



21. Symposium, Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen
ZC ZIEGLER CONSULTANTS AG
15.06.2018, Dübendorf, ZH

Möglichkeiten und Grenzen künstlicher Schwingungserregung für die Erschütterungsprognose

Dr. Maximilian Billmaier, ic-group, Wien, Österreich
Dr. Michael Österreicher, ic-group, Wien, Österreich
Dr. Wolfgang Unterberger, ic-group, Wien, Salzburg

ic group of companies office@ic-group.org www.ic-group.org

Abstract

Im Rahmen der Planung neuer Eisenbahnstrecken sind Erschütterungs- und Körperschallprognosen integrale Bestandteile der Begutachtung. Kernaufgabe dieser Prognosen ist das Ermitteln/Berechnen der Ausbreitungsbedingungen vom Gleiskörper bis zu den maßgebenden Anrainerobjekten, für welche die Prognosen erstellt werden. Dabei sind neben numerischen Berechnungen in-situ Messungen vor Ort notwendig, um die Gegebenheiten abzubilden. Die Palette der in-situ Anregung von Schwingungen reicht, abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung, von Hammerschlägen über Sprengversuche bis zu regulierbaren Anregungen mittels Groß-Schwingungserreger (wie z.B. VibroScan®). Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Schwingungsanregung verfügen jeweils über unterschiedliche Anregeenergien sowie auch Frequenzbereiche, in welchen Schwingungen angeregt werden können. Gerade für die Groß-Schwingungserreger, bei welchen die Steuerung der Anregung zumeist elektrohydraulisch erfolgt, können theoretisch beliebige Anregungsfunktionen in skalierbaren Energiebereichen realisiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein Vergleich der unterschiedlichen Anregungsmöglichkeiten durchgeführt. Der Fokus der Arbeit liegt auch auf der Untersuchung unterschiedlicher Anregungen (Sweep, Pulse und Random Noise) mit einem Groß-Schwingungserreger. Ziel der Arbeit ist es, die Einsatzgebiete sowie auch die Grenzen der unterschiedlichen Anregemethoden aufzuzeigen und Fehler in der Versuchsdurchführung aufzuzeigen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Methodikvergleich Erschütterungsprognosen.....	1
2.1.	Praxisbezug: Messungen auf Tunnelsohle einer Hochleistungsbahnstrecke	1
2.1.1.	Schlaghammer mit 5 kg Schlagmasse.....	2
2.1.2.	Nomand 65 Schwingungserreger, Verfahren Vibroscan	2
2.2.	Theoriebezug: Indikatoren zur Bewertung der Anregungsmethoden	3
2.2.1.	Indikator Signalqualität: Signal-Rausch-Verhältnis	3
2.2.2.	Indikator Krafteinleitung: Abschätzung Kraftstoß.....	3
2.2.3.	Indikator erzwungene Emissionen: Gesamtenergie gemessenen Emissionsspektren ...	4
3.	Verfahren zur Systemanregung für Erschütterungsprognosen	4
3.1.	Systemanregung mit Hammerschlägen	4
3.1.1.	Systemanregung mit einem Fallgewicht	5
3.1.2.	Emissionsspektren Hammerschlag Anregung, drei Varianten	5
3.1.3.	Abschätzung Emissionsspektren Fallgewicht aus Methode Hammerschlag.....	7
3.1.4.	Übertragungsfunktionen Hammerschlag Anregung, drei Varianten	7
3.2.	Systemanregung mit Sprengversuchen.....	9
3.3.	Systemanregung mit Schwingungserreger (VibroScan®)	9
3.3.1.	Emissionsspektren Schwingungserreger (VibroScan®)	10
3.3.2.	Übertragungsfunktionen Schwingungserreger (VibroScan®).....	12
4.	Vergleich Methoden Systemanregung für Erschütterungsprognosen.....	13
4.1.	Qualitativer Vergleich Übertragungsfunktionen der Anregungsmethoden	13
4.2.	Vergleich Indikator Signalqualität: Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)	14
4.3.	Vergleich Indikator Krafteinleitung: Schätzwert Kraftstoss	14
4.4.	Vergleich Indikator erzwungene Emissionen	14
5.	Zusammenfassung Erschütterungsprognosen	16
5.1.	Methode Hammerschlag.....	16
5.2.	Methode Schwingungserreger (Nomand 65: VibroScan®).....	16
5.3.	Methoden Sprengen und Fallmasse.....	16
6.	Literaturverzeichnis.....	17

1. EINLEITUNG

Der fortschreitende Ausbau der Verkehrsinfrastruktur führt in dicht bebauten Ballungsräumen vermehrt zu Betriebsbelastungen durch Erschütterungen und sekundärem Luftschall von Personen und Sachgegenständen. Insbesondere bewegte Lasten, wie fahrende Züge und Straßenverkehrsmittel als Emissionsquellen, verursachen durch den dynamisch wechselnden Kontakt von Objekt und Schiene bzw. Fahrbahn mechanische Schwingungen, welche in erster Linie über den Untergrund in naheliegende Gebäude übertragen werden. Dort werden diese Immissionen als Schwingungen (Erschütterungen) und/oder sekundärer Luftschall wahrgenommen. Zunehmende Betriebsdichten und zum Teil deutlich höhere Fahrgeschwindigkeiten auf der einen Seite, sowie die zunehmende Empfindlichkeit der Anrainer gegenüber Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen auf der anderen Seite, stellen die Anforderung, bereits im Vorfeld detaillierte Prognosen über das zu erwartende Immissionsniveau zu erstellen. Diese bilden die Grundlage um schwingungsreduzierende Maßnahmen im Bereich der Emission und Immission zu planen. Auf Grund der großen Anzahl an Einflussparametern in der Modellbildung von komplexen und großräumigen Ausbreitungsmodellen im Untergrund, kommen Erschütterungsprognosen auf Basis von Versuchen und realen Messungen in der Praxis hohe Bedeutung zu.

Emissionsspektren, dargestellt als Schnellepegel, werden benutzt um die Emissionen zu charakterisieren. Diese Methoden zur Prognoseerstellung basieren gängiger Weise auf Übertragungsfunktionen, mathematisch gesehen also Beziehungen zwischen einem Ein- und einem Ausgangssignal eines (linearen-zeitinvarianten) dynamischen Systems im Frequenzraum. Eine gemessene Übertragungsfunktion als Zusammenhang von Emission und Immission bildet das System, in Abhängig von der Messgenauigkeit, idealerweise eindeutig ab. Qualitätskriterien von gemessenen Übertragungsfunktionen sind die Begriffe Signal-Rausch-Verhältnis, Frequenzauflösung und obere und untere Grenzfrequenzen, Reproduzierbarkeit, zeitliche Dauer des Inputs, sowie auch im System theoretisch vorhandene Nicht-Linearitäten, die durch das lineare Systemabbild dargestellt werden sollen. Mit einer für das System repräsentativen gemessenen Übertragungsfunktion können Erschütterungsprognosen erstellt werden, deren Aussage hinsichtlich ihrer Belastbarkeit von möglichen Prognosen mit Rechenmodellen auf Grund der Vielzahl an Einflussparametern nur begrenzt zu ersetzen sind. Gängige Methoden zur künstlichen Signalerzeugung sind, geordnet nach deren Aufwand in der Leistungserbringung, etwa die Methoden Hammerschlag, mechanisch oder pneumatisch beschleunigte Fallgewichte, Sprengungen, regelbare elektrische- oder elektrohydraulische Schwingungserreger unterschiedlicher Größe und Ambiente Anregungen.

Hinsichtlich der Möglichkeiten belastbare und systemabbildende Übertragungsfunktionen zu messen, weisen die angeführten künstlichen Methoden zur Signalerzeugung differenziertere Vor- und Nachteile auf, die nachfolgend anhand von praktischen Beispielen aufgezeigt werden sollen.

2. METHODIKVERGLEICH ERSCHÜTTERUNGSPROGNOSEN

2.1. PRAXISBEZUG: MESSUNGEN AUF TUNNELSOHLE EINER HOCHLEISTUNGSBAHNSTRECKE

Um den Praxisbezug herzustellen, werden die in diesen Beitrag gezeigten Methoden der Systemanregung im Rahmen einer Erschütterungsprognose anhand eines exemplarischen Versuches gezeigt. Für eine Hochleistungsbahnstrecke werden abschnittsweise Tunnel in offener Bauweise im Nahbereich von bebauten Gebieten errichtet. Im Rohbau eines Tunnels in offener Bauweise werden auf der provisorischen Asphaltfahrbahn mit Unterbeton auf der Tunnelsohle Messungen mit einem Schlaghammer und dem VibroScan® durchgeführt. Die Messung der Emissionen und Immissionen zeigt das dynamische Verhalten, d.h. das Ausbreitverhalten der Erschütterungen im Tunnelbauwerk.

Fünf Geophone werden entlang der Tunnelachse installiert. Im Nahbereich des Anregungspunktes werden die erzeugten Emissionen auf der Asphaltfahrbahn (in weiterer Folge als Messpunkt P0 bezeichnet) gemessen. Die weiteren vier Geophone werden entsprechend ihrer Entfernungen in Metern entlang der Tunnelachse mit Messpunkten P16, P32, P64 und P100 bezeichnet, siehe auch Abbildung 1. Die in diesem Beitrag dargestellten Übertragungsfunktionen werden durch das Verhältnis von den Messpunkten P16-P100 zur Emissionsquelle P0 gebildet. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt anhand von Terz-Spektren der digitalisierten Schnellepegel.

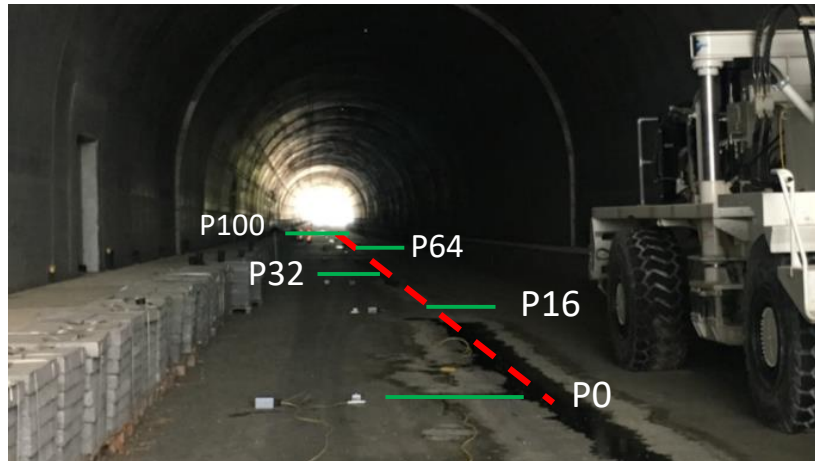


Abbildung 1 Messanordnung Längsachse Tunnel, Fünf Messpunkte P0-P100

Fünf Geophone des Typs MST-1031 der Firma Walesch und ein Datenlogger der Fa. Gantner vom Typ Q.Brixx werden eingesetzt. Die Abtastrate der aufgezeichneten Schwinggeschwindigkeiten wird auf 1000 Hz festgelegt, womit der für das Demonstrationsbeispiel ausreichende Frequenzbereich 4 bis 315 Hz abgedeckt wird. Die Dauer der Aufzeichnungen ist den Anregungstypen angepasst.

2.1.1. Schlaghammer mit 5 kg Schlagmasse

Bei dem im Rahmen des Versuchs eingesetzten Hammer handelt es sich um einen handelsüblichen Vorschlaghammer mit 5 kg Schlagmasse und einem Holzstiel mit 110 cm Länge. Um die möglichen Einflüsse unterschiedlicher Hammerkalotten aufzeigen zu können, werden im Rahmen des Versuchs die Hammerschläge in drei Varianten ausgeführt:

- Hammerschläge direkt auf den Asphalt,
- Hammerschläge auf Unterlagsplatten aus Holz und
- Hammerschläge auf kombinierten Unterlagsplatten aus Holz und Sylodyn.

Für jede Variante werden drei Hammerschläge ausgeführt und aufgezeichnet.

2.1.2. Nomad 65 Schwingungserreger, Verfahren Vibroscan

Der Nomad 65 Schwingungserreger ist ein zweiachsiger LKW der mit bis zu 25 km/h (sofern nicht dynamisch aktiv) bewegt werden kann (Dieselmotor). Die Außenabmessungen betragen rund 11 x 3,4 x 3,2 m (Länge x Breite x Höhe). Die Bruttomasse beläuft sich auf rund 32 t. Das Gerät wird in Europa vom Unternehmen Sercel in Frankreich vertrieben, siehe <http://www.sercel.com>.

Der Nomad 65 Schwingungserreger basiert auf der dynamischen Erregung einer Masse. Im Fall des Nomad 65 ist dies eine Masse von etwa 4 t. Um eine ausreichende Anbindung an den Untergrund herzustellen ist ein Überdrücken der dynamischen Masse erforderlich. Dazu wird mittels hydraulischen Stempeln eine Gesamtkraft (Druck durch Stempel und Eigengewicht von dynamischer Masse & Grundplatte) von 278 kN erzeugt. Die Anregung der dynamischen Masse erfolgt hydraulisch, wobei ein elektrisches Signal, erzeugt in der Steuerelektronik, im Torque Motor in ein hydraulisches umgewandelt wird. Ein Rückkopplungssystem erfasst die aktuelle Kraft mittels Beschleunigungs-

Aufnehmern und steuert das Ausgangssignal der Steuerelektronik in Echtzeit. Dies bietet den Vorteil, dass der Schwingungserreger auf unterschiedliche Untergrundsituationen reagieren bzw. die Kraft über den Anregungsfrequenzbereich konstant gehalten werden kann.

Das dynamische Kraftniveau des Nomad 65 wird bereits ab 5,4 Hz erreicht. Der technisch mögliche Arbeitsweg der hydraulischen Kolben ist auf ca. 10 cm begrenzt.



Abbildung 2 VibroScan®, Elektrohydraulischer Schwingungserreger Nomad 65

Linke Abbildung: Fahrer Schwingungserreger

Rechte Abbildung: Detailansicht dynamische Masse mit hydraulischen Zylindern

2.2. THEORIEBEZUG: INDIKATOREN ZUR BEWERTUNG DER ANREGUNGSMETHODEN

2.2.1. Indikator Signalqualität: Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis wird durch das Verhältnis der Summen der Spektralen Leistungsdichten zweier Signale (im konkreten Fall eine gemessene Zeitreihe mit und ohne Energieeinleitung in das System) über ein definiertes Frequenzband berechnet und zeigt wieviel Energie das erzwungene Signal im Vergleich zum Grundrauschen des Sensors aufweist.

Gleichung 1 Berechnung Signal-Rausch-Verhältnis

$$SNV = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{S_{XX}(f)}{S_{NN}(f)} [-]$$

Hier ist f_{min} die untere-, f_{max} die obere Grenzfrequenz im Frequenzband, $S_{XX}(f)$ und $S_{NN}(f)$ sind die Spektralen Leistungsdichten der Messung mit der künstlich in das System eingeleitete Energie und der Messung des Grundrauschens. Im dokumentierten Fall werden die Summen der Spektralen Leistungsdichten entsprechend der Länge der Signale im Zeitbereich gewichtet, da die in das System eingetragene Energie neben den Amplituden auch von der Dauer der Krafteinleitung abhängt.

2.2.2. Indikator Krafteinleitung: Abschätzung Kraftstoß

Der Kraftstoß wird als Indikator vereinfacht zum Vergleich der unterschiedlichen Anregungsmethoden herangezogen. Aus der Kraft auf einen Körper und deren Einwirkungsdauer ergibt sich eine Impulsänderung, die als Kraftstoß bezeichnet wird. Dabei wird die auf das System aufgebrauchte Kraft mit der (abgeschätzten) Zeitdauer multipliziert:

Gleichung 2 Kraftstoß um Gesamtenergie aus Anregung abzuschätzen

$$F_{\text{ges}} = F * \Delta t \text{ [kNs]}$$

Hier ist F die Kraft in der Einheit kN aus der Krafteinleitung als Absolutwert. Δt ist der Schätzwert für die Dauer der Krafteinleitung.

2.2.3. Indikator erzwungene Emissionen: Gesamtenergie gemessenen Emissionsspektren

Mit den gemessenen Emissionsspektren (Dimension Schnellepegel mit $v_{\text{ref}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) wird die in das System eingeleitete Energie durch Aufsummieren abgeschätzt.

3. VERFAHREN ZUR SYSTEMANREGUNG FÜR ERSCHÜTTERUNGSPROGNOSEN**3.1. SYSTEMANREGUNG MIT HAMMERSCHLÄGEN**

Die Methode Hammerschlag findet eine breite Anwendung im Rahmen von Erschütterungsprognosen. Mit einem Hammerschlag wird ein deterministisches Signal als gewünschte Kraftanregung erzeugt, welches durch einen Kraftaufnehmer theoretisch messbar wäre. In der Theorie zeichnet sich ein perfekter/idealer Einzelimpuls (unendliche Amplitude in unendlich kurzer Zeit) durch seine konstanten erzeugten Amplituden über das unendliche Frequenzspektrum aus, womit ein System idealerweise auf der unbegrenzten Bandbreite im Frequenzbereich angeregt werden würde. Ein idealer Impuls weist in der Theorie unendlich viel Energie auf. In der Praxis kann ein idealer Impuls nicht erzeugt werden, weshalb die Schlagkalotte relevanten Einfluss auf die Eigenschaften des Signals hat. Der Benutzer kann den Frequenzgehalt (Bandbreite) durch die Wahl der Schlagkalotte beeinflussen, da die zeitliche Dauer des Impulses davon abhängt.

Systemantworten (Emissionen) erzwungen mit sehr steifen Schlagkalotten (Stichwort Vorschlaghammer direkt auf den Asphalt) unterscheiden sich von den Antworten mit weiteren Schlagkalotten, siehe schematisch Abbildung 3. Bei ersteren ist die gemessene Zeitdauer des Schlagimpulses wesentlich kürzer, weshalb der gemessene Impuls eher einem mathematischen idealen Impuls entspricht. Es wird ein breiterer Frequenzbereich angeregt, da auch höhere Frequenzen von dem Einzelimpuls mit kurzer Stoßdauer im System angeregt werden.

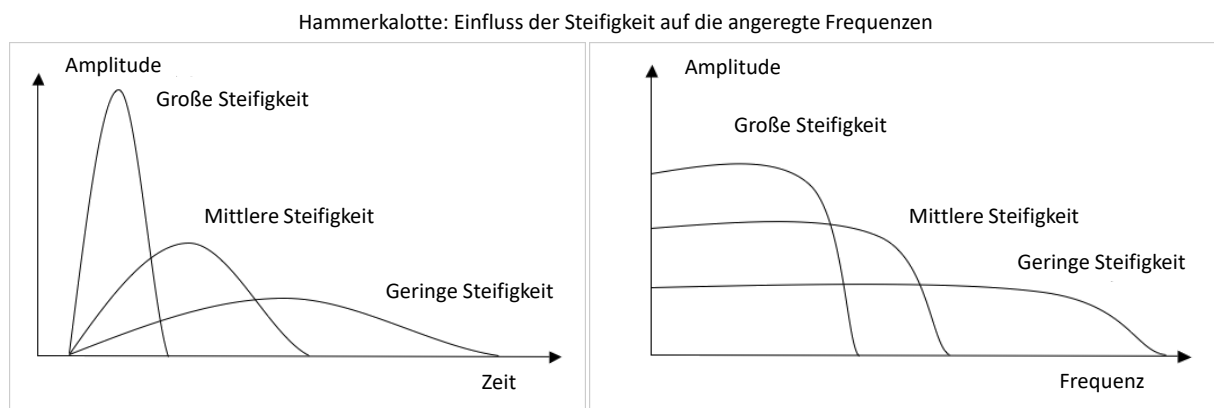


Abbildung 3 Schlagkalotten: Einfluss der Steifigkeiten auf die angeregten Frequenzen

Linke Abbildung: Zeitbereich

Rechte Abbildung: Frequenzbereich. Schematische Darstellung des Autors.

Die gesamte Energie aus dem Hammerschlag (abgeschätzt durch den Kraftstoß) berechnet sich demnach nur zufolge einer sehr kurzen Zeitdauer (Einwirkung der Kraft).

Gleichung 3 Abschätzung Kraft aus einem Hammerschlag

$$F = m \cdot (i \cdot g) \cdot h / \Delta s = 5 \cdot (2 \cdot 9,81) \cdot 2,5 / 0,002 \approx 120 \text{ [kN]}$$

Gleichung 4 Abschätzung resultierender Kraftstoß aus einem Hammerschlag

$$F_{\text{ges}} = F \cdot \Delta t = 120 \cdot 0,01 = 1,2 \text{ [kNs]}$$

Hier sind die Parameter m die Masse am Hammerkopf in der Einheit kg, der Parameter i ist der angenommene dimensionslose Faktor für die Beschleunigung des Hammerkopfes durch den Benutzer, h ist die (translatorisch angenommene) Höhendifferenz in der Einheit m, Δs die Verformung des Asphalts durch den Hammerschlag in der Einheit m und Δt die abgeschätzte Zeitdauer Hammerschlags in der Einheit s.

Messungen mit dem Hammerschlag haben generell ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis: Ein zeitlich sehr kurzer Hammerschlag im Vergleich zu einer verhältnismäßig längeren Datenaufzeichnung. Die Signalqualität (bzw. die Qualität der Emissionsspektren) kann durch das Mitteln einer größeren Anzahl an Hammerschlägen erhöht werden.

Der Nutzer kann die in das System eingeleitete Energie durch mögliche Zusatzmassen am Hammer und die Ausführungsstärke des Hammerschlages beeinflussen. Die Möglichkeit der Steuerung der Parameter ist allerdings begrenzt. Die Einfachheit und flexiblen Systemanregung mittels eines Hammerschlages unterliegt dem größten Nachteil, dem limitierten Energieeintrag.

3.1.1. Systemanregung mit einem Fallgewicht

Die Anregung mittels Fallgewichten/Fallmassen wird auf Grund der Ähnlichkeit zum Hammerschlag vereinfacht behandelt. Mit einem Fallgewicht ist eine größere Reproduzierbarkeit erreichbar (konstante Fallhöhen) und in das System kann durch die Versuchsanordnung höhere Energie (größere Massen und Fallhöhen) eingeleitet werden. Der mit einem Fallgewicht erzeugte Kraftstoß kann durch die Fallmasse größer sein als der Wert eines Hammerschlages.

Gleichung 5 Abschätzung Kraft aus einem Fallgewicht System DYNPACT®, www.baudynamik.de

$$F = m \cdot (i \cdot g) \cdot h / \Delta s = 75 \cdot (9,81) \cdot 1 / 0,002 \approx 370 \text{ [kN]}$$

Gleichung 6 Abschätzung resultierender Kraftstoß aus einem Fallgewicht

$$F_{\text{ges}} = F \cdot \Delta t = 370 \cdot 0,01 = 3,7 \text{ [kNs]}$$

3.1.2. Emissionsspektren Hammerschlag Anregung, drei Varianten

In der Abbildung 4 sind Terzspektren der Hammerschlag Schnellepegel für drei unterschiedliche Versuchsvarianten, vgl. Abschnitt 2.1.1, dargestellt. Die gemessenen Schnellepegel zeigen ab ca. 20 Hz im dB-Spektrum relativ konstante Amplituden. Das Grundrauschen liegt in der Abbildung ab etwa 8 Hz bis zur oberen Grenzfrequenz unter den erzwungenen Schwingungen.

In weiterer Folge sind in der Abbildung 5 die gemessenen Emissionen am Messpunkt P0 und die Immissionen an den Messpunkten P16 bis P100 als Schnellepegel dargestellt. Es zeigt sich, dass

- bereits beim Messpunkt P16, d.h. bei 16 m Abstand von der Emissionsquelle, unter 10 Hz keine belastbaren Immissionen gemessen werden konnten, und, dass
- die gemessenen Immissionen ab dem Messpunkt P32 nicht deutlich vom Grundrauschen unterschieden werden können.

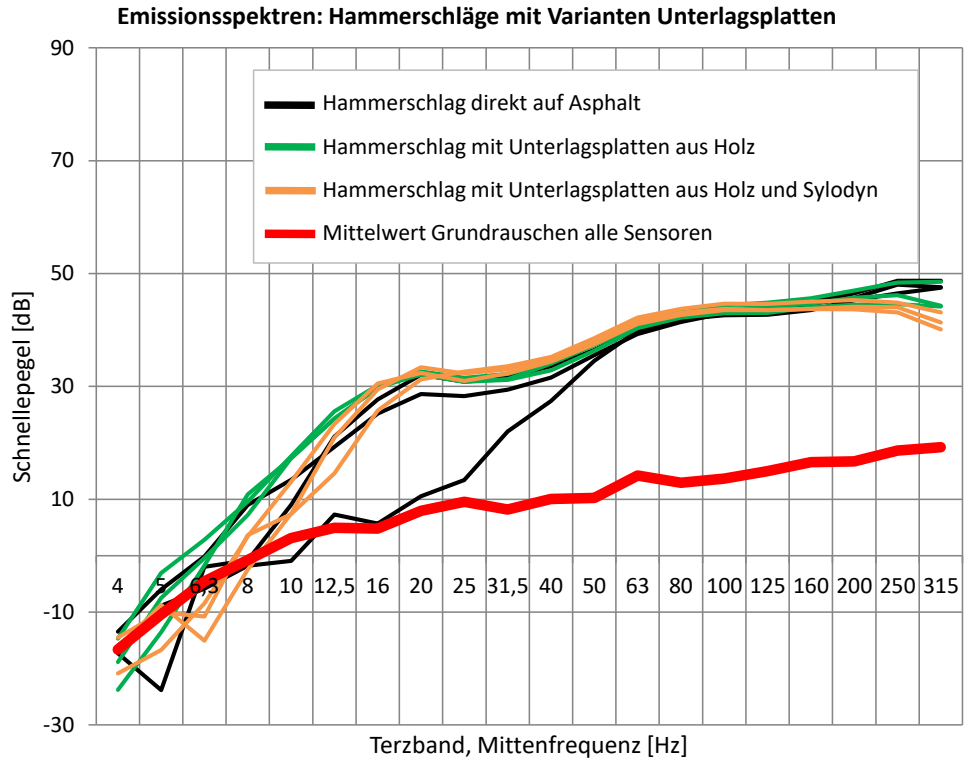


Abbildung 4 Emissionsspektren Schnellepegel: Hammerschlag Anregung, drei Varianten
Rote Linie: Grundrauschen

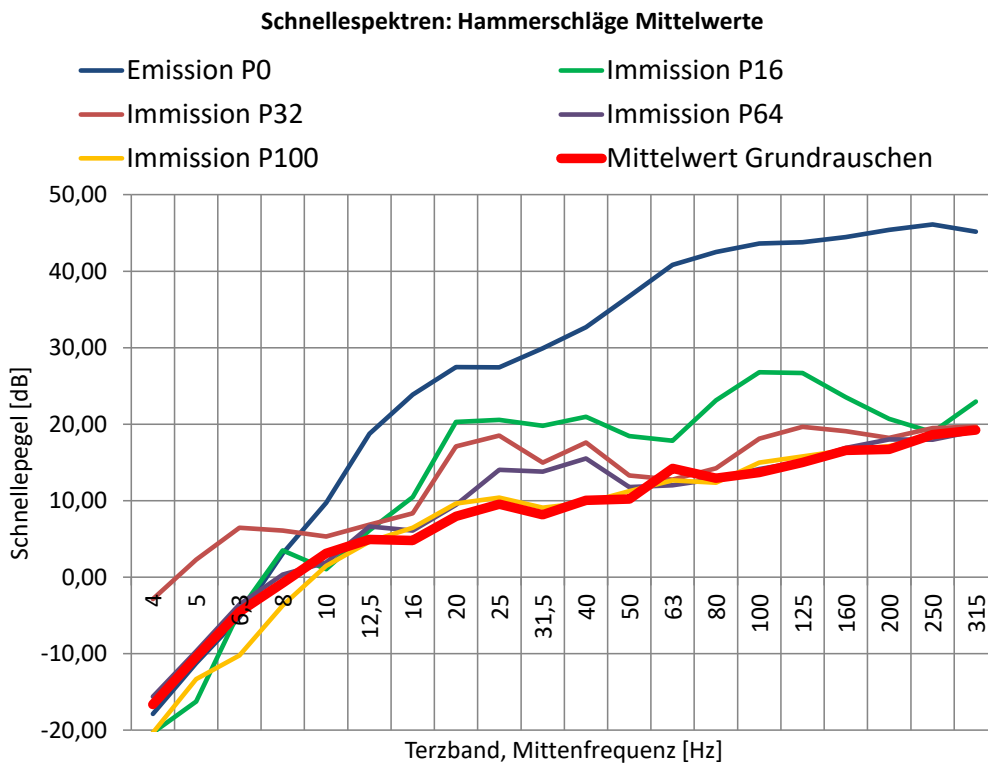


Abbildung 5 Immissionen Schnelle Spektren Mittelwerte Hammerschläge und Grundrauschen

3.1.3. Abschätzung Emissionsspektren Fallgewicht aus Methode Hammerschlag

Die im Abschnitt 3.1.1 abgeschätzte Anregung mit der Masse 75 kg und Fallhöhe 1 m wird aus den Emissionsspektren der Methode Hammerschlag abgeschätzt (lineares skalieren im Zeitbereich). In der Abbildung 7 sind die abgeschätzten Emissionsspektren der Schnellepegel dargestellt.

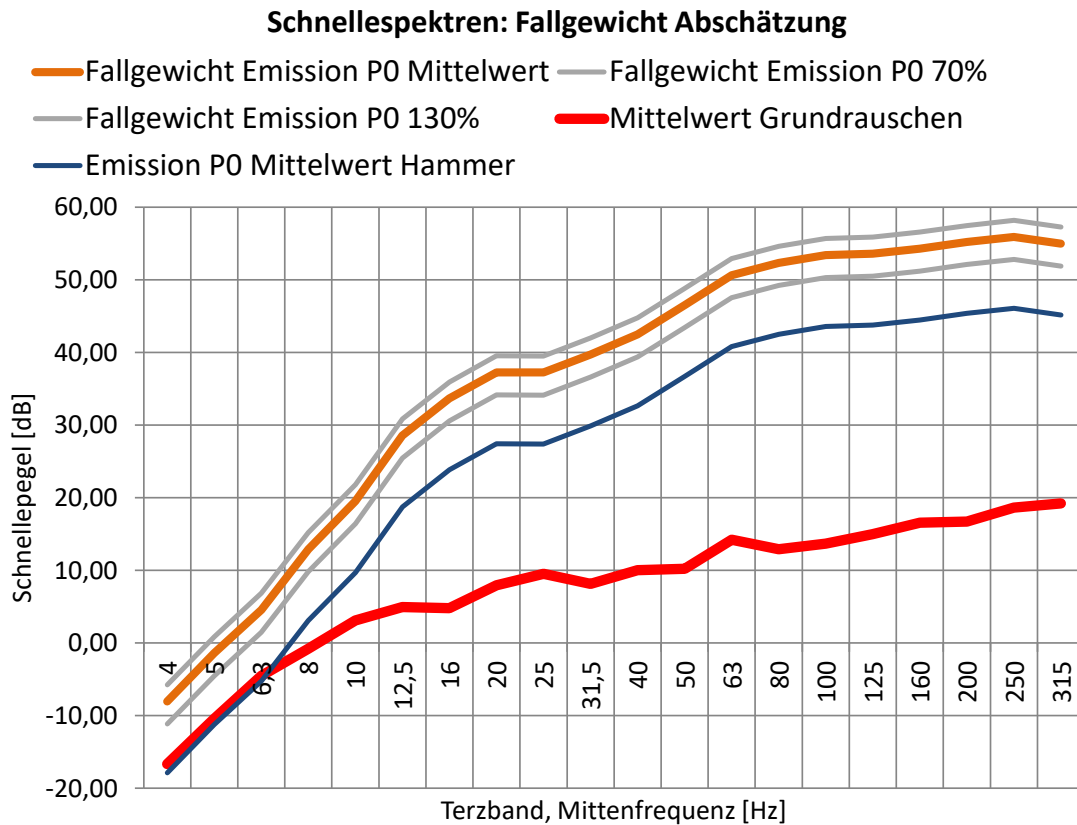


Abbildung 6 Abschätzung Emissionsspektren Schnellepegel: Anregung mit Fallgewicht

3.1.4. Übertragungsfunktionen Hammerschlag Anregung, drei Varianten

In der Abbildung 7 sind für jede der drei Methoden Hammerschlag und jede der vier Messpunkte P16 bis P100 (Immissionen) die Übertragungsfunktionen mit Bezug auf den Messpunkt P0 (Emissionen) dargestellt.

Anhand den Abbildung 4 und Abbildung 5 wird gezeigt, dass die gemessenen Immissionen sich nicht vom Grundrauschen der Sensoren abheben. Die Übertragungsfunktionen, Abbildung 7, unterscheiden sich für die unterschiedlichen Varianten Hammerschlag nur bedingt und sind ab dem Messpunkt P32 nicht zur Erstellung von belastbaren Prognosen geeignet.

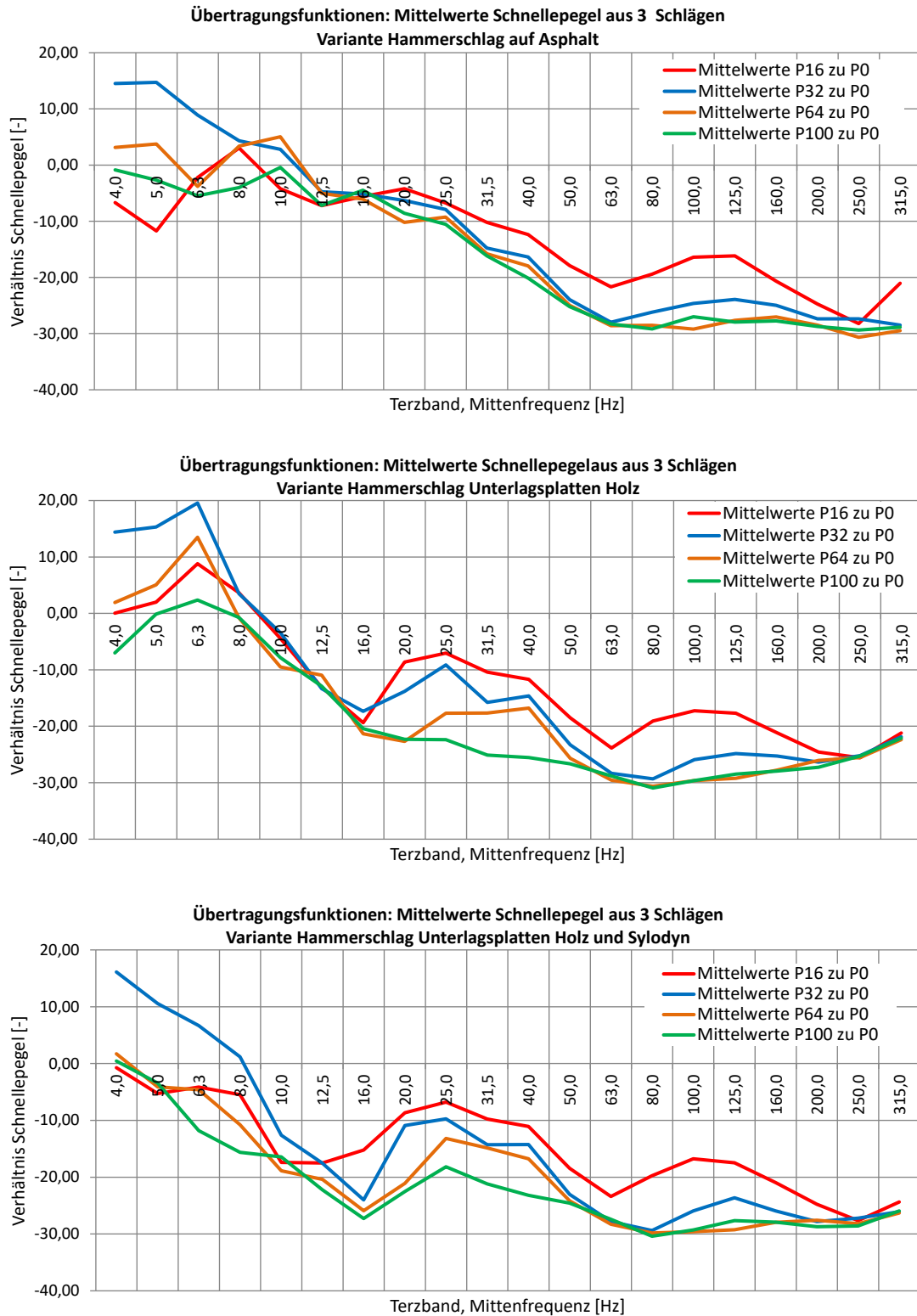


Abbildung 7 Übertragungsfunktionen Mittelwerte Schnellepegel Methode Hammerschlag
 Obere Abbildung: Variante Hammerschlag auf den Asphalt
 Mittlere Abbildung: Variante Hammerschlag mit Zwischenplatten aus Holz
 Untere Abbildung: Variante Hammerschlag mit Zwischenplatten aus Holz und Syldoyn

3.2. SYSTEMANREGUNG MIT SPRENGVERSUCHEN

Eine weitere Möglichkeit Schwingungen im Untergrund anzuregen ist es Sprengladungen zur Detonation zu bringen. Dabei werden, je nachdem welche Abstände Gegenstand der Untersuchung sind, Ladungen von 80 g bis wenige kg eingesetzt. Zum Einsatz kommen zumeist, auf Grund der einfachen und sicheren Handhabbarkeit gelatinöse Sprengstoffe (z.B. Austro Gel). Diese Sprengstoffe haben Detonationsgeschwindigkeiten von 5'000-6'000 m/s. Die Umsetzung, bei kleinen Ladesäulen, erfolgt daher in Bruchteilen von ms. Bei der Umsetzung des Sprengstoffes kommt es, sofern kein Materialauswurf erfolgt, im Nahbereich zu einer plastischen Verformung des umliegenden Gesteins und in weiterer Folge zu einer elastischen Verformung, welche sich als seismische Wellen durch den Untergrund ausbreitet. Der Anteil der Energie, welche in plastische bzw. elastische Verformung umgesetzt wird ist vom umliegenden Gestein bzw. der eingesetzten Sprengstoffmenge abhängig.

Da für den vorliegenden Beitrag keine Sprengversuche durchgeführt werden konnten, werden Aufzeichnungen aus vergleichbaren Messungen zur Gegenüberstellung verwendet. Auf Grund von dem ähnlichen impulsartigen Verhalten/Kraftanregung der künstlichen Emissionsquellen aus Hammerschlägen und Sprengungen, wird über erstere Methode auf die Emissionen der Sprengung zurück gerechnet. Es wird angenommen, dass die Emissionsspektren Schnellepegel bei 30 m (Messpunkt P30) bis auf die Skalierung durch die eingetragenen Energien ähnlich sind. Die Abbildung 8 zeigt das abgeschätzte Emissionsspektren in der Dimension Schnellepegel. In der Abbildung ist auch das Grundrauschen dargestellt.

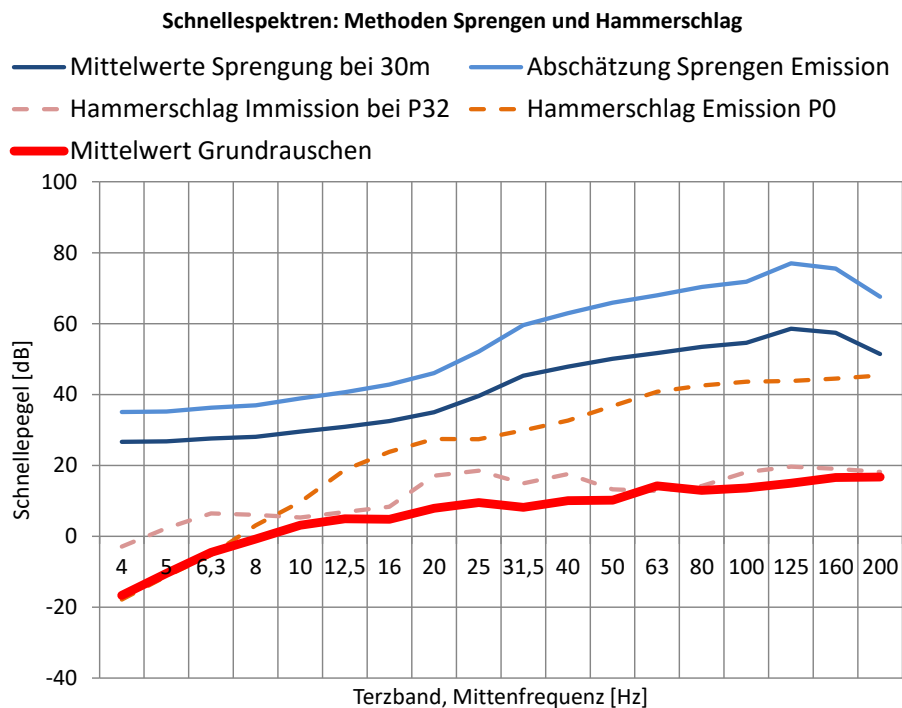


Abbildung 8 Abschätzung Emissionen Sprengversuch mit 80 g Ladung

3.3. SYSTEMANREGUNG MIT SCHWINGUNGSERREGER (VIBROSCAN®)

Schwingungserreger/Shaker werden benutzt um gezielt Energie in ein System einzuleiten und relevante Schwingungsformen anzuregen. Sie werden im Wesentlichen in drei Typen unterteilt:

- Mechanische Schwingungserreger sind Unwuchterreger mit rotierenden Massen. Verschiedene Frequenzen und Amplituden können durch Variation von Rotationsgeschwindigkeit und Masse der Unwucht erzeugt werden. Die Anregung erfolgt in Form von harmonischen Schwingungen und/oder Sweeps. Die rotierenden Massen müssen ggfs. je Frequenzbereich angepasst werden.

- Elektromagnetische Schwingungserreger funktionieren durch ein elektrisch aufgebautes Magnetfeld, in dem sich eine bekannte Masse bewegt und direkt auf das Versuchsobjekt einwirkt. Die Kraftmessung kann direkt erfolgen.
- Elektrohydraulische Schwingungserreger basieren auf der Funktionsweise der Hydraulik. Kräfte werden auf die dynamische Masse des Schwingungserregers durch hydraulische Flüssigkeiten übertragen. Es sind größere Amplituden möglich, da längere Wege erzeugt werden können. Mitunter ermöglichen Elektrohydraulische Schwingungserreger statische Kräfte zu erzeugen. In Abhängigkeit der dynamisch wirksamen Massen können theoretisch beliebige Signale generiert werden. Die Kraftmessung kann direkt erfolgen.

Generell sind die maßgebenden Faktoren für die Kraftamplituden über das relevante Frequenzband eines Schwingungs-Erregers der mechanische Arbeitsweg der dynamisch wirksamen Masse, der hydraulische Durchfluss und/oder die elektrische Leistung. Diese Grenzen wirken sich insbesondere im tieffrequenten Bereich aus.

Obwohl Elektromagnetische und Elektrohydraulische Schwingungserreger das Erzeugen von randomisierten Signalen zulassen, werden in der Praxis generell Sweep-Anregungen bevorzugt. In dieser Methode durchläuft die Kraftanregung ein definiertes Frequenzband mit harmonischen Sinus-Schwingungen. Neben der guten Kontrollierbarkeit zeichnen sich Sweep-Anregungen durch das sehr hohe Signal-Rausch-Verhältnis aus.

Sweep-Anregungen mit besonders kurzer Gesamtdauer werden als „Chirp“ Anregungen bezeichnet. Das Frequenzband wird in einer relativ kurzen Zeitdauer durchfahren. Dies kann in der Praxis zu „unreinen“ Sweeps führen, da die elektrohydraulische Anregung und deren Feedbackschleife bei hohen Sweep-Raten (Frequenzänderungen pro Zeiteinheit) keine reinen Sinussignale mehr erzeugen können. Größere Zeitdauern der Sweeps können zu Problemen/Erhitzen der Hydraulik führen, weshalb in der Regel Sweeps von 10-30 s verwendet werden.

Im vorliegenden Beitrag wird im Rahmen des Großversuches mit dem Elektrohydraulischen Schwingungserreger Nomad 65, Methode VibroScan[®], gearbeitet, siehe dazu Abschnitt 2.1.2.

3.3.1. Emissionsspektren Schwingungserreger (VibroScan[®])

Die Emissionsspektren werden mit Sweeps von 5 bis 200 Hz ermittelt. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche aufzeigen zu können, werden unterschiedliche Sweep-Dauern (12, 14 und 18 s) in den unabhängigen Versuchen definiert. Jeder Sweep wird dreimal ausgeführt. Das Kraftniveau wird in den Versuchen zwischen 20, 25 und 30 % der Maximalkraft des Nomad 65 variiert.

In der Abbildung 9 sind die Emissionsspektren für drei Sweep-Einstellungen dargestellt:

- Sweep von 5 bis 200 Hz, 14 s Dauer und 30 % der Leistung
- Sweep von 5 bis 200 Hz, 14 s Dauer und 20 % der Leistung
- Sweep von 5 bis 200 Hz, 18 s Dauer und 20 % der Leistung

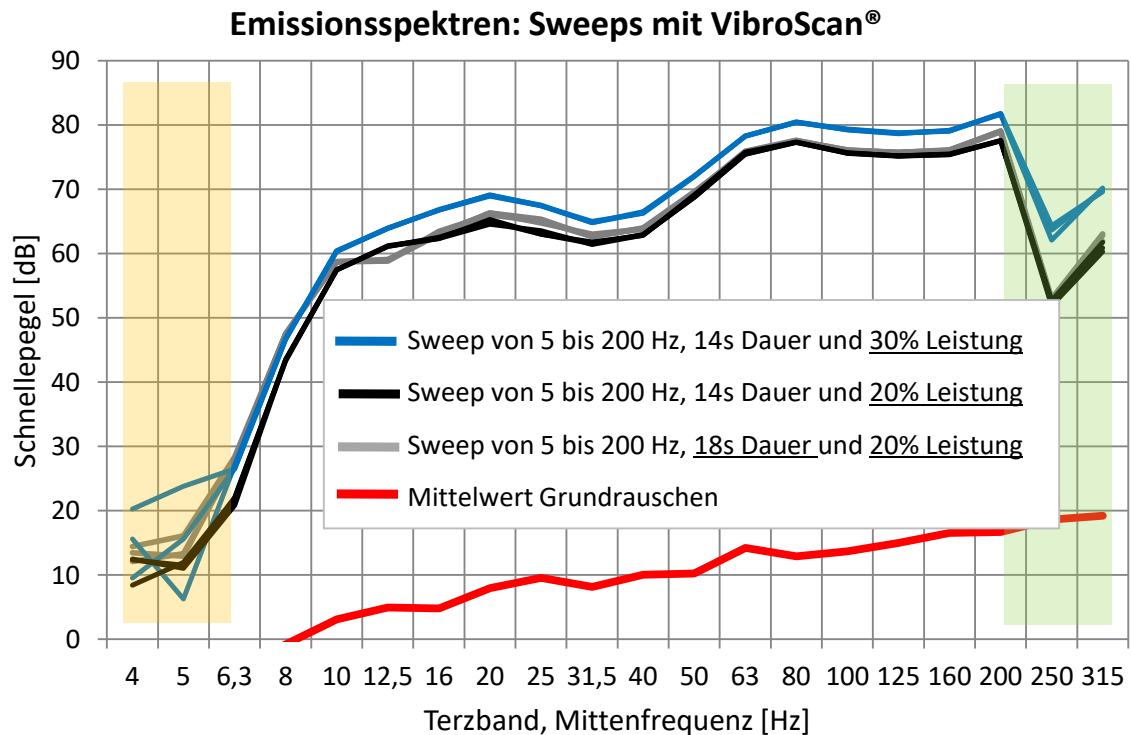


Abbildung 9 Emissionsspektren Schnellepegel VibroScan®, Sweep mit 25 & 30 % Leistung, Dauer 14 s
Jedem Sweep-Versuch liegen drei Durchläufe zugrunde, die Bereiche Anstarten und Abschalten des Sweeps sind farblich hinterlegt.

Je drei Sweeps liegen im Diagramm optisch auf einer Linie. Deutlich erkennbar ist, dass der Sweep mit 30 % der Leistung des Schwingungserregers über dem Emissionen der beiden weiteren Sweeps liegt. Die Dauer der Sweeps (14 und 18 s) hat auf die Qualität der Signale keinen signifikanten Einfluss. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist in der qualitativen Bewertung als sehr hoch zu bezeichnen. Deutlich ersichtlich sind die tieferen- und höheren Grenzfrequenzen des Sweeps. Näherungsweise können anhand der Darstellung in der Abbildung 9 die gewünschten Bereiche der konstanten Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bewertet werden.

In der Abbildung 9 sind drei Frequenzbereiche des Sweep-Vorgangs im Emissionsspektrum zu erkennen:

- Im gelb hinterlegten Bereich werden die frequenzabhängigen Kräfte an- bzw. hochgefahren, es zeigt sich eine große Variabilität in den Signalen.
- Im mittleren Bereich, dem Verweilbereich zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz des Sweeps, wird wie vorgegeben Energie in das System eingetragen.
- Im grün hinterlegten Frequenzbereich wird die Sweep-Leistung heruntergefahren (Abschalten), weshalb es zu einem Einbruch der Schnellepegel kommt. Die Variabilität im Emissionsspektrum ist in höheren Frequenzbereichen (bezogen auf die obere Grenzfrequenz) nicht weiter dargestellt.

Die gesamte Energie aus dem Versuch mit dem Schwingungserreger berechnet sich mit der Dauer des Sweeps. Der Kraftstoß wird als Indikator vereinfacht berechnet, siehe Abschnitt 3:

Gleichung 7 Abschätzung Kraftstoß eines Sweep-Versuchs mit 20 % Leistung und 14 s Dauer

$$F_{ges} = 285\text{kN} * 20\% * 14\text{ s} \approx 800\text{ kNs}$$

Hier wird die Kraft mit 285 kN als Maximalkraft des Schwingungserregers angesetzt und auf 20 % Leistung im Sweep abgemindert. Die Dauer von 14 s fließt in die Berechnung ein.

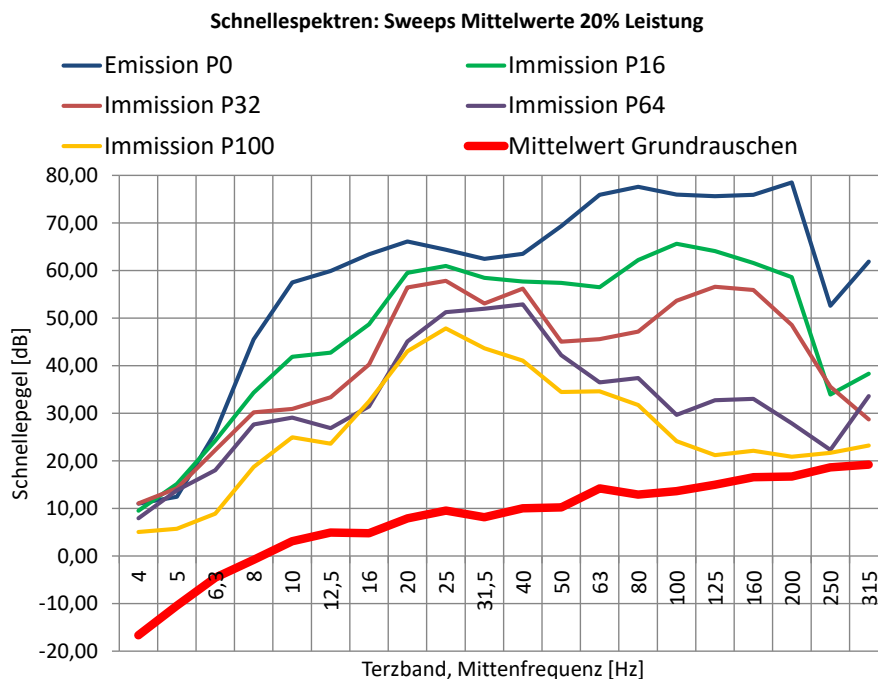


Abbildung 10 Schnelle Spektren: Mittelwerte Sweep-Versuche im Vergleich zum Grundrauschen

Die Abbildung 10 zeigt deutlich, dass selbst für den Messpunkt P100, über den gesamten angeregten Frequenzbereich, noch ausreichend Energie im gemessenen Antwortsignal gegeben ist.

3.3.2. Übertragungsfunktionen Schwingungserreger (VibroScan®)

In der Abbildung 11 sind Übertragungsfunktion der Sweep-Versuch dargestellt. Darin werden auch die Anregungen mit 20 % und 30 % der maximalen Leistung des Schwingungserregers verglichen. Die sehr hohe Reproduzierbarkeit der Übertragungsfunktionen bis zum Messpunkt P100 (100 m Entfernung vom Emissionspunkt) belegt die hohe Qualität der Sweep-Versuche mit dem Nomad 65.

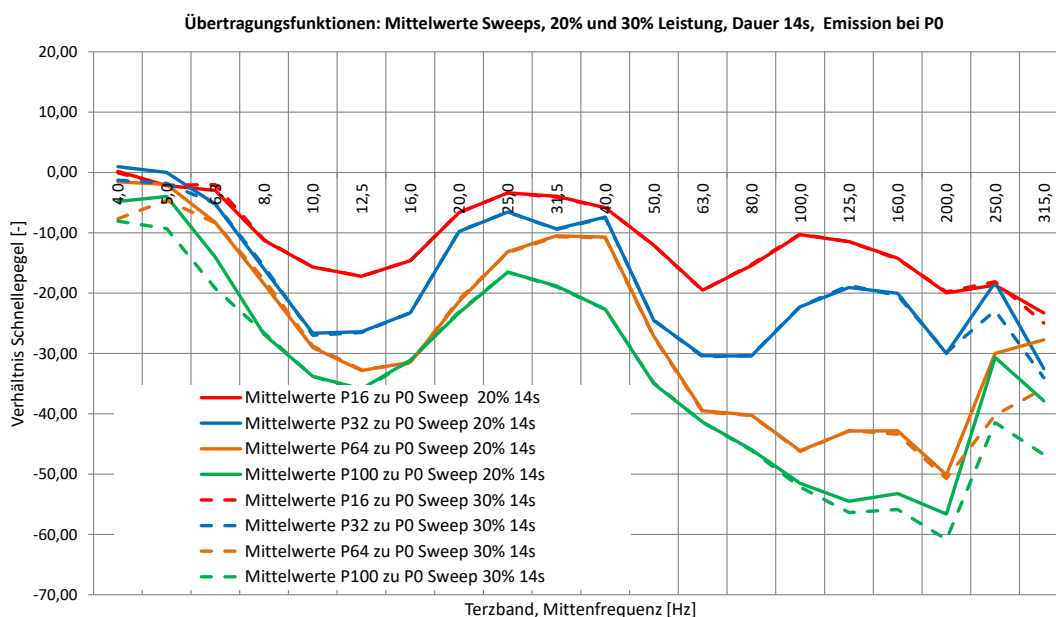


Abbildung 11 Übertragungsfunktionen Mittelwerte Schnellepegel VibroScan®, Dauer 14 s

Durchgezogene Linien: Sweeps mit 20 % Leistung

Strichlierte Linien: Sweeps mit 30 % Leistung

4. VERGLEICH METHODEN SYSTEMANREGUNG FÜR ERSCHÜTTERUNGSPROGNOSEN

4.1. QUALITATIVER VERGLEICH ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN DER ANREGUNGSMETHODEN

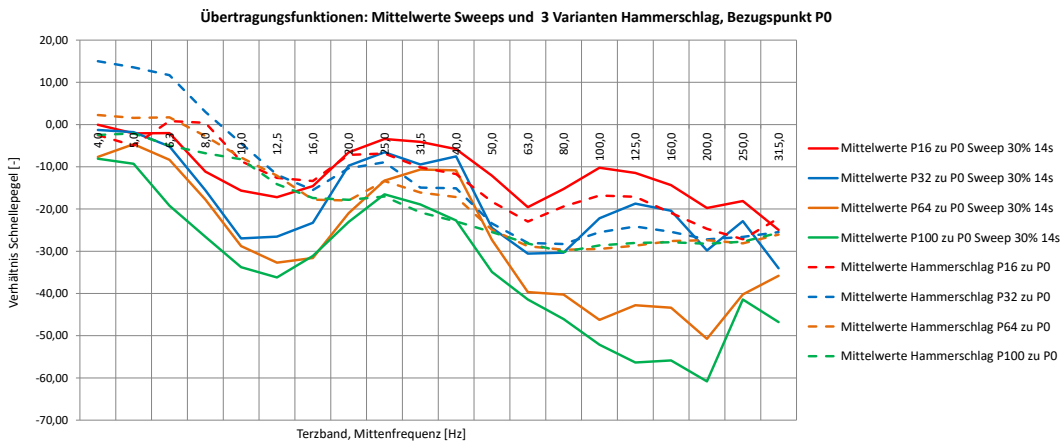


Abbildung 12 Übertragungsfunktionen Sweep- und Hammerschlaganregungen

Durchgezogene Linien: Sweeps mit 20 % Leistung

Strichlierte Linien: Mittelwerte aus den drei Varianten Anregung mit Hammerschlag

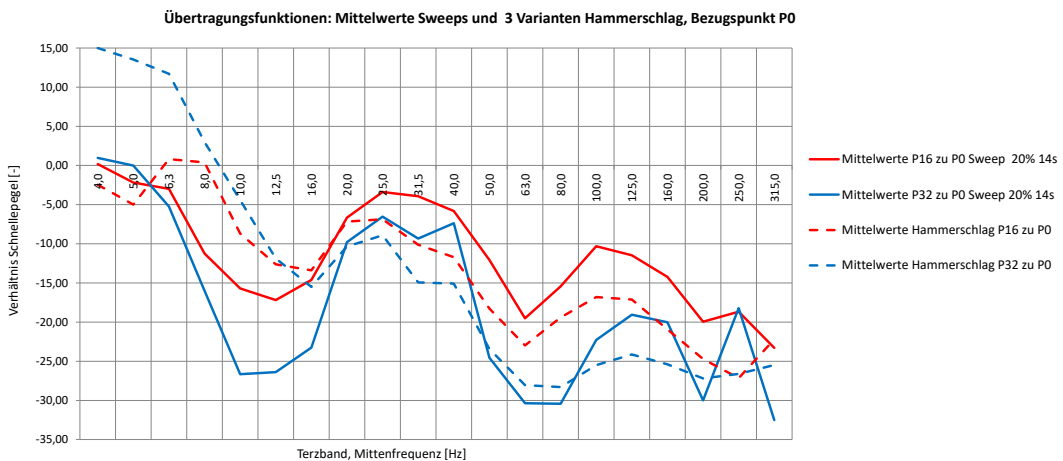


Abbildung 13 Übertragungsfunktionen Sweep- und Hammerschlaganregungen

Messpunkte im Nahbereich: P16 und P32

Durchgezogene Linien: Sweeps mit 30 % Leistung

Strichlierte Linien: Mittelwerte aus den drei Varianten Anregung mit Hammerschlag

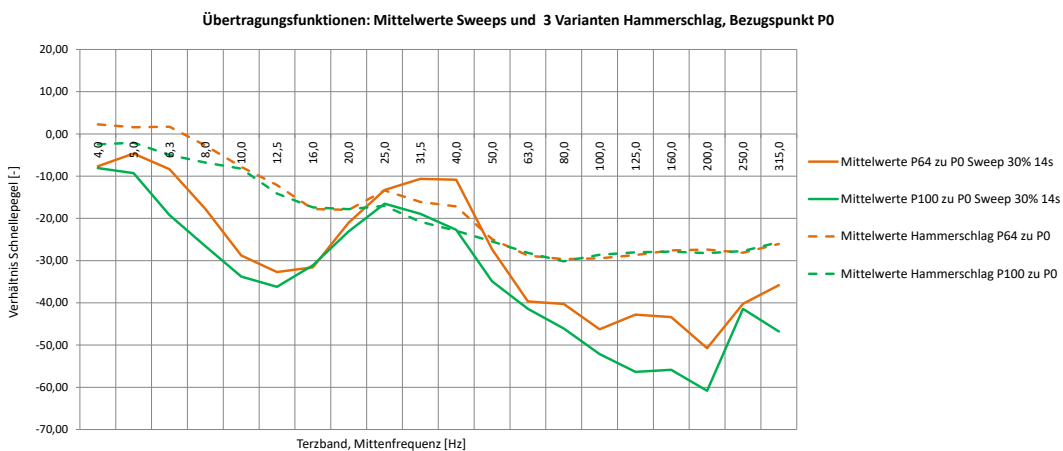


Abbildung 14 Übertragungsfunktionen Sweep- und Hammerschlaganregungen

Messpunkte im entfernen Bereich: P64 und P100

Durchgezogene Linien: Sweeps mit 30 % Leistung

Strichlierte Linien: Mittelwerte aus den drei Varianten Anregung mit Hammerschlag

4.2. VERGLEICH INDIKATOR SIGNALQUALITÄT: SIGNAL-RAUSCH-VERHÄLTNIS (SNR)

Die Signal-Rausch-Verhältnisse werden für die gemessenen Zeitreihen der Versuche Hammerschlag und Sweep an den Messpunkten P16 und P100 ausgewertet. Die SNR werden entsprechend den Zeitlängen der Methoden gewichtet (Sweep: 3x 14 s Dauer, Hammerschlag: 3x 1 s Dauer). Als Sweep-Anregung werden die drei Sweep-Durchläufe mit 20 % Leistung des Schwingerregers berücksichtigt.

- Das Signal-Rausch-Verhältnis am Messpunkt P16 zeigt, dass der Indikator SNR für die Anregung Schwingerregger ca. 20x besser zu bewerten ist als für die Anregung Hammerschlag.
- Das Signal-Rausch-Verhältnis am Messpunkt P100 zeigt, dass der Indikator SNR für die Anregung Schwingerregger ca. 2,5x besser zu bewerten ist als für die Anregung Hammerschlag.
- Beim Messpunkt P100 hat das gemessene Signal aus dem Hammerschlag ein Signal-Rausch-Verhältnis $SNR \approx 1$: Es wird das Grundrauschen gemessen.
- Die Amplituden der Anregung können für den Schwingungserreger mit dem Faktor 5 gesteigert werden, womit eine wesentliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden könnte.

In der Abbildung 15 sind die Zeitverläufe von einem Hammerschlag und einem Sweep-Versuch der Messpunkte P16 und P100 dargestellt.

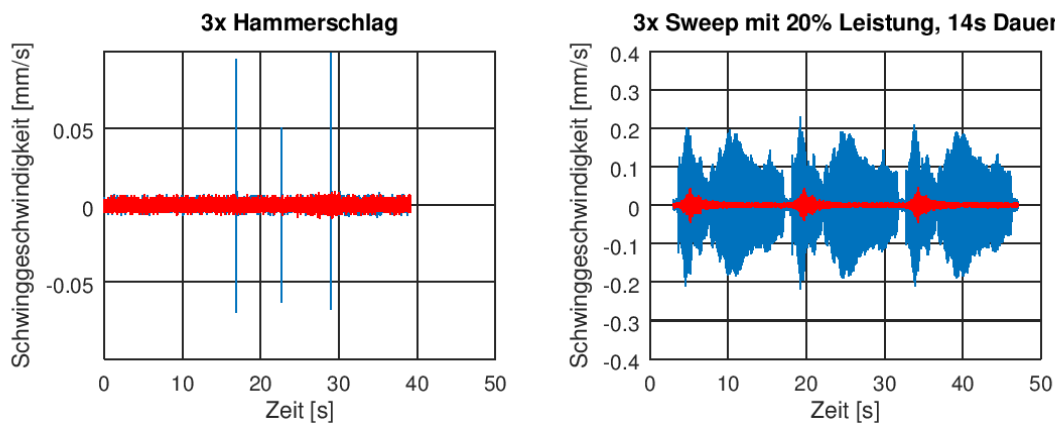


Abbildung 15 Schwinggeschwindigkeiten 3x Hammerschlag und 3x Sweep 20 %, 14 s, P16 und P100

Blaue Linie: Gemessene Schwinggeschwindigkeiten P16

Rote Linie: Gemessene Schwinggeschwindigkeiten P100

4.3. VERGLEICH INDIKATOR KRAFTEINLEITUNG: SCHÄTZWERT KRAFTSTOSS

Der Vergleich der Schätzwerte des Indikators Kraftstoß zeigt, dass durch die Systemanregung mit dem Nomad 65 wesentlich mehr Energie in das System eingeleitet wird als durch einen Hammerschlag. Es gilt zu berücksichtigen, dass der Sweep-Versuch mit 14 s gesamter Zeitdauer bewertet wird.

$$F_{\text{ges,Hammer}} = F \cdot \Delta t = 120 \cdot 0,01 = 1,2 \text{ kNs}$$

$$F_{\text{ges,Sweep}} = 285 \text{ kN} \cdot 20 \% \cdot 14 \text{ s} \approx 800 \text{ kNs}$$

4.4. VERGLEICH INDIKATOR ERZWUNGENE EMISSIONEN

In der Tabelle 1 und Abbildung 16 sind die über den relevanten Frequenzbereich summierten Energien aus den Emissionsspektren im Messpunkt P0 erfasst. In der Tabelle sind in den Zeilen 4-6 die unabhängigen Versuche ausgewertet. Die Energiewerte sind in Prozent von dem größten Wert angegeben. Der größte Wert wurde im Versuch 3 mit der Sweep-Anregung (30 % der Leistung des Nomad 65 und 14 s Dauer) ausgewertet.

- Die Hammerschläge generieren nur rund 2 % der Energie des Referenz-Versuchs.

- _ Der abgeschätzte Energieeintrag Fallmasse liegt bei ca. 6 % der Energie des Referenz-Versuchs.
- _ Der abgeschätzte Energieeintrag Sprengung liegt bei ca. 48 % der Energie des Referenz-Versuchs.
- _ Die Reproduzierbarkeit der Resultate (Zeilen 7 und 8) der Sweep-Versuche mit dem Nomad 65 werden insbesondere anhand der geringen Variationskoeffizienten in Prozent ersichtlich. Hier werden die drei Versuche je Methodik miteinander verglichen.
 - o Die Variationskoeffizienten der Sweep-Versuche liegen unter 1 %.
 - o Die Variationskoeffizienten der Hammerschläge liegen bei bis zu 15 %.
 - o Die Variationskoeffizienten für die abgeschätzten Methoden Fallgewicht und Sprengung werden nicht berechnet.
- _ Die Resultate sind hinsichtlich der relativen Verhältnisse der Anregungslevels, speziell im Fall der Sweep-Anregungen (20 % und 14 s, sowie 30 % und 14 s), für die Prognoseerstellung von hoher Qualität.

Tabelle 1 Vergleich Energie Anregungsmethoden in Prozent, aus den Emissionsspektren im Messpunkt P0

Vergleich Energie in Emissionsspektren: Energie linear berechnet, bezogen auf Versuch mit der größten generierten Energie												
	Hammerschlag			Fallmasse Abschätzung	Sprengung Abschätzung	Schwingungserreger: Sweep-Anregung						
	auf Asphalt	mit Holz	Holz & Sylodyn	Fallmasse Abschätzung	Sprengung Abschätzung	20% 12s	20% 14s	20% 18s	20% 20s	20% 20s	25% 14s	30% 14s
Versuch 1	2,2	1,7	1,9	5,8	47,5	65,3	66,1	71,2	73,2	75,2	81,5	99,5
Versuch 2	2,2	1,9	2,3	Nicht berechnet, da Schätzwerte		63,6	65,7	71,3	73,4	75,8	82,2	99,7
Versuch 3	1,9	1,7	1,7			63,4	65,9	71,4	73,8	75,8	82,6	100,0
Mittelwert	2,1	1,8	2,0			64,1	65,9	71,3	73,5	75,6	82,1	99,7
Variations-Koeff. in %	7,2	8,0	15,1			1,7	0,3	0,1	0,4	0,5	0,7	0,3

Die Abbildung 16 verdeutlicht die hohen Energiegehalte der Versuche mit den Sweep-Anregungen.

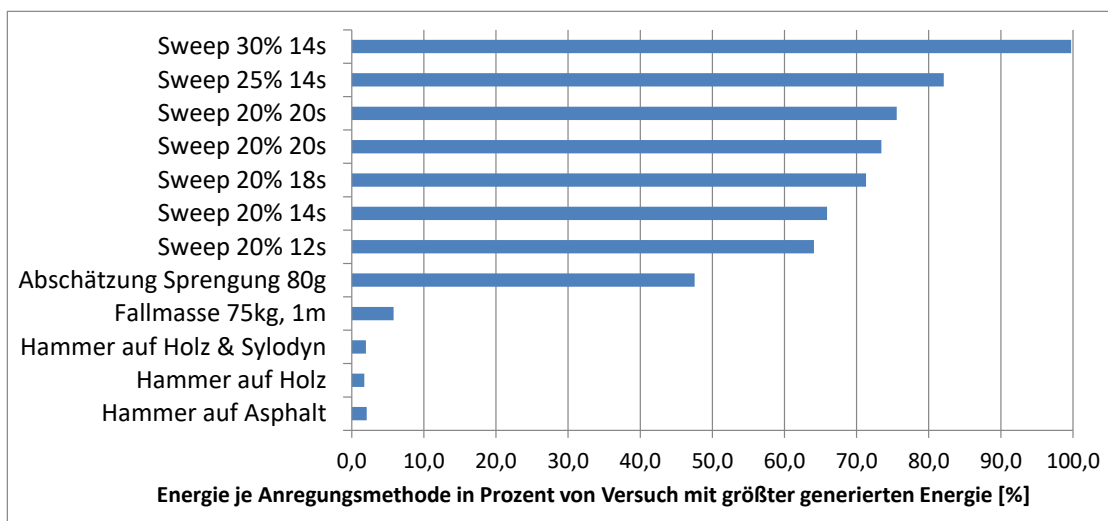


Abbildung 16 Vergleich Energie Anregungsmethoden in Prozent, siehe Tabelle 1

5. ZUSAMMENFASSUNG ERSCHÜTTERUNGSPROGNOSEN

5.1. METHODE HAMMERSCHLAG

- Die Grenzen der Anregungsmethode Hammerschlag liegen insbesondere in der Distanz zwischen dem Eintrag der Kraft (Emission) und Messung der Antwort (Immission).
- Immissionen aus einem Hammerschlag sind außerhalb von Resonanzbereichen nicht vom Grundrauschen zu trennen.
- Tiefe Frequenzen werden mit der Methode Hammerschlag nicht angeregt.
- Die zeitliche Dauer eines Versuches und Frequenzauflösung sind gering.
- Das Signal-Rausch-Verhältnis muss generell als gering bezeichnet werden.
- Hammerschlag Versuche zeigen eine geringe Reproduzierbarkeit.
- Starke Flächenpressungen mit großen plastischen Verformungen treten bei unsauberen Schlägen auf, weshalb lokale Effekte großen Einfluss auf die Energieumwandlung haben.
- Trotz des sehr flexiblen Einsatzes und der leichten Handhabung sind der Methode Hammerschlag damit Grenzen für Erschütterungsprognosen gesetzt.

5.2. METHODE SCHWINGUNGSERREGER (NOMAND 65: VIBROSCAN®)

- Messtechnisch ermittelte Übertragungsfunktionen zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit.
- Die Erschütterungsprognosen mit dem Nomand 65 sind sowohl für tiefe als auch für hohe Frequenzbereiche belastbar.
- Der Benutzer kann die Kraftamplituden, die Zeitdauer und das Frequenzband festlegen.
- Die Versuchsdauer resultiert in hohe Frequenzauflösungen.
- Der Nomand 65 ist als LKW variabel einsetzbar, hat durch seine Abmessungen allerdings auch einen erhöhten Platzbedarf.
- Der Transport zu möglichen Einsatzorten ist mit einem höheren Aufwand verbunden.
- Die Wirtschaftlichkeit ist für jeden Einsatz zu bewerten.

5.3. METHODEN SPRENGEN UND FALLMASSE

- Die künstliche Anregung mit Fallgewichten zeigt im Vergleich zu Messungen mit dem Schlaghammer Resultate mit höherer Qualität, ist aber durch die Notwendigkeit einer Maschine / eines Versuchsgeräts in der Versuchsdurchführung bereits als wesentlich aufwendiger einzuschätzen als die Hammerschlag Methode.
- Dynamisches Anregen mit Sprengungen ist hinsichtlich der Anwendungsgrenzen zwischen den Methoden Hammerschlag und Schwingungserreger einzuordnen.
- Der höhere Energiegehalt von Sprengungen wirkt sich positiv auf die Versuchsqualität aus.
- Sprengungen und Fallmassen sind impulsförmige Anregungen (geringe Zeitdauer, geringe Frequenzauflösung, bedingte Steuerung durch den Nutzer möglich, geringe Reproduzierbarkeit, mögliche hohe Wirtschaftlichkeit, große Energieumsätze in plastische Verformungen)
- Die Methode Sprengung ist nach den örtlichen Gegebenheiten zu bewerten.

6. LITERATURVERZEICHNIS

MÜLLER, G.; MÖSER, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik, 3., erweiterte und überarbeitete Auflage. Springer. Berlin, 2003

KRAMER, H.: Angewandte Baudynamik, Grundlagen und Praxisbeispiele, 2. Auflage. Ernst & Sohn. Berlin, 2013

SERCEL France: Nomad Seismic Vibrator Range, Beschreibung Schwingungserreger Nomad 65, 2016

EWINS, D.J.; J.B. Roberts, Uk University of S. University of Sussex (Hrsg.): MODAL TESTING - Theory, Practice and Application, second edition. RESEARCH STUDIES PRESS LTD. Baldock, Hertfordshire, England, 2000

SILVA, C. W. D.: VIBRATION: Fundamentals and Practice, second edition. Taylor & Francis, www.taylorandfrancisgroup.com, 2007

VIBROSCAN® ist ein eingetragene Wortmarke der iC consulenten ZT GmbH