

Mischnutzung von Gebäuden – Erschütterungen und Sekundärluftschall in Wohn- und Büroräumen durch gebäudeinterne Produktion

H. Molzberger, N. Breitsamter, imb-dynamik GmbH, Herrsching, D

Abstract

Es werden Maschinen in Gebäuden betrieben, die auch für Wohnungen und Büros genutzt werden. Im vorliegenden Beitrag wird die Problematik dieser Art einer Mischnutzung von Gebäuden aus schwingungstechnischer Sicht beleuchtet.

Hierfür wird als ein Beispiel ein Fall herangezogen, der nicht zur Zufriedenheit der Gebäudenutzer führte. In einem Gebäude werden im Erdgeschoss CNC-Maschinen betrieben, die trotz erheblicher Entkopplungsmaßnahmen in den Oberschossen zu störenden Immissionen führen und die Zielvorstellungen und Anhaltswerte für Erschütterungen und Sekundärluftschall überschreiten.

Es werden die messtechnischen Untersuchungen vorgestellt, die dynamischen Zusammenhänge analysiert und mögliche Abhilfsmaßnahmen aufgezeigt. Hierfür auch eine einfache Einführung in die zugrunde liegende Mechanik und die Abgrenzung der Aufgabenstellung von einem „typischen“ Erschütterungsproblem, bei welchem die Schwingungen von außen auf ein Gebäude einwirken. Weiterhin wird eine ausgeführte, jedoch wenig wirksame Maßnahme vorgestellt und die Gründe für das Scheitern der Maßnahme genauer hinterfragt.

Anhand eines zweiten aktuellen Beispielprojektes sehen wir uns die spezielle Aufgabenstellung aus Sicht der baudynamischen Planung an: Im konkreten Fall wurden sehr spezielle messtechnische Voruntersuchungen erforderlich, eine vergleichsweise umfassende Modellbildung und vor allem die Klärung einer Vielzahl begleitender Fragestellungen. Die Untersuchungen gehen damit weit über das übliche Maß eines vertikalen Gebäudemodells hinaus und erhöhen so erheblich den Wissensstand bzgl. der gegebenen Problematik

Mischnutzung von Gebäuden – Erschütterungen und Sekundärluftschall in Wohn- und Büroräumen durch gebäudeinterne Produktion

Problematik – Messungen – Analyse – Abhilfsmaßnahmen

Autor: Dr.-Ing. Holger Molzberger, Co-Autor: Dr.-Ing. Norbert Breitsamter, beide imb-dynamik GmbH

Es werden Maschinen in Gebäuden betrieben, die auch für Wohnungen und Büros genutzt werden. Im vorliegenden Beitrag wird die Problematik dieser Art einer Mischnutzung von Gebäuden aus schwingungstechnischer Sicht beleuchtet.

Hierfür wird als ein Beispiel ein Fall herangezogen, der nicht zur Zufriedenheit der Gebäudenutzer führte. In einem Gebäude werden im Erdgeschoss CNC-Maschinen betrieben, die trotz erheblicher Entkopplungsmaßnahmen in den Oberschossen zu störenden Immissionen führen und die Zielvorstellungen und Anhaltswerte für Erschütterungen und Sekundärluftschall überschreiten.

Es werden die messtechnischen Untersuchungen vorgestellt, die dynamischen Zusammenhänge analysiert und mögliche Abhilfsmaßnahmen aufgezeigt. Hierfür auch eine einfache Einführung in die zugrunde liegende Mechanik und die Abgrenzung der Aufgabenstellung von einem „typischen“ Erschütterungsproblem, bei welchem die Schwingungen von außen auf ein Gebäude einwirken. Weiterhin wird eine ausgeführte, jedoch wenig wirksame Maßnahme vorgestellt und die Gründe für das Scheitern der Maßnahme genauer hinterfragt.

Anhand eines zweiten aktuellen Beispielprojektes sehen wir uns die spezielle Aufgabenstellung aus Sicht der baodynamischen Planung an: Im konkreten Fall wurden sehr spezielle messtechnische Voruntersuchungen erforderlich, eine vergleichsweise umfassende Modellbildung und vor allem die Klärung einer Vielzahl begleitender Fragestellungen. Die Untersuchungen gehen damit weit über das übliche Maß eines vertikalen Gebäudemodells hinaus und erhöhen so erheblich den Wissensstand bzgl. der gegebenen Problematik.

Verwendete Abkürzung: „EL“ = Elastische Lagerung

Vorstellung imb-dynamik

imb-dynamik bearbeitet seit über 30 Jahren ausschließlich Fragestellungen in den Bereichen Dynamik, Schwingungen und Erschütterungsschutz.

TEIL 1: CNC-Maschinen in Wohn- und Bürogebäude (Sanierung)

1 Problematik

Im hier vorgestellten Bestandsgebäude sind CNC-Maschinen in den Obergeschossen trotz einer aufwändig und sorgfältig ausgeführten elast. Lagerung (= „EL“) teils störend wahrnehmbar. Es handelt sich um Sekundären Luftschall, der von schwingenden Bauteilen abgestrahlt wird. Die Anhaltswerte für Schlafräume nachts – bzw. Büroräume werden überschritten. Das Gebäude steht daher überwiegend leer bzw. wurde zu Lagerfläche umgenutzt.

1.1 Gebäude

Das bestehende Gebäude wurde oberhalb des EG vollständig entkoppelt, um den oberen Teil mit Büros und Wohnungen vom unteren Teil, der CNC-Fertigung, zu trennen.

Die Trennung besteht aus Gummigranulat mit Mineralwollstreifen, 5 cm stark, weiterhin Schubnocken zur Aufnahme von Erdbebenkräften, und wurde sehr sorgfältig eingebaut (perfekte Dokumentation, Abdeckung mit Edelstahlplatten).

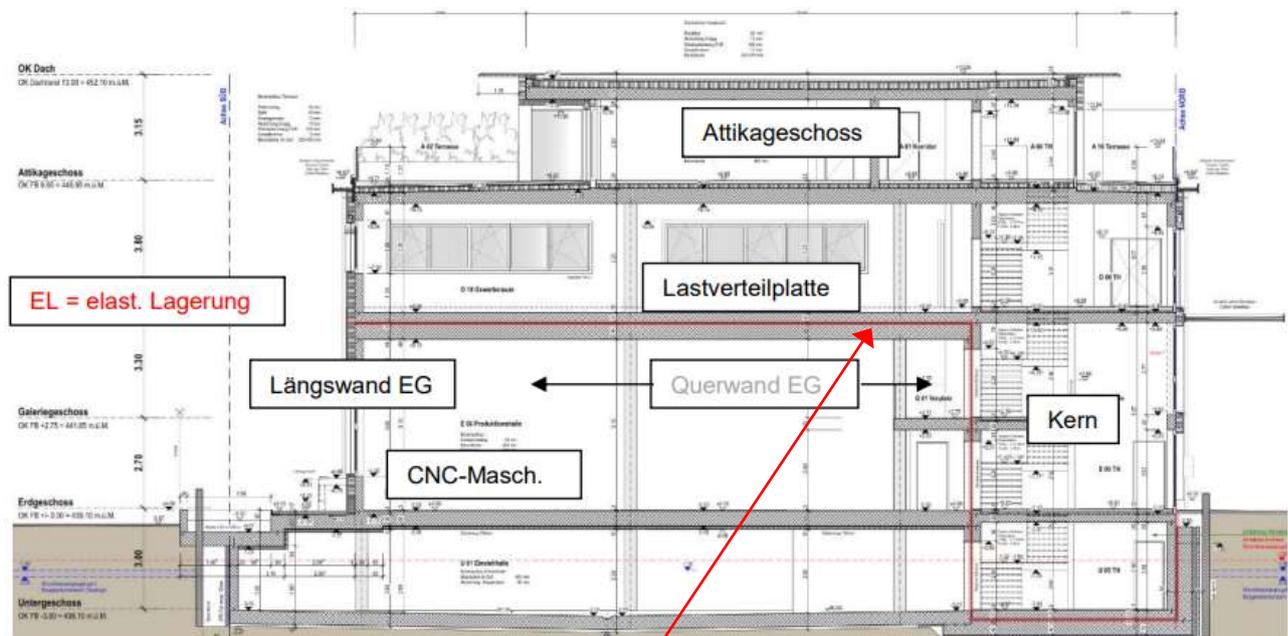


Bild 1: Querschnitt entkoppeltes Gebäude



Bild 2: Sorgfältige Ausführung Streifenlagerung Gummigranulat / Mineralwolle

1.2 Zielvorstellungen

Erschütterungen nach DIN 4150/2

Die Werte müssen bei dauerhaftem Betrieb (24/7) am Immissionsort unter der menschl. Fühlschwelle von $KB = 0,1$ bleiben.

Sekundärluftschall nach VDI 2719/ TA-Lärm

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Schwingschnelle in den Raumbegrenzungsflächen, den jeweiligen Abstrahl- und Absorptionsverhältnissen im Raum und den daraus resultierenden Schalldruckpegeln im Raum. Für den FAST-bewerteten Maximalpegel nach VDI 2719 kann abgeleitet werden:

$$\bar{L}_{\max} = L_{vA, \text{FAST}} - 3 \text{ dB} + 10 \cdot \log(4 \cdot S/A) + 10 \cdot \log \sigma \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

- \bar{L}_{\max} = A-bewerteter mittlerer maximaler Schalldruckpegel im Raum in dB(A)
- $L_{vA, \text{FAST}}$ = A- und FAST-bewerteter Schnellepegel der Raumbegrenzungsflächen in dB(A), re $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
- S = Größe der schwingerregten Fläche in m^2
- A = Absorptionsvermögen des Raumes in m^2
- σ = Abstrahlgrad
- 3 dB = Korrekturterm für Berücksichtigung der Phasenlage verschiedener Übertragungswege und schallabstrahlender Bauteile (Erfahrungswert)

Für S , A und σ werden validierte Standardwerte für raumakustische Verhältnisse in Wohnräumen und mit Wohnräumen vergleichbar ausgestatteten Räumen angesetzt.

VDI 2719, mittlere Maximalwerte für Schlafräume nachts:

Gebiet	sog. Komfortanforderung	Mindestanforderung
Reine und Allgemeine Wohngebiete	35 dB(A)	40 dB(A)
Sonstige Gebiete	40 dB(A)	45 dB(A)

Aus diesen Werten lässt sich ein Beurteilungswert von 25 dB(A) nachts ableiten.

Auch die TA-Lärm sowie die SIA 181 geben diesen Wert für Dauereinwirkungen an.

In allen Beurteilungsszenarien ist eine ggf. vorhandene Impuls- und Tonhaltigkeit – wie z.B. bei CNC-Fräsen – gesondert zu beachten. I.d.R. macht dies nochmals 3-6 dB aus.

Für niederfrequente Geräuscheinwirkungen aus der Nachbarschaft wäre die DIN 45 680 heranzuziehen. Ein solcher Sachverhalt ist hier jedoch weder vom Entstehungsort her noch vom Frequenzbereich gegeben.

Vorgefundene Situation:

- Büroetage ca. 43 dB(A)
- Wohnungen im Attikageschoss ca. 33 dB(A)

Somit wäre eine Reduktion von rund 13 dB(A) wünschenswert. Störend werden jedoch die Einwirkungen nur beim groben Fräsen mit entsprechendem Schichtabtrag wahrgenommen.

2 Messkonzept

2.1 Messaufbauten

Es wurden 4 einzelne Messkampagnen mit identischem Programm an den Fräsen durchgeführt:

Variante (Messaufbau)	Name	Ziel / Besonderheiten
1	Flächige Messung im 1.OG	Feststellen der wesentlichen Abstrahlflächen Dadurch Konzentration auf die maßgebenden Übertragungswege mit den weiteren Messaufbauten
2	Detailmessung Wellenausbreitung	Durch erste Messergebnisse initiiert: Untersuchung von Biegewellen auf der elast. gelagerten Lastverteilplatte
3	Vertikalschnitt	Vertikalübertragung durch die EL messen Gesamtverhalten, Estrichverhalten
4	Detailmessung Kern	Bewertung der Rest-Schwingungsübertragung durch den nicht (oder schlecht) trennbaren Kern im Fall von Maßnahmen

2.2 Messpunkte

Links im Bild die Messpunktanordnung – rechts die standardisierte Sekundär-Luftschall Prognose aus den Messwerten (blau = vertikal, rot = horizontal)

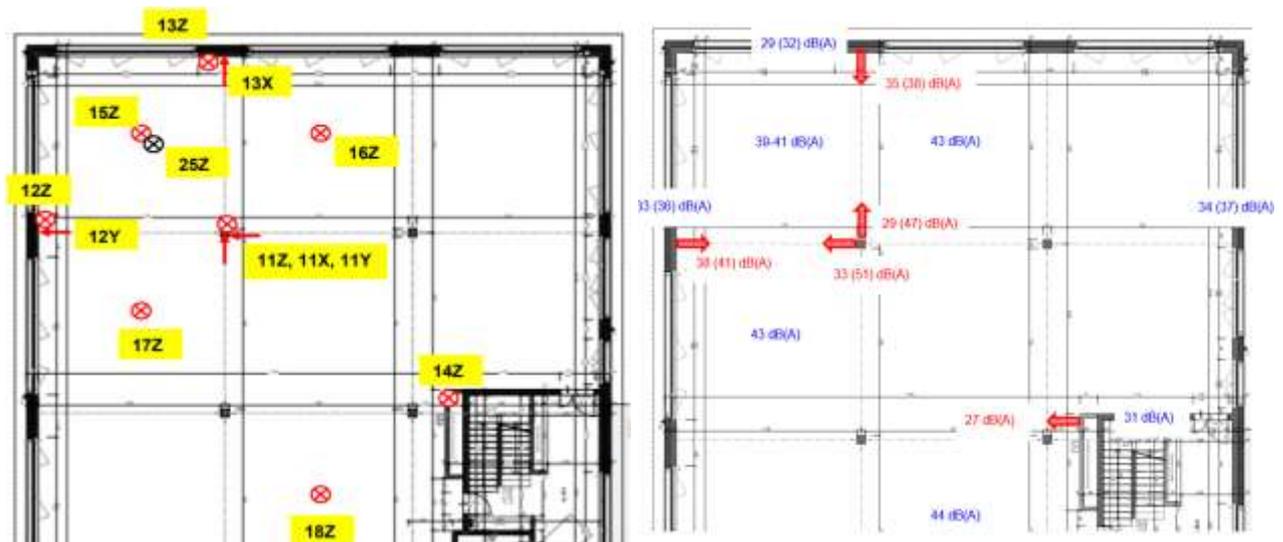


Bild 3: Immissionsort 1. OG mit Messpunkten zur baudynamischen Analyse

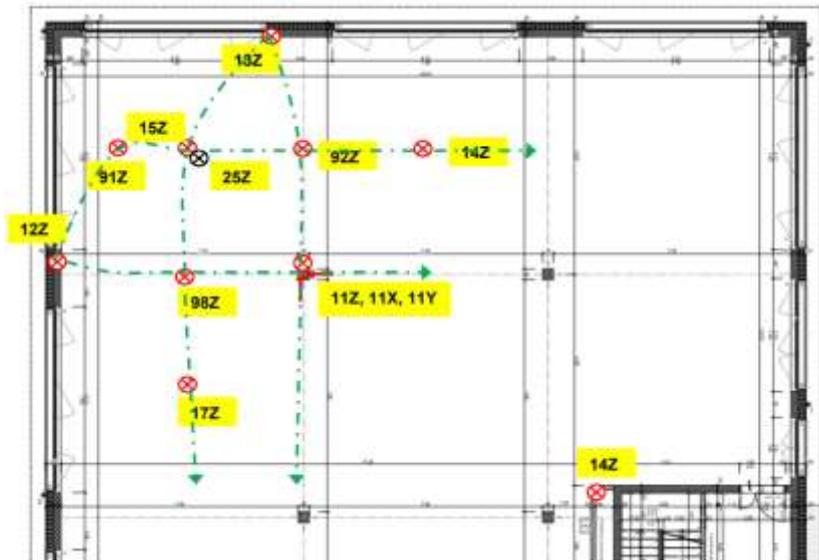


Bild 4: Deckenuntersuchung Biegewellen, Messpunkte

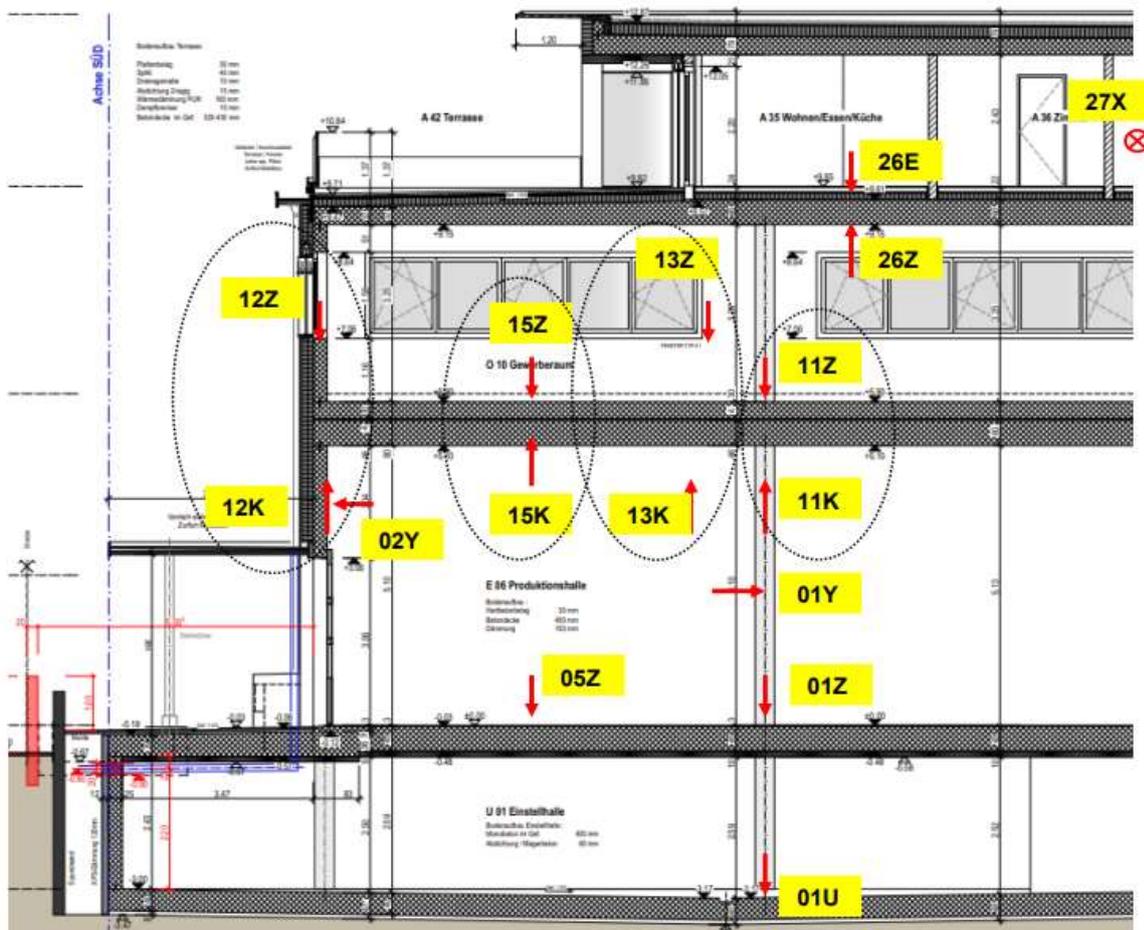


Bild 5: Vertikalschnitt durch das Gebäude, Messpunkte

2.3 Überblick Auswertestufen

- a) Spektrale standardisierte Auswertung (s. Abschnitt 5, Abbildungen im Anhang)
 - der 4 Messkampagnen
 - aller Messpunkte (s. Lage der Messpunkte)
 - jeweils für den Betriebszustand Fräser 1 und Fräser 2 (Betriebsprogramm)
 - für Erschütterungen und Sekundärluftschall¹

In jedem Spektrum ist die jeweils 3-malige Messung von Fräser 1 über ca. 30 Sekunden und Fräser 2 ebenfalls über 30 Sekunden enthalten, um ein etwas breiteres – jedoch reproduzierbares – Spektrum zu erhalten, das die Bildung von Übertragungsfunktionen ermöglicht.

- b) Analyse im Zeitbereich: V.a. für Einzählwerte (z.B. Sek.-Luftschall in dB(A)) und zur Beurteilung laufender BiegeWellen (Variante 2)
- c) Weiterführende Analysen, z.B. Übertragungsfunktionen und ergänzende mechanische Betrachtungen, Korrektur der Prognosewerte durch Berücksichtigung der abstrahlenden Flächen ($A_{\text{Stütze}} < A_{\text{Decke}}$)
- d) Messwertgestützte Beurteilung der Situation nach der Durchführung von Maßnahmen. Beantwortung der Frage: Wieviel Restschall überträgt sich durch die verbleibenden Übertragungswege, wenn der jeweils maßgebende gekappt wird?

3 Baudynamische Analyse

3.1 BiegeWellen – Zusammenhang mit der EL

Die 2. Messung „Details Wellenausbreitung“ ergab in Übereinstimmung mit der Anschauung:

- Brüstung: Die statisch größere Einsenkung auf der EL führt auch dynamisch zu einer größeren Amplitude
- über biegesteife Ecken schwingt hierdurch die Brüstung /Wand horizontal in einer Pinned-Pinned-Mode
- auch die Decke oberhalb wird wiederum über eine biegesteife Ecke zu BiegeWellen angeregt. (Schwingung gleicher Frequenz, jedoch größerer Wellenlänge, da Decke dicker)

Visualisierung des messtechnisch detektierten Effektes der BiegeWellenentstehung:

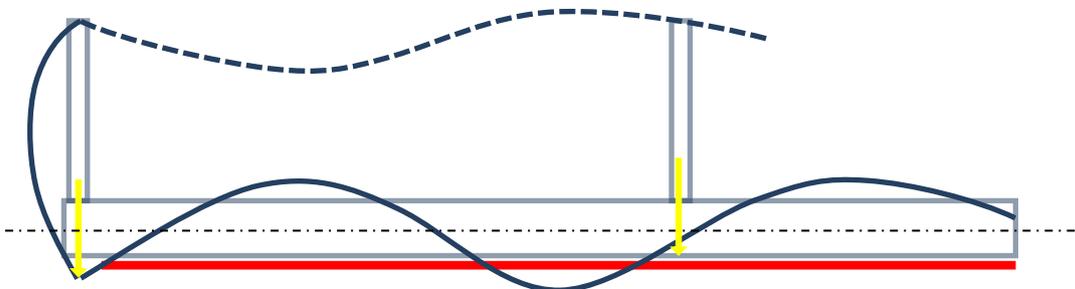


Bild 6: Entstehung von BiegeWellen

¹ Jeweils standardisierte Prognose aus dem jeweiligen Messpunkt, als ob dieser Messpunkt ein Estrichmesspunkt wäre. Kleinere Flächen, z.B. einer horizontal schwingenden Stütze müssen separat berücksichtigt werden.

Verringerung des Einflusses aus Biegewellen durch eine pressungsangepasste (oder lastadaptive) Elastomerlagerung: Aufnahme der vertikalen Lasten dort, wo sie von oben herunterkommen, möglichst versatzfrei

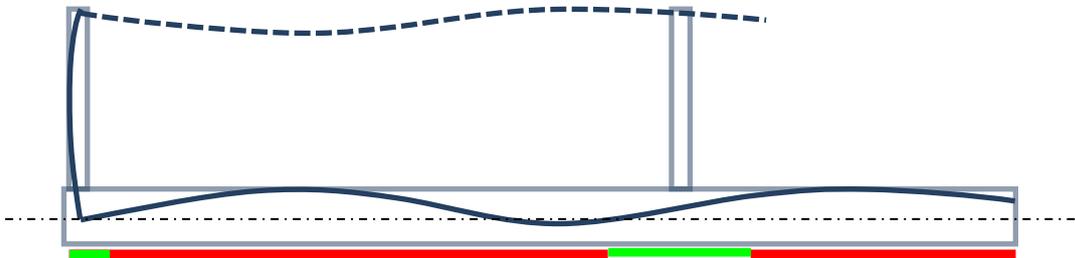


Bild 7: Verminderung von Biegewellen durch Anpassung des stat. Lastabtrages

Durch die Biegewellenthematik wird in etwa noch einmal die gleiche Immissionsenergie freigesetzt, wie im reinen (versatzfreien) Vertikalfall.

Allein durch die Randverdrehung gibt es im Fassadenbereich jedoch ständig das Entstehen von Biegewellen, auch wenn die EL perfekt angepasst ist. Im vorliegenden Fall haben wir demgegenüber eine signifikante Verstärkung.

3.2 Biegewellen: Messtechnischer Beleg

Vergleich der Bereiche mit und ohne Biegewellen:

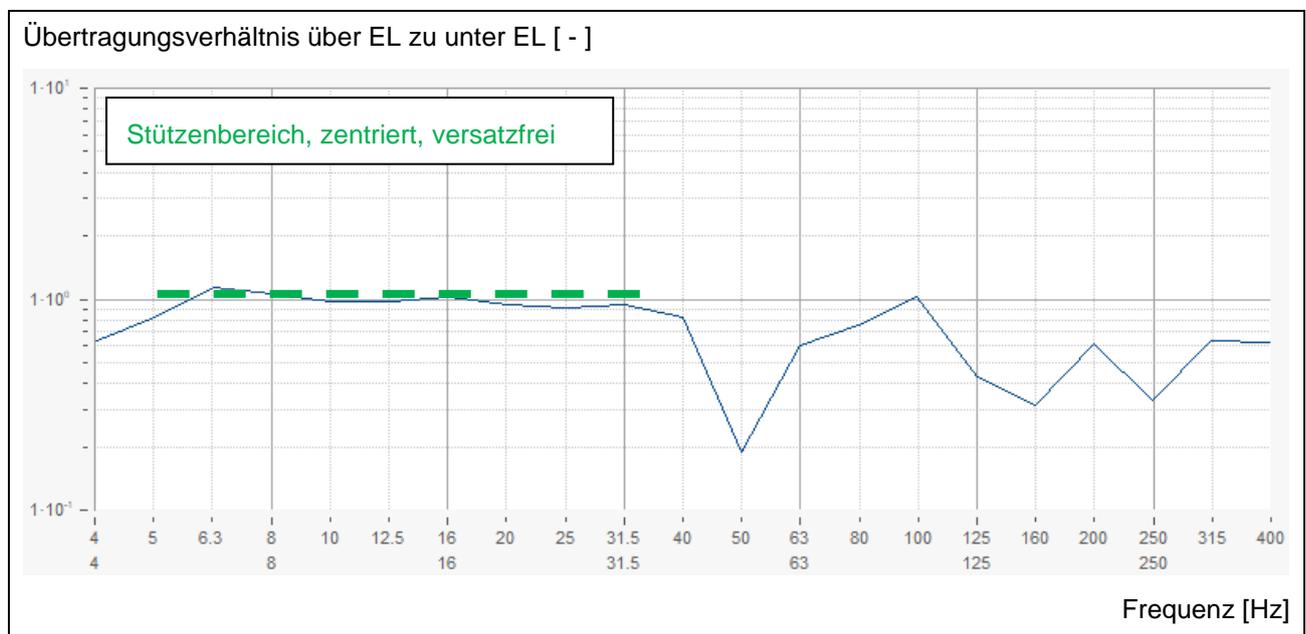


Bild 8: Quasistatische Balance: Faktor 1

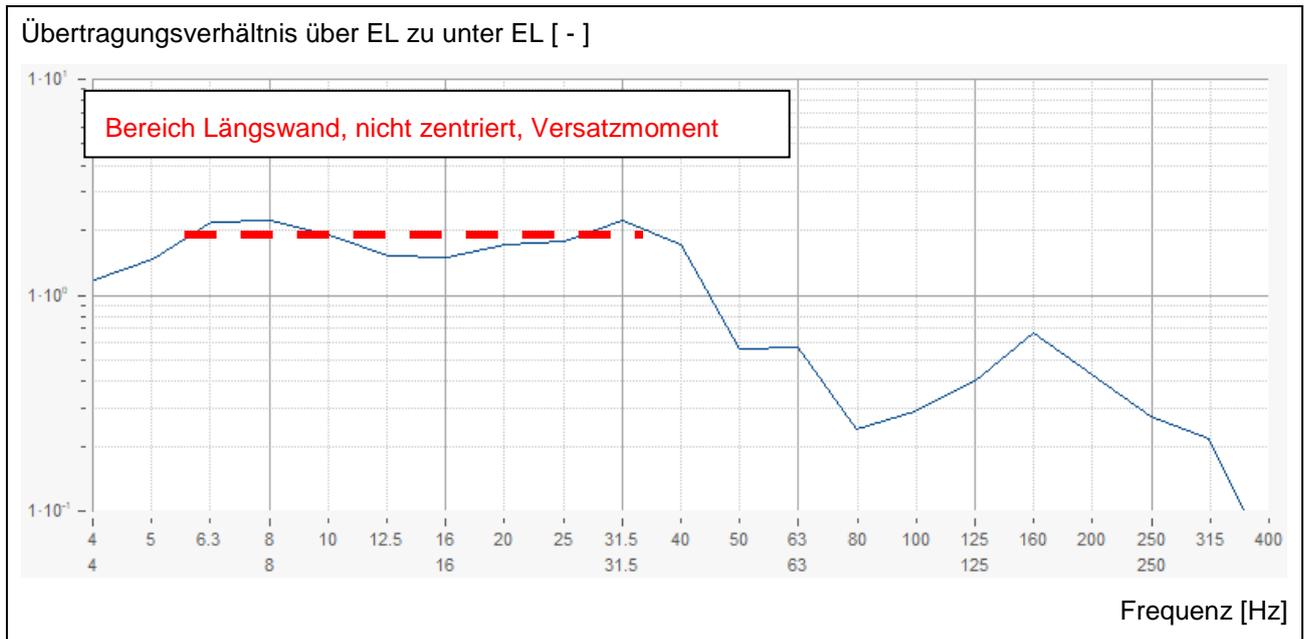


Bild 9: Quasistatische Balance: **Faktor 2**

Der Nachweis von Biegewellen erfolgt – wider Erwarten – über den „quasistatischen“ Frequenzbereich. Hier hilft die Statik, die Dynamik zu verstehen.

3.2.1 Sonderfall: Horizontalschwingung der Stützen

Stütze horizontal – Dämpfung extrem gering (1,9%)

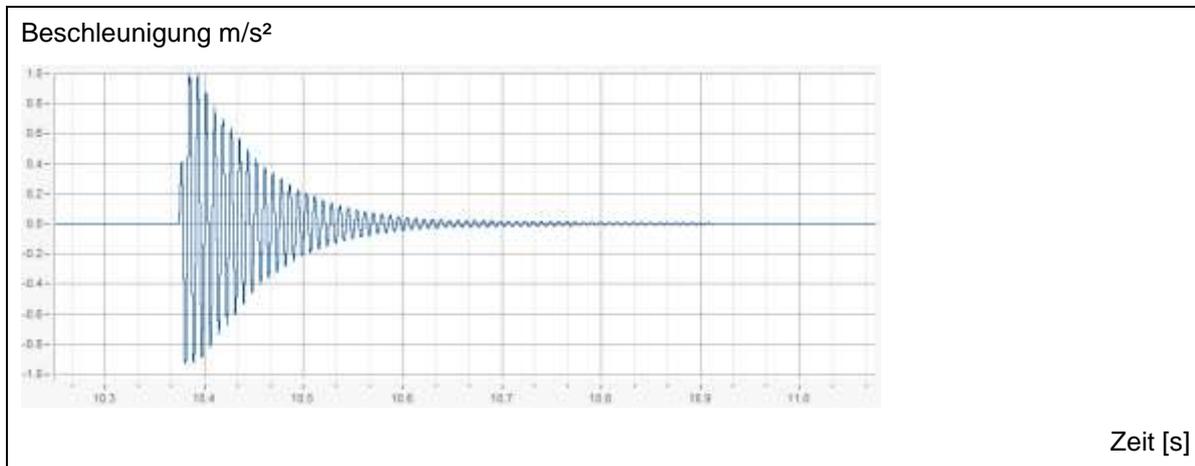


Bild 10: Horizontale Schlaganregung einer Stütze

Die abstrahlende Fläche einer Stütze ist im Vergleich zu einem Estrich oder selbst einer Wand gering. Es können zudem nur Frequenzen „oberhalb des akustischen Kurzschlusses“ abgestrahlt werden.

Nachfolgend ein Überblick über die übliche **Vertikalanregung** und die detektierten **Biegewellen**:

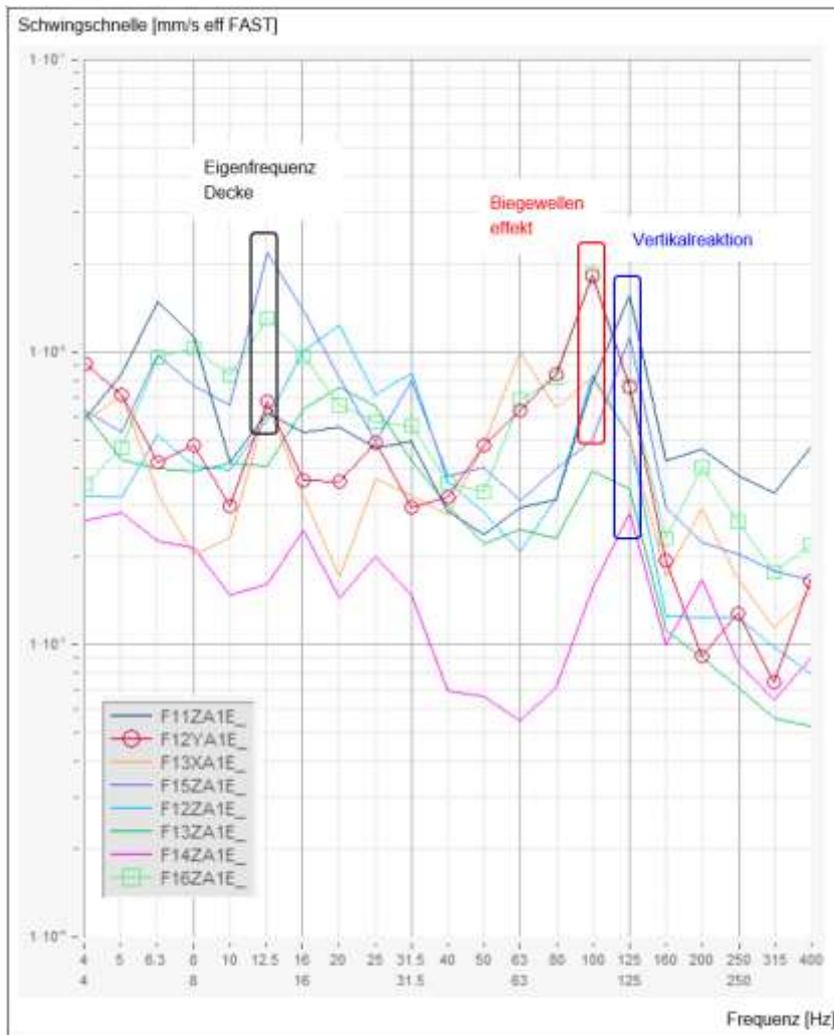


Bild 11: Biegewellen vs. Vertikal

4 Ursachen

Nach erfolgter Analyse ergeben sich die folgenden Ursachen für die erhöhten Immissionen:

- I. Umplanung mit Unterkellerung
- II. Externer Kostendruck – folglich Verzicht auf eine pressungsabhängige teurere Elastomer Lagerung
- III. Infolge des nun einheitlichen Lagermaterials über- und unterlastete Bereiche – v.a. zu Biegewellen im Gebäude führend
- IV. Vermutlich generelle Unterschätzung der verringerten Wirksamkeit elastischer Lager in Gebäuden, Stichwort „Abweichung von der Einmassenschwinger-Berechnung“

Jedoch:

- Keinerlei Ausführungsprobleme oder -fehler.
- Die EL ist sauber durchgeplant, was lediglich von den resultierenden statischen Problemen (aus II und III resultierend) durchkreuzt wurde: Durch ungleiche Setzungen ergaben sich mutmaßlich Körperschallbrücken in der Fassadentrennung. Die Fassadenfuge konnte nachgeschnitten werden.
- Auch die eigens vorgesehene Erdbbensicherung mit sehr aufwändigen Schub-Höckern war nicht ursächlich für die vorgefundene Problematik.

5 Maßnahmen

5.1 Überblick

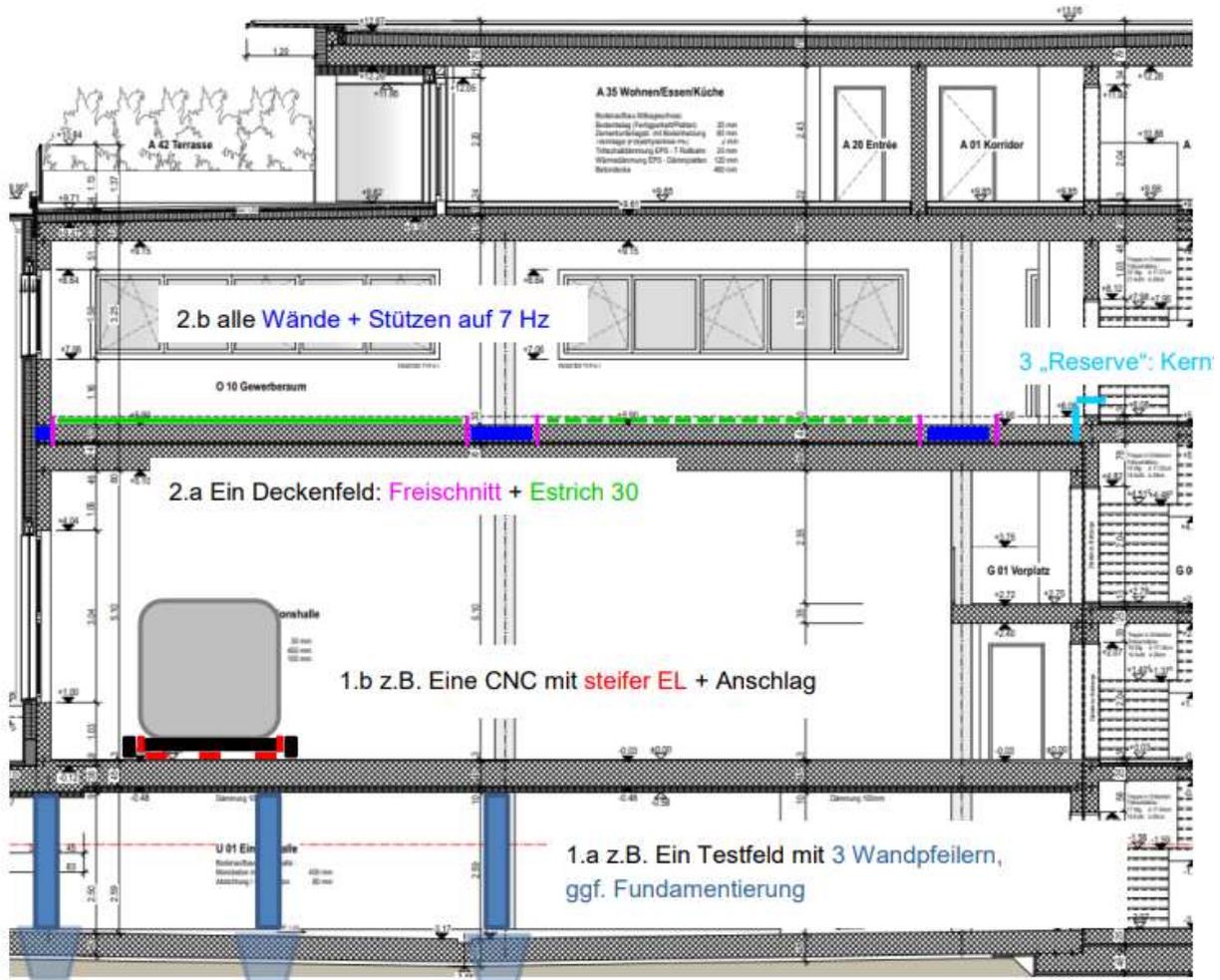


Bild 12: Überblick möglicher Maßnahmen

1.a	Stützensteifigkeit UG erhöhen – um die nachträglich geplante Unterkellerung „rückgängig“ zu machen
1.b	Maschinenseitige Maßnahmen (nach anfänglichen Versuchen wohl nicht gewünscht)
2.a	Elastische Lagerung im Wand-, Brüstungs- und Stützenbereich ersetzen und auf ca. 7 Hz abstimmen
2.b	im Deckenfeldbereich Abstrahlung verringern durch niederfrequente Estrichabstimmung
3.	Kernfreischnitt, falls dieser nach Sanierung noch Beiträge zur Immissionssituation liefert
4.	Betriebstechnische Maßnahmen, z.B. 2-Schicht-Betrieb (nicht gewünscht)

5.2 Lagermaterial und Biegewellenreduktion

Errechnet wurde die Verbesserungswirkung von PU-Schaum 50 mm gegenüber Gummigranulat (speziell im vorliegenden Fall, ermittelt mit dem Gebäudemodell iSEG (10))

Sek.-LS [dB(A)] infolge $v = 0,1 \text{ mm/s eff}$

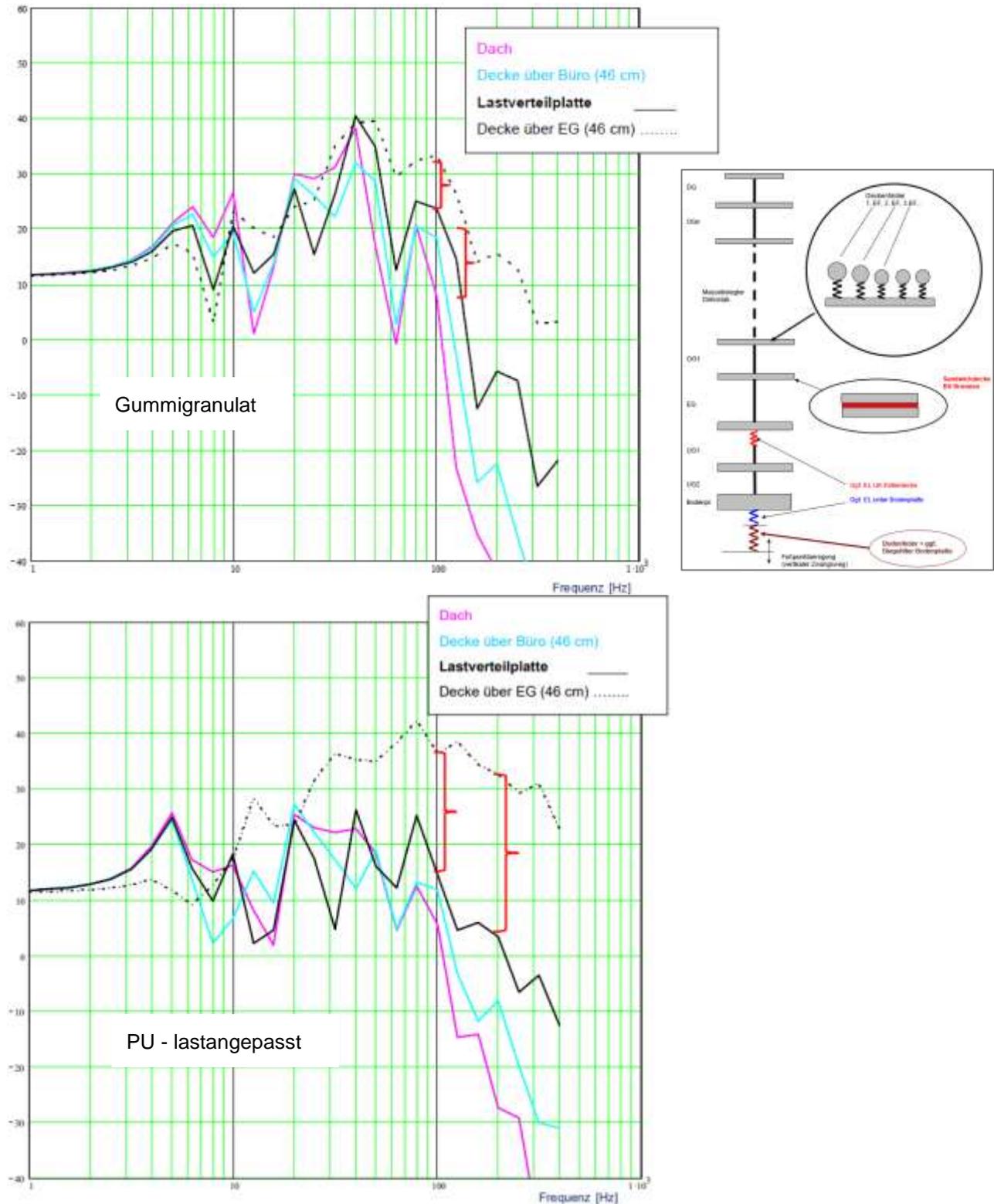


Bild 13: Sek.-Luftschall mit iSEG (10)

Vgl. der Einfügedämmungen (mit / ohne EL) in den Hauptanregungsfrequenzen:

	Gummigranulat	PU-Lagerung 8 Hz	EFD
Bei 100 Hz	- 8 dB	- 21 dB	13 dB
Ab 125 Hz	- 15 dB	- 28 dB	13 dB

Mit einer gut abgestimmten PU-Lagerung oder einem lastadaptiven Lagermaterial, auf ca. 7-8 Hz abgestimmt, hätte sich die Anforderung in etwa einhalten lassen.

5.3 Stützensteifigkeit

Es wurden umfangreiche Versteifungs-Versuche mit den Tiefgaragen-Stützen unter der CNC-Maschinen-Decke durchgeführt:



Bild 14: Fotos von versteiften Stützen

Es zeigte sich Folgendes:

- Grundlegende Trennung der Fälle „Kraftanregung und Fußpunktanregung“ ist erforderlich
- Fußpunktanregung „von unten“: Übliche Übertragungsfunktion mit Resonanz (z.B. Faktor 10 Peak) Resultierend ist das „bremsen“ eines von unten angeregtem Schwinger (z.B. einer einzelnen Decke) sehr einfach.
- Kraftanregung „von oben“: Kaum frequenzabhängiges Verhalten
Die steifere Anbindung eines Gebäudes an die – nachweislich sehr steife – Fundamentierung mittels höherer Stützensteifigkeit ist ein extrem schwieriges Unterfangen, da die Schwingamplituden im Sub- μm -Bereich liegen.

Trotz hoher baulicher Kreativität und vielen nachträglichen Versuchen zu Klebungen, Verguss und Aufpressen konnten die prognostizierten Minderungsmaße auf diesem Weg nicht erreicht werden.

TEIL 2: Aufstockung Druckereigebäude

6 Aufgabenstellung

Im Herbst 2022 wurde an uns die Aufgabe herangetragen, die Aufstockung eines Druckereigebäudes in Basel mit ca. 20 Wohnungen in 4 Etagen immissionstechnisch zu begleiten.

Vor allem im EG des Gebäudes (ferner UG, 1. OG) arbeiten Druckmaschinen, die dynamische Lasten in das Gebäude einbringen, die je nach Frequenz

- als Erschütterungen fühlbar sein können oder
- als Sekundär-Luftschall störend hörbar sein können.

Es waren Messungen durchzuführen und Schutzmaßnahmen so zu dimensionieren, dass die Anforderungen der in der Schweiz anzusetzenden Normen und Richtlinien für gesunde Wohnverhältnisse eingehalten werden.

Es werden im Folgenden die speziellen messtechnischen Voruntersuchungen vorgestellt, eine vergleichsweise umfassende Modellbildung und vor allem die Klärung einer Vielzahl begleitender Fragestellungen.

Die Untersuchungen gehen damit weit über das übliche Maß eines vertikalen Gebäudemodells hinaus und erhöhen so erheblich den Wissensstand bzgl. der gegebenen Problematik.

Schemaschnitt:

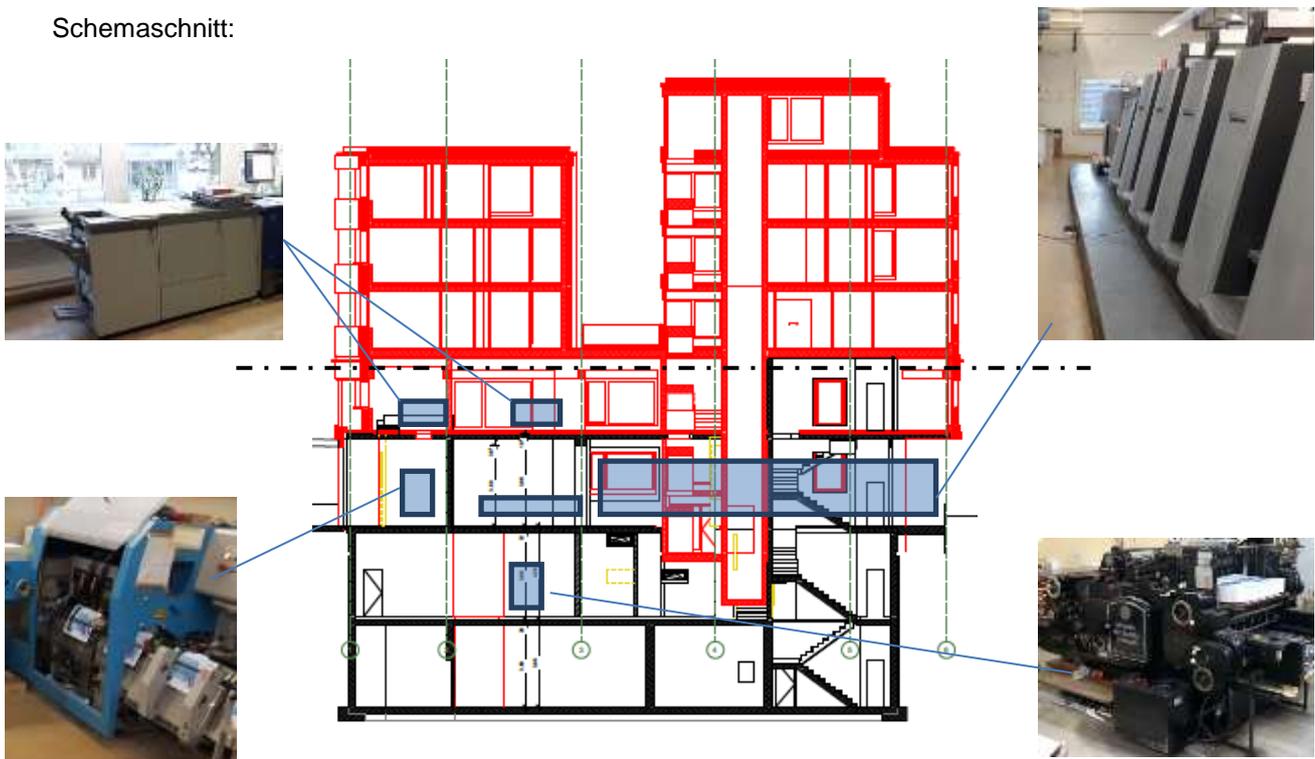


Bild 21: Schnitte des Gebäudes mit Bestand und Neubau – Druckmaschinen angedeutet, Federebene

7 Anpassung Gebäudemodell iSEG (imb-Simulation Erschütterungen in Gebäuden)

prinzipieller Aufbau des verwendeten Modells iSEG für den gg. Einsatzzweck:

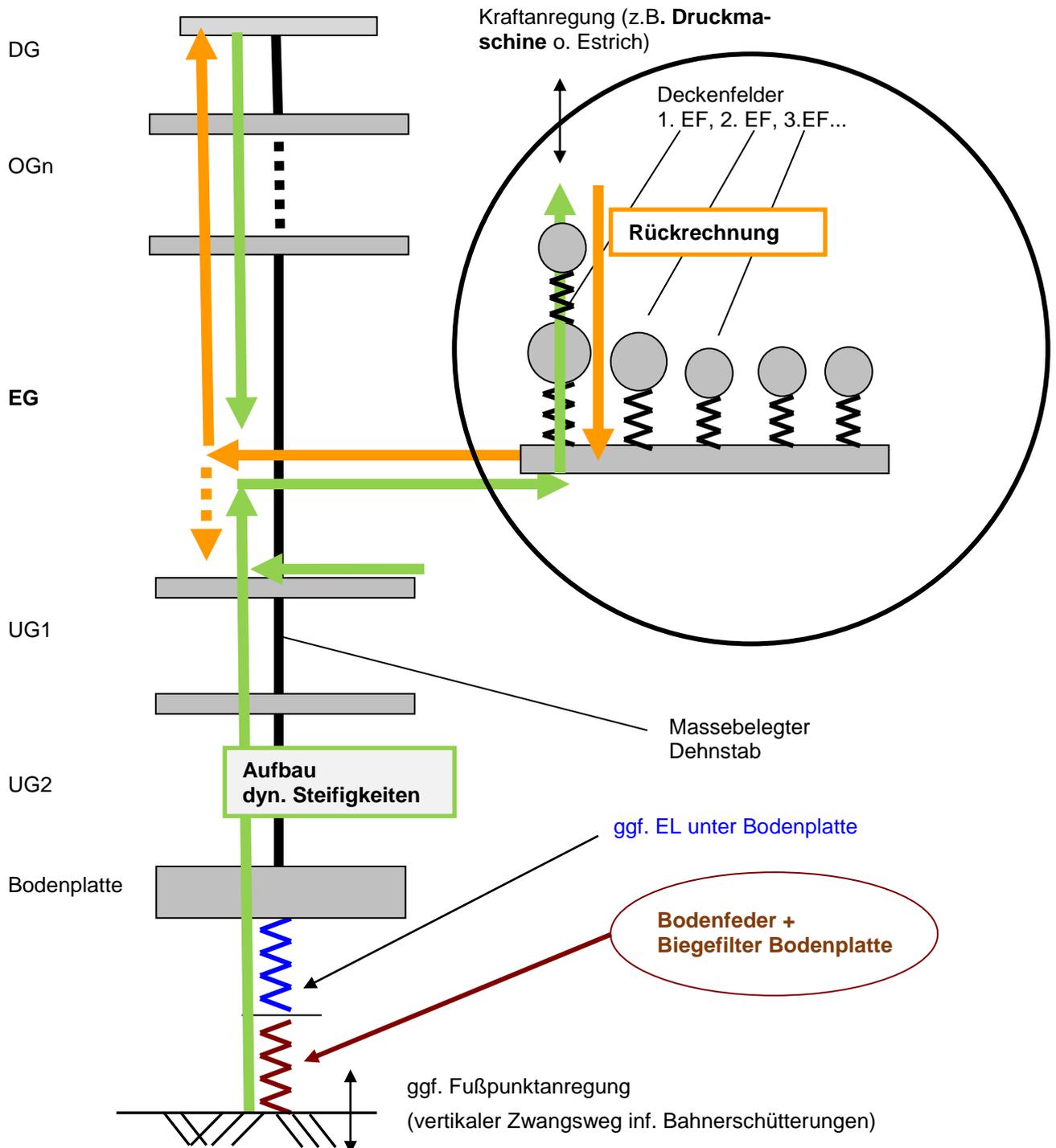


Bild 22: Umbau des Immissionsmodells iSEG auf Kraftanregung im Gebäude

Im Gebäude erfolgt der **Aufbau der dynamischen Widerstände** (Impedanzen oder Steifigkeiten) bis an den Punkt der Kräfteinleitung (Anregung).

Die **Rückrechnung** beginnt am Ort der Kräfteinleitung und erfolgt dann in die einzelnen „Gebäudeäste“ bis an den jeweiligen Immissionsort.

8 Zielvorstellungen

Erschütterungen nach DIN 4150/2

Die Werte müssen analog Teil 1 bei dauerhaftem Betrieb (24/7) am Immissionsort unter der menschl. Schwelle von $KB = 0,1$ bleiben.

Sekundärluftschall nach SIA 181

Angelehnt an den Bericht des Bauphysikers (Betrieb vor 7 Uhr oder nach 19 Uhr vorkommend):

$$L_{Aeq} + \text{Impulshaltigkeit} + \text{Tonhaltigkeit} \leq 25 \text{ dB(A)}$$

Angesetzt wurden je 2 dB für Impuls- und Tonhaltigkeit.

Unser Messsignal zeigt an hochpegeligen Messpunkten bis zu 5 dB als Impulszuschlag. Dieser ist durch die Verwendung FAST-bewerteter Eingangsspektren in allen folgenden Prognosen bereits enthalten. Bei den (erforderlichen!) niedrigen Pegeln wird der Impulszuschlag nach Einschätzung des Bauphysikers / Akustikers deutlich niedriger als im Messsignal liegen. Beide Zuschläge werden zudem nach menschlicher Beurteilung und nicht aus einer automatisierten Auswertung heraus gebildet.

Wir übernehmen daher die Zuschläge für Impuls- und Tonhaltigkeit. Es steht damit eine kleine Reserve zur Verfügung, die Rundungsvorschrift für Dezibel zu kompensieren bzw. als kleine Sicherheit.

Alle unsere Prognosewerte enthalten – unter diesen Annahmen – bereits die beiden o.g. Zuschläge.

9 Besondere Untersuchungen

9.1 Modellgrenzen

Das verwendete Modell iSEG (10), das im Rahmen zweier Dissertationen an der TU-München (8) und (9) entstand, ist geeignet, schnell Parameterstudien durchzuführen, kann unterschiedlichste frequenzabhängige Dämpfungen verarbeiten und hat weitere Vorteile, die das Verständnis für die vorliegende Situation fördern und ein Gefühl für die beteiligten dynamischen Effekte geben.

Da es sich um ein reines Vertikalmodell handelt, müssen jedoch flächige / räumliche Effekte separat erfasst werden. Gegenüber der Realität „greift die Modellierung tendenziell zu scharf“. In der Realität ergeben sich i.A. stärkere Mittelungseffekte nach oben hin im Gebäude.

Horizontale Einflüsse, wie die Erzeugung und Schallabstrahlung von BiegeWellen, müssen ebenfalls separat erfasst werden (z.B. durch Messergebnisse anderer Gebäude, Erfahrung, mechanische Anschauung).

Weiterhin wichtig im vorliegenden Fall:

Wo liegen die Frequenzgrenzen des verwendeten Modellierungsprinzips?

- Entwicklung der Decken nach Eigenformen bis zumindest 400 Hz
- Stützen als Kontinuum oder Lumped-Mass gerechnet zeigen – unter den hier vorkommenden Bauteilquerschnitten – ebenfalls, dass die begrenzende halbe Stützenmasse oben bzw. unten an der Stütze ab ca. 530 Hz aufgrund ihrer Massenimpedanz blockierend wirken kann.
- damit Auswertbarkeit bis ca. 400 Hz i. O.

9.2 Zweites Modell zur Kontrolle

Mit einigen wichtigen Eingangsgrößen wurde imb-dynamik intern eine 2. Modellierung durchgeführt (1 x Molzberger / 1 x Breitsamter), um „blind“ die Größenordnung der Einfügedämmung zu bestätigen.

Ergebnis der vereinfachenden Kontrolle ist eine Einfügedämmung von 30 dB für die Stahlfederlagerung.

9.3 Besonderheit: „Feder-Antiresonanz“

Auch „Kontinuumsschwingung der Feder“ genannt – die Federn im Federelement schwingen hierbei „in sich“, d.h. der Mittelteil der Feder gegen die beiden Ufer oben und unten:

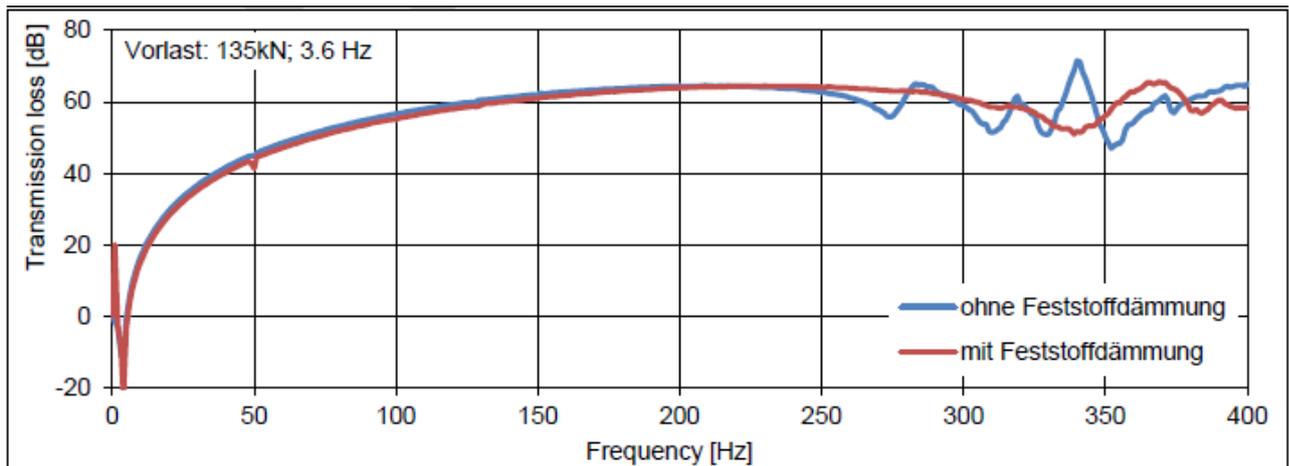


Bild 23: Quelle Gerb: Gemessene Transmissability und Eigenschwingungen der Federn (hier 3,6 Hz Var.)

Der problematische Frequenzbereich liegt ca. bei dem 75-fachen der Nenn-Abstimmfrequenz, also bei 2,5 Hz Abstimmung bei rund 190 Hz.

Die Federantiresonanz kann ggf. nachträglich bedämpft werden, indem die nicht-bedämpften Stahlfedern eine Fußbaddämpfung erhalten (zähviskoses Öl, das die freie Schwingung der Stahlfedern an ihrem Fuß bedämpft).

9.4 Abhebekräfte in der Lagerung

Da die Stahlfedern bis zur Entlastung (drohendes Abheben) um 40 mm vorgespannt sind, müsste die Verformung in den relevanten Lastfällen im Betonbau ≥ 40 mm werden. Dies ist schadensfrei u.E. nicht möglich. Die inneren Momente im Gebäude müssen jedoch konstruktiv aufgenommen werden, z.B. das Verkippen des Kerns im Gebäude.

9.5 Ergänzungsmessungen

9.5.1 Gründungs- und Bodensteifigkeit

Die von unten vorhandene Gegenimpedanz ist für den Wirkungsgrad der Stahlfedern wichtig. Sie wurde von uns gemessen, indem eine „bekannte“ Stütze (60 cm x 60 cm) von oben mit einem Fallgewicht rein vertikal angeregt wurde. Eine Beschleunigungsmessung am Fallgewicht lässt dieses wie einen Impedanzhammer verwenden.

Die Schwingungsantwort wurde am Stützenkopf und in den einzelnen Untergeschossen bis zu Bodenplatte messtechnisch spektral erfasst. Über die Dehnung der Betonstütze ist eine weitere Möglichkeit der Kraftmessung gegeben.

Mit dem gemessenen Boden und den vorhandenen Stützenquerschnitten werden um 5-7 dB niedrigere Prognosewerte erzielt, als mit dünnen Stützen (30 cm x 30 cm) und einer weichen Gründung.

Wichtig: Die bekannte Impedanz erlaubt eine Rückrechnung auf die Anregungskräfte der Druckmaschine(n)

9.5.2 Messung der Horizontalanregung Deckenebene über EG

Allgemein deutlich schwächer als die Vertikalanregung. Es sind v.a. niederfrequente Anteile durch den Blatttransfer um ca. 0,02 mm/s eff FAST enthalten, vorwiegend 1,25-1,6 Hz, und somit in etwa der Größe der vertikalen Anregung entsprechend bei dieser Frequenz.

9.5.3 Korrelation Schwingungen – Luftschallmessung im 1.OG

Zur Analyse der Schallabstrahlung horizontal schwingender Bauteile (MW-Wand, Fenster im 1.OG)

Korrelation zur Detektierung möglicher Sicherheiten in der Prognosekette

- Fenster ca. 2 dB niedriger als der Estrichmesspunkt (Referenz)
- Mauerwerks-Wand rund 11 dB niedriger als der Estrichmesspunkt
- Gemessener Luftschall rund 6-7 dB (!) niedriger als die o.g. Prognoseformel
- Zeigt direkt vor Bauteilen eine plausible ~ 3 dB Erhöhung durch Reflexion (z.B. 5 cm vor dem Fenster)

Vorbehaltlich der Schallpegel-Messgerät Überprüfung haben wir tendenziell niedrigere Werte als bislang prognostiziert, es befanden sich jedoch nicht alle Maschinen in „echtem“ Vollbetrieb.

9.6 Aufschaukeln des Gebäudes durch niederfrequente Anregung

Durch niederfrequente horizontale Anregung (Blatttransfer große Druckmaschine) wurde ein Aufschaukeln des Gesamtgebäudes bis über die menschl. Fühlschwelle befürchtet. Unter worst-case Annahmen bzgl. Dämpfung und ohne „tilgende Rückwirkung“ des schwingenden Gebäudes mit einigen 1000 to Gesamtgewicht ergibt sich:

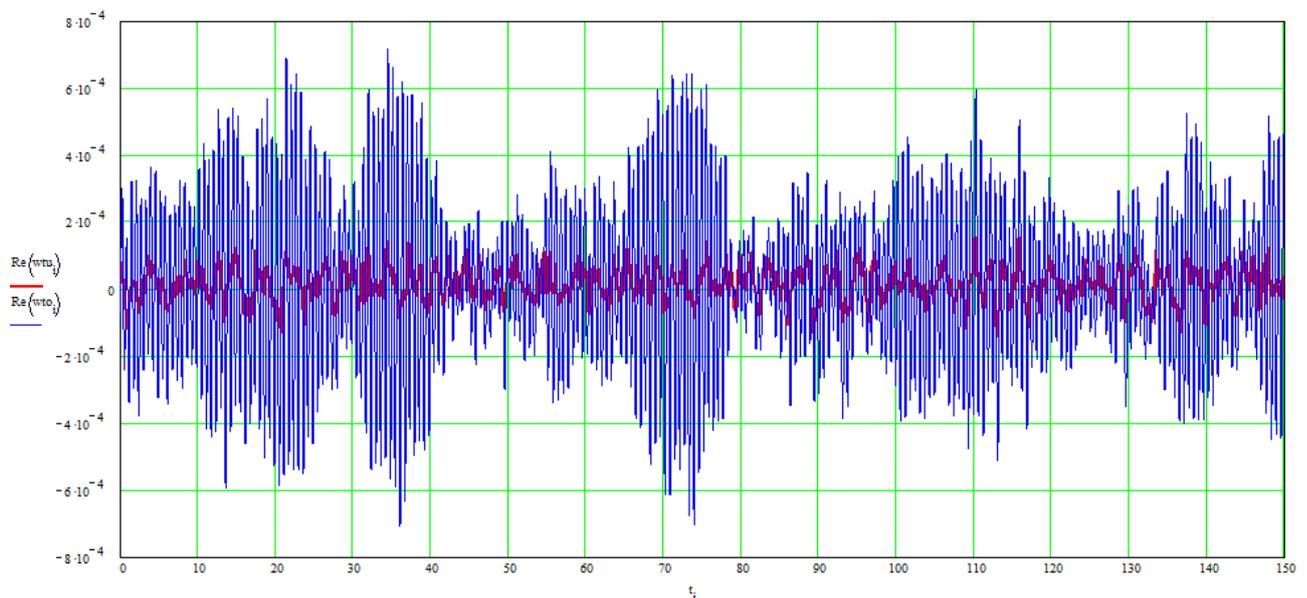


Bild zur Veranschaulichung der Aufschaukelung, Wank-Eigenfrequenz des Geb. auf Stahlfedern 1,6 Hz
 rot: phasenechte Überlagerung aus 3 Messpunkten, blau Gebäudereaktion

Trotz Berechnung mit minimaler Dämpfung (ggf. geplante Dämpfungsmaßnahmen an den Stahlfedern stehen noch nicht fest) zeigt sich eine maximale Schwingungsüberhöhung von lediglich rund Faktor 5.

Angabe der Horizontal- Kipp- Eigenfrequenzen (Starrkörper -Eigenfrequenzen) in X- bzw. Y-Richtung:

Formel	1. Horizontal-Kipp-Eigenfrequ.	2. Horiz.-Kipp-Ef
$f_{\phi h} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{I_{gyf}}{I_{gy}} \right) \cdot f_h^2 + f_{\phi}^2 \right]} - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{I_{gyf}}{I_{gy}} \right) \cdot f_h^2 + f_{\phi}^2 \right]^2 - f_h^2 \cdot f_{\phi}^2}$	$f_{\phi h} = 1.329$	$f_{\phi h} = 1.581$
$f_{\phi h} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{I_{gyf}}{I_{gy}} \right) \cdot f_h^2 + f_{\phi}^2 \right]} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{I_{gyf}}{I_{gy}} \right) \cdot f_h^2 + f_{\phi}^2 \right]^2 - f_h^2 \cdot f_{\phi}^2}$	$f_{\phi h} = 3.853$	$f_{\phi h} = 3.536$

Eingangswerte sind die richtungstreuen isoliert gerechneten Eigenfrequenzen und die Massenträgheiten bzgl. Schwerpunkt bzw. Federlagerung.

10 Variation der Eingangswerte

Mit dem Prognosemodell iSEG können Variationen sehr schnell durchgeführt werden, so z.B.:

- Stützenquerschnitte Bestand und Neubau
- Deckeneigenfrequenzen
- Estrichabstimmung
- konstruktiv erforderliche Versätze

11 Gesamteinschätzung

Es wurde die Maßnahme einer tiefabgestimmten Stahlfeder-Lagerung („Gerb-Federn“, abgestimmt auf 2,5 Hz) berechnet.

Unsere Befürchtungen und damit weitere Untersuchungen konzentrieren sich nach Durchführung aller ergänzenden Messungen im vorliegenden Fall auf:

- a) ungewöhnlich hohe Einwirkfrequenzen in Verbindung mit der Isolationsverringerng durch die Stahlfeder-Kontinuumsschwingungen
- b) normgerechte Befestigung der Installationsleitungen, da hier Sonderlösungen erforderlich werden
- c) Horizontalschwingungen der Wände und abweichendes Abstrahlverhalten in Abhängigkeit der gewählten Bauweise (v.a. durch BiegeWellenanregung, s. Teil 1)

Dem gegenüber die vorhandenen Sicherheiten:

Prognosewerte inkl. Ton- und Impulshaltigkeit max. ca. **20 dB(A)**, überwiegend nur 10-16 dB(A), jedoch in speziellen Konstellationen „Ausreißer“ bis 29 dB(A)

Die Schallmesswerte liegen um ca. 6-7 dB unterhalb der Prognose aus den Schwingungssensoren.

Unter Berücksichtigung eines Worst-Case Zuschlages von 3 dB für horizontale Schallabstrahlung und Körperschallbrücken, lägen wir rechnerisch bei 9 dB Sicherheit und der „Ausreißer“ würde die Zielvorstellungen von 25 dB(A) exakt treffen.

Hinweis: Der Schall wird überwiegend nicht vom Estrich abgestrahlt, sondern von der Deckenunterseite des darüberliegenden Geschosses (und ggf. von Wänden).

Allerdings darf nicht vergessen werden, dass die Stahlfedern so weich sind, dass schon geringe Körperschallbrücken Wirkung zeigen können, besonders an nachgiebigen Stellen des Gebäudes.

Offene Themen:

- Aufnahme von Erdbebenkräften über Stahlfedern oder über separate Schubdorne. Zu berücksichtigen:
 - Schwinden der Decke über 1 OG
 - Wind- und Temperatur-Verformungen
- Ausbildung der Details (allg.), auch die Installationen betreffend
- Bauseitige Kontrollen der Ausführung und Kontrollmessungen

Das Projekt ist derzeit noch in der Planung.

12 Grundlagen

- (1) imb-dynamik-Messungen (allgemein)
- (2) DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen
Teil 2, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, 1999-06
- (3) VDI-Richtlinie 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, 1987-08
- (4) VDI-Richtlinie 2057 alt, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen
Blatt 4.1, „Messung und Beurteilung von Arbeitsplätzen in Gebäuden“, 1987-05
- (5) VDI-Richtlinie 2057 Blatt 3, Ganzkörperschwingungen an Arbeitsplätzen in Gebäuden, März 2017
- (6) 24. Bundes-Immissions-Schutz Verordnung (24. BImSchV)
- (7) SIA 181:2006, Bauwesen, Schallschutz im Hochbau (Schweizer Norm)
- (8) N. Breitsamter: Ersatzmodelle zur Bestimmung der Schwingungsantwort von Gebäuden unter Anregung durch Bodenerschütterungen, Dissertation am Lehrstuhl für Baumechanik, TUM, 1996
- (9) H. Molzberger: Vereinfachende dynamische Gebäudemodellierung mit besonderer Berücksichtigung der Bauwerk-Boden-Interaktion, Dissertation am Lehrstuhl für Baumechanik, TUM, 2009
- (10) **iSEG** (imb-Simulation von Erschütterungen in Gebäuden), Stand 2022-02