

Baudynamische Aspekte beim Laborbau

Daniel Gsell, Marcel Birchmeier, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

1 Einleitung

Neben einer Vielzahl von verschiedenen Aspekten aus unterschiedlichen Fachgebieten sind beim Laborbau auch bezüglich Erschütterungen oftmals hohe Anforderungen zu berücksichtigen. Um mit anderen Labors in der Spitzenforschung auch in Zukunft mithalten zu können (immer längere Untersuchungsprozesse mit steigender räumlicher und zeitlicher Auflösung), werden die Anforderungen bezüglich Erschütterungen immer strenger und möglichst umfassend, auch weil Räume zur Verfügung gestellt werden sollen, die einer heute noch nicht bekannten Nutzung dienen sollen.

Diese Aufgabenstellung birgt viele Unbekannte und Risiken, nicht nur seitens Anforderungen an die Erschütterungen, sondern auch bezüglich Bauwerksverhalten und möglichen Erschütterungserzeuger. Ein möglichst frühes Miteinbeziehen eines Experten hilft, diese Risiken zu erkennen, zu quantifizieren und dies dem Bauherrn als Grundlage für weitere Planungsentscheide zur Verfügung zu stellen. Oft sind zu hohe Erwartungen und der Glaube, dass eine ingenieurtechnische Lösung (auch wenn sehr kostspielig) existiert, Gründe dafür, dass die Risiken bezüglich Gebrauchstauglichkeit spät erkannt werden und so einen grossen Mehraufwand generieren.

Ziel dieses Beitrags ist es, die relevanten Aspekte bei der Planung und Umsetzung von Laborbauten und immissionsreduzierenden Massnahmen in Erinnerung zu rufen, auf Schwierigkeiten und Grenzen hinzuweisen und insbesondere die Unsicherheiten aufzuzeigen, die bei der Abschätzung der zu erwartenden Erschütterungen im Neubau mitberücksichtigt werden müssen.

2 Allgemeine Aspekte

Bereits in der frühen Planungsphase eines Gebäudes für erschütterungsempfindliche Nutzung, sollten einige Aspekte bezüglich Erschütterungen mitberücksichtigt werden, u.a.:

- Die Anforderungen bezüglich Erschütterungen müssen als Erstes festgelegt werden, dabei ist zu beachten, dass es den absolut ruhigen Ort nicht gibt.
- Erschütterungsempfindliche Gerätschaften sollten möglichst weit entfernt von potentiellen Erschütterungsquellen platziert werden.

- Die bezüglich Erschütterungen ruhigsten Orte befinden sich im Allgemeinen auf dem Gebäudefundament (Bodenplatte).
- Den technischen Möglichkeiten für immissionsreduzierende Massnahmen sind physikalische Grenzen gesetzt.

Das Ablaufdiagramm in Bild 2.1 stammt aus der Richtlinie VDI 2038 – Blatt 1 (Bild 3) und zeigt die verschiedenen Elemente bei der baudynamischen Planung. Zuerst steht die Festlegung der Anforderungen. Diese beeinflussen praktisch das gesamte Bauvorhaben und sollten entsprechend sorgfältig erarbeitet werden (siehe nächstes Kapitel). Die Ermittlung der Grundlagen und die Festlegung der Anforderung sollten sinnvollerweise durchgeführt werden, bevor ein Bauprojekt konkret wird (Vorstudien, strategische Planung). Als wichtigste Entscheidungsgrundlagen dienen die Prognosen der zu erwartenden Erschütterungen im zu erstellenden Gebäude (siehe Kapitel 5). In fast allen Phasen gewinnt man die Grundlagen mit entsprechenden Messungen vor Ort oder in vergleichbaren Situationen oder aber aus Erfahrung. Das Diagramm zeigt auch, dass mögliche Konsequenzen der Nichterfüllung der Anforderungen einschneidend sein können wie z.B. die Änderung des Standorts oder des gesamten Gebäudekonzepts. Die Prognosesicherheit bzw. deren Streuung ist zu diskutieren.

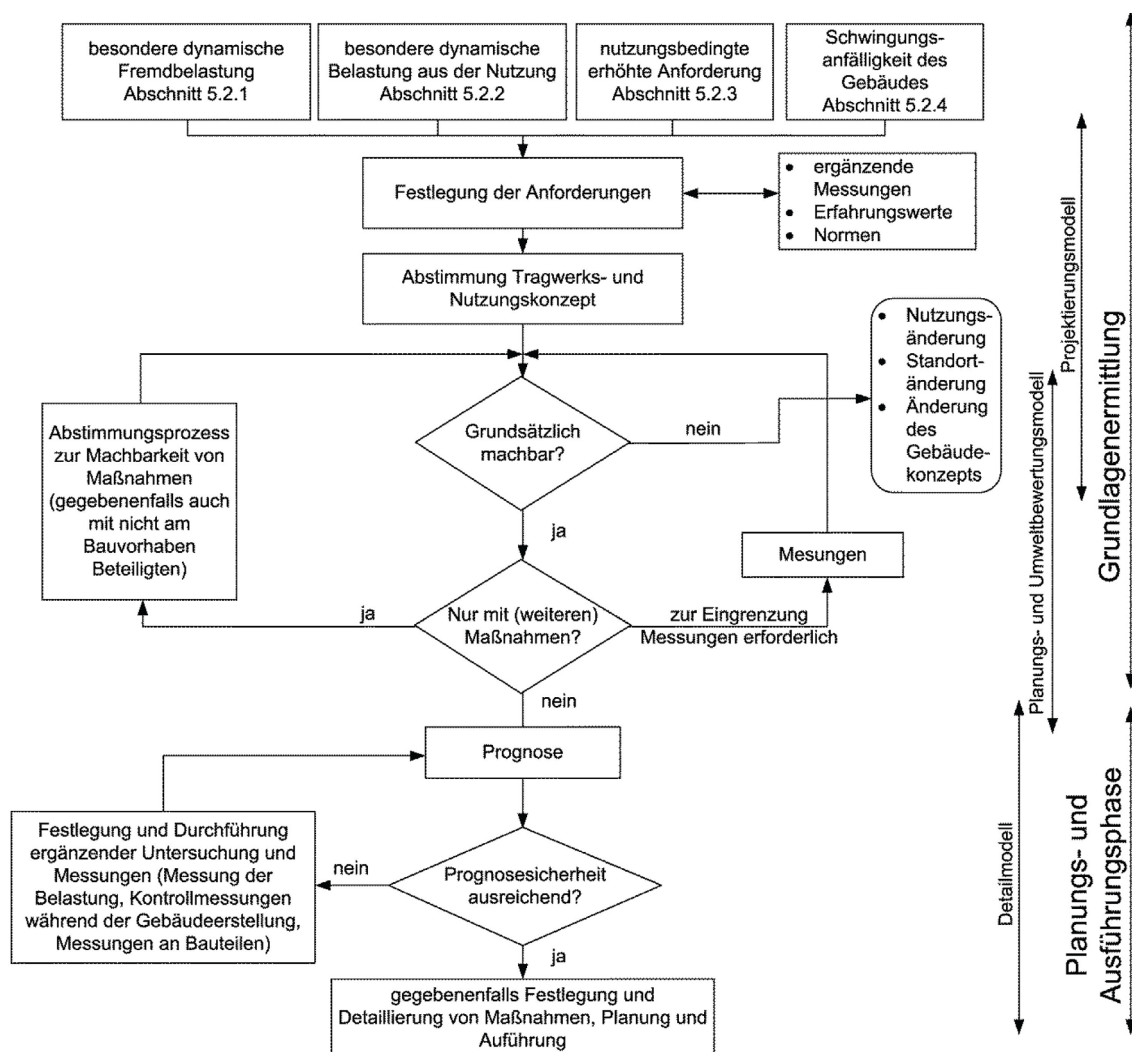


Bild 2.1 Ablauf einer baudynamischen Planung (aus VDI 2038, Blatt 1, Bild 3)

Die erschütterungsrelevanten Aspekte müssen bereits bei der Standortwahl mit Hilfe einer Standortevaluation (meist mit Messungen verbunden) berücksichtigt werden. Damit lassen sich mögliche Probleme vorzeitig erkennen.

Auch beim Raumkonzept und Tragwerkskonzept spielen die Erschütterungsaspekte eine entscheidende Rolle. Zwei Sachverhalte die häufiger anzutreffen sind:

- Platzierung der Gebäudetechnik im untersten Geschoss, wo es am wenigsten Erschütterungen gibt und somit bezüglich der Erschütterungen die ruhigsten Bedingungen zu finden wären.
- Anhand anderer Kriterien festgelegter Stützenraster oder Bauhöhen der Geschossdecken. Beides hat Einfluss auf das Schwingverhalten der Decken und kann mögliche immissionsreduzierende Massnahmen wie z.B. die lokale elastische Lagerung eines Mikroskops limitieren oder gar unmöglich machen.

Werden zu Beginn die falschen Entscheidungen getroffen, dann werden unter Umständen unnötigerweise Randbedingungen geschaffen, die kostspielige Massnahmen oder sogar die Infragestellung der Gebrauchstauglichkeit nach sich ziehen.

Auch das Nutzungskonzept (zeitliche Aufteilung der Nutzung) wird von erschütterungsrelevanten Aspekten beeinflusst. Mit einem geeigneten Nutzungskonzept lassen sich allenfalls kostspielige Massnahmen oder Einschränkungen beim Raum- und Tragwerkskonzept vermeiden. Als Beispiel sei hier die Pumpe einer Sprinkleranlage erwähnt, die zu Wartungszwecken zweimal pro Jahr während einigen Minuten in Betrieb genommen werden muss. Werden die Nutzer richtig informiert und lassen sich erschütterungsempfindliche Abläufe betrieblich entsprechend steuern, kann auf eine immissionsreduzierende Massnahme bei der Pumpe und sämtlicher Zu- und Ableitungen verzichtet werden.

Oftmals ist es nicht wirtschaftlich und auch nicht notwendig, die strengsten Anforderungen im gesamten Gebäude zu erfüllen. Es sollten daher Bereiche unterschiedlicher Anforderungen definiert und ein entsprechendes Massnahmenkonzept erarbeitet werden. Sind nur vereinzelte Geräte erschütterungsempfindlich, sind lokale Massnahmen beim Gerät sinnvoll. Allerdings müssen dazu die Voraussetzungen geschaffen werden, dass eine lokale Massnahme auch ausgeführt werden kann (genügend Platz, ausreichend hohe Eigenfrequenzen der Geschossdecken, etc.). Sind hingegen viele empfindliche Geräte auf engem Raum vorgesehen, ist es unter Umständen einfacher, den gesamten Raum immissionsreduziert auszuführen (z.B. elastisch gelagerter Boden). Allerdings kann dann die Begehung der gelagerten Platte zu Problemen führen.

Standortwahl, Raumkonzept, Tragwerkskonzept, Nutzungskonzept und Massnahmenkonzept müssen aufeinander abgestimmt sein. Hierzu braucht es die Zusammenarbeit aller Beteiligten. Die Aufgabe des Baudynamikers besteht darin, die relevanten Aspekte zu benennen, aufzubeheben und die Planer und Bauherren über Möglichkeiten und Risiken zu informieren.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass beim Laborbau, insbesondere bei Labors mit sehr hohen Anforderungen aufgrund der sehr spezialisierten Nutzung kaum normative Richtlinien existieren. Die für die Bearbeitung der Erschütterungsproblematik anzuwendenden Verfahren sind daher projektspezifisch zu entwickeln.

3 Anforderungen

Ein meist unterschätzter Aspekt bei der Planung von Laborbauten ist die Festlegung der Anforderungen bezüglich maximal zulässiger Erschütterungen. Dies ist grundsätzlich die Aufgabe des Bauherrn, wobei jedoch die Unterstützung durch den Baudynamiker oft nötig ist. Zur Definition der Anforderungen sind ein profundes Verständnis der dynamischen Vorgänge im erschütterungsempfindlichen Gerät und genaue Kenntnisse der Mess- und Auswerteverfahren erforderlich.

Die Angabe der Anforderungskriterien basiert auf physikalischen Größen wie z.B. Schwinggeschwindigkeit oder Beschleunigung. Im Gegensatz zu anderen Anforderungen wie z.B. für die Raumtemperatur oder die statische Deckendurchbiegung ist bei den Erschütterungen die Angabe eines einzuhaltenden Maximalwerts nicht ausreichend. Es sind Angaben zum Frequenzbereich erforderlich und es bedarf einer klaren Definition, wie die zu beurteilende Grösse zu bestimmen ist. Leider sind diese Angaben in Gerätespezifikationen meist nicht vorhanden (siehe Bild 3.1).

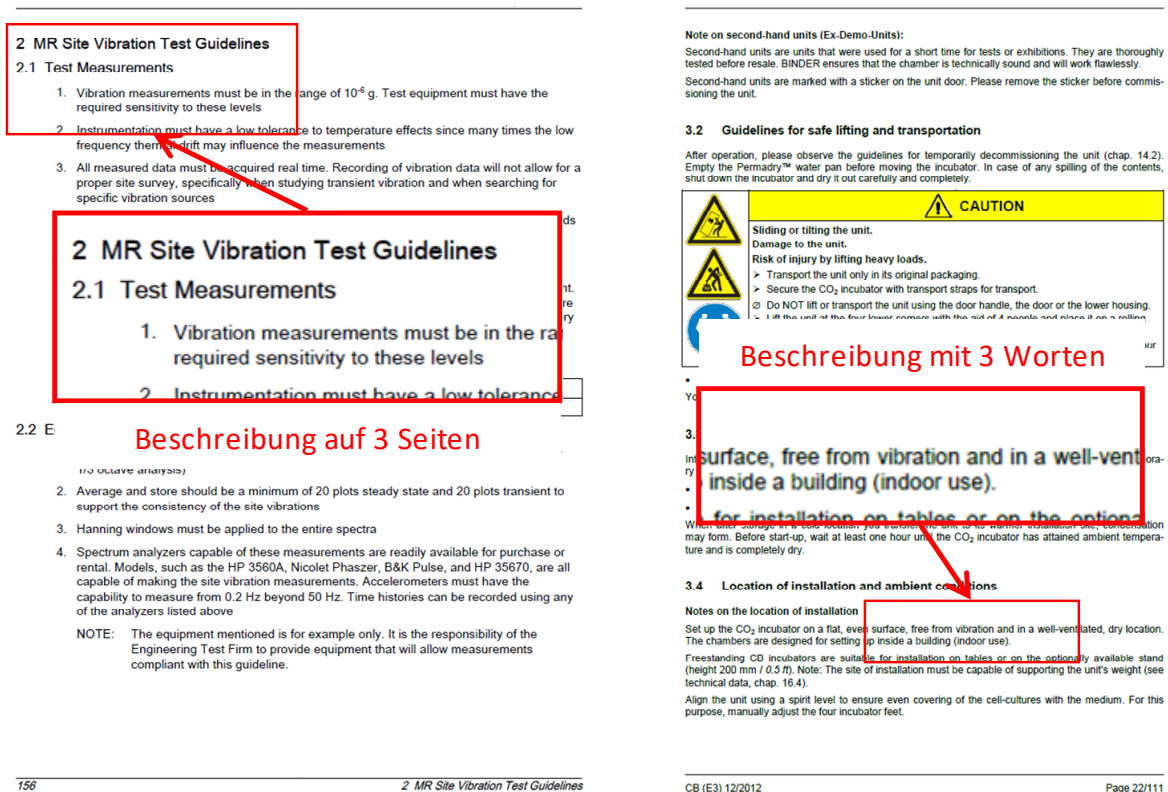


Bild 3.1 Beispiele von ausführlichen (links) und unrealistischen (rechts) Herstellerangaben zu den Anforderungen bezüglich Erschütterungen

Bei einer Messung sind die Abtastfrequenz und die Dauer einer Aufzeichnung entscheidende Parameter: Ist die Abtastrate zu tief, deckt die Messung eventuell nicht den gesamten relevanten Frequenzbereich ab. Ist die Dauer der Messung zu kurz, wird die Frequenzauflösung schlecht. Auch der Ort, wo die Anforderungen einzuhalten sind, muss definiert sein. Die Anforderungen sollten am besten an der Schnittstelle zwischen Bauwerk und Gerät definiert werden (unterhalb allfälliger immissionsreduzierenden Massnahmen wie geräteinterne Federn oder vorgegebenen Schwingungstischen).

Es sind genaue Angaben zu machen, wie die gemessenen Signale verarbeitet werden müssen. Dies betrifft die Angabe von zu verwendenden Filtern, Angaben zur Transformation in den Frequenzbereich (u.a. Länge des Zeitfensters oder Mittelungsdauer, Fensterfunktionen, Frequenzauflösung) und Angaben zur Mittelwertbildung (u.a. arithmetischer Mittelwert, energetischer Mittelwert, Max-Hold). Je nach Auswerteverfahren ergeben sich unterschiedliche Resultate, die bis zu einem Faktor 5 voneinander abweichen (siehe Kapitel 4).

Im Weiteren sind die Anforderungen prinzipiell gerätespezifisch. Auch hier gibt es Schwierigkeiten: Oftmals ist gar nicht bekannt, welche empfindlichen Gerätschaften in Zukunft eingesetzt werden. Sind die Geräte spezifiziert, können die Angaben der Gerätehersteller ungenügend oder unrealistisch sein (siehe Bild 3.1). Je nach Eigenschaft des Geräts (Eigenfrequenzen, Dämpfung, etc.) und durchzuführender Prozess (Dauer, einmalig oder repetitiv, etc.) sind ganz unterschiedliche Erschütterungsarten (impulsartig oder kontinuierlich) störend. Entsprechend muss das Auswerteverfahren für die Erschütterungsmessungen angepasst werden. Da meist nur der Hersteller über die notwendigen Kenntnisse verfügt, sollte prinzipiell er die erforderlichen Angaben zu Mess- und Auswerteverfahren bereitstellen.

Dies illustriert das folgende Beispiel: Man betrachtet ein erschütterungsempfindliches Gerät (z.B. Mikroskop) vereinfacht als Zweimassen-Schwinger mit entsprechenden Massen (M_1 , M_2), Eigenfrequenzen (f_{res1} , f_{res2}) und Dämpfungskonstanten (ξ_1 , ξ_2), wie in Bild 3.2 dargestellt.

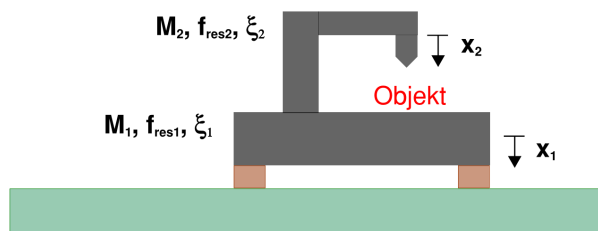


Bild 3.2 Vereinfachtes System, als Zweimassenschwinger idealisiert.

Untersucht werden zwei unterschiedliche Fälle der geräteinternen Dämpfung ξ_2 (stark und schwach gedämpft). Es wird die für eine äussere Störung für den Gerätenutzer relevante Relativverschiebung $x_1 - x_2$ (zwischen Objektiv und Objekt) für einen kurzen Puls und für eine längere Störung berechnet. Die Zeitverläufe sind in Bild 3.3 mit den zugehörigen Terzbandspektren mit unterschiedlichen Mittelungszeiten dargestellt. In Bild 3.4 ist die Relativverschiebung für die vier untersuchten Fälle dargestellt. Betrachtet man die Terzbandspektren der beiden unterschiedlichen Anregungen z.B. für eine Mittelungszeit von 1 Sekunde, so sind die Unterschiede in den Amplituden zwischen den beiden Fällen gross. Vergleicht man nun die Relativverschiebungen der beiden unterschiedlichen Anregungen für den Fall eines stark gedämpften internen Systems, dann sind die Unterschiede in den Amplituden der Relativverschiebung klein, während sie im schwach gedämpften Fall gross sind.

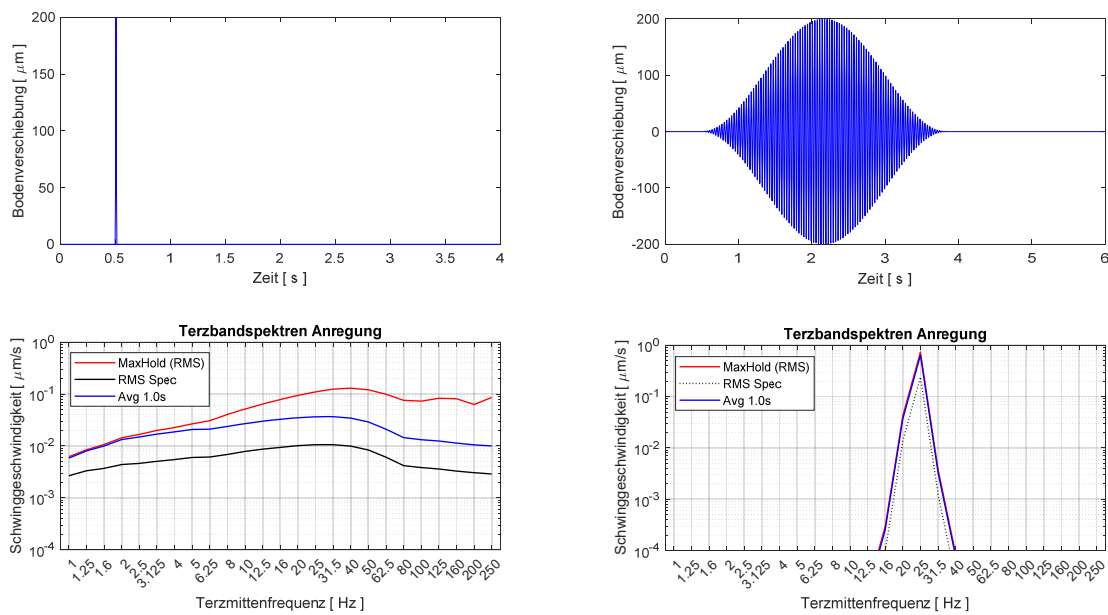


Bild 3.3 Anregung des Systems mit kurzem Puls (links) und mit langen Puls mit definierter Hauptfrequenz (rechts) und die zugehörigen Terzbandspektren.

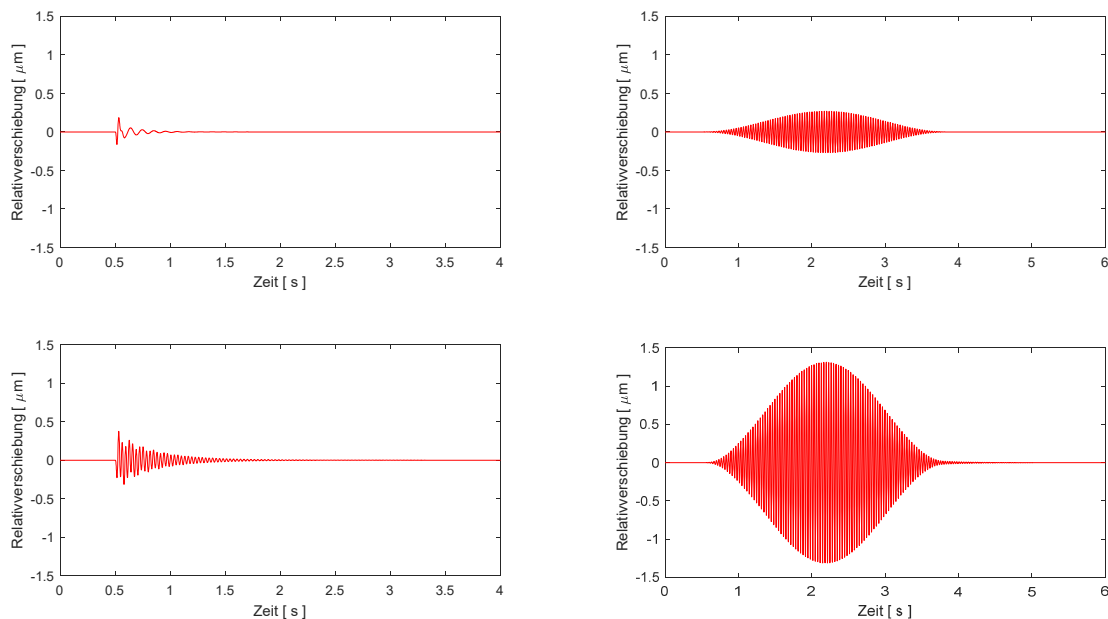


Bild 3.4 Relativverschiebung zwischen Objektiv und Objekt links für den kurzen und rechts für den langen Puls - oben jeweils für eine hohe interne Dämpfung und unten für ein schwach gedämpftes System.

Das Beispiel zeigt eindrücklich, dass die Wahl der Länge der Mittelungszeit für die Ermittlung der relevanten Terzbandspektren bei einer Standortbestimmung sowie das interne mechanische Verhalten des erschütterungsempfindlichen Gerätes miteinbezogen werden müssen. Letzteres ist jedoch lediglich dem Hersteller des Gerätes zugänglich.

Ein wichtiger Aspekt ist die Häufigkeit, mit der die verschiedenen Störungen auftreten. Wird der Output des Geräts durch Mittelung über eine Vielzahl von reproduzierbaren kurzzeitigen Ereignissen generiert, so spielt ein einzelnes kurzzeitiges Störsignal meist keine wesentliche Rolle oder wird als Ausreisser bei der Auswertung gar nicht berücksichtigt. Hingegen kann ein zu häufiges Auftreten der Störung einen sinnvollen Betrieb des Geräts unmöglich machen.

Wird der Output des Geräts durch Aneinanderreihen von einzelnen Messungen generiert (Bsp. Bildaufbau oder Film von zeitlichen Prozessen), so ist bereits ein einzelnes Störereignis nicht erwünscht und kann zu Fehlinterpretationen führen. Es hängt somit von den Abläufen der Laborarbeiten und Prozessen der Geräte ab, bei welcher Häufigkeit von Störereignissen ein reibungsloser Betrieb gewährleistet werden kann. Angaben über die Häufigkeit gehören ebenfalls zur Definition der Anforderung und müssen wiederum von Seiten des Bauherrn oder Nutzers festgelegt werden.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, dass es für die Festlegung der Anforderungen – wenn nicht durch Herstellerangaben der spezifizierten Geräte klar definiert – meist Fachkräfte bedarf. Oftmals sind Messungen bei baugleichen Gerätschaften erforderlich, um überhaupt Anforderungen für die projektierten Räumlichkeiten zu definieren. Neben dem Mess- und Auswerteverfahren müssen bei einer solchen Vergleichsmessung auch die vorhandene Bausubstanz und die Bodeneigenschaften am Standort bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden. Je nach Situation können durch eine Vergleichsmessung zu konservative Anforderungen resultieren.

Zur Definition der Anforderungen werden häufig die von Gordon vorgeschlagenen VC-Klasse (siehe Anhang) herangezogen. Neben der Angabe einer bestimmten VC-Klasse muss zusätzlich definiert werden, welche Art von Ereignissen zu berücksichtigen sind und wie diese ausgewertet werden müssen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es bei der Festlegung der Anforderungen mehr bedarf als nur der Angabe eines einzuhaltenden Grenzwerts oder einer VC-Klasse. Folgende Angaben sollten seitens Bauherrn / Gerätehersteller klar definiert werden:

- Grenzwert mit Angabe der Frequenz (auch in spektraler Form, klare Definition der Einheiten)
- Klare Angaben zu Messverfahren: Messdauer, Abtastrate
- Klare Angaben zu Auswerteverfahren je Ereignistyp: Filtern, Angaben zur Transformation in den Frequenzbereich sowie Länge des Zeitfensters, Fensterfunktionen, Frequenzauflösung, Angaben zur Mittelwertbildung wie arithmetischer Mittelwert, energetischer Mittelwert, Max-Hold (inkl. Definition)
- Angaben zu zulässigen Häufigkeiten

4 Erschütterungsquellen

4.1 Externe Quellen

Verkehr

Die Entfernung des Grundstückes zu Verkehrsflächen ist leicht aus Plänen (z.B. GIS) ersichtlich. Schienen- und LKW- bzw. Busverkehr stellen hier die grössten Erschütterungsquellen dar. Die Immissionen können direkt durch Messungen erfasst werden. Um einen aussagekräftigen Überblick über die Grösse und Charakteristik der Erschütterungsimmissionen zu erhalten, sollte mindestens während einer Zeitdauer von 24 Stunden gemessen werden, je nach Anforderung auch länger. Bei Schienenverkehrsanlagen ist wichtig, dass auch die Stosszeiten

erfasst werden. Zu diesen Zeiten sind oft auch ältere Fahrzeuge im Einsatz, welche mehr Emissionen verursachen können.

Als Beispiel sind in Bild 4.1 die gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten einer Zugdurchfahrt im Frei-Feld abgebildet. Bild 4.2 zeigt die zugehörigen Terzbandspektren mit unterschiedlichen Zeitfenster der Mittelung. Als Zeitfenster für die Mittelung werden Fenster mit Längen 0.5 s bis 16 s über das Signal gelegt, in definierten Schritten von Anfang zum Ende verschoben und innerhalb dieses Zeitfensters das Mittelwert Terzbandspektrum gebildet. Zwischen dem beiden Extremwerten (RMS- und MaxHold-Spektrum) liegt in diesem Beispiel der Faktor 5, oder 2 ½ VC-Klassen. Bei breiterer Verteilung der Erschütterungsenergie im Spektrum kann dieser Faktor auch deutlich höher liegen.

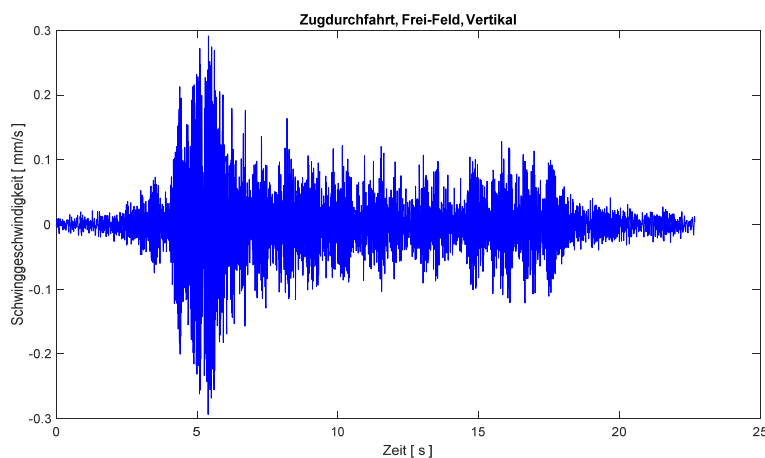


Bild 4.1 Vertikale Erschütterungen einer Zugdurchfahrt, gemessen im freien Feld.

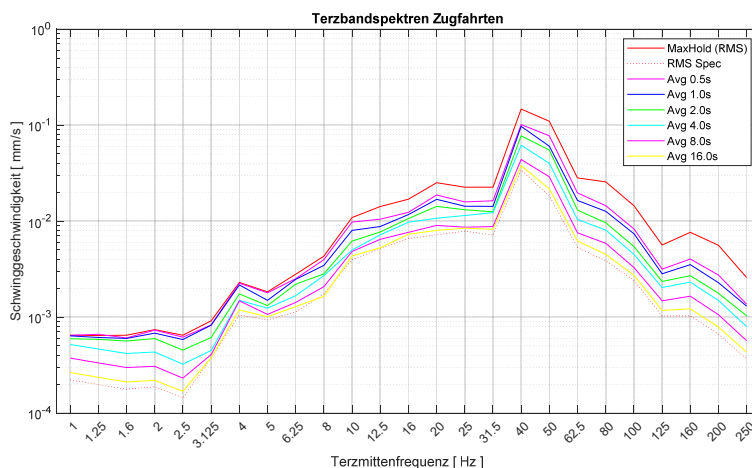


Bild 4.2 Terzbandspektren des in Bild 4.1 gezeigten Signales mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Die Erschütterungen aus dem Verkehr weisen typischerweise ihre Energiemaxima in einem Frequenzbereich auf, in welchem sich auch die Eigenfrequenzen der Geschossdecken befinden.

Betreffend zukünftiger Entwicklung muss immer auch daran gedacht werden, dass das Schienennetz (neue Gleise, Einbau von Weichen, udgl.), das Rollmaterial sowie die Trassen (Stras-

se und Schiene) einer zeitlichen Veränderung unterworfen sind, welche typischerweise kaum kontrollierbar ist.

Nachbarn und mögliche zukünftige Nachbarn

Sind auf den Nachbargrundstücken erschütterungsintensive Nutzungen vorhanden, so sind diese frühzeitig zu erfassen. Neben der Erschütterungsmessung auf dem Grundstück selber empfiehlt es sich auch, das Gespräch mit den Anrainern zu suchen, da es durchaus möglich ist, dass während der zeitlich begrenzten Messperiode gewisse Gerätschaften, die sich später als störend erweisen könnten, nicht erfasst werden. Insbesondere in Gewerbegebieten ist die Thematik mit erhöhter Aufmerksamkeit abzuklären. Als mögliche Quellen sind insbesondere Beton- und Kieswerke, Schrottplätze, Maschinenbaubetriebe mit Stanzwerkzeugen, grosse Motorenprüfstände, Kraftwerke, Pumpen etc. zu berücksichtigen.

Als Beispiel sind in Bild 4.3 gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten auf einem Gelände abgebildet. Es handelt sich dabei um die Erschütterung infolge eines Stanzbetriebes in ca. 100 m Entfernung. Bild 4.4 zeigt die zugehörigen Terzbandspektren mit unterschiedlichen Zeitfenstern der Mittelung. Zwischen den beiden Extremwerten (RMS- und MaxHold-Spektrum) liegt in diesem Beispiel der Faktor 2, somit bei einer VC-Klasse.

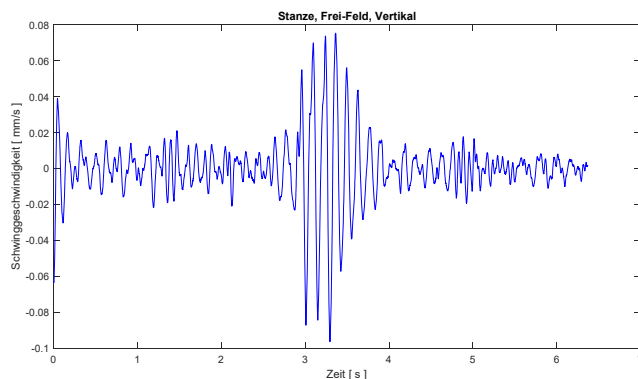


Bild 4.3 Vertikale Erschütterungen infolge einer Stanze in ca. 100 m Entfernung, gemessen im freien Feld.

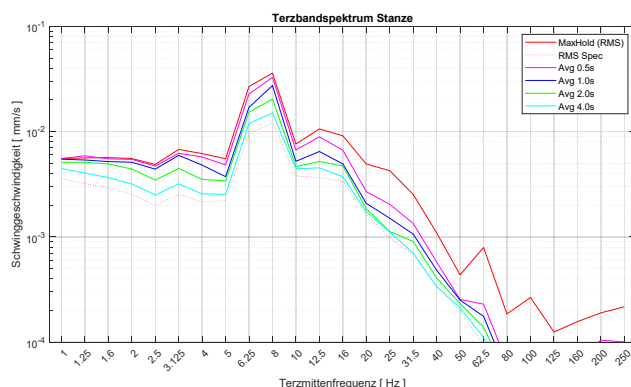


Bild 4.4 Terzbandspektren des in Bild 4.3 gezeigten Signales mit unterschiedlichen Mittelungszeiten.

Um ein umfassendes Bild der Erschütterungen vor Ort zu erhalten, sind Messungen von mindestens 24 Stunden empfehlenswert besser jedoch über mehrere Tage.

Sind die Nachbargrundstücke nicht bebaut oder findet in Zukunft eine Nutzeränderung statt, so ist dies in der Planung des eigenen Labors zu berücksichtigen, weil das Risiko besteht, dass eine erschütterungsintensive Nutzung in Zukunft die eigenen Arbeiten stören könnte. Rechtlich besteht kein Anrecht auf erhöhte Ruhe in der eigenen Parzelle, nur weil man selbst auf diese angewiesen ist.

Werden Erschütterungsmessungen zur Beurteilung des Standortes durchgeführt, so sind folgende Aspekte bei der Wahl der Lage und der Anzahl der notwendigen Messpunkte zu berücksichtigen:

- Erschütterungen sind zeitlich und örtlich variable Felder von Teilchenbewegungen in den drei Raumrichtungen. Die verschiedenen vorhandenen Erschütterungsquellen, die Reflexionen und Streuungen der Wellen an Flächen mit mechanischen Impedanzunterschieden (geologische Schichten, angrenzende Gebäude, ...) führen zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen im betrachteten Feld. Die führt örtlich zu entsprechend höheren oder geringeren Erschütterungsamplituden.
- Messungen sind zeitlich zwar kontinuierlich möglich, örtlich (in der Fläche und in der Tiefe) können jedoch nur wenige einzelne Punkte erfasst werden. Es gibt somit eine Unsicherheit dahingehend, ob wirklich die maximalen Amplituden gemessen werden.
- Bezüglich des Bodenaufbaus sind insbesondere Schichtungen mit grossen Impedanzunterschieden bezüglich der Erschütterungsausbreitung sorgfältig zu beurteilen.

Es ist auch möglich, dass während der Nutzungszeit des Gebäudes, Bauarbeiten auf den Nachbarparzellen oder an der angrenzenden Verkehrsinfrastruktur durchgeführt werden.

Wind

Wind ist ein stochastisches Ereignis und somit nur mit statistischen Verteilungen beschreibbar. Wind wirkt im Wesentlichen horizontal auf ein Gebäude ein und regt dieses turbulenzbedingt zu horizontalen Schwingungen an. Erhöhte Aufmerksamkeit ist dieser Erschütterungsquelle insbesondere dann zu schenken, wenn die Labors in den oberen Geschossen von hohen schlanken Gebäuden angeordnet werden. Da die Erschütterungen im Gebäude mit zunehmender Höhe zunehmen, sind erschütterungsempfindliche Bereiche in der Regel in den Untergeschossen oder in den unteren Geschossen eines Hochhauses anzuordnen.

4.2 Interne Quellen

Interne Quellen kann man in der Regel direkt kontrollieren.

Nutzung des Gebäudes durch Personen

Gehende Personen haben in der Regel Schrittfrequenzen um 2 Hz. Beim Auslegen des Tragwerkes ist darauf zu achten, dass die Eigenfrequenzen der Decken mindestens dem 6 oder eher 7-fachen der Schrittfrequenz entsprechen, damit die Struktur nicht in ihrer Eigenfrequenz angeregt wird. Zur Illustration sind in Bild 4.5 die vertikale Schwinggeschwindigkeit auf einer Decke mit der tiefsten Eigenfrequenz > 25 Hz abgebildet, wenn eine Person 2 Meter vom Sensor entfernt vorbei geht. Zu erkennen sind die Impulse der Fussauftritte ca. alle 0.5 Sekunden. Zwischen den Auftritten klingt die Schwingung sehr schnell wieder ab. Es fin-

det keine Aufschaukeln statt. In Bild 4.6 sind die vertikalen Schwinggeschwindigkeiten auf einer Decke mit 8.1 Hz Eigenfrequenz dargestellt, wenn eine Person mit 2 Hz 1 Meter neben dem Sensor vorbei geht. Klar zu erkennen ist das Aufschaukeln der Decke. Die effektive Amplitude der Erschütterung ist stark von der Dämpfung der Struktur abhängig. Diese ist per se nicht bekannt und kann nur konservativ abgeschätzt werden.

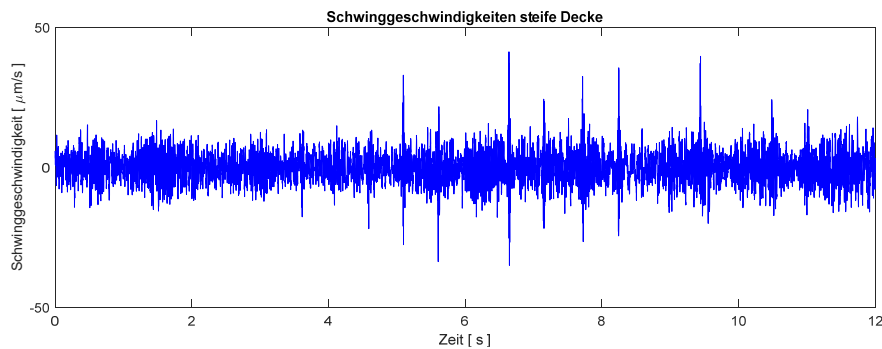


Bild 4.5 Schwinggeschwindigkeiten einer steifen Decke (Eigenfrequenz > 25 Hz), wenn eine Person 2 Meter neben dem Sensor vorbei geht.

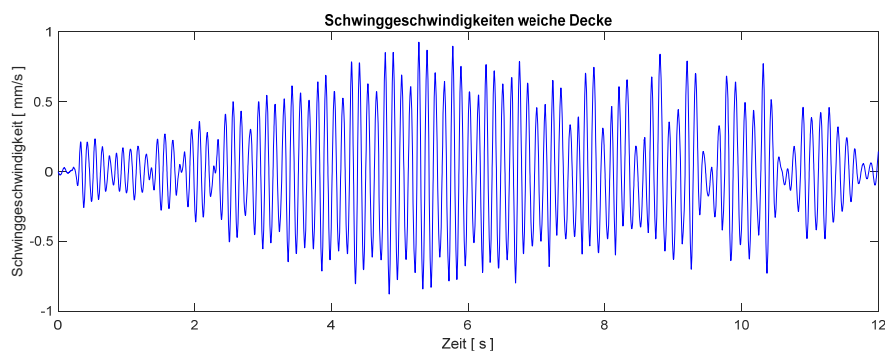


Bild 4.6 Schwinggeschwindigkeiten einer weichen Decke (8.1 Hz Eigenfrequenz), wenn eine Person 1 Meter neben dem Sensor vorbei geht.

Neben dem Resonanzproblem können auch die Erschütterungen der einzelnen Impulse der Fussauftritte massgebend sein. Die effektive Amplitude dieser Erschütterungen ist abhängig von der Masse der Person, der Beschaffenheit des Schuhwerkes, der Art des Bodens, der Steifigkeit und der Masse der Decke.

Oft werden kleine Transportwagen mit Lasten oder Palettenrollis durch die Gänge geschoben. Deren Anregung ist kaum bekannt. Es gilt, solche Anregungen durch fugenfreie Oberflächen und Wagen mit weichen Rädern (Luftreifen) zu minimieren. Emissionen von Tiefgaragen und Anlieferungen und weitere Quellen wie das Zuschlagen von Türen, Fenstern, und Schubladen oder sich setzende Personen sind zu beachten.

Haustechnikanlagen

Für die erschütterungsempfindlichen Geräte können insbesondere Haustechnikanlagen, welche auf oder unter derselben Decke montiert sind, störend sein. Folgende Anlagen sind beispielsweise zu betrachten:

- Umluftkühler
- Ventilatoren

- Kompressoren (Kälte und Druckluft)
- Grosse Pumpen
- Medienführende Leitungen
- Notstromaggregate
- Lift- und Hebeanlagen
- ...

Im Prinzip können die dynamischen Kräfte der einzelnen Anlagen problemlos an vergleichbaren Anlagen ermittelt werden. Es stellt sich aber sehr oft die Problematik, dass die tatsächlich einzubauenden Anlagen erst dann bekannt sind, wenn die Auftragsvergabe an den entsprechenden Unternehmer abgeschlossen ist, also oftmals erst nach Fertigstellung des Rohbaus.

Erschütterungsintensive Laborgeräte

Bei Laborarbeiten werden oftmals auch Geräte benötigt, welche als Erschütterungserzeuger zu bezeichnen sind. So emittieren Kühlaggregate, Zentrifugen, Laborrüttler und dgl. Erschütterungen, welche auf empfindliche Geräte störend sein können.

5 Erschütterungsprognosen

5.1 Externe Quellen

Umgebungserschütterungen

Die Prognose der zu erwartenden Erschütterungen auf den Deckenfeldern infolge der Umgebungserschütterungen ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Zwei unterschiedliche Ansätze sind hier erwähnt.

Die Prognose kann auf empirischen Modellen, basierend auf umfassender Erfahrung erfolgen. In der Regel bedient man sich dazu Transferspektren (Ankopplung Umgebung → Gebäudefundation, Verstärkung Fundation → Deckenfelder). Oft werden diese reduziert auf die Mittelwerte in den Terzbändern. Unterschiedliche unbekannte bzw. nicht genau bekannte Parameter dabei stark vereinfacht, was sich in der Prognosegenauigkeit widerspiegelt.

Alternativ werden zur Prognose auch aufwändige 3D - Simulationsmodelle mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente verwendet. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass viele der benötigten Angaben nur bedingt bekannt oder nicht exakt modellierbar sind. Erwähnenswert sind zwei Aspekte: Einerseits ist die Wirkung der nichttragenden Bauteile im Modell nicht wirklich abbildbar. Diese beeinflussen insbesondere bei den zu untersuchenden sehr kleinen Erschütterungsamplituden das dynamische Verhalten des Gebäudes erheblich. Andererseits sind die Erschütterungen der Umgebung, die ein zeitlich und örtlich variierendes Feld darstellen, nur an wenigen Stützstellen bekannt. In Realität erfolgt die Anregung jedoch flächig. Für Wellenlängen, welche kleiner oder im Bereich der Abmessung des Untergeschosses sind, ist die effektive Anregung schlicht nicht abbildbar.

Beide Ansätze haben ihre Stärken und Vorteile sowie aber auch ihre Ungenauigkeiten. Entscheidend dabei ist es, diese Prognoseunsicherheiten zu benennen, zu quantifizieren und mit den verantwortlichen Personen zu diskutieren.

Wind

Die dynamische Anregung des Gebäudes ist abhängig von der Windstärke (mittlere Windgeschwindigkeit), der Turbulenzintensität des Windes, der Gebäudeform und dessen dynamischen Eigenschaften. Die Windstärke, die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Windrichtung sind oft von staatlichen Institutionen wie z.B. der SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt) über einen ausreichenden Zeitraum (30 Jahre) und Auflösung (Sekundenspitzenwerte) zu beziehen. Die effektiven dynamischen Kräfte auf das geplante Gebäude können über Windkanalversuche (Geländemodell mit bebauter Umgebung) näherungsweise abgeschätzt werden. Zusammen mit den dynamischen Parametern des Gebäudes können die zu erwartenden Erschütterungen abgeschätzt werden. Entscheidend ist hier, dass in Absprache mit dem Bauherrn eine zu berücksichtigende Wiederkehrperiode der Windgeschwindigkeit definiert wird, bis zu der das Labor störungsfrei betrieben werden kann.

In eher flachen Gebäuden kann durch das Einbauen ausreichend langer und zahlreicher Tragwände das Gebäude soweit versteift werden, dass die Erschütterungen minimiert werden können. In hohen schlanken Gebäuden sind die statischen Möglichkeiten sehr begrenzt.

5.2 Interne Quellen

Nutzung des Gebäudes durch Personen

Es sind hier zwei Vorgehensweisen diskutiert, welche es erlauben die Erschütterungen infolge Personenverkehr abzuschätzen:

Messung an einer vergleichbaren Decke / Erfahrung: Die sicherlich zuverlässigste Abschätzung erhält man durch eine Messung an einer quasi baugleichen Decke. Dazu müssen die Eigenfrequenzen, die Deckenmasse und die Dämpfung mit der geplanten Decke gut übereinstimmen. Zudem ist dem Bodenbelag Beachtung zu schenken. Durch einfaches Messen der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten - verursacht durch Personen, die in unterschiedlichen Abständen zum Sensor vorbei gehen - gelangt man direkt zu den gefragten Schwinggeschwindigkeiten. Es ist zu empfehlen, unterschiedliche Szenarien (z.B. Schrittfrequenzen, Schuhwerk, ...) an mehreren Stellen auf der Decke zu untersuchen.

Simulation mit FEM: Viele der heute eingesetzten Finite-Element- Software-Pakete bieten die Möglichkeit, dynamische Lastfunktionen entlang von definierten Pfaden vorzugeben und das dynamische Verhalten der Decke durch numerische Zeitintegration zu ermitteln. Die Genauigkeit der ermittelten Resultate hängt stark davon ab, wie gut die dynamischen Kräfte bekannt sind (insbesondere Gewicht der Person, welches Schuhwerk getragen wird, welcher Bodenbelag eingesetzt ist) und wie umfassend die Struktur im Modell nachgebildet werden kann (z.B. Wirkung der nichttragenden Elemente, unbekannte Strukturdämpfung, ...). In Bild 5.1 sind das Simulationsmodell sowie die Gehstrecke und die Messpunkte abgebildet.

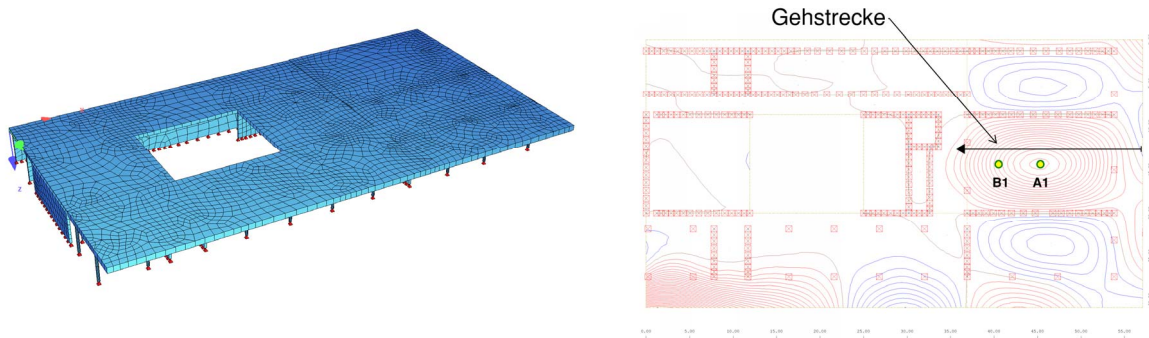


Bild 5.1 Ausschnitt aus dem Simulationsmodell (links). Simulationsmodell mit Gehstrecke, Messpunkten und hinterlegtem ersten Schwingungsmod bei 16 Hz (rechts).

In Bild 5.2 sind die numerisch ermittelten vertikalen Schwinggeschwindigkeiten an den Punkten A1 und B1 dargestellt. In den Schwinggeschwindigkeiten ist klar erkenntlich, dass die Deckeneigenfrequenz mit 16 Hz hoch genug ist, so dass die Decke nicht aufgeschaukelt werden kann. Die Erschütterungen infolge eines einzelnen Fussauftrittes klingen ab, bevor der nächste Auftritt erfolgt.

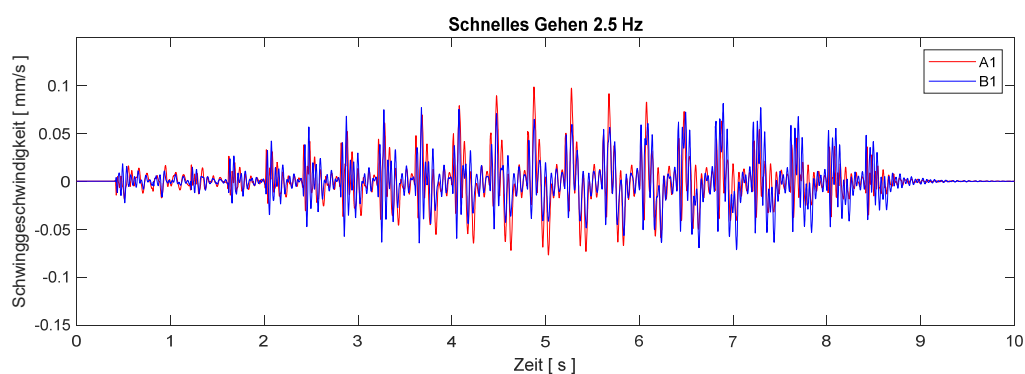


Bild 5.2 Numerisch ermittelte Schwinggeschwindigkeiten an den Punkten A1 und B1 während eine Person mit 2.5 Hz (= Schritte/Sekunde) relativ schnell neben den Messpunkten vorbei geht.

Haustechnikanlagen

Die dynamischen Kräfte von Haustechnikanlagen sind oft unbekannt und können vom Hersteller nicht geliefert werden. Diese Kräfte können aber relativ einfach experimentell bestimmt werden, indem die Erschütterungen am Aufstellort einer baugleichen Anlage gemessen werden. Parallel dazu wird die mechanische Admittanz der Tragstruktur am Aufstellort mit Hilfe eines Schwingungserregers oder eines Impulshammers gemessen. Aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten und der Admittanz können die dynamischen Kräfte ermittelt werden, welche die Anlage auf die Tragstruktur ausübt. Basierend auf diesen Kräften können am geplanten Standort die Erschütterungen prognostiziert werden.

6 Massnahmen

Ein frühzeitiger Miteinbezug eines Baudynamikers in den Planungs- und Bauprozess, eine adäquate Wahl des Standorts sowie des Raum-, Tragwerks- und Nutzungskonzepts kann die Notwendigkeit von immissionsreduzierenden Massnahmen bei erschütterungsempfindlichen

Laborgeräten minimieren. Ganz ohne zusätzliche Massnahme dürfte aber kaum ein Laborbau auskommen, da zum Betrieb des Labors meist auch erschütterungserzeugende Geräte erforderlich sind. Zu erwähnen sind z.B. Kältekompressoren, die idealerweise nahe beim erschütterungsempfindlichen Gerät platziert werden sollten.

Immissionsreduzierende Massnahmen können entweder bei der Quelle, auf dem Ausbreitungsweg oder beim Empfänger vorgesehen werden. Im Folgenden werden nicht alle Möglichkeiten aufgeführt, sondern lediglich einige Aspekte erwähnt, die gerne vergessen gehen.

Häufig sind erschütterungserzeugende Geräte wie z.B. Haustechnikanlagen in einer Vielzahl vorhanden, aber örtlich begrenzt angeordnet. Hier kann es wirtschaftlich sein, den gesamten entsprechenden Bereich elastisch vom restlichen Gebäude zu trennen. Zu beachten ist, dass auch alle Leitungsverbindungen entkoppelt werden. Bild 6.1 zeigt die elastische Lagerung einer Sockelplatte im neuen Biozentrum in Basel im Bauzustand, auf der ein Grossteil der Haustechnikanlagen montiert wird.

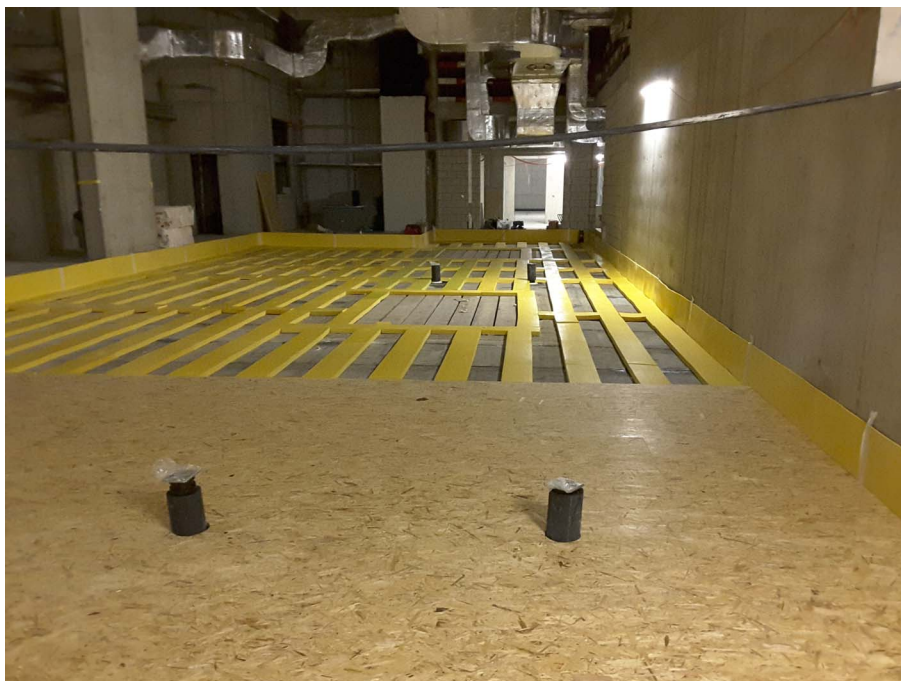


Bild 6.1 Bauzustand einer elastisch gelagerte Sockelplatte aus Beton im Bereich der Haustechnikanlagen.

Bei einer elastischen Lagerung einer gebäudeinternen Quelle ist darauf zu achten, dass die Abstimmfrequenz der Lagerung so gewählt wird, dass die Anregung durch die Maschine nicht noch zusätzlich verstärkt wird. Je nach Dämpfung bewirkt eine elastische Lagerung, dass die Anteile um die Abstimmfrequenz verstärkt werden, was je nach Gerätschaften im erschütterungsempfindlichen Bereich mehr Nachteile mit sich zieht als es Vorteile bringt. Eine Schicht mit geringer Dichte oder geringer Steifigkeit und somit grossem Impedanzunterschied zum Beton (z.B. elastische Gebäudelagerung oder Wärmedämmung unter dem Gebäude) hat zur Folge, dass die von gebäudeinternen Quellen verursachten Erschütterungen in der Gebäudestruktur bleiben. Je nach Art der Quelle kann es aber von Vorteil sein, wenn die Energie ins Erdreich abgestrahlt werden kann.

Um lokale elastische Lagerungen von Maschinen oder empfindlichen Geräten sinnvoll ausführen zu können, muss die Tragstruktur entsprechend ausgebildet sein. Decken mit hoher Steifigkeit und grosser Masse sind hierfür besser geeignet als weiche und leichte Decken. Die

Deckeneigenfrequenzen müssen grösser sein als die Abstimmungsfrequenz der elastischen Lagerung, ansonsten diese wirkungslos bleibt oder die Erschütterungen sogar verstärkt. Deckeneigenfrequenzen grösser als 15 Hz sind daher anzustreben. Eine grosse Masse hilft, Erschütterungen durch impulsartige Anregungen klein zu halten.

Es kann durchaus wirtschaftlicher sein, bei allen erschütterungserzeugenden Haustechnikanlagen generelle Massnahmen umzusetzen als bei jeder einzelnen Maschine zu entscheiden, ob Massnahmen erforderlich sind. Üblicherweise eingesetzte Haustechnikanlagen werden häufig auf einen Betonsockel (Höhe ca. 20 cm) auf Polyurethan-Elastomermatten (Höhe ca. 5 cm) mit einer Abstimmungsfrequenz von 10 bis 12 Hz gestellt. Schwere und grosse Anlagen müssen aber immer gezielt untersucht werden. Häufig sind hier allfällige maschineninterne Lagerungen zu beachten. Eine möglichst grosse elastisch gelagerte Sockelmasse (3- bis 5-mal die Masse der Anlage) ist u.a. für die Stabilität der Maschine erforderlich.

Als Massnahme zur Reduktion von gebäudeexternen Erschütterungen sei hier die Art der Fundation erwähnt. Ein möglichst grosses und steifes Fundament (z.B. gesamtes, genügend ausgesteiftes Untergeschoss) kann je nach Situation weniger empfindlich auf Erschütterungen reagieren, als Fundamentblöcke, die aus dem Gebäudefundament ausgeschnitten werden, da diese sich besser mit den Wellen im Boden bewegen können (Analogie zu kleinen und grossen Schiffen bei mittlerem Wellengang).

Bei den Massnahmen an erschütterungsempfindlichen Anlagen sei hier lediglich erwähnt, dass eine Vielzahl von passiven aber auch aktiven Systemen zur Schwingungsreduktion auf dem Markt zu finden ist. Hier gilt es, die Herstellerangaben kritisch zu hinterfragen.

7 Schlussbemerkung

Die Vielzahl der unterschiedlichen Aspekte mit Bezug zur Erschütterungsthematik zeigt die Komplexität von Bauprojekten mit Labors, an die hohe Anforderungen gestellt werden. Jeder Bau ist einmalig. Die Vorgehensweise muss projektspezifisch angepasst werden - ein Kochrezept gibt es nicht. Zur Bearbeitung sind sowohl seitens Bauherr und Nutzer wie auch seitens Planer und Baudynamiker ein profundes Verständnis der dynamischen Vorgänge und vertiefte Kenntnisse der Mess- und Auswerteverfahren erforderlich.

In allen Bereichen - angefangen bei der Festlegung der Anforderungen über die Beschreibung der Erschütterungsquellen bis hin zur Beschreibung des projektierten Baus - gibt es viele Unbekannte und somit grosse Unsicherheiten. Sensitivitätsanalysen, die Betrachtung von unterschiedlichen Szenarien und eine statistische Herangehensweise sind erforderlich, diese Unsicherheiten zu quantifizieren und als Entscheidungsgrundlage für den Bauherrn aufzubereiten. Die Aufgabe des Baudynamikers besteht darin, die relevanten Aspekte zu benennen, zu bearbeiten und die Planer und Bauherren über Möglichkeiten und Risiken zu informieren. Der Bauherr muss in den Prozess involviert werden, denn er entscheidet am Ende über die Umsetzung und trägt somit auch einen Teil der Verantwortung.

Literaturhinweise

VDI-Richtlinie 2038 Blatt 1 bis 3, Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen – Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Düsseldorf, 2012/2013

Gordon, C.G., Generic criteria for vibration-sensitive equipment, SPIE, vol. 1619, 1991, San Jose CA, pp.71-85

Anhang

Figure 1: Generic Vibration Criterion (VC) Curves for Vibration-Sensitive Equipment - Showing also the ISO Guidelines for People in Buildings (see Table 1 for description of equipment and uses)

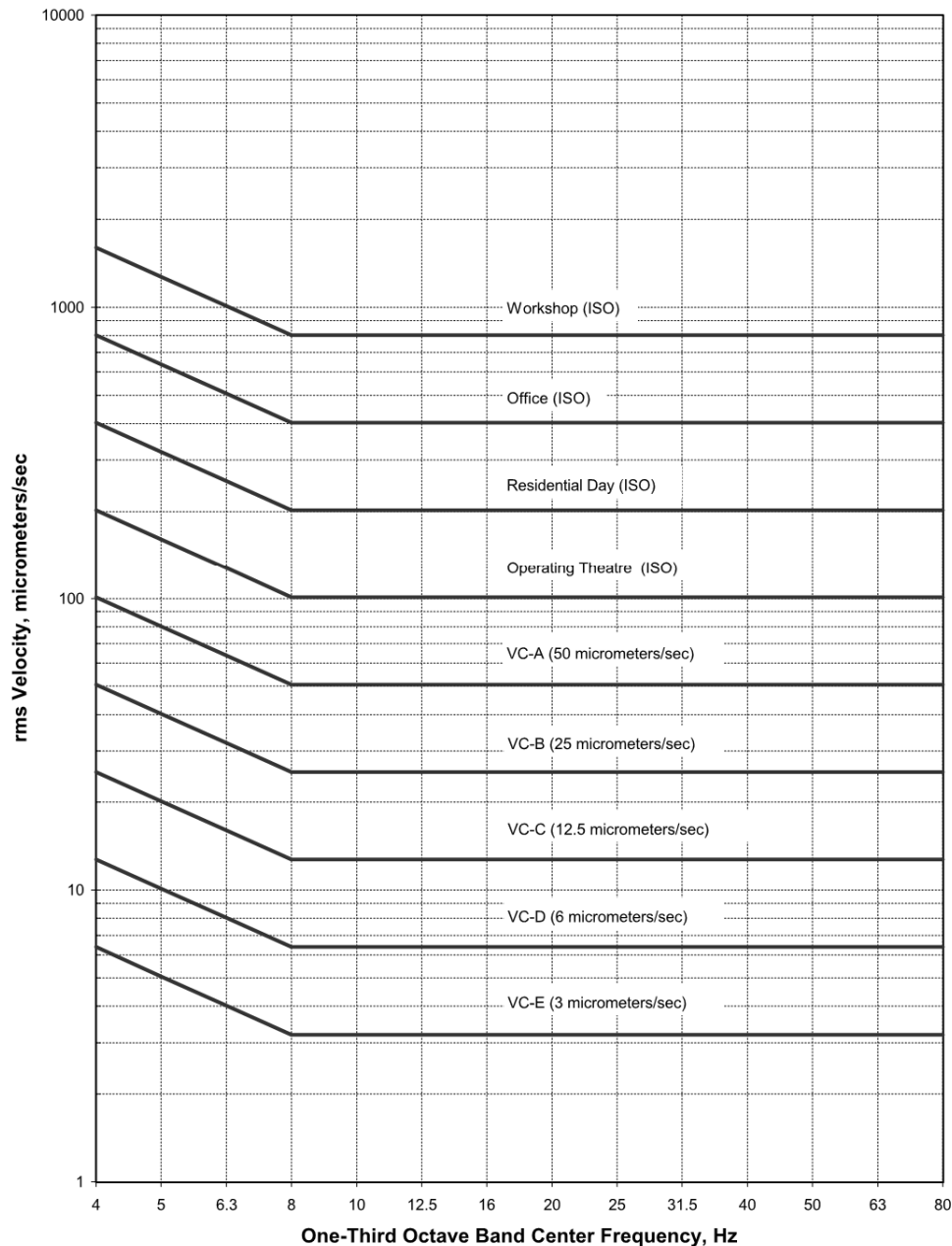


Bild A.1 VC-Kriterien nach Gordon

**Table 1: Application and interpretation of the
generic vibration criterion (VC) curves
(as shown in Figure 1)**

Criterion Curve (see Figure 1)	Max Level (1) micrometers/ sec,rms	Detail Size (2) microns	Description of Use
Workshop (ISO)	800	N/A	Distinctly feelable vibration. Appropriate to workshops and nonsensitive areas.
Office (ISO)	400	N/A	Feelable vibration. Appropriate to offices and nonsensitive areas.
Residential Day (ISO)	200	75	Barely feelable vibration. Appropriate to sleep areas in most instances. Probably adequate for computer equipment, probe test equipment and low-power (to 20X) microscopes.
Op. Theatre (ISO)	100	25	Vibration not feelable. Suitable for sensitive sleep areas. Suitable in most instances for microscopes to 100X and for other equipment of low sensitivity.
VC-A	50	8	Adequate in most instances for optical microscopes to 400X, microbalances, optical balances, proximity and projection aligners, etc.
VC-B	25	3	An appropriate standard for optical microscopes to 1000X, inspection and lithography equipment (including steppers) to 3 micron line widths.
VC-C	12.5	1	A good standard for most lithography and inspection equipment to 1 micron detail size.
VC-D	6	0.3	Suitable in most instances for the most demanding equipment including electron microscopes (TEMs and SEMs) and E-Beam systems, operating to the limits of their capability.
VC-E	3	0.1	A difficult criterion to achieve in most instances. Assumed to be adequate for the most demanding of sensitive systems including long path, laser-based, small target systems and other systems requiring extraordinary dynamic stability.

Notes:

(1) As measured in one-third octave bands of frequency over the frequency range 8 to 100 Hz.

(2) The detail size refers to the line widths for microelectronics fabrication, the particle (cell) size for medical and pharmaceutical research, etc. The values given take into account the observation that the vibration requirements of many items depend upon the detail size of the process.

Bild A.2 VC-Kriterien nach Gordon