

## **Erschütterungsschutz Stuttgart 21 - Tunnelmessungen, Prognosen, Maßnahmen**

Norbert Breitsamter, imb-dynamik GmbH, Herrsching, D

### **Abstract**

Bei dem allgemein bekannten Bahnprojekt Stuttgart 21 werden zahlreiche Gebäude von Tunnelröhren mit geringer Überdeckung unterfahren. Zur Sicherstellung des Erschütterungsschutzes wurden von imb-dynamik Tunneladmittanz- und Ausbreitungsmessungen durchgeführt, die Prognosen damit zugeschärft und Abhilfemaßnahmen präzisiert. Damit liegen umfangreiche Daten der Admittanzen und Übertragungsfunktionen zu den Gebäuden aus ca. 65 Messquerschnitten für unterschiedlichste Tunnelquerschnitte, Gebirge, Überdeckungshöhen usw. vor, die einen umfassenden Vergleich ermöglichen.

Vorgestellt werden Messverfahren und Analyse der Messergebnisse, Prognosezuschärfung und Maßnahmenanpassung.

Prinzipielle Probleme der Erschütterungsprognosen werden beleuchtet.

## **Erschütterungsschutz Stuttgart 21**

Tunnelmessungen, Prognosen, Maßnahmen

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

Bei dem allgemein bekannten Bahnprojekt Stuttgart 21 werden zahlreiche Gebäude von Tunnelröhren mit geringer Überdeckung unterfahren. Zur Sicherstellung des Erschütterungsschutzes wurden von imb-dynamik Tunneladmittanz- und Ausbreitungsmessungen durchgeführt, die Prognosen damit zugeschärft und Abhilfemaßnahmen präzisiert. Damit liegen umfangreiche Daten der Admittanzen und Übertragungsfunktionen zu den Gebäuden aus ca. 65 Messquerschnitten für unterschiedlichste Tunnelquerschnitte, Gebirge, Überdeckungshöhen usw. vor, die einen umfassenden Vergleich ermöglichen.

Vorgestellt werden Messverfahren und Analyse der Messergebnisse, Prognosezuschärfung und Maßnahmenanpassung.

Prinzipielle Probleme der Erschütterungsprognosen werden beleuchtet.

### **Vorstellung imb-dynamik**

imb-dynamik bearbeitet seit über 30 Jahren ausschließlich Fragestellungen in den Bereichen Dynamik, Schwingungen und Erschütterungsschutz, mit den thematischen Schwerpunkten Schienenverkehr, Erschütterungen in Gebäuden und Maschinenerschütterungen.

Insbesondere verfügt imb-dynamik in diesen Bereichen über eigene analytische dynamische Modellierungen:

iSi: imb-dynamik-Rad-Schiene-Interaktionsmodell

iSEG: imb-dynamik-Simulationsmodell für Ausbreitung von Erschütterungen in Gebäuden

iSP: imb-dynamik-Simulationsmodell für Presswerkserschütterungen

## 1 Einführung

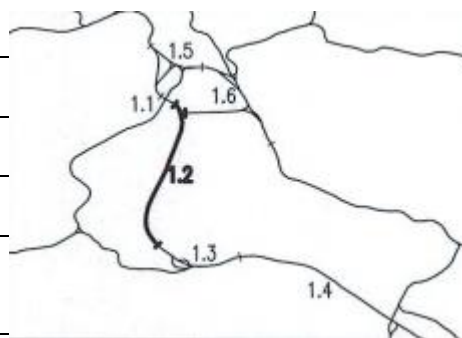
Bei dem allgemein bekannten Bahnprojekt Stuttgart 21 (bestehend aus dem neuen unterirdischen Hbf. und 4 Zulauftunnels mit jeweils 2 Röhren werden zahlreiche Gebäude mit teils sehr geringer Überdeckung unterfahren. In Vorprognosen seitens IB Fritz [3] wurden an zahlreichen Abschnitten Erschütterungsschutzmaßnahmen in Form von Masse-Feder-Systemen vorgesehen, welche planfestgestellt sind.

Zur Absicherung und Zuschärfung der Ursprungsprognosen wurden von imb-dynamik Tunneladmittanz- und Ausbreitungsmessungen an insgesamt 65 Tunnelquerschnitten und über 100 korrespondierenden Gebäuden durchgeführt.

Das Gesamtprojekt ist in 6 Planfeststellungsabschnitte und 4 Ausbaulose organisiert.

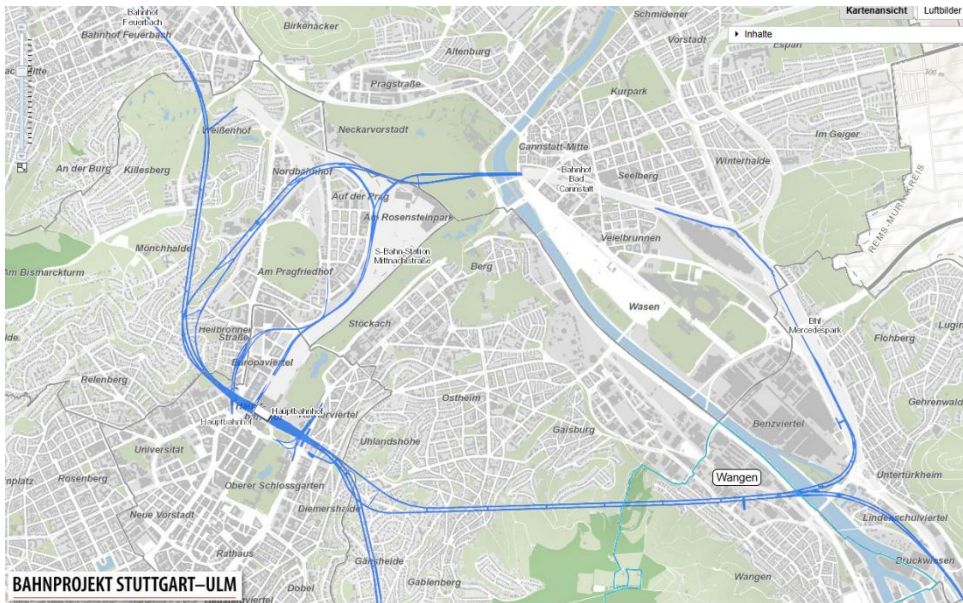
Tabellarische Übersicht:

Übersichtstabelle Stuttgart 21		
Tunnel	Planfeststellungsabschnitt	Ausbaulos
Talquerung Hbf	PfA 1.1	Los B
Fildertunnel	PfA 1.2	Los C
Flughafentunnel	PfA 1.3	Los D
Filderebene	PfA 1.4	Los D
Feuerbach + Bad Cannstadt, S-Bahn	PfA 1.5	Los A S-Bahn Los A
Tunnel Ober/Untertürkheim	PfA 1.6	Los C



Dazu kommen noch Anpassungen der S-Bahn (geänderte Zuführung zum Haltepunkt HBf) und von Stadtbahnabschnitten.

Dazu Kartendarstellungen:



*Bild 1: Bereich Stuttgart Talkessel / Neckar (Auszug aus biss21 [1])*



*Bild 2: Bereich Stuttgart Flughafen / Filderportal (Auszug aus biss21 [1])*

## 2 Messungen

### 2.1 Anregungsverfahren

Dieses wurde bereits in [2] ausführlich beschrieben und wird hier nur kurz dargestellt.

Als Erschütterungsquelle bzw. als Kraftanregung diene ein sog. Hochfrequenzrüttler mit variabler Unwucht. Als Trägergerät / Versorgungseinheit wurde ein Mobilbagger eingesetzt.

Die Krafteinleitung für die Admittanzmessung erfolgte über ein hochabgestimmtes Stahljoch (relevante Eigenfrequenzen über 500 Hz). Auf der Tunnelsohle wurde dieses mittels Betonschrauben temporär verschraubt. Der Rüttler erfasst mit seiner Zange das Stahljoch, dieses überträgt über seine Grundplatte und damit über eine definierte Fläche die Kraft auf die Tunnelsohle.



*Bild 3: Rüttler und Stahljoch mit Messgerät*

Die Kraftmessung erfolgt über die Biegung des Stahlträgers (analog einer Kraftmessdose).

Die Biegung wird mittels DMS messtechnisch erfasst.

Dazu werden 4 DMS in die Taschen des I-Profiles gesetzt und einer (redundant) an die Unterseite. Eine Mittelwertbildung über die 4 DMS eliminiert Horizontalkräfte und Biegemomente auf das Stahljoch aus Ausmitigkeiten des Rüttlers, sodass nur die resultierende Vertikalkraft erfasst wird. Die Kalibrierung erfolgt statisch mittels einer Kraftmessdose und zeigt ein streng lineares Verhalten.

Wegen des frequenzunabhängigen E-Moduls des Stahls gilt diese Kalibrierbeziehung in sehr guter Näherung bis 100 Hz (dyn. Überhöhung bei 50 Hz 1%, bei 100 Hz 4%).

## 2.2 Messaufbau

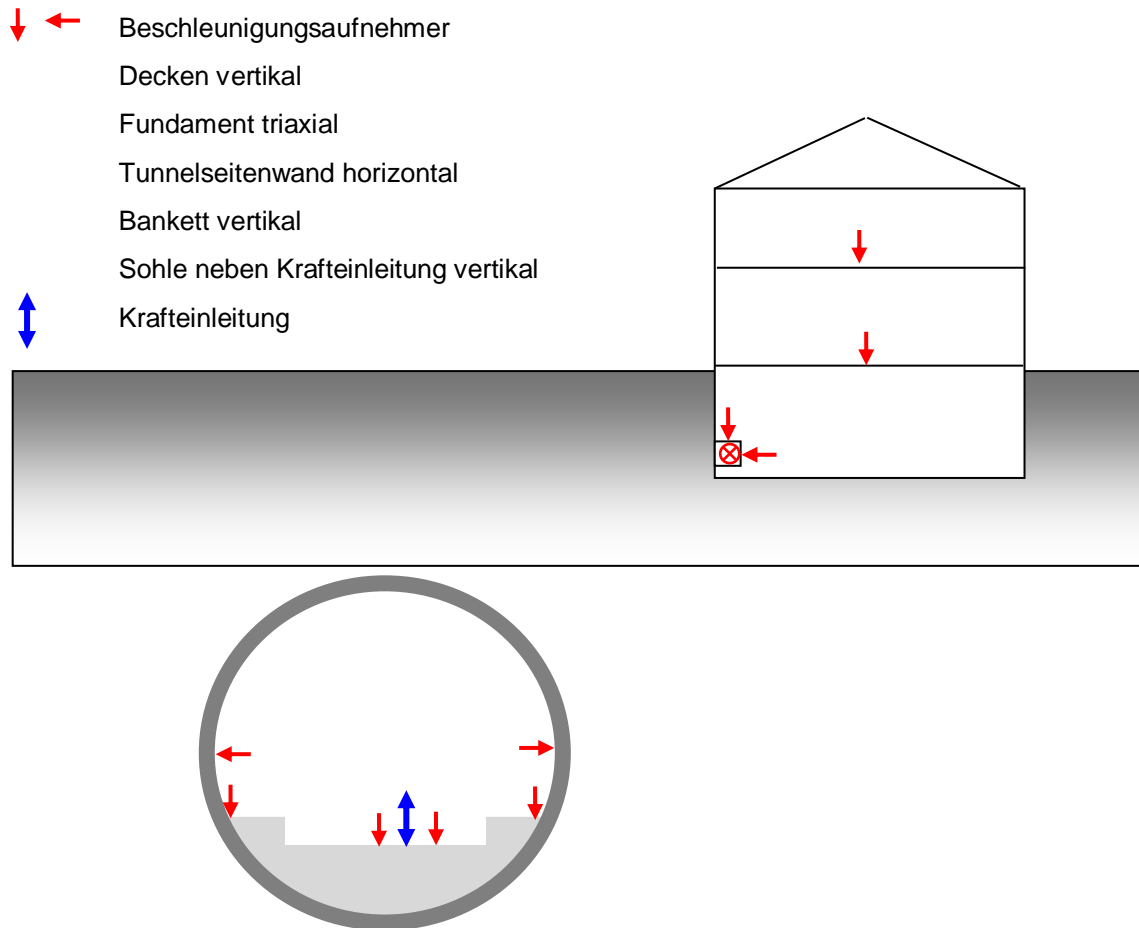


Bild 4: Typischer Messaufbau Schwingungsmessung

## 2.3 Messquerschnitte und Tunnelleigenschaften

Die Messungen fanden nur an immissionsrelevanten Querschnitten, also bei relativ geringer Überdeckung statt.

Tabelle

Tunnel	Anzahl der Querschnitte	Gebirge	Überdeckung	Tunnelform
Hbf Nord/Südkopf	2+2	Talsediment	0-10 m	Rechteck 4-8gl.
	2+7	Felsseintritt	10-55 m	Kreis 2 gl.
Feuerbach	4	Fels	37-58 m	Kreis 1gl.
	2	Austritt Feuerb.	8-12 m	Rechteck 2gl.
Bad Cannstatt	4	Fels	6-50 m	Kreis 1gl.
Filder	6	Fels	25-50 m	Kreis 1gl. Tübbing
Ober/Untertürkheim	4	Felsaustritt	20-30 m	Kreis 1gl.
	11	Talsediment	6-20 m	
Flughafen	7	Lockergestein	20-25 m	Kreis 1gl.
	4			Rechteck 1gl
S-Bahn	8	Talsediment	0-5 m	Rechteck 2gl.
Stadtbahn	2	Talsediment	5 m	Rechteck 1gl.

## 2.3 Auswertung

Zunächst wurden Terzspektren mit der Charakteristik Fast-Max-Hold erstellt:

- Kraftspektren aus den DMS-Messpunkten
- Schnellespektren für alle Beschleunigungsmesspunkte

Daraus wurden folgende Übertragungsfunktionen abgeleitet:

- Eingangsadmittanz = Schnelle Tunnelsohle / Kraft
- ÜF Tunnel = Schnelle Seitenwand / Schnelle Sohle
- Transferadmittanz = Schnelle Seitenwand / Kraft
- ÜF Boden = Schnelle Gebädefundament vertikal / Schnelle Tunnelseitenwand
- ÜF Gebäude = Schnelle Decke / Schnelle Gebädefundament vertikal

Betrachteter Frequenzbereich der Admittanzen 10 bis 100 Hz

Betrachteter Frequenzbereich der Ausbreitung (ÜF Boden) teils 4 bis 400 Hz

### 3 Messergebnisse

Der Focus liegt hier auf den Tunnel- und Fundamentmesspunkten. Die Deckenmesspunkte waren häufig durch Schritte der Anwohner gestört.

#### 3.1 Berechnung der Eingangsadmittanz

Beispielhaft Tunnel Bad Cannstatt, MQ I (Rosensteinstraße)

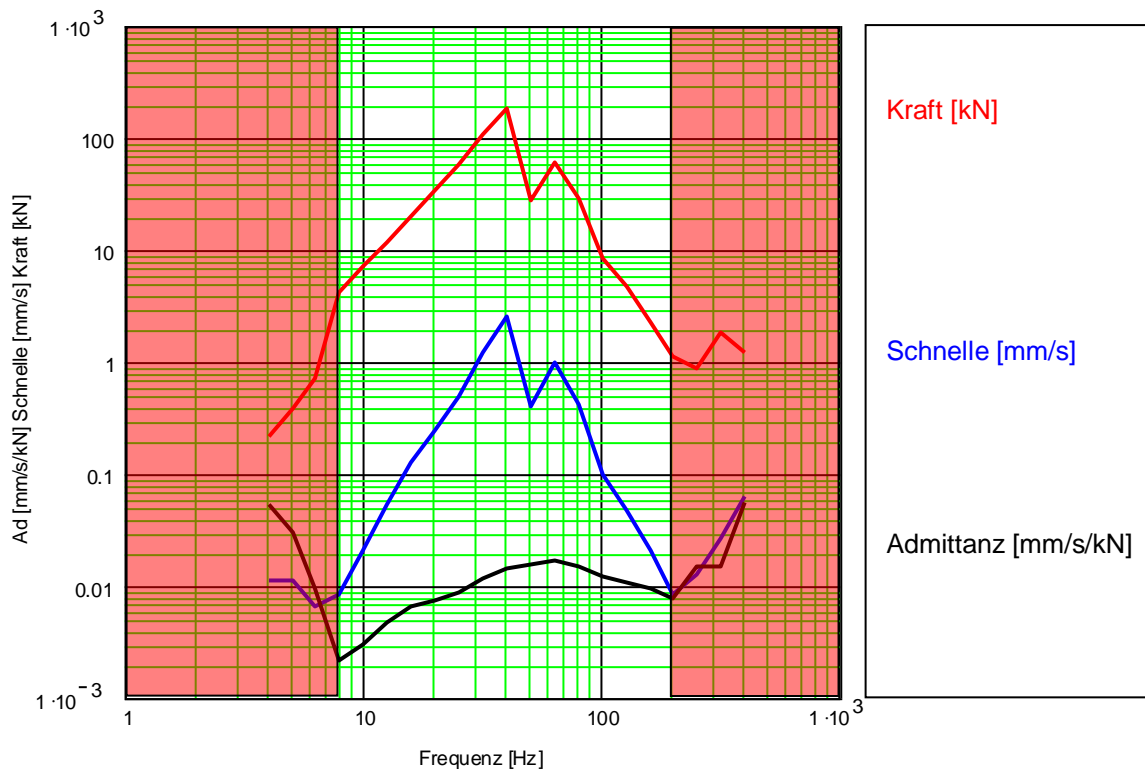


Bild 5: Kraft, Schnelle Tunnelsohle und Eingangsadmittanz

An dieser Messstelle wurde eine Grundgeräuschfreiheit von 8 Hz bis 200 Hz erreicht (grüner Bereich).

Gefordert ist ein abgedeckter Frequenzbereich von 10 bis 100 Hz.

Zwischen 10 Hz und 100 Hz wird in jeder Terz eine Kraft von mindestens 8 kN eingeleitet, die maximale Kraft in der maximalen Arbeitsfrequenz des Rüttlers bei ca. 40 Hz.

Die Admittanz zeigt einen ausgerundeten Verlauf ohne ausgeprägtes Eigenverhalten.

Versuch einer mechanischen Interpretation:

Die dynamische Steifigkeit der Tunnelsohle wird aus den folgenden Anteilen zusammengesetzt:

- Federanteil C (Federsteifigkeit des Vollraums)
- viskoser Dämpfer R (Wellenabstrahlung im Boden)
- positive Massensteifigkeit M (Fehlmasse der Kavität)

gewählte Parameter pro Meter Tunnellänge und Anpassung an Messergebnis

$$C = 10^{10} \text{ N/m}, R = 3 \times 10^7 \text{ N/m/s}, M = 93 \text{ t}$$

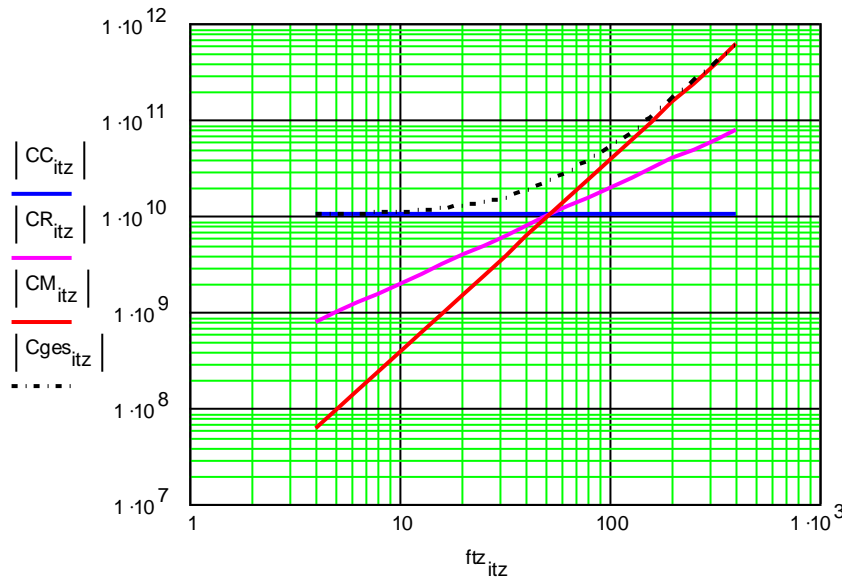


Bild 6a: dynamische Steifigkeiten (Betrag, in N/m) Von **Feder**, **Dämpfer** und **Kavität** und **gesamt**

Daraus Berechnung der Admittanz:

$$Adm\_th_{itz} := \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot ftz_{itz} \cdot 10^6}{|Cges_{itz}|} \right)$$

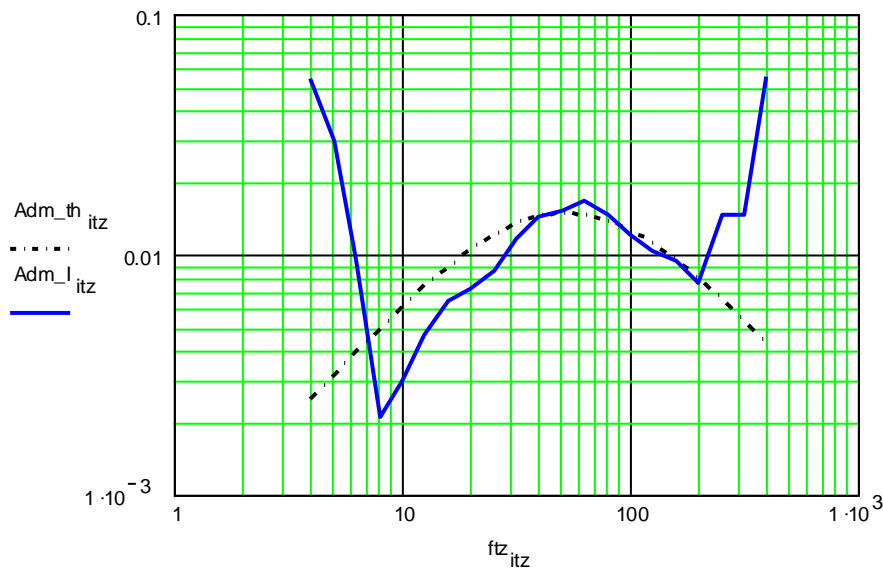


Bild 6b: Admittanz [mm/s/kN] **gemessen** und **theoretisch**

### 3.2 Admittanzverlauf und Ausbreitung eines Messquerschnittes

Beispielhaft Tunnel Bad Cannstatt, MQ I (Rosensteinstraße)

Bergmännischer Tunnel, Überdeckung 16 m, Fels

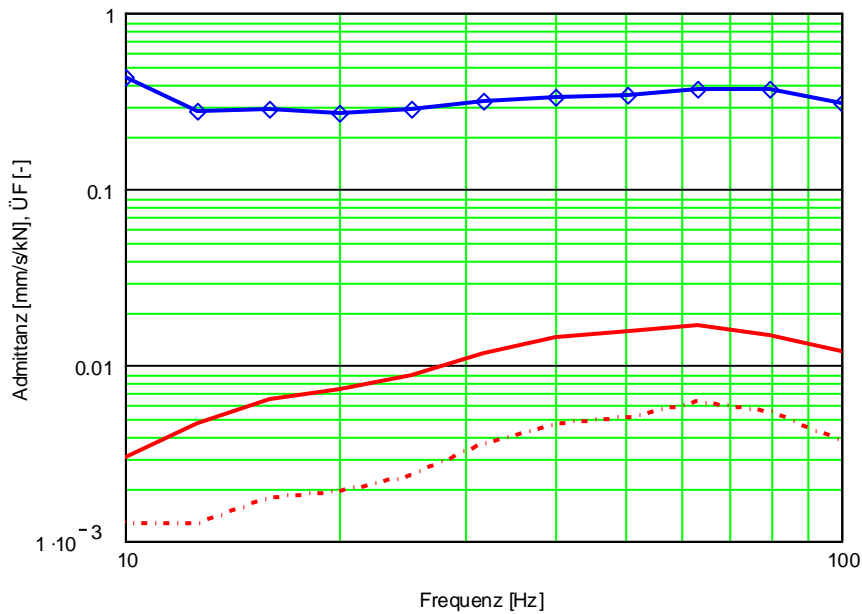


Bild 7: ÜF Sohle Wand  $\diamond$ - $\diamond$ -, Eingangsadmittanz \_\_\_\_\_, Transferadmittanz -.-.-

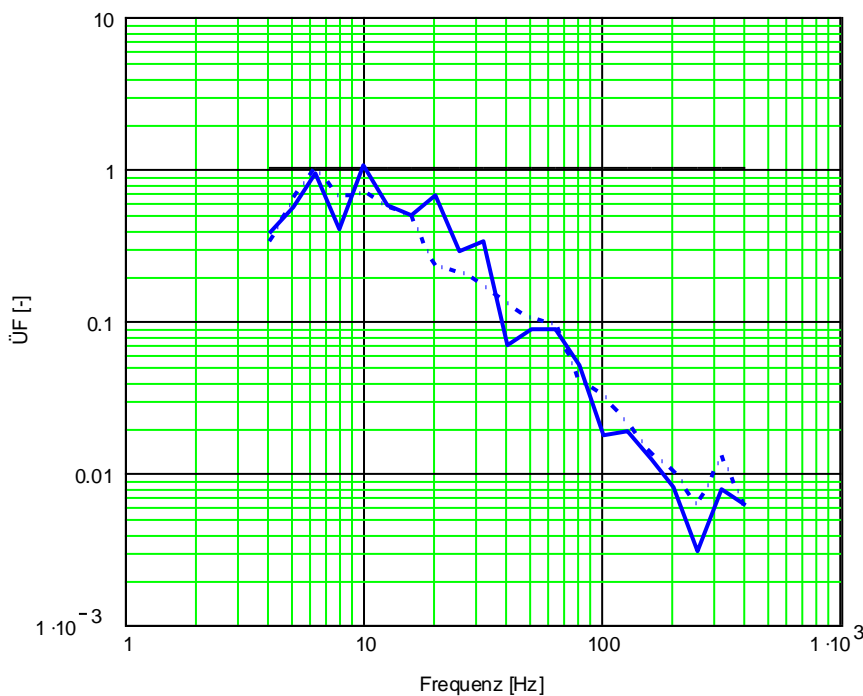


Bild 8: ÜF Tunnelwand – Fundament vertikal für 2 korrespondierende Gebäude

### 3.3 Vergleich der Eingangs- und Transferadmittanzen

Zunächst werden Gruppen ähnlicher Situationen gebildet und zusammengefasst und die Mittelwerte dieser Gruppen abschließend gegenübergestellt.

Kreisquerschnitte im Felsgestein (Zuführung Bad Cannstatt)

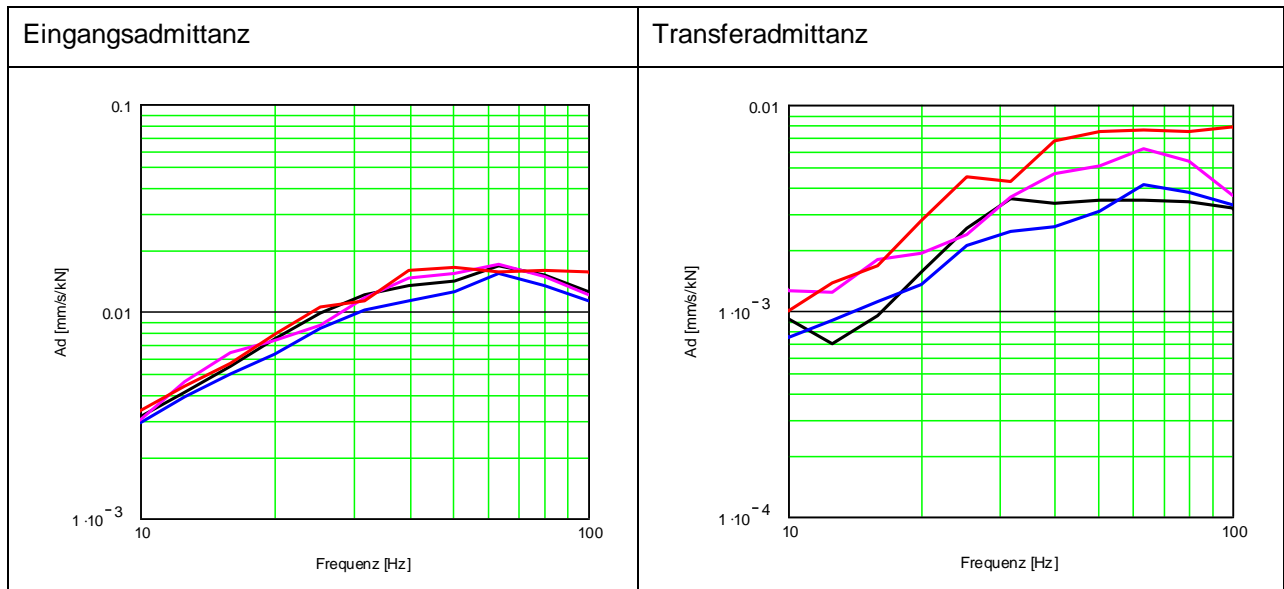


Bild 9a Kreisquerschnitte im Felsgestein

Kreisquerschnitte im Talsediment/Lockergestein Türkheim/Flughafen

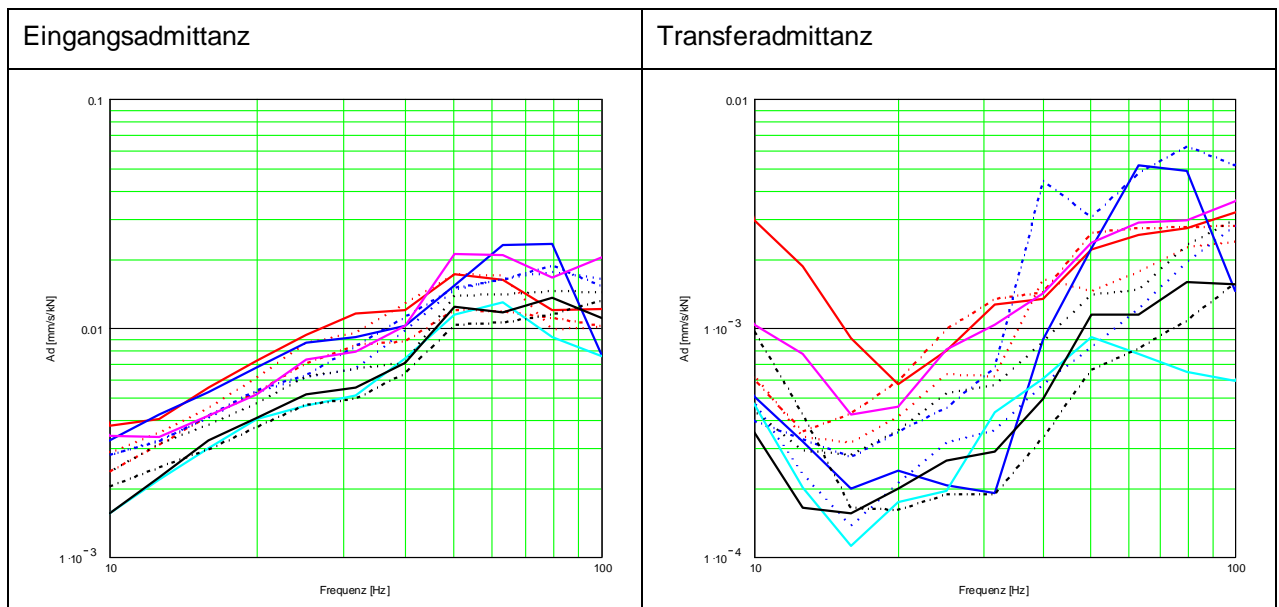


Bild 9b Kreisquerschnitte im Talsediment

Breiter Rechteckquerschnitt Nordkopf im Talsediment

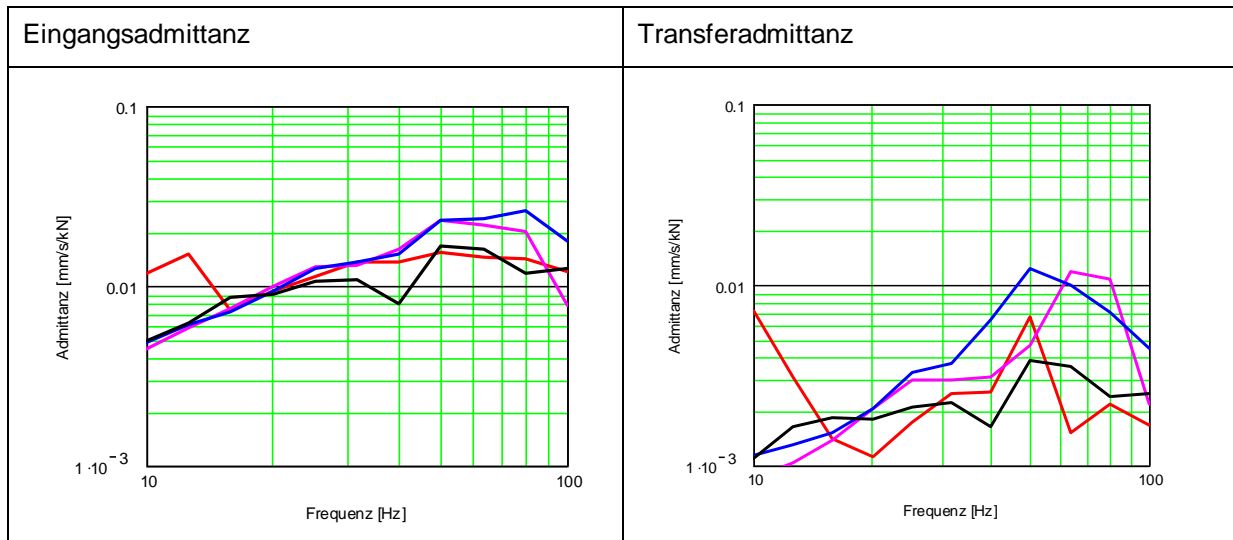


Bild 10: Breiter Rechteckquerschnitt Hbf

Rechteckquerschnitt S-Bahn 2gleisig im Talsediment

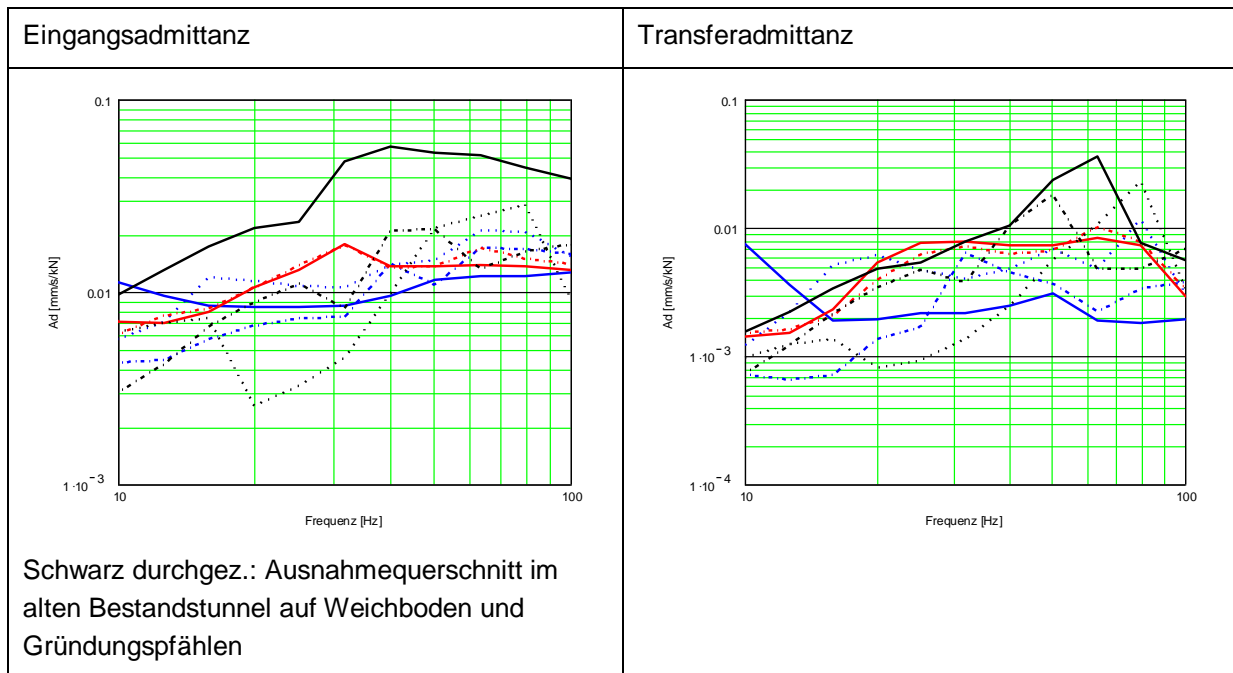


Bild 11: Rechteckquerschnitt S-Bahn 2gleisig

- Die Eingangsadmittanzen streuen moderat (ca. ± 3 dB)
- Die Transferadmittanzen streuen wesentlich stärker (ca. ± 6-10 dB)

Vergleich der Situationen durch Gegenüberstellung der Mittelwerte

- Kreisquerschnitt im Fels (blau), im Talsediment (rot)
- Rechteckquerschnitt im Talsediment Nordkopf (schwarz durchgezogen) und S-Bahn (schwarz strichpunkt)

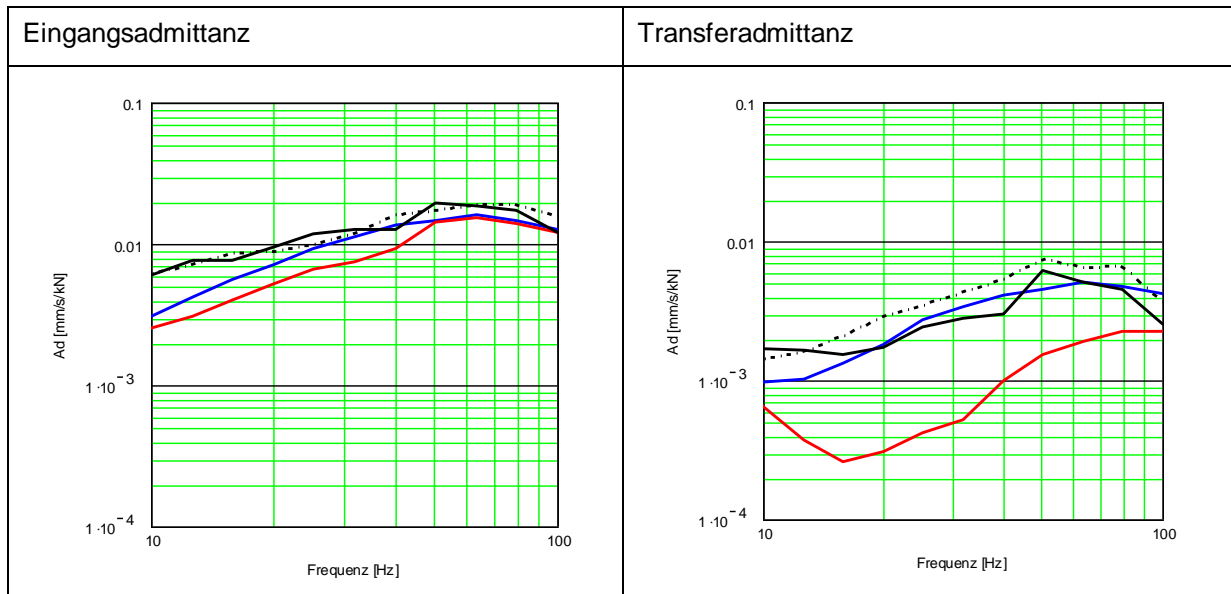


Bild 12: Vergleich der Situationen

Die Unterschiede der Eingangsadmittanz sind im Vergleich zu den vorigen Streuungen wenig signifikant.

Tendenziell sind die Rechteckquerschnitte leichter anregbar als die Kreisquerschnitte

Die Transferadmittanz der Kreisquerschnitte im Talsediment ist auffallend (um ca. Faktor 4) kleiner als bei den anderen Situationen (siehe rote Kurven).

Zwischenfazit:

Die Transferadmittanzen weisen eine starke Streuung auf.

Die starke Streuung der Transferadmittanz ist insofern problematisch, da die üblichen Emissionsansätze auf Messwerten von Tunnelseitenwandmesspunkten ohne Admittanzkenntnisse basieren.

Das heißt, dass Vorprognosen (die zu einem Zeitpunkt vor Auffahren der Tunnelröhren erstellt werden müssen) eine Unschärfe von bis zu  $\pm 10$  dB haben können.

Diese erhebliche Unschärfe könnte mit Hilfe weiterer Messpunkte an Tunnelsohle und Banketten, jeweils beidseits, und einer Analyse des Ausbreitungsverhaltens im Tunnelquerschnitt reduziert werden (vgl. [6]).

### 3.4 Vergleich der ÜF zum Gebäudefundament

Hier werden exemplarisch einige Gruppen dieser ÜF aus den Messkampagnen abgebildet.

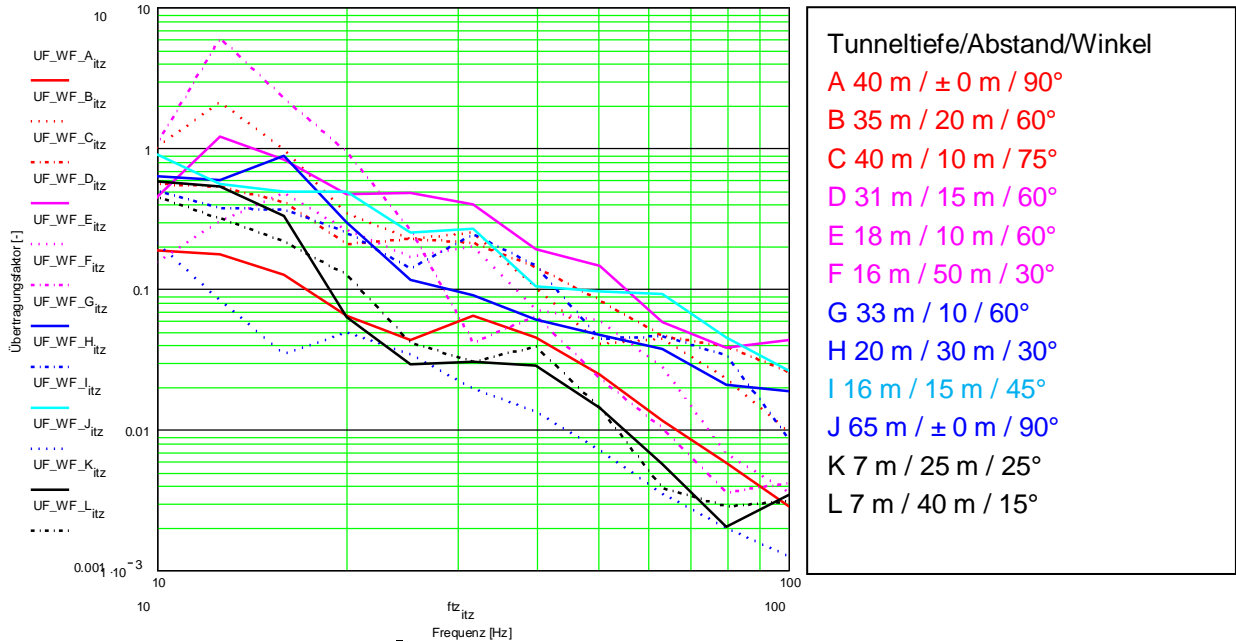


Bild 13: Zusammenstellung verschiedener Situationen (A-E Kreisquerschnitte im Talsediment, G-J im Fels, K und L Rechteckquerschnitte im Talsediment)

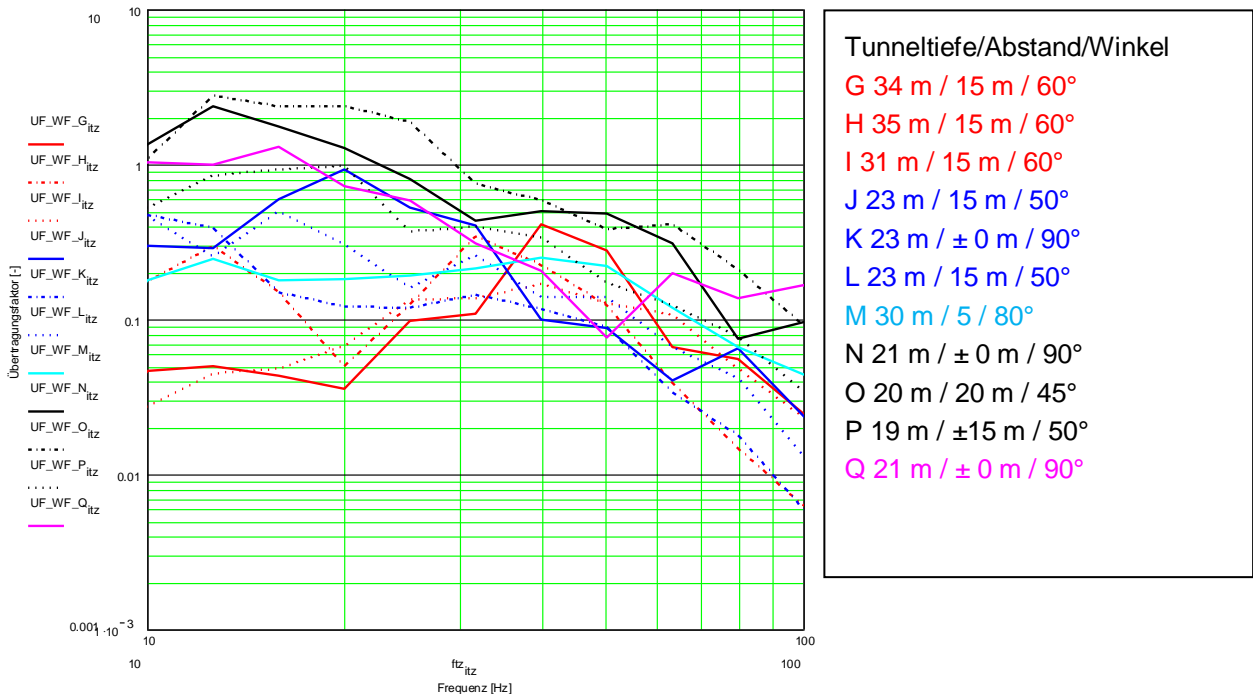


Bild 14: Kreisquerschnitte im Lockergestein (G-I Flughafentunnel) und Talsediment (J-Q Ober-/Untertürkheim)

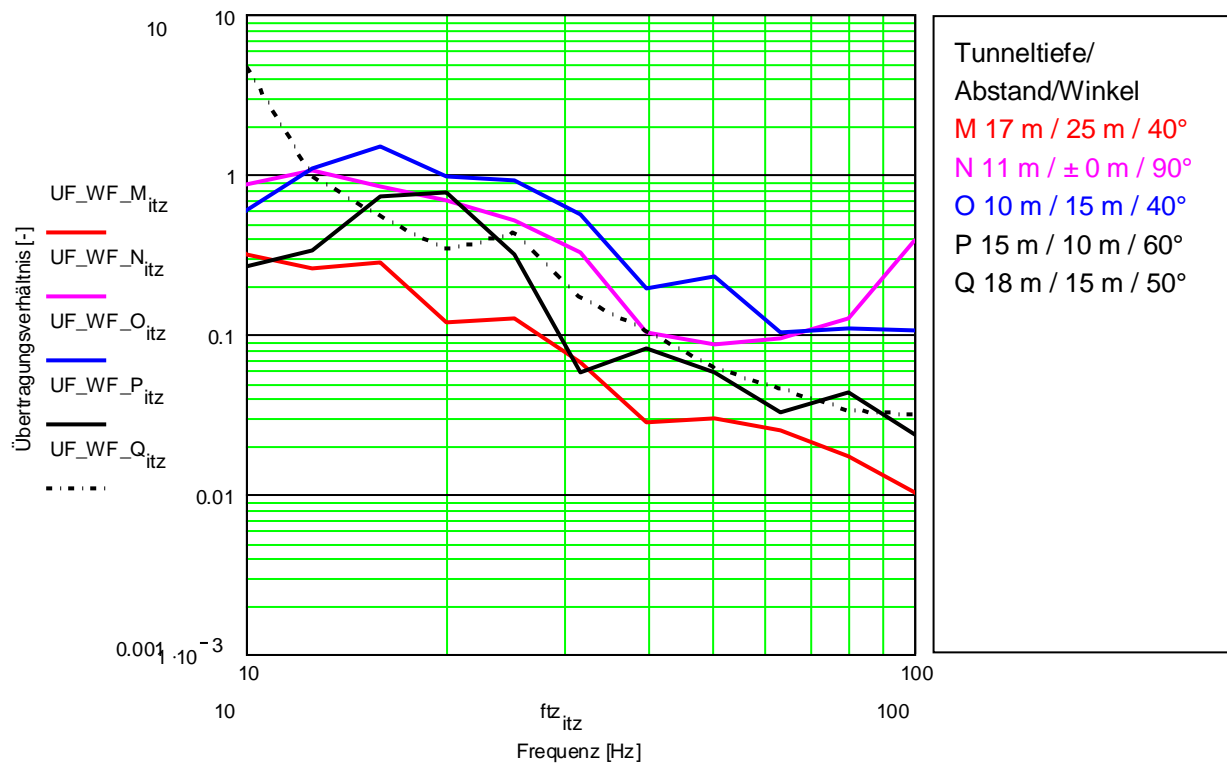


Bild 15: Breite Rechteckquerschnitte Nordkopf im Talsediment

### 3.5 Analyse

- Die Übertragungsfunktionen korrelieren weitgehend mit der Tunneltiefe:
  - Je tiefer der Tunnel, desto schwächer die Übertragung
  - Allerdings überlagern sich Details der geometrischen Anordnung der Gebäude zum Tunnel
- Eine Ausnahme bilden die oberflächennahen Rechteckquerschnitte
  - Dort ist die Übertragung trotz geringer Überdeckung schwach.
- Generell gilt, dass meistens große Admittanzen mit schwachen Übertragungen einhergehen und umgekehrt, sodass die großen Streuungen der beiden Einzelgrößen sich in der Gesamtprognose teilweise „herauskürzen“.

### 3.6 ÜF in Gebäuden exemplarisch

Exemplarisch wird das Kongresszentrum Messe Stuttgart betrachtet.

Dargestellt sind Übertragungsfunktionen

- Von Tunnelseitenwand auf Gebäudefundament
- Von Gebäudefundament auf Decken im OG
- Von Gebäudefundament auf Boden Kongresshalle

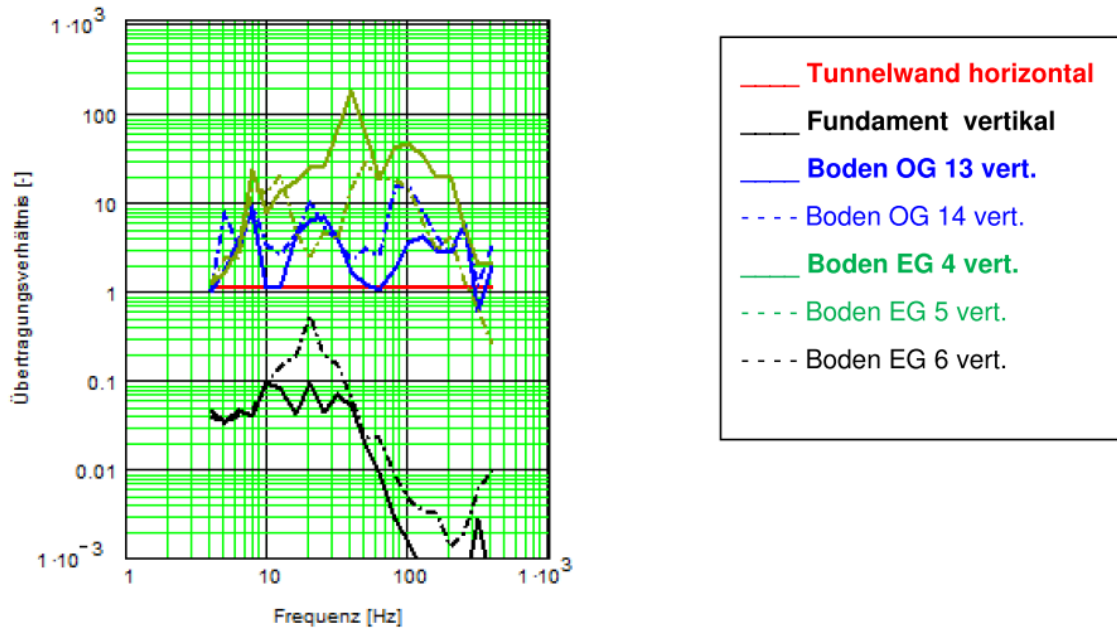


Bild 16: Übertragungsfunktionen für das Kongresszentrum Messe Stuttgart

Die weit gespannten Decken im OG zeigen Eigenfrequenzen ab 5 Hz und maximale Resonanzverstärkungen von ca. Faktor 10.

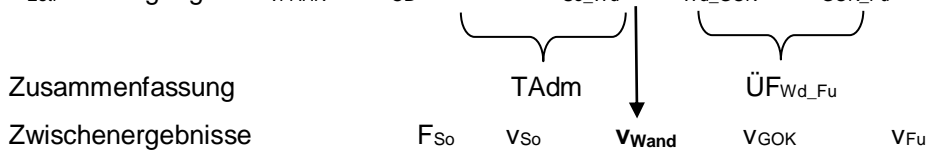
Der Bodenaufbau der Kongresshalle mit absenkbaren Bereichen ist extrem schwingungsempfindlich mit sehr hohen Resonanzverstärkungen.

## 4 Prognosezuschärfungen

### 4.1 Allgemeines

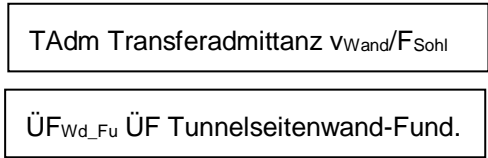
Prognoseformel für eine rein rechnerische Prognose auf der Basis spektraler Übertragungsfunktionen  $\ddot{U}(f)$ :

$$V_{Estr} = \text{Anregung} \times \ddot{U}_{VFAHR} \times \ddot{U}_{OB} \times \text{Adm} \times \ddot{U}_{So\_Wd} \times \ddot{U}_{Wd\_GOK} \times \ddot{U}_{GOK\_Fu} \times \ddot{U}_{Fu\_De\_Estr}$$



Anregung: Differenzweganregung (Gleislagefehler, Radunrundheiten, Schienenwellen), Parameteranregung

- $\ddot{U}_{VFAHR}$ : Ablesung der Rauigkeiten, Transformation von Wellenlängen in Frequenzen
- $\ddot{U}_{OB}$ : Übertragungsverhalten des Oberbaus (Radsatz-Oberbau-Resonanz, Kraft auf Tunnelsohle)
- Adm: Eingangsadmittanz der Tunnelsohle
- $\ddot{U}_{So\_Wd}$ :  $\ddot{U}$  Tunnelsohle-Wand
- $\ddot{U}_{Wd\_GOK}$ :  $\ddot{U}$  Tunnelseitenwand-GOK
- $\ddot{U}_{GOK\_Fu}$ :  $\ddot{U}$  GOK-Fundament
- $\ddot{U}_{Fu\_De\_Estr}$ :  $\ddot{U}$  Fundament-Decke-Estrich
- $F_{So}$ : Kraft auf Tunnelsohle
- $v$ : Schwingschnelle (So, Wand, GOK, Fu, Estr)



## 4.2 Ursprungsprognose und Prognosezuschärfungen

Die den PfV zugrundeliegenden Ursprungsprognosen [3] wurden seitens IB Fritz erstellt.

Dazu wurden vorhandene Tunnelemissionspektren auf die Situation in Stuttgart 21 umgerechnet (Berücksichtigung von Fahrgeschwindigkeit, Tunnelquerschnitt, 1- oder 2-gleisig, jedoch ohne Berücksichtigung des Gebirges). Für den Boden erfolgte eine Ausbreitungsberechnung, für die Gebäude eine pauschale Berücksichtigung der Deckenschwingungen.

Die Prognosezuschärfung erfolgte durch

- Ansatz der vorhandenen Tunnelemissionsspektren, korrigiert um Transferadmittanzdifferenzen im Vergleich zu einer konservativ angesetzten Vergleichsadmittanz (unvermeidliche Prognoselücke)
- Ansatz der gemessenen ÜF Seitenwand-Fundament, umgerechnet auf Linienquelle
- Ansatz der gemessenen ÜF Fundament-Decken, teils ergänzt mit typisierter Gebäudemodellierung

Prognoseschema tabellarisch

	Anregung	ÜF <sub>VFAHR</sub>	ÜF <sub>OB</sub>	Adm	ÜF <sub>So_Wd</sub>	VWand	ÜF <sub>Wd_Fu</sub>	ÜF <sub>Fu_De_Estr</sub>
Vorprognose	Zuschlag für Bogen und Weichen	Korrektur	-	???	Korrekturen für Tunnel-form	Vergleichb. Messer-gebnisse	Berechnung, nicht offen-gelegt	Teils nur Holz/Beton Teils Variation f <sub>Decke</sub> Ü <sub>max</sub> = 20 dB
				TAdm				
Zuschär-fung	Bogenzuschlg. aus Vorprog. Weichenzu-schlag mod.	Korrektur-formel modifiziert	Ggf. EFD	Direkte Messergeb-nisse Relative Admittanzkor-rektur		Aus Vor-prognose Lücke, da ohne Adm	Messergeb-nisse, Um-rechn. auf Linienquelle	Messergebnisse, typ. Gebäudemodell

Eine Crux der Prognosen ist die starke Verankerung am Tunnelseitenwand-Messpunkt.

Die Tunnelseitenwand ist im Tunnel zwar die gleisfernste realisierbare Messposition mit weitgehendem Fernfeldverhalten, aber nicht zwingend Teil des Ausbreitungsweges.

Bei schlechter Anbindung an das Gebirge kann die Seitenwand in Ausnahmefällen sehr wenig schwingen, während die Gebäude via Tunnelsohle und Boden sehr wohl betroffen sind (siehe [6]).

Diese Schwäche lässt sich nur durch zusätzliche MP an Sohle und Bankett heilen

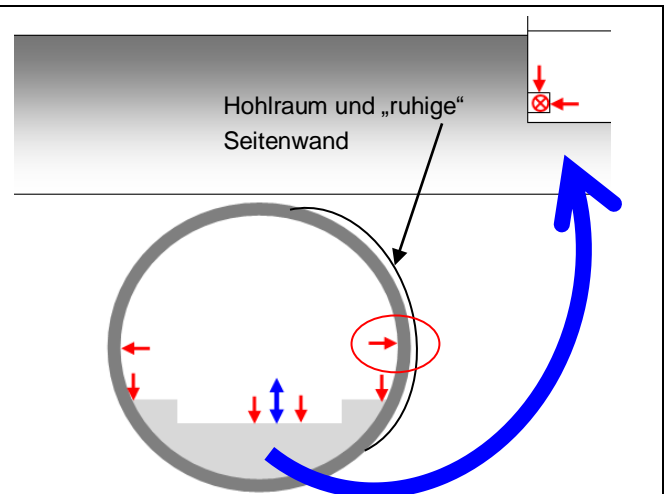


Bild 17: Ausbreitung bei „hohler“ Seitenwand (vgl. Bild 4)

Insgesamt ergab sich, dass die Ursprungsprognosen meist konservativ waren, mit einer signifikanten Ausnahme:

Flughafentunnel im Bereich der Kongresshalle. Hier war die Admittanz zu niedrig und gleichzeitig die Kongresshalle (mit sehr schwingungsfreudigen Bodenaufbauten) viel zu unempfindlich angesetzt.

## 5 Maßnahmenanpassung

In den Ursprungsprognosen wurden folgende Maßnahmen ermittelt und in den PfB festgeschrieben:

- Schwere MFS mit Abstimmfrequenzen bis hinunter zu 6,3 Hz
- Leichte MFS mit Abstimmfrequenzen von 20, 25 und 31,5 Hz

Die Zuschärfung ergab, dass einige leichte MFS hätten eingespart werden können, was jedoch angesichts der Festschreibung in den PfB recht schwierig ist.

Folgende Maßnahmenmodifikation erfolgten:

1. Ersatz aller leichten 31,5Hz-MFS durch Hochelastische Schienenstützpunkte
2. Ersatz leichter MFS beim S-Bahn-Tunnel (mit SchO) durch USM
3. Absenkung der Abstimmfrequenz des leichten 20Hz-MFS beim Flughafen auf 12,5 Hz

Die Modifikationen 1 und 2 bedeuten eine Erleichterung bzw. Einsparung, die Modifikation 3 hingegen eine extreme Verschärfung.

Zum Nachweis der Funktionalität der Maßnahmenmodifikation wurden Einfügungsdämmungen mittels iSi [4] berechnet.

### 5.1 Vergleichende Darstellung der jeweiligen Einfügungsdämmungen (Abk. EFD) nach iSi

Mit Resonanzkorrektur (Begrenzung auf 6 dB in einer bzw. 5 dB auf zwei Terzen) und hochfrequenter Flatline.

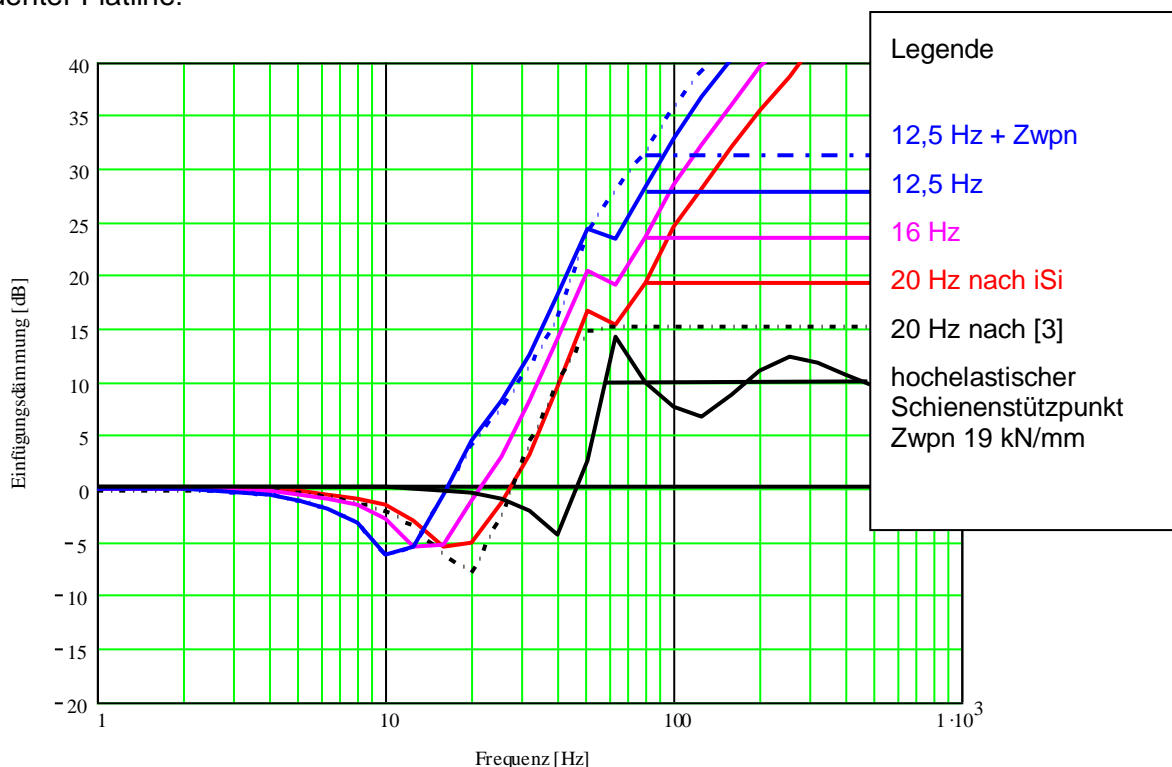


Bild 17: Einfügungsdämmungen der Maßnahmen

### 5.2 Vergleich MFS 31,5 Hz – hochelastischer Schienenstützpunkt

Die Wirkung wird als Einfügungsdämmung [dB] dargestellt.

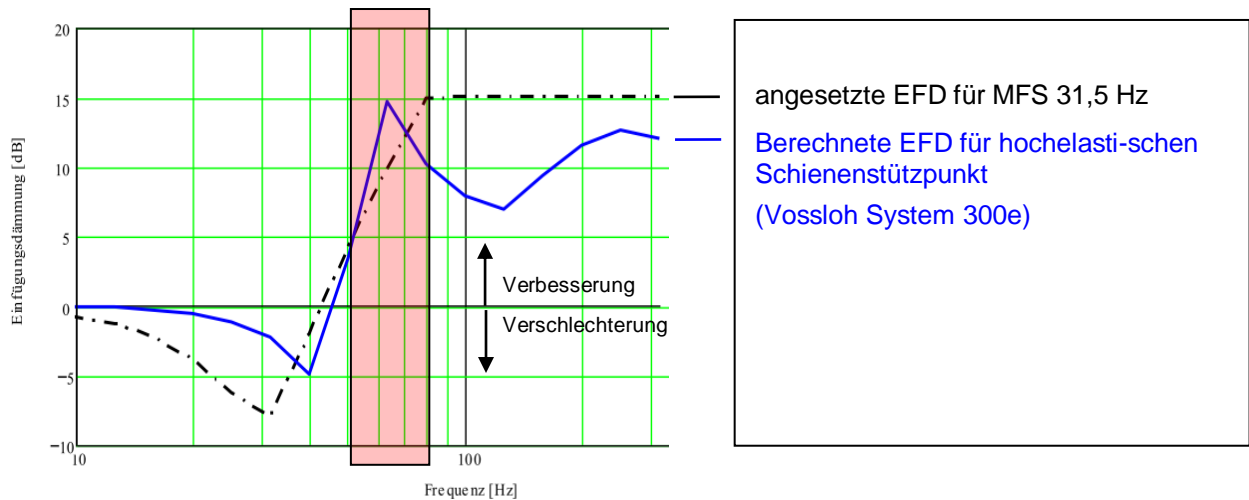


Bild 18: Wirkung hochelastische Schienenstützpunkt

Der maßgebende Frequenzbereich für den Sekundärluftschall erstreckt sich im vorliegenden Fall von 50 Hz bis 80 Hz (roter Kasten). In diesem Bereich ist die EFD beider Systeme in der Summe gleich.

### 5.3 Zur Konstruktion des 12,5Hz-MFS

Die vorgehaltene Bauhöhe von 77 cm für ein leichtes 25Hz-MFS konnte nicht mehr vergrößert werden. Es gelang aber – an der Grenze der technischen Machbarkeit – mittels eines Materialmixes und unter Einsatz von Schwerbeton ein flächig gelagertes 12,5Hz-MFS unterzubringen.

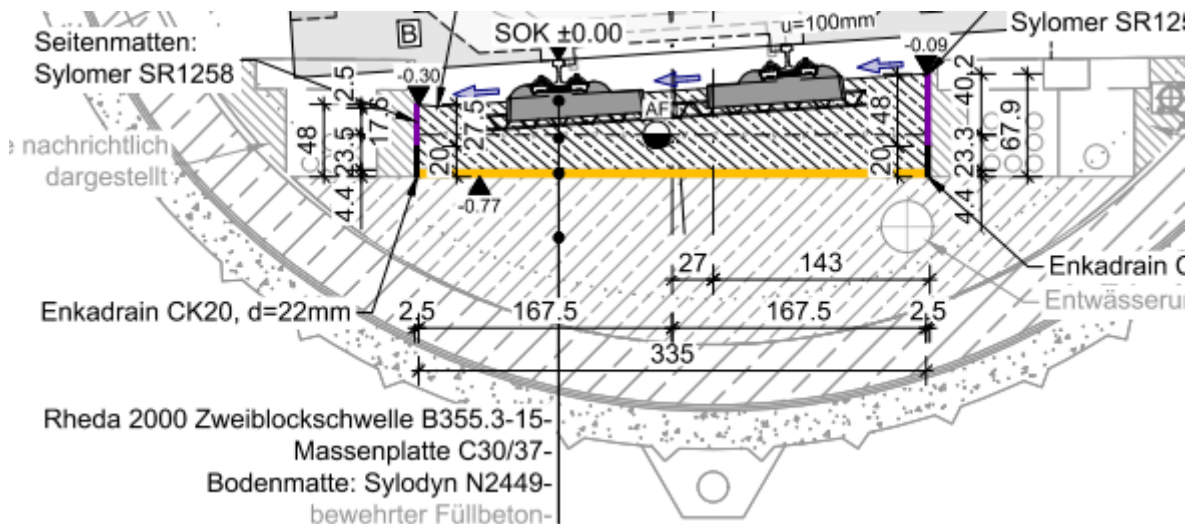


Bild 19 Querschnitt des MFS

Die Bauhöhe beträgt 77 cm (unter SOK Innenschiene)

Dies entspricht der vorhandenen Bauhöhe beim MFS Tunnel Rastatt, wo das gleiche Problem besteht. Dort werden aktuell leichte MFS mit 16 Hz und 12,5 Hz (an der Grenze der technischen Machbarkeit) mit großen Anstrengungen realisiert.

## 6 Ausblick auf Maßnahmenumsetzung und Nachmessungen

imb-dynamik hat die Umsetzung der Maßnahmen im Los A (Feuerbachtunnel und Tunnel Bad Cannstatt) und im S-Bahn-Tunnel baudynamisch begleitet:

- Feuerbachtunnel: hochelastische Schienenstützpunkte
- Tunnel Bad Cannstatt: hochelastische Schienenstützpunkte und leichte 25Hz-MFS
- S-Bahntunnel: schweres 6,3Hz-MFS, SchO auf USM

Aktuell sind folgende Abschnitte fertiggestellt:

- Alle hochelastischen Schienenstützpunkte
- Schwere MFS der Talquerung (HBf Süd- und Nordkopf)
- Flughafentunnel

Die Eigenfrequenzen der Maßnahmen wurden großenteils bereits nachgemessen und bestätigt.

## 7 Literatur

- [1] biss21, interaktives Bürgerinformationssystem zu Stuttgart 21
- [2] N. Breitsamter, H. Molzberger: Admittanz- und Ausbreitungsmessungen CityTunnel Leipzig, in VDI-Berichte 2063, Mai 2009
- [3] IB Fritz: Ursprungsprognosen
- [4] iSi: imb-dynamik-Rad-Schiene-Interaktionsmodell, siehe [www.imb-dynamik.de](http://www.imb-dynamik.de)
- [5] imb-dynamik-Messungen 2020 bis 2024 (insgesamt 12 Messkampagnen)
- [6] N. Breitsamter, H. Molzberger: Tunneladmittanz und Erschütterungsausbreitung Vergleich CityTunnel Leipzig – neuer Kaiser-Wilhelmtunnel Cochem, in Müller-BBM Bahnakustik Fachtagung 2012
- [7] N. Breitsamter, H. Molzberger: Tunneladmittanz- und Ausbreitungsmessungen bei Stuttgart 21, Messverfahren, Analyse der Messergebnisse, Prognosen in VDI-Tagung Baudynamik, 2025