

## Präzisionsfertigung über Reinraum (VC-D) ... machbar?

Daniel Gsell, ZC Engineering AG, Zürich, CH

### Abstract

Beim Neubau eines Industriegebäudes wurde eine anspruchsvolle Mischnutzung geplant: Schwere Bearbeitungszentren im Erdgeschoss (EG) sollten direkt über einem Reinraum im Untergeschoss (UG) angeordnet werden. Da die Erfahrungen aus dem bestehenden Produktionsbau zeigten, dass eine ähnliche Anordnung bereits bei geringeren Anforderungen zur Erschütterungsarmut zu Störungen geführt hatte, wurde frühzeitig ein detailliertes Konzept umgesetzt. Als massgebendes Kriterium für den Reinraum im UG wurde die Einhaltung der strengen Erschütterungsklasse VC-D ( $6.25 \mu\text{m/s}$ ) definiert, mit dem Wunsch nach noch ruhigeren Bereichen (VC-E). Methodik: Messungen und Modellierung

Da für eine präzise Prognose verlässliche Eingangsdaten zwingend erforderlich sind, wurden im Vorfeld umfassende Messungen durchgeführt:

- **Umgebungserschütterungen:**  
Messungen in einer Testbaugrube über acht Tage ergaben, dass die Umgebung das sehr strenge Kriterium VC-F einhält. Der Standort wurde somit als schwingungstechnisch sehr gut geeignet eingestuft.
- **Maschinenkräfte:**  
Da Herstellerangaben fehlten, wurden die dynamischen Kräfte indirekt im Bestand über Schwinggeschwindigkeiten und Admittanzmessungen ermittelt. Dies ergab transiente Impulse mit maximalen Kräften von ca. +/- 10 kN.
- **Baugrunddynamik:**  
Mittels MASW-Verfahren (Multichannel Analysis of Surface Waves) wurden die Scherwellengeschwindigkeiten des Lockergesteins (225 m/s bis 400 m/s) vor Ort bestimmt und in ein validiertes Schichtmodell überführt.
- **FEM-Modell:**  
Diese Messdaten dienten als Grundlage für ein kalibriertes 3D-Finite-Elemente-Modell, welches das Gebäude und den geschichteten Baugrund abbildet. Um Reflexionen zu verhindern, wurden nicht-reflektierende Ränder (Absorbing Boundaries) im linear-elastischen Modell implementiert.
- **Prognose und strukturelle Optimierung:**  
Die erste Prognose mit einer 60 cm starken Bodenplatte zeigte, dass die VC-D-Grenzwerte direkt unter den Maschinen nicht flächendeckend eingehalten werden konnten. Eine elastische Entkopplung der Bodenplatte brachte nur ca. 30 % Reduktion und wurde aufgrund der tiefen Frequenzen verworfen. Als effektivste Massnahme erwies sich die Verstärkung der Bodenplatte auf 90 cm in Kombination mit zusätzlichen aussteifenden Wandscheiben im UG.
- **Abnahmemessungen und Erkenntnisse:**  
Eine siebentägige Abnahmemessung nach Inbetriebnahme der EG-Produktion bestätigte die Prognosen: Die Erschütterungen im UG lagen durchweg unter den Grenzwerten (VC-D), in weiten Teilen wurde sogar VC-E erreicht. Ein unerwartetes Phänomen durch den Hallenkran, welcher

anfangs Erschütterungsspitzen oberhalb von VC-C verursachte, konnte durch die mechanische Reinigung und das Abschleifen der Kranbahnschiene dauerhaft gelöst werden.

Das Projekt zeigt, dass hochempfindliche Nutzungen direkt unter schwerer mechanischer Fertigung realisierbar sind, sofern die Dynamik von Beginn an integraler Bestandteil der Planung ist. Der Erfolg basiert auf präzise ermittelten Eingangsdaten (Baugrund und Maschinenkräfte), validierten FE-Modellen zur Kosten-Nutzen-Prüfung von Baumassnahmen sowie einem ganzheitlichen Ansatz.

# Präzisionsfertigung über Reinraum (VC-D) - Machbar?

Daniel Gsell, ZC Engineering AG

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Neubaus eines Industriegebäudes wurde eine anspruchsvolle Mischnutzung realisiert: Eine Präzisionsfertigung mit schweren Bearbeitungszentren im Erdgeschoss, direkt über einem Reinraum im Untergeschoss, der hohe Anforderungen an die Erschütterungsarmut (VC-D) stellt. Um die Machbarkeit zu prüfen und das strukturelle Design zu optimieren, wurde ein umfassendes Engineering-Konzept umgesetzt. Dies beinhaltete die messtechnische Bestimmung der Umgebungserschütterungen und der dynamischen Maschinenkräfte im Bestand sowie eine detaillierte Charakterisierung der dynamischen Bodeneigenschaften. Mittels eines kalibrierten 3D-Finite-Elemente-Modells, das sowohl das Gebäude als auch den geschichteten Baugrund abbildet, wurden Erschütterungsprognosen erstellt. Die Ergebnisse führten zu gezielten baulichen Optimierungen, wie der Verstärkung der Bodenplatte auf 90 cm und der strategischen Anordnung von Wandscheiben im Untergeschoss. Abschliessende Abnahmemessungen im Betrieb bestätigten die Einhaltung der strengen Anforderungen und validierten die Genauigkeit des Prognosemodells.

## 2 Einleitung

Moderne Produktionsstätten erfordern oft die Kombination von Prozessen, die „exzellente Qualität und extreme Präzision“ bedingen. Für den betrachteten Neubau wurde eine betrieblich kompakte Lösung gewählt, die jedoch schwingungstechnisch ein hohes Risiko birgt: Die Anordnung von grossen Bearbeitungszentren im Erdgeschoss (EG) unmittelbar über einem Reinraum im Untergeschoss (UG).

Die Zielvorgabe für den Reinraum im UG war die Einhaltung des Kriteriums VC-D ( $6.25 \mu\text{m/s}$ ) über die gesamte Fläche, mit dem Wunsch nach noch ruhigeren Bereichen (VC-E). Die Erfahrungen der Firma aus dem bestehenden Produktionsbau zeigten, dass eine ähnliche Anordnung bereits bei geringeren Anforderungen zu Störungen in der Fertigung geführt hatte. Um dieses Risiko beim Neubau von vornherein zu eliminieren, wurde bereits in der Vorprojektphase eine detaillierte Untersuchung eingeleitet.

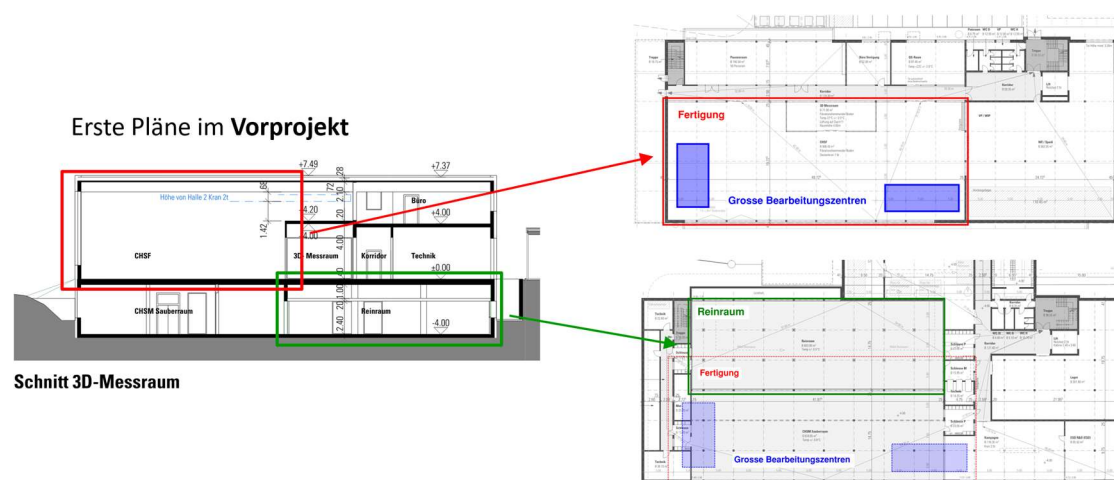


Bild 2.1 Schematischer Schnitt des geplanten Industriegebäudes.

### 3 Anforderungen und Standortbestimmung

#### 3.1 Ermittlung der Anforderungen (VC-Kriterien)

Um realistische Grenzwerte festzulegen, wurden in bestehenden Produktionshallen Langzeitmessungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die aktuellen Prozesse bei einem Niveau von VC-D stabil laufen, während VC-C an manchen Messpunkten bereits zu Beeinträchtigungen führen kann. Basierend darauf wurde für den Neubau VC-D als minimales, massgebendes Kriterium für die Reinnräume definiert.

#### 3.2 Umgebungserschütterungen

Ein entscheidender Faktor für die Eignung des Standorts war das vorhandene Erschütterungsniveau durch externen Verkehr und benachbarte Produktionsbauten. Messungen in einer Testbaugrube auf Fundationskote über acht Tage zeigten, dass die Umgebungserschütterungen das extrem strenge Kriterium VC-F einhalten. Der Standort wurde somit als schwingungstechnisch sehr gut geeignet eingestuft.

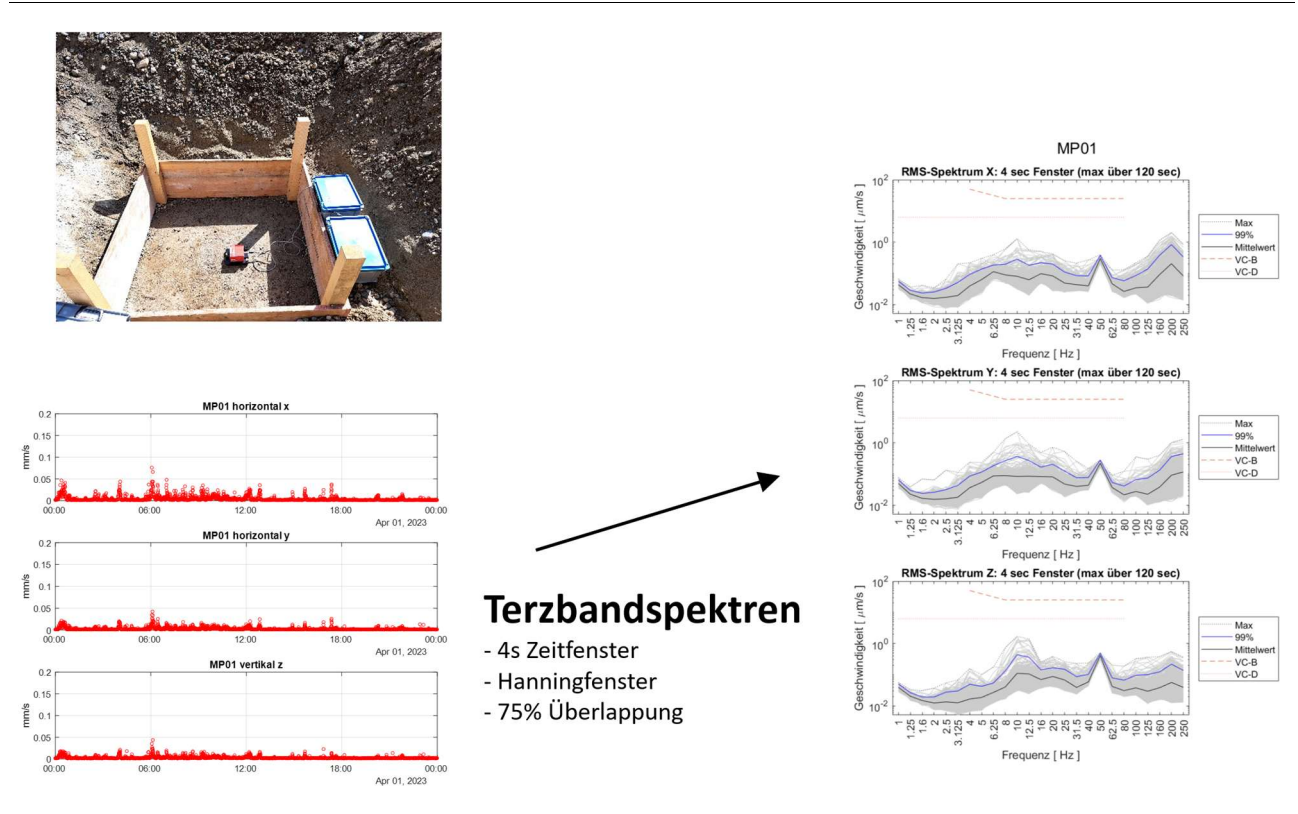


Bild 3.1 Standortbestimmung auf dem Baufeld.

### 4 Charakterisierung der Erschütterungsquellen

Da Maschinenhersteller oft keine verlässlichen Angaben zu dynamischen Kräften machen können, wurden diese im Bestand indirekt ermittelt.

Durch die Messung der Schwinggeschwindigkeit  $v(\omega)$  im Betrieb bei typischen Prozessen und der gleichzeitigen Bestimmung der Admittanz (Nachgiebigkeit) der Decke mittels Impulshammernmessungen konnte die vertikale dynamische Maschinenkraft  $F(\omega)$  für fünf typische Prozesszustände ermittelt werden:

$$F(\omega) = \frac{v(\omega)}{\text{Admittanz}(\omega)}$$

Die Untersuchungen ergaben maximale dynamische Kräfte im Bereich von ca. +/- 10 kN, die meist als transiente Impulse auftreten. Diese Kraft-Zeit-Verläufe dienten als Eingangsdaten für die spätere Simulation.

### 5 Dynamische Baugrundcharakterisierung

Klassische Baugrundgutachten liefern keine dynamischen Parameter. Für eine präzise Prognose ist jedoch die Kenntnis der Wellengeschwindigkeiten im Boden essenziell. Mittels Wellenausbreitungsversuchen (MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves) vor Ort wurde die Dispersionsbeziehung ermittelt.

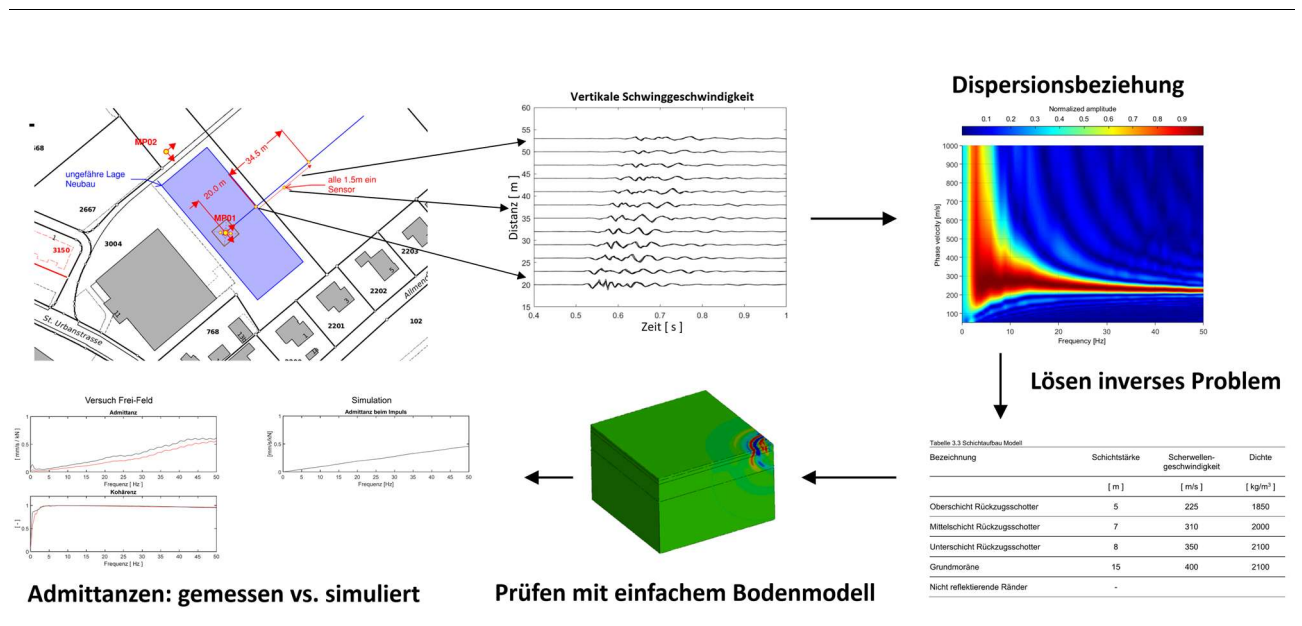


Bild 5.1 Ermittlung der Wellengeschwindigkeiten im geschichteten Halbraum.

Durch das Lösen des inversen Problems konnte ein Schichtmodell des Bodens erstellt werden (Lockergesteinsschichten), dessen Scherwellengeschwindigkeiten zwischen 225 m/s und 400 m/s liegen. Dieses Modell wurde durch einen Vergleich der simulierten Admittanz mit der gemessenen Admittanz im Freifeld validiert.

### 6 Prognosemodell und Simulation

#### 6.1 Das FE-Modell

Es wurde ein umfassendes 3D-Finite-Elemente-Modell erstellt, welches das Untergeschoss des Gebäudes sowie den umgebenden Boden (125m x 105m x 60m) abbildet. Um Reflexionen an den Modellrändern zu verhindern, wurden nicht-reflektierende Ränder (Absorbing Boundaries) implementiert. Das Modell wurde linear-elastisch mit einer Betondämpfung von 3.5% und einer Bodendämpfung von 1% (Abstrahlungsdämpfung) berechnet.

#### 6.2 Simulation der Erschütterungsausbreitung

Die Anregung erfolgte im Modell durch die zuvor ermittelten Kraftimpulse an den künftigen Maschinenstandorten (IMP01 und IMP02). Mittels expliziter Zeitintegration wurden die Schwinggeschwindigkeiten an über 100 relevanten Punkten auf der Bodenplatte und der Decke berechnet.

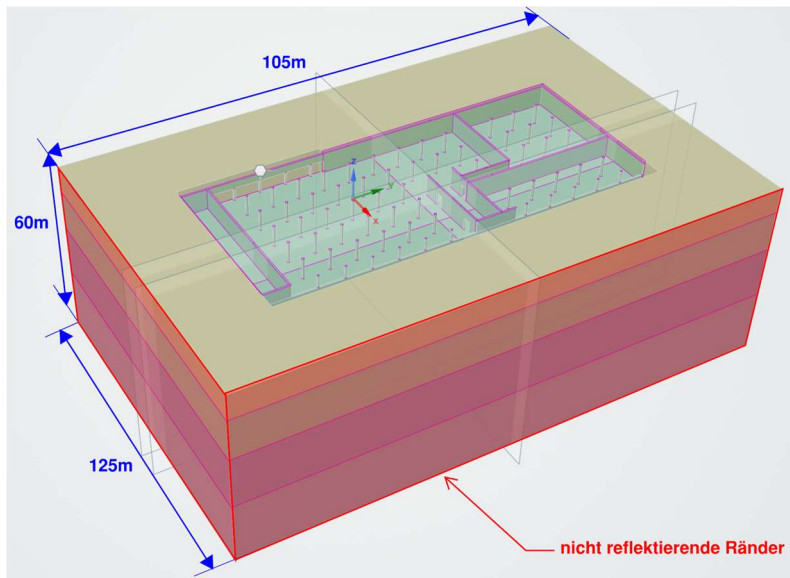


Bild 6.1 Simulationsmodell zur Prognose der Erschütterungsarmut.

### 6.3 Prognoseresultate und Optimierung

Die erste Prognose für die ursprüngliche Planung (60 cm Bodenplatte) zeigte, dass VC-D im Reinraum bei gleichzeitigem Betrieb der schweren Maschinen nicht flächendeckend garantiert werden konnte. Insbesondere im Bereich direkt unter den Quellen wurden die Grenzwerte überschritten. In der Folge wurden verschiedene Varianten simuliert:

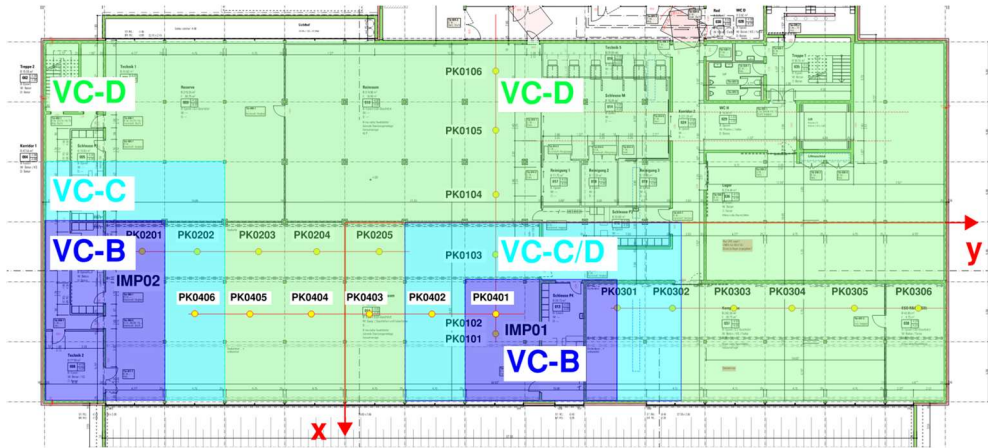
- Entkopplung der Bodenplatte: Eine elastische Trennung der Bodenplatte von den Stützen brachte nur ca. 30% Reduktion, was aufgrund der tiefen Frequenzen und der baulichen Komplexität als nicht zielführend verworfen wurde.
- Massen- und Steifigkeitserhöhung: Die Verstärkung der Bodenplatte auf 90 cm in Kombination mit zusätzlichen Wandscheiben im UG erwies sich als effektivste Massnahme.

## 7 Realisierung und Abnahmemessungen

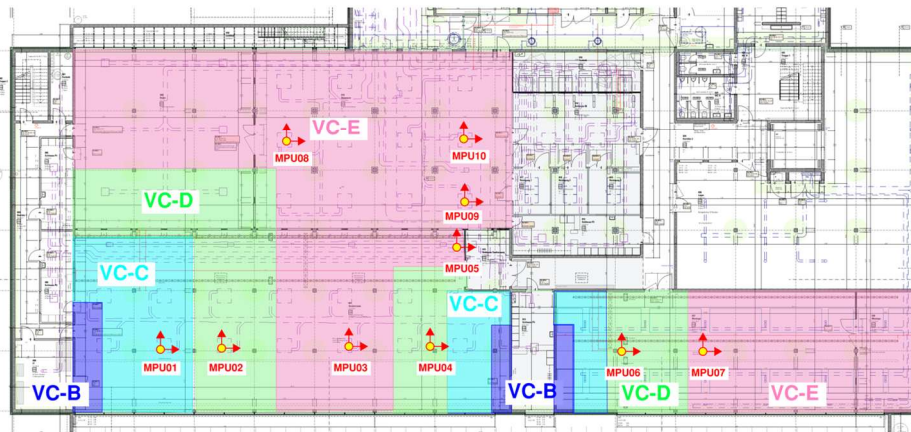
Der Bau wurde schliesslich mit einer 90 cm starken Bodenplatte und zusätzlichen Betonwänden zur Aussteifung ausgeführt. Nach der Inbetriebnahme der Produktion im EG, aber noch vor dem finalen Bezug des Reinraums im UG, wurden die Ergebnisse mittels einer siebentägigen Abnahmemessung überprüft.

### 7.1 Ergebnisse im Normalbetrieb

Die Messungen bestätigten, dass die Prognosen korrekt waren. Über weite Bereiche des Reinraums wurde sogar das Kriterium VC-E eingehalten. Die durch den regulären Produktionsbetrieb im EG induzierten Erschütterungen im UG lagen durchwegs unter den festgelegten Grenzwerten.



Prognostiziert



Gemessen

Bild 7.1 Validierung der Erschütterungsarmut im regulären Betrieb. Oben prognostizierte und unter gemessene Erschütterungen beim Betrieb der Werkzeugmaschinen im EG.

## 7.2 Sonderereignis Hallenkran

Ein interessantes Phänomen trat beim Betrieb des grossen Hallenkran im EG auf. Anfänglich verursachte dieser im UG deutlich messbare Erschütterungsspitzen oberhalb von VC-C.

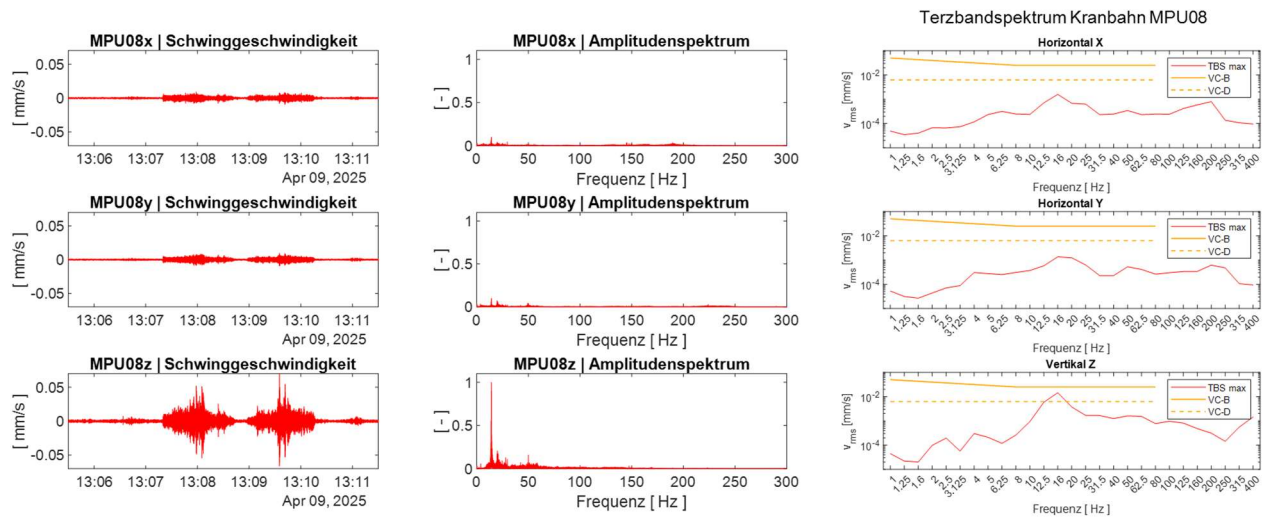


Bild 7.2 Im Reinraum gemessene Schwinggeschwindigkeiten beim Betrieb des Hallenkran im Erdgeschoss..

Die Ursachenanalyse ergab, dass Verunreinigungen auf der Kranbahnschiene zu impulsartigen Anregungen führten. Nach dem mechanischen Reinigen und Abschleifen der Schienen wurde das Problem behoben, und die Werte sanken dauerhaft unter das geforderte Niveau.

## 8 Schlussfolgerungen

Das Projekt beweist, dass eine hochempfindliche Nutzung (VC-D/E) direkt unter einer schweren mechanischen Fertigung realisierbar ist, sofern die Dynamik von Beginn an integraler Bestandteil der Planung ist.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind:

- Validierte Modelle: Ein FE-Modell ist nur so gut wie seine Eingangsdaten. Die messtechnische Bestimmung von Bodenparametern und Maschinenkräften ist zwingend erforderlich.
- Effizienz der Simulation: Das Modell erlaubt es, bauliche Massnahmen (wie Plattenstärken) bereits vor dem ersten Spatenstich auf ihre Kosten-Nutzen-Effizienz zu prüfen.
- Ganzheitlicher Ansatz: Neben der Tragstruktur müssen auch Sekundärquellen wie Kranbahnen und Gebäudetechnik (konsequente Entkopplung) berücksichtigt werden.

Die erfolgreiche Abnahme gibt Vertrauen für zukünftige Projekte, bei denen die Verdichtung von industrieller Produktion und hochsensiblen Prozessen zunehmend gefordert ist.