

Erschütterungseinwirkungen auf hochsensible Institutsneubauten

Dr.-Ing. Silke Appel

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

1 Einleitung

Im Zuge der Planung von Instituten der Forschung und Wissenschaft werden immer höhere Anforderungen an die Umgebungsbedingungen für Labor- und Messräume gestellt. Für die Einrichtung von Laserlaboren, die Aufstellung von Elektronenmikroskopen (TEM, SEM, REM) oder Messeinrichtungen der Nanotechnologie werden Schwingungskriterien genannt, die um mehrere Größenordnungen unterhalb der Fühlbarkeitsschwelle des Menschen liegen. Diese zulässigen Einwirkungen aus Erschütterungen liegen mitunter auf einem Niveau, welches durch übliche, den statischen Erfordernissen entsprechenden Tragwerkskonstruktionen nicht erreicht werden kann. Maßgebliche und oft nur mit erheblichem, konstruktivem Aufwand zu reduzierende Schwingungsanregungen resultieren oft aus dem Straßenverkehr der unmittelbaren Umgebung. Auch beeinflussen der Betrieb von Aggregaten und Maschinen der Haustechnik oder dem Institut angeschlossener Werkstätten das Schwingungsniveau innerhalb des Neubaus. Anhand aktueller Projektbeispiele werden folgend die Kriterien für verschiedene Laboreinrichtungen, die Vorgehensweise zur Erschütterungsprognose unter Betrachtung des Baugrundeinflusses und verschiedener Gründungsvarianten sowie die Auslegung möglicher Minderungsmaßnahmen aufgezeigt und diskutiert.

2 Beurteilungskriterien

Für besonders empfindliche Labore und Messeinrichtungen werden i.d.R. vom Hersteller Grenzwerte für zulässige Schwingungseinwirkungen genannt. Generische Richtwerte für Amplituden mechanischer Schwingungen finden sich darüber hinaus in der VDI-Richtlinie VDI 2038-2, die auf [Gordon, 1991] beruhen. Die darin aufgeführten „Vibration Criteria“ (VC-Linien) werden international häufig für die Beurteilung von Standorten für schwingungsempfindliche Anlagen eingesetzt. Für höhere Anforderungen wurden die VC-Linien um die sogenannten „Nano-Linien“ [Heiland et. al., 2005] erweitert. Während für einen Großteil der Elektronenmikroskope (TEM, REM oder SEM) die Linie VC-D, z.T: auch VC-E, maßgeblich ist, wurde beispielsweise für das neugebaute Präzisionslabor der Max-Planck-

Gesellschaft in Stuttgart-Büsnau [Gömmel et. al., 2015] das Schwingungskriterium VC-M vorgegebenen, welches für Frequenzen größer 8 Hz um den Faktor 2^9 unter VC-D und somit um den Faktor 2^{13} unterhalb der menschlichen Fühlbarkeitsschwelle liegt.

Als Kriterium wird dabei der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit im Terzfrequenzbereich angegeben. Über die Mittelungszeit zur Berechnung des Effektivwertes gibt es hierfür keine klare Vorschrift. Diese ist in Abhängigkeit der Signalcharakteristik festzulegen [Amick et. al., 2005]. Für harmonische, monofrequente Schwingungen ergibt sich für den Peakwert mit dem Faktor $\sqrt{2}$ in Bezug zum Effektivwert der sogenannte „crest factor“ [Amick, 1997]. Für transiente und vor allem Impulsanregung ist der „crest faktor“ größer. Hier muss ein kürzeres Mittelungsintervall zur Bestimmung der RMS-Werte berücksichtigt werden. Für stochastische bzw. transiente Anregungen haben sich Mittelungszeiten zwischen 1 s und 4 s bewährt. Diese Kurzzeitwerte können dann statistisch aufbereitet und zu Langzeiteffektivwerten oder im Rahmen des Peak-Hold-Verfahrens zu maximalen RMS-Werten zusammengefasst werden.

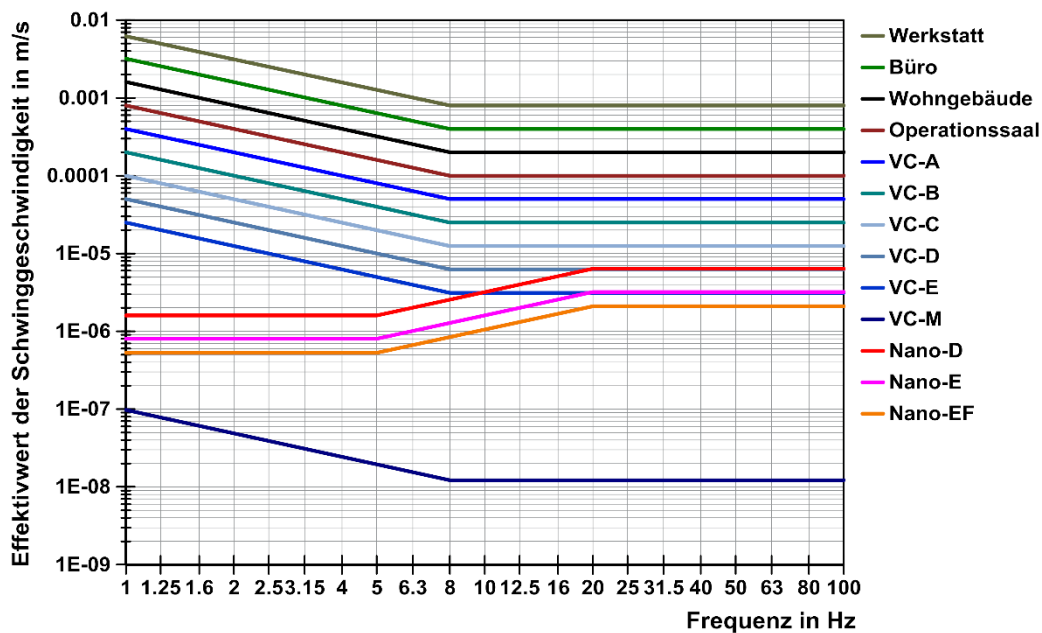


Bild 1: Darstellung der VC-Kriterien

3 Dynamische Belastungen

Die Schwingungsbelastung für Institute und Labore mit empfindlichen Gerätschaften ergeben sich, insbesondere innerstädtisch, hauptsächlich aus dem Straßen- und u.U. Schienenverkehr in der näheren Umgebung des Baugrundstückes. Die dynamischen Anregungen aus dem Straßenverkehr zeichnen sich durch tieffrequente Anteile zwischen 8 Hz und 16 Hz aus. Die sogenannte mikroseismische Belastung sollte im Zuge von Langzeitmessungen im Baugrund, möglichst auf Höhe der geplanten Gründung,

erfasst werden. Über Modellrechnungen kann anhand der im Baugrund erfassten Schwingungen eine Prognose der resultierenden Bauwerksschwingungen erfolgen.

Darüber hinaus spielen bzgl. der Schwingungsbelastung der Einrichtungen folgende Faktoren eine wichtige Rolle:

- personeninduzierte Schwingungen (Gehen in Räumen und Fluren),
- Zulieferverkehr,
- Aggregate (Lüfter, Kältemaschinen, Pumpen, etc.) der Haustechnik,
- Geräte und Maschinen in Werkstätten, auch Krananlagen,
- Aufzüge.

4 Schwingungsprognose

4.1 Aktuelle Projekte

4.1.1 DESY Deutsches Elektronensynchrotron in Hamburg

Auf dem Gelände des DESY in Hamburg wurden in den letzten Jahren eine Reihe neuer Institute mit hohen Anforderungen bzgl. zulässiger Schwingungsimmissionen geplant und gebaut. GuD begleitet die Planung der Experimentierhalle PETRA III sowie der Institute FLASH und SDMA. Für das Institut CFEL wurden im Rahmen einer Standortbestimmung messtechnische Untersuchungen an verschiedenen Orten auf dem Gelände durchgeführt.

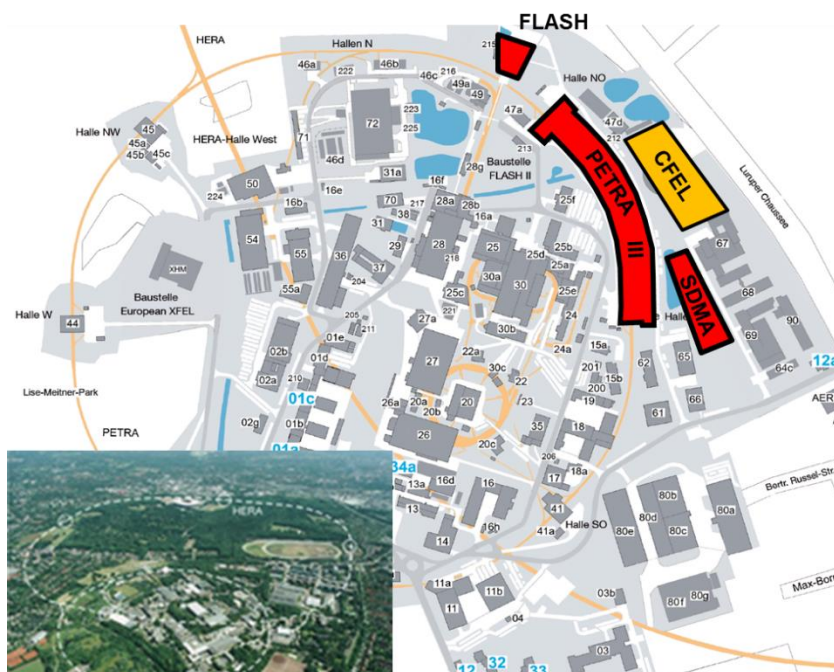


Bild 2: Gelände des DESY in Hamburg

In einem derzeit in der Planungsphase befindlichen Neubau sollen u.a. schwingungsempfindliche Experimentier- und Laboreinrichtungen im 2. Obergeschoss sowie Lasermesslabore auf der Bodenplatte im Untergeschoss bzw. im Erdgeschoss eingerichtet werden. Für Labore auf Deckenfeldern, für die keine besonderen Anforderungen durch spezifische Gerätschaften gestellt werden, wird als maßgebendes Schwingungskriterium oft VC-B genannt, um eine möglichst hohe Flexibilität in der zukünftigen Nutzung zu gewährleisten. In Abstimmung mit den projektbeteiligten Planern und den späteren Nutzern der Labore wurden zusammenfassend folgende Kriterien bzgl. zulässiger Schwingungseinwirkungen vereinbart:

- Laserlabore im Erdgeschoss und Untergeschoss: VC-D
- für alle weiteren Laboreinrichtungen: VC-B

4.1.2 Berlin-Adlershof

In Berlin-Adlershof wird im Rahmen die Erweiterung eines bestehenden Forschungsbaus geplant. Für den in die Bestandsbebauung zu integrierenden Neubau ist ein nicht überbautes Tiefgeschoss vorgesehen, in dem besonders erschütterungsempfindliche Elektronenmikroskope und wissenschaftliche Geräte aufgestellt werden sollen. Weitere empfindliche Geräte sollen im nicht unterkellerten Teil des Erdgeschoss installiert werden. Laborbereiche befinden sich darüber hinaus auf Deckenebenen des Erdgeschosses und des 1. Obergeschosses.

Im Abstand von ca. 30 m befindet sich eine stark befahrene Straße, die eine wichtige Verbindung mit Bus- und auch LKW-Verkehr zwischen den Berliner Stadtteilen Adlershof und Schöneweide darstellt. Im Zuge schwingungstechnischer Untersuchungen wurde der Frage nachgegangen, ob die geplante, über die statischen Erfordernisse hinausgehende Dicke der Bodenplatte als schwingungsmindernde Maßnahme ausreichend ist, um einen uneingeschränkten Betrieb der schwingungsempfindlichen Geräte an den dafür vorgesehenen Orten zu gewährleisten. Den zur Verfügung gestellten Unterlagen war zu entnehmen, dass die vorgesehenen TEM (Transmissions-Elektronenmikroskope) die höchsten Anforderungen an die Erschütterungsruhe stellen.

Von FEI Company und JEOL GmbH, einem der beiden z. Z. in Frage kommenden TEM-Hersteller, liegen präzisierte, von den VC-Linien abweichende Anforderungen an den Aufstellungsort von TEM in Form von Terzspektren mit Angaben zulässiger Schwingungseinwirkungen vor. Dort heißt es u.a.:

- *If all data points are in Region I, floor vibration and acoustics are suitable and the site passes.*
- *If any data points are in Region II or III, SE Tool analysis is required to determine both pass/fail and to generate the final report.*

Es wird unmittelbar deutlich, dass eine Überschreitung der Anforderungen nach „Region II or III“ am geplanten Standort eines solchen Gerätes nicht zwangsläufig dazu führt, dass ein ungestörter Betrieb

nicht möglich ist. Vielmehr ist für die Aufstellung eine Konsultation mit dem Hersteller erforderlich, und ggf. muss das Gerät konstruktiv an den geplanten Standort angepasst werden.

Neben den aktuellen Anforderungen liegen auch diejenigen Anforderungen vor, die seinerzeit bei der Planung des benachbarten Physikgebäudes gestellt wurden. Die vorgenannten Kriterien sind in Bild 3 grafisch zusammengestellt.

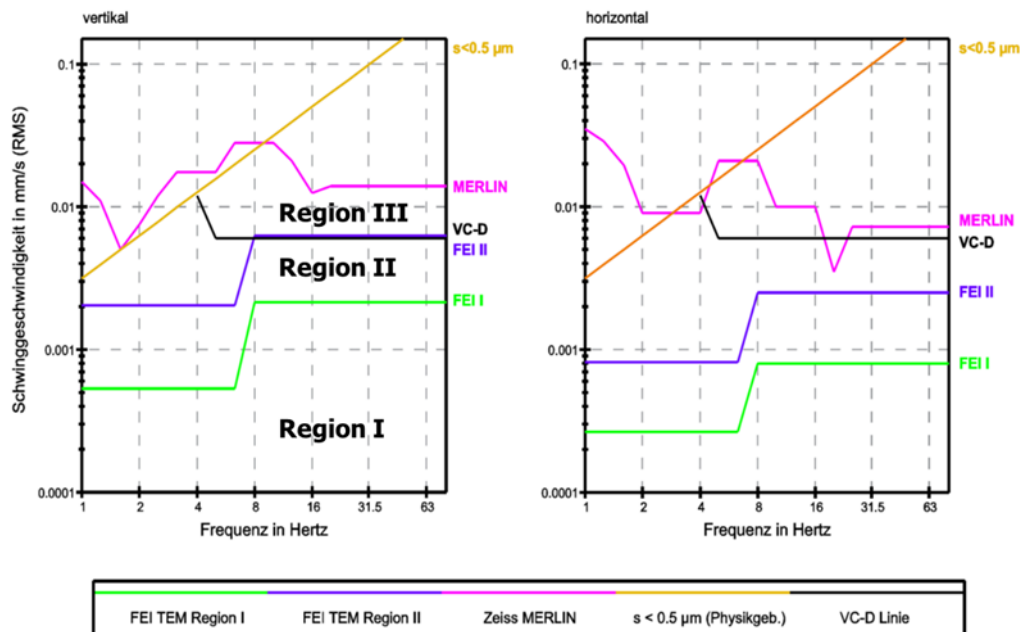


Bild 3: Grafische Darstellung der zulässigen Amplituden der mechanischen Schwingungen am Aufstellort erschütterungsempfindlicher Geräte

4.2 Erfassung der mikroseismischen Schwingungsanregung (Straßenverkehr)

Beide Baugrundstücke werden maßgeblich durch den hochfrequentierten Straßenverkehr auf nahegelegenen Hauptverkehrsadern von Hamburg bzw. Berlin beeinflusst. Auf Basis von Messungen sollte diese Anregung erfasst und folgend eine Dimensionierung der Gründungsstruktur mit dem Ziel der Einhaltung der vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Schwingungseinträge vorgenommen werden. Hierzu wurden zunächst vertikale und horizontale Baugrundschwingungen über einen Zeitraum von 12-24 h aufgezeichnet. Die Schwinggeschwindigkeitssensoren (Geophone), verteilt über die jeweilige Fläche des Grundrisses, wurden in kleinen Schürfgruben über Metallspieße, siehe Bild 4, im gewachsenen Untergrund installiert.

Die Aufbereitung der Messsignale erfolgte hauptsächlich Frequenzbereich. So wurden für die Bestimmung des Frequenzinhaltes der Messwertregistrierungen aus allen Zeitsignalen die Terzspektren berechnet. Hierzu wurden die erfassten Messsignale im Zuge einer Terz-Analyse sowohl nach dem Peak-Hold-Verfahren als auch in Form energetischer Mittelwerte über festgelegte Zeitintervalle verrechnet. Die Einzelspektren wurden frequenzabhängig einer statistischen Auswertung unterzogen.



Bild 4: Beispielhafte Darstellung der 3-D Messpunkte
(links: Seismometer, rechts: Schwinggeschwindigkeitssensor)

Das Bild 5, für die Messungen auf dem DESY-Gelände, zeigt beispielhaft die aus jeweils 4s berechneten frequenzabhängigen RMS-Werte, die mittels des Peak-Hold-Verfahrens (Diagramm links) und über energetische Mittelung (Diagramm rechts) über ein Zeitintervall von 3 min zu Schwingschnellespektren zusammengefasst wurden (graue Linien). Wie die Darstellung zeigt, liegt die maßgebliche Anregung im Frequenzbereich zwischen 8 Hz und 16 Hz. Diese tieffrequenten Anteile resultieren aus der Anregung durch den Straßenverkehr entlang der Luruper Chaussee. Es wird deutlich, dass die Langzeiteffektivwerte (Diagramm rechts) das Schwingungskriterien VC-D zwar sicher unterschreiten, die Peak-Hold-Spektren (Diagramm links) im Frequenzbereich um 10 Hz jedoch oberhalb von VC-D liegen.

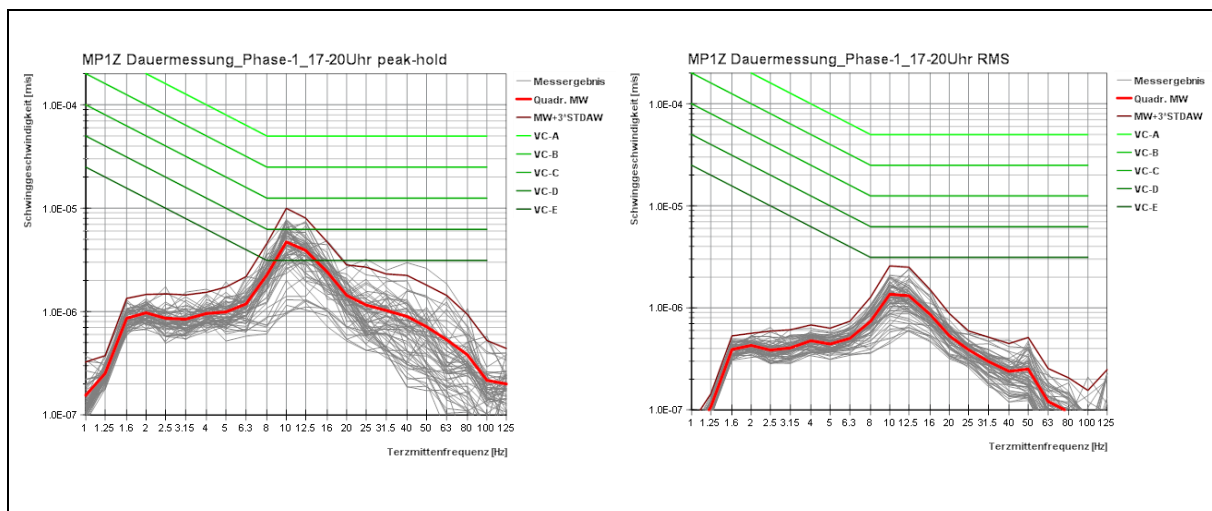


Bild 5: exemplarische Messergebnisse, Aufbereitung der Peak-Hold-Spektren (Diagramm links) und der Langzeiteffektivwerte (Diagramm rechts)

Die nachfolgende Abbildung beinhaltet für die in Berlin-Adlershof aufgezeichneten Einzelereignisse bei LKW- bzw. Busüberfahrten die berechneten Terzspektren der Schwingschnelle (Peak-Hold).

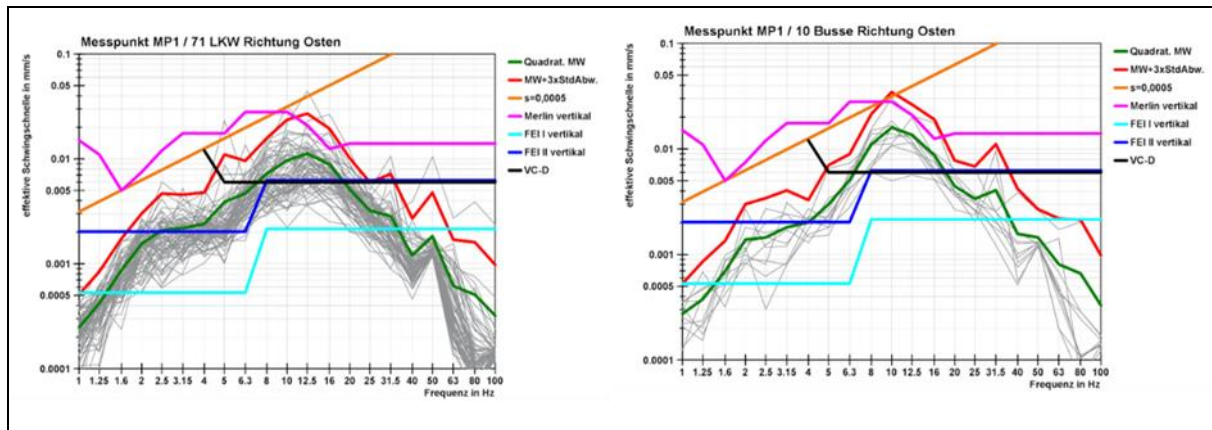


Bild 6: exemplarische Messergebnisse, Terzspektren der Schwingschnelle unter Anregung durch LKW-Fahrten (Diagramm links) sowie Busse (Diagramm rechts)

Neben den Ergebnissen der Einzelmessungen wurden die aus allen Registrierungen energetisch gemittelten Terzspektren (grüne Kurven) sowie die terzweisen Maximalwerte (rote Kurven) eingetragen. Die Maximalwerte verdeutlichen die mögliche Größe der Überschreitung in den einzelnen Terzmittenfrequenzen. Den Diagrammen kann entnommen werden, dass im Baugrund, im Bereich der geplanten Aufstellung des TEM, Schwingungsanregungen vorhanden sind, die oberhalb der Grenzwerte (FEI Region I und FEI Region II) liegen. Auch das Schwingungskriterium VC-D wird im Frequenzbereich zwischen 6 Hz und 16 Hz überschritten.

Für beide Projekte zeigte sich somit die gleiche Problematik. Infolge der Anregung aus Straßenverkehr werden zumindest im Baugrund die Anforderungen im Frequenzbereich um 10 Hz nicht eingehalten.

4.3 Modellrechnungen

4.3.1 Vorgehensweise

Für die Prognoseberechnungen von Gebäudeschwingungen ist es in der Regel erforderlich, dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle zumindest von Teilen des Bauwerks oder des Gesamtbauwerks zu erstellen. Für eine Betrachtung der Schwingungseinwirkungen auf Gründungselemente, z.B. auf eine Bodenplatte, sollten darüber hinaus Halbraummodelle verwendet werden. Diese haben den Vorteil, dass die Wellenausbreitung im geschichteten Untergrund innerhalb der Modellrechnungen berücksichtigt werden kann.

Für die hier vorgestellten Projekte wurde jeweils ein solches Halbraummodell erstellt. Die Berechnungen zur Übertragung der gemessenen Baugrundschrwingungen auf eine Bodenplatte erfolgten mit dem Programm SASSI2000.

Die dreidimensionalen Modelle beinhalten die Abbildung der Bodenplatte in ihren Abmessungen und den mittleren statischen Gebäudelasten sowie den umgebenden Baugrund. Die dynamische Anregung

wurde punktuell in einer Entfernung von 100 m bzw. 40 m zur Bodenplatte in Form einer Einheitsanregung eingeprägt.

Für die Berechnung des Eigenschwing- bzw. Resonanzverhaltens von Geschossdecken wurde für das Institut auf dem DESY-Gelände ein diskretes Finite-Elemente-Modell des Gesamtgebäudes erstellt. Das Modell wurde einer Eigenform- und Steifigkeitsanalyse unterzogen sowie mit Anregungsfunktionen infolge gehender Personen im Gebäude beaufschlagt. Für alle Laborbereiche konnten so gezielt die Schwingungseinwirkungen prognostiziert werden. Die Berücksichtigung des anstehenden Baugrundes erfolgt in diesem Modell über diskrete Feder-Dämpfer-Elemente.

Für beide Institute wurde aufgrund der gemessenen Anregung durch den Straßenverkehr empfohlen, das Gebäude steif auszubilden und Deckeneigenfrequenzen in den Laborbereichen unter 16 Hz zu vermeiden.

4.3.2 Bestimmung der dynamischen Bodenparameter

Eine wesentliche Einflußgröße zur Bestimmung der Schwingungsübertragung vom Baugrund auf das Gebäude bzw. die Gebäudegründung stellt die Abbildung der dynamischen Bodenparameter dar. Grundsätzlich sollten im Zuge von Prognoseuntersuchungen die tiefenabhängigen Steifigkeitswerte in situ bestimmt werden. Im Zuge der Planung der PETRA III-Experimentierhalle in Hamburg (2005) wurden Downhole-Messungen sowie eine Oberflächenseismik vorgenommen.

Für den direkt benachbarten, geplanten Neubau konnten, unter Berücksichtigung der für das Objekt durchgeführten bodenmechanischen Untersuchungen, die erkundeten Scher- und Kompressionswellengeschwindigkeiten (c_s und c_p) übernommen bzw. übertragen werden. Anhand dieser Werte ist eine Berechnung des dynamischen Schub- bzw. Elastizitätsmoduls (G_d und E_d) der anstehenden Bodenschichten möglich:

$$G_d = c_s^2 \cdot \rho \quad (1)$$

$$E_d = c_p^2 \cdot \rho \quad (2)$$

Das Bild 7 zeigt für eine Bohrung den Verlauf der zugehörigen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten für Scher- und Kompressionswelle.

Im Bereich Hamburg-Bahrenfeld ist der Baugrund vorwiegend durch oberflächennahe Sande und Kiese charakterisiert. Unterlagert werden diese durch bindige Böden in Form von Geschiebeböden bzw. Beckenton. Der maximale freie Grundwasserspiegel liegt bei ca. +18 mNN und somit etwa 16 m bis 18 m unter dem derzeitigen Geländeniveau. In der vorgenannten Gründungsebene lagern Geschiebelehme mit stark schwankenden Festigkeiten sowie locker bis mitteldicht gelagerte Sande.

Unter dynamischen Gesichtspunkten kann der Untergrund als relativ steif bezeichnet werden. Die Scherwellengeschwindigkeiten liegen durchgehend oberhalb von 250 m/s, der dynamische Schubmodul somit oberhalb von 115 MN/m².

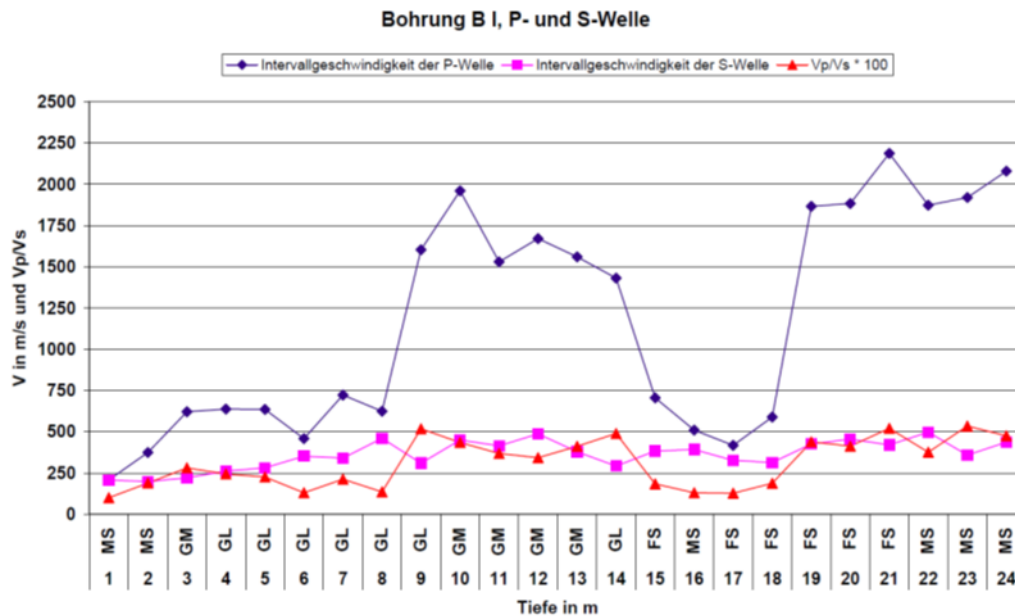


Bild 7: tiefenabhängiger Verlauf der Scherwellen- und Kompressionswellengeschwindigkeit für das BV PETRA III-Experimentierhalle

Alternativ können die bodendynamischen Parameter aus Angaben des Baugrundgutachtens zumindest abgeschätzt werden. Für das Bauvorhaben in Berlin-Adlershof aus dem geotechnischen Bericht hervor, dass am Standort des geplanten Gebäudes unterhalb einer ca. 1 m mächtigen Auffüllung enggestufte Fein- und Mittelsande mit hauptsächlich lockerer bis teilweise dichter Lagerung anstehen. Aus der geplanten Dicke der Bodenplatte von 1 m ergibt sich unter Vernachlässigung des Eigengewichtes der Außenwände und von Ausbaulasten eine mittlere Sohlpressung von

$$\sigma_0 = 1,4 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 35 \text{ kN/m}^2$$

Unter Ansatz einer aus bodenmechanischen Versuchen gewonnenen Porenzahl von

$$e = 0,74$$

ergibt sich nach [Vrettos, 2012] ein dynamischer Schubmodul von

$$G_d = 625 \cdot \frac{1}{0,3+0,7e^2} \sqrt{\frac{2\sigma'_z}{3p_0}} \cdot p_0 = 41 \text{ MN/m}^2 \quad (3)$$

Da der Boden einen mit der Tiefe zunehmenden Schubmodul besitzt, der Boden unmittelbar unterhalb der Sohle aber mit einer in die Tiefe abnehmenden Zusatzspannung belastet ist, wurde hier näherungsweise ein homogener Halbraum mit den rechnerischen Eigenschaften in der Sohlfluge angenommen.

Grundsätzlich weist der Untergrund in Berlin-Adlershof eine deutlich geringere dynamische Steifigkeit im Vergleich zum Hamburger Projektbeispiel auf.

In der Regel ist eine solche Einschätzung im Zusammenhang der hier erforderlichen Prognosesicherheit zu grob. Das Ziel sollte, daher immer sein, die tiefenabhängige, dynamische Steifigkeit in situ anhand von seismischen Messung zu bestimmen.

4.3.3 Schwingungsverhalten des Bauwerkes

Für eine erste Einschätzung der Schwingungsempfindlichkeit eines Bauwerkes bzw. von Bauwerksteilen sowie für eine Plausibilitätsbetrachtung hinsichtlich der Modellerstellung und der prognostizierten Ergebnisse bietet es sich an

1. die ersten Eigenfrequenzen und Eigenformen sowie
2. die statische Steifigkeit der Aufstellorte der schwingungsempfindlichen Einrichtungen

zu ermitteln. Beides kann anhand eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells erfolgen.

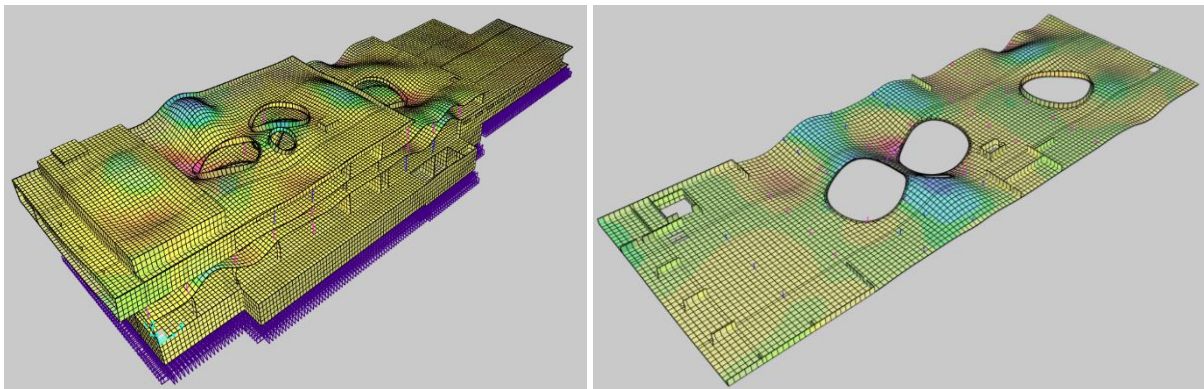


Bild 8: Eigenformanalyse des Gesamtgebäudes (DESY) Bild 9: Eigenformanalyse der Decke über dem 1.OG (DESY)

Die ersten Deckeneigenfrequenzen im Projekt DESY, siehe Bild 8 und Bild 9 liegen unterhalb von 10 Hz. Im Bereich der Labore im 2.OG zeigen sich Eigenformen bei Frequenzen 13 Hz. Hierbei wurden bereits eine hohe Deckenstärke und die Ausbildung einer Hohlkörperdecke berücksichtigt. Hohlkörperdecken weisen nahezu die gleiche Steifigkeit wie „normale“ Stahlbetondecken, doch demgegenüber eine um ca. 30% verminderte Masse auf. Weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Anregungen mussten zeigen, inwieweit die Einhaltung des Kriteriums VC-B trotz der niedrigen Eigenfrequenzen möglich ist.

Als ein Kriterium hinsichtlich der Einhaltung einer solchen Anforderung kann nach VDI 2038 die statische Steifigkeit bzw. Impedanz am Aufstellort der Geräte herangezogen werden. Die späteren Deckenschwingungen werden naturgemäß nicht nur von der Ausbildung der Tragwerkskonstruktion

sondern vor allem von der Charakteristik, dem Frequenzinhalt und der Intensität der dynamischen Anregung bestimmt. Die statische Steifigkeit am Aufstellort kann daher lediglich ein sehr grobes Maß zur Einschätzung der Schwingungsempfindlichkeit darstellen.

Für das geplante Institut auf dem DESY-Gelände in Hamburg wurden für insgesamt 10 Punkte auf dem Laborfußboden im 2.OG die Steifigkeitswerte überprüft. Die Punkte wurden auf Basis der Eigenformanalyse ausgewählt. Das Bild 10 beinhaltet die Lage der mit einer Einheitslast beaufschlagten Knotenpunkte sowie exemplarisch ein zugehöriges Verformungsbild. Aus der Inversion der Verformung des belasteten Modellknotens erhält man die Steifigkeit. Bild 11 zeigt für die 10 Knotenpunkte die berechneten Werte in der Gegenüberstellung zu den Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung von VC-A und VC-B aus der VDI 2038.

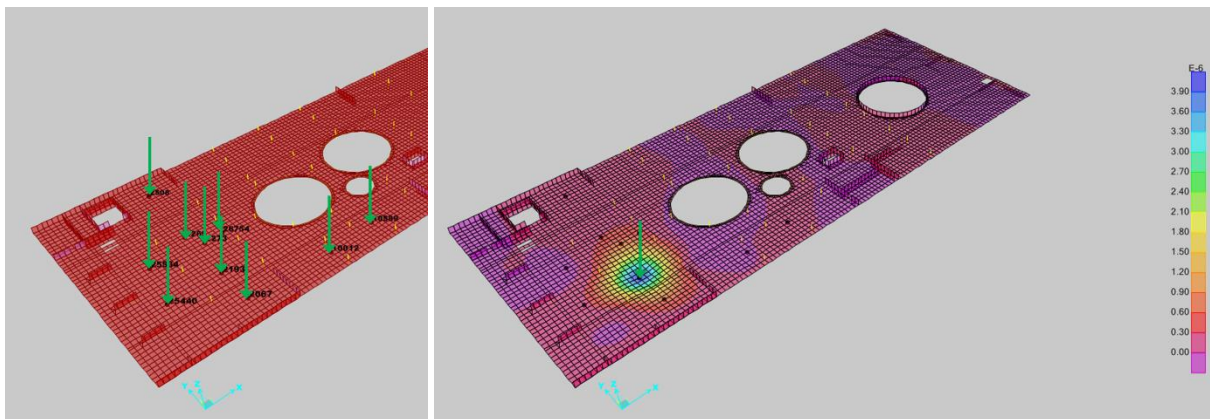


Bild 10: DESY: Berechnung der statischen Steifigkeit von Geschossdecken, links: Belastungsknoten, rechts: Verformungsbild

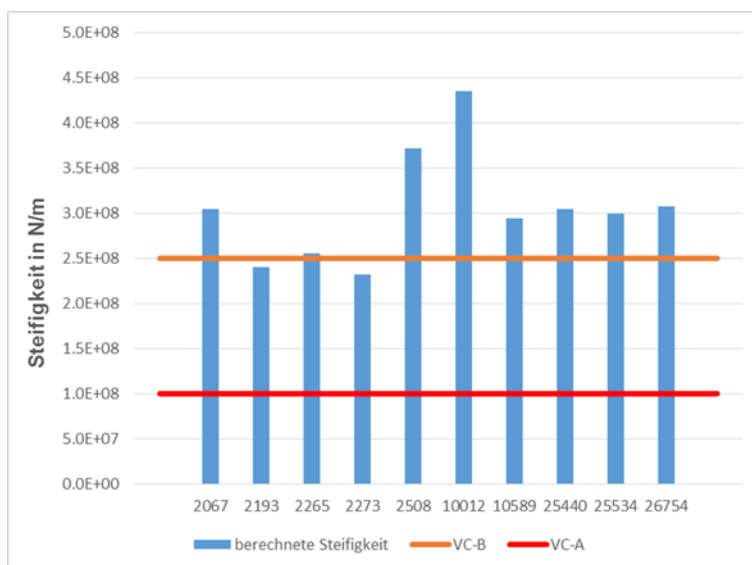


Bild 11: DESY: berechnete statische Steifigkeit

Die erforderliche Steifigkeit von $2,5E+08$ N/m wird für die untersuchten Knotenpunkte nahezu überall erreicht. Somit war eine gewisse Voraussetzung dahingehend gegeben, dass das Schwingungskriterium VC-B, zumindest jedoch VC-A, eingehalten werden kann.

4.3.4 Mikroseismische Anregung / Übertragung auf Bodenplatten

Die Prognoseberechnungen zur Bestimmung der Schwingungspegel auf der Bodenplatte erfolgten anhand der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Halbraummodelle. Aus dem Verhältnis der Schwingungsantworten der Modelle mit Bodenplatte (unterschiedlicher Dicke) zum Modell der freien Oberfläche wurden frequenzabhängige Übertragungsfaktoren berechnet. Für die beiden BV ergeben sich die in Bild 12 ermittelten Zusammenhänge. Es zeigt sich, dass die horizontalen Schwingungsamplituden im maßgebenden Frequenzbereich unabhängig von der Stärke der Bodenplatte gleich groß ausfallen. Bezüglich der vertikalen Schwingungsübertragung ergeben sich frequenzabhängige Unterschiede. Tieffrequent liegen die Kurven für unterschiedliche Bodenplattenstärken nahezu übereinander. Ab einer Frequenz um ca. 5 Hz weisen die Modelle mit steiferer Bodenplatte geringere Übertragungsfaktoren auf. Die Reduktion der Schwingungsübertragung ist hierbei abhängig von:

- Geometrie der Fundamentplatte,
- Steifigkeit der Fundamentplatte,
- Steifigkeit und Schichtung des Untergrundes.

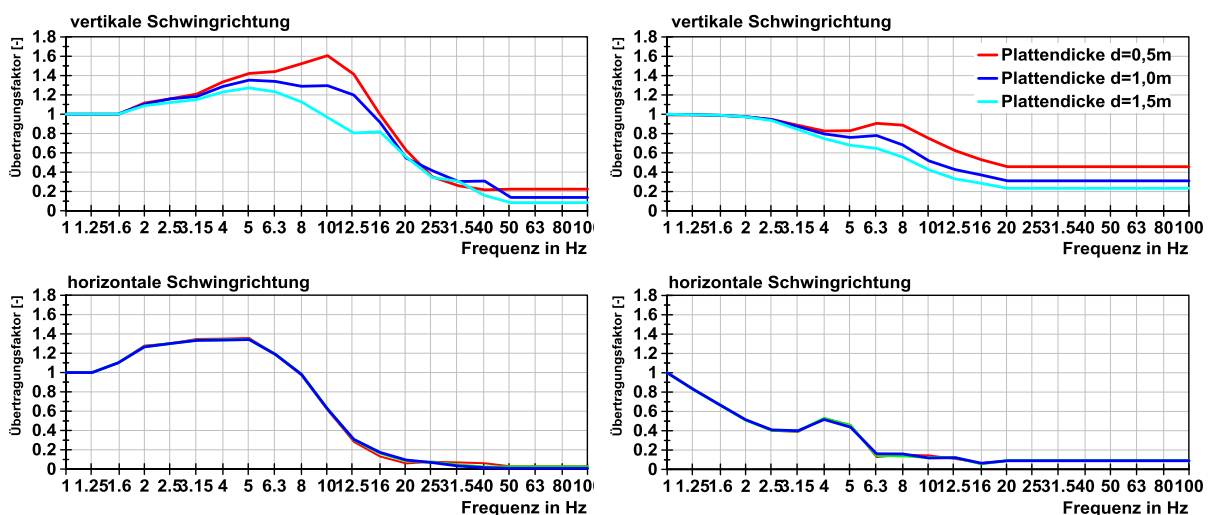


Bild 12: Übertragungsfunktionen Freifeld auf Bodenplatte unter Variation der Bodenplattenstärke, links: DESY (geschichteter Untergrund), rechts: Berlin-Adlershof (homogener Untergrund)

Durch Multiplikation der Übertragungsfunktionen mit den gemessenen Baugrundsicherungen erhält man die zu erwartenden Fundamentschwingungen. Bild 13 und Bild 14 enthalten eine Gegenüberstellung der Plattenschwingungen für die drei Modelle unterschiedlicher Plattenstärke.

Für das Institutsgebäude in Hamburg ergeben sich Schwingungspegel auf einer Bodenplatte mit mindestens 1 m Stärke, die den Anforderungen an die zulässige Schwingungseinwirkung entsprechen.

Für das BV in Berlin-Adlershof zeigen sich hinsichtlich einer geplanten Aufstellung der TEM im Frequenzbereich zwischen 1,5 Hz und 16 Hz Überschreitungen des Kriteriums FEI-Stufe/Region 1. Im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 12,5 Hz wird auch das Kriterium der Stufe/Region 2 nicht eingehalten. Durch eine zusätzliche Erhöhung der Bodenplattenstärke auf $d \gg 1,5$ m ist ebenfalls nicht von einer Einhaltung aller Anforderungen auszugehen. Für die Aufstellung der TEM müssen daher Sondermaßnahmen getroffen werden. Für alle weiteren schwingungsempfindlichen Geräte mit der Anforderung VC-D kann die Installation auf einer Bodenplatte der Stärke von 1 m erfolgen.

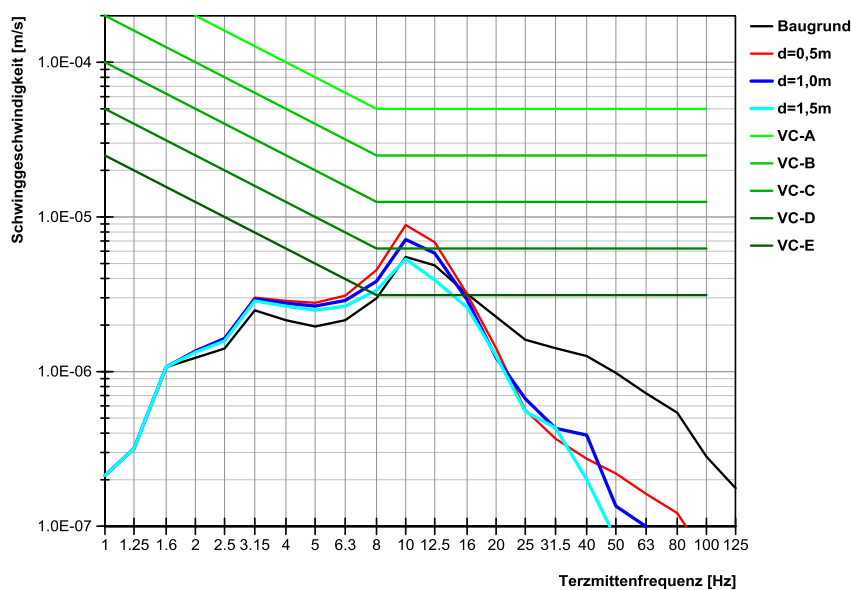


Bild 13: DESY: Berechnungsergebnisse der effektiven Schwingungsamplituden auf der Bodenplatte

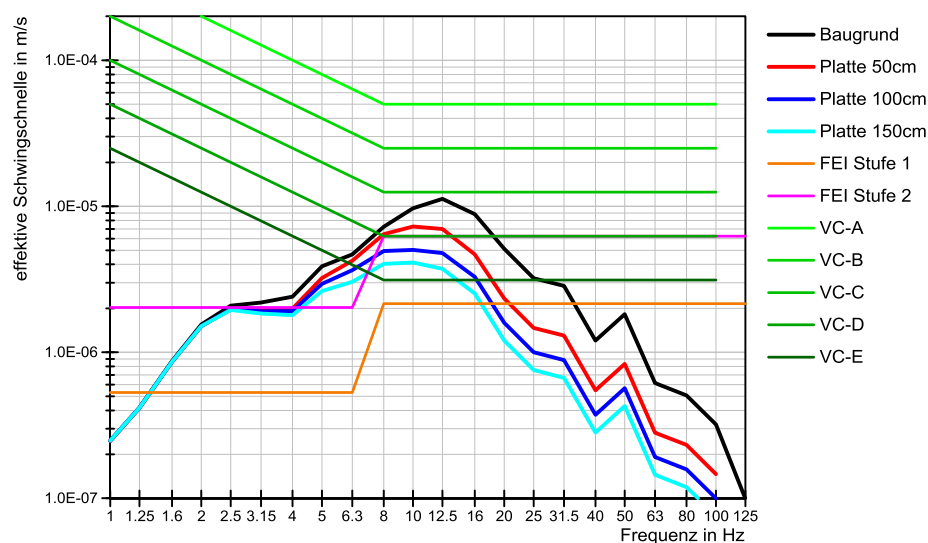


Bild 14: Berlin-Adlershof: Berechnungsergebnisse der effektiven Schwingungsamplituden auf der Bodenplatte

Um die Schwingungsantworten auf den geschossdecken abschätzen zu können, wurden die Halbraummodelle folgend auf dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle der Gesamtbauwerke erweitert. Hier wurden die den Baugrund abbildenden diskreten Feder-Dämpfer-Elemente mit den gemessenen Freifeldanregungen beaufschlagt. In der Berechnung ist zwingend zu berücksichtigen, dass die Freifeldanregung nicht phasen- und amplitudengleich über die gesamte Fläche der Bodenplatte wirkt. Es ergeben sich Phasenunterschiede entsprechend der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten im Boden. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass das Kriterium VC-B in den Laborbereichen der Obergeschosse gerade eingehalten wird. Einzelne, kurzzeitige Überschreitungen infolge der Anregung aus dem Straßenverkehr können jedoch auftreten.

4.3.5 Personeninduzierte Schwingungsanregung

Neben den von außen auf das Gebäude einwirkenden dynamischen Belastungen sind auch die Anregungen im Gebäude selbst zu beachten. Mittels der Berechnungen am FE-Modell können z.B. Schwingungsantworten unter Anregung durch gehende Personen abgeschätzt werden. Die untersuchten Lastfälle stellen jeweils nur eine mögliche Auswahl der Belastung durch Personen dar. Zu berücksichtigen sind:

- die Anzahl der gehenden Personen,
- der Ort bzw. die Pfade der Personen,
- die Schrittfrequenz.

Für die hier beschriebenen Projekte wurden mehrere Lastfälle untersucht:

- eine gehende Person im Labor unter Variation der Schrittfrequenz zwischen 1,7 Hz und 2,3 Hz,
- bis zu 10 gehende Personen, verteilt an unterschiedlichen Orten im Bereich der Labore, mit abweichender Schrittfrequenz und unter Annahme eines zufälligen Zeitversatzes (Phasenversatz der Anregung).

Im Ergebnis wurden Schwingungspegel auf der Geschossdecke ermittelt, die in beiden Instituten generell unterhalb von VC-B lagen.

4.3.6 Haustechnische Aggregate

Haustechnische Aggregate sollten innerhalb der Institute mit schwingungsempfindlichen Geräten grundsätzlich schwingungs isoliert aufgestellt werden. In Abhängigkeit der Betriebsdrehzahlen sind hierfür Elastomerlager mit Abstimmfrequenzen zwischen 8 Hz und 20 Hz (z.B. für Pumpen, Kältemaschinen, Generatoren) oder Stahlfedern mit Resonanzfrequenzen zwischen 2 Hz und 6 Hz (z.B. für große Lüfter) zu verwenden. Für eine wirksame schwingungs isolierte Lagerung spielt die Impedanz der Aufstellfläche eine große Rolle. Für die Lagerung auf Elastomeren und beabsichtigter Aufstellung

der Geräte auf Deckenfeldern bzw. auf dem Dach eines Gebäudes sollten zuvor die Steifigkeit, z.B. über eine Eigenfrequenzanalyse, überprüft werden. Je nachgiebiger die Aufstellfläche ist, desto geringer fällt die Minderungswirkung durch die elastische Lagerung aus. Die Angaben der Materialhersteller beziehen sich hinsichtlich des sogenannten Isolationsgrades immer auf einen ideal steifen Untergrund.

5 Minderungsmaßnahmen

Reichen konstruktive Maßnahmen, wie die Verstärkung der Bodenplatte, nicht aus, um die hohen Anforderungen an die zulässigen Immissionen zu erfüllen, müssen Sonderkonstruktionen entwickelt werden. Als Beispiel hierfür wurden im Labor für Festkörperphysik der MPG in Stuttgart-Büsnau 11 Experimentierplätze auf Sonderfundamenten eingerichtet, siehe [Gömmel et. al., 2015]. Die Sonderfundamente weisen Massen zwischen 100 t und 190 t auf und wurden jeweils auf Luftfederelementen gelagert. Ziel war es, das Schwingungskriterium VC-M einzuhalten. Das Institut in Stuttgart mit seinen Experimentierboxen ist einer der „ruhigsten“ Standorte der Welt und somit sehr begehrt unter Wissenschaftlern für Untersuchungen im Bereich der Nanotechnologie.

Für die Aufstellung der TEM in Berlin-Adlershof sind die erforderlichen Umgebungsbedingungen nur durch die Installation einer massiven Bodenplatte nicht gewährleistet. Daher sollte für die beiden Mikroskope eine ähnliche Aufstellung auf luftgefederten Sonderfundamenten erfolgen. Die Einzel-fundamente weisen, auch aufgrund der geringeren Anforderungen, lediglich eine Masse von etwa 50 t. Die Resonanzfrequenz der vertikalen Starrkörpereigenform liegt bei ca. 1 Hz. Um die Schwingungen in der Resonanzfrequenz zu begrenzen, wurde, ausgehend von rechnerischen Untersuchungen, empfohlen, eine Dämpfung von 5 -10 % vorzusehen. Einkammer-Luftfedern weisen jedoch nur eine geringe Dämpfung um ca. 2% auf. Durch den Einsatz von Zweikammer-Luftfedern kann die Dämpfung zwar auf etwa 4 % erhöht werden. Die Federn zeichnen sich jedoch durch einen nichtlinearen Steifigkeitsverlauf aus. Das bedeutet, dass mit zunehmender Frequenz ein Anstieg der Steifigkeit und somit eine Minderung der Isolationswirkung erfolgt.

Da Zusatzdämpfer, wie z.B. Viskodämpfer, im Bereich der sehr kleinen Verformungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch zu einer zusätzlichen Versteifung des Gesamtsystems führen, wurde vorgeschlagen, ein aktives Regelungssystem zu installieren, welches im Frequenzbereich unter ca. 15 Hz zu einer Begrenzung der Fundamentalschwingungen führt. Unter Ansatz der beschriebenen Parameter konnte die Schwingungseinwirkung auf den Aufstellort der TEM auf ein verträgliches Maß reduziert werden, siehe Bild 15.

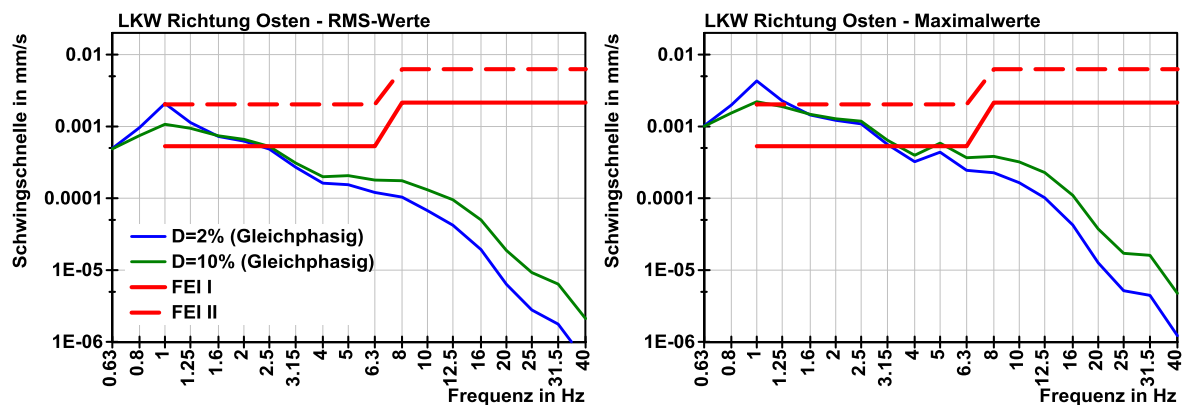


Bild 15: Prognostizierte Schwingungspegel auf Sonderfundament

Literatur

- VDI 2038-2:2013-01 „Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen, Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Schwingungen und Erschütterungen - Prognose– Messung, Beurteilung und Minderung
- Gordon, Colin G. [1991]: „Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment“, Vol. 1619
- Amick, H., Gendreau, M., Busch, T., Gordon, C. [2005]: „Evolving Criteria of research facilities: I - Vibration“, SPIE Conference 5933
- Amick, H. [1997]: „On Generic Vibration Criteria for Advanced Technology Facilities“, Journal of the Institutes of Environmental Sciences
- Heiland, D.; Beyer, K. [2005]: „Schwingungsanforderungen in der Nanotechnik“, DACH Tagung
- Gömmel, A., Beyer, K., Appel, S., Ast, C.R., Kern, K. [2015]: “Einfluss der Luftfederbauart auf die Erschütterungsruhe im Hochleistungspräzisionslabor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung Stuttgart“, 5. VDI-Fachtagung Baudynamik2015
- Gömmel, A., Appel, S., Beyer, K., Motz, U., Steudel, U., Ast, C.R., Kern, K. [2014]: “Entwicklung von hochgradig erschütterungsarmen Fundamenten für elf Versuchsumgebungen in einem neugebauten Präzisionslabor“, Bauingenieur 89, S4-S12, 2014
- Vrettos C. [2008]: Bodendynamik, in: Witt K. J. (Hrsg.) Grundbautaschenbuch, Teil 1, 7. Auflage. Ernst & Sohn, S. 451–500

