

Entwicklung schwingungsisolierter Gerätefundamente für hochgradig erschütterungssensitive Rasterelektronenmikroskope

Dipl.-Ing. Dr.techn., **Michael Reiterer**, REVOTEC zt gmbh, Wien;
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., **Rainer Flesch**, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien;

Kurzfassung

Die Technische Universität Wien errichtet derzeit auf dem Gelände des österreichischen Atominstutits in der Stadionallee 2 ein neues Institutsgebäude. Im Kellergeschoss des Gebäudes werden in Bezug auf Erschütterungsimmissionen hochsensible Rasterelektronenmikroskope betrieben und die Untersuchung der zur Sicherstellung des störungsfreien Betriebs erforderlichen erschütterungsdämmenden Maßnahmen wurde bereits in der Planungsphase des Gebäudes beauftragt. Im Artikel werden die örtlichen Anlageverhältnisse des Gebäudezubaus, die maßgebenden Erschütterungsquellen und die Ergebnisse von durchgeführten Immissionsmessungen vor Baubeginn dargelegt. Auf Grundlage der durchgeführten Messungen wurden Maßnahmen für den Erschütterungsschutz der Rasterelektronenmikroskope und für die Raumaufführung entwickelt und diese werden im Artikel ebenfalls beschrieben.

Abstract

Currently the Vienna University of Technology constructs a new institute building at the location of the Austrian nuclear institute at the Stadionallee 2. Several high vibration sensitive scanning electron microscopes are placed at the basement of the building and hence, the investigation of necessary vibration insulation measures has been contracted within the design phase of the new building. In this paper the local site conditions at the area of the new institute building, the leading vibration sources and the results of conducted vibration immission measurements before start of any construction work are presented. Measures for the protection against vibrations at the position of the scanning microscopes at the basement of the building were developed based on the results of the conducted immission measurements and they are also described in this paper.

1. Einleitung

Am Gelände des Atominstutts der Technischen Universität Wien in 1020 Wien, Stadionallee 2, wird derzeit ein mehrgeschossiger Gebäudezubau errichtet. Im Kellergeschoss dieses Gebäudezubaus werden mehrere Messräume mit hochgradig erschütterungssensitiven Rasterelektronenmikroskopen ausgeführt und diese werden nach Fertigstellung von der Universitären Service-Einrichtung für Transmissions-Elektronenmikroskope (USTEM) der TU Wien für Lehre, Forschung und Erbringung von Dienstleistungen genutzt. Zur Sicherstellung des störungsfreien Betriebes der Rasterelektronenmikroskope wurden vom Bauherrn bereits in der Planungsphase des Gebäudezubaus erschütterungstechnische Untersuchungen beauftragt und der derzeitige Stand dieser Arbeiten wird im vorliegenden Artikel von den Autoren präsentiert.

2. Örtliche Anlageverhältnisse und maßgebende Erschütterungsquellen

In der Abbildung 1 ist ein Lageplan des Geländes des Atominstutts mit textlichen Hinweisen zum Standort des derzeit in Bau befindlichen neuen USTEM Gebäudes dargestellt (grün markiert). Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt werden im USTEM Gebäude zukünftig „hoch erschütterungssensible“ Forschungstätigkeiten mit Rasterelektronenmikroskopen durchgeführt und diese weisen mit $< 0,50 \mu\text{g}$ bei der Terzbandmittenfrequenz von 1,25 Hz sehr hohe Anforderungen an den Erschütterungsschutz auf. Als maßgebende Erschütterungsquelle wurde der Verkehr auf der Stadionallee und hierbei insbesondere die täglich in einer hohen Anzahl stattfindenden Busvorbeifahrten identifiziert.

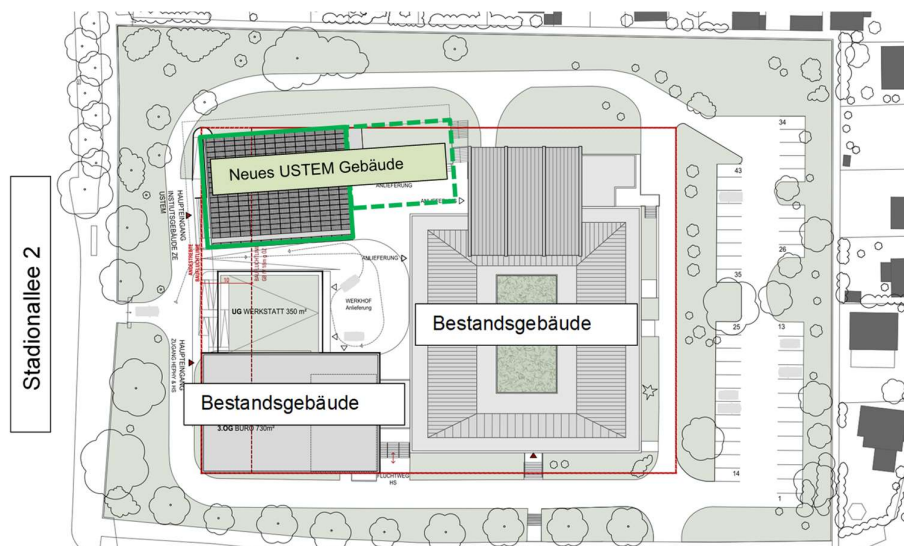


Abbildung 1: Lageplan Gelände des Atominstutts der TU Wien in 1020 Wien mit Darstellung der Bestandsgebäude und des in Bau befindlichen neuen USTEM Gebäudes

In der Abbildung 2 ist das Kellergeschoss des derzeit in Bau befindlichen USTEM Gebäudes dargestellt. Die „hoch erschütterungssensiblen“ Räume des Kellergeschosses, in denen die Arbeiten mit den Rasterelektronenmikroskopen durchgeführt werden, sind in der Abbildung „orange“ eingefärbt.

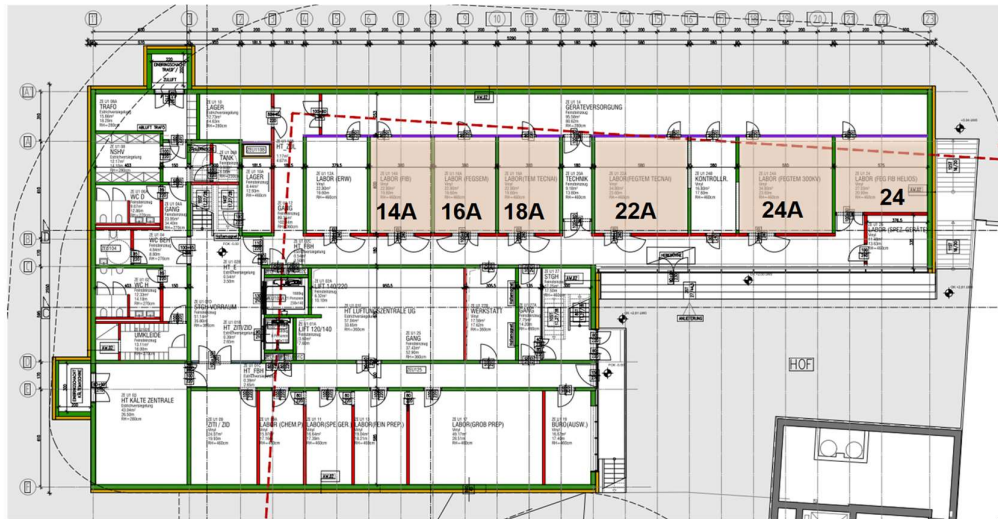


Abbildung 2: Lageplan Gelände des Atominstututs der TU Wien in 1020 Wien mit Darstellung der Bestandsgebäude und des in Planung befindlichen USTEM Gebäudes

Mit der in Abbildung 2 im jeweiligen Messraum eingetragenen Raumnummer lässt sich zuordnen, welches Rasterelektronenmikroskop im jeweiligen Raum aufgestellt wird. In den dargestellten Messräumen werden nämlich die folgenden unterschiedlichen Typen von Rasterelektronenmikroskopen betrieben:

- Raum **ZE U1 14A**_DBFIB Quanta 3D_Magnetfeld_Vibration
- Raum **ZE U1 16A**_FEGSEM Quanta 200_Magnetfeld_Vibration
- Raum **ZE U1 24**_FEGFIB HELIOS_Magnetfeld_Vibration
- Raum **ZE U1 24A**_FEGTEM 300kV_Magnetfeld_Vibration
- Raum **ZE U1 22A**_FEGTEM Tecnai F20_Magnetfeld_Vibration
- Raum **ZE U1 18A**_TEM Tecnai G2 20_Magnetfeld_Vibration

Das Rasterelektronenmikroskop mit den höchsten Anforderungen an den Erschütterungsschutz ist das Gerät FEGTEM 300kV und für dieses Gerät werden im Abschnitt 3 die zulässigen Grenzbeschleunigungen im Terzband angegeben.

3. Zulässige gerätespezifische Grenzbeschleunigungen im Terzband

Für jedes der in Abschnitt 2 angeführten Rasterelektronenmikroskope wurden vom AG Gerätedatenblättern zur Verfügung gestellt und in diesen sind die Grenzwerte der zulässigen RMS-Schwingbeschleunigung für Vibrationen in vertikaler Z-Richtung, horizontaler X-Richtung (Left to Right Vibration) und horizontaler Y-Richtung (Front to Back Vibration) in der Form von Terzspektren definiert. Wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt wurde, sind die strengsten Anforderungen an den Erschütterungsschutz bei dem Gerät FEGTEM 300kV gegeben. In der Abbildung 3 ist daher das Grenzwertspektren für dieses Gerät im maßgebenden Bereich von 1 Hz bis 40 Hz sowie im Detail nochmals von 1 bis 6,3 Hz dargestellt. Man erkennt, dass bei den Terzmittenfrequenzen $\leq 2,5$ Hz eine maximale vertikale RMS-Schwingbeschleunigung von $< 1 \mu\text{g}$ zulässig ist.

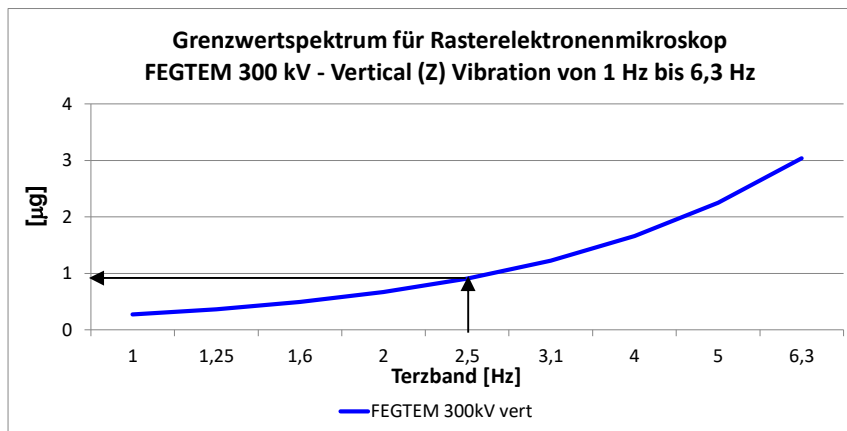
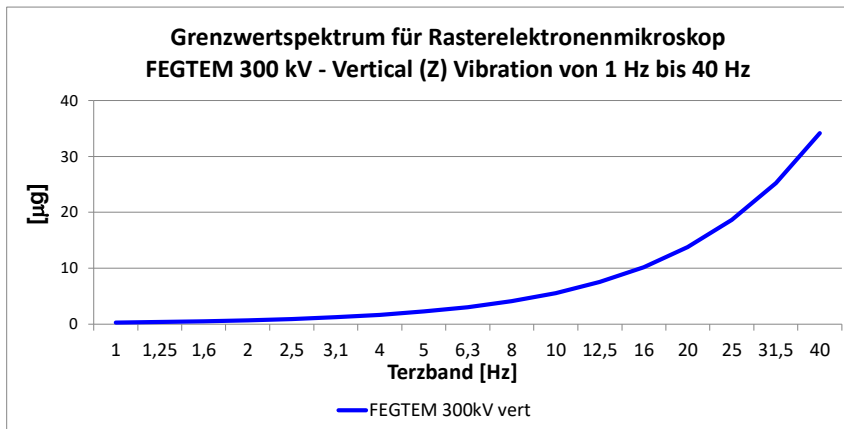


Abbildung 3: Zulässige RMS-Schwingbeschleunigung für das maßgebende Rasterelektronenmikroskop FEGTEM 300kV dargestellt als Terzspektren

3. Messung der Erschütterungsimmissionen vor Baubeginn

Zur Ermittlung der Erschütterungsimmissionen im Bereich des neu geplanten Gebäudezubaues wurden am 23.10.2018 Kurzzeitmessungen der verkehrsinduzierten Erschütterungsimmissionen (Verkehr auf der Stadionallee 2) vor Baubeginn durchgeführt. Die Messungen wurden mit SYSCOM Geräten des Typs MRT 3000 mit externen Sensoren durchgeführt und die triaxialen Schwinggeschwindigkeitssensoren wurden dabei an unterschiedlichen Messpunkten auf dem Gelände des späteren Standortes des Gebäudezubaues positioniert.

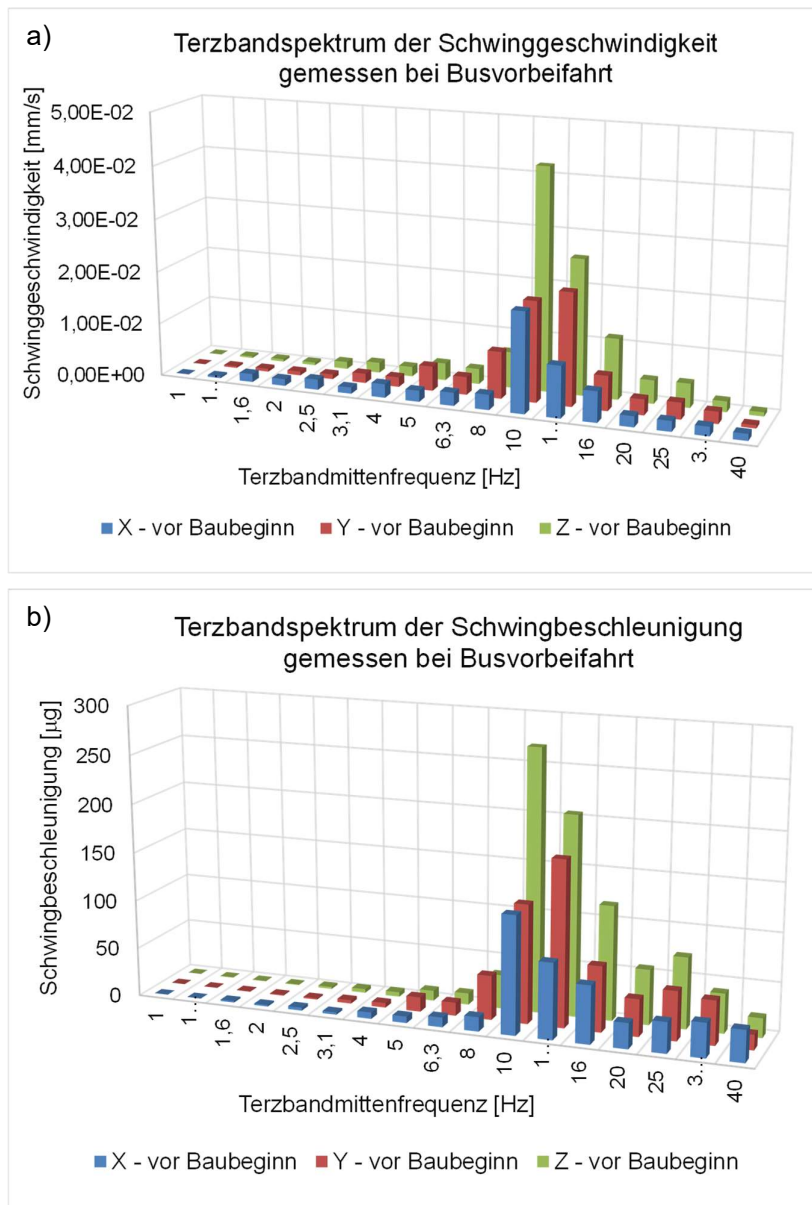


Abbildung 4: Gemessene Terzspektren bei Busvorbeifahrt: a) RMS-Schwinggeschwindigkeit (peak hold max); b) RMS-Schwingbeschleunigung (peak hold max)

Die Kurzzeitmessungen haben ergeben, dass durch den Busverkehr auf der Stadionallee die höchsten Erschütterungsimmissionen auftreten und in der Abbildung 4 ist für die maßgebende Busvorbeifahrt das Terzbandspektrum der RMS-Schwinggeschwindigkeit in [mm/s] und das zugehörige Terzbandspektrum der RMS-Schwingbeschleunigung in [μg] dargestellt. Man erkennt, dass die Busvorbeifahrt eine maximale RMS-Schwinggeschwindigkeit und RMS-Schwingbeschleunigung von 0,42 mm/s und 269 μg bei der Terzmittenfrequenz 10 Hz hervorruft. Der Vergleich des Grenzwertspektrums des maßgebenden Rasterelektronenmikroskops FEGTEM 300kV mit den bei Busvorbeifahrt gemessenen Erschütterungsimmissionen ist in der Abbildung 5 dargestellt.

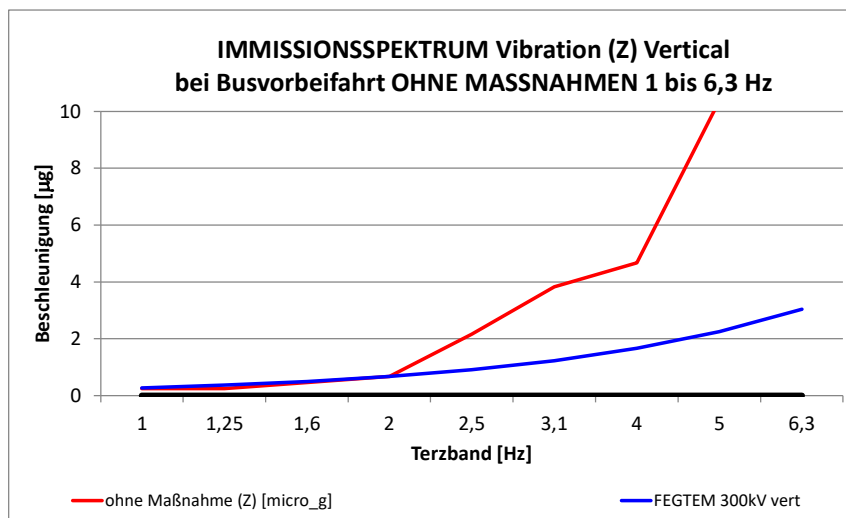
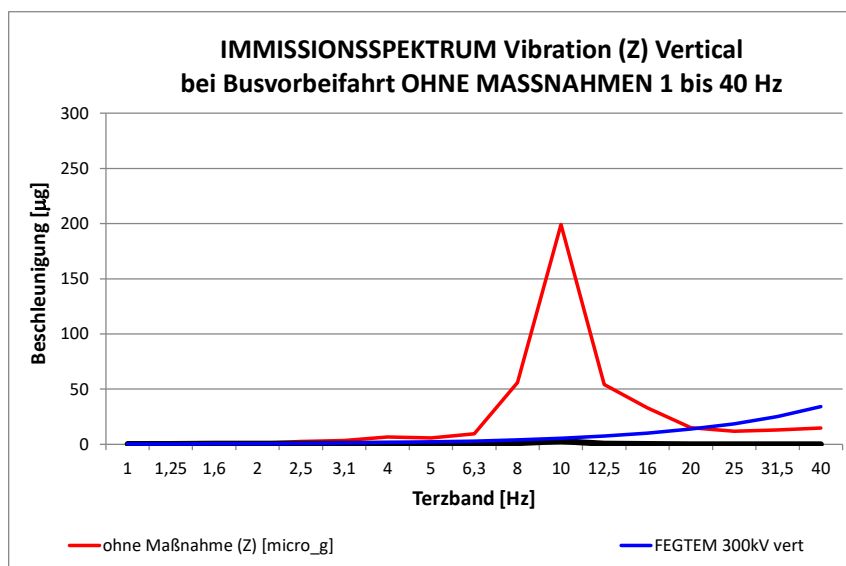


Abbildung 5: Immissionsspektrum Vibration (Z) Vertical bei Busvorbeifahrten OHNE Maßnahmen und Vergleich mit Grenzwertspektrum des Gerätes FEGTEM 300kV

Bei der Terzmittenfrequenz von 10 Hz beträgt der gerätespezifische Grenzwert lediglich 5,6 μg und dieser ist demnach ca. 50-fach überschritten. Eine Detailbetrachtung des Frequenzbereiches von 1 bis 6,3 Hz zeigt, dass die Überschreitungen des zulässigen Grenzwertes bereits ab der Terzmittenfrequenz von 2,5 Hz auftreten. Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse vor Baubeginn, ist ohne Ausführung von Maßnahmen kein störungsfreier Betrieb der Rasterelektronenmikroskope möglich und die Ausführung von erschütterungsdämmenden Maßnahmen ist zwingend erforderlich.

4. Empfehlung der erschütterungsdämmenden Maßnahme

Die im Bereich des neu geplanten USTEM Gebäudes durchgeführten Erschütterungsmessungen vor Baubeginn haben ergeben, dass der Busverkehr auf der Stadionallee 2 zu Erschütterungsimmissionen führt, die OHNE Ausführung von erschütterungsdämmenden Maßnahmen zu einer nicht akzeptablen Störung des Betriebes der in Bezug auf Erschütterungen hochsensiblen Rasterelektronenmikroskope führen. Der Vergleich der messtechnisch ermittelten verkehrsinduzierten Erschütterungsimmissionen mit den gerätespezifischen Grenzkurven liefert insbesondere im tieffrequenten Bereich < 20 Hz signifikante Überschreitungen, die OHNE Ausführung von Maßnahmen nicht akzeptabel sind. Als Maßnahme wurde dem Bauherrn die Ausführung von tief abgestimmten (Stahlbeton-)Gerätefundamenten mit Luftfederlagerung (aktiv und passiv) und die schwingungstechnische Entkopplung der Deckenkonstruktion von den Gerätefundamenten in den Messräumen empfohlen. Der Bauherr hat den vorgeschlagenen Maßnahmen zugestimmt und im Abschnitt 5 wird auf den aktuellen Entwicklungsstand der Gerätefundamente sowie der Raumausführung eingegangen.

5. Entwicklung Gerätefundamente und Raumausführung

Auf Grundlage der in Abschnitt 3 dargelegten Ergebnisse der Erschütterungsimmissionsmessungen (ausgewertet als Terzbandspektren) sowie der festgelegten Maßnahmen für den Erschütterungsschutz, erfolgt in diesem Abschnitt die Beschreibung der entwickelnden Lösungen für die Gerätefundamente und für die Raumgestaltung. Die erschütterungsdämmende Wirkung der auf Luftfedern gelagerten (Stahlbeton-)Gerätefundamente wurde mittels der Einmassenschwingeranalogie berechnet [1]. Das Verstärkungs- bzw. Dämmverhalten wird dabei über den Faktor V in Gl. (1) berücksichtigt, wobei β im vorliegenden Fall das Verhältnis zwischen der betrachteten Terzmittenfrequenz und der Abstimmfrequenz der Maßnahme darstellt. ζ definiert in Gl. (1) das Lehr'sche Dämpfungsmaß (Prozentsatz der

kritischen Dämpfung). Ab dem Frequenzverhältnis $\beta = \sqrt{2}$ setzt die Dämmwirkung des dynamischen Systems ein [2].

$$V(\beta, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (1)$$

Die Lehr'sche Dämpfung wurde hierbei mit $\zeta = 20\%$ der kritischen Dämpfung angesetzt. Zur Einhaltung der gerätespezifischen Grenzwerte der RMS-Schwingbeschleunigung wurde für die Abstimmfrequenz des auf Luftfedern gelagerten Gerätefundaments $f_0 = 1,20$ Hz gewählt. Dieser Wert entspricht der Grundfrequenz f_0 des Gerätefundaments mit zugehöriger vertikaler Schwingungsform. In der Abbildung 6 ist das nach Umsetzung der Maßnahme (Gerätefundament mit $f_0 = 1,20$ Hz) sich rechnerisch ergebende Immissionsspektrum bei Busvorbeifahrt für die maßgebenden Vibrationen in Z-Richtung dargestellt. Man erkennt, dass die bei Busvorbeifahrt OHNE Maßnahme stark ausgeprägten Erschütterungsimmissionen bei der Terzmittenfrequenz von 10 Hz (Maximalwert 269 μg , vgl. Abbildung 5) bei Umsetzung der Maßnahme auf ein verbleibendes Minimum von 4 μg reduziert werden können. Der bei dem Rasterelektronenmikroskop mit den höchsten Anforderungen an den Erschütterungsschutz (FEGTEM 300kV) vom Hersteller definierte Grenzwert von 5,6 μg (bei der Terzmittenfrequenz von 10 Hz) kann demnach bei Ausführung des tiefabgestimmten Gerätefundaments mit $f_0 = 1,20$ Hz eingehalten werden.

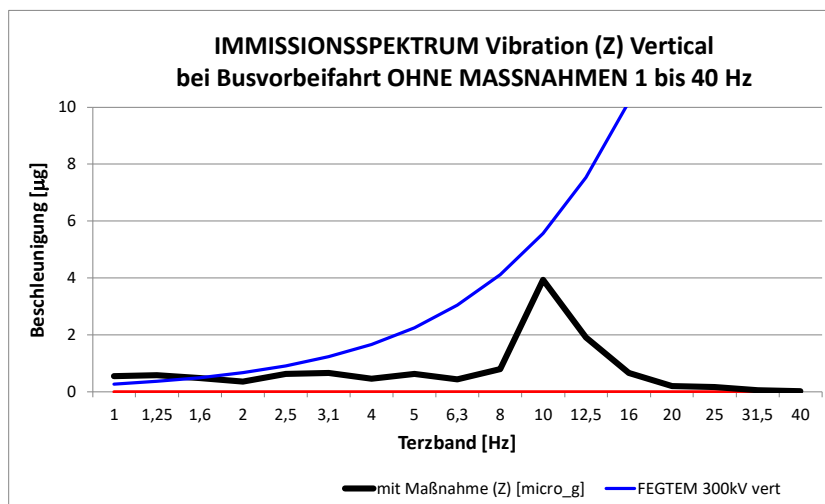


Abbildung 6: Immissionsspektrum Vibration (Z) bei Busvorbeifahrten MIT Maßnahmen (tiefabgestimmtes Gerätefundamente mit Luftfederlagerung, Abstimmfrequenz $f_{0,v} = 1,20$ Hz, zugehöriges Lehr'sches Dämpfungsmaß $\zeta = 0,20$) und Vergleich mit Grenzwertspektrum des Gerätes FEGTEM 300kV; Eingangsdaten aus Messungen vor Baubeginn

Es wird an dieser Stelle angemerkt, dass im Bereich der Terzmittenfrequenz $< 1,6$ Hz trotz Ausführung der erschütterungsdämmenden Maßnahme eine verbleibende Überschreitung des gerätespezifischen Grenzwertes auftritt. Diese liegt aber nur in einem sehr geringen Prozentbereich und in Abstimmung mit dem Bauherrn wurde diese geringfügige Überschreitung vorläufig akzeptiert.

Auf Grundlage der Ergebnisse der von den Autoren durchgeführten Prognoseberechnungen und der festgelegten Maßnahmen für den Erschütterungsschutz, wurden mit der Firma BILZ mehrere Abstimmungsbesprechungen zur konstruktiven Ausführung der tiefabgestimmten Gerätefundamente durchgeführt. Der derzeitige Planungsstand sieht Gerätefundamente vor, die eine Eigenmasse von zumindest 40 Tonnen aufweisen und auf Luftfedern gelagert sind. In der Abbildung 7 ist ein Ausführungsbeispiel für ein tiefabgestimmtes Gerätefundament, dass in den Messräumen des TU Wien USTEM Gebäudes eingebaut wird, dargestellt.

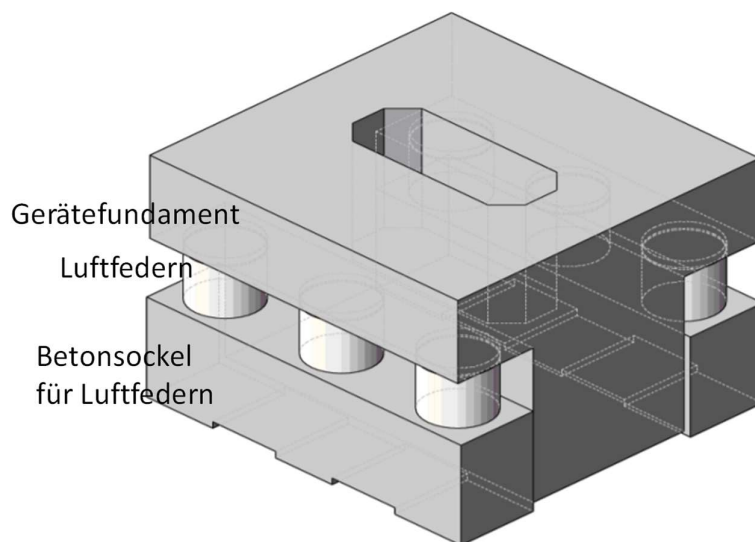


Abbildung 7: Ausführungsbeispiel für ein tiefabgestimmtes Gerätefundament (vorgesehen für den Einbau in den Messräumen des neuen Institutsgebäudes des TU Wien USTEM)

Die Abstimmungsbesprechungen mit der Firma BILZ haben auch ergeben, dass zur Vermeidung von gebäudeinternen Störungen durch Personenbewegungen (Gehen) in den Messräumen, unbedingt eine Entkopplung der Deckenkonstruktion von den Gerätefundamenten ausgeführt werden soll. Diese Entkopplung wurde im Planungsprozess entsprechend berücksichtigt und in der Abbildung 8 ist ein Ausführungsbeispiel für die Raumgestaltung der Messräume im neuen Institutsgebäude des TU Wien USTEM dargestellt. Man erkennt, dass die Deckenkonstruktion im Messraum an keiner Stelle auf dem Geräte-

fundament gelagert ist und damit ist eine vollständige Entkopplung, der infolge Personenbewegung im Messraum sich ergebenden Erschütterungsemissionen von den Gerätefundamenten, sichergestellt.

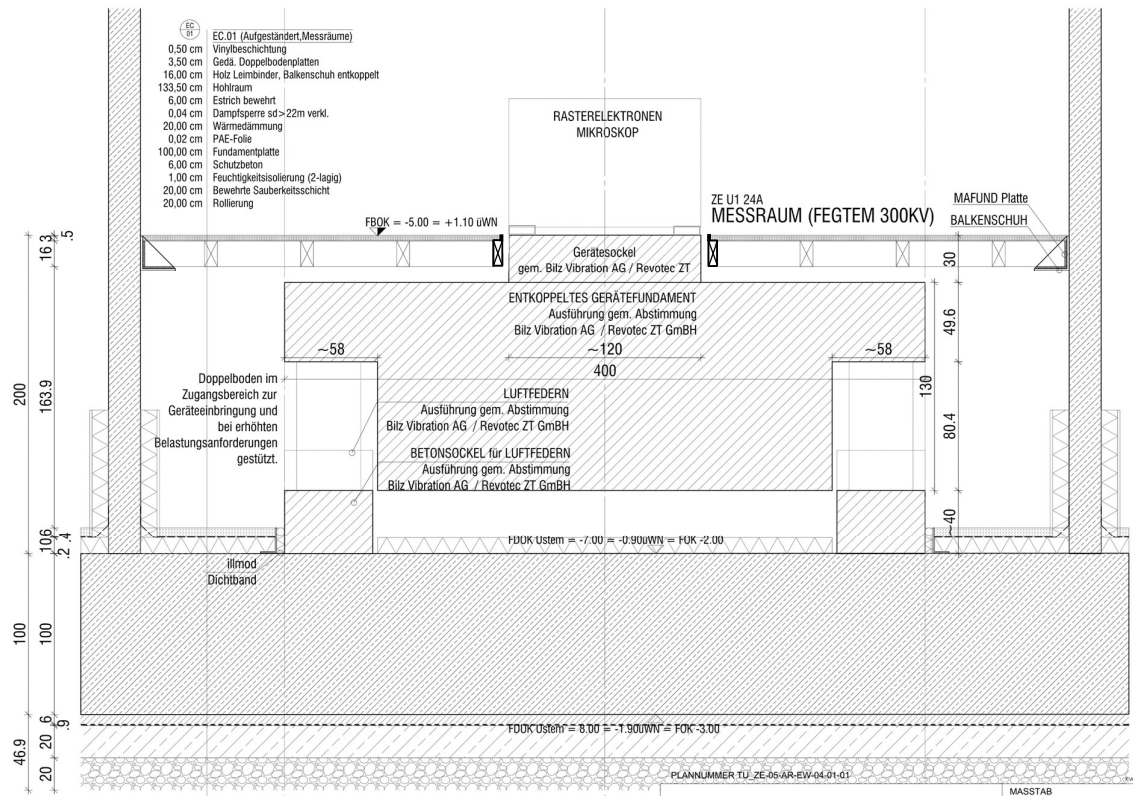


Abbildung 8: Ausführungsbeispiel für Raumgestaltung (vorgesehen in den Messräumen des neuen Institutsgebäudes TU USTEM); Quelle: AE30 Architekten

6. Zusammenfassung

Im Artikel wurde die Entwicklung von tiefabgestimmten Gerätefundamente mit Luftfederlagerung für die Aufstellung von in Bezug auf Erschütterungen hochsensiblen Rasterelektronenmikroskopen im Kellergeschoss des derzeit in Bau befindlichen neuen Institutsgebäude des TU Wien USTEM vorgestellt. Als maßgebende Erschütterungsquelle wurden aus den durchgeführten Immissionsmessungen vor Baubeginn die täglichen Busvorbeifahrten auf der Stadionallee identifiziert und bei der Terzmittenfrequenz von 10 Hz wurden maximale RMS-Schwingbeschleunigungen von bis zu 269 μg ermittelt. Der gerätespezifische Grenzwert beträgt bei dieser Terzmittenfrequenz 5,6 μg und damit liegt eine Überschreitung um den Faktor 50 vor. Als erschütterungsdämmende Maßnahme wurden tiefabgestimmte Gerätefundamente mit Luftlagerung vorgeschlagen, wobei die Abstimmfrequenz zur Sicherstellung

des störungsfreien Betriebes der Rasterelektronenmikroskope mit $f_0 = 1,20$ Hz definiert wurde (Grundfrequenz mit zugehöriger vertikaler Schwingungsform). Bei Ausführung dieser Maßnahme hat die Prognoseberechnung bei der Terzmittenfrequenz von 10 Hz einen Maximalwert der RMS-Schwingbeschleunigung von $2,9 \mu\text{g}$ geliefert und dieser Wert ist kleiner als der vom Hersteller der Rasterelektronenmikroskope definierte Grenzwert von $5,6 \mu\text{g}$. Mit Ausnahme von geringfügigen Überschreitungen die sich bei der Prognoseberechnung trotz Ausführung dieser Maßnahme im Frequenzbereich $< 1,6$ Hz ergeben, sind die gerätespezifischen Grenzwerte über den gesamten Frequenzbereich eingehalten. Die verbleibende geringfügige Überschreitung bei den Frequenzen $< 1,6$ Hz wurde mit dem Bauherrn abgestimmt und vorläufig als akzeptabel beurteilt. Durch weitere baubegleitende Messungen der Erschütterungsimmissionen (auf der fertiggestellten Bodenplatte und im Endzustand des Gebäudezubaus) sollen die positiven oder negativen Veränderungen der Immissionswerte bei den Busvorbeifahrten, insbesondere im maßgebenden tiefen Frequenzbereich $< 1,6$ Hz ausgewertet und falls erforderlich eine Nachoptimierung (Verringerung) der derzeit festgelegten Abstimmfrequenzen der Gerätefundamente ($f_0 = 1,2$ Hz) durchgeführt werden. Zusätzlich zu den tiefabgestimmten Gerätefundamenten wurde als zweite Maßnahme die Ausführung einer vibrationsentkoppelten Deckenkonstruktion in den Messräumen vorgegeben und durch diese Maßnahme sind bei den nicht vermeidbaren Personenbewegungen in den Messräumen (z. B. Gehen) keine Störungen des Betriebes zu erwarten.

Literaturangaben:

- [1] FLESCHE, R. (1993) *Baudynamik praxisgerecht, Bd.1, Berechnungsgrundlagen*. Wiesbaden, Bauverlag, ISBN: 3762530106.
- [2] PETERSEN, C.; WERKLE, H (2019) *Dynamik der Baukonstruktionen*. Springer Verlag.

Autorenkontakt: michael.reiterer@revotec.at
rainer.flesch@ait.ac.at