



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.06

УДК 69.058.8

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СИЛ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А. Бюттнер¹, И.Х.Т. Шмидт¹, Ф. Сатхофф²

¹Университет прикладных наук Магдебург-Стендаль, Магдебург, Германия

²Ростокский университет, Росток, Германия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 декабря 2018

Принята: 25 февраля 2019

Опубликована: 28 июня 2019

Ключевые слова:

импульсное возбуждение, реакция возбуждения, соединение датчика, увеличение силы, изменение расстояния, полная проводимость, спектр сил машины, метод прогноза.

АННОТАЦИЯ

Совместно с нашим партнером Baudynamik Heiland & Mistler Университет прикладных наук разрабатывает практический метод прогнозирования вибраций, вызванных строительными машинами. Проект спонсирует BMWi. Новый метод более реалистично учитывает параметры строительных машин и характеристик грунта. Это делается с помощью специальной измерительной процедуры. Первым ее шагом является измерение пропускания передачи конкретной машины в месте «1» и вибрационных откликов на различных расстояниях. После этого спектры машины высчитаны от измеренных данных на каждом расстоянии. На втором этапе измеряется пропускная способность передачи, т.е. в здании (местоположение «2»), для импульсной силы, индуцированной специальным импульсным генератором. Затем полученные ранее спектры машины вместе с импульсной характеристикой математически преобразуются в частотной области для получения прогноза колебаний в здании, вызванных машиной обратным преобразованием во временной области. Так, прогноз вибраций может использоваться для оценки допустимых уровней вибрации согласно DIN 4150-3. Двухэтапная процедура основана на предположении, что передача колебаний в грунте и в здании может быть описана как линейная система. В статье это предположение проверено для конкретной вибрационной пластины. Описанная выше процедура применяется в трех разных местах с совершенно разными характеристиками грунта. Получены спектры силы для каждого грунта на различных расстояниях. Оценка данных показывает значительное влияние расстояния до расчетных спектров машины. Влияние импульсного уровня (низших или высших импульсных сил) оказывается незначительным. Сравнение полученных спектров сил для трех различных типов грунтов показывает, что спектры машин находятся в удовлетворительном соответствии. В результате можно констатировать, что предполагаемая линейная передача вибрации для вибраций, вызванных вибрационной пластиной, может быть удовлетворительно проверена. Предлагаемый метод прогнозирования дополнительно разработан и проверен.

© ПНИПУ

© Arne Büttner – Dipl.-Ing. (FH), M. Eng., e-mail: arnebuettner@gmail.com.

J.H. Thomas Schmidt – Dr.-Ing., Professur Informatik/Baudynamik, e-mail: thomas.schmidt@hs-magdeburg.de.

Saathoff Fokke – Dr.-Ing., Professur Geotechnik und Küstenwasserbau, e-mail: fokke.saathoff@uni-rostock.de.

DEVELOPMENT AND EXAMINATION OF FORCE SPECTRA FOR CONSTRUCTION MACHINES

A. Büttner¹, J.H.T. Schmidt¹, F. Saathoff²

¹Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, Deutschland

²Universität Rostock, Rostock, Deutschland

ARTICLE INFO

Received: 27 December 2018

Accepted: 25 February 2019

Published: 28 June 2019

Keywords:

Impulsanregung, Anregungsantwort, Sensorankopplung, Krafterhöhung, Abstandsänderung, Admittanz, Maschinenkraftspektrum, Prognoseverfahren.

ABSTRACT

Together with our partner Baudynamik Heiland & Mistler the university of Applied Sciences is developing a practical prediction method for construction machine induced vibrations. The project is sponsored by BMWi. The new method takes the construction machine parameters and the soil characteristics much more realistically into account. This is done by a special measuring procedure. The first step of this procedure is to measure the transfer admittance of the specific machine at a location „1“ and the vibration responses at different distances. Then the machine spectra are calculated from the measured data at each distance. In a second step the transfer admittance i.e. in building (location „2“) are measured for an impulse force induced by a special impulse generator. Then the previously obtained machine spectra together with the impulse response is mathematically transformed in the frequency domain to obtain a prediction of the vibrations in the building caused by the machine by back transformation in the time domain. The so predicted vibrations can be used to evaluate the admissible vibration given DIN 4150-3. The two step procedure is based on the assumption that the vibrations transfer in the soil and in the building can be described as linear systems. Within the paper this assumption will be proofed for a specific vibration plate. The procedure describe above is applied to three different places with completely different soil characteristics. The machine force spectra are obtained for each soil at different distances. The data evaluation shows the significant influence of the distance to the calculated machine spectra. The influence of the impulse level (lower or higher impulse forces) shows to be of minor significance. A comparison of the force spectra obtain for the three different soils shows that the machine spectra are in satisfactory accordance. As result it can be stated that the assumed of linear vibration transfer for vibrations caused by the vibration plate can be satisfactorily proofed. The proposed prediction method is further developed and proofed.

© PNRPU

1. Einleitung

Viele Baustellengeräte (Verdichtungsgeräte wie Rüttelplatten und Vibrationswalzen, Anbauverdichter, Rammgeräte, Kettenbagger u.v.a.m.) emittieren Erschütterungen, die in benachbarten Gebäuden für Menschen spürbar und störend sein können oder auch Gebäudeschäden verursachen.

Oft kommt es nach Beendigung einer Baumaßnahme zu gerichtlichen Auseinandersetzungen, in denen nachträglich geklärt werden muss, ob die Baustelle die Ursache für Gebäudeschäden war. Um Konflikten vorzubeugen, können die zu erwartenden Bauwerksschwingungen vor Beginn einer Baumaßnahme prognostiziert und beurteilt werden. Der geeignete Geräteinsatz kann dann entsprechend im Voraus geplant werden. In beiden Fällen kommen derzeit überschlägige empirische Prognoseverfahren zum Einsatz. Wenn die Genauigkeit und Belastbarkeit dieser Prognoseverfahren nicht ausreicht, müssen unter großem Aufwand Erschütterungsszenarien mit dem zum Einsatz kommenden Baugerät initiiert und messtechnisch untersucht werden. Die Erschütterungsimmissionen in einem Gebäude hängen von den Eigenschaften des emittierenden Gerätes, dem Baugrund, der Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk sowie den dynamischen Eigenschaften des Gebäudes selbst ab.

Die Prognosemethoden nach derzeitigem Stand der Technik sind relativ ungenau. Das liegt daran, dass Baugrundparameter nicht berücksichtigt werden, die Einflüsse von Baugeräte- und Bauwerksparametern oft unbekannt sind oder nur abgeschätzt werden können. Diese Methoden erfüllen somit nicht die Anforderung einer hohen und zuverlässigen Prognosegenauigkeit.

In einem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt an der Hochschule Magdeburg-Stendal wird in Zusammenarbeit mit unserem Forschungspartner „Baudynamik Heiland & Mistler GmbH“ derzeit ein praxistaugliches, messtechnisch unterstütztes Verfahren zur genaueren Prognose von zu erwartenden oder nachträglich zu beurteilenden Erschütterungen entwickelt. Das Messverfahren berücksichtigt die maßgebenden Baugeräteeigenschaften und damit die tatsächlichen Eingangsparmeter von der Erschütterungsentstehung, über den Baugrund bis hin zum Bauwerk. Die Hauptaufgabe für die Entwicklung des Prognoseverfahrens unterteilt sich in mehrere Schwerpunkte:

- Untersuchung der Anregbarkeit des Bodens und des Bauwerkes durch künstliche Anregungsarten,
- Validierung des linear angenommenen Übertragungsverhaltens zwischen Anregungsquelle, Baugrund und Bauwerk infolge von Erschütterungen,
- Berechnung von spezifischen Kraftfunktionen verschiedener Maschinen,
- Entwicklung und Formulierung der Algorithmen zur Erschütterungsprognose,
- Störgrößenuntersuchungen,
- Validierung und Verallgemeinerung des Gesamtverfahrens.

In diesem Beitrag werden die Untersuchungsergebnisse für die Berechnung von Kraftspektren, anhand einer Rüttelplatte, vorgestellt.

2. Berechnung und Untersuchung von Kraftspektren für Baumaschinen

2.1. Versuchsserie zur Ermittlung des Kraftspektrums der Rüttelplatte AVP2620

Im Rahmen einer Versuchsserie zur Ermittlung und Untersuchung von Maschinenkraftspektren wurden Messungen an drei verschiedenen Standorten, mit verschiedenen Bodenprofilen (Thale, Haldensleben, Magdeburg) durchgeführt. In Fig. 1 und Fig. 2 sind der Messaufbau sowie die Bodenprofile für alle drei Standorte dargestellt.

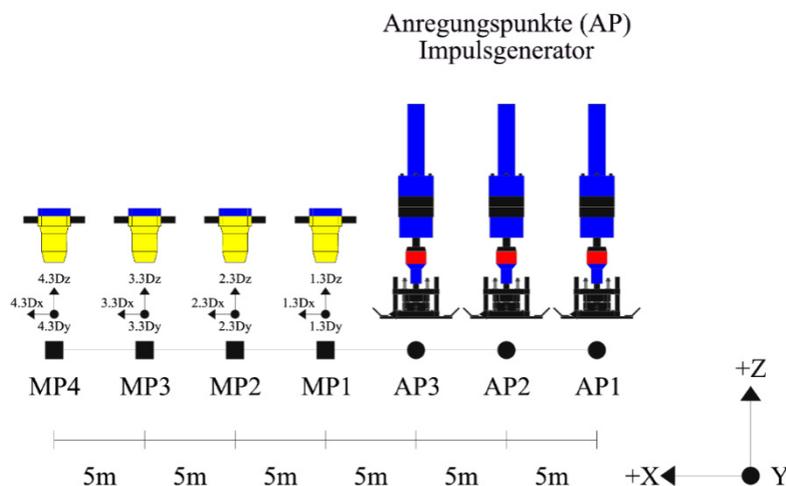


Fig. 1. Messaufbau zur Ermittlung und Untersuchung von Maschinenkraftspektren

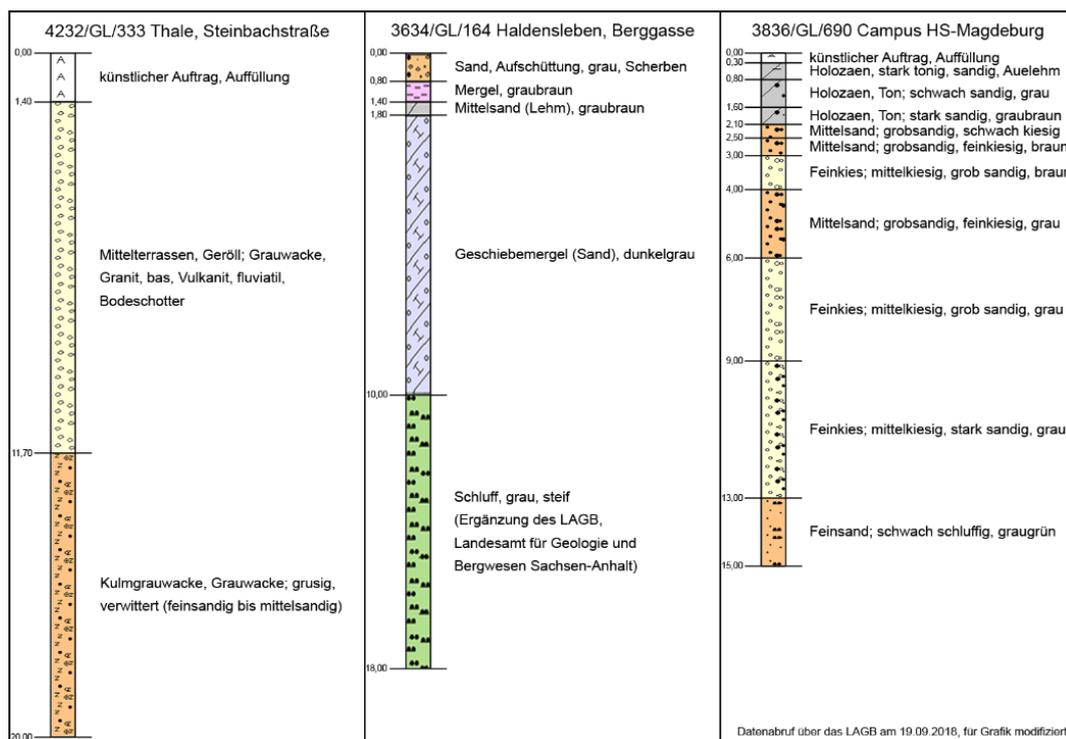


Fig. 2. Bodenprofile der drei Messstandorte

Als Anregungsquelle kam ein Impulsgenerator mit variierenden Fallgewichten und eine Rüttelplatte AVP2620 der Firma Ammann zum Einsatz. Aus den Messergebnissen wurden, wie in dem nachfolgenden Abschn. 2.2 beschrieben, die Admittanzspektren sowie die Maschinenkraftspektren der Rüttelplatte AVP2620 für jeden Standort separat berechnet.

2.2. Berechnung von maschinenspezifischen Kraftfunktionen

Die Berechnung von maschinenspezifischen Kraftfunktionen wird durch zwei Initialmessungen realisiert. In einer ersten Messreihe werden Admittanzspektren, infolge einer vertikalen, messtechnisch erfassten Impulsanregung ($n = 10 \text{Stk}$) und deren Geschwindigkeitsantworten für den jeweiligen Abstand berechnet. Der Krafteintrag wird mit Hilfe eines Impulsgenerators, welcher mit variablen Fallgewichten bestückt werden kann, realisiert. Da die Impulsdauer τ , welche u.a. von der Steifigkeit des Untergrundes abhängig ist, sehr gering sein kann ($< 0,003 \text{s}$) und um eine höhere Frequenzauflösung der Admittanzspektren sowie der späteren Maschinenkraftspektren zu erzielen wurde eine Abtastrate von 19200 Hz für die jeweiligen Messungen gewählt. Aufgrund des zunehmenden Abstandes zwischen Anregungsquelle und Geschwindigkeitssensorik bzw. aufgrund der steigenden Laufzeiten der entstehenden Wellen vom Emmissionsort zum jeweiligen Immissionsort der Messkette kommt es zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen Anregungsimpuls und den jeweiligen Anregungsantworten. Um die Anregungsantworten, auch in größerer Entfernung zu berücksichtigen wurde ein Zeitfenster von 1,6s (30720 Werte) gewählt. Des Weiteren muss die Werteanzahl des Impulsausschnittes und deren Geschwindigkeitsantwort zur Berechnung der Admittanz gleich sein. Dafür wird eine Rechteckfensterung ohne Überlappung benutzt. Für jeden Krafteintrag und Abstand wird ein separates Admittanzspektrum berechnet. Die Einzelberechnung der Admittanzen erzeugt große Datenmengen, hat aber den Vorteil, dass evtl.

Fehler durch eine Mittelwertbildung erkannt werden können. Detailliertere Informationen zum Impulsgenerator, dem Messaufbau und zur Berechnung von Admittanzspektren sind in [5] dokumentiert.

In einer zweiten Messreihe am gleichen Ort, mit gleichem Messaufbau wird die definierte Impulsanregung durch eine reale Maschinenanregung ersetzt. Für die Berechnung des Maschinen-Kraftspektrums werden die einzelnen Admittanzspektren (1. Messreihe) mit den jeweiligen Maschinenantworten (2. Messreihe) verrechnet. Dabei muss das Signal der Maschinenantwort ebenfalls in Ausschnitte (30720 Werte) aufgeteilt werden. Die Teilung wird mit einer Hanning-Fensterung mit 50 % Überlappung realisiert. Des Weiteren wurden für jeden Anregungspunkt (AP), für jeden Messpunkt (für jede Raumrichtung) und für jeden Arbeitszustand der Maschine (z.B.: Anschalt-, Abschalt- und Verdichtungsvorgang) separate Kraftfunktionen berechnet. Die Einzelberechnung der Maschinen-Kraftspektren erzeugt große Datenmengen, hat aber ebenfalls den Vorteil, dass evtl. Fehler durch eine Mittelwertbildung erkannt werden können.

Mit Hilfe geeigneter Signalverarbeitungssoftware wurden die Messdaten aus jeweils zwei Initialmessungen, wie oben genannt, vorbereitet und im Anschluss daran zu einem Maschinen-Kraftspektrum, mit folgenden Schritten, verrechnet.

1. Einlesen der vorbereiteten Maschinen-Anregungsantwort im Abstand n (Ort n)
2. Einlesen der zuvor berechneten, zugehörigen Admittanz im Abstand n (Ort n)
3. Berechnung des Maschinen-Kraftspektrums, als Übertragungsfunktion aus dem Verhältnis von Ausgangssignal (Maschinen-Anregungsantwort aus 1.) zu Eingangssignal (Admittanz aus 2.)

Das Maschinen-Kraftspektrum $F_M(f)$ berechnet sich nach folgender Formel [2, 5, 6, 7]:

$$F_M(f) = \frac{v_M(f)}{\underline{Y}(f)} = \frac{v_M(f)}{\frac{v_A(f)}{F_A(f)}}, \text{ mit} \quad (1)$$

$v_A(f)$ = Spektrum der gemessenen Schwinggeschwindigkeit infolge Impulsanregung,

$F_A(f)$ = Spektrum der eingeleiteten Kraft infolge Impulsanregung,

$\underline{Y}(f)$ = Admittanz, Verhältnis zwischen $v_A(f)$ und $F_A(f)$,

$v_M(f)$ = Spektrum der gemessenen Schwinggeschwindigkeit infolge Maschinenanregung.

Für die evtl. benötigte Rückführung einer nachfolgenden Prognoseberechnung in den Zeitbereich wurden alle Admittanz- und Kraftspektren zusätzlich komplex berechnet.

2.3. Untersuchung von maschinenspezifischen Kraftfunktionen

Für die Untersuchungen der Maschinenkraftspektren wurden die 3 folgenden variablen Parameter der Messkette näher analysiert.

- Auswirkung der Abstandsänderung bei der Berechnung von Kraftspektren
- Auswirkung einer Krafterhöhung bei der Berechnung von Kraftspektren
- Auswirkung verschiedener Bodenprofile bei der Berechnung von Kraftspektren

Aus vorangegangenen Untersuchungen über die lineare Abhängigkeit bei der Berechnung von Admittanzen im Boden infolge einer Impulskraftanregung (siehe [5]) können direkte Analogien zur Berechnung von Kraftfunktionen abgeleitet werden.

2.3.1. Auswirkung der Abstandsänderung bei der Kraftspektrenberechnung

Beim Vergleich zwischen berechneten Admittanzspektren in Abhängigkeit vom Abstand verschiebt sich scheinbar der Frequenzinhalt mit zunehmender Entfernung von der Quelle zu tieferen Frequenzen (Tiefpasswirkung des Bodens). Diese Beobachtung lässt sich mit der über den Abstand zur Quelle zunehmenden Materialdämpfung des Bodens begründen. In der Fig. 3 (2. Grafik von oben) sind zwei unterschiedliche Admittanzspektren, in Abhängigkeit vom Abstand, für den Standort Thale beispielhaft dargestellt. Weiterführende Informationen dazu sind u.a. in [3, 5, 6, 7, 9, 10] dokumentiert. Weitere Vergleiche zwischen den dazugehörigen Kohärenzspektren, hinsichtlich der zunehmenden Entfernung zwischen Anregungsquelle und Immissionsort, zeigten, nach [5], eine Verschlechterung der linearen Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Dies lässt sich ebenfalls durch die über den Abstand zunehmende, oben bereits genannte, Materialdämpfung und der damit verbundenen Abnahme des Signal-Rausch-Abstandes begründen. Der Einfluss von Nichtlinearitäten hinsichtlich der Materialdämpfung des Bodens bei der Berechnung von Admittanzen, infolge der in [5] dokumentierten, Abstandsvergrößerung zur Quelle konnte nicht beobachtet werden. Die Materialdämpfung des Bodens kann daher als annähernd linear-elastischer Vorgang betrachtet werden. Die Ursache für die Verschlechterung der Kohärenz mit zunehmendem Abstand zur Quelle begründet sich mit dem abnehmenden Signal-Rausch-Abstand und der damit verbundenen Nähe zum Pegel des Grundrauschens während der Messung. In der oberen Grafik der Fig. 3 sind die Anregungsantworten für den Standort Thale, in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle, sowie der maximale Rauschpegel beispielhaft dargestellt. Im Antwortspektrum für den Abstand von 5 m treten unterhalb von 10 Hz und oberhalb von 400 Hz verstärkte Streuungen der jeweiligen Antwortspektren, aufgrund der Nähe zum Maximalpegel des Grundrauschens auf. In dem dazwischenliegenden, mittleren Frequenzbereich sind die Streuungen geringer und relativ konstant. Beim Anregungsspektrum für den Abstand von 30 m verringert sich dieser mittlere Frequenzbereich aufgrund der zunehmenden Materialdämpfung auf einen Frequenzbereich zwischen 16 – 128 Hz. Die mit dem Abstand zunehmenden Streuungen der Antwortspektren übertragen sich dementsprechend auf die Admittanzspektren und somit auch auf die, im Nachgang, berechneten Kraftfunktionsspektren (siehe 3. Grafik, Fig. 3). Stellt man die Streuungen der Kraftspektren, hinsichtlich des zunehmenden Abstandes, mit Hilfe des Variationskoeffizienten über der Frequenz (Fig. 3, untere Grafik, Terzspektrum) dar, lässt sich die Übertragung der Streuungen anhand der oben genannten Frequenzbereiche sehr gut verdeutlichen.

In den theoretischen Untersuchungen nach [9] wurde für den Fall „Weiche Bodenschicht über steiferen Halbraum“ festgestellt, dass im Admittanzspektrum bei den tieferen Frequenzen sich die Amplituden des unterliegenden steiferen Halbraumes und bei den höheren Frequenzen sich die Amplituden der obenliegenden, weicheren Bodenschicht ausbilden. Im mittleren Frequenzbereich nehmen die Amplituden stark zu und bilden einen „Resonanzbereich“ der, nach [9], etwa mit

$$f_0 = \frac{v_s}{2h}, \text{ mit} \quad (2)$$

v_s = Scherwellengeschwindigkeit,

h = Dicke der weicheren Bodenschicht.

angegeben werden kann. In diesem Bereich sind die Amplituden gegenüber der weicheren Bodenschicht verstärkt.

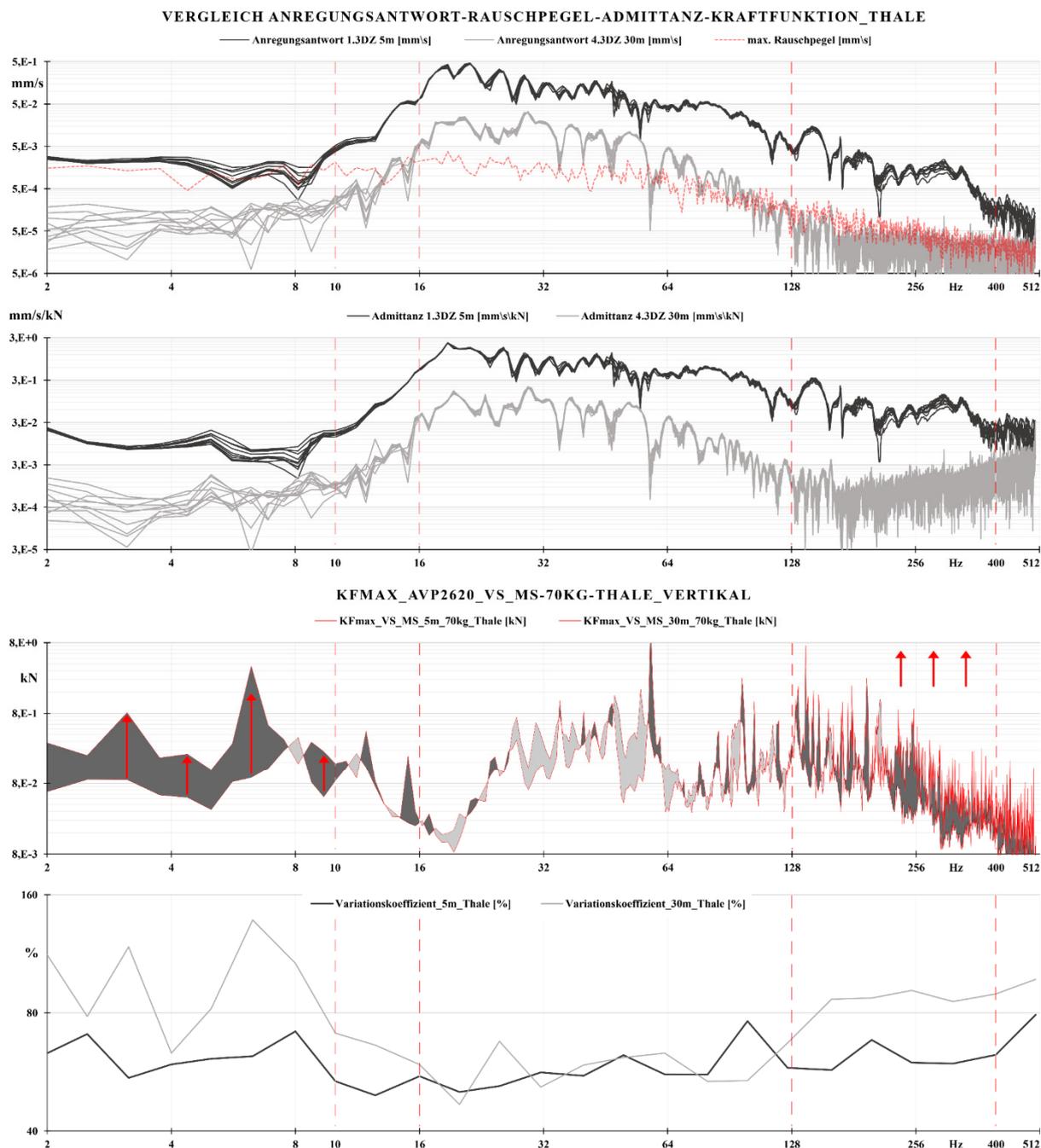


Fig. 3. Vergleich zwischen den maximalen Kraftfunktionen (KFmax) im Abstand von 5 und 30 m zur Quelle, Verdichtungsvorgang, AVP2620, Standort Thale

Für den Fall „Steife Schicht über weicherem Halbraum“ konnten ebenfalls, im Admittanzspektrum den tieferen Frequenzen die Amplituden der untenliegenden Schicht und den höheren Frequenzen die Amplituden der oberen, steiferen Schicht zugeordnet werden. Im Unterschied zum vorherigen Fall kann man, nach [9], im mittleren Frequenzbereich eine, mit der Entfernung zunehmende, Amplitudenabnahme feststellen.

Diese auf der Theorie basierenden Feststellungen konnten bei den, in [5], durchgeführten Messreihen, an den oben bereits genannten Standorten, bestätigt werden. In allen drei Admittanzspektren für die jeweiligen Standorte, mit den in Fig. 2 dazugehörigen Bodenprofilen, konnte für den mittleren Frequenzbereich eine Amplitudenverstärkung, bzw. ein

Resonanzbereich beobachtet werden. Daher handelt es sich grundsätzlich um geschichtete Böden „weich auf steif“, also um Böden die mit der tiefe kontinuierlich an Steifigkeit zunehmen. In Fig. 3 sind die Amplitudenverstärkungen im mittleren Frequenzbereich der Admittanzspektren für den Standort Thale in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle beispielhaft dargestellt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Abstand zwischen Anregungsquelle und Anregungsantwort einen Einfluss auf die anschließende Berechnung von Admittanzspektren und damit auch auf das darauf basierende Maschinenkraftspektrum hat. Daher sind berechnete Kraftspektren einer Maschine (bei gleichem Arbeitsgang) vom Abstand zwischen Quelle und Aufnahmeort abhängig und beeinflussen somit auch spätere Prognoseberechnungen. Inwieweit und in welcher Größenordnung sich diese Unterschiede auf die Ergebnisse von Prognosen auswirken, soll in einem 3. Teil der Forschungsarbeit näher untersucht werden.

2.3.2. Auswirkung einer Krafterhöhung bei der Berechnung von Kraftspektren

Vergleiche der jeweiligen Kohärenzspektren infolge einer definierten Impulskrafterhöhung am Emissionsort zeigten bei Admittanzberechnungen erwartungsgemäß eine „Verbesserung“ bzw. Vergrößerung des nutzbaren Frequenzbereiches. Dies lässt sich mit der Zunahme des Signal-Rausch-Abstandes begründen. Im höheren Frequenzbereich hat die Materialdämpfung des Bodens einen stärkeren Einfluss. Daher nehmen die Amplituden der Admittanzspektren in direkter Nähe zur Quelle, infolge der in [5] dokumentierten Krafterhöhung, ab einem bestimmten Frequenzbereich sichtbar ab. In größerer Entfernung zur Quelle ist die Abnahme der Amplituden aufgrund der Verschiebung des Frequenzinhaltes in den tieferen Frequenzbereich (Materialdämpfung, Tiefpasswirkung des Bodens) nicht mehr so dominant ausgeprägt, aber dennoch vorhanden. Durch den über die Frequenz abgetragenen Variationskoeffizienten konnte, nach [5], eine Kenngröße zur Beurteilung der relativen Streuung der Admittanz infolge der variierenden Kraftereinleitung um einen Mittelwert berechnet und auf eine Abstandsänderung bezogen werden. Die Streuungen der Admittanzspektren infolge der variierenden Kraftereinleitung vergrößern sich infolge des zunehmenden Abstandes nur im tieferen und im höheren Frequenzbereich. Die Streuungen im mittleren Frequenzbereich blieben relativ konstant und größenmäßig gleich. Aufgrund der in Abschn. 2.3.1 bereits genannten Form des Admittanzspektrums für Böden der Art „weich auf steif“ resultieren die festgestellten Streuungen der Admittanzspektren nicht aus der Krafterhöhung, sondern sind ebenfalls nur auf den kleiner werdenden Signal-Rausch-Abstand zurückzuführen. Der Einfluss von Nichtlinearitäten bei der Berechnung von Admittanzen, infolge der in [5] dokumentierten, variierenden Kraftereinleitung, konnte nicht beobachtet werden.

Der Einfluss einer variierenden Impulskraftanregung ist für die Berechnung von Maschinenkraftspektren und somit für eine spätere Prognoseberechnung als gering einzustufen und kann in guter Näherung als ein linear-elastischer Vorgang betrachtet werden.

2.3.3. Auswirkung verschiedener Bodenprofile bei der Berechnung von Maschinenkraftspektren

In Fig. 4 sind die einzelnen berechneten Kraftfunktionen (KFEW), die maximale, minimale und arithmetisch gemittelte Kraftfunktion (KFmax, KFmin, KFMW) sowie der Variationskoeffizient (Streuung um den Mittelwert) bis zu einer Frequenz von 500 Hz für die folgende Messreihe „KFEW-AP1_AVP2620_VS_MS-AP1-70kg-Thale.DDF“ beispielhaft dargestellt.

Messaufbau: siehe Fig. 1, AP1, 3D-Geofone auf Dreibein-Fußplatte
 Messort: Thale, Bodenprofil siehe Fig. 2
 Admittanzen: ~10 Generatorimpulse, Fallgewicht 70kg, Abstand zur Quelle 15m
 Maschine: Rüttelplatte AVP2620, Arbeitsfrequenz 97,50 Hz
 Kraftfunktionen: ~ 30 – 90s Vollgas im Stand (VS), Verdichtungsvorgang (MS),
 Abstand zur Quelle 15m (1.3DZ, vertikal)

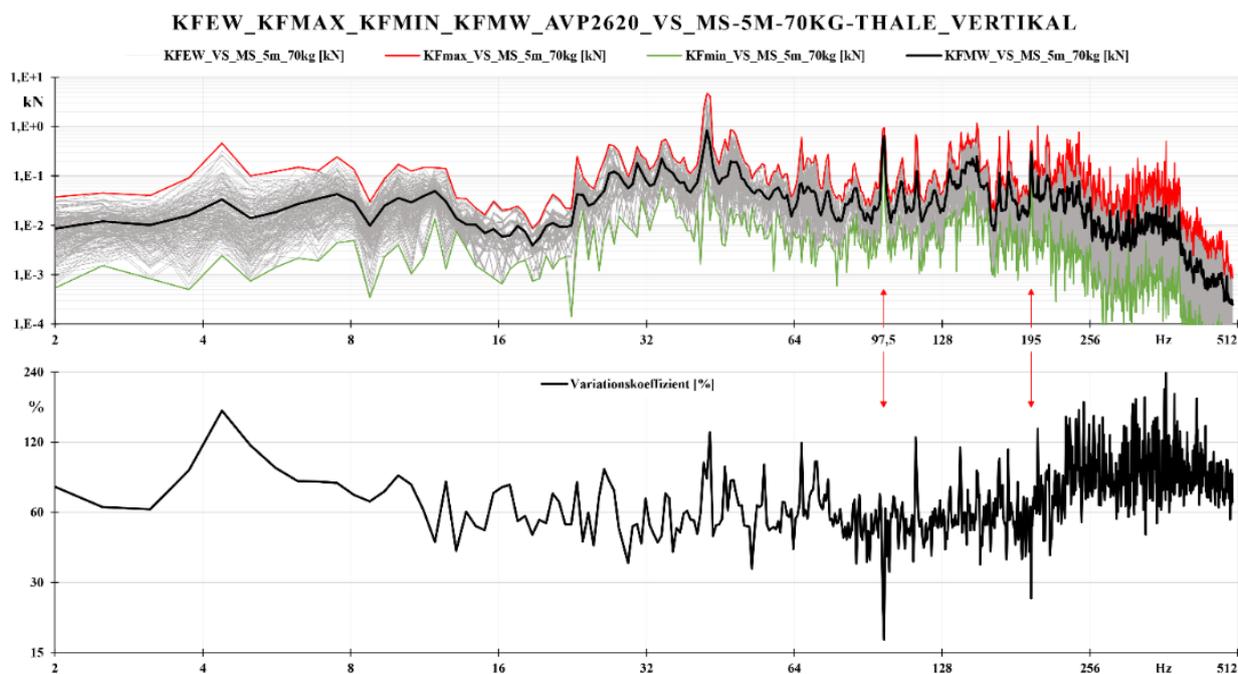


Fig. 4. Einzelne Kraftfunktionen, maximale, minimale und arithmetisch gemittelte Kraftfunktion sowie der Variationskoeffizient über der Frequenz

Maschinen dieser Art werden im Allgemeinen durch eine rotierende Unwucht angetrieben. Nach dem Start durchläuft die Maschine einen Frequenzbereich bis die Arbeitsfrequenz erreicht ist. Dieser Bereich wird im Folgenden Anschlag- bzw. Anfahrvorgang genannt (siehe Fig. 6). Hat die Rüttelplatte die Arbeitsfrequenz erreicht, befindet sich die Maschine im Verdichtungsvorgang. In der Fig. 5 ist die Arbeitsfrequenz sowie die 2. Harmonische bzw. 1. Oberschwingung dargestellt. Beim Abschalten durchläuft die Maschine, analog zum Anschlagvorgang, einen Frequenzbereich bis sie zur Ruhe kommt, daher Abschaltvorgang genannt. Die in Fig. 5 dargestellten Kraftfunktionen beziehen sich auf den Verdichtungsvorgang der Rüttelplatte. Die Streuung der einzelnen Kraftfunktionen um den Mittelwert, welcher als Variationskoeffizient über der Frequenz dargestellt ist, zeigt deutlich das unterschiedliche Verhalten bzw. den variierenden Krafteintrag der Rüttelplatte. Dies kann u.a. mit einem „Springen“, „Hüpfen“, oder „Einsinken“ bzw. mit dem Stichwort „Ankopplung der Maschine auf dem Erdboden“ begründet werden. Aufgrund der Tatsache, dass jeder einzelne Impulseintrag $F_A(f)$ bzw. jede separate Admittanz $\underline{Y}(f)$ mit jedem Ausschnitt (1,6s aus ca. 60s Gesamtdauer) der Anregungsantwort der Rüttelplatte $v_M(f)$ verrechnet wurde, treten im Mittel Streuungen von bis zu 78 % auf. Diese Streuungen konnten an allen drei Standorten (Fig. 2), in etwa gleicher Größenordnung, festgestellt werden.

Zur vereinfachten Darstellung für den Vergleich zwischen den jeweiligen Kraftspektren der unterschiedlichen Standorte wurde eine arithmetische Mittelung aller berechneten Kraftfunktionen pro Standort durchgeführt. Dadurch werden die in Abschn. 2.3.1 und Abschn. 2.3.2 bereits genannten Einflüsse auf die berechneten Kraftfunktionen hinsichtlich eines Standortvergleiches egalisiert. In der oberen Grafik der Fig. 5 sind die gemittelten Kraftspektren der Rüttelplatte AVP2620 für die in Fig. 2 gezeigten Standorte vergleichend dargestellt.

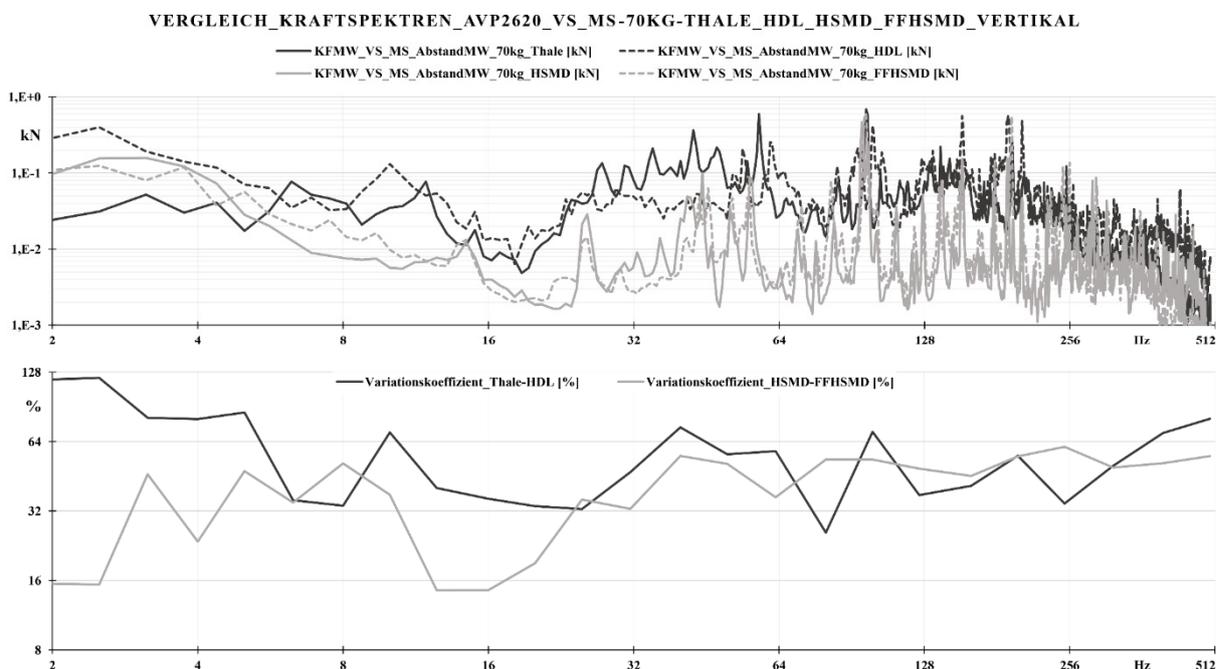


Fig. 5. Vergleich der standortbezogenen Maschinenkraftspektren der Rüttelplatte AVP2620

Beim Vergleich der Maschinenkraftspektren in Fig. 5 stellt man fest, dass sich die Verläufe der Spektren für die Standorte Thale und HDL ähneln. Das Spektrum für den Standort HSMD (grau) unterscheidet sich von den Spektren der beiden anderen Standorte. Die Amplituden des Spektrums für den Standort HSMD liegen im dargestellten Frequenzbereich unterhalb der beiden anderen Spektren. Aufgrund dieser Tatsache wurde eine vierte Messreihe am Standort der Hochschule Magdeburg zur Auswertung herangezogen. Die Messreihe, mit gleichem Messaufbau und der Bezeichnung FFHSMD, fand zu einem früheren Zeitpunkt auf einer anderen Position auf dem Hochschulgelände statt. Das berechnete Kraftspektrum für die Rüttelplatte AVP2620 dieser Messreihe unterscheidet sich ebenfalls von den beiden Kraftspektren der Standorte Thale und Haldensleben, ähnelt aber dem Spektrum vom Standort HSMD. Die Ursache für die unterschiedlichen Kraftfunktionsverläufe liegt in der Ankopplung der Messensorik auf der Erdoberfläche. Bei den Messreihen an den Standorten Thale und Haldensleben kamen, aufgrund der verdichteten Oberflächen, 3D-Geofone auf Dreibein-Fußplatten zum Einsatz. Am Standort der Hochschule Magdeburg wurden im Gegensatz dazu Fußplatten mit Spikes eingesetzt. Ein Gesamtvergleich aller Maschinenkraftspektren ist daher nicht möglich. Vergleicht man die Kraftspektren der Standorte Thale und HDL über den Variationskoeffizienten (untere Grafik, Fig. 5, Terzspektrum) miteinander, so treten im Mittel Streuungen von bis zu 55 % auf. Die Streuungen der am Standort Magdeburg berechneten Kraftspektren der Rüttelplatte AVP2620 lagen im Mittel bei 51 % und unterscheiden sich damit nur geringfügig von den zuvor genannten Streuungen der beiden anderen Standorte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Funktionsverläufe berechneter Kraftspektren für die oben genannte Rüttelplatte, bei gleichem Messaufbau, auf unterschiedlichen Böden (Standorten), relativ gut übereinstimmen. Damit kann in guter Näherung ein linear-elastisches Verhalten der Böden, für das hier eingebrachte Kraftniveau, angenommen werden. Im Rahmen der beiden Initialmessungen zur Berechnung von Admittanzen und der anschließenden Berechnung des Maschinenkraftspektrums sollte, hinsichtlich nachfolgender Prognoseberechnungen, zwischen den unterschiedlichen Ankopplungen der Messsensorik auf der Erdoberfläche unterschieden werden. Inwieweit und in welcher Größenordnung sich die unterschiedlichen Ankopplungen auf die Ergebnisse von Prognosen auswirken, soll in einem 3. Teil der Forschungsarbeit näher untersucht werden.

2.3.4. Aufbau einer strukturierten Datenbank für Maschinenkraftspektren

Um zukünftige, messtechnisch gestützte Prognoseberechnungen zu vereinfachen, ist das Anlegen einer strukturierten Datenbank für Maschinenspektren sinnvoll. Damit würde sich der Aufwand, hinsichtlich einer späteren Prognoseberechnung, auf eine „Vorortmessung“ in Form einer Admittanzbestimmung am Ort der Prognose und der Zuhilfenahme eines bereits katalogisierten Maschinenkraftspektrums reduzieren. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes wurden seitens der Hochschule Magdeburg momentan 15 Baumaschinen, mit 33 Arbeitszuständen und 66 An- und Abschaltvorgängen, in Form von Kraftspektren mit den dazugehörigen Maschinenparametern, Messaufbauten und Klimadaten katalogisiert. Das derzeitige Datenvolumen der Datenbank soll durch die Ergebnisse des 3. Teils der Forschungsarbeit auf ein Minimum reduziert werden, damit eine realitätsnahe, praxistaugliche Umsetzung realisiert werden kann.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Abstand zwischen Anregungsquelle und Anregungsantwort einen Einfluss auf die Berechnung von Admittanzspektren und damit auch auf die Maschinenkraftspektren hat. Daher sind berechnete Kraftspektren einer Maschine (bei gleichem Arbeitsgang) vom Abstand zwischen Quelle und Aufnahmeort abhängig und beeinflussen somit auch spätere Prognoseberechnungen.

Der Einfluss einer variierenden Impulskraftanregung ist für die Berechnung von Maschinenkraftspektren und somit für eine spätere Prognoseberechnung als gering einzustufen.

Die Funktionsverläufe berechneter Kraftspektren, hier am Beispiel einer Rüttelplatte, stimmen bei gleichem Messaufbau auf unterschiedlichen Böden (Standorten), relativ gut überein. Damit kann in guter Näherung ein linear-elastisches Verhalten der Böden, für das hier eingebrachte Kraftniveau, angenommen werden. Im Rahmen der beiden, zur Berechnung von Admittanzen und der anschließenden Berechnung des Maschinenkraftspektrums, notwendigen Initialmessungen sollte, hinsichtlich nachfolgender Prognoseberechnungen, auf eine nicht wechselnde Ankopplung der Messsensorik auf der Erdoberfläche geachtet werden. Inwieweit bzw. in welcher Größenordnung sich die Unterschiede bei der Berechnung von Kraftspektren, infolge einer Abstandsänderung zwischen Anregungsquelle und –antwort sowie der unterschiedlichen Bodenankopplung der Messsensorik, auf die Ergebnisse von Prognoseberechnungen auswirken, soll in einem 3. Teil der Forschungsarbeit näher untersucht werden.

Zusätzlich dazu und als Ausblick muss für eine spätere Prognoseberechnung und Beurteilung nach DIN 4150-3:2016-12 [1], bezüglich der Einwirkung von Schwingungen auf Bauwerke, zwischen den jeweiligen Arbeitszuständen der Maschine (z.B.: An-, Abschalt- und Verdichtungsvorgängen), bzw. zwischen kurzzeitige Erschütterungen und Dauererschütterungen unterschieden werden. Dabei gehören die An- und Abschaltvorgänge, z.B. der oben genannten Rüttelplatte AVP2620 (siehe Fig. 6), zu den kurzzeitigen Erschütterungseinwirkungen, deren Häufigkeit bzw. deren zeitliche Abfolge nicht ausreicht, oder nicht geeignet sind das Bauwerk in einen Resonanzzustand zu versetzen, oder Materialermüdungserscheinungen hervorzurufen. Für diesen Fall werden die maximalen Kraftfunktionen KF_{max} (Peak-Hold-Spektrum) aus den An- und Abschaltvorgängen zur Prognoseberechnung verwendet. In der folgenden Fig. 6 ist das Geschwindigkeitssignal über die Zeit für den Anschalt- und Verdichtungsvorgang für die Rüttelplatte AVP2620 beispielhaft dargestellt.

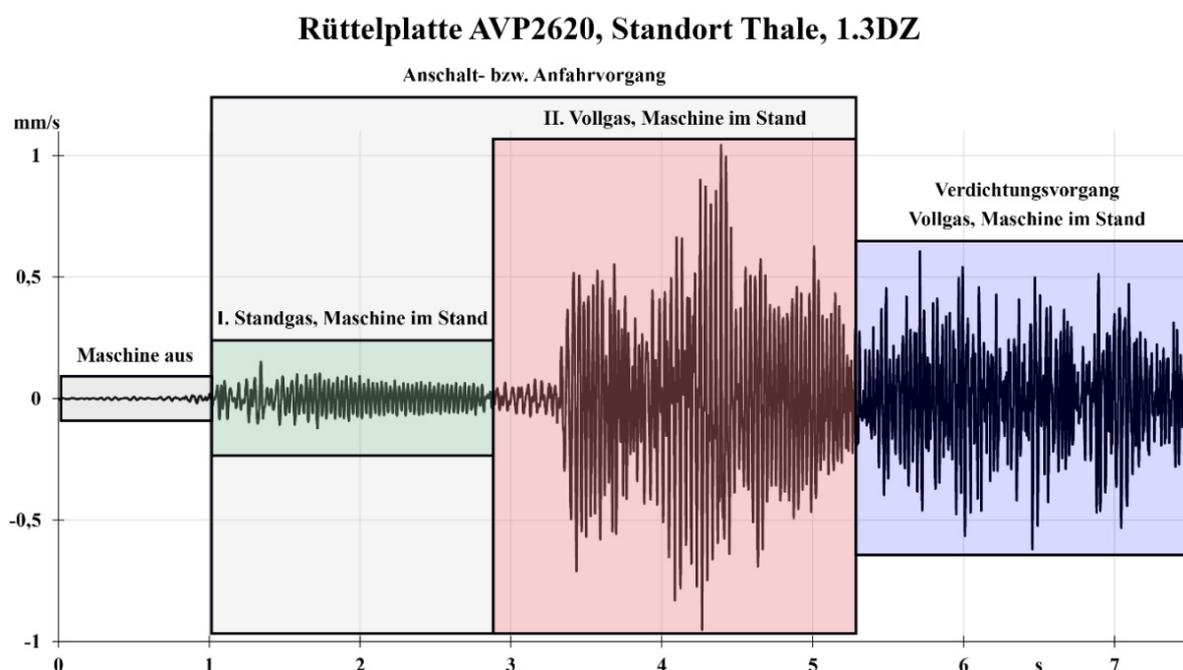


Fig. 6. Anschalt- und Verdichtungsvorgang AVP2620, Standort Thale, 1.3DZ

Dauererschütterungen sind nach DIN 4150-3:2016-12 [1] als Erschütterungen definiert, auf welche die Definition der kurzzeitigen Erschütterungen nicht zutrifft. Der in Fig. 6 dargestellte Verdichtungsvorgang der Rüttelplatte AVP2620 gehört zu den Dauererschütterungen, deren Häufigkeit bzw. deren zeitliche Abfolge ausreichend, oder geeignet sind das Bauwerk in einen Resonanzzustand zu versetzen, oder Materialermüdungserscheinungen hervorzurufen.

References

1. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 4150-3:2016-12 Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Beuth Verlag GmbH, 2016.
2. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): VDI 3837:2013-01 Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen – Spektrales Prognose-verfahren. Beuth Verlag GmbH, 2013.

3. Achmus M., Kaiser J., tom Wörden, F. Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten: Grundlagen – Messergebnisse – Prognosen. Institut für Bauforschung e.V., 2005.
4. Jahnke R., Heiland D., Mistler M. Kraftbasiertes Prognoseverfahren für baustelleninduzierte Erschütterungen, D-A-C-H-Tagung: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2017, Weimar, 2017.
5. Büttner A., Schmidt J.H.T., Saathoff F. Entwicklung eines praxistauglichen Prognoseverfahrens für baustellenbedingte Erschütterungen – 1. Teil. Untersuchung der Linearität bei der Berechnung von Admittanzen des Bodens infolge einer Impulskraftanregung. 6. VDI-Fachtagung: Baudynamik, Würzburg, 2018.
6. Haupt W. Bodendynamik Grundlagen und Anwendung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1986.
7. Flesch R. Baudynamik praxisgerecht. Band 1 Berechnungsgrundlagen. Bauverlag GmbH, 1993.
8. Studer A. J., Koller G. M. Bodendynamik Grundlagen, Kennziffern, Probleme. 2., völlig neubearbeitete Auflage, Springer-Verlag, 1997.
9. Auersch L. Zur Erschütterungsausbreitung im Boden und im Gebäude unter Berücksichtigung der Erregerkräfte und von Bodenschichtungen. VDI Berichte Nr. 1145, 1994.
10. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) DIN 4150-1:2001-06 Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen. Beuth Verlag GmbH, 2001.