

## **Erschütterungsprognosen in Produktionsbetrieben des Maschinenbaus**

D. Gsell, M. Birchmeier, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

### **Abstract**

Produktionsbetriebe im Maschinenbau sind auf Erschütterungsprognosen angewiesen, wenn geplant ist Maschinen an neue Standorte zu verlegen. Es stellen sich betreffend Erschütterungen die Fragen, ob am neuen Standort in der geforderten Qualität produziert werden kann und ob allenfalls umliegende Anlagen durch die neuen Emissionen gestört werden können. Der vorliegende Beitrag beschreibt in einem ersten Teil eine Methodik wie solche Prognosen für einen bekannten Maschinentyp durch Kombination von Messungen und Simulationen vorgenommen werden können. Mit Admittanzmessungen (dynamische Steifigkeiten) am heutigen Standort und der Messung der Schwinggeschwindigkeiten infolge Betrieb der Maschine werden indirekt die dynamischen Kräfte der Maschine ermittelt. Durch numerische Simulation, bzw. bei einem bestehenden künftigen Standort durch Messung, wird die Admittanz am künftigen Aufstellort ermittelt. Basierend darauf können die zu erwartenden Erschütterungen prognostiziert und mit Anforderungen verglichen werden. Anhand von einem Beispiel wird im zweiten Teil des Artikels die Anwendung der Methodik aufgezeigt.

# Erschütterungsprognosen in Produktionsbetrieben des Maschinenbaus

Daniel Gsell | Marcel Birchmeier | ZC Ziegler Consultants AG

## 1 Zusammenfassung

Produktionsbetriebe im Maschinenbau sind auf Erschütterungsprognosen angewiesen, wenn geplant ist Maschinen an neue Standorte zu verlegen. Es stellen sich betreffend Erschütterungen die Fragen, ob am neuen Standort in der geforderten Qualität produziert werden kann und ob allenfalls umliegende Anlagen durch die neuen Emissionen gestört werden. Der vorliegende Beitrag beschreibt in einem ersten Teil eine Methodik wie solche Prognosen für einen bekannten Maschinentyp durch Kombination von Messungen und Simulationen vorgenommen werden können. Mit Admittanzmessungen (dynamische Steifigkeiten) am aktuellen Standort und der Messung der Schwinggeschwindigkeiten durch den Betrieb der Maschine werden indirekt die dynamischen Kräfte der Maschine ermittelt. Durch numerische Simulation, bzw. bei einem bestehenden künftigen Standort durch Messung, wird die Admittanz am künftigen Aufstellort ermittelt. Basierend darauf können die zu erwartenden Erschütterungen prognostiziert und mit Anforderungen verglichen werden. Anhand von einem Beispiel wird im zweiten Teil des Artikels die Anwendung der Methodik aufgezeigt.

## 2 Maschinenerschütterungen

### 2.1 Zulässige Erschütterungen

In den meisten Fällen existieren vom Maschinenhersteller keine oder keine realistischen Anforderungen an die erforderliche Erschütterungsarmut am Aufstellort seiner Maschinen. Im Produktionsbetrieb oder in anderen Betrieben mit vergleichbarem Maschinenpark sind aber reichlich Erfahrungen mit einer entsprechenden Maschine vorhanden auf die zurückgegriffen werden kann. Oftmals kann in der heutigen Situation mit den vorhandenen Erschütterungen in der gewünschten Qualität produziert werden. Somit stellt die heutige Situation einen unteren Grenzwert der zulässigen Erschütterungen für den geplanten Standort dar. Durch Langzeitmessungen der Erschütterungen neben der zu beurteilende Maschine kann somit eine sinnvolle Anforderung quantitativ erfasst werden. Zu erwähnen ist, dass die zu beurteilende Maschine in der Messperiode selbst nicht in Betrieb sein darf oder nur die Zeitfenster der aufgezeichneten Erschütterungsdaten ausgewertet werden, in denen die Maschine nicht in Betrieb ist, während in der Umgebung die üblichen Arbeiten fortgeführt werden.

Relevante Grössen der störenden Erschütterungen sind neben der absoluten Amplitude der Erschütterung, deren Frequenzinhalt, deren Dauer und auch deren Häufigkeit. Um sämtliche Aspekte zu erfassen und trotzdem ein anwendbares, nicht zu komplexes Kriterium zur Verfügung zu haben, eignet sich eine Beurteilung analog der im Laborbau üblichen Vorgehensweise zur Standortevaluation. Dazu misst man über einen relevanten Zeitraum  $T_{\text{mess}}$ , was typischerweise ein paar Tagen entspricht, die Erschütterungen permanent. Um für den Betreiber eine statistisch relevante Aussage machen zu können, wird die Messdauer in Zeitfenster  $T_{\text{prod}}$  unterteilt, die etwa einem typischen Produktionszyklus eines Werkstücks (meistens nur wenige Minuten) entspricht. Innerhalb dieser Zeitfenster  $T_{\text{prod}}$  werden die Zeitreihen der Erschütterungsmessung mit einem Fenster  $T_F$  von wenigen Sekunden Länge abgefahren, wobei sich die Fenster sinnvollerweise zeitlich überlappen. Innerhalb jedes dieser Zeitfenster werden die Messdaten mit einem Hanningfenster (Vermeidung von Leakage-Effekten) multipliziert und anschliessend das Terzbandspektrum gebildet. Innerhalb des Zeitfensters  $T_{\text{prod}}$  wird in jedem Frequenzband der Maximalwert (Max-Hold-Terzbandspektrum) gespeichert. Damit sind die maximalen Erschütterungsamplitude je Terzband in diesem Zeitfenster, welches einem Produktionszyklus entspricht bekannt. Diese Schritte sind in Bild 2.1a dargestellt.

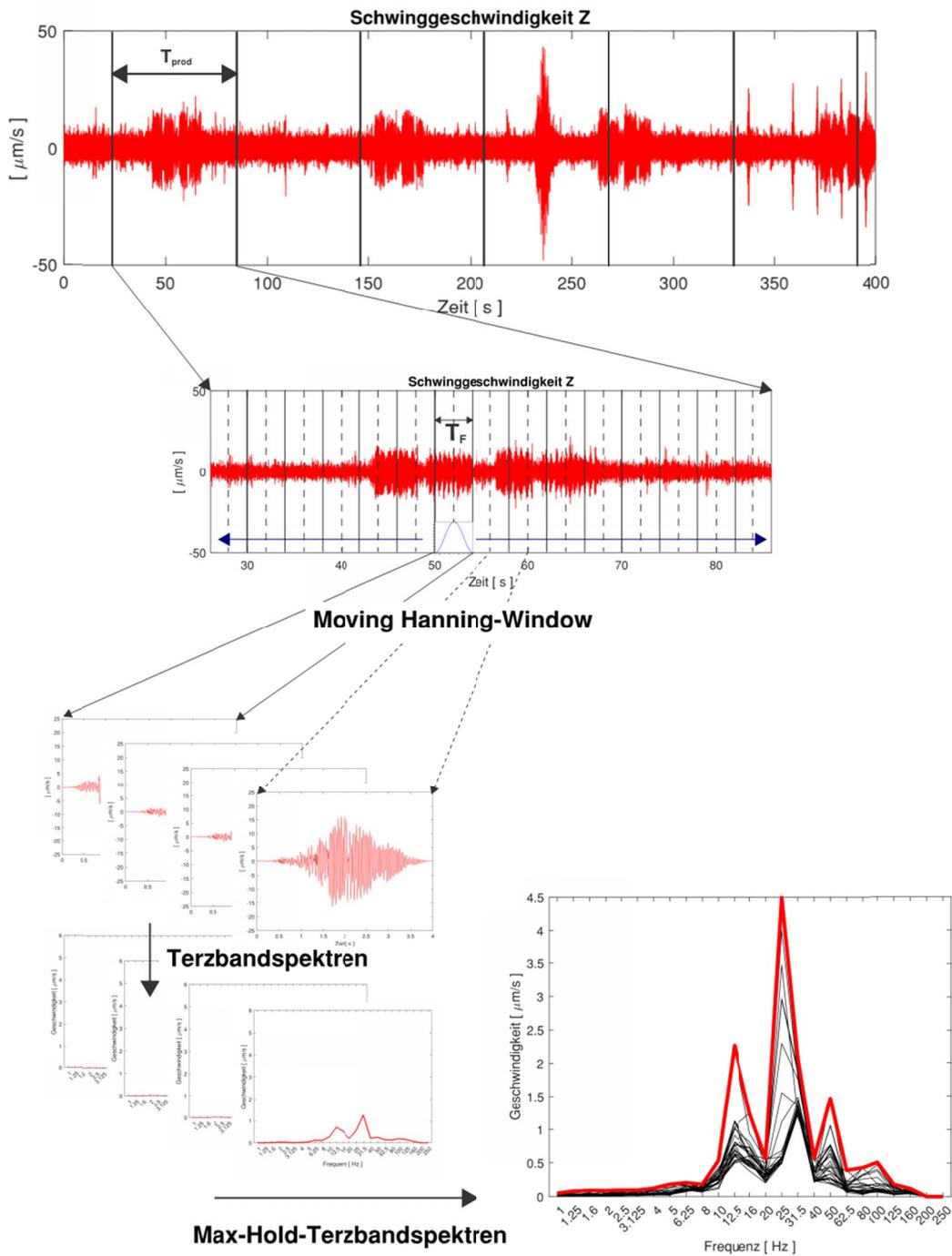


Bild 2.1a Signalverarbeitung Max-Hold-Terzbandspektren.

Unter der Annahme einer Normalverteilung werden über die gesamte Beurteilungszeit (z.B. 24-Stunden oder die Dauer eines typischen Werktages) in den einzelnen Terz-Bändern über alle  $T_{\text{prod}}$ -Intervalle der Mittelwert ( $\mu$ ) und die Standardabweichung ( $\sigma$ ) ermittelt. Zudem wird der maximale Wert gespeichert. Mit dem Mittelwert und der Standardabweichung wird der 97.725-Perzentilwert ( $=\mu + 2 \cdot \sigma$ ) und der 99.865-Perzentilwert ( $=\mu + 3 \cdot \sigma$ ) ermittelt (Bild 2.1b). Praktischer ausgedrückt kann damit ausgesagt werden, wie oft innerhalb der Beurteilungszeit die Erschütterungen innerhalb eines Produktionszyklus  $T_{\text{prod}}$  die betrachteten Amplituden im Terzband überschritten werden. Betrachtet man Zeitintervalle  $T_{\text{Prod}}$  von einer Minute, sind die statistischen Werte wie folgt zu verstehen:

- Der 97.725-Perzentilwert des Spektralwertes des Terzbandspektrums wird in 100 1-Minuten-Intervallen etwas mehr als 2x überschritten oder in 24 Stunden finden 32 Überschreitungen statt.
- Der 99.865-Perzentilwert des Spektralwertes des Terzbandspektrums wird in 1000 1-Minuten-Intervallen 1.35x überschritten oder in 24 Stunden finden 2 Überschreitungen statt, es handelt sich somit um ein seltenes Ereignis.

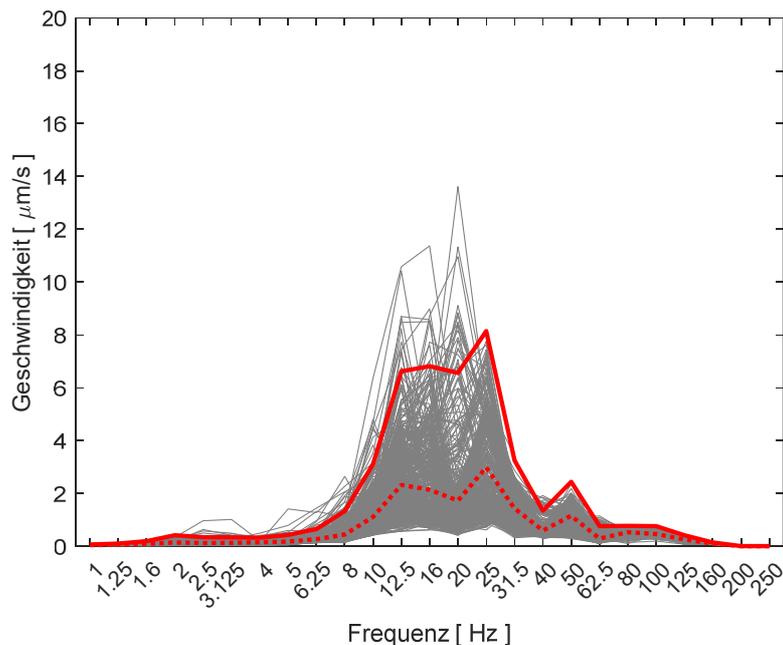


Bild 2.1b Max-Hold-Terzbandspektren über einen ganzen Tag. Rot ausgezogen ist der 99.865 %-Fraktilwert eingezeichnet und rot gepunktet der Mittelwert der maximalen Amplituden in den Terzbändern je Beurteilungsintervall  $T_{\text{prod}}$ .

## 2.2 Methodik zur Prognose

Um die zu erwartenden Erschütterungen durch den Betrieb einer bekannten Maschine an ihrem zukünftigen Standort zu prognostizieren, kann unten beschreibendes Vorgehen angewendet werden. Das Vorgehen beruht im Wesentlichen auf der Bestimmung von Admittanzen am heutigen und am künftigen Standort der Maschine. Besteht der künftige Standort, kann die Admittanz direkt gemessen werden, was zu den verlässlichsten Resultaten führt. Bei Neubauten können die Admittanzen am künftigen Aufstellort mit Hilfe von Finite Element Modellen ermittelt werden. Die Admittanz ist der Kehrwert der mechanischen Impedanz. Die mechanische Impedanz beschreibt den Widerstand, den das Bauteil der Ausbreitung der mechanischen Schwingungen entgegensetzt. Die Impedanz ergibt sich als Quotient einer Kraft  $F$  und einer der resultierenden Geschwindigkeit  $v$  und die Admittanz somit als Quotient von Geschwindigkeit  $v$  und der Kraft  $F$ . Die Admittanz, mit der Einheit  $[(\text{mm/s}) / \text{N}]$ , stellt somit die zu erwartende Geschwindigkeit bei einer Einheitskraft je Frequenz dar.

Vorgehen zur Prognose (Bild 2.2a):

1. Ermittlung der Admittanz am heutigen Standort der Anlage. Dazu wird zum Beispiel mit einem Impulshammer der Boden des Aufstellortes der Maschine mit einem Schlag angeregt und die entsprechende Kraft  $F_{A,\text{best}}(t)$  aufgezeichnet. Gleichzeitig wird die vertikale Schwinggeschwindigkeit des Bodens  $v_{A,\text{best}}(t)$  aufgezeichnet. Die beiden Aufzeichnungen werden durch die Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und dividiert, womit die Admittanz als  $A_{\text{best}}(\omega) = v_{A,\text{best}}^*(\omega) / F_{A,\text{best}}^*(\omega)$  berechnet wird.

2. Die Schwinggeschwindigkeiten  $v_{B,best}(t)$  von typischen Betriebszuständen der Anlage werden am selben Ort gemessen.
3. Die Admittanz wird am neuen Standort bestimmt. Wie oben erwähnt, kann dies gemessen werden oder mit Hilfe einer Finite-Element Simulation geschehen. In beiden Fällen wird wiederum die Struktur mit einem Impuls angeregt und die daraus resultierende Schwinggeschwindigkeit gemessen. Während in der Realität der Impuls mit dem Impulshammer erfolgt, wird in der Simulation das Modell mit einer dynamischen Impulskraft angeregt. Die Admittanz am neuen Standort wird analog zum Punkt 1 bestimmt:  $A_{neu}(\omega) = \dot{v}_{A,neu}^*(\omega) / F_{A,neu}^*(\omega)$ .
4. Durch Division der Fourier-transformierten gemessenen Schwinggeschwindigkeit der Anlage am bestehenden Standort  $\dot{v}_{B,best}^*(\omega)$  mit der ermittelten Admittanz des bestehenden Standorts  $A_{best}(\omega)$  und Multiplikation mit der Admittanz des neuen Standorts  $A_{neu}(\omega)$ , erhält man die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit am neuen Standort im Frequenzbereich  $\dot{v}_{B,neu}^*(\omega) = \dot{v}_{B,best}^*(\omega) \cdot A_{neu}(\omega) / A_{best}(\omega)$ . Durch die Rücktransformation in den Zeitbereich erhält man die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit  $v_{B,neu}(t)$  am neuen Standort.
5. Aus der zu erwartenden Schwinggeschwindigkeit werden die Max-Hold-Terzbandspektren gebildet und mit den entsprechenden Spektren, welche am heutigen Standort der erschütterungsempfindlichen Anlagen aufgezeichnet wurden, verglichen.

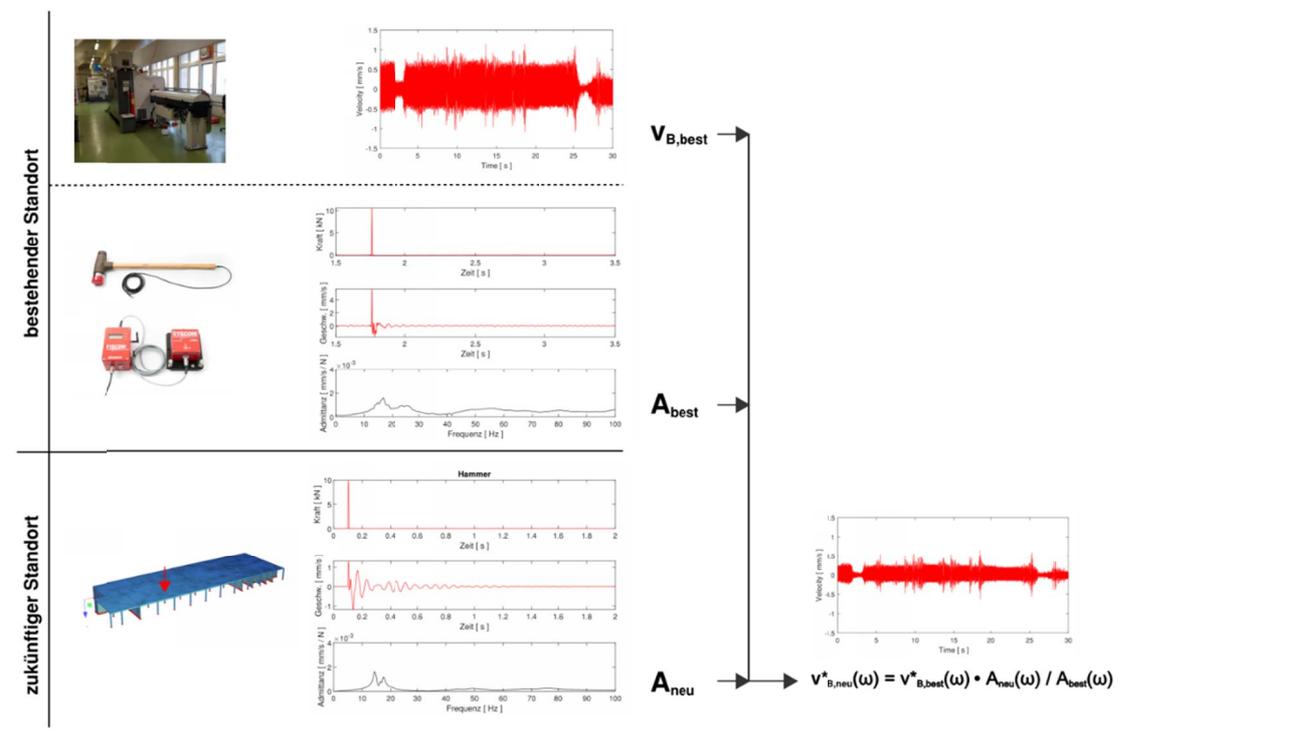


Bild 2.2a Vorgehen zur Bestimmung der Schwinggeschwindigkeiten am neuen Standort.

Bei der Bestimmung der Admittanz in bestehenden Gebäuden sind immer mehrere Impulse aufzuzeichnen und anschliessend den Mittelwert daraus zu bestimmen. Dadurch können Störungen wie Hintergrunderschütterungen, welche immer vorhanden sind, ausgemittelt werden. Zudem ist es empfehlenswert, die Versuche dann durchzuführen, wenn es im Gebäude bezüglich Erschütterungen möglichst ruhig ist.

Das hier gezeigt Vorgehen bezieht sich immer auf die vertikalen Erschütterungen. In den meisten zu beurteilenden Situationen stehen die Maschinen auf Bodenplatten oder auf Deckenfeldern, die vertikalen

Erschütterungen sind hier auch klar grösser als die horizontalen Erschütterungen und somit entscheidend für die Beurteilung. Das Verfahren kann auch auf horizontale Erschütterungen ausgeweitet werden, dies ist insbesondere nötig bei Produktionsanlagen in Oberschossen von horizontal schwach ausgesteiften Gebäuden.

### 3 Anwendungsbeispiel Hochpräzisionsschleifen

#### 3.1 Problemstellung

Die Schneeberger Lineartechnik AG mit Hauptsitz in Roggwil ist ein führender Hersteller für Linear- und Profilschienenführungen, Zahnstangen und Kugelgetrieben. Die dazu erforderlichen Präzisionsschleifarbeiten stellen sehr hohe Anforderungen an die Erschütterungsarmut. Zurzeit sind Schleifgenauigkeiten von einem Mikrometer gefordert. In Zukunft, unter anderem durch die Miniaturisierung bedingt, steigen die Anforderungen bald in den Submikrometerbereich. Die Schneeberger Lineartechnik AG plante in Roggwil zur Erweiterung ihrer Produktion einen Neubau. Einige der bestehenden Maschinen und weitere ähnliche Maschinen sollen im Neubau in einer klimatisierten Halle untergebracht werden. Aus betrieblichen Gründen sind die Anlagen im klimatisierten Bereich auf derselben Bodenplatte anzuordnen, die Bodenplatte ihrerseits ist temperaturstabilisiert. Rund um den klimatisierten Bereich werden aus betrieblichen Gründen weitere Maschinen angeordnet, welche klar höhere Erschütterungsemissionen aufweisen.

#### 3.2 Ermitteln der Anforderungen

Das Erschütterungsniveau wird analog dem in Kapitel 2 dargestellten Vorgehen erfasst. Im Produktionsbetrieb sind die Erschütterungen direkt bei zwei Schleifmaschinen und im vorhandenen Messraum, in welchen zur Qualitätssicherung hochpräzise Oberflächenmessungen durchgeführt werden, erfasst worden. Als Beispiel sind in den Bildern 3.2a und 3.2c die Pegelschriebe in den drei Raumrichtungen während der gesamten Messdauer dargestellt. In den grau hinterlegten Bereichen war diese Maschine nicht in Betrieb, während die übrige Produktion normal lief. Für die Bestimmung der Anforderung an die Ruhe für die Situationen A und B (Bild 3.4a und 3.4b), wurden die grau hinterlegten Zeitfenster am 14. Dezember ausgewertet. In den Bildern 3.2b und 3.2d sind der Mittelwert (strichlierte Linie) und der 99.865 %-Fraktilwert (ausgezogene Linie) der Max-Hold-Terzbandspektren in diesem Zeitraum dargestellt. Die Spektren basieren auf Zeitfenstern der Länge  $T_F = 1.0$  Sekunde. Mit solch kurzen Fenstern können Einzelimpulse, wie diese aus Werkzeugwechseln in der Maschine resultieren, adäquat erfasst werden.

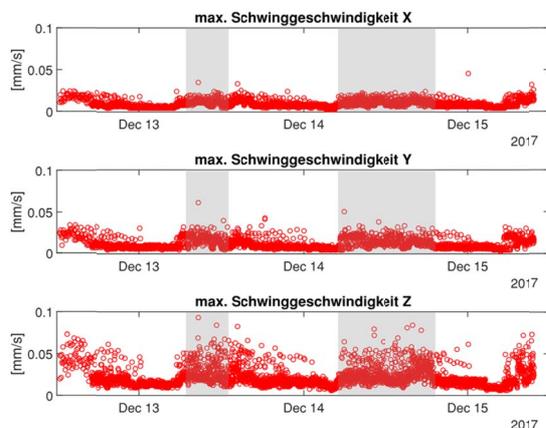


Bild 3.2a Pegelschrieb bei der Schleifmaschine, Situation A Bild 3.4a.

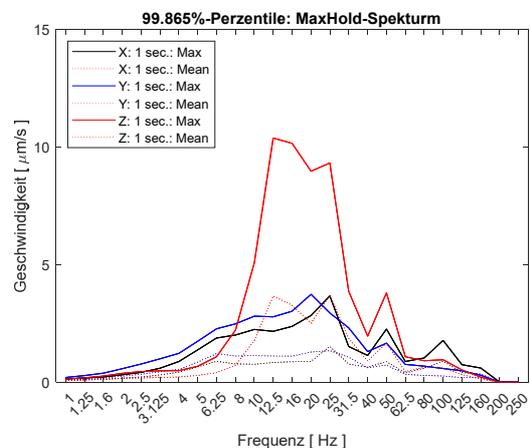


Bild 3.2b unterer Grenzwert für die Anforderung (ausgezogene Linie) an die Erschütterungsarmut, dargestellt als Terzbandspektrum.

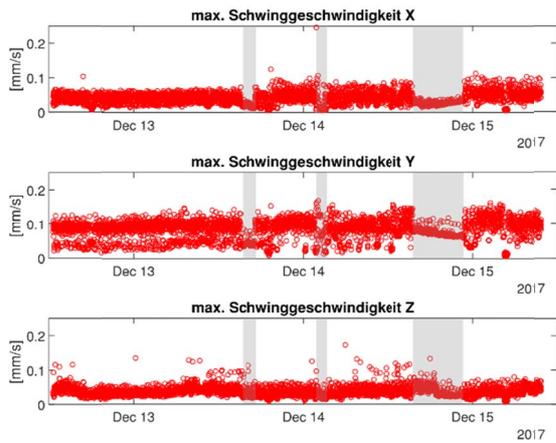


Bild 3.2c Pegelschrieb bei der Schleifmaschine, Situation B Bild 3.4a.

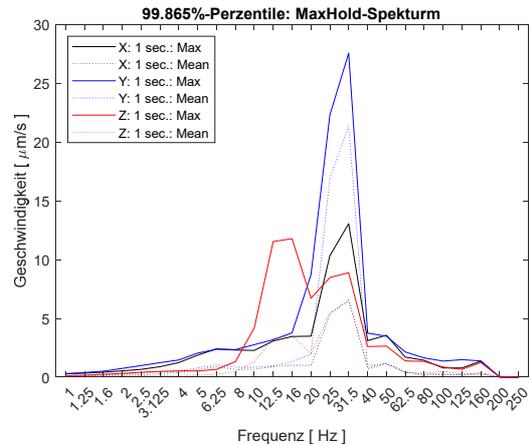


Bild 3.2d unterer Grenzwert für die Anforderung (ausgezogene Linie) an die Erschütterungsarmut, dargestellt als Terzbandspektrum.

### 3.3 Charakterisierung der externen Erschütterungsquellen für den Neubau

Neben den internen, produktionsbedingten Erschütterungen, welche in Kapitel 3.2 beschrieben sind, sind auch externe Quellen, wie Verkehr und anderes zu beachten. Dazu wurden am Standort des geplanten Gebäudes Langzeitmessungen der Erschütterungen durchgeführt. Insbesondere die naheliegende Strasse mit LKW-Verkehr ist als Quelle zu nennen. In der Messkampagne wurden die Messgeräte auf die Moräne des anstehenden Baugrundes gestellt. Dazu sind die oberflächlichen weichen Schichten mit einem Baggerschlitz geöffnet worden. Während der Messperiode fanden in der unmittelbaren Umgebung Bauarbeiten statt (im Pegelschrieb in Bild 3.3a grau hinterlegte Zeitbereiche). Ausgewertet wird das Zeitfenster am 14. Dezember von 17 – 21 Uhr. Das Verkehrsaufkommen ist in dieser Zeit als normal zu bezeichnen. In Bild 3.3b ist der Mittelwert und der 99.865 %-Fraktilwert der Max-Hold-Terzabandspektren in diesem Zeitraum dargestellt. Die Spektren basieren auf Zeitfenstern der Länge  $T_F = 1.0$  Sekunde. Um einen adäquaten Vergleich mit den Anforderungen an die Erschütterungsarmut durchzuführen, ist bei beiden Aspekten (Charakterisierung Quelle und Charakterisierung Anforderung) dasselbe Zeitfenster zur Ermittlung der Max-Hold-Terzabandspektren zu verwenden.

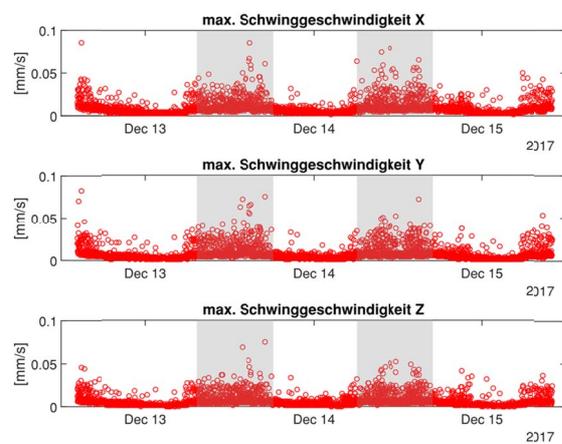


Bild 3.3a Pegelschrieb im Baggerschlitz am Standort des geplanten Gebäudes.

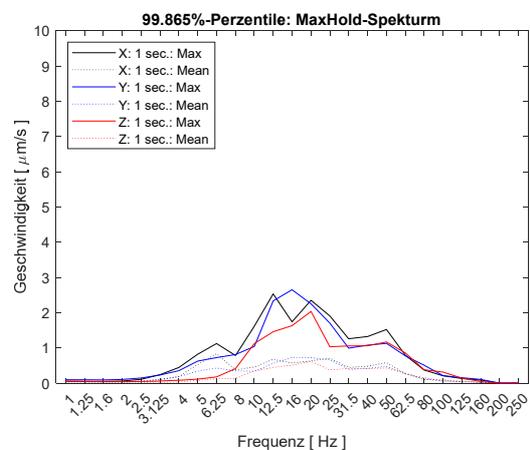


Bild 3.3b Max-Hold-Terzabandspektren auf der Moräne am geplanten Standort des Neubaus.

### 3.4 Konzept für den Hallenbau

Herzstück der neuen Produktionshalle ist der Bereich Präzisionsschleifen. Diese Arbeiten nehmen ca. 650 m<sup>2</sup> in Anspruch und sollen auf einer Ebene stattfinden. Eine weitere Anforderung ist, dass die Anlagen in Zukunft umgestellt und teilweise ersetzt werden können, ohne dass grosse bauliche Massnahmen nötig werden. Die Forderung nach hoher zukünftiger Flexibilität bedingt, dass auf einzelne Maschinensockel oder Lagerungen im Idealfall zu verzichten ist. Für den Bauherrn war schon zu Beginn des Projektes klar, dass dieser sensible Produktionsbereich auf der Bodenplatte des Gebäudes stehen wird. Zudem möchte man im Neubau, im Hinblick auf künftige Qualitätsanforderungen, ein klar niedrigeres Erschütterungsniveau erreichen als dies am heutigen Produktionsstandort herrscht.

Folgende konzeptionellen Überlegungen führten zur vorgeschlagenen Lösung (Bilder 3.4a und 3.4b), welche dann bezüglich ihrer Tauglichkeit betreffend der Erschütterungen untersucht wurde.

- Der hoch sensible Bereich des Präzisionsschleifens wird möglichst weit von der Strasse entfernt angeordnet. Zwischen Präzisionsschleifen und der Strasse wird ein Untergeschoss angeordnet, welches die Erschütterungen vom Strassenverkehr tendenziell etwas abschirmt.
- Die hoch sensiblen Schleifmaschinen werden auf einer kräftigen Bodenplatte angeordnet. Erschütterungsemissionen der Maschinen werden durch die Steifigkeit und auch durch die Masse der Bodenplatte klein gehalten. Die Bodenplatte wird möglichst gut an den Untergrund angeschlossen, mit dem Ziel eines möglichst kleinen Impedanz-Unterschiedes zwischen Untergrund und Beton. Damit können Erschütterungen, welche an der Oberfläche der Bodenplatte eingeleitet werden in das Erdreich abgestrahlt werden, womit die mechanische Energie aus dem System abfließen kann. Anstelle einer druckfesten Wärmedämmung, wie Schaumglas unter der Bodenplatte, welches eine sehr geringe Dichte und somit einen grossen Impedanz-unterschied zur Betonplatte aufweist, wird daher eine hochverdichtete Schüttung aus Elektro-Ofen-Schlacke verwendet.
- Die Bodenplatte mit der hochsensiblen Nutzung wird gegenüber dem restlichen Gebäude elastisch getrennt, wozu ein Polyurethan-Elastomer eingesetzt wurde. Die Erschütterungen aus dem Betrieb des Gebäude (Bohren, Fräsen, Kranbahn, Haustechnik, ...) gelangen so nur stark abgeschwächt in den hoch sensiblen Bereich.

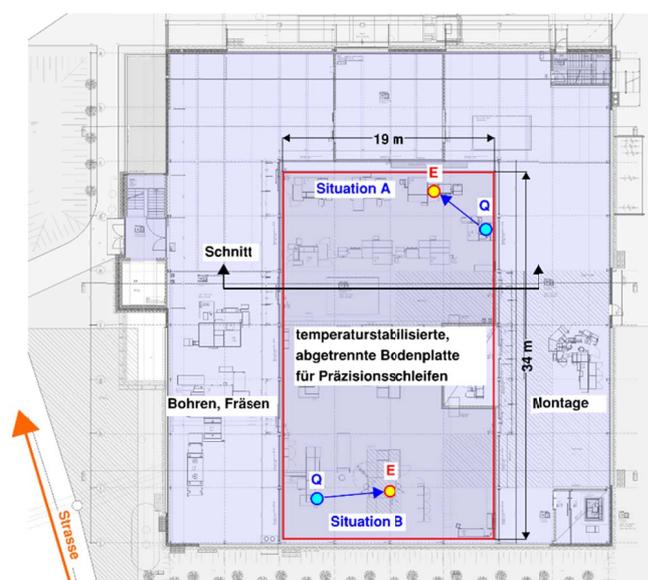


Bild 3.4a Grundriss Erdgeschoss.

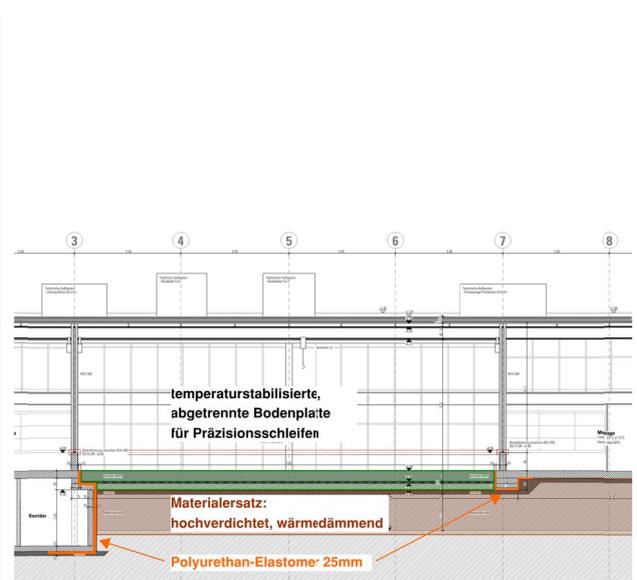


Bild 3.4b Schnitt durch das Gebäude

### 3.5 Prognose der zu erwartenden Erschütterungen

Im Folgenden wird beispielhaft die zu erwartenden Erschütterungen für zwei künftige Situationen (Situationen A und B nach Bild 3.4a) untersucht. Für die effektive Verifizierung des Konzeptes sind alle relevanten Situationen eingeflossen. Die Bilder 3.5a und 3.5b zeigen typische, eher starke gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten und daraus ermittelte dynamische vertikale Kräfte während die betrachteten Werkzeugmaschinen am aktuellen Standort arbeiteten und Erschütterungen erzeugten.

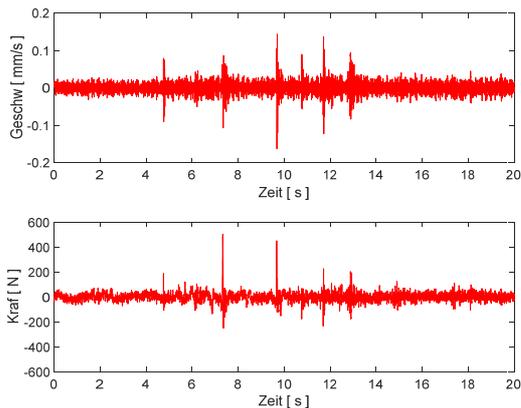


Bild 3.5a Typische gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten und daraus ermittelte vertikale dynamische Fundationskraft bei der Maschine Situation A am aktuellen Standort.

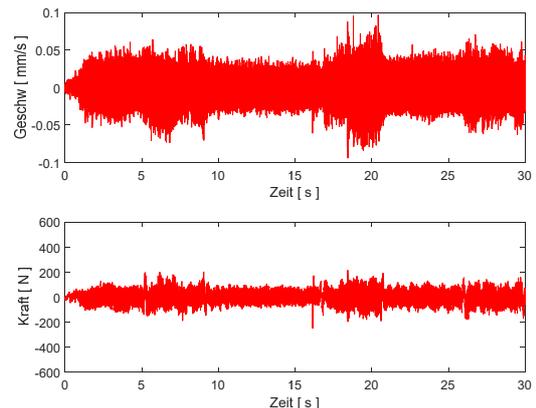


Bild 3.5b Typische gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten und daraus ermittelte vertikale dynamische Fundationskraft bei der Maschine Situation B am aktuellen Standort.

Um den Frequenzinhalt der Signale zu kennen, wurden die Max-Hold-Terzbandspektren der Schwinggeschwindigkeiten aus den Bildern 3.5a und 3.5b ermittelt. Dazu wurden 1-Sekunden Zeitfenster verwendet, wie dies in Kapitel 2 beschrieben ist. In den Bildern 3.5c und 3.5d sind die Spektren dargestellt. Der massgebende Frequenzinhalt liegt zwischen 8 und 125 Hz.

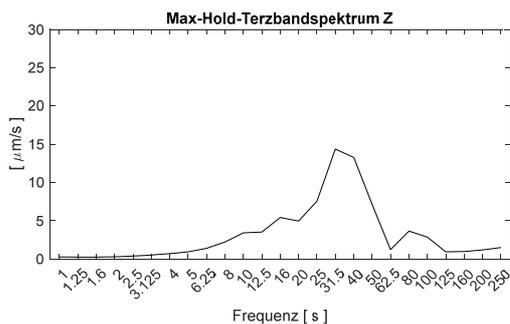


Bild 3.5c Max-Hold-Terzbandspektrum der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten bei der Maschine Situation A (Bild 3.5a).

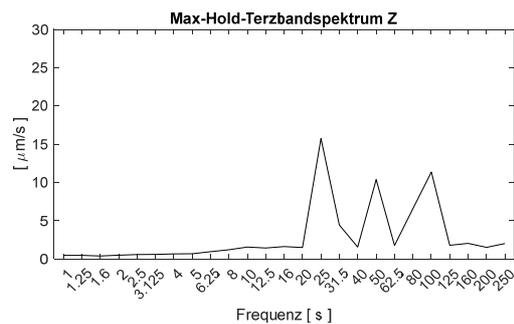


Bild 3.5d Max-Hold-Terzbandspektrum der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten bei der Maschine Situation B (Bild 3.5b).

Um die Admittanz der zukünftigen Bodenplatte abzuschätzen, wurde mit dem Finite Element Software Paket Sofistik 2018 die Bodenplatte und der anstehende Baugrund modelliert (Bild 3.5e). Bei der Modellierung des Baugrundes wurden an den Rändern nichtreflektierende Randelemente verwendet. Mangels Kenntnis der dynamischen Bodenkennziffern, wurden Scherwellengeschwindigkeiten und Dichten aus der Literatur (z.B. J.A. Studer und M. G. Koller, Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme) entnommen. Um die Unsicherheiten etwas zu erfassen wurden bezüglich des Baugrundverhaltens Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

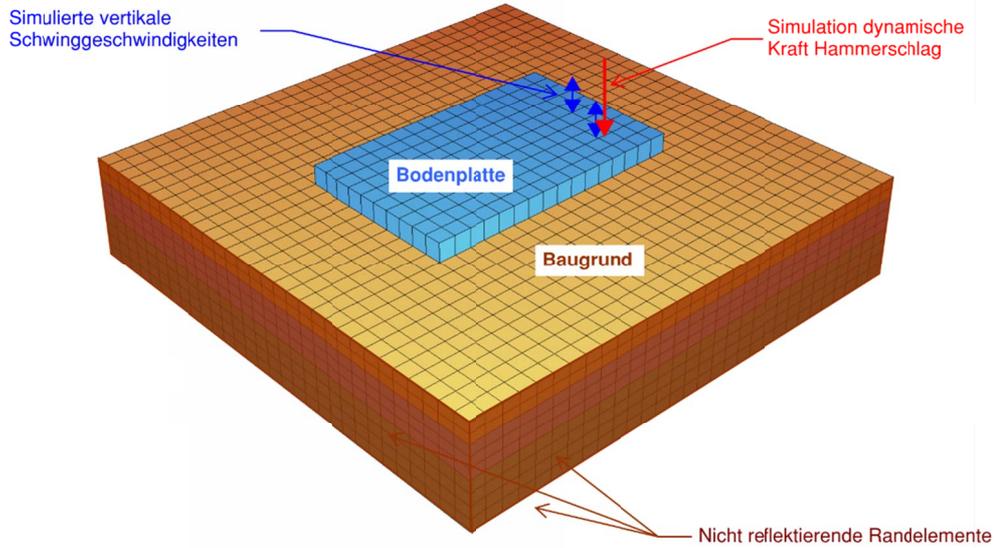


Bild 3.5e Finite Element Modell Bodenplatte und Baugrund.

Bei der numerischen Modellierung von dynamischen Problemen sind die Anforderungen für die numerische Stabilität zu beachten. So müssen die betrachteten Wellenlängen durch das örtliche Diskretisierungsgitter (Finite Elemente Netz) genügend oft abgetastet werden und im Zeitbereich gilt es die Zeitintegration bzw. den diskreten Zeitschritt so zu wählen, dass die höchste Frequenz mindestens 10 bis 20 zeitliche Stützstellen hat.

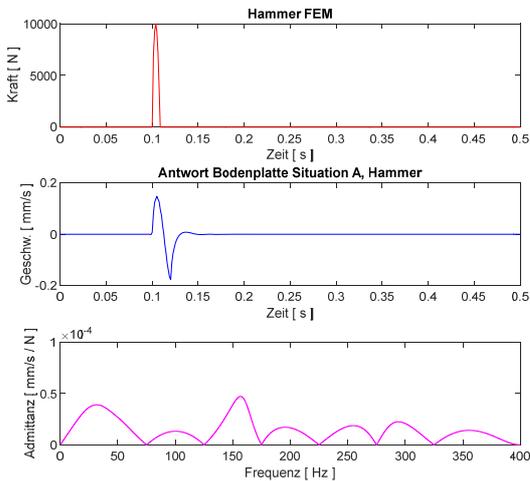


Bild 3.5f Von oben nach unten: Simulierter Hammerschlag, zugehörige vertikale Schwinggeschwindigkeit der Bodenplatte und Admittanz bestimmt in der Situation A bei der Quelle.

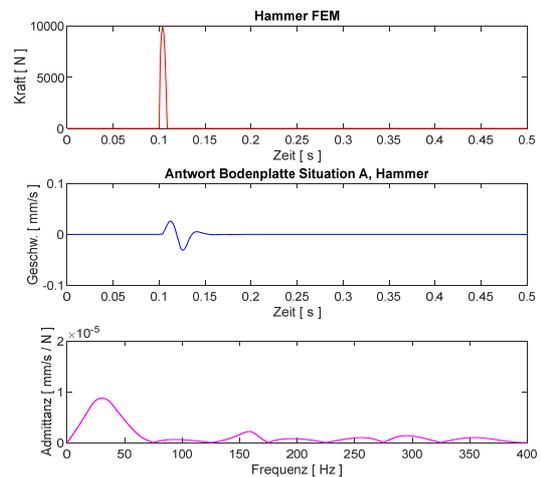


Bild 3.5g Von oben nach unten: Simulierter Hammerschlag, zugehörige vertikale Schwinggeschwindigkeit der Bodenplatte und Admittanz bestimmt in der Situation A für einen Hammerschlag an der Quelle und die gemessene Schwinggeschwindigkeit beim Empfänger.

In den Bildern 3.5f und 3.5g sind die simulierten Daten für die Situation A dargestellt. Aus der im Modell bestimmten Admittanz und den experimentell bestimmten dynamischen Kräften der Maschinen auf die Foundation (Bilder 3.5a und 3.5b) wird die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit am neuen Standort abgeschätzt. Ist die Schwinggeschwindigkeit nicht am Maschinenstandort selber von Interesse, so kann die Admittanz auch bestimmt werden, indem der Hammerschlag am Standort der Maschine erfolgt, die Aufzeichnung der Schwinggeschwindigkeiten jedoch an einen anderen, interessierenden Standort.

In den Bildern 3.5h und 3.5i sind für die Situationen A und B die prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten abgebildet. Aus den prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten wird das Max-Hold-Terzband analog zum Vorgehen im Kapitel 2 bestimmt und mit den Anforderungen aus Kapitel 3.2 verglichen.

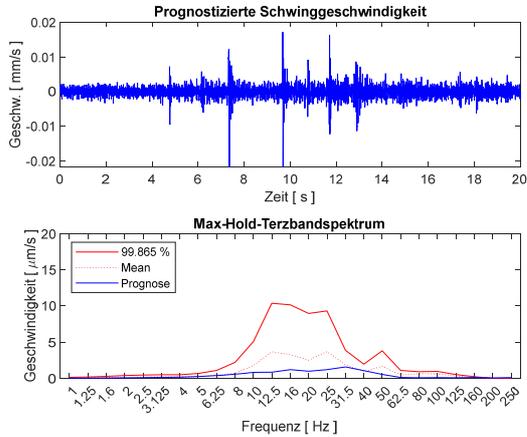


Bild 3.5h Situation A: Prognostizierte Schwinggeschwindigkeit (oben) und Vergleich des Max-Hold-Terzbandspektrums der prognostizierten Schwinggeschwindigkeit mit den Anforderungen (rot ausgezogene Linie).

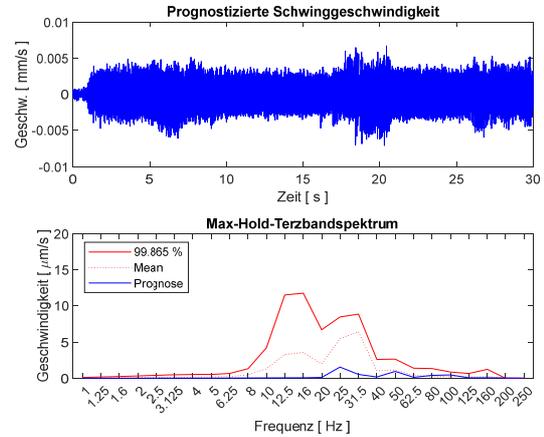


Bild 3.5i Situation B: Prognostizierte Schwinggeschwindigkeit (oben) und Vergleich des Max-Hold-Terzbandspektrums der prognostizierten Schwinggeschwindigkeit mit den Anforderungen (rot ausgezogene Linie).

### 3.6 Kontrolle bei der Bauausführung

Im Rohbau, nach Erstellung und Aushärtung der Bodenplatte wurden Admittanzmessungen auf der Bodenplatte vorgenommen um die Prognoseberechnung zu verifizieren. Dies ist insofern wichtig, da die Wellengeschwindigkeiten des Bodens in diesem Projekt nur konservativ abgeschätzt wurden und dies somit eine Unsicherheit darstellte. Falls die Admittanzmessungen zeigen würden, dass das Verhalten der Bodenplatte deutlich von den Annahmen abweichen, hätte man zu diesem Zeitpunkt noch Möglichkeiten um Massnahmen zu ergreifen. In den Bildern 3.6a und 3.6b sind die Admittanzmessungen und der Vergleich mit der im Finite Element Modell ermittelten Admittanz dargestellt. Der Vergleich mit der Simulation passt sehr gut.



Bild 3.6a Baustelle zum Zeitpunkt der Admittanzmessung

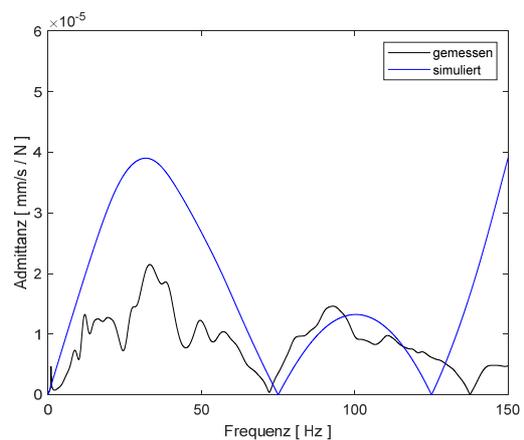


Bild 3.6b Vergleich der gemessenen Admittanz und der mit der Finite Element Software ermittelten Admittanz für die Situation A.

### 3.7 Messungen nach Inbetriebnahme

Ein Vergleich Simulation und Messung nach der Inbetriebnahme des Gebäudes ist nur qualitativ möglich, da die exakt gleichen Produktionsschritte der Maschinen bei der Messung am aktuellen Standort nicht festgehalten wurden. Trotzdem ist in den Bildern 3.7a und 3.7b sowie 3.7c und 3.7d ein Vergleich der Prognose und den nach Inbetriebnahme gemessenen Erschütterungen für die Situationen A und B gezeigt. In der Situation stimmen die Größenordnungen der Amplituden der impulsartigen Erschütterungen gut überein. In der Situation B überschätzt die Prognose die Erschütterungen klar, dies ist unter anderem auf die in der Simulation unterschätzte Admittanz der Bodenplatte im tieferfrequenten Bereich zurückzuführen.

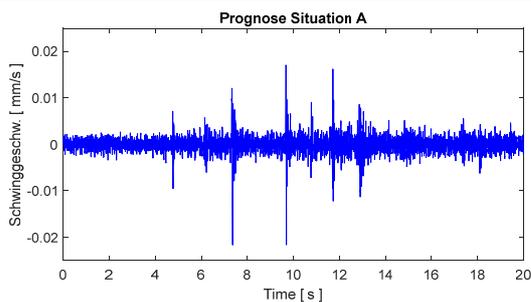


Bild 3.7a Situation A: Prognostizierte vertikale Erschütterungen.

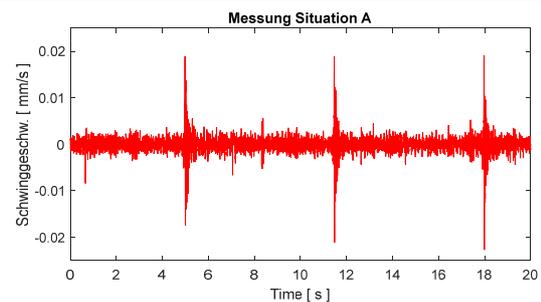


Bild 3.7b Situation A: nach Inbetriebnahme gemessene vertikale Erschütterungen.

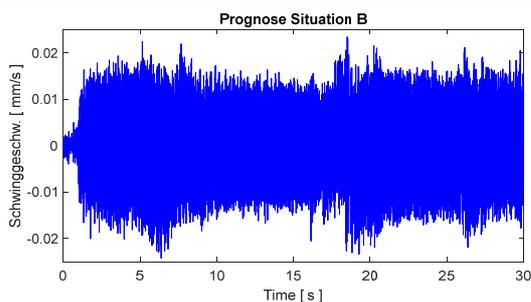


Bild 3.7c Situation B: Prognostizierte vertikale Erschütterungen.

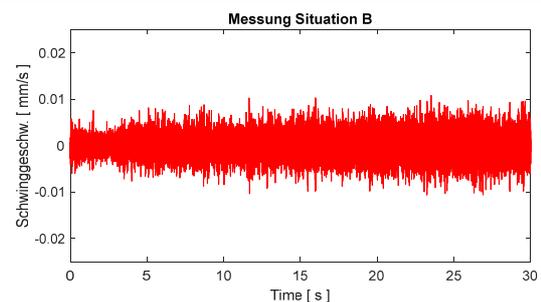


Bild 3.7d Situation B: nach Inbetriebnahme gemessene vertikale Erschütterungen.

## 4 Zusammenfassung

Für die Prognosen von zu erwartenden Erschütterungen bei Produktionsbetrieben im Maschinenbau sind in einem ersten Schritt die Anforderungen an die Erschütterungsarmut zu ermitteln. Mangels Angaben von Maschinenherstellern können diese Anforderungen bei bestehenden Maschinen direkt durch Erschütterungsmessungen erfasst werden. Das Vorgehen bei der Signalverarbeitung analog zur Standortevaluation im Laborbau, basierend auf Max-Hold-Terzbandspektren, eignet sich sehr gut, um einen unteren zulässigen Grenzwert für die betrachtete Maschine zu erfassen. Durch Admittanzmessungen und Messungen der Schwinggeschwindigkeiten während typischen Produktionsprozessen am aktuellen Standort können die dynamischen Maschinenkräfte auf die Fundation abgeschätzt werden. Am geplanten Aufstellort kann bei Neubauten die Admittanz mit Hilfe von Finite Element Simulationen ermittelt werden während bei schon bestehenden Bauten dies sinnvollerweise gemessen wird. Zusammen mit der dynamischen Maschinenkraft kann die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit am geplanten Standort prognostiziert und beurteilt werden.

Anhand eines Beispiels ist das Vorgehen exemplarisch vorgestellt worden. Die Admittanzmessung kurz nach Erstellung der Bodenplatte als auch die Erschütterungsmessung nach Inbetriebnahme der Halle zeigen, dass das Vorgehen eine verlässliche Prognose der zu erwartenden Erschütterungen ermöglicht.