

Die Übertragungsfaktoren

Von

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

1. Einführung
2. Messungen
 - 2.1 Tunnelsprengung
 - 2.2 Spundwanddrummung mit Rüttelgerät und Vibrationsverdichtung
 - 2.3 Untertägige Gewinnungssprengung
 - 2.4 Straßenverkehr
3. Schlussfolgerungen

Zusammenfassung

Die vielfach getroffene Annahme konstanter Faktoren für die Ermittlung von Decken- / bzw. Obergeschosschütterungen aus Fundamentanhaltswerten wird anhand mehrerer Fallbeispiele untersucht.

Bei stationärer Anregung wie z.B. durch Spundwandeinrüttlung sollte die in DIN 4150 Teil 1 angegebene Annahme eines konstanten Übertragungsfaktors gelten. Es zeigte sich aber auch ein Beispiel, wo sich bei konstanter Fundamentalschwingung die Deckenschwingung ändert. Die beim Anlaufen solcher Geräte entstehenden Resonanzfälle oder resonanznahen Anregungen führen je nach Dauer des Hochfahrens in Abhängigkeit des Verhältnisses von Erregerfrequenz zu Eigenfrequenz jeweils zu verschiedenen Übertragungsfaktoren.

Bei Sprengungen ergibt sich eine große Streubreite, die wohl auch in der unterschiedlichen Ausbreitung der Druckwelle im Gebirge begründet ist, wodurch die Anregungswerte in unterschiedlicher Weise transformiert werden.

Bei der Untersuchung einer Anregung aus Straßenverkehr zeigte sich eine systematische Abhängigkeit von den Maximalamplituden, die durch ein lineares Übertragungsmodell nicht erklärt werden kann. Auch hier muss die individuelle Transformation der Anregung in Abhängigkeit von z.B. Fahrzeugkonstruktion und Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

1. Einführung

Bei der Prognose der Erschütterungseinwirkung auf Gebäude oder auf Menschen in Gebäuden wird häufig davon ausgegangen, dass die Freifelderschütterung beim Übergang auf das Fundament abgemindert wird und die Fundamenterschütterung zu einer verstärkten Anregung von Gebäudeteilen, insbesondere Decken führt. Für diese Übertragung vom Fundament wird ein lineares Strukturverhalten angenommen, so dass in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz des schwingenden Bauteils Decke ein konstanter Übertragungsfaktor angesetzt wird.

Bei der Dimensionierung von Abstimmungsauslegungen für Feder-Masse-Systeme im Schienenverkehr wird häufig auch eine Sprungprobe auf einer Decke ausgeführt und aus der so ermittelten Eigenfrequenz die Übertragung vom Fundament auf die Decken ermittelt. Auch dieses Vorgehen hat als Voraussetzung, dass der Übertragungsfaktor ein allein strukturabhängiger Wert ist und für ein Bauwerk als konstant anzusehen ist.

Die DIN 4150 gibt im Abschnitt 1 - Vorermittlung der Schwingungsgrößen - Abschnitt 4.3 Übertragung auf Bauwerke - an, dass eine solche Abschätzung konstanter Übertragungsfaktoren nur für überwiegend harmonische gleichphasige Anregung gilt. Als konservative Abschätzung wird der Resonanzwert $1/(2 D_0)$ angegeben. Für $D_0 = 0,02$ bis $D_0 = 0,05$ ergibt sich ein Übertragungsfaktor von 10 bis 25.

Die Bedeutung der Erschütterungen in den oberen Geschossen ergibt sich einerseits aus den Vorgaben der DIN 4150 Teil 2 für die Immissionswerte, die auf den Decken der bewohnten Räume zu bestimmen sind, andererseits auf den Vorgaben des Teils 3 für die Beurteilung der Einwirkungen auf Gebäude. In Tabelle 1 werden Anhaltswerte für die oberste Deckenebene angegeben. Es wird zwar einerseits in Abschnitt 5.1 angegeben, dass für die Beurteilung der Einwirkungen die Schwingungen in der obersten Deckenebene "wesentliche Hinweise" geben. Weiter unten heißt es in diesem Abschnitt, dass wenn die Anhaltswerte der Tabelle 1 eingehalten werden, Schäden im Sinne der Verminderung des Gebrauchswertes nicht auftreten. Das heißt aber auch, dass die Erschütterungen in der obersten Deckenebene bekannt sein müssen. Diese müssen entweder durch Messungen oder aus den Fundamentwerten mit zuverlässigen Übertragungsfaktoren bestimmt werden.

Vor allem bei dem zur Zeit bestehenden hohen Kostendruck wird häufig auf eine Messung in der obersten Deckenebene verzichtet und nur die Messung an den Fundamenten zur Beurteilung herangezogen.

2. Messungen

2.1 Tunnelsprengung

Bei einer Überwachung einer Tunnelbaumaßnahme wurde seitens der Bauüberwachung die Messung in den oberen Stockwerken als überflüssige Maßnahme angesehen. Bei dem Versuch, zuverlässige Übertragungswerte zu ermitteln, zeigte sich, dass die Werte in einem größeren Bereich streuen als angenommen. Es konnte auch keine Systematik festgestellt werden.

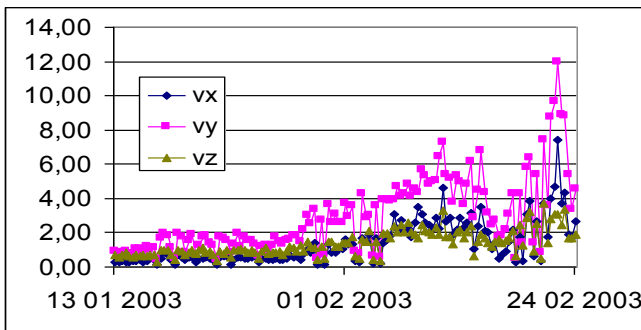


Bild 1 : Schwinggeschwindigkeitsamplituden
im Keller/Fundament

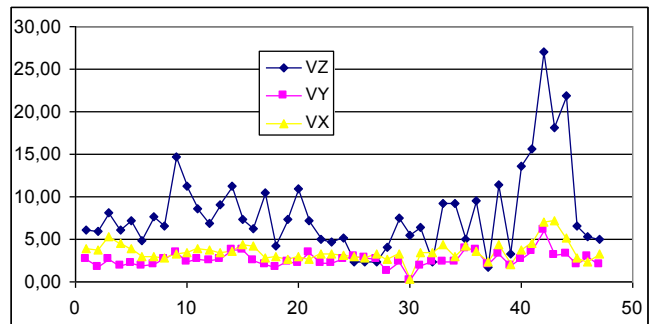


Bild 2 : Schwinggeschwindigkeiten
OG ab 6.2.2003 bis 24.2.2003

Bild 1 zeigt die Entwicklung der Erschütterungen. Das Überwachungsprogramm sah vor, die Erschütterungen schon zu einem frühen Zeitpunkt zu messen, nämlich ungefähr zu einer Zeit als die Erschütterungen am Einwirkungsort spürbar wurden. Erst, wenn eine Annäherung an die Anhaltswerte der Tabelle 1 der DIN 4150 Teil 3 festgestellt wurde, wurde auch eine Messstelle in der obersten Deckenebene eingerichtet. Für diesen Zeitraum bis zum Abbruch der Messungen konnten die Übertragungsfaktoren als Verhältnis der Schwingungen in der obersten Deckenebene zu den Schwingungen am Fundament bestimmt werden.

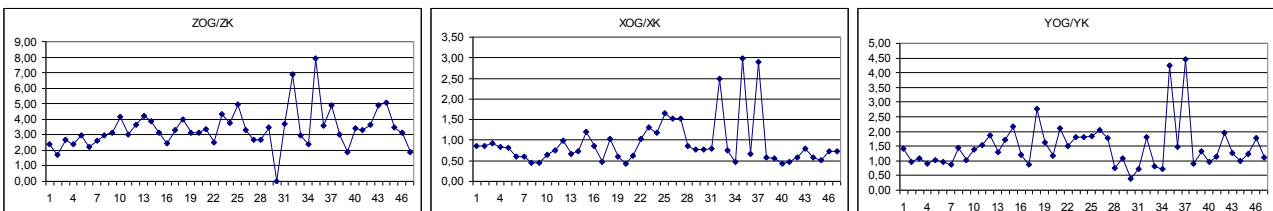


Bild 3 : Übertragungsfaktoren ab 6.2.2003, z, x und y

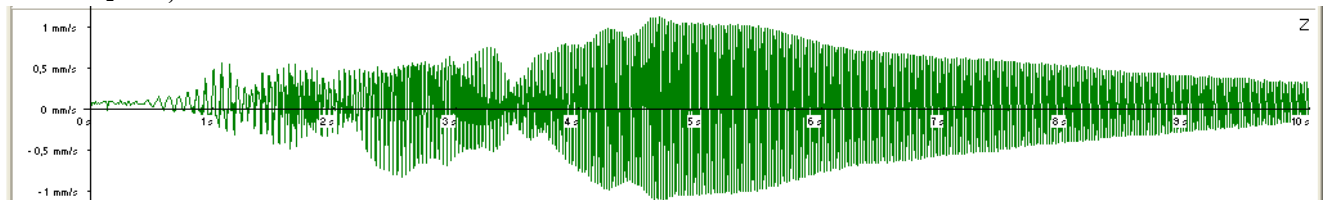
Da bei der vorstehend beschriebenen Überwachung lediglich die Maximalwerte der Ereignisse aufgezeichnet wurden, konnte eine genauere Analyse nicht vorgenommen werden. Es konnte lediglich festgestellt werden, dass für die vertikalen Deckenschwingungen ein leichter Trend zu erkennen ist, dass die Übertragungsfaktoren mit der absoluten Größe der Erschütterungsamplituden ansteigen.

2.2 Spundwandrammung mit Rüttelgerät und Vibrationsverdichtung

Die DIN 4150 gibt in Teil 1 an, dass Übertragungsfaktoren bei Gleichphasigkeit der harmonischen Erregung, z.B. bei Spundwandeinrüttelung oder Vibrationsrammung, wohldefiniert sind.

Keller/Fundament	0,35 mm/s	19 Hz	0,36 mm/s	21 Hz	1,11 mm/s	38 Hz
Dach	0,92 mm/s	29 Hz	0,64 mm/s	21 Hz	3,38 mm/s	18 Hz
Übertragung ?	2,63		1,78		3,05	

Keller $v_z = 1,11 \text{ mm/s}$



Dachgeschoss $v_z = 3,38 \text{ mm/s}$

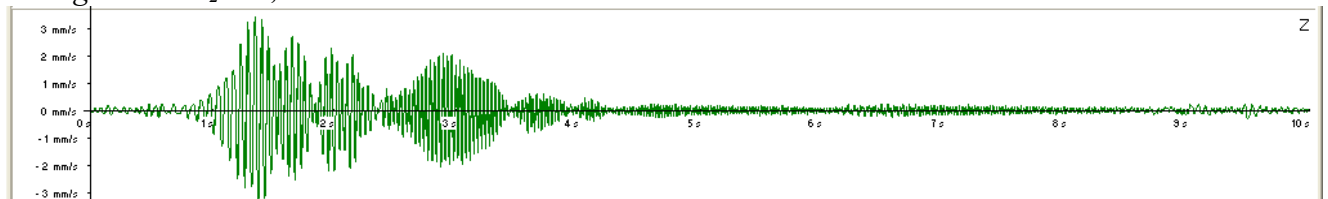


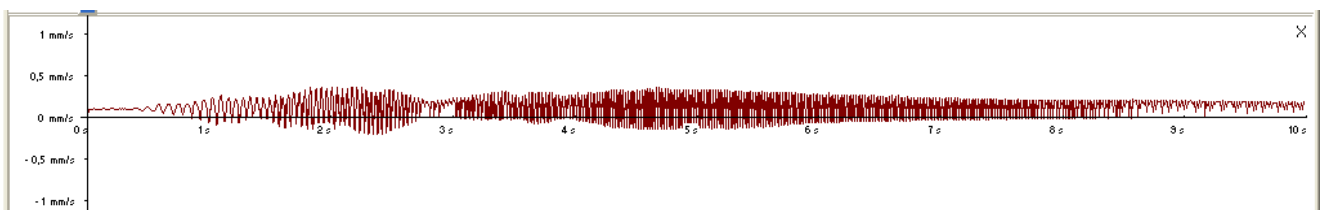
Bild 4 : Erschütterungen bei Spundwandrammung
(Zeitbereich 10 s, Wertebereich oben 1,25 mm/s, unten 4 mm/s)

Beim Anlaufen des Rüttelgeräts zeigt sich eine Resonanzanregung der vertikalen Deckenschwingung im Obergeschoss, wobei sich ein Übertragungsfaktor von ca. 10 ergibt. Beim Übergang zum Dauerbetrieb bei 40 Hz ist die Reaktion im Obergeschoss gering und es ergibt sich ein Übertragungsfaktor von 0,1. Wenn lediglich aus den Maximalwerten der Übertragungsfaktor bestimmt wird, ergibt sich dieser zu 3,05. Wie zu erkennen ist, tritt allerdings der Maximalwert am Fundament

zu einer ganz anderen Zeit auf als der auf der Decke des Obergeschosses. Zwischen diesen Messwerten besteht also gar kein mechanisch definierbarer Zusammenhang.

Auch in den horizontalen Erschütterungen zeigt sich dieser Effekt der ansteigenden Frequenz beim Anfahren des Rüttelgeräts.

Keller $maxv_x = 0,35 \text{ mm/s}$



Dachgeschoss $maxv_x = 0,92 \text{ mm/s}$

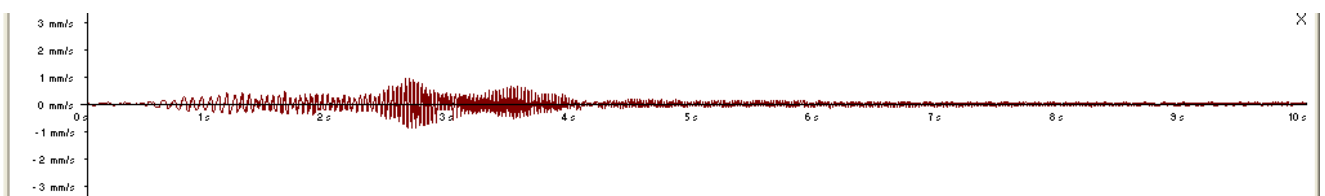


Bild 5 : Erschütterungen bei Spundwanddrummung

Diese Unterschiede in den Übertragungswerten ergeben somit eindeutig aus dem Eigenschwingverhalten des Gebäudes und dem Unterschied zwischen einer erzwungenen Schwingung und einer Anregung im Resonanzbereich.

Bei einer anderen Spundwanddrummung konnte ebenfalls die Resonanzanregung beim Anlaufen festgestellt werden, wobei sich das Verhältnis von Anregungsamplitude zu Reaktionsamplitude nur in Abhängigkeit der Frequenz feststellen lässt. Überraschend ist das Anwachsen der Reaktionsamplitude bei konstanter Frequenz und konstanter Anregungsamplitude (siehe Bild 6). Als ein durch die Dämpfung begrenztes Aufschwingen kann dieses Verhalten nicht erklärt werden, da das Aufschwingen sehr langsam mit vielen Lastwechseln erfolgt, was nur bei einer unbegründet hohen Dämpfung erwartet werden kann. Zudem nimmt im späteren Verlauf der Anregung die Reaktionsamplitude wieder ab (diese nachfolgende Messequenz ist hier nicht gezeigt).

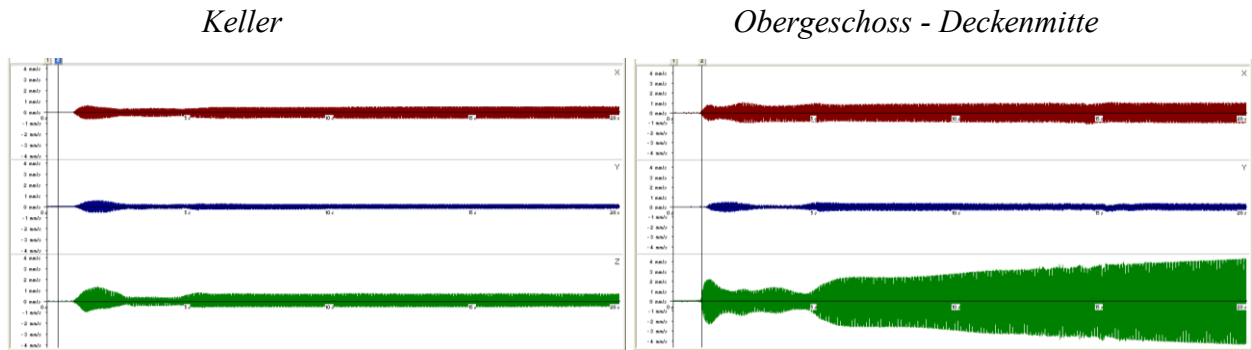


Bild 6 : Spundwanddrummung mit ungewöhnlicher Reaktion in Z-Richtung
(Messbereich 30 Sekunden, Amplitude 4 mm/s)

Gegenüber der Spundwanddrummung ist eine Verdichtung mit Vibrationswalze oder Rüttelplatte zwar ebenfalls durch eine harmonische Anregung dominiert, durch das Hin- und Herfahren und den variierenden Abstand zum Messpunkt sowie die kontinuierliche Veränderung des zu verdichtenden Materials ergibt sich aber eine maßgebliche Beteiligung anderer Frequenzen.

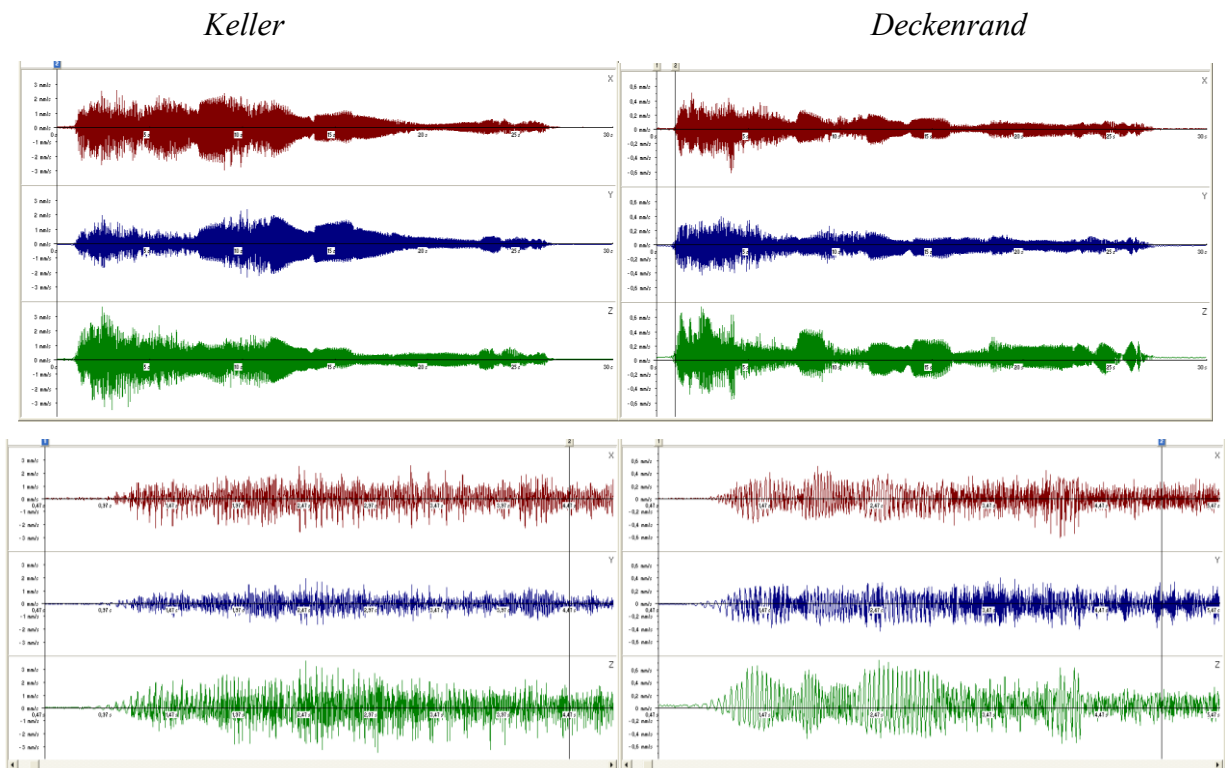


Bild 7 : Anregung durch Rüttelplatte
(gesamte Messzeit oben : 30 sekunden; Anfangsbereich 5 Sekunden unten
Amplitude obere Begrenzung : links 4 mm/s, rechts 0,8 mm/s)

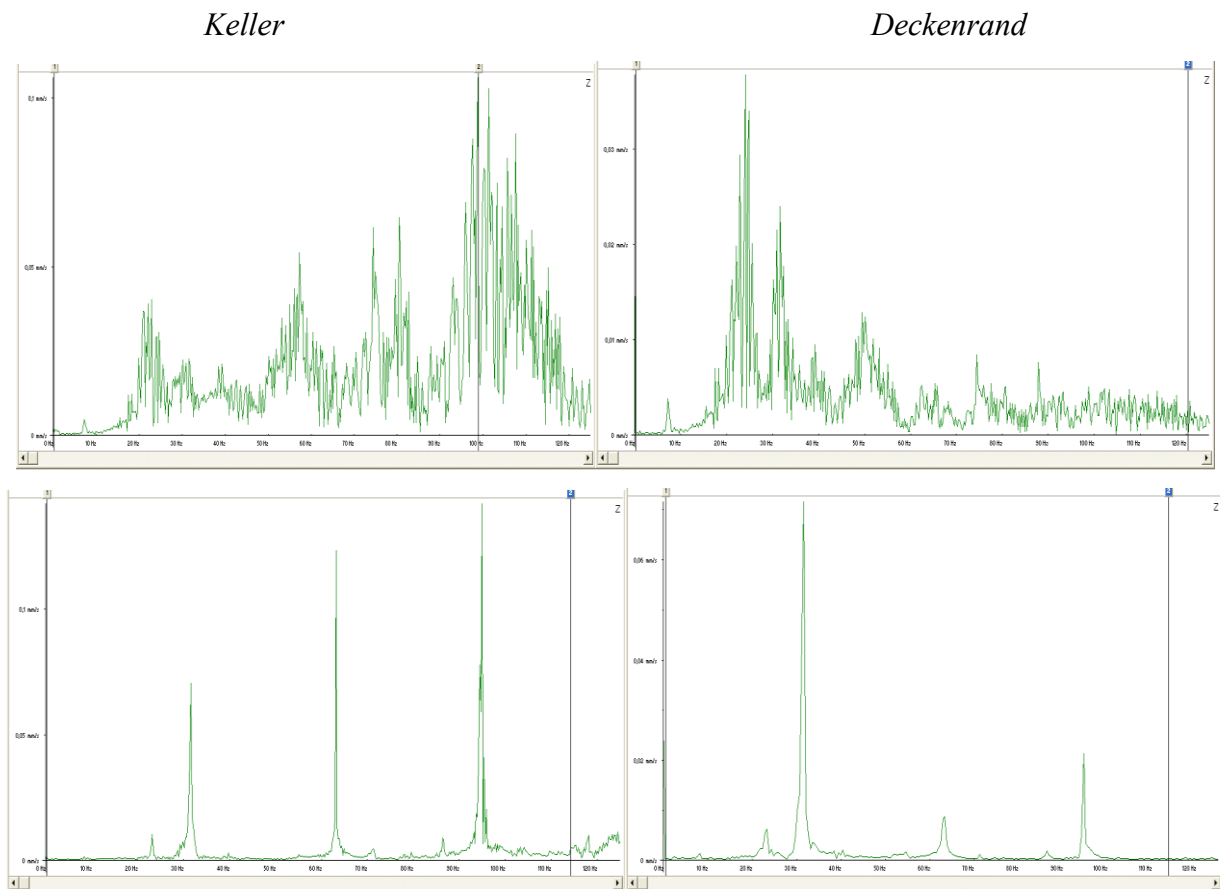


Bild 8 : Anregung durch Rüttelplatte - Amplitudenspektrum - Z-Richtung
(oben : Anfangszeitbereich der Messung, unten : mittlerer Zeitbereich; Frequenzbereich 130 Hz)

Das Amplitudenspektrum zeigt, dass das Bauwerk aus dem Frequenzangebot im wesentlichen die Deckenschwingungen herausfiltert, wobei die Resonanzanregung im Anfangsbereich der Messung, beim Anlaufen des Geräts deutlich ist, während in der Arbeitsfrequenz nur eine geringe Beteiligung der Deckeneigenschwingung zu erkennen ist.

Trotz im wesentlichen harmonischer Anregung ist somit ein Übertragungsfaktor nicht eindeutig definiert. Dies lässt sich auch daran erkennen, dass verschiedene Ereignisse bei einer einfachen Relation der Maximalwerte jeweils unterschiedliche Übertragungsfaktoren ergeben (siehe Tabelle 1).

		VX	VY	VZ
Ereignis 2	Keller	0,62 mm/s	0,44 mm/s	0,74 mm/s
	OG	2,92 mm/s	2,38 mm/s	3,69 mm/s
	Übertragungsfaktor	4,7	5,4	5,0
Ereignis 4	Keller	1,75 mm/s	0,61 mm/s	1,09 mm/s
	OG	1,4 mm/s	1,14 mm/s	1,77 mm/s
	Übertragungsfaktor	0,8	1,9	1,6

Tabelle 1 : Einfache Maximalwertübertragungsfaktoren bei Rüttelrammung

2.3 Untertägige Gewinnungssprengung

Bei einer gewerberechtlich erforderlichen Erschütterungsüberwachung ist die Einhaltung der Messwerte nach DIN 4150 Teil 2 nachzuweisen. Das heißt es darf keine erhebliche Belästigung im Einflussbereich der Erschütterungsausbreitung bei normaler Nutzung der Wohnungen geben. Das hieße aber, dass auch in den am meisten benutzten Räumen gemessen kontinuierlich werden müsste. Das ist aber nicht möglich, da bei der Benutzung der Räume durch Hin- und Hergehen häufig höhere Erschütterungen auftreten als durch die Sprengungen. Die erhebliche Belästigung ergibt sich daraus, dass die Erschütterungseinwirkung wahrgenommen wird, wenn im übrigen Ruhe im Gebäude ist. Um eine Überwachung zu ermöglichen muss somit eine Messstelle gewählt werden, an der es möglichst wenige Störungen gibt. Die möglichen Erschütterungen in Deckenmitte der Wohnräume müssen dann durch Übertragungsfaktoren abgeschätzt werden.

Bei einer ersten Auswertung in einem modernen Gebäude mit Betondecken zeigten sich bei jeder Sprengung unterschiedliche Übertragungsfaktoren Keller-Obergeschossdecke (siehe Tabelle 2).

Eine Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Erschütterungen ergab, dass die Maximalwerte auf den Decken unabhängig waren von den Maximalwerten im Keller.

Untertägige Gewinnungssprengung - 200 m unter Gelände

Messung 3

	z	z	x	x	y	y
OG	0,711	-0,627	0,779	-0,916	0,707	-0,591
Keller	0,117	-0,145	0,162	-0,230	0,216	-0,179
Übertragung	6,077	4,324	4,809	3,983	3,273	3,302
Absolutwerte	6,077		5,654		3,950	
Amplituden	5,107		4,324		3,286	

Messung 5

	z	z	x	x	y	y
OG	0,646	-0,626	1,039	-0,990	0,598	-0,537
Keller	0,121	-0,180	0,214	-0,213	0,252	-0,189
Übertragung	5,339	3,478	4,855	4,648	2,373	2,841
Absolutwerte	5,339		4,878		3,164	
Amplituden	4,226		4,752		2,574	

Tabelle 2 : Übertragungsfaktoren bei Gewinnungssprengungen

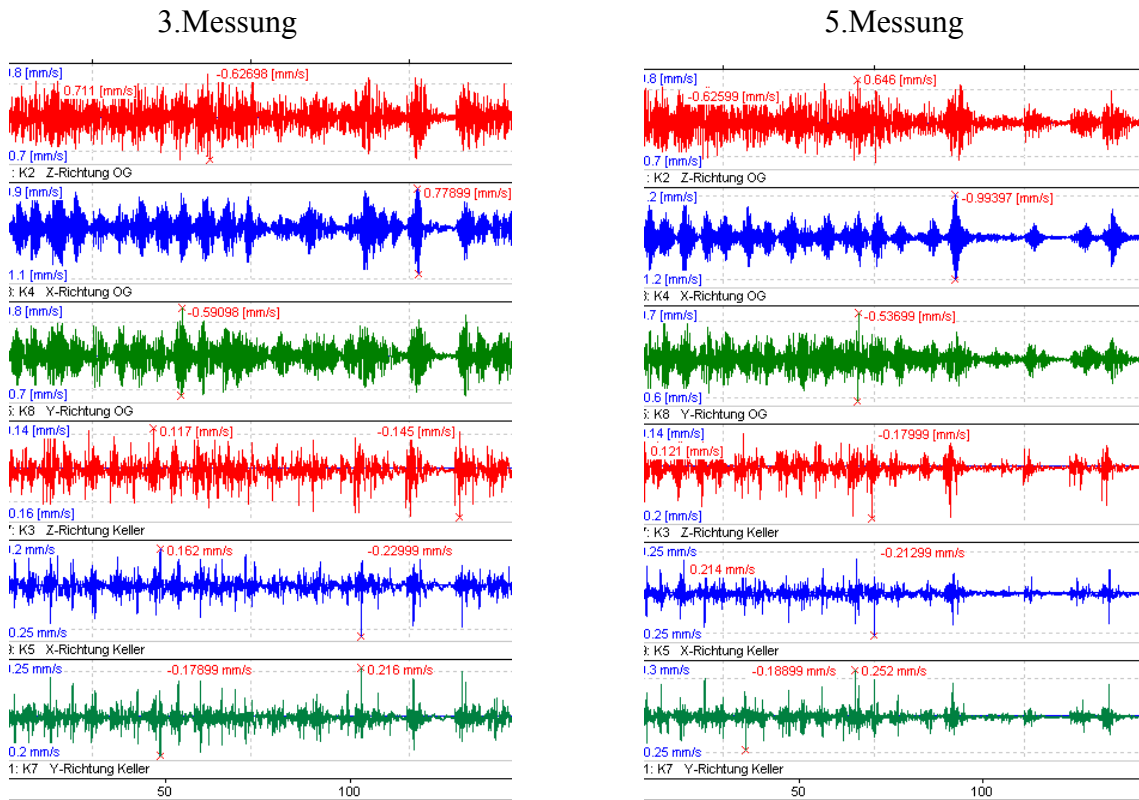
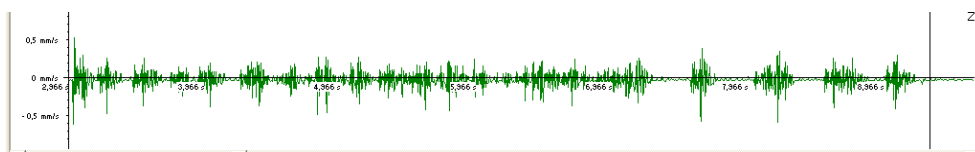


Bild 9 : Messung Keller und OG bei Gewinnungssprengungen

Die jeweiligen Maximalwerte sind in Bild 9 durch Kreuze in den Zeitverläufen gekennzeichnet.

Bei einem anderen Gebäude mit weichen Holzbalkendecken zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den Maximalamplituden bei einer Sprengung, indem die Maximalwerte jeweils bei der ersten Zündung auftreten.

Keller Vz max = 0,58 mm/s



Dachgeschoss max Vz = 1,56 mm/s

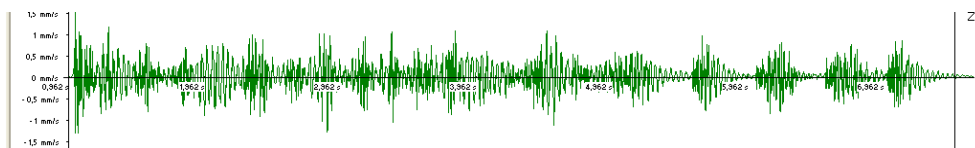
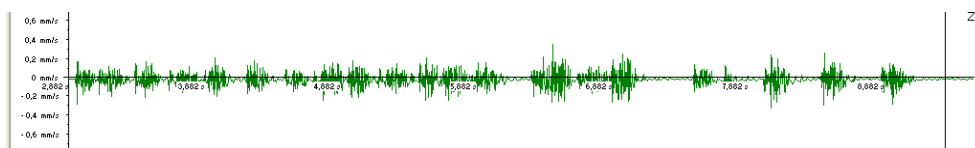


Bild 10 : Schwinggeschwindigkeiten bei Gewinnungssprengungen

Bei einer späteren Sprengung treten die Maximalwerte auch bei der selben Zündung auf (siehe Bild 11).

Keller : max Vz = 0,34 mm/s



OG max Vz = 1,69 mm/s

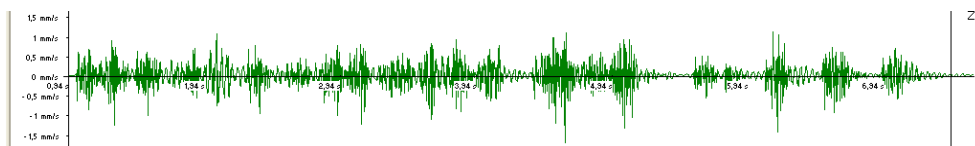
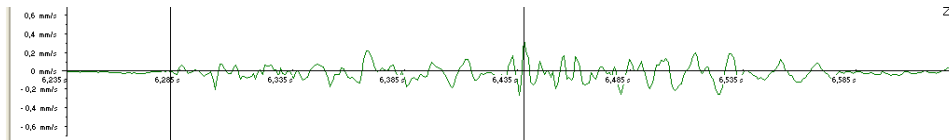


Bild 11 : Schwinggeschwindigkeiten bei Gewinnungssprengungen

Eine Spreizung im Zeitbereich zeigt aber, dass zwischen den beiden Maximalwerten kein direkter mechanischer Zusammenhang besteht.

Ausschnitt Keller mit max $V_z = 0,34 \text{ mm/s}$, $\Delta T = 0,157 \text{ sec}$, Zeitbereich 0,4 sec



Ausschnitt OG mit max $V_z = 1,69 \text{ mm/s}$, $\Delta T = 0,241 \text{ sec}$, Zeitbereich 0,44 sec

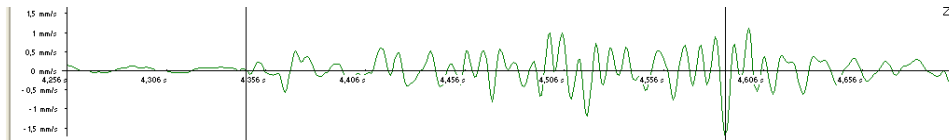


Bild 11 : Schwinggeschwindigkeiten bei Gewinnungssprengungen

Die Festlegung der Übertragungswerte um eine Überwachung durch die Messungen im Keller zu ermöglichen, ist also für jedes Gebäude individuell aus mehreren Sprengungen zu bestimmen.

2.3 Straßenverkehr

Aufgrund einer Beschwerde wegen Risschäden waren Erschütterungen aus Straßenverkehr zu bestimmen. Bei einer Messung von 9 Uhr bis 18 Uhr wurden ca. 120 Ereignisse bei Überschreitung der Triggerschwelle von 0,1 mm/s im Keller aufgezeichnet. Das Gebäude liegt ca. 35 m entfernt von einer Hauptverkehrsstraße mit einer etwas unregelmäßigen Straßendecke. Obwohl das Gebäude, ein Einfamilienhaus, nicht direkt an der Straße lag und sogar durch ein vierstöckiges Mehrfamilienhaus mit Kellergaragen gegenüber der Straße abgeschirmt war, konnte durch die Messung bestätigt werden, dass die Erschütterungen im Arbeitszimmer des Bewohners deutlich spürbar sind.

Zur Beurteilung der Erschütterungen nach DIN 4150 Teil 2 und Teil 3 wurde im Keller (Fundamentanhaltswerte) und in der Mitte der Decke des Arbeitszimmers gemessen, da dort die Erschütterungen am deutlichsten wahrgenommen wurden.

Eine Sortierung der Maximalwerte der aufgenommenen Zeitverläufe zeigt einen deutlichen Trend, dass die Übertragungsfaktoren bei kleineren Anregungsamplituden geringer werden.

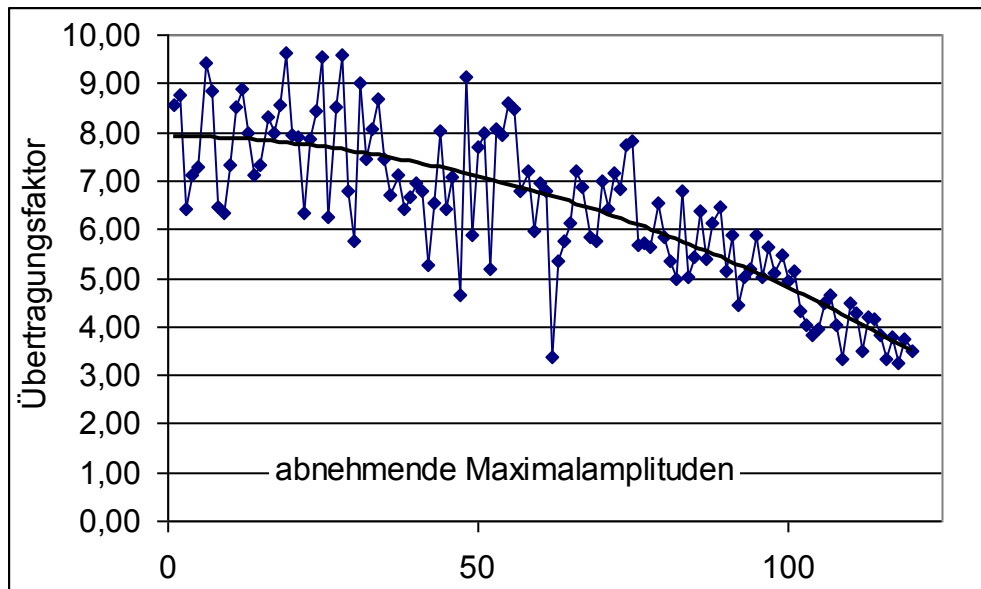


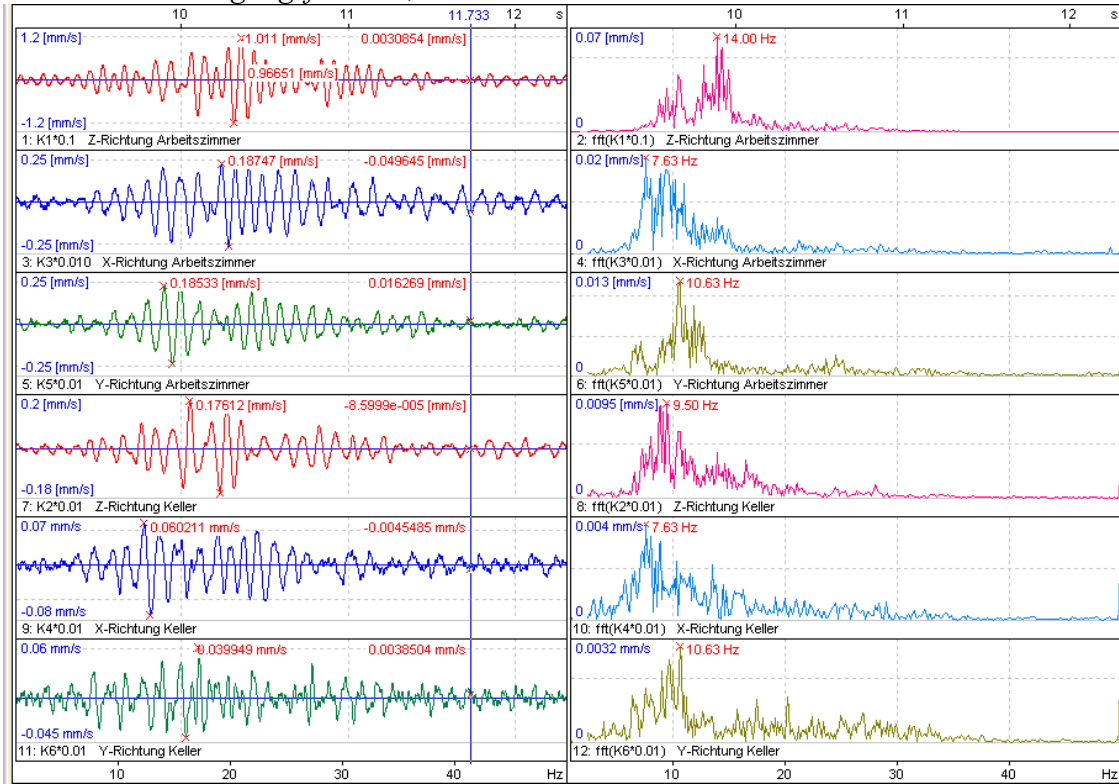
Bild 12 : Übertragungsfaktoren bei Straßenverkehr

Während dieses Verhalten auf einen nichtlinearen Zusammenhang hindeutet, der bei den geringen Dehnungen nicht zum üblichen mechanischen Modell passt, lässt sich die große Streubreite durch eine genauere Betrachtung des Zeitbereichs erklären.

Bei zwei Messungen mit Amplitude 1 mm/s im Arbeitszimmer ergab sich für die eine ein Übertragungswert von 5,74 und für die anderen von 9,02. Wird im Zeitverlauf die Z-Richtung betrachtet, zeigt sich für die eine Messung ein unregelmäßiger Verlauf der Erschütterungen im Keller, bei der Messung mit Übertragungsfaktor 9,02 zeigt sich eine an-/abschwellende Schwingung, die zudem noch im Frequenzbereich der Eigenschwingung der Decke entspricht.

Die Streuung in den Übertragungswerten ist somit den unterschiedlichen Anregungen durch die LKWs zuzuschreiben. Je nach Fahrzeugkonstruktion und wahrscheinlich auch Geschwindigkeit ergibt sich für den Messpunkt Fundament eine unterschiedliche Anregungscharakteristik.

Straßenverkehr - Übertragungsfaktor 5,74



Übertragungsfaktor 9,02

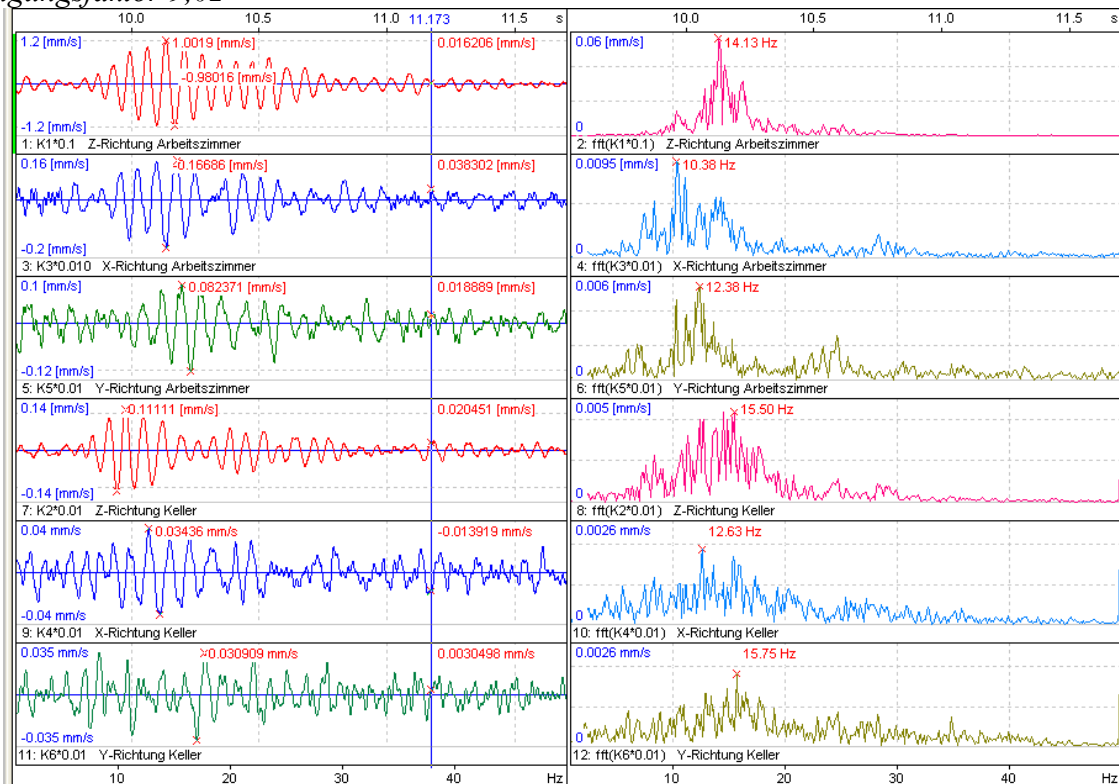


Bild 13 : Deckenanregung bei Straßenverkehr

3. Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der Übertragungsfaktoren zeigt, dass vielfach auch für instationäre Anregung verwendete konstante Werte jeweils einer genaueren Bestimmung bedürfen. Auch bei gleichartigen Anregung am Fundament können die Unterschiede zu unterschiedlichen Schwingungen auch der Decken führen, wie anhand von Gewinnungssprengungen und Straßenverkehr gezeigt wird.

Weiterhin lassen sich Zusammenhänge zwischen Erschütterungsamplituden und Übertragungsfaktoren bestimmen, die durch ein lineares mechanisches Modell nicht erklärt werden können.

Die lineare Modellbildung kann zwar Unterschiede bei resonanznaher Anregung im Anfahrbereich von Vibrationsgeräten erklären, nicht jedoch die auch bei konstanter Anregung auftretenden Abweichungen in der Reaktion. Auch ein solches Verhalten kann durch ein lineares Modell nicht erklärt werden.