Dipl.-Ing. **M.O. Rosenquist**, Ingenieurbüro Dr. Kebe und Dipl.-Ing. Rosenquist, Hamburg;

Übersicht

1 Einleitung	1
2 Unterteilung von erschütterungsempfindlichen Maschinen und Geräten	2
3 Ermittlung von Anforderungen für erschütterungsempfindliche Geräte	3
4 Beispiele für individuelle Geräte-Anforderungen	5
5 Allgemeine Anforderungen für besonders erschütterungsempfindliche Geräte in	Forschung
und Produktion	6
5.2 Auftretende Schwingungen, Schwingungsquellen	10
5.3 Schwingungsmessungen und Auswertung	11
6 Schwingungsisolation mit passiven Elementen	12
6.1 Stahlfeder-Dämpfer-Elemente	15
6.2 Stahlfeder-Elemente	17
6.3 Luftfeder-Elemente	19
7 Schwingungsisolation mit aktiven Elementen	21

1 Einleitung

Die Entwicklung hochtechnisierter Produktion und Forschung führt bei vielen Verfahren zu höheren schwingungstechnischen Anforderungen am Aufstellort von Maschinen und Geräten. Gleichzeitig ist festzustellen, dass ohne die Berücksichtigung von Schwingungseigenschaften infolge einer optimierten statischen Auslegung immer weichere Baukonstruktionen entstehen, welche tendenziell durch tieffrequente Erschütterungen, wie z.B. Straßenverkehr oder Gehen von Menschen, anregbar sind. Darüber hinaus führt eine hohe Nutzungsdichte zu geringen Entfernungen zwischen den Erschütterungsquellen wie Straßenverkehr oder Produktion und erschütterungsempfindlicher Produktion und Forschung.

Im Fall von Erschütterungen durch Baubetrieb treten in Abhängigkeit der Bauverfahren geringfügig bis zu extrem höhere Erschütterungen als unter üblichen Randbedingungen auf und es sind die Einwirkung auf Menschen, bauliche Anlagen und technische Anlagen, also Maschinen und Geräte, zu berücksichtigen.

In Bauvorhaben oder bei erschütterugsintensiven Baubetrieb ist es für den Betrieb erschütterungsempfindlicher Geräte daher besonders wichtig möglichst frühzeitig schwingungstechnische Untersuchungen unter Einbeziehung von Schwingungsmessungen anzustellen. Im Rahmen der Untersuchungen ist zunächst die Erschütterungsempfindlichkeit der zu schützenden Geräte zu betrachten, Schwingungsmessungen durchzuführen, die Baudynamik des Bauwerkes zu untersuchen sowie Maßnahmen zum Erschütterungsschutz zu planen.

Nachfolgend wird über Anforderungen zur Bewertung der Einwirkung von Erschütterungen für empfindliche Maschinen bzw. Geräte und die praktische Vorgehensweise anhand von Beispielen berichtet.

2 Unterteilung von erschütterungsempfindlichen Maschinen und Geräten

Zunächst soll eine Unterteilung von Maschinen und Geräten vorgenommen werden.

Bei Maschinen handelt es sich in vielen Fällen um Anlagen, welche infolge von bewegten Massen selbst Schwingungen verursachen. Dabei sind wiederum Maschinen mit geringen, wie z.B. Kolbenkompressoren, und mit höheren Anforderungen, wie z.B. hoch präzise Fertigungsmaschinen, zu unterscheiden.

Für Maschinen mit geringen Anforderungen – also eigentlich nicht besonders erschütterungsempfindlichen Maschinen, welche auch noch selbst Erschütterungen hervorrufen – liegt z.B. die DIN ISO 10816 "Mechanische Schwingungen - Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen" [1] vor, wobei das o.g. Beispiel Kolbenkompressoren unter Teil 6: "Hubkolbenmaschinen mit Leistungen über 100 kW" beschrieben wird. In der Norm sind verschiedene Stufen der Anforderungen über Grenzwerte der Schwingungsamplitude auf maßgeblichen Messpunkten an der

Maschine angegeben. Der Maschinenhersteller hat seine Produkte zu spezifizieren und in den technischen Daten bzw. Aufstellbedingungen anzugeben. Zur Ermittlung der zu erwartenden Schwingungen und einem Vergleich mit den Anforderungen gemäß DIN ISO 10816 kann ein Nachweis gemäß DIN 4024 "Maschinenfundamente" Teil 1 "Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen" oder Teil 2 "Steife (starre) Stützkonstruktionen für Maschinen mit periodischer Erregung" geführt werden.

In der nächsten Stufe handelt es sich um Maschinen mit höheren Anforderungen wie z.B. hoch präzise Fertigungsmaschinen. Bei diesen Maschinen wird die Erschütterungsempfindlichkeit wesentlich durch den mechanischen Aufbau der Maschine oder das Verfahren bestimmt und ist damit bereits sehr individuell. Das gleiche gilt für Geräte von Schaltanlagen über Computeranlagen bis zu Analysegeräten.

Bei besonders hoher Erschütterungsempfindlichkeit wird i.a. von erschütterungsempfindlichen Geräten – oder "vibration sensitive equipment" gesprochen, auch wenn es sich um ein Produktionsgerät in der Halbleiterfertigung handelt, das einige Tonnen Masse aufweist.

3 Ermittlung von Anforderungen für erschütterungsempfindliche Geräte

Aufgrund der Abhängigkeit der Erschütterungsempfindlichkeit von den individuellen Geräteeigenschaften sind diese grundsätzlich beim Betreiber oder Hersteller zu erfragen. In der Regel liegen bei tatsächlich erschütterungsempfindlichen Geräten hierzu Informationen vor. In vielen Fällen sind die Angaben allerdings schwierig und in manchen Fällen nicht nachzuvollziehen. Es ist daher zur Interpretation der Angaben zweckmäßig sich mit der Ermittlung von Anforderungen für erschütterungsempfindliche Geräte zu beschäftigen.

Die Ermittlung der Erschütterungsempfindlichkeit von Komponenten, Geräten und sonstigen elektrotechnischen Produkten kann z.B. gemäß DIN EN 60068 "Umweltprüfungen" (Environmental testing) vorgenommen werden. Entsprechend der Schwingungsumgebung werden unterschiedliche Schwingungssignale und Prüfverfahren beschrieben. Es handelt sich um sinusförmige Schwingungen, breitbandiges Rauschen oder Schock. Darüber hinaus ist für den Lastfall Erdbeben ein weiteres Prüfverfahren angegeben.

Tabelle 1: DIN EN 60068-3-8:2003 Tabelle 1

Tabelle 1 – Beispiele für Schwingungsumgebung und empfohlenes Prüfverfahren

Emp	fohlenes Prüfverfahren entsprechend IEC 60068	Mixed Mode Teil 2-80	Rauschen Teil 2-64 Rauschen	Sinus Teil 2-6 Sinusförmig
	Art der Schwingsignale für die Prüfung	Rauschen + sinusförmig		
Schwingungs-	Lagerung		X	
umgebung des Prüflings	Nicht ortsfeste Anwendung		X	
	Transport		X	
Eingebaute	Gebäud/ortsfeste Anwendung		X	
Prüflinge in	Gebäude an oder nahe bei rotierenden Maschinen und deren Teile			Х
	Eisenbahn- und Straßenfahrzeugen		X	
	Prüflinge, befestigt auf oder nahe an Maschinen	X		
	Strahlflugzeug	X	X	
	Hubschraubern, Propellerflugzeug	X		
	Raumfahrzeugsystemen, Simulation quasistatischer Belastungen ^{a)}			Х
	Bauteilen für Raumfahrzeuge		X	
	Schiffen, durch Schiffsschraube angetrieben	X		
	Schiffen, mit Strahlantrieb		X	
Abgeschätzte	Rauschen + sinusförmig	X		
dynamische Bedingungen, Art des Signals	Rauschen		X	
	sinusförmig			X
ANMERKUNG	Zur Beschreibung von Klassen für dynamische Bedingunger	n siehe IEC 60721-	3-0.	

Eigenfrequenz des Prüflings simuliert eine lineare Beschleunigung (Start von Raumfahrzeugen).

In der Norm sind für den Schwingungstestbetrieb der Prüfstände in Stufen aufsteigende Schwingungsamplituden empfohlen. Bei niedrigen Frequenzen wird ein konstanter Wert für den Schwingweg und bei höheren Frequenzen ein konstanter Wert für die Schwingbeschleunigung angegeben.

Zur Durchführung der Prüfungen werden die zu untersuchenden Geräte den Schwingungsamplituden der angestrebten Stufe ausgesetzt. Auf diese Weise wird nicht die Belastungsgrenze ermittelt, sondern die Einhaltung der betreffenden Prüfungsstufe.

4 Beispiele für individuelle Geräte-Anforderungen

Im vorliegenden Beispiel der Anforderungen von Computeranlagen handelt es sich um Angaben zu Schockeinwirkungen mit Amplitude und Impulsbreite eines halbsinusförmigen Schockimpulses, die Werte für die Schwingungseinwirkungen gelten 5 Hz bis 500 Hz als Spitze-Spitze-Werte mit $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ sowie der Auslenkung in mm.

Tabelle 2: Beispiel für Anforderungen von Computeranlagen im Frequenzbereich

Einteilung der Maschinen in 3 Klassen

Klasse Umgebungsbedingungen		
V1	Fest am Boden stehende Geräte in Büroumgebung	
V2	Tischgeräte und Geräte für Wandbefestigung	
V3	Portables und Geräte für Industrieumgebung	

Vibrationsgrenzwerte für die einzelnen Maschinenklassen

Klasse	Schock	g rms	g peak	Ausschlag
V1	< 600 kg	0,10	0,30	0,0865
V1	3 g/3 ms > 600 kg	0,05	0,15	0,0432
V2	3 g/3 ms	0,10	0,30	0,0865
V3	3 g/3 ms	0,27	0,80	0,2388

Als weiteres Beispiel sind die Anforderungen eines Produktionsgerätes in der Halbleiterindustrie abgebildet. Es handelt sich dabei um die Darstellung als Leistungsdichtespektrum, wie es für spektrale Angaben erforderlich ist, sofern nicht feste Frequenzintervalle verwendet werden. Alternativ ist die spektrale Darstellung in Terzbandbreite möglich. Bei diesen sehr erschütterungsempfindlichen Geräten ist eine messtechnische Ermittlung der Anforderungen bei simultaner, sehr aufwendiger Kontrolle des Gerätebetriebes notwendig.



Abbildung 1: Halbleiter-Lithografiegerät des Herstellers ASML

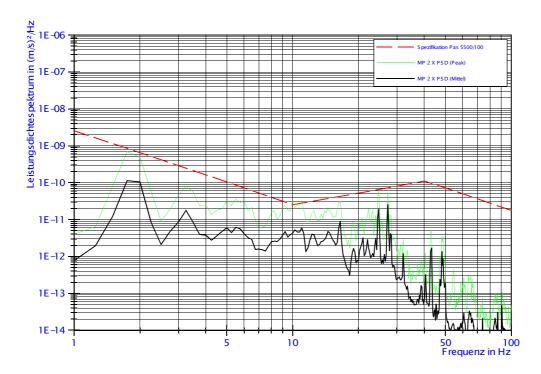


Abbildung 2: Messergebnisse (grün Spitzenwerte, schwarz Mittelwerte) und Anforderungen für ein Produktionsgerät (rot gestrichelt) in der Halbleiterindustrie

5 Allgemeine Anforderungen für besonders erschütterungsempfindliche Geräte in Forschung und Produktion

Grundsätzlich sind für auch hoch erschütterungsempfindliche Geräte z.B. aufgrund ihrer Funktions- und Verfahrensweise, Zyklen- bzw. Analysedauer sowie der Auflösung gerätespezifische Anforderungen maßgeblich. Es handelt sich bei den hoch

erschütterungsempfindlichen Geräten in der Forschung u.a. um Mikroskope mit Auflösungen bis in den einstelligen nm-Bereich wie Raster-Elektronen-Mikroskope (REM oder SEM: Scanning electron microscope), Transmissions-Elektronen-Mikroskope (TEM: Transmission electron microscope) und Kraftmikroskope (AFM: Atomic force microscope). Weiter werden in der Forschung und in der hochtechnisierten Produktion auf Basis von Halbleitern zur Chipfertigung oder in der Nanotechnik Lithografiegeräte eingesetzt und Linienbreiten von weniger als 0.1·10⁻⁶ m realisiert. Es kann sich aber auch um weniger empfindliche Labortechnik wie Massen-Spektrometer handeln. Bei den sehr erschütterungsempfindlichen Geräten können bereits die Gebäudeschwingungen durch alltäglichen Wind oder entfernten Straßenverkehr zur Überschreitung der schwingungstechnischen Anforderungen führen. Zur Klassifizierung von Erschütterungseinwirkungen auf Geräte liegen keine allgemein gültigen oder verbindlichen Regelwerke vor.

Ausgehend von den Anforderungen für die Geräte in der Halbleiterindustrie sind die so genannten Vibration-Criteria (VC) entstanden und weiter entwickelt worden. Bekannt geworden sind insbesondere die Formulierungen von Gordon [1], die eine Beschreibung der Klassifizierung im Hinblick auf die Nutzung unterschiedlicher Geräteklassen bieten. Die Vibration-Criteria nach Gordon bieten eine gute Möglichkeit zur grundsätzlichen Bewertung der Schwingungen am zu untersuchenden Standort (Tabelle 3). Die Klassifizierung für Terzband-Mittenfrequenzen von bis 4 Hz 80 Hz sind mit zunehmenden Anforderungen in Klassen von A bis E angegeben. Einerseits steigen die zulässigen Amplituden der Schwingungskriterien unterhalb von 10 Hz und andererseits endet der betrachtete Frequenzbereich bei 4 Hz.

Tabelle 3: Vibration-Criteria (VC) [1] [2] [3]

Kriterium	Terzschnelle (Effektivwert)	Strukturgröße	Anwendung
Werkstatt (ISO)	800 μm/s	-	Gut spürbare Schwingung, anwendbar auf Werkstätten und unsensible Orte
Büro (ISO)	400 μm/s	-	Spürbare Schwingung, anwendbar auf Büros und unsensible Orte
Wohngebäude (ISO)	200 μm/s	75 µm	Gerade noch spürbare Schwingung, anwendbar auf Ruhezonen in den meisten Fällen. Eventuell anwendbar auf Computer, einfache Mikroskope und Laborgeräte
Operationssaal (ISO)	100 μm/s	25 μm	Schwingung nicht spürbar, geeignet für sensible Ruhezonen, vorwiegend geeignet für Mikroskope bis 100-fache Vergrößerung
VC-A	50 μm/s	8 µm	Überwiegend geeignet für optische Mikroskope bis 400-fache Vergrößerung, Mikrowaagen, optische Waagen, Ausrichter
VC-B	25 μm/s	3 µm	Ein geeigneter Standard für optische Mikroskope bis 1000-fache Vergrößerung, lithographische Geräte (einschließlich Stepper) bis 3 µm Linienbreite
VC-C	12,5 µm/s	1 µm	Ein guter Standard für die meisten lithographische Geräte bis 1 µm Linienbreite
VC-D	6 μm/s	0,3 µm	Überwiegend geeignet für anspruchsvolle Apparaturen einschließlich Elektronenmikroskop (REM und TEM) und E-Beam Systeme, die am Ran- de der Leistungsfähigkeit arbeiten
VC-E	3 μm/s	0,1 μm	Kriterium ist schwer einzuhalten, geeignet für höchstsensible Systeme einschließlich Lasergeräte mit langen optischen Wegen und anderen Systemen mit außergewöhnlich hohen dynamischen Stabilitätsanforderungen
VC-F	1 μm/s	-	Erweitere Anforderungen für zukünftige Erfordernisse

Diese Festlegung der Schwingungskriterien bei sehr tiefen Frequenzen trifft allerdings für einige Geräte unterschiedlicher Gattungen nicht zu. Die zulässigen Amplituden können gerade bei tiefen Frequenzen bis 5 Hz, u.a. wegen der Abstimmfrequenz geräteinterner elastischer Lagerungen, sehr gering sein, so dass bereits beim allgemeinen Erschütterungspegel diese hohen Anforderungen am zu untersuchenden Standort überschritten werden können. In den Vorschlägen zu Schwingungsanforderungen in der Nanotechnik von Heiland und Beyer [4] werden diese Aspekte mit einem Frequenzbereich ab 1 Hz und zu niedrigen Frequenzen steigenden Anforderungen berücksichtigt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Nano-Linien [4]

Malta alcuna	Terzschnelle (Effektivwert)			
Kriterium	1 Hz bis 5 Hz	5 Hz bis 100 Hz	Anwendung	
Nano-D	1,6 µm/s	6,4 µm/s	Sehr schwierig einzuhaltendes Kriterium für REM der Nanotechnologie für Auflösungen bis 1 nm, Obergeschosse mit hohen Anforderungen an die dynamische Steifigkeit und Eigenfrequenz	
Nano-E	0,8 µm/s	3,2 µm/s	Extremes Kriterium für REM der Nanotechnologie für Auflösungen bis 2-5 Å (10 Å= 1 nm), nur auf sehr massiven Bodenplatten und nur bei sehr günstigen Baugrundvoraussetzungen einhaltbar	
Nano-EF	0,53 μm/s	2,1 µm/s	Strengstes Kriterium für REM und TEM der Nanotechnologie für Auflösungen im Sub- Ångströmbereich (10 Å= 1 nm), das Kriterium ist nur unter sehr speziellen Bedingungen und besonderen Baukonstruktionen einhaltbar	

Letztlich sind für Untersuchungen zur Aufstellung von erschütterungsempfindlichen Geräten gerätespezifische Anforderungen maßgeblich und ggf. messtechnisch zu ermitteln. Zur messtechnischen Ermittlung der Schwingungssensivität dieser Geräte existieren Vorschläge, z.B. veröffentlicht von Wobbe [5], allerdings keine allgemein akzeptierte Vorgehensweise.



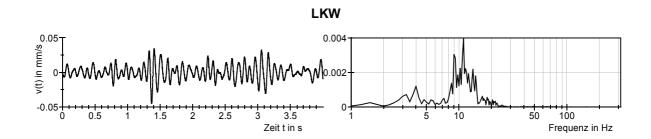
Bild 3: Ermittlung der Schwingungsempfindlichkeit eines Massenspektrometers unter Verwendung eines Schwingungerregers mit Linearmotor [6]

Zur messtechnischen Ermittlung können z.B. Schwingungserreger mit Linearmotor verwendet werden, um geeignete Schwingungssignale zu erzeugen (Bild 3). Zur Feststellung

einer ordnungsgemäßen, ausreichend genauen Funktion des zu untersuchenden Gerätes ist eine enge Zusammenarbeit und Absprache mit dem Nutzer erforderlich.

5.2 Auftretende Schwingungen, Schwingungsquellen

Die auf erschütterungsempfindliche Geräte einwirkenden Schwingungen können grundsätzlich alle in der Baudynamik zu betrachtenden Ursachen aufweisen. Im Bereich des Aufstellorts sind u.a. Maschinen, haustechnische Anlagen, die Bewegung von Menschen sowie bei Industrieanlagen verfahrenstechnisch bedingte Anlagenschwingungen zu berücksichtigen. Bei den von außen auf das betreffende Gebäude einwirkende Schwingungen sind sehr häufig Straßen-, aber auch Schienenverkehrserschütterungen sowie der Betrieb von Maschinen maßgeblich (Bild 4).





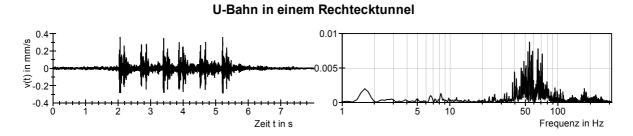


Bild 4: Beispiele für typische Schwingungen aus unterschiedlichen Bohrlochmessungen [2]

Die tatsächlich am Aufstellort auftretenden Schwingungen werden ausgehend von der Schwingungsquelle von den Übertragungseigenschaften im Boden, der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung sowie von den Gebäude- und Deckeneigenfrequenzen beeinflusst. In diesem Zusammenhang sind tieffrequente Schwingungen besonders zu beachten, da diese in Abhängigkeit von den Boden- oder Bauteileigenschaften über große Entfernungen übertragen werden und die Wirksamkeit von Maßnahmen in diesem Frequenzbereich schwierig zu realisieren sind.

5.3 Schwingungsmessungen und Auswertung

Die Schwingungsmessungen sind mit einer Messkette gemäß DIN 45669 "Messung von Schwingungsimmissionen" Klasse 1 1 Hz bis 315 Hz bestehend aus hochempfindlichen Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern (Geophonen) f_0 =4.5 Hz und einem Messverstärker mit einer Kompensation der Aufnehmerkennlinie vom Typ SMK-801 von Dr. Kebe Scientific Instruments GmbH durchgeführt worden [7]. Die Datenerfassung erfolgte mit 2048 Werten pro Sekunde über eine A/D-Wandlerkarte sowie Software von National Instruments und wurde auf der Festplatte des Messcomputers gespeichert. Ausgehend von den Schwingungssignalen im Zeitbereich sind digitale Terzfilter angewendet, eine Effektivwertbildung (fast τ =125 ms) vorgenommen und letztlich maximale und energieäquivalente Terzschnellepegel $L_{\nu FmaxTerz}$ und $L_{\nu FeqTerz}$ bestimmt worden (v_0 =5·10-8 m/s). Bei dieser Vorgehensweise wird vermieden, dass kurzzeitig bzw. einmalig auftretende Maximalwerte bzw. sehr schmalbandige Frequenzspitzen die Messergebnisse bestimmen.

Zur Darstellung der Ergebnisse in diesem Bericht werden die auf der schwingungsisolierten Geräteaufstellebene auftretenden Schwingungen als Terzschnellepegel mit den Anforderungen der Vibrations-Criteria und der Nano-Linien in ein Diagramm eingetragen. Die Messergebnisse sind aus verschiedenen Untersuchungen zusammengetragen. An den untersuchten Standorten lagen unterschiedliche Quellen und Baustrukturen vor, so dass sich auch die eingeleiteten Schwingungen in Amplitude und spektraler Zusammensetzung unterscheiden. Bei einigen Untersuchungen waren die zu schützenden Geräte auf der schwingungsisolierten Aufstellebene in Betrieb, dieser Umstand ist bei der Betrachtung der höheren dargestellten Frequenzen zu berücksichtigen.

Für die Beschreibung der Schwingungsübertragung vom Fußpunkt der Baustruktur auf die schwingungsisolierte Aufstellebene wird nachfolgend die Übertragungsfunktion verwendet. In der Regel wird zur Ermittlung der Übertragungsfunktion die nachfolgende Definition für die Auswertung von Messsignalen eingesetzt:

$$H_{1} = \frac{S_{A}(f) \cdot S_{E}^{*}(f)}{S_{E}(f) \cdot S_{E}^{*}(f)}$$

*H*₁: komplexe Übertragungsfunktion

S_E: komplexes Spektrum des System-Eingangssignals $v(t)_{\text{MP Eingangssignal}}$

 S_A : komplexes Spektrum des System-Ausgangssignals $v(t)_{MP \text{ Ausgangssignal}}$

*: Kennzeichnung konjugiert komplexer Größen.

Bei höheren Frequenzen treten nur noch geringe Schwingungsamplituden auf, so dass die Güte der Übertragungsfunktion abnimmt. Zur Durchführung der Schwingungsmessungen konnten die zu schützenden Geräte nicht immer vollständig ausgeschaltet werden. In diesen Fällen treten daher bei höheren Frequenzen Spitzen aus dem Gerätebetrieb in Betriebsbereitschaft (standby) auf, welche nicht über die Schwingungsisolation übertragen werden.

6 Schwingungsisolation mit passiven Elementen

Schwingungsisolation mit passiven Elementen bezeichnet die klassische Schwingungsisolation mit Feder- und Dämpfer-Elementen, die aufgrund der dynamischen Eigenschaften im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem aus Masse, Feder und Dämpfer, ohne weitere Energiezufuhr wirksam sind. Zur Aufstellung von erschütterungsempfindlichen Geräten sind zunächst die am Aufstellort auftretenden Schwingungen messtechnisch zu erfassen und Prognosen für die Baustruktur vorzunehmen. In Abhängigkeit der von Erschütterungsempfindlichkeit der Geräte ist die Baustruktur schwingungstechnisch optimiert und eine schwingungsisolierte Aufstellung der Geräte zu planen.

Im Fall der hier mit passiven Elementen vorgestellten Ergebnisse sind zunächst Schwingungsmessungen in Bohrlöchern in der zukünftigen Gründungsebene bei Straßenverkehr sowie eine Prognose der auf der zukünftigen Gebäudesohle zu erwartenden Schwingungen. Maßgeblich für die Anregung durch Straßenverkehr sind die dynamischen Eigenschaften der LKW-Fahrzeuge sowie die Interaktion mit der Fahrbahn auf dem Boden. Es handelt sich im Allgemeinen Fall um Aufbauschwingungen mit 1.5 Hz bis 2 Hz, bei blockierten Feder-Dämpfer-Elementen bei 2.5 Hz bis 3 Hz sowie Achseigenschwingungen im Bereich von 7 Hz und 15 Hz statt [8]. Im vorliegenden Fall sind im Baugrund dominierende Frequenzen von 3 Hz bis 5 Hz beim Grunderschütterungspegel mit weit entferntem Straßenverkehr sowie 9 Hz bis 14 Hz bei Straßenverkehr auf der 72 m entfernten vierspurigen Ausfallstraße festgestellt worden (Bild 4 oben) [9].

Das Gebäude weist mit einer dicken Sohlplatte auf dem Baugrund eine Hochabstimmung gegenüber der Anregung sowie eine geringe Überhöhung auf. Aufgrund der Hochabstimmung werden die Straßenverkehrserschütterungen mit einem Faktor von etwa eins vom Baugrund auf die Gebäudesohle übertragen. Zur Verminderung der auf die Aufstellebene der Forschungsräume einwirkenden Erschütterungen waren daher Maßnahmen zur Schwingungsisolation zu ergreifen.

Die Maßnahmen zur Schwingungsisolation waren ausgehend von einer sehr steifen Sohle und einem massiven zu lagernden Fundamentblock vorgesehen, so dass das System als Ein-Massen-Schwinger betrachtet werden kann. Die Wirksamkeit der Schwingungsisolation mit passiven Elementen lässt sich für diesen Fall am einfachsten mit der Übertragungsfunktion einer Fußpunktanregung auf die Bewegung der elastisch gelagerten Masse beschreiben [10] [11] (Bild 5).

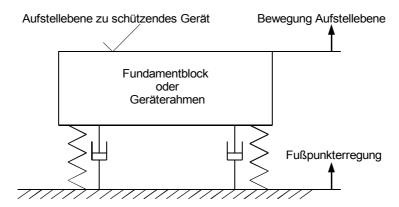


Bild 5: Modell zur Schwingungsisolation: Ein-Massen-Schwingers mit Fußpunktanregung

Prognoserechnungen ergaben unter Verwendung der gemessen Baugrundschwingungen für eine Schwingungsisolation auf Stahlfeder-Dämpfer-Elementen mit einer niedrigen Abstimmfrequenz im Bereich von f₀=3 Hz und einem Lehrschen Dämpfungsmaß von D=0.16 eine deutliche Reduktion der Schwingungen am Aufstellort. Da bei Stahlfeder-Dämpfer-Elementen eine Niveauregulierung wie bei Luftfeder-Elementen nicht eingesetzt werden kann, wurden für eine ausreichende Lagestabilität infolge nicht symmetrischer Belastung durch Versuchsaufbauten steife Federn und eine hohe Masse des zu lagernden Blockfundamentes von 32 t gewählt.

Die Ergebnisse der nachfolgend vorgestellten Schwingungsisolationen mit passiven Elementen sind ausgehend von simultanen Messungen ermittelt worden.

6.1 Stahlfeder-Dämpfer-Elemente

Zunächst werden die Ergebnisse der elastischen Lagerung auf Stahl-Feder-Dämpfer-Elementen dargestellt, die nach den Vorgaben der Planung erstellt worden sind (Bild 6).



Bild 6: Stahlfeder-Dämpfer-Element unter einem Stahbeton-Blockfundament

Die Schwingungsisolation weist in der Abstimmfrequenz zwischen 3 Hz und 4 Hz eine Überhöhung von 2.7 auf. Das Lehrsche Dämpfungsmaß aus einem Ausschwingversuch beträgt D=0.16. Die Wirksamkeit beginnt bei 6 Hz und bei 10 Hz beträgt der Isolationsgrad 80 %. An dem Standort werden die Anforderungen VC-E bei Betrachtung der Maximalwerte eingehalten. Diese Feststellung gilt auch für Anforderungen zu niedrigeren Frequenzen bis 1 Hz (Bild 7).

Für den vorliegenden Fall liegt der Vorteil dieser Lösung in einer vergleichsweisen hohen Dämpfung in der Abstimmfrequenz zur Begrenzung der Überhöhung und einer guten Wirksamkeit zur Schwingungsverminderung im Frequenzbereich mit den maßgeblichen Amplituden der Anregung durch Straßenverkehr.

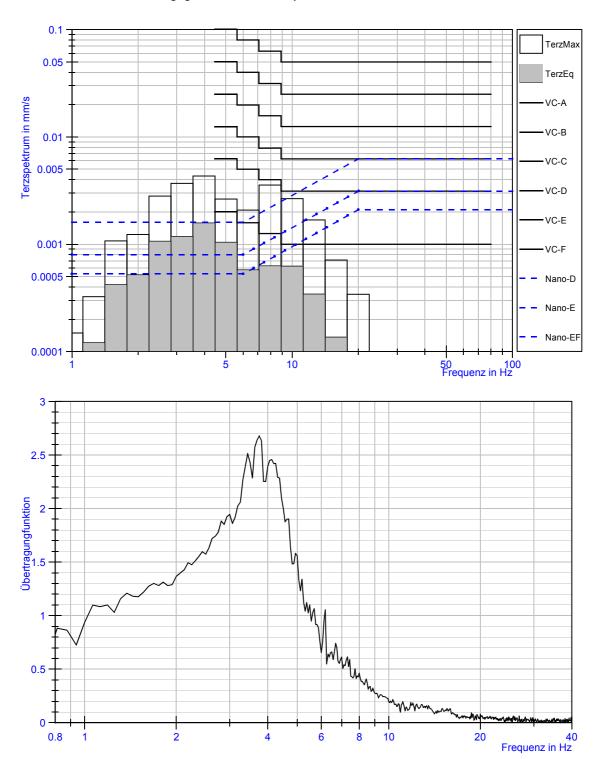


Bild 7: Schwingungsisolation: Stahl-Feder-Dämpfer-Elemente, Komponente: vertikal, Emittent: Straßenverkehr, Aufstellebene: kein maßgeblicher Betrieb der zu schützenden Geräte

6.2 Stahlfeder-Elemente

Im Rahmen der Untersuchungen gab es die Möglichkeit bei einem der elastisch gelagerten Blockfundamenten das ursprüngliche Dämpfer-Element wirkungslos zu machen und ein reines Stahl-Feder-Elementen zu erhalten (Bild 8).



Bild 8: Stahlfeder-Element unter einem Stahbeton-Blockfundament (das ursprüngliche Dämpfer-Element wurde wirkungslos gemacht)

Im Vergleich zu den Stahlfeder-Dämpfer-Elementen weisen die Ergebnisse für die Stahlfeder-Elemente aufgrund der geringen Dämpfung in der Abstimmfrequenz zwischen 3 Hz und 4 Hz eine große Überhöhung von 16 auf. Aus einem Ausschwingversuch ist ein geringer Wert für das Lehrsche Dämpfungsmaß von D=0.012 bestimmt worden. Die Wirksamkeit beginnt bereits bei 4 Hz und bei 6 Hz beträgt der Isolationsgrad 65 % (Bild 9).

Die lediglich bis 4 Hz angegebenen Vibration-Criteria werden an dem Standort bei Betrachtung der Maximalwerte mit der VC-E-Kurve deutlich und nahezu die Kurve VC-F eingehalten, da die Resonanzüberhöhung unterhalb der Gültigkeit dieser Anforderungen liegt. Für viele Anwendungen sind allerdings hohe Anforderungen bei Frequenzen unterhalb von 4 Hz maßgeblich und wurden daher auch in der Formulierung der Nano-Linien hervorgehoben [4]. Unter Berücksichtigung von hohen Anforderungen bei sehr tiefen Frequenzen ist der Einsatz von Stahlfeder-Elementen am vorliegenden Standort nicht zweckmäßig.

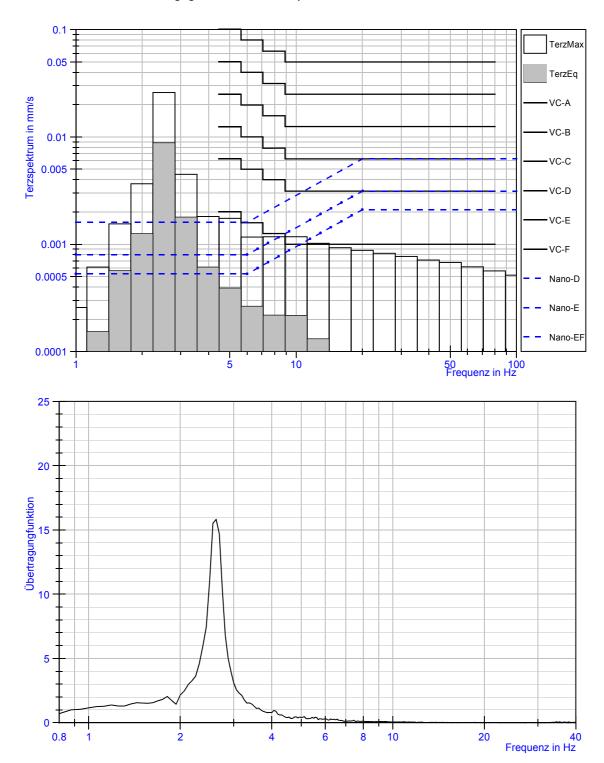


Bild 9: Schwingungsisolation: Stahlfeder-Elemente, Komponente: vertikal, Emittent: Straßenverkehr, Aufstellebene: kein maßgeblicher Betrieb der zu schützenden Geräte

6.3 Luftfeder-Elemente

Darüber hinaus ist als weitere Variante ein Blockfundament mit Luftfeder-Elementen zu untersuchen. Im Gegensatz zu den Stahlfeder-Dämpfer-Elementen ist bei Luftfeder-Elementen zur Gewährleistung der horizontalen Lage eine automatische Niveauregelung erforderlich (Bild 10).



Bild 10: Luftfeder-Element unter einem Stahbeton-Blockfundament

Ebenso wie die Stahlfeder-Elemente weisen die Ergebnisse für Luftfeder-Elemente im Vergleich zu den Stahlfeder-Dämpfer-Elementen aufgrund der geringen Dämpfung in der Abstimmfrequenz bei 1.5 Hz eine große Überhöhung, im vorliegenden Fall von 21, auf. Der geringe Wert des Lehrschen Dämpfungsmaßes der Luftfeder-Elemente beträgt, ermittelt durch einen Ausschwingversuch, D=0.018. Die Wirksamkeit beginnt bereits bei 2.5 Hz und bei 4 Hz beträgt der Isolationsgrad 75 % (Bild 10).

Bei strenger Betrachtung der Vibration-Criteria werden an dem Standort bei Betrachtung der Maximalwerte sogar die Anforderungen VC-F eingehalten. Ähnlich wie bei den Stahlfeder-Elementen würde allerdings eine Betrachtung der niedrigeren Frequenzen bis 1 Hz zeigen, dass im Bereich der Abstimmfrequenz infolge der großen Resonanzüberhöhung die gerätespezifischen Anforderungen einer Reihe schwingungsempfindlicher Geräte nicht erfüllt werden können.

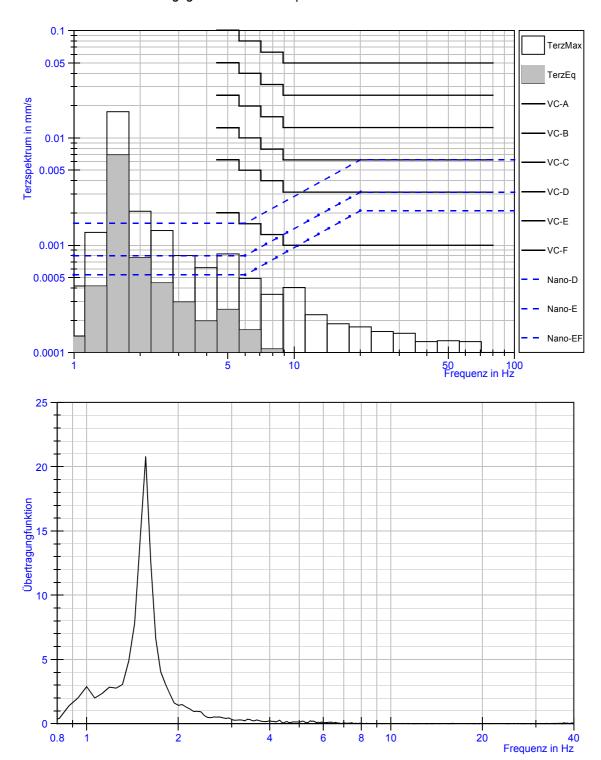


Bild 11: Schwingungsisolation: Luftfeder-Elemente, Komponente: vertikal, Emittent:
Straßenverkehr, Aufstellebene: kein maßgeblicher Betrieb der zu schützenden
Geräte

Im vorliegenden Fall waren die Anforderungen durch das am alten Forschungsstandort auftretenden Schwingungsniveau vorgegeben und wurde durch Schwingungsmessungen dokumentiert. Die Einhaltung dieses Schwingungsniveaus war wegen der hohen Resonanzüberhöhung der anderen Lösungen nur mit Stahlfeder-Dämpfer-Elementen zu gewährleisten.

7 Schwingungsisolation mit aktiven Elementen

Eine Alternative zu passiven Systemen bieten Systeme zur Schwingungsisolation mit aktiven Elementen (Aktuatoren) bieten, es kann insbesondere bei nachträglichen Maßnahmen baulicher Aufwand minimiert werden und es liegt im Vergleich zu passiven Elementen aufgrund der Vermeidung der Resonanzüberhöhung eine sehr gute Wirksamkeit bei tiefen Frequenzen vor [12] [13].

Literaturverzeichnis

- [1] Gordon Colin G.: Proceedings of International Society for Optical Engineering Vol. 1619, , 1991
- [2] Kramer Helmut: Angewandte Baudynamik Ein Lehrbuch zum Studium und zur Weiterbildung, Ernst & Sohn Verlag GmbH Berlin, 2006
- [3] Möser Michael, Müller Gerhard: Taschenbuch der Technischen Akustik 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [4] Heiland Dieter, Beyer Karlheinz: DGEB Tagung Aktuelle Themen des Erdbebeningenieurwesens und der Baudynamik, DGEB Aachen, 2005
- [5] Wobbe Christian: VDI Baudynamik Tagung 2003, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2003
- [6] Ziegler Armin: DACH Tagung Aktuelle Brückendynamik, SIA Zürich, 2003
- [7] Rosenquist Marc Oliver: Beratende Ingenieure: Messtechnik in der Baudynamik, Springer-VDI-Verlag, Juli/August 1999
- [8] Cantieni Reto: DACH Tagung Aktuelle Brückendynamik, SIA Zürich, 2003
- [9] Grabe Jürgen, Bierer Thorsten: Structural Dynamics EURODYN 2005, Millpress Rotterdam, 2005

- [10] Teil 2: Lin. zeitinvar. schwingungsfähige Sys. m. einem Freiheitsgrad: DIN 1311-2: 2002-02 Schwingungen und schwingungsfähige Systeme, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2002
- [11] Petersen Christian: Dynamik der Baukonstruktionen, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsges. mbH Braunschweig, 1996
- [12] Rosenquist Marc Oliver: Einsatz und Vergleich aktiver Elemente (Aktuatoren) und passiver Elemente bei der Schwingungsisolation empfindlicher Geräte in der Forschung,
 VDI-Berichte 1754 Baudynamik Tagung 2006, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
 [13] Rosenquist Marc Oliver: Active and passive elements/methods for vibration isolation of

sensitive equipment in research (and production) – a comparison based on measurements,