

Mischnutzung auf dem Hochschulcampus

Daniel Gsell, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

Abstract

Auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich entsteht derzeit ein Gebäude für Quantenphysiklabors. Die Bodenplatten des Gebäudes sind bereits erstellt. Die geplanten Experimente stellen höchste Anforderungen an die Erschütterungsarmut – und das mitten auf einem stark frequentierten Campus mit Busverkehr und einer Versuchshalle des Bauingenieurwesens in unmittelbarer Nähe. Bereits in der Planungsphase wurden deshalb umfangreiche Messkampagnen und Prognoseberechnungen durchgeführt. Nun wurden über mehrere Tage hinweg Erschütterungsmessungen auf der Baugrubensohle vorgenommen, um das tatsächliche Erschütterungsniveau im entstehenden Bauwerk zu prüfen. Die Messungen zeigen, dass die Umgebungserschütterungen – insbesondere durch den Busverkehr – die Anforderungen in den Laboren nicht verletzen. Einzig Windanregungen eines benachbarten Gebäudes verursachen gelegentlich Erschütterungen, die über dem geforderten Niveau liegen können.

Parallel zur Planung des Physikgebäudes wurde in der benachbarten Bauhalle eine grosse Geotechnik-Zentrifuge installiert. Um die empfindlichen Messungen in den künftigen Physiklabors nicht zu stören, wurde die Zentrifuge mit einer sehr weichen elastischen Lagerung und hoher Trägheitsmasse ausgeführt. Erste Versuche und Messungen zeigen, dass die Erschütterungen durch diese Massnahmen wie geplant ausreichend reduziert werden konnten.

Zusätzlich wurde vom Institut für Baustatik und Konstruktion ein Hexapod beschafft, der derzeit provisorisch in der Bauhalle betrieben wird. Die Anlage kann im Frequenzbereich bis 100 Hz Massen von bis zu 2 Tonnen mit bis zu 9 g beschleunigen und erzeugt entsprechend hohe Erschütterungen. Um den Einfluss auf die Physiklabore zu klären, wurden Messungen und umfangreiche Simulationen durchgeführt. Diese zeigen deutlich, dass bei Betrieb des Hexapods an diesem Standort – selbst mit umfangreichen Massnahmen zur Reduktion der Emissionen – die Anforderungen an die Ruhe in den Physiklabors nicht eingehalten werden können. Ein alternativer Standort muss gefunden werden.

Die Kombination aus extrem empfindlichen Laboren und stark schwingungsintensiven Einrichtungen auf engem Raum stellt hohe Anforderungen an Planung und Koordination. Die Risiken gegenseitiger Beeinflussungen und deren Konsequenzen müssen bei der Standortwahl zwingend berücksichtigt werden.

Mischnutzung auf dem Hochschulcampus

Daniel Gsell, ZC Ziegler Consultants AG

0 Zusammenfassung

Auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich entsteht derzeit ein Gebäude für Quantenphysiklabors. Die Bodenplatten des Gebäudes sind bereits erstellt. Die geplanten Experimente stellen höchste Anforderungen an die Erschütterungsarmut – und das mitten auf einem stark frequentierten Campus mit Busverkehr und einer Versuchshalle des Bauingenieurwesens in unmittelbarer Nähe. Bereits in der Planungsphase wurden deshalb umfangreiche Messkampagnen und Prognoseberechnungen durchgeführt. Nun wurden über mehrere Tage hinweg Erschütterungsmessungen auf der Baugrubensohle vorgenommen, um das tatsächliche Erschütterungsniveau im entstehenden Bauwerk zu prüfen. Die Messungen zeigen, dass die Umgebungserschütterungen – insbesondere durch den Busverkehr – die Anforderungen in den Laboren nicht verletzen. Einzig Windanregungen eines benachbarten Gebäudes verursachen gelegentlich Erschütterungen, die über dem geforderten Niveau liegen können.

Parallel zur Planung des Physikgebäudes wurde in der benachbarten Bauhalle eine grosse Geotechnik-Zentrifuge installiert. Um die empfindlichen Messungen in den künftigen Physiklabors nicht zu stören, wurde die Zentrifuge mit einer sehr weichen elastischen Lagerung und hoher Trägheitsmasse ausgeführt. Erste Versuche und Messungen zeigen, dass die Erschütterungen durch diese Massnahmen wie geplant ausreichend reduziert werden konnten.

Zusätzlich wurde vom Institut für Baustatik und Konstruktion ein Hexapod beschafft, der derzeit provisorisch in der Bauhalle betrieben wird. Die Anlage kann im Frequenzbereich bis 100 Hz Massen von bis zu 2 Tonnen mit bis zu 9 g beschleunigen und erzeugt entsprechend hohe Erschütterungen. Um den Einfluss auf die Physiklabore zu klären, wurden Messungen und umfangreiche Simulationen durchgeführt. Diese zeigen deutlich, dass bei Betrieb des Hexapods an diesem Standort – selbst mit umfangreichen Massnahmen zur Reduktion der Emissionen – die Anforderungen an die Ruhe in den Physiklabors nicht eingehalten werden können. Ein alternativer Standort muss gefunden werden.

Die Kombination aus extrem empfindlichen Laboren und stark schwingungsintensiven Einrichtungen auf engem Raum stellt hohe Anforderungen an Planung und Koordination. Die Risiken gegenseitiger Beeinflussungen und deren Konsequenzen müssen bei der Standortwahl zwingend berücksichtigt werden.

1 Einleitung

Auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich entsteht derzeit das neue Physikgebäude HPQ. Das Team um Ilg Santer Architekten und Fürst Laffranchi Bauingenieure GmbH konnte 2016 den Architekturwettbewerb mit seinem Projektentwurf für sich entscheiden. Ziel des Wettbewerbs war ein städtebaulich, architektonisch und betrieblich optimales Forschungsgebäude für die Physik – mit hochkomplexen Technologieplattformen für die Quantenphysik. Das Projekt erfüllt zudem die hohen Anforderungen der Auftraggeberin an Städtebau, Architektur, Nutzung und Nachhaltigkeit.

Besonders das geplante Center for Low Noise Experiments (CLNE) stellt extreme Anforderungen an die Erschütterungsarmut. Das neue Gebäude liegt mitten auf dem Campus Höggerberg und ist damit vielfältigen Erschütterungsquellen ausgesetzt. Um den Anforderungen gerecht zu werden, sah das Wettbewerbsprojekt bereits vor, die empfindlichsten Labore direkt auf der Bodenplatte anzuordnen und diese so tief abzusenken, dass sie auf der tragfähigen Molasse, rund 25 Meter unter dem Geländeniveau, zu liegen kommt.

2 Erschütterungsquellen auf dem Campus ETH Höggerberg

Der Campus Höggerberg der ETH Zürich ist stark frequentiert und vielfältig genutzt. Unterschiedliche Aktivitäten und Infrastrukturen erzeugen Erschütterungen, die potenziell störend auf die empfindlichen Labore des HPQ-Gebäudes wirken können. Das Gebäude liegt zentral auf dem Campus (vgl. Bild 2.1). Die Erschliessung des Campus erfolgt hauptsächlich über den öffentlichen Busverkehr. Aufgrund der hohen Zahl an Personen auf dem Campus herrscht ein dichter Busfahrplan auf der Wolfgang-Pauli-Strasse. Neben dem Strassenverkehr entstehen durch den laufenden Betrieb auf dem Campus zahlreiche weitere Erschütterungsquellen, die in ihrer Gesamtheit ein beachtliches Erschütterungsniveau erzeugen.

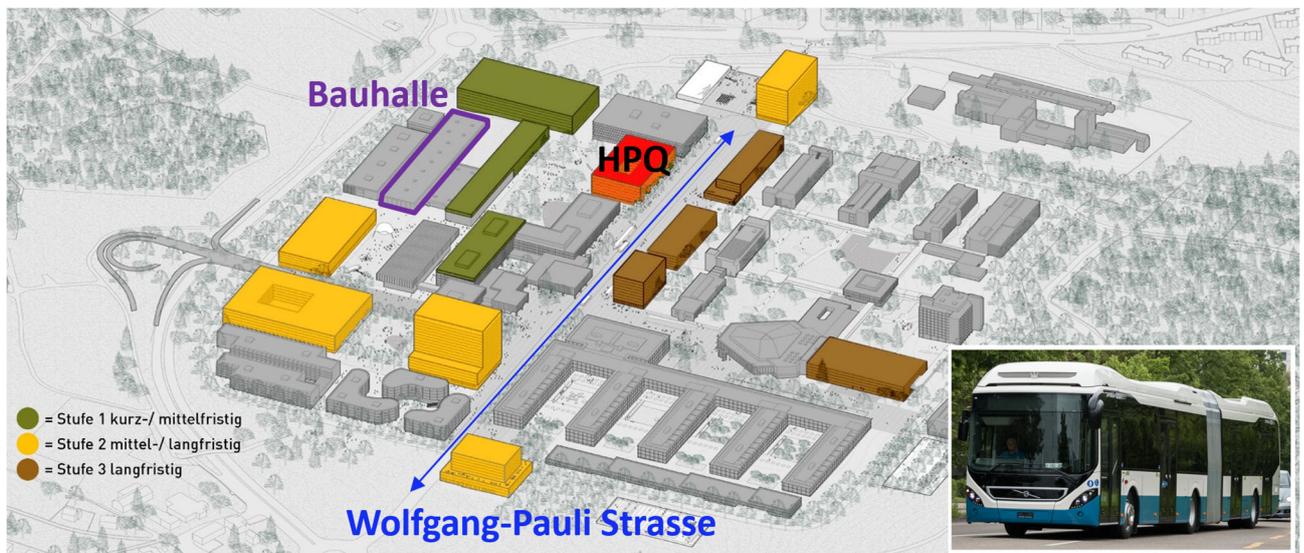


Bild 2.1 Situation auf dem Campus ETH Höggerberg

Besonders relevant ist die Versuchshalle des Departements Bau, die sich nur rund 80 Meter von den künftigen CLNE-Laboren entfernt befindet. Dort werden heute bereits verschiedene Grossversuche durchgeführt, die erhebliche Erschütterungen verursachen können. Drei exemplarische Anlagen sind (vgl. Bild 2.2):

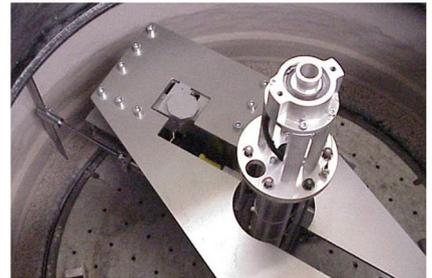
- **MAST** (Multi-Axial Subassembly Testing):
Diese Anlage ermöglicht quasistatische zyklische Versuche und hybride Simulationen an Tragwerksteilen in Originalgrösse. Die Steuerung erfolgt computergestützt mit sechs Freiheitsgraden.
- **LUSET** (Large Universal Shell Element Tester):
Hierbei handelt es sich um eine Prüfanlage für grossmassstäbliche Versuche an Stahlbeton-Schalenelementen mit Abmessungen bis 2.0 × 2.0 m. Die Elemente werden mittels 100 Hydraulikzylindern in ihrer Ebene sowie senkrecht dazu bis zum Bruch belastet.
- **Trommel Zentrifuge:**
In der früheren Trommel-Zentrifuge wurden skalierte geotechnische Versuche durchgeführt. Die rotierende Anlage läuft mit 13 Hz und erzeugt infolge unausweichlicher Massen-Exzentrizitäten spürbare Erschütterungen.



MAST: Prof. Stojadinovic



LUNET: Prof. Kaufmann



Zentrifuge: Prof. Springmann

Bild 2.2 Beispiele von Grossversuchen in der Bauhalle auf dem Campus ETH Hönggerberg

Während der Planungsphase des Gebäudes HPQ wurden neue Grossversuchsanlagen des Departements Bau der ETH Zürich in oder neben der bestehenden Bauhalle konzipiert und beschafft (vgl. Bild 2.3). Dabei handelt es sich einerseits um eine neue, gross dimensionierte Geotechnik-Zentrifuge des Instituts für Geotechnik (IGT) und andererseits um einen sogenannten Hexapod – eine Plattform mit sechs Freiheitsgraden – für das Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK).

Die neue Zentrifuge ist die leistungsstärkste ihrer Art in Europa. Sie kann Versuchskörper mit Beschleunigungen von bis zu 250 g testen. Der Hexapod ist in der Lage, Massen bis 2 Tonnen mit Beschleunigungen von bis zu 10 g bei Frequenzen bis 100 Hz nahezu beliebig zu bewegen.



Zentrifuge: Prof. [Anastasopoulos](#)
250g @ 4 Hz



Hexapod: Prof. [Chatzi](#)
10g @ 2 Hz – 100 Hz

Bild 2.3 Links die neue Zentrifuge des IBK und rechts der Hexapod des IBK.

Forschungsinfrastrukturen wie diese unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung – es ist deshalb davon auszugehen, dass künftig zusätzliche Grossversuchsanlagen hinzukommen werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Herausforderung, all diese Anlagen parallel zu den hochsensiblen Experimenten der Quantenphysik betrieben zu können, ohne sich gegenseitig zu stören.

3 Anforderungen an die Erschütterungen im Quantenphysiklabor

In der Regel werden bei Laborbauten die Erschutterungskriterien nach Colin G. Gordon («Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment») – bekannt als VC-Kurven – herangezogen. Die Quantenphysiker des Center for Low Noise Experiments (CLNE) haben jedoch eigene, deutlich strengere Anforderungen definiert. In Bild 3.1 sind die VC-Kurven VC-C bis VC-G sowie die CLNE-Anforderung dargestellt. Während VC-C bereits als sehr restriktiv gilt, liegen die zulässigen Erschütterungen im CLNE nochmals um den Faktor 100 darunter.

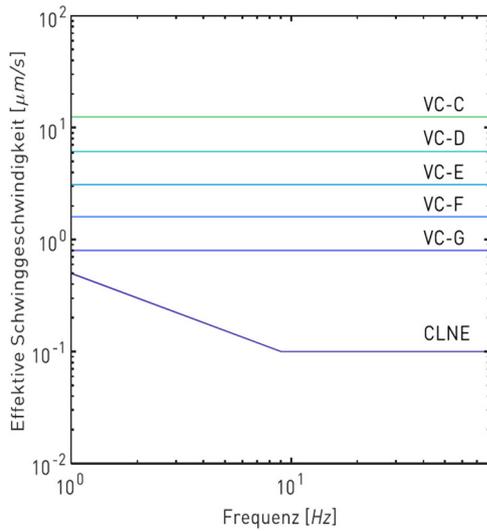


Bild 3.1 Anforderungen an die Ruhe, nach den VC-Kurven und die Anforderung im CLNE.

Auswerte Algorithmus

(Schwinggeschwindigkeiten)

- ... Zeitsignal unterteilen in 6 Sekunden Zeitfenster mit 50% Überlappung
- ... Multiplikation der einzelnen kurzen Zeitfenster mit einem Hanningfenster
- ... RMS-Terzbandspektren Bildung
- ... Amplitudenkorrektur (Energiekorrektur Hanning)
- ... Max. Hold Spektren in 180 Sekunden Zeitintervallen bilden über 24 Stunde
- ... im 24 Stunden 99.9% Fraktilwert eingehalten

Bild 3.2 Vorgehen beim Ermitteln der Terzbandspektren aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten.

Im CLNE sind grosse, gelagerte Laborplattformen vorgesehen. Es handelt um Betonblöcke von bis zu 120 Tonnen Gewicht welche auf aktiven Luftfedern gelagert sind. Die Luftfedern zusammen mit der Trägheitsmasse haben in der horizontalen Richtung eine Abstimmfrequenz von ca. 1.6 Hz und in vertikaler Richtung von 2.0 Hz. In den Bildern 3.3 und 3.4 sind die entsprechenden Übertragungsfaktoren vom Boden auf die Laborplattform in horizontaler und vertikaler Richtung dargestellt. Das theoretische Verhalten ist als orange Kurve dargestellt. Beim gewählten System wird die Resonanzüberhöhung der Luftfederung aktiv reduziert. Wobei das aktive System im tiefen Frequenzbereich ein Eigenrauschen aufweist, welches bei den im CLNE gestellten Anforderungen nicht zu vernachlässigen ist. Unter Berücksichtigung dieses Eigenrauschens würde für den Standort «Hönggerberg» eine garantierte Kurve (blau) vom Hersteller angegeben.

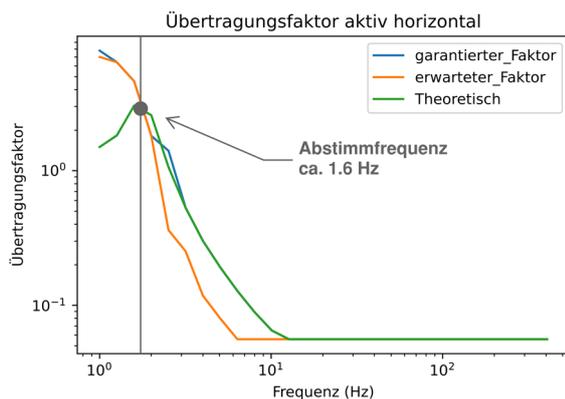


Bild 3.3 Übertragungsverhalten der auf Luftfedern gelagerten Laborplattform in horizontaler Richtung.

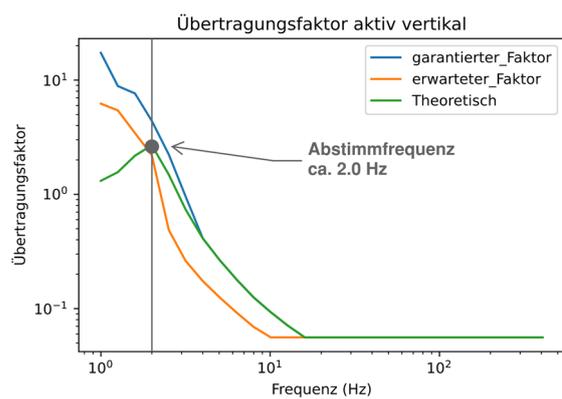


Bild 3.4 Übertragungsverhalten der auf Luftfedern gelagerten Laborplattform in vertikaler Richtung.

Mithilfe des bekannten Übertragungsverhaltens und der festgelegten Anforderungen auf der Plattform lassen sich die zulässigen Erschütterungen direkt am Boden des Labs ableiten. Bild 3.5 zeigt diese Grenzwerte für horizontale und vertikale Richtung.

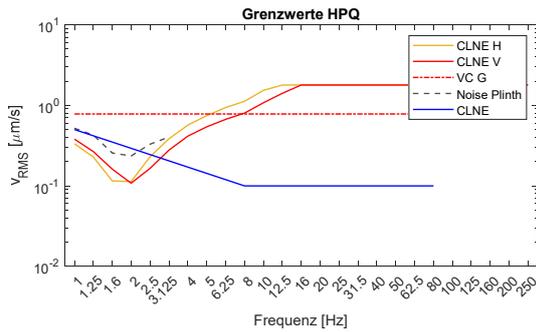


Bild 3.5 Zulässige Schwinggeschwindigkeiten auf der Bodenplatte des Gebäudes HPQ, so dass die Anforderung CLNE eingehalten ist.

4 Bei der Planung berücksichtigte Erschütterungsquellen

4.1 Erschütterungsprognosen in der Planung

Im Rahmen der Planung wurden insbesondere die Umgebungserschütterungen – wie der Busverkehr – sowie bestehende Versuchsanlagen und Tätigkeiten in der Bauhalle berücksichtigt. Die Firma GUD (Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin) führte während der Planungsphase umfangreiche Erschütterungsmessungen durch, unter anderem auch in mehreren Bohrlöchern in unterschiedlichen Tiefen. Diese Messdaten flossen gemeinsam mit aufwändigen, dreidimensionalen Finite-Element-Modellen in Prognosen der zu erwartenden Erschütterungsniveaus in den Laboren des HPQ ein, dies durch GUD und Fürst Laffranchi Ingenieure GmbH. Die Tragstruktur wurde daraufhin so optimiert, dass die Anforderungen auf allen Laborflächen bei allen relevanten Erschütterungsquellen eingehalten werden können.

4.2 Messung der Erschütterungen auf der Bodenplatte in der Baugrube

Im März 2025 erfolgte eine erste Überprüfung der Prognosen durch Erschütterungsmessungen. Über drei Tage hinweg wurden die Schwinggeschwindigkeiten an zwölf Messpunkten auf der Bodenplatte der Baugrube kontinuierlich aufgezeichnet.



Bild 4.2a Baugrube des Gebäudes HPQ vom Baugrubenrand.



Bild 4.2b Boden des CLNE in der Baugrube des Gebäudes HPQ.

Für die Auswertung wurden 30 Busdurchfahrten zur Stosszeit (18:30 bis 19:30 Uhr) herangezogen. In den Zeitreihen der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten (Bild 4.2c) lassen sich die einzelnen Durchfahrten gut erkennen – rot markiert für Busse auf der Wolfgang-Pauli-Strasse, grün für den Hönningerberg-Ring. Der Untergrund in der Baugrube bestand zum Zeitpunkt der Messung aus Magerbeton mit hohem Zementgehalt

auf der Molasse. Die zugehörigen Terzbandspektren (Bild 4.2d) zeigen, dass die CLNE-Anforderungen unter den gegebenen Bedingungen eingehalten werden.

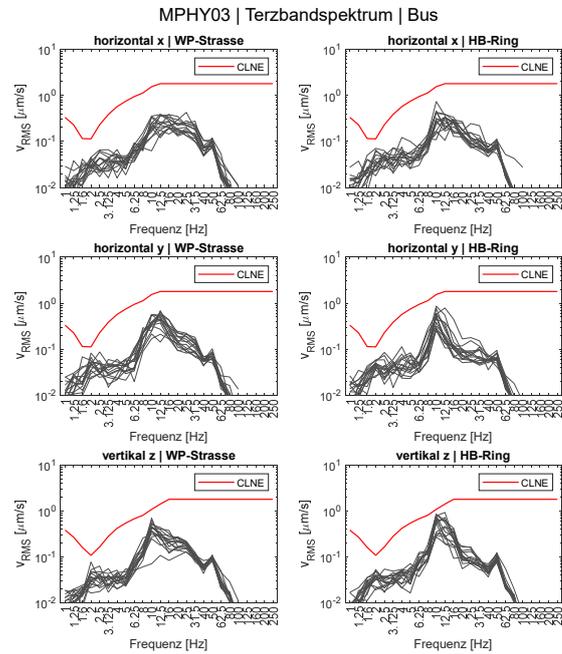
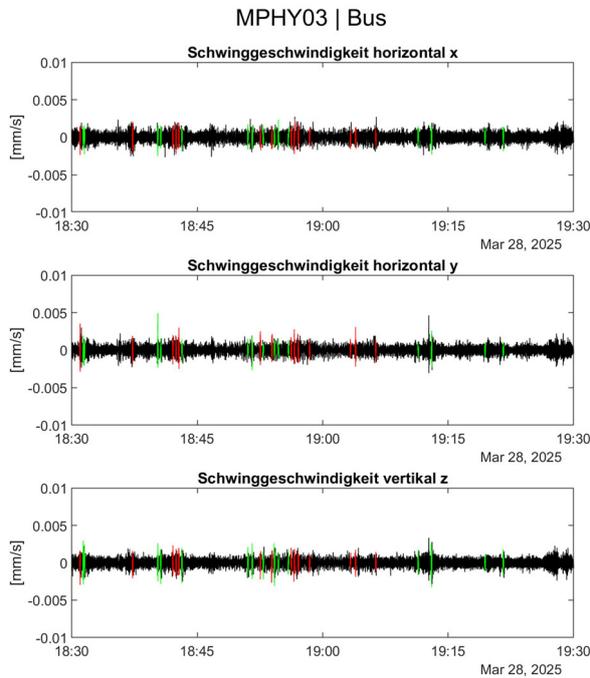


Bild 4.2c Gemessene Schwinggeschwindigkeiten auf der Baugrubensohle während der Busdurchfahrten.

Bild 4.2d Ermittelte Terzbandspektren der einzelnen Busdurchfahrten.

Bild 4.2e zeigt die Terzbandspektren der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten während 24 Stunden – beispielhaft für einen Messpunkt im Bereich des CLNE. Das Auswerteverfahren sieht vor, Terzbandspektren in 6 Sekunden Zeitfenstern mit 50 % Überlappung zu bilden, wobei die Zeitsignale vor der Transformation mit einem Hanning-Fenster multipliziert werden. Die gesamte Messzeit wird in 180 Sekunden-Intervalle unterteilt, in denen die Max-Hold-Terzbandspektren ermittelt werden (grau dargestellt), basierend darauf werden zudem statistische Aussagen wie Mittelwert und 99 % Fraktilwert gemacht.

In Bild 4.2e ist ersichtlich, dass in einzelnen Zeitintervallen von 180 Sekunden die CLNE-Anforderungen im Frequenzbereich von 2.0–2.5 Hz überschritten werden.

Während des 24-stündigen Messzeitraums wehte immer wieder ein kräftiger Wind mit einem mittleren Stundenwert von bis zu ca. 30 km/h. Gegen Abend nahm die Windgeschwindigkeit deutlich ab. In Bild 4.2f ist das Zeitintervall von 21:00 bis 24:00 Uhr dargestellt – ein Zeitraum mit schwächerem Wind. Deutlich erkennbar ist, dass die Spitzen im Frequenzbereich zwischen 2.0 und 2.5 Hz in dieser Phase wesentlich geringer ausfallen. Dies deutet darauf hin, dass der Wind als Anregungsquelle verantwortlich sein könnte.

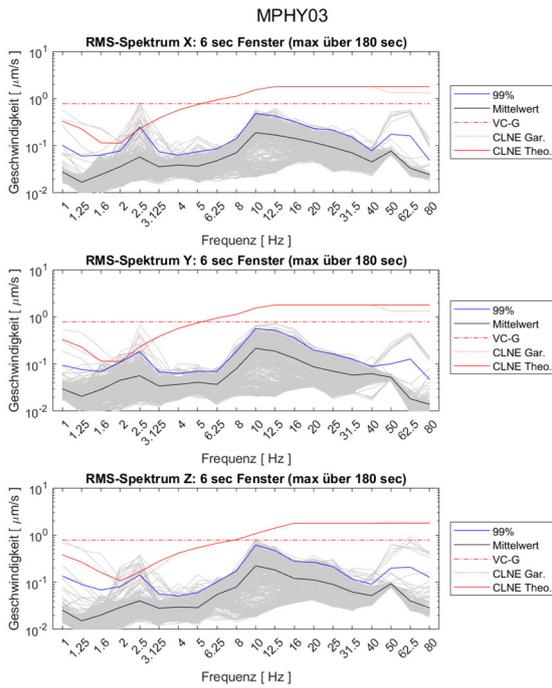


Bild 4.2e Terzbandspektren ermittelt während 24 Stunden auf der Baugrubensohle im Bereich des CLNE.

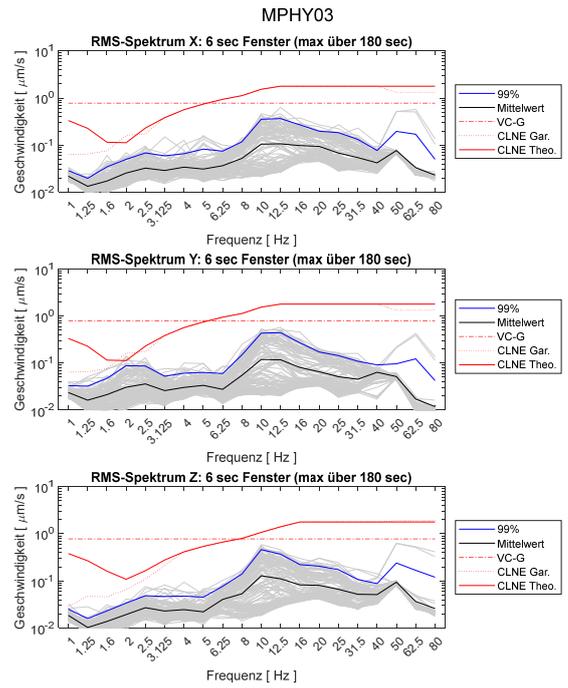


Bild 4.2f Terzbandspektren ermittelt während 3 Stunden OHNE Wind auf der Baugrubensohle im Bereich des CLNE.

In Bild 4.2e ist ersichtlich, dass in vereinzelt Zeitintervallen von 180 Sekunden, die Anforderung «CLNE» im Frequenzbereich zwischen 2.0 – 2.5 Hz überschritten wird.

In den 24 Stunden der Messung hat immer wieder ein eher kräftiger Wind geweht (Windgeschwindigkeit bis ca. 30 km/h Stundenmittel). Gegen Abend hat die Windgeschwindigkeit dann stark abgenommen. In Bild 4.2e ist nur das Zeitintervall von 21:00 Uhr bis 24:00 Uhr ausgewertet. Klar ersichtlich ist, dass die Spitze bei 2.0 – 2.5 Hz deutlich weniger stark vorhanden ist. Womit der Wind als Ursache wahrscheinlich wird.

Zur weiteren Ursachenabklärung wurden Messdaten auf dem Jahre 2018 aus dem angrenzenden Gebäude HIT (Bild 4.2g) analysiert. Betrachtet man die horizontalen Schwinggeschwindigkeiten im 4. Obergeschoss bei einer Impulsanregung neben dem Gebäude, so zeigt sich im Terzbandspektrum eine Eigenfrequenz des Gebäudes bei ca. 2.5 Hz (Bild 4.2 h). Dieses Resultat unterstützt die These, dass der Wind diese Eigenfrequenz anregt und die Auswirkungen als Erschütterungen in der Baugrube sichtbar sind. sich um windinduzierte Gebäudeschwingungen handelt.

Die Messungen zeigen, dass die Anforderungen im CLNE und in den anderen Räumlichkeiten des HPQ grundsätzlich eingehalten werden können. Die Anregung durch Wind und mögliche Massnahmen sind jedoch noch vertieft zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Situation bezüglich der Erschütterungen im Endzustand noch etwas verändern wird. So bringt die Masse und die interne Steifigkeit des Gebäudes HPQ im Endzustand eine Reduktion der Erschütterungen, während im Endzustand die Busse deutlich näher am Gebäude vorbeifahren, die Fahrbahn aber sicher in einem besseren Zustand sein wird.

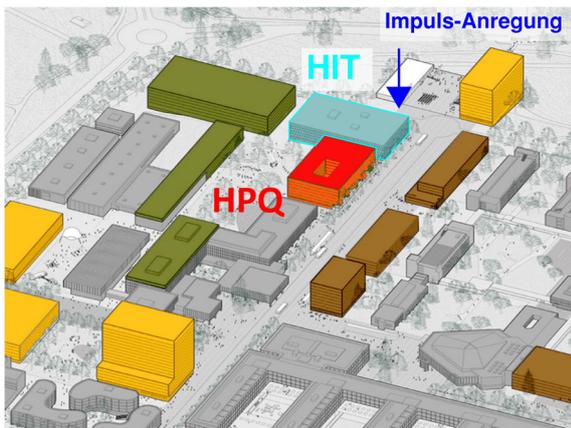


Bild 4.2g Gebäude HIT, welches vom Wind angeregt wurde.

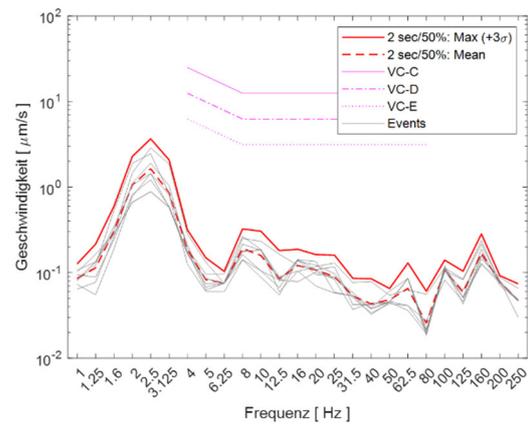


Bild 4.2h Terzbandspektren gemessen im 4. Obergeschoss in horizontaler Richtung, bei Impulsanregungen Busdurchfahrten

5 Neue Zentrifuge IGT

5.1 Beschreibung Versuchsanlage

In der Planungsphase des Gebäudes HPQ hat das Institut für Geotechnik (IGT) eine neue Zentrifuge für dimensionsskalierte geotechnische Versuche beschafft. Die Anlage wurde in einem neu erstellten Untergeschoss realisiert, das sich zwischen der Bauhalle und dem zukünftigen Gebäude HPQ befindet. Der Abstand zur Baugrube des HPQ beträgt rund 70 Meter (siehe Bild 5.1a).

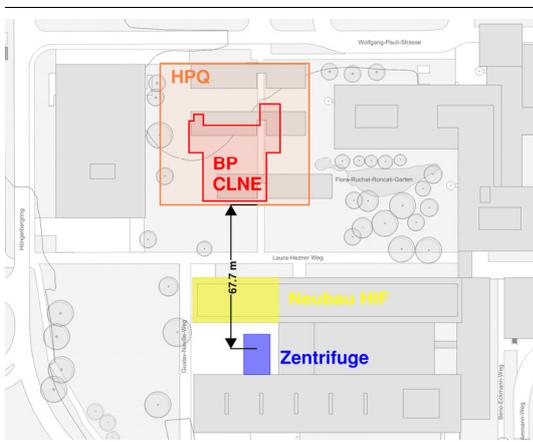


Bild 5.1a Situationsplan ETH Höggerberg mit Zentrifuge und HPQ.



Bild 5.1b neue Zentrifuge im entkoppelten Betonzylinder

Die Zentrifuge besteht aus einem massiven, rotierenden Stahlbalken mit einem Durchmesser von 9 Metern. An dessen Enden sind zwei Stahlgondeln montiert – eine davon dient als Träger für den Versuch, die andere als Gegengewicht zur Auswuchtung. Jede Gondel kann mit bis zu 2 Tonnen beladen werden. Bei einer maximalen Drehzahl von 240 U/min entsteht eine radiale Beschleunigung von 250 g. Schon kleine Unwuchten im Kilogramm-Bereich führen dabei zu erheblichen dynamischen Kräften, die in den Baugrund eingeleitet werden. Da die typischen Anregungsfrequenzen zwischen 1.5 und 3.0 Hz liegen, also genau im Bereich der Abstimmfrequenzen der Laborplattformen des CLNE, wurde entschieden, die Zentrifuge in horizontaler Richtung besonders weich zu lagern. Eine horizontale Abstimmfrequenz von ca. 0.3 Hz wurde angestrebt. Um die Eigenbewegung zu begrenzen, wurde eine Trägheitsmasse von 240 Tonnen eingeplant. Die Anlage wird in einem flachen Betonzylinder aufgestellt, der an vier Punkten auf Federpaketen mit Dämpferelementen gelagert ist (vgl. Bild 5.1c und 5.1d).

Trotz der weichen elastischen Lagerung sind aufgrund der strengen Anforderungen des CLNE Unwuchten von lediglich 10 kg zulässig. Eine sorgfältige Auswuchtung ist daher unerlässlich.

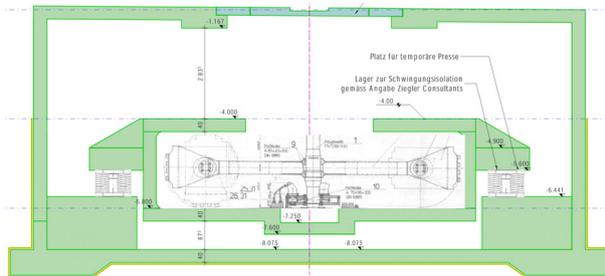


Bild 5.1c Querschnitt durch das Untergeschoss mit dem elastisch gelagerten Betonzylinder und der Zentrifuge.

Bild 5.1d Einheben des Betonzylinder in das Untergeschoss mit den 4 Federpaketen (gelb-schwarz in den Ecken des UG2)

5.2 Erschütterungsmessung in der Baugrube HPQ bei Betrieb der Zentrifuge

Nach Feierabend, in der Zeit von 19:45 bis 20:05 Uhr – also bei eher ruhigen Umgebungsbedingungen – wurde die Zentrifuge unter typischer Unwucht in Betrieb genommen. Die Gondeln wurden stufenweise auf bis zu 150 U/min beschleunigt. Bei Drehzahlen von 30, 60, 90, 120 und 150 U/min wurde jeweils mindestens 60 Sekunden konstant betrieben. Die Erschütterungen wurden gleichzeitig in der Baugrube des HPQ aufgezeichnet.

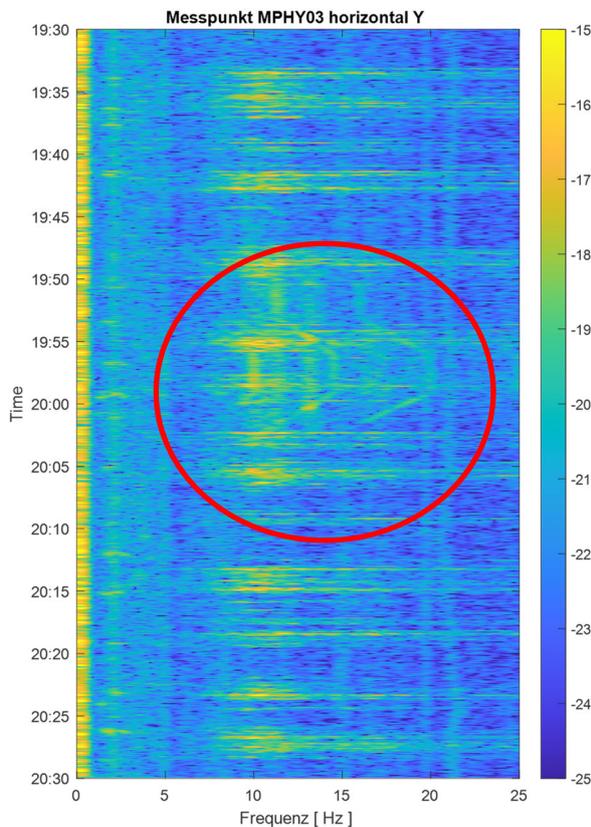


Bild 5.2a Spektrogramm aus den gemessenen horizontalen Schwinggeschwindigkeiten auf der Baugrubensohle.

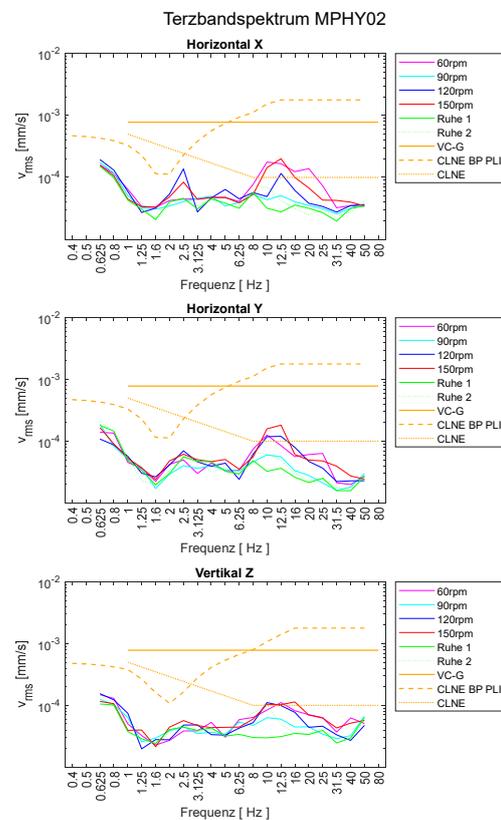


Bild 5.2b Terzbandspektren bei unterschiedlichen Drehzahlen der Zentrifuge

Bild 5.2a zeigt das Spektrogramm der horizontalen Schwinggeschwindigkeiten. Die Erregung durch die Zentrifuge ist nur schwach in den höheren Harmonischen der Drehfrequenz erkennbar (roter Kreis in Bild 5.2a). In den Transferspektren (vgl. Bild 5.2b) lässt sich zeigen, dass die Zentrifuge die Grenzwerte der CLNE-Anforderungen gut einhält. Die dort sichtbare Spitze bei 2.5 Hz in der X-Richtung ist – bei einer Anregung von 2.0 Hz (entsprechend 120 U/min) – nicht durch den Zentrifugenbetrieb verursacht, sondern vermutlich durch windinduzierte Schwingungen des Gebäudes HIT bedingt.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die elastische Lagerung wie geplant wirkt: Die in den Baugrund eingeleiteten Kräfte werden auf unter 1 kN reduziert. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass die zulässige Unwucht von 10 kg nicht überschritten werden darf und die Auswuchtung entsprechend aufwändig bleibt.

6 Hexapod

6.1 Beschreibung der Anlage

Das Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) hat einen Hexapod beschafft, der derzeit provisorisch in der Bauhalle betrieben wird (vgl. Bild 6.1a). Es handelt sich dabei um eine dynamische Prüfplattform mit sechs Freiheitsgraden. Zusammen mit dem Gewicht der bewegten Teile – der Plattform selbst und Teilen der Hydraulikzylinder – werden bis zu 2'000 kg beschleunigt. Der Hexapod kann in allen drei Raumrichtungen Beschleunigungen von bis zu 90 m/s^2 erzeugen, was maximalen Kräften von über 200 kN entspricht, die in den Baugrund eingeleitet werden.



Bild 6.1a Hexapod.

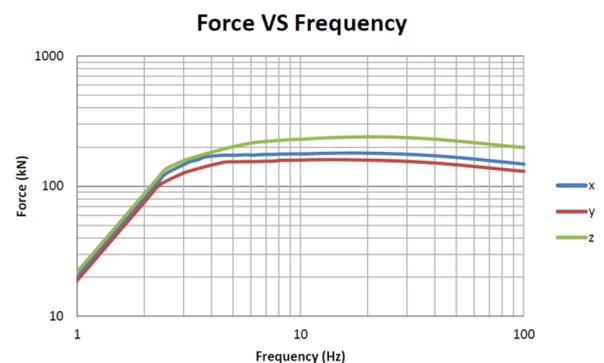


Bild 6.1b maximale Kräfte vom Hexapod

6.2 Versuche und Messungen

Zur Beurteilung der Auswirkungen wurden in einem ersten Schritt Erschütterungsmessungen in der heutigen Aufstellungssituation durchgeführt. Der Hexapod wird derzeit auf dem Aufspannboden der Bauhalle betrieben, allerdings noch mit provisorischer Servohydraulik – daher konnten die vollen Beschleunigungen noch nicht gefahren werden.

Die Anlage wurde nacheinander in den drei Raumrichtungen angeregt, jeweils mit Sinussignalen bei Frequenzen von 1, 2, 4, 8, 16, 32 und 64 Hz – mit möglichst hohen Anregungskräften. Die Erschütterungen wurden gleichzeitig auf der Baugrubensohle im Bereich des CLNE aufgezeichnet. Ziel war es, eine diskrete Admittanzkurve zu bestimmen, mit der sich – basierend auf den zulässigen Schwinggeschwindigkeiten – die maximal zulässigen Erregerkräfte ableiten lassen.

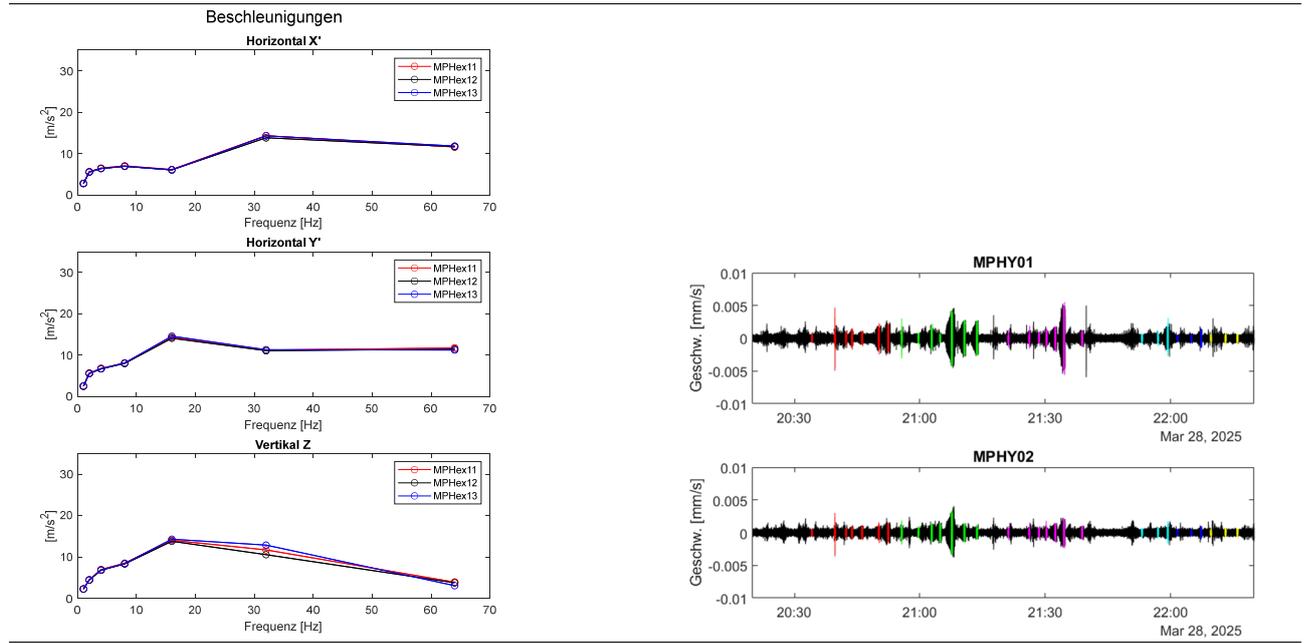


Bild 6.2a Gefahrene Beschleunigungen des Hexapods.

Bild 6.2b Gemessene horizontale Schwinggeschwindigkeiten CLNE

6.3 Ergebnisse der Messungen

In Bild 6.3a sind die Terzbandspektren der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten dargestellt – verglichen mit den Anforderungen des CLNE. Die Erregung durch den Hexapod ist bei allen getesteten Frequenzen klar sichtbar. Bereits bei nur ca. 15 % der maximal möglichen Leistung überschreiten die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten in mehreren Frequenzbereichen deutlich die zulässigen Grenzwerte.

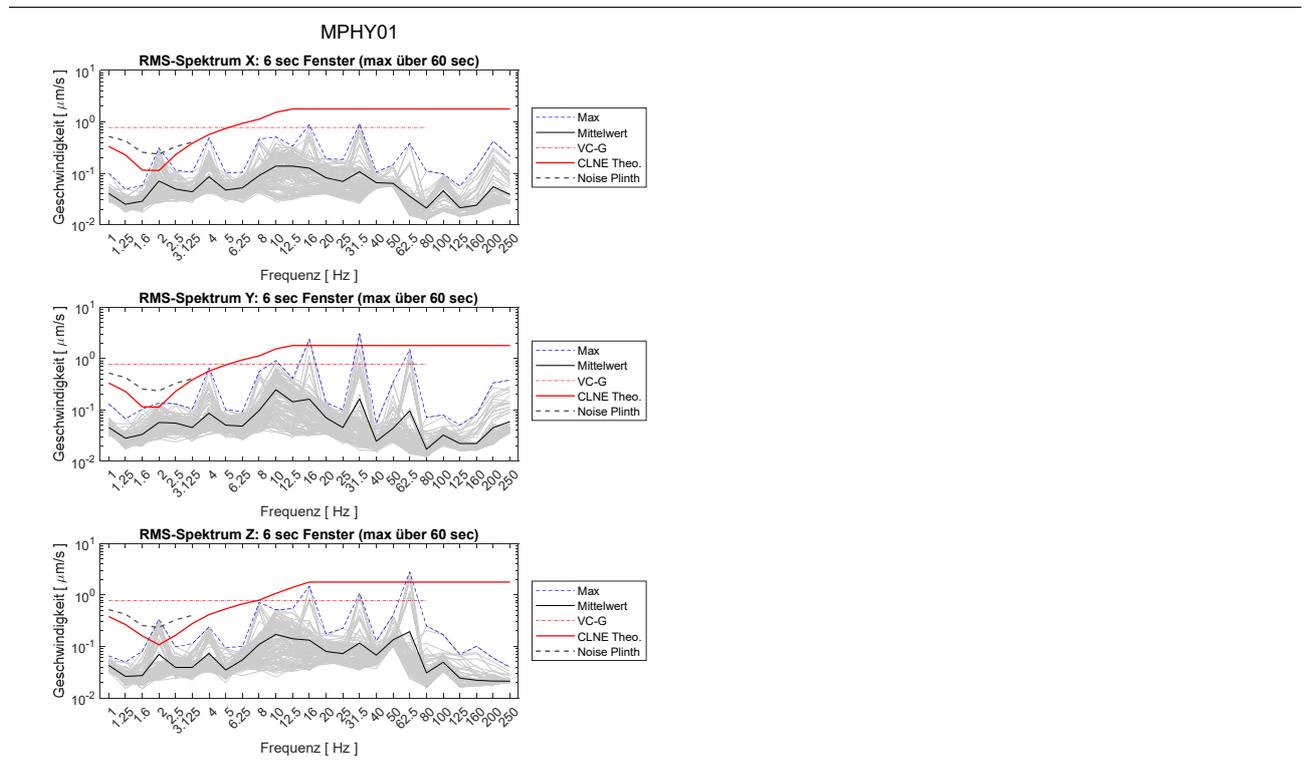


Bild 6.3a Terzbandspektren in der Baugrube (CLNE) während dem Betrieb des Hexapods.

6.4 Numerische Untersuchung möglicher Standorte

Es wurde eine Lösung für den Betrieb des Hexapods gesucht, dazu wurden mehrere Varianten möglicher Standorte in der Bauhalle mit unterschiedlicher Fundamentausbildung betrachtet, um zu klären wo und wie der Hexapod in Zukunft aufgestellt werden könnte, so dass die Physikexperimente nicht gestört werden, während der Hexapod betrieben wird. Neben der Lagerung auf einer kräftigen Bodenplatte (3 m stark) wurde auch eine Variante mit grosser Trägheitsmasse (250 Tonnen), welche Luftfedern gelagert ist, untersucht. Die Abstimmfrequenzen der Lagerung betragen 0.6 Hz in die horizontale und 1.6 Hz in die vertikale Richtung. Für diese Untersuchungen wurde ein grosses dreidimensionales Modell der Bauhalle und der Umgebung inklusive der Baugrube des Gebäudes HPQ erstellt. In Bild 6.4a ist der modellierte Bereich dargestellt. Einerseits ist die Ausdehnung des Modells sehr gross und andererseits müsste ein Frequenzbereich bis 100 Hz untersucht werden. Dies bedingt sehr viele, entsprechend kleine Volumenelemente im Modell wodurch die Rechenzeit extrem hoch würde. Daher wurden die Parameter so gewählt, dass Frequenzen bis ca. 30 Hz plausibel abgebildet werden können.

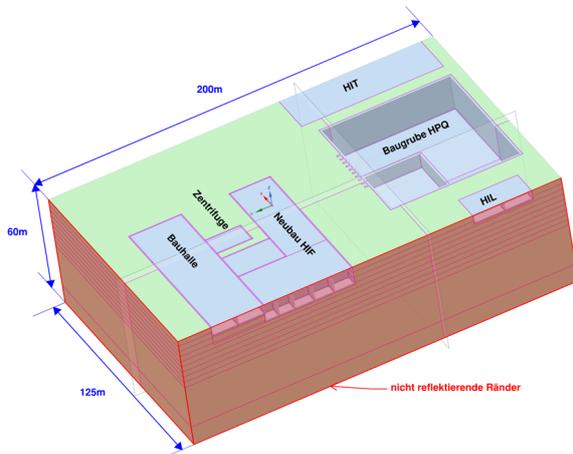


Bild 6.4a Modellierter Bereich

6.5 Zulässige Kräfte

Die Modelle wurden mit Impulskräften in allen drei Raumrichtungen angeregt, um Transferfunktionen zu bestimmen. Daraus wurden die maximal zulässigen Erregerkräfte abgeleitet, bei denen die Anforderungen des CLNE eingehalten werden. Bei der Variante „Kräftiges Fundament“ sind im unteren Frequenzbereich lediglich Kräfte bis ca. 10 kN zulässig – das entspricht etwa 5 % der maximalen Hexapod-Leistung. Bei der Variante „Luftfederlagerung“ sind oberhalb von 5 Hz deutlich höhere Kräfte (über 200 kN) zulässig. Im Bereich der Abstimmfrequenzen der Lagerung (1–3 Hz) hingegen wären nur 1–2 kN zulässig – sowohl wegen der Resonanzverstärkung als auch wegen der grossen Bewegungen der Trägheitsmasse.

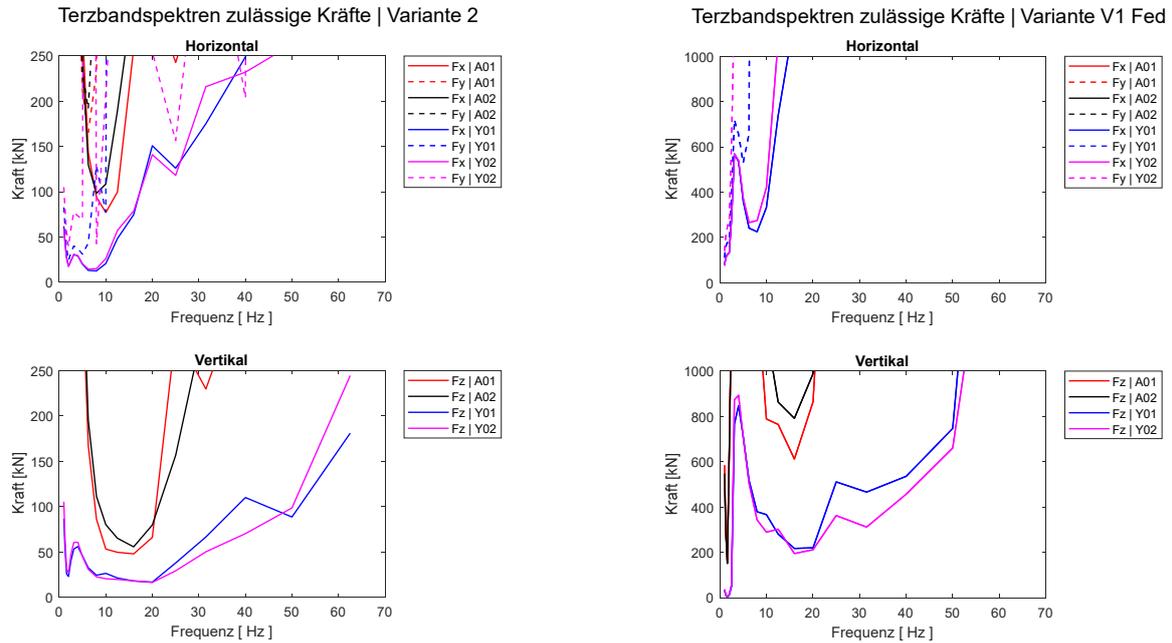


Bild 6.5a Zulässige Kräfte im Spektralbereich (oben horizontal und unten vertikal) bei der Variante «Kräftiges Fundament»

Bild 6.5b Zulässige Kräfte im Spektralbereich (oben horizontal und unten vertikal) bei der Variante «Luftfederlagerung»

6.6 Fazit

Selbst bei optimierter Lagerung ist ein störungsfreier Betrieb des Hexapods in unmittelbarer Nähe des CLNE nicht möglich. Besonders problematisch sind Experimente mit hohem Energieeintrag im Frequenzbereich von 1–3 Hz – wie sie typischerweise bei Erdbebensimulationen auftreten.

Unter der Voraussetzung, dass die CLNE-Grenzwerte jederzeit eingehalten werden müssen und der Hexapod sein volles dynamisches Potenzial ausschöpfen soll, ist klar: Für den Betrieb ist ein alternativer Standort erforderlich, der ausreichend grosse Entfernung zum HPQ aufweist.

7 Schlussfolgerung

Der Entscheid, das neue Quantenphysikgebäude (HPQ) mitten auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich zu realisieren, bringt in Bezug auf Erschütterungen erhebliche Herausforderungen mit sich. Die Kombination aus hochsensiblen Laboren – insbesondere im Center for Low Noise Experiments (CLNE) – und benachbarten, teils stark erschütterungsintensiven Forschungseinrichtungen ist in dieser Dichte ungewöhnlich und erfordert eine besonders sorgfältige Planung.

Die umfangreichen Messungen und Modellierungen zeigen:

- Die Umgebungserschütterungen, insbesondere durch den Busverkehr, bleiben auch im realen Betrieb unterhalb der zulässigen Grenzwerte. Einzelne kurzzeitige Überschreitungen im Bereich 2.0–2.5 Hz sind auf Windanregungen eines Nachbargebäudes zurückzuführen. Diese sind zwar lokalisiert, sollten aber weiter beobachtet und ggf. mit gezielten Massnahmen begegnet werden.
- Die neue Geotechnik-Zentrifuge wurde unter erheblichem ingenieurtechnischem Aufwand so konzipiert und gelagert, dass ihre Erschütterungsemissionen im relevanten Frequenzbereich deutlich reduziert werden konnten. Die Messergebnisse belegen, dass das Ziel erreicht wurde: Die

Grenzwerte des CLNE werden eingehalten. Die Anforderungen an die Unwuchttoleranz sind jedoch sehr streng, was einen grossen Aufwand bei Betrieb und Auswuchtung bedeutet.

- Der Hexapod hingegen stellt eine kaum lösbare Konfliktsituation dar. Selbst unter Einsatz grosser Trägheitsmassen und elastischer Lagerungen mit tiefen Abstimmfrequenzen ist ein konformer Betrieb in der Nähe des HPQ nicht möglich..

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Das CLNE ist aus erschütterungstechnischer Sicht erfolgreich in die komplexe Umgebung integriert worden – unter der Bedingung, dass neue Störquellen rechtzeitig erkannt und bewältigt werden.
- Die Zentrifuge demonstriert, dass auch anspruchsvolle, potenziell störende Forschungseinrichtungen mit geeigneten Massnahmen integrierbar sind.
- Der Hexapod hingegen überschreitet die betrieblich zulässigen Erschütterungsgrenzwerte so deutlich, dass nur eine Verlegung an einen neuen, deutlich entfernten Standort in Frage kommt.

Für künftige Forschungsinfrastrukturen mit hoher dynamischer Aktivität ist auf dem Campus Höggerberg eine übergeordnete, koordinierte Planung erforderlich, die die Standorte und Interaktionspotenziale systematisch bewertet. Nur so lassen sich Konflikte künftig vermeiden und sowohl hochsensible als auch grossmassstäbliche Forschung nachhaltig nebeneinander realisieren.