

ASPEKTE ZUR PUNKT- UND LINIENQUELLEN- THEMATIK BEI KÜNSTLICHER SCHWINGUNGS- ANREGUNG MITTELS SCHWINGUNGS- GENERATOREN

Michael Österreicher¹ und Wolfgang Unterberger¹

¹ iC consulenten ZT GmbH, Schönbrunnerstrasse 297, A-1120 Wien

KURZFASSUNG

Im Rahmen der Errichtung neuer Bahnstrecken stellen Erschütterungs- bzw. Körperschallprognosen einen integralen Bestandteil der Planung dar. Bereits in der Planungsphase müssen entsprechende Gegenmaßnahmen (wie z.B. Masse-Feder Systeme) berücksichtigt werden, da diese wesentlichen Einfluss auf die Dimensionierung wie z.B. den Ausbruchquerschnitt bei Tunnels haben können. Diese Vorbemessungen erfolgen zumeist mittels geodynamischer Versuchs- und Modellrechnungsverfahren. Untersuchungen, welche im Vorfeld der Errichtung stattfinden, sind jedoch mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet, sodass Verifikationsmessungen nach Fertigstellung des Rohbaus bei Tunnelbauwerken bzw. des Unterbaus bei freien Strecken notwendig sind, um die zuvor geplanten Maßnahmen nochmals zu überprüfen. Dazu werden z.B. künstliche Schwingungen mittels Schwingungsgeneratoren am Rohbau des Tunnels bzw. Unterbau angeregt und zeitgleiche Schwingungsmessungen an der Quelle bzw. in naheliegenden Anrainerobjekten durchgeführt. Zur Schwingungsanregung stehen dazu meist Schwingungserreger aus dem Bereich der Explorationsseismik zur Verfügung. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Anregungen mittels Schwingungsgeneratoren, anders als dies Zugsanregungen darstellen, als Punktquelle zu betrachten sind.

In der vorliegenden Arbeit wird diese Problematik der Punkt- und Linienquellencharakteristik unterschiedlicher Anregungen im Detail untersucht. Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit welchem eine Umrechnung der mittels Schwingungsgenerator ermittelten Immissionen in reale Zugsimmissionen möglich ist. Dabei werden, unter Berücksichtigung der lokalen Admittanzen bzw. der Übertragungsfunktionen, die Messungen mittels Superposition in entsprechende, dem Zug vergleichbare, Linienquellen, umgerechnet.

Schlagwörter: Schwingungsprognose, künstliche Schwingungserregung, Baudynamik, VibroScan, Erschütterungen, Punktquelle, Linienquelle

1. EINFÜHRUNG

1.1. Motivation

Die Durchführung von Erschütterungsprognosen im Rahmen der Planung von Infrastrukturprojekten sowie Kontrollmessungen nach Fertigstellung einzelner Projektphasen kann heute gemeinhin als Stan-

ard angesehen werden. Prognoserechnungen im Rahmen der Planung stellen zudem die Grundlage für die Dimensionierung von Erschütterungsschutzmaßnahmen dar, welche bereits in einem frühen Projektstadium bekannt sein müssen. Diese Prognosen basieren zumeist auf in-situ Versuchen zur Ermittlung der geo- und baodynamischen Parameter sowie auf Vergleichsmessungen der Erschütterungsemissionen.

Nachmessungen nach Fertigstellung einzelner Projektphasen wie z.B. Tunnelrohbau finden häufig mit Schwingungserregern wie z.B. dem VibroScan[®] Verfahren statt. Dabei werden Schwingungen an ausgewählten Messpunkten angeregt und die Übertragungseigenschaften in maßgebenden Gebäuden mittels Schwingungsmessungen ermittelt. Anhand der so ermittelten Übertragungseigenschaften und vorhandenen Emissionsdaten aus vergleichbaren Projekten können die im Vorfeld durchgeführten Prognoserechnungen überprüft werden.

Die Anregung mittels Schwingungserreger stellt jedoch, im Gegensatz zur Anregung durch z.B. einen Zug, eine Punktquellenanregung dar. Anregungen durch einen Zug besitzen, zumindest bis in bestimmte Distanzen, eher die Charakteristik einer Linienquelle. Dies hat, abhängig von der Distanz, einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbreitungscharakteristik der einzelnen Wellentypen im Untergrund¹ und an der Oberfläche und damit auch letztendlich einen Einfluss auf die Schwingungsimmissionen in Gebäuden. Zahlreiche Verfahren² versuchen dem Rechnung zu tragen, indem mittels Berechnungsverfahren aus den Anregungen durch Schwingungsgeneratoren Anregungen mit Linienquellencharakteristik simuliert werden. Weiters werden Schätzformeln angegeben, ab welcher Distanz, abhängig von der Zuglänge, eine Punktquellencharakteristik angesetzt werden kann^{1, 3}.

In der vorliegenden Arbeit wird ein verallgemeinerter Ansatz zu Ermittlung des Einflusses zwischen Punkt- und Linienquellencharakteristik erarbeitet, sodass mit einfachen Ansätzen aus den Messungen mittels Schwingungsgeneratoren auf tatsächliche Immissionen aus dem Zugverkehr oder vergleichbarer Quellen geschlossen werden kann.

1.2. Physikalische Grundlagen

Anregungen an der Oberfläche oder Untertage wie z.B. Zugsvorbeifahrten pflanzen sich im Untergrund wellenförmig aus. Dabei entstehen Wellen unterschiedlichen Typs, welche sich in unterschiedlicher Weise im Untergrund ausbreiten. Als maßgebende Vereinfachung in der Schwingungsanalyse wird davon ausgegangen, dass auf Grund der sehr kleinen Verschiebungen linear-elastisches Verhalten im Untergrund gegeben ist. Auf eine detaillierte Herleitung der Wellengleichungen für den elastischen Halbraum wird an dieser Stelle verzichtet, Darstellungen dazu können z.B. bei^{4, 5, 6} gefunden werden.

Im Fall von periodischen Anregungen entstehen stationäre Wellen deren Phasengeschwindigkeit c die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines bestimmten Schwingungszustandes einer Phase angibt⁵. Ist dabei die Phasengeschwindigkeit von der Anregungsfrequenz abhängig, spricht man von „Dispersion“, da sich die Wellenanteile ihrer Frequenz entsprechend mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten c fortpflanzen. Bei nichtperiodischer Anregung, wie dies z.B. bei Zugsanregungen gegeben ist, entstehen transiente Wellen deren Wellengeschwindigkeit c die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines markanten Wertes – zum Beispiel des Einsatzpunktes des Wellenzuges – angibt⁵.

Im Wesentlichen wird in einem ersten Ansatz, ausgehend von der Theorie eines elastischen Halbraums⁷, zwischen zwei Wellentypen, entsprechend deren Auftreten, unterschieden. Es sind dies die

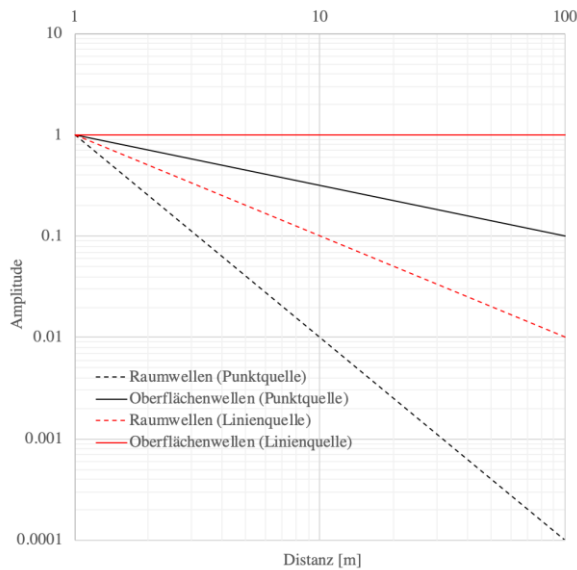
- Raumwellen und die
- Oberflächenwellen an der Grenze eines Mediums

Das Ausbreitungsverhalten bzw. die Abnahme von Schwingungen mit der Distanz kann im Wesentlichen durch folgenden Zusammenhang aus Gl. 1 beschrieben werden.

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n e^{\left(-\frac{2\pi f D}{c} (r - r_0) \right)} \quad (1)$$

Dabei besteht die Gl. 1 aus zwei Termen. Der erste Term beschreibt die Abnahme der Amplituden zufolge der geometrischen Dämpfung, der zweite Term jene zufolge der Materialdämpfung. Der Term der geometrischen Dämpfung ist lediglich vom Abstand und einem Exponent n abhängig. Er be-

schreibt die Abnahme der Energiedichte über die Distanz. Der Exponent n ist dabei Abhängig vom Wellentyp und der angenommenen Anregungscharakteristik (Punkt- oder Linienquelle) und kann Werte zwischen 0 und 2 annehmen (vgl. Abbildung 1).



Wellenart	Abminderung	
	Punktquelle	Linienquelle
Raumbwelle	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^1$
Oberflächenwelle	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{0,5}$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^0$

Abbildung 1: Wellen- und anregungstypabhängige Schwingungsausbreitung.

Die Abbildung 1 zeigt deutlich, dass das Ausbreitungsverhalten der einzelnen Wellentypen von der Anregungscharakteristik abhängig ist. Generell zeigt eine Linienquellencharakteristik für alle Wellentypen eine geringere geometrische Dämpfung - d.h. Abnahme der Energiedichte - als eine Punktquellencharakteristik. Dies ist auf die zylinderförmige Ausbreitungsfront der Linienquelle gegenüber der kugelförmigen bei einer Punktquelle zurückzuführen.

Der zweite Term der Gl. 1 stellt die frequenzabhängige Materialdämpfung dar. Wie aus der Gl. 1 ersichtlich steigt die Materialdämpfung mit zunehmender Frequenz an, was generell dazu führt dass tiefere Frequenzen bis in größerer Distanzen relevant sein können. In der Literatur^{4, 5, 6} können Materialdämpfungswerte von etwa 1-5%, abhängig vom Untergrund, gefunden werden.

Für praktische Anwendungen wird Gl. 1 zu

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \quad (2)$$

vereinfacht. Dies ist notwendig, da zahlreiche Randbedingungen wie z.B. genauer Schichtaufbau im gesamten Projektgebiet, Refraktions- bzw. Reflexionsverhalten im Untergrund nur schwer flächenmäßig erhoben werden können. Der Parameter $n(f)$ stellt dabei die frequenzabhängige Gesamtschwingungsdämpfung bestehend aus geometrischer und Materialdämpfung dar und wird empirisch, durch in-situ Messungen, ermittelt. Dabei werden Schwingungsmessungen z.B. entlang eines Profils von einer Quelle weg durchgeführt, und anhand von Regressionsrechnungen der Parameter $n(f)$ für einzelne Frequenzbänder (zumeist Terzbandbreite) bestimmt.

1.3. Messungen mit künstlicher Schwingungserregung

Wie bereits eingangs erwähnt werden für Kontrollmessungen im Bauzustand künstliche Schwingungsquellen herangezogen. Dabei kommen sowohl Kleinanregungen wie z.B. Hammerschlag oder Fallgewichte, wie auch, abhängig von der Aufgabenstellung, Schwingungserreger mit bis zu 280kN Anregungskraft (vgl. Abbildung 2) zur Anwendung.

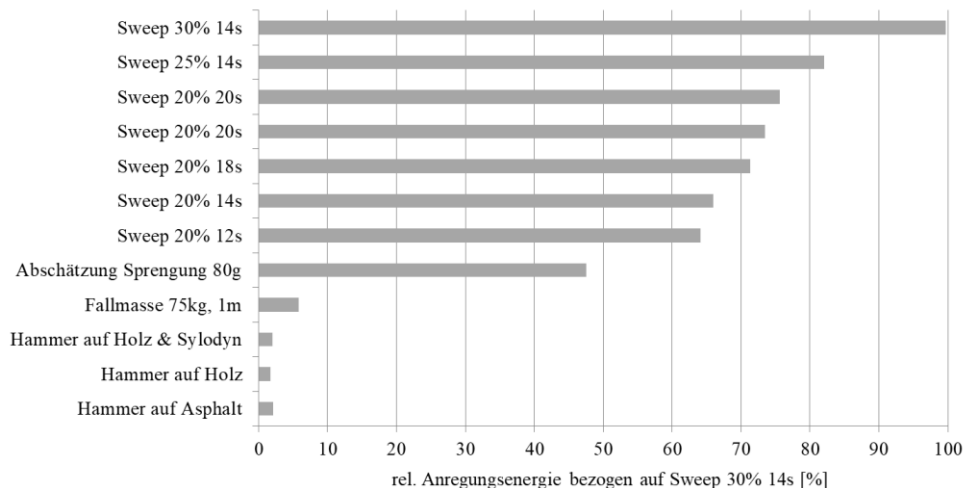


Abbildung 2: Vergleich der Energieeinleitung unterschiedlicher Anregungsmethoden ⁸.

Speziell für Anregungen entlang von Eisenbahnstrecken bzw. Eisenbahntunnel ist der Einsatz von Schwingungserregern mit großer Krafteinleitung wie z.B. den elektrohydraulischen Schwingerregger VibroScan[®] mit einer maximalen Kraft von 278kN (vgl. Abbildung 3), zu empfehlen ⁸ um bei allen Anrainern im Einflussbereich ausreichend Schwingungsenergie in den relevanten Frequenzbändern anzuregen. Hinsichtlich des Frequenzbereichs zeigen aktuelle Messungen, dass ein Frequenzbereich bis 200Hz und darüber durchaus abgedeckt werden muss, um die auftretenden Zugsemissionen an Neubau-Hochleistungsstrecken in Tunneln abzubilden.



Abbildung 3: VibroScan[®], Elektrohydraulischer Schwingungserregger Nomad 65.

Mit dem Schwingungserregger VibroScan[®] kann ein Frequenzbereich von 1 Hz-250 Hz abgedeckt werden, wobei die volle Krafteinleitung (278kN) im Frequenzbereich von 5.4Hz bis 250Hz abgerufen werden kann.

2. ANSATZ ZUR ERFASSUNG DER PUNKT- UND LINIENQUELLENTHEMATIK BEI KÜNSTLICHER SCHWINGUNGSERREGUNG

2.1. Grundsätzliche Überlegungen

Ausgangspunkt der Überlegungen sind jene Daten, welche im Rahmen der Messungen mit Schwingungsgeneratoren oder anderen künstlichen Quellen erhoben werden können. Bei Messungen dieser Art werden entlang eines Profils (zumeist einer Eisenbahntrasse) in vorwiegend regelmäßigen Abständen Anregungen durchgeführt. Dabei werden folgende Messungen direkt erhoben:

- Eingeleitete Kraft in den Untergrund

- Schwingungsantwort des Untergrunds bzw. einer Tunnelsohle
- Schwingungsantwort der Tunnelwand
- Schwingungsmissionen an und in relevanten Bauwerken im Nahbereich (zumeist Fundament und ein- oder mehrere Obergeschoße).

All diese oben angeführten Signale werden als Zeitverläufe am jeweiligen Aufstellort erhoben. Eine detaillierte Zeitsynchronität der Messungen im Bereich der Quelle und beim Empfänger (Gebäude) kann in der Regel auf Grund der fehlenden Synchronisationsmöglichkeiten (vor allem im Tunnel) nicht erreicht werden. Für die Messung von Laufzeiten einzelner Wellentypen wären Messungen mit einer Zeitsynchronität von <1 ms notwendig.

Weiters werden Emissionsspektren aussagekräftiger Zugüberfahrten an vergleichbaren Strecken erhoben. Dabei werden bei Tunnelstrecken in der Regel Messpunkte an der Tunnelwand bzw. an der Tunnelsohle (Randweg) und bei Freilandstrecken Messpunkte in 8m Distanz zur Gleisachse herangezogen. Wichtig ist jedoch grundsätzlich, dass für die Emissionsmessungen an einer Vergleichstrecke sowie für die Messungen mit künstlicher Schwingungserregung im Projektgebiet die gleichen Messpunkte herangezogen werden.

2.2. „Stand der Technik“ in der Immissionsprognose

Aus den Messungen mit künstlicher Schwingungserregung werden Transferspektren (zumeist mit Terzbandbreite) zwischen einem Punkt an der Trasse und einem entsprechend relevanten Punkt im Haus berechnet. Für die Prognose der Schwingungen werden die gemessenen Spektren aus vergleichbaren Zugsereignissen eingesetzt und mittels der zuvor ermittelten Transferspektren die Immissionen (spektral) im Gebäude ermittelt. Diese klassische Immissionsprognose kann z.B. bei ⁴ und ⁹, nachgelesen werden. In diesen Ansätzen wird implizit immer von Punktquellen ausgegangen und die Liniencharakteristik nicht berücksichtigt. Dem wird oft dadurch Rechnung getragen, dass Sicherheitsaufschläge auf das Prognoseergebnis gemacht werden. Dies kann zu systematischen Fehleinschätzungen bei der Prognose führen. In ³ ist angeführt, dass der Abstand bis welchen ein Zug als Linienquelle zu interpretieren ist mit

$$a = \frac{1}{\pi} T_l \quad (3)$$

abgeschätzt werden kann. Dabei ist T_l als die gesamte Länge des Zuges aufzufassen.

Daraus kann abgeleitet werden, dass bei einer üblichen Zuglänge von etwa 200m für Personenzüge eine Linienquellencharakteristik bis in eine Distanz von 63m berücksichtigt werden muss. Für Güterzüge, mit einer Länge bis zu 500m ist diese Distanz nochmal deutlich größer. Dies bedeutet, dass, da zumeist unterschiedliche Zugstypen auf einer Strecke verkehren, nahezu alle relevanten Gebäude dahingehend berücksichtigt werden müssen. Ein gemeinsamer Korrekturfaktor (Sicherheitsaufschlag) kann zu systematischen Fehleinschätzungen führen. Ziel muss es daher sein, einen entfernungs- und zugslängenabhängigen Korrekturfaktor zu finden.

2.3. Erweiterter Ansatz zur Berücksichtigung der Punkt- und Linienquellencharakteristik

Im Rahmen dieser Arbeit wird nun folgender erweiterter Ansatz vorgeschlagen und anhand einer Anwendung getestet:

- Annahme einer Achslastfunktion
- Ermittlung der Admittanz der einzelnen Tunnelabschnitte (Messung)
- Ermittlung der Ausbreitungsfunktionen vom Tunnel zu den Anrainergebäuden (Messung)
- Ermittlung der Immission jeder einzelnen Achse zufolge einer Zugüberfahrt
- Zeitrichtige Superposition der Immissionen der einzelnen Achsen und damit Berücksichtigung der Liniencharakteristik führt zur Immission im Anrainergebäude

Als dynamische Achslastfunktion wird in einer ersten Näherung eine Sinc-Funktion herangezogen. Diese wird gewählt, da die Sinc-Funktion bei entsprechender Transformation in den Frequenzbereich eine Rechteckfunktion darstellt. Entsprechend der Frequenzgrenzen der gewählten Funktion sind alle

Frequenzen innerhalb dieses Bereichs gleichermaßen im Signal vorhanden. Die Amplitudengewichtung der Sinc-Funktion für jede Achse erfolgt entsprechend der jeweiligen Achslast.

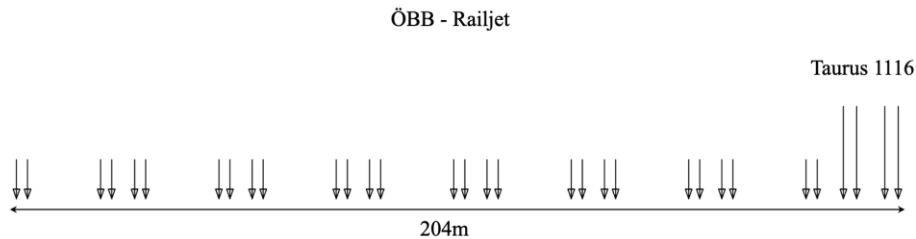


Abbildung 4: Lastbild ÖBB Railjet.

Aus den Messungen mit künstlicher Schwingungsanregung wird die Übertragungsfunktion jedes einzelnen untersuchten Querschnitts nach Gl. 4 ermittelt.

$$H(f) = \frac{v_I(f)}{v_E(f)} \quad (4)$$

Weiters wird aus den Messungen anhand der eingeleiteten Kraft und der Reaktion des Bauwerks (in der Regel Tunnelsohle) die Admittanz (vgl. Gl. 5) an den untersuchten Querschnitten ermittelt. Die Admittanz gibt an, welche Reaktion v_m (Schwinggeschwindigkeit m/s) ein Bauwerk auf eine gegebene Krafterregung F_m hat. Geringe Admittanzen bedeutet demgemäß, dass eine Krafterregung zu einer geringen Schwingungsreaktion v_m des Bauwerks führt.

$$A(f) = \frac{v_m(f)}{F_m(f)} \quad (5)$$

Der eigentliche Berechnungsvorgang besteht nun darin, den betroffenen Tunnelabschnitt in einzelne Segmente in Anlehnung an die Achsabstände aufzuteilen. Für jedes einzelne Segment wird die Kraftanregung im Tunnel angesetzt (Sinc-Funktion), mittels der Admittanzfunktion die daraus resultierende Schwinggeschwindigkeit im Tunnel (Sohle oder Tunnelwand) ermittelt und danach mittels der gemessenen Übertragungsfunktion die Immissionen im zu untersuchenden Objekt ermittelt.

$$v_i(t) = \text{ifft}(\text{fft}(\text{sinc}(t))H(f)A(f)) \quad (6)$$

Dies wird für jede Achsanregung i getrennt durchgeführt (vgl. Gl. 6). Entsprechend ihrem Abstand (vgl. Abbildung 5) und damit der zeitlichen Verschiebung zufolge der Überfahrtsgeschwindigkeit werden die Immissionen der einzelnen Achsen am Immissionsort zeitrichtig summiert.

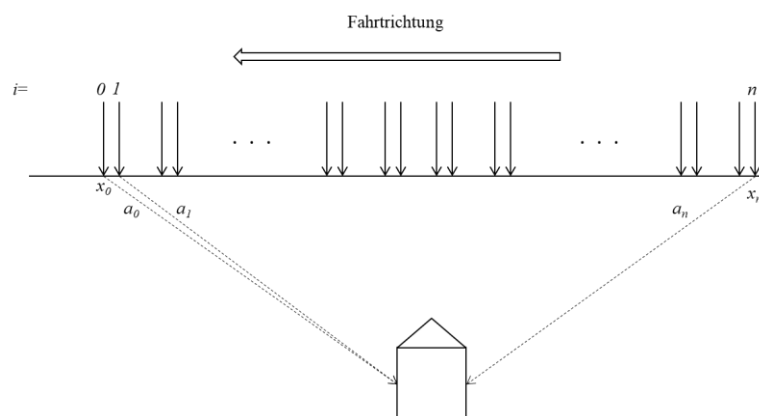


Abbildung 5: Schwingungstransfer von der Quelle zum Empfänger.

Die Phasenverschiebung bei der Summation ergibt sich aus der Fahrgeschwindigkeit sowie aus dem Abstand der einzelnen Achsen zueinander.

Die Berechnungen selbst erfolgen generell im Frequenzraum. Sowohl für die Admittanz als auch für die Übertragungsfunktion zum Gebäude werden entsprechende Näherungsfunktionen (zumeist Poly-

nome höheren Grades) ermittelt und im relevanten Frequenzbereich auf die Daten angewandt. Durch Rücktransformation in den Zeitbereich kann der Zeitverlauf der Zugsimulationen ermittelt werden.

Nachdem sowohl die Admittanzfunktion als auch die Übertragungsfunktion nur an diskreten Punkten im Tunnel (zumeist im Abstand von 25-50m) vorliegt, müssen die entsprechenden Funktionen zwischen den Messpunkten interpoliert werden. Das kann z.B. anhand von Verfahren wie in ² beschrieben durchgeführt werden.

3. ANWENDUNGSBEISPIEL KORALMBAHN: AUSBAU ABSCHNITT TUNNEL SREJACH

Im Rahmen der Untersuchungen zum Projekt Koralmbahn, Abschnitt Mittlern – Althofen wurde das oben angeführte Verfahren getestet. Im Detail handelt es sich um den Tunnel Srejach. Der Tunnel Srejach ist ein 620m langer Tunnel mit geringer Überlagerung/Überschüttung. Das Objekt, welches für den Test des Verfahrens herangezogen wurde, liegt 24m vom Tunnel entfernt (vgl. Abbildung 6).

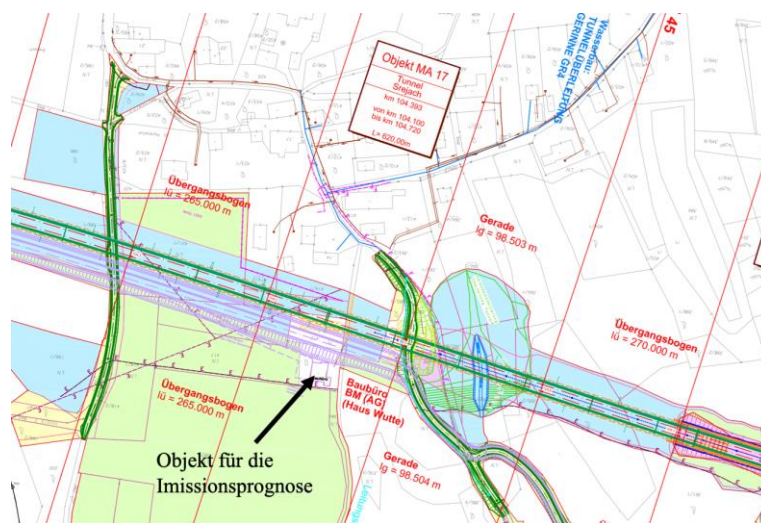


Abbildung 6: Übersichtslageplan Projektgebiet Tunnel Srejach.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Messungen im Tunnel (alle 50m) und im oben angeführten Objekt durchgeführt. Die Abbildung 7 zeigt dazu exemplarisch Ergebnisse der Admittanzmessung bzw. der Ausbreitungsmessungen vom Tunnel in das Gebäude.

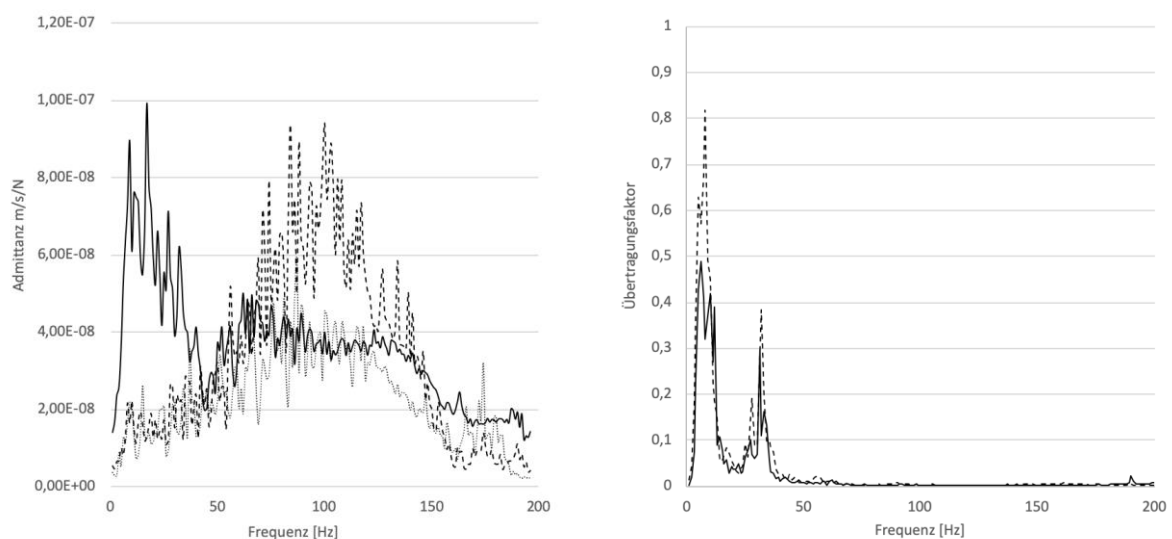


Abbildung 7: Exemplarische Messergebnisse im Projektgebiet.

Wie die Ergebnisse der Admittanzmessung zeigen, können die Admittanzen über die Länge eines Tunnelbauwerks durchaus erheblich schwanken. Dies kann z.B. auf die umliegende Geologie aber auch auf lokale Inhomogenitäten im Tunnelbauwerk zurückgeführt werden. Jedenfalls zeigt dies deutlich, dass die Admittanz einen wesentlichen Einfluss auf die Schwingungsprognose hat.

Für die Prognose wurde ein Bereich von 250m im Tunnel betrachtet. Als Zugsanregung wurde das Lastbild eines Railjets (vgl. Abbildung 4) mit einer Fahrgeschwindigkeit von 200km/h angesetzt. Nach Anwendung der Admittanzfunktion bzw. der Übertragungsfunktion zur Modellierung des Übertragungsverhaltens bis in das Gebäude kann nach Aufsummierung aller Achsenanregungen ein Geschwindigkeitszeitverlauf am Immissionspunkt ermittelt werden.

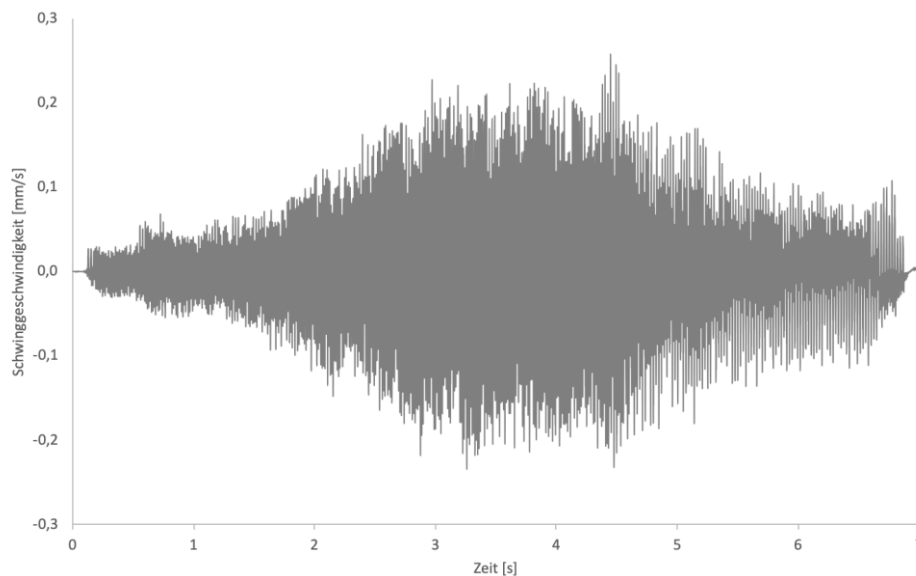


Abbildung 8: Ergebnis Immissionsprognose.

Aus dem so ermittelten synthetischen Zeitverlauf kann der Immissionspegel des sekundären Luftschalls entsprechend ONR 199005 ermittelt werden. Dieser ergibt 38,2dB. Zum Vergleich wurde eine Immissionsprognose entsprechend Abschnitt 2.2 durchgeführt. Diese ergibt einen Immissionspegel von 34,6dB für den gleichen Zugtyp. Die Prognose anhand der Methode basierend auf einer Punktquellenbetrachtung (Abschnitt 2.2) unterschätzt die Immissionen signifikant.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine Berücksichtigung der Punkt- und Linienquellenthematik bei der Anwendung künstlicher Schwingungserregungen für die Immissionsprognose nicht zu vernachlässigen ist. Die Ergebnisse zeigen, dass beim gegebenen Beispiel durchaus Unterschiede von etwa 3dB (ca. 40%) bei der Immissionsprognose auftreten können. Die Anwendung von Korrekturfaktoren kann ein vereinfachter Ansatz sein diese Abweichungen in der Modellbildung zu kompensieren. Es zeigt sich, dass konstante Faktoren in größerer Distanz zu einer Überschätzung und in geringerer Distanz zu einer Unterschätzung der Immissionen führen können. Hinzu kommt, dass die Unterschiede zwischen Punkt- und Linienquellenbetrachtung auch abhängig von der Geschwindigkeit bzw. den Zuglängen sind. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz vorgeschlagen, in dem die Liniencharakteristik eines überfahrenden Zuges in einfacher Weise in der Prognoseerstellung berücksichtigt werden kann.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht im Bereich der Untersuchung unterschiedlicher Zuglängen, Zugstypen, Fahrgeschwindigkeit und Abstand von Immissionspunkten. Mit einer detaillierten Studie dazu können wechselseitige Abhängigkeiten in Bezug dieser Parameter auf die Prognose ermittelt werden.

LITERATUR

- [1] Kim, D. & Lee, J., (2000), Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **19**, 115–126.
- [2] Ralbovsky, M. & Alten, K., (2013), Predicting vibration immission using Train Simulation : A combination of experimental and numerical solutions to assess railway-induced vibrations prior to construction. *Internoise 2013*, 1–10.
- [3] Gutowski, T. G. & Dym, C. L., (1976), Propagation of ground vibration: A review. *J. Sound Vib.* **49**, 179–193.
- [4] Flesch, R., (2014), Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen. *Vorlesung an der TU Graz*.
- [5] Kramer, H., (2006), *Angewandte Baudynamik - Grundlagen und Beispiele für Studium und Praxis*, Ernst & Sohn
- [6] Verruijt, A., (2010), *An Introduction to Soil Dynamics*, Springer Berlin Heidelberg
- [7] Studer, J. A. & Koller, M. G., (1996) *Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme*. Springer Berlin-Heidelberg
- [8] Billmaier, M., Österreicher, M. & Unterberger, W., (2018), Möglichkeiten und Grenzen künstlicher Schwingungserregung für die Erschütterungsprognose. in *21. Symposium, Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen*
- [9] Österreicher, M. & Hrunek, M., (2004), Die Bemessung der Unterschottermatten für die Hochtragwerke der Bauabschnitte U2 / 7 bis U2 / 10 Die Bemessung der Unterschottermatten für die Hochtragwerke der Bauabschnitte U2 / 7 bis U2 / 10 in *Wiener Eisenbahnkolloquium*.