

# Messung und Berechnung der Übertragung von Erschütterungen auf Stockwerksdecken unter Berücksichtigung der Eigenschaften von schwimmendem Estrich

Kira Holtzendorff, Marc Oliver Rosenquist

*baudyn GmbH, Hamburg*

**Zusammenfassung:** Für den benötigten Erschütterungsschutz sind in bestimmten Fällen Deckentragsysteme zu versteifen sowie der schwimmende Estrich frequenzmäßig abzustimmen. Es werden Projektbeispiele vorgetragen, in denen anhand von 3D-FE-Gebäudemodellen berechnete, frequenzabhängige mit gemessenen Übertragungsfunktionen verglichen werden. Die so gewonnenen Erfahrungen können zukünftig bei der Beurteilung von FE-Berechnungsergebnissen berücksichtigt werden. Zusätzlich werden die dynamischen Eigenschaften des schwimmenden Estrichs in berechnungs- und messtechnischer Hinsicht verglichen.

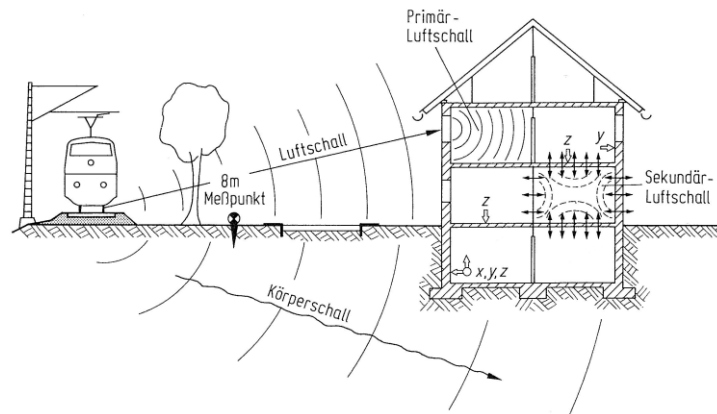
## 1 Einführung Erschütterungsschutz

### 1.1 Fragestellung

Für den geplanten Neubau von Wohngebäuden in der Nähe von Straßen, Schienenverkehrswegen und Industriebetrieben ist im Rahmen einer erschütterungstechnischen Untersuchung nachzuweisen, dass die Anforderungen an die Erschütterungen und den sekundären Luftschall zur Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit im Sinne der Vermeidung von maßgeblichen Beeinträchtigungen von Menschen in Gebäuden erfüllt werden.

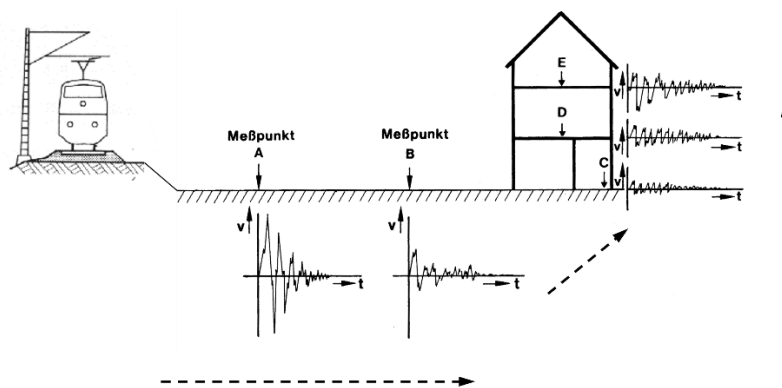
Hierzu erfolgt in der Regel zunächst eine Schwingungsmessung mit Messpunkten auf dem Baugrundstück in Gruben oder in noch vorhandenen Bestandsgebäuden während der Erschütterungseinwirkung. Basierend auf den so gewonnenen Messergebnissen wird eine Prognose der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls für Stockwerksdecken und Wände im geplanten Neubau vorgenommen.

In der Abb. 1 wird die Situation der Erschütterungsausbreitung von der Quelle (z.B. Gleis) über den Boden in die Gründung des geplanten Neubaus dargestellt:



**Abbildung 1:** Erschütterungsübertragung Bahnstrecke – Boden – geplantes Gebäude [3]

Bei der Ausbreitung der Erschütterungen in die Umgebung vermindern sich die Schwingungsamplituden im Boden zunächst mit größer werdendem Abstand zur Quelle. Bei der Übertragung vom Boden in die Gründung des geplanten Gebäudes erfolgt in der Regel eine weitere Verminderung der Amplituden. Von dort übertragen sich die Erschütterungen über die aufgehenden Bauteile (Wände) auf die Stockwerksdecken. Hierbei erfolgt in der Regel eine Verstärkung bzw. Vergrößerung der Schwingungsamplituden, wie in der Abb. 2 dargestellt wird:



**Abbildung 2:** Schwingungsminderung in der Ausbreitung bzw. -verstärkung in der Übertragung im Gebäude [3 u.a.]

## 1.2 Übertragungsfunktion Fundament - Decke

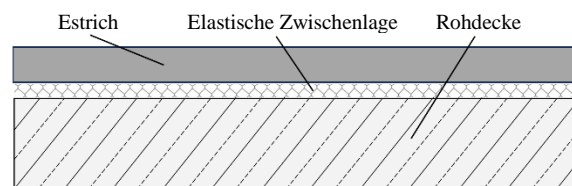
Das Maß der Verstärkung bzw. Vergrößerung stellt für eine möglichst zutreffende Prognose der Erschütterungen bzw. Schwingungsamplituden auf der Stockwerksdecke einen entscheidenden Parameter dar. In einer sogenannten Standard-Prognose werden statistische, frequenzabhängige Übertragungs- bzw. Vergrößerungsfunktionen [4] verwendet, in welchen die Verstärkung auf Basis der Ergebnisse einer großen Anzahl von Messergebnissen quantitativ festgelegt wurde.

Im konkreten Projekt kann die Verwendung von individuellen Übertragungsfunktionen, welche in dynamischen Berechnungen mit 3D-Finite-Elemente-Gebäudemodellen ermittelt werden, von der Gründung auf verschiedene Stockwerksdecken zu genaueren Ergebnissen führen als die statistischen Übertragungsfunktionen. Neben einer möglichst zutreffenden Abbildung des Tragsystems des Gebäudes sind hier die Lagerungsbedingungen, möglichst realistische und ständige Lasten sowie die Dämpfung als maßgebliche Parameter festzulegen. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt üblicherweise durch Erfahrungswerte, z.B. aus der Literatur (für Dämpfung siehe z.B. [1]), und ist damit naturgemäß Ungenauigkeiten unterlegen.

Es gilt demnach, die Erfahrungswerte und somit die Prognoseungenauigkeit durch eigens durchgeführte Nachmessungen an fertiggestellten Gebäuden weiter einzugrenzen und damit Berechnungsergebnisse besser interpretieren zu können.

### 1.3 Übertragungsfunktion Schwimmender Estrich

Im Wohnungsbau ist der Einbau eines schwimmenden Estrichs auf den Rohbaudecken für den benötigten Trittschallschutz erforderlich. Der schwimmende Estrich stellt selbst ein schwingungsfähiges System – bestehend aus einer elastischen Zwischenlage (Feder) unterhalb einer Estrichschicht (Masse) dar, siehe folgende Abb. 3:



**Abbildung 3:** Aufbau schwimmender Estrich

Analog zu den Verstärkungen vom Fundament auf Stockwerksdecken erfolgt bei der Erschütterungsübertragung häufig eine weitere Verstärkung von der Rohdecke auf die Estrichschicht. Das Maß der Verstärkung hängt direkt von den dynamischen Eigenschaften des schwimmenden Estrichs ab und wird ebenfalls durch frequenzabhängige Übertragungsfunktionen beschrieben. Eine Prognose der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls sollte daher unter Berücksichtigung dieser Übertragungsfunktionen erfolgen und wird in der Praxis zunehmend durchgeführt [2].

## 2 Projektbeispiele Berechnung - Messung

### 2.1 Projekt A Wohngebäude U-Bahn

Das Projekt A stellt einen Neubau mit Eigentumswohnungen dar. Der Neubau weist eine Tiefgarage und neben dem Erdgeschoss fünf weitere Obergeschosse auf. In einer Entfernung von ca. 28 m verläuft in zwei Richtungen eine U-Bahnlinie auf einem Bahndamm. Im Rahmen der erschütterungstechnischen Untersuchungen sind zu Beginn Schwingungsmessungen im Bestandsgebäude und im Zuge der Bauausführung auf der Stahlbetonsohlplatte (Dicke 60 cm), an Fundamentpunkten und auf repräsentativen Deckenfeldern (Stahlbeton  $h = 20$  cm) in den Obergeschossen im Rohbau sowie auf Probeflächen des schwimmenden

Estrich durchgeführt worden. Aus den Messergebnissen können frequenzabhängige Übertragungsfunktionen vom Fundament auf einzelne Deckenfelder und von der Rohbaudecke auf den schwimmenden Estrich ermittelt werden.

### 2.1.1 3D-FE-Gebäudemodell

Für die berechnungstechnische Ermittlung von frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen vom Fundament auf Deckenfelder wurde ein 3D-FE-Gebäudemodell erstellt, welches in der Abb. 4 dargestellt wird. Ebenfalls gekennzeichnet sind die untersuchten Deckenfelder im Erdgeschoss und im 1. Obergeschoss:

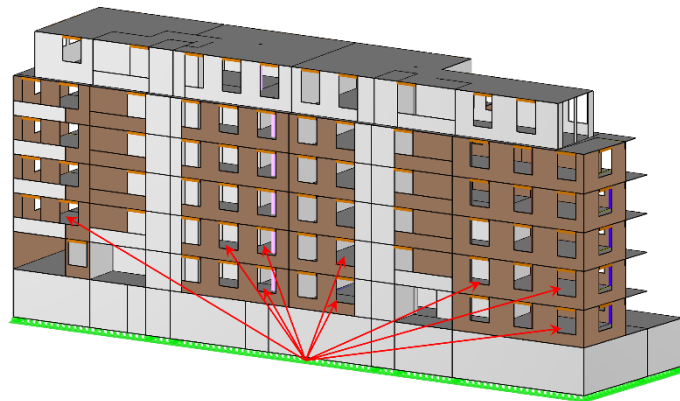


Abbildung 4: Projekt A: 3D-FE-Gebäudemodell mit Kennzeichnung der untersuchten Deckenfelder

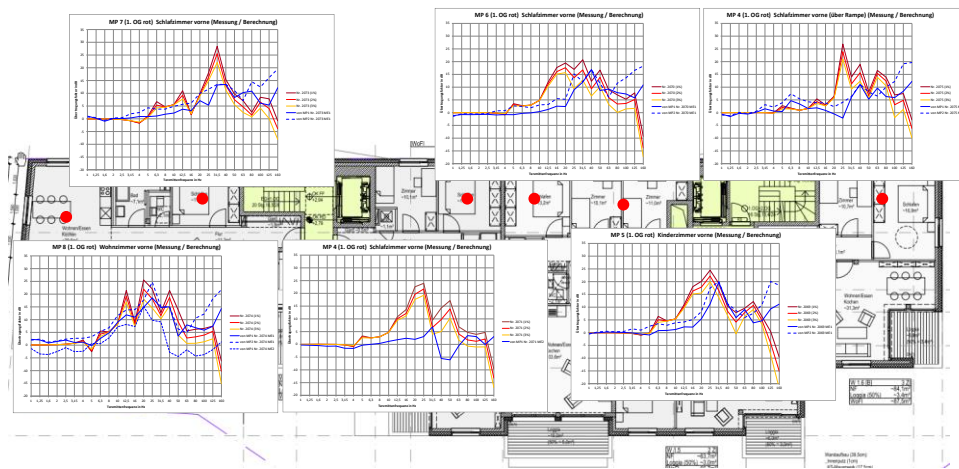
### 2.1.2 Übertragungsfunktionen Fundament – Decke aus Berechnung und Messung

In der Abb. 5 des Grundrisses des Erdgeschosses von Projekt A sind sowohl die Messpunkte auf den Deckenfeldern (rote Punkte) als auch jeweils die Diagramme der Übertragungsfunktionen vom Fundament auf die betreffenden Deckenfelder dargestellt. Die berechneten Kurven sind Grün eingefärbt, wobei hier drei verschiedene Dämpfungsmaße ( $D = 1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ) zugrunde gelegt wurden. Die blauen Kurven stellen die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen ausgehend von verschiedenen Fundament-Messpunkten dar:



Abbildung 5: Projekt A Erdgeschoss: Vergleich Übertragungsfunktionen Fundament – Deckenfelder  
Messung (blau) / Berechnung (rot)

Der Vergleich zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen in Abb. 5 zeigt zum einen die Problematik der Abschätzung der Dämpfung auf. Die Messergebnisse weisen tendenziell niedrigere Überhöhung als die Berechnungsergebnisse auf, was auf ein höheres Dämpfungsmaß als 3 % schließen lässt. Für zwei von drei Deckenfeldern werden – in Abweichung zu den Berechnungsergebnissen – messtechnisch deutlich geringere Überhöhungen gemessen, was ggf. auf eine zu dem Berechnungsmodell abweichende, bautechnische Ausführung zurückzuführen ist. Für den mittleren Messpunkt ist eine prinzipielle Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung zu erkennen. Tendenziell weist auch hier die tatsächliche Decke gegenüber dem Modell eine größere Dämpfung und eine höhere Steifigkeit auf, was – auf der sicheren Seite liegend – akzeptabel ist.



**Abbildung 6:** Projekt A 1. Obergeschoss: Vergleich Übertragungsfunktionen Fundament – Deckenfelder Messung (blau) / Berechnung (rot)

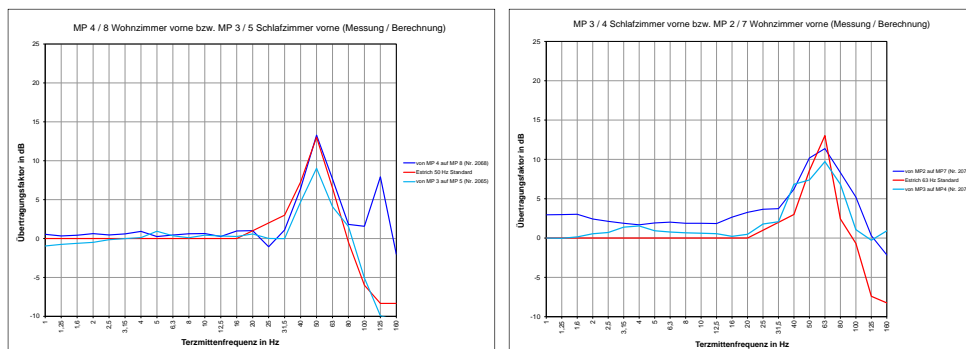
In der Abb. 6 des Grundrisses des 1. Obergeschosses von Projekt A sind sowohl die Messpunkte auf den Deckenfeldern (rote Punkte) als auch jeweils die Diagramme der Übertragungsfunktionen vom Fundament auf die betreffenden Deckenfelder dargestellt. Die berechneten Kurven sind rot eingefärbt, wobei hier ebenfalls drei verschiedene Dämpfungsmaße ( $D = 1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ) zugrunde gelegt wurden. Die blauen Kurven stellen die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen ausgehend von verschiedenen Fundament-Messpunkten dar.

Im Vergleich zeigt sich auch hier, dass im vorliegenden Fall die Messergebnisse eine geringere Überhöhung bzw. höhere Dämpfung und eine größere Steifigkeit für die untersuchten Deckenfelder aufweisen. Tatsächlich werden in der Regel im Vergleich zu den Berechnungen höhere Decken-Eigenfrequenzen gemessen.

Unabhängig davon, dass auf diese Weise in den Berechnungen, auf denen die Prognosen der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls für den später herzustellenden Neubau basieren, auf der sicheren Seite gerechnet wird, da sowohl ein höheres Dämpfungsmaß als auch eine größere Steifigkeit der Deckensysteme zu geringeren Prognosewerten führen, wäre individuell zu klären, inwiefern vor Ort eine abweichende Bauausführung oder auch temporäre „Widrigkeiten“ bzw. im Berechnungsmodell z.B. Auflagerbedingungen und Massen zu größeren Diskrepanzen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen führen können.

### 2.1.3 Übertragungsfunktionen Rohdecke – Estrich aus Berechnung und Messung

In den Diagrammen der Abb. 7 werden die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen (blau) von der Rohdecke auf den schwimmenden Estrich mit den für die Prognose verwendeten Standardfunktionen (rot) verglichen. Da die Standardfunktionen gemittelte Daten aus eigenen Messergebnissen darstellen, ist die Übereinstimmung der quantitativen Überhöhung gut, liegt jedoch tendenziell in der Prognose auch auf der sicheren Seite. Für die Estrich-Probefelder im Erdgeschoss (Abb. 7 links) wurde eine Abstimmfrequenz des schwimmenden Estrichs in der 50 Hz-Terz und für die Probefelder im 1.OG (Abb. 7 rechts) eine Abstimmfrequenz in der 63 Hz-Terz gemessen.



**Abbildung 7:** Projekt A links Erdgeschoss - rechts 1. OG: Vergleich Übertragungsfunktionen Rohdecke – schwimmender Estrich Messung (blau) / Berechnung (rot)

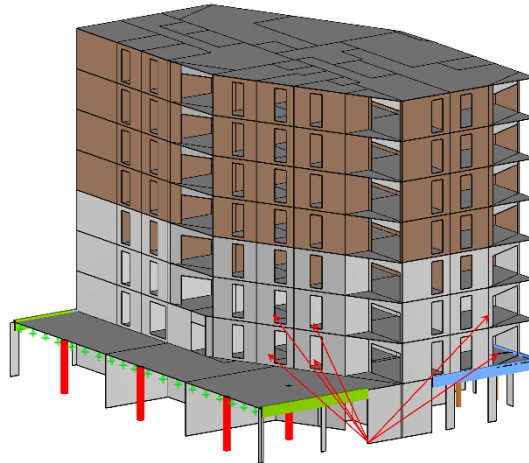
## 2.2 Projekt B Wohnturm S-Bahn

Das Projekt B stellt einen Neubau ohne Untergeschoss dar, in welchem im Erdgeschoss eine Gewerbenutzung vorgesehen wird und welches sieben Obergeschosse mit Wohnnutzung aufweist. Das hier untersuchte Gebäude befindet sich im Mindestabstand von 18 m zu ebenerdigen Bahngleisen mit S-Bahn, Regional- und Güterverkehr.

Im Rahmen der erschütterungstechnischen Untersuchungen sind zu Beginn Schwingungsmessungen in einem Parkhaus und in Gruben auf dem Baugrundstück und im Zuge der Bauausführung auf repräsentativen Deckenfeldern (Stahlbeton  $h = 26$  cm) in den Obergeschossen im Rohbau durchgeführt worden. Aus den Messergebnissen können Übertragungsfunktionen vom Fundament auf einzelne Deckenfelder ermittelt werden.

### 2.2.1 3D-FE-Gebäudemodell

Für die berechnungstechnische Ermittlung von frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen vom Fundament auf Deckenfelder wurde ein 3D-FE-Gebäudemodell erstellt, welches in der Abb. 8 dargestellt wird. Ebenfalls gekennzeichnet sind die untersuchten Deckenfelder im 1. und 2. Obergeschoss:

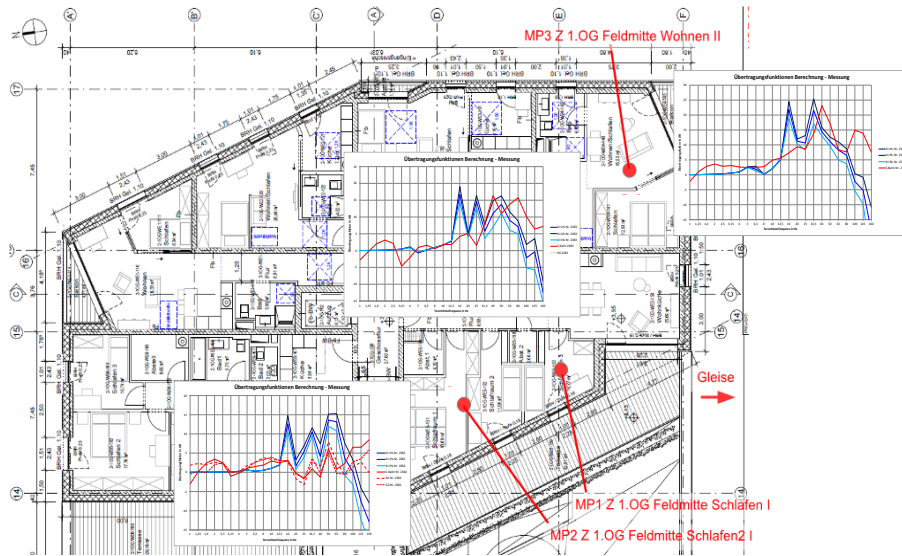


**Abbildung 8:** Projekt B: 3D-FE-Gebäudemodell mit Kennzeichnung der untersuchten Deckenfelder

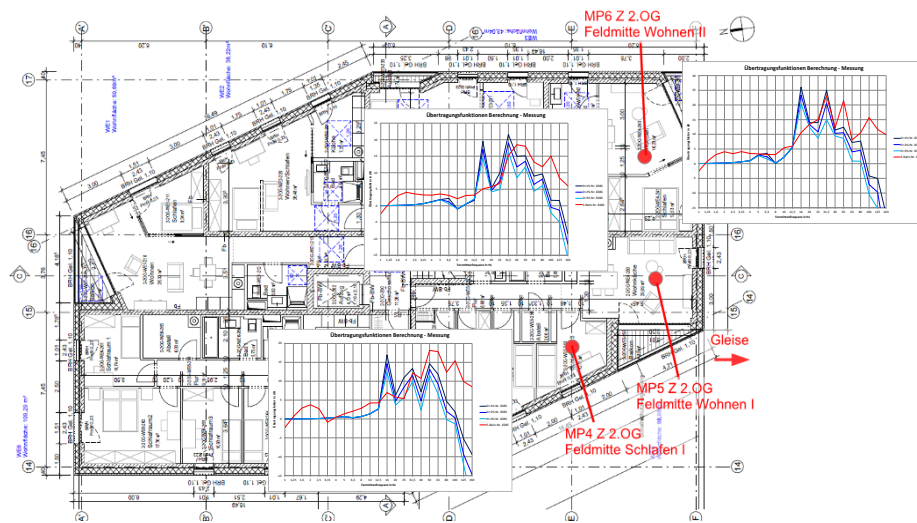
### 2.2.2 Übertragungsfunktionen Fundament – Decke aus Berechnung und Messung

In den Abb. 9 und 10 der Grundrisse im 1. und 2. Obergeschoße von Projekt B sind sowohl die Messpunkte auf den Deckenfeldern (rote Punkte) als auch jeweils die Diagramme der Übertragungsfunktionen vom Fundament auf die betreffenden Deckenfelder dargestellt. Die berechneten Kurven sind blau eingefärbt, wobei hier drei verschiedene Dämpfungsmaße ( $D = 1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ) zugrunde gelegt wurden. Die roten Kurven stellen die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen ausgehend von verschiedenen Fundament-Messpunkten dar.

Aus dem Vergleich der berechneten und gemessenen Übertragungsfunktionen ist wie beim Projekt A erkennbar, dass die tatsächlichen Deckensysteme eine etwas höhere Dämpfung und Steifigkeit aufweisen. Hier fällt zusätzlich auf, dass für alle untersuchten Deckenfelder eine deutliche Überhöhung in der 12,5 Hz-Terz berechnet wird. Bei der Überprüfung des Berechnungsmodells ergibt sich, dass bei dieser Frequenz ausgeprägte, parallele bzw. gekoppelte Deckenschwingungen über alle Stockwerke hinweg berechnet werden, was jedoch nicht der messtechnischen Erfahrung entspricht. Aus diesem Grund ist diese berechnete Schwingform als unrealistisch einzuschätzen.



**Abbildung 9:** Projekt B 1. Obergeschoss: Vergleich Übertragungsfunktionen Fundament – Deckenfelder Messung (rot) / Berechnung (blau)



**Abbildung 10:** Projekt B 2. Obergeschoss: Vergleich Übertragungsfunktionen Fundament – Deckenfelder Messung (rot) / Berechnung (blau)



### **3 Zusammenfassung**

Ein Vergleich von mess- und berechnungstechnisch ermittelten, frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen vom Fundament auf ausgewählte Deckenfelder in zwei Wohnungsbauprojekten ergibt praxisnahe Erkenntnisse zur tatsächlichen Dämpfung sowie zur Steifigkeit der Tragkonstruktionen. In den hier vorgestellten Projektbeispielen wurden in den Berechnungen geringere Dämpfungsmaße und Steifigkeiten und/oder zu hohe Lasten angesetzt, als in den Messungen ermittelt. Für die auf den Übertragungsfunktionen aus den Berechnungsmodellen basierende Prognose der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls wird so jedoch auf der sicheren Seite gerechnet. Die aus Messungen ermittelten Übertragungseigenschaften können nur für gleichartige Konstruktionen übernommen werden. Überdies kann durch den Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse auf unrealistische Eigenschwingformen im Modell geschlossen werden. Für genauere Modellbildungen wäre zusätzlich eine detailliertere Untersuchung der Bauzustände während der Schwingungsmessungen auf den Rohbaudecken erforderlich.

Die in der Prognose für den schwimmenden Estrich in der Übertragungsfunktion angesetzte Überhöhung konnte in den Schwingungsmessungen bestätigt werden.

### **Literatur**

- [1] PETERSEN, C. Dynamik der Baukonstruktionen, Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg 1996
- [2] ROSENQUIST, M.O.; HOLTZENDORFF, K. Einfluss des schwimmenden Estrichs auf die Immissionen von Erschütterungen und sekundärem Luftschall aus dem Schienenverkehr. In: Wuttke, F.; Hendrawan, D.B. Aji; Aycan, Ö. (Hrsg.) D-A-CH-Tagung, CAU Kiel, 2023, S. 533 - 542
- [3] Heckl, M., Müller, H.A. Taschenbuch der Technischen Akustik, Berlin Heidelberg, Springer Verlag 1994
- [4] DIN 45672-3 Entwurf: Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen – Teil 3: Prognoseverfahren auf Basis von Terzspektren