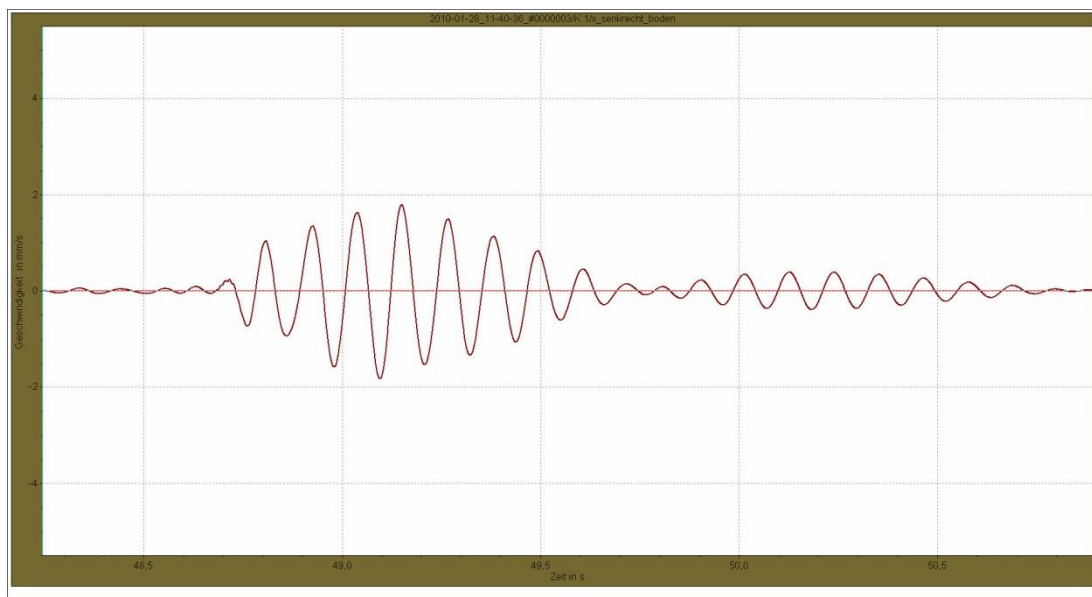


# Erschütternde Umstände

## Schwingungsbelastung von Kunst- und Bauwerken



MEDA 9.001

Diplomarbeit  
vorgelegt am 27.03.2010  
von Andrea Gmach

Prüfer: Prof. Dr. Andreas Burmester  
Dr. Andreas Kratzer

## Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.“

München, den 27. 03. 2010

## Danksagung

- Für die unentgeltliche Überlassung des Meßequipments  
Abteilung Messtechnik (Ingenieurbau)  
Technisches Rathaus München  
Friedenstrasse 40  
(089) 233 61611
- Für die unentgeltliche Überlassung der Auswertungssoftware MEDA  
Wölfel Meßsysteme Software GmbH + Co. KG  
97201 Höchberg
- Für Rat und Tat:
  - Bayerisches Nationalmuseum mit Sammlung Bollert
  - Kunstbau
  - Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser Gärten und Seen
  - Schloss- und Gartenverwaltung Nymphenburg
  - Neue Pinakothek
- Prof. Dr. Andreas Burmester
- Dr. Andreas Kratzer
- Eric Kürbs
- Allen, die diese Arbeit möglich gemacht haben.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Einleitung.....</b>	<b>Seite 2</b>
<b>Auswahl der Meßobjekte.....</b>	<b>Seite 3</b>
<b>Überblick Durchgeführte Messungen.....</b>	<b>Seite 7</b>
<b>Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>Seite 13</b>
<b>Eigenfrequenz – Resonanz und Dämpfung .....</b>	<b>Seite 16</b>
<b>Übertragungswege von Erschütterungen .....</b>	<b>Seite 26</b>
<b>Weiterleitung von Erschütterungen-Bestimmende Einflüsse.....</b>	<b>Seite 27</b>
<b>Das Meßequipment.....</b>	<b>Seite 28</b>
<b>Das Meßverfahren.....</b>	<b>Seite 31</b>
<b>Die DIN 4150.....</b>	<b>Seite 34</b>
<b>Erschütterungsbelastung durch Erdbeben .....</b>	<b>Seite 37</b>
<b>Erschütterungen durch Bauarbeiten.....</b>	<b>Seite 38</b>
<b>Belastung durch Verkehrserschütterungen.....</b>	<b>Seite 47</b>
<b>Transportsimulation – Einfluss des Fahrbelags.....</b>	<b>Seite 55</b>
<b>Tranportsimulation – Überwinden von Höhenunterschieden.....</b>	<b>Seite 59</b>
<b>Transportsimulation Depot/Ausstellung.....</b>	<b>Seite 62</b>
<b>Transportsimulation – Einfluss der Fahrt auf die umgebende Baustruktur.....</b>	<b>Seite 73</b>
<b>Belastung durch den Erschütterungseintrag von Besuchern.....</b>	<b>Seite 78</b>
<b>Propagation von Erschütterungen.....</b>	<b>Seite 89</b>
<b>Schadensmechanismen.....</b>	<b>Seite 96</b>
<b>Der Schadensnachweis.....</b>	<b>Seite 102</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>Seite 104</b>
<b>Ausblick.....</b>	<b>Seite 106</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>Seite 107</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>Seite 108</b>
<b>Literaturverzeichnis und Abbildungsnachweis.....</b>	<b>Seite 113</b>



## Einleitung

Der Titel „Erschütternde Umstände“ mag auf den ersten Blick reißerisch und übertrieben klingen, allerdings ist es an der Zeit, das bisher selbst auf dem Gebiet der Präventiven Konservierung stiefmütterlich behandelte Thema „Vibrationen und Stöße“ dem Fachpublikum näher zu bringen. Denn, ob wir uns dessen nun bewusst sind oder nicht, Kunstwerke und Baudenkmäler sind wie alles Andere um uns herum ständigen Erschütterungen ausgesetzt. Hört man sich unter Restauratoren, Denkmalpflegern und Museumspersonal um, folgen die Antworten zumeist einem einheitlichen Schema: Im Gegensatz zu anderen Schadensmechanismen, ausgelöst durch ungeeignete Klima-/Lichtsituationen und biogenen Befall ist die Sorge hinsichtlich Erschütterungen eher unterbewertet. Dass liegt zum Einen an nicht vorhandenen Grenzwerten und Richtlinien, zum Anderen an dem stark physikalisch geprägten theoretischen Hintergrund, der eher abschreckend wirkt. Anders als bei Licht und Klima, deren Gesetze, Tendenzen und Mechanismen bereits mannigfach an Fallbeispielen aus dem Museumsalltag veranschaulicht und allgemein verständlich formuliert wurden, stellen hier die Hauptinformationsquellen die Ingenieurwissenschaften, wie Schwingungsmechanik, Bau- und Bodendynamik, Messtechnik, um nur einige zu nennen, dar. Fachliteratur aus dem Gebiet der Präventiven Konservierung belässt es meist bei dem Rat, den Umgang mit Kunstobjekten möglichst erschütterungsarm zu gestalten. Detaillierter bearbeitet wurde das Thema auf dem Gebiet der „Kunsttransporte außer Haus“ von GREEN, MARCON, MECKLENBURG, MERVIN, SAUNDERS und STÜHLER, um die Wichtigsten zu nennen. In diesen Arbeiten wurden bereits konkrete Werte erhoben. Bei THICKETT finden sich Messungen während Bauvorhaben an Museumsgebäuden. Das vor 20 Jahren verwendete Meßinstrumentarium ist vor allem in puncto Datenverarbeitung den heutigen Möglichkeiten weit unterlegen. Die sich daraus ergebenden Werte sind auch hinsichtlich eines unzulänglich beschriebenen Meßaufbaus teils unvollständig. Daher können Sie in dieser Form nicht ohne Skepsis übernommen werden und müssen folglich vor dem Hintergrund dieser Unzulänglichkeiten interpretiert werden. Parallel zur vorliegenden Arbeit beschäftigt sich WEI et. al. mit der Entwicklung berührungsfreier Methoden zur Messung von Schwingungen an Leinwänden via Laser. Die Praktikabilität dieses Meßaufbaus bleibt allerdings in der Folgezeit noch zu beweisen.

Mit Hilfe der Abteilung Meßtechnik des Technischen Rathauses der Stadt München, das mit Meßequipment und Know-how erheblich zu dieser Arbeit beigetragen hat, war es möglich, in fünf Münchner Museen und Sammlungen, bzw. historischen Bauten Erschütterungsmessungen durchzuführen. Die Fragestellung lautet: Wie stark sind Kunstobjekte und Bauten durch Erschütterungen belastet? Sie bildet die Grundlage, um im Anschluss daran das Schadenspotential für einzelnen Materialgruppen und Kunstgattungen abzuschätzen und schließlich Grenzwerte bzw. Richtlinien für den musealen und denkmalpflegerischen Gebrauch festzuschreiben. Die Auswahl (Bayerisches Nationalmuseum mit Sammlung Bollert, Kunstbau, Neue Pinakothek und Nymphenburg Hauptschloss) wurde derart gestaltet, dass sich an diesen Häusern verschiedene Emissionsquellen und bauliche Gegebenheiten untersuchen ließen. Mit den in dieser Arbeit gemessenen Situationen soll dem Restaurator ein geeignetes Instrumentarium an die Hand gegeben werden. Grundlagen und dominante Mechanismen der Schwingungsmechanik werden in einer gebündelten Zusammenstellung besprochen, wobei sich durchaus hauseigene Probleme in einem der vielen, teils abstrahierten Fallbeispielen wiederfinden lassen. Die dazugehörigen Auswertetabellen folgen jeweils themenbezogen den entsprechenden Kapiteln. Im digitalen Anhang finden sich die mittels Datenblättern

visualisierten Messungen, wobei die Zeitsignale sowohl in Schwinggeschwindigkeit als auch in Schwingbeschleunigung den dazugehörigen Frequenzanalysen gegenübergestellt sind. Die Meßprotokolle mit allen relevanten Daten können ebenfalls dem digitalen Anhang entnommen werden. Einer kreativen und kritischen Adaption der Messungen zu einer ersten Einschätzung der eigenen Situation steht demnach nichts im Wege. Sollte dann ein Bedarf an weiteren Untersuchungen oder einer Beratung durch Fachleute auf dem Gebiet der Schwingungsanalyse erkannt werden, so können die Fragestellungen gezielt formuliert und den Bedürfnissen entsprechend ergebnisorientiert bearbeitet werden.

## Auswahl der Meßobjekte

Ziel der Arbeit ist es, so viele Meßwerte als möglich mit unterschiedlichen Variablen zu sammeln, um die Übertragbarkeit auf möglichst viele Situationen im Museumsalltag zu ermöglichen. Deshalb galt es, bei der Auswahl der Gebäude mit dem darin aufbewahrten Sammlungsgut auf Vielfalt zu achten. Als Kriterien dienen die Bauweise der Gebäude, das Bodenprofil auf dem sie erbaut wurden, ihre Exposition gegenüber Straßen- und Schienenverkehr, das Besucheraufkommen, die Infrastruktur der Häuser und die Sammlungsschwerpunkte.

Das Bayerische Nationalmuseum/Sammlung Bollert  
 Prinzregentenstraße 3  
 80538 München

Bauweise: Stahlbetondecken; für Sammlung Bollert nicht gesichert  
 Sammlungsgut: Kunsthandwerk/Verschiedenes/historische Bausubstanz  
 Boden: Graue Auenrendzina (feinsandige Flußsedimente)

Verkehr: Prinzregentenstraße

Lärmkarten: Straßenlärm: Tag 55–über80 dB(A) Nacht 55–75 dB(A)  
 Schienenlärm: Tag 35–65 dB(A) Nacht 30–60 dB(A)  
 Gewerbelärm: Tag 0 dB(A) Nacht 0 dB(A)<sup>1</sup>



Abbildung 1 Bayerisches Nationalmuseum mit Sammlung Bollert;  
 Auszug aus den Münchner Lärmkarten

Im direkten Umfeld des Bayerischen Nationalmuseums und der Sammlung Bollert, die unmittelbar an der Prinzregentenstraße liegt, lassen sich die höchsten Lärmpegel durch Straßenverkehr messen. Obwohl der angegebene dB(A) Wert nur ein Maß für das menschliche Lärmempfinden darstellt und dementsprechend frequenzabhängig modifiziert<sup>2</sup> ist, kann doch eine Tendenz für die Höhe der aus dem Straßenverkehr erwachsenden Erschütterungen abgeleitet werden, vor allem da dieser Wert nur zu einem qualitativen

<sup>1</sup> Lärmkarten München 2007.

<sup>2</sup> Innerhalb des Hörbereiches empfinden Menschen hohe Töne des gleichen Schalldruckes als lauter und damit als unangenehmer als tiefe Töne. Diesem Umstand wird in der Größe dB(A) Rechnung getragen. GÖBEL 1998.

Vergleich zwischen den ausgewählten Häusern herangezogen wird. Damit haben das Bayerische Nationalmuseum und die Sammlung Bollert die höchsten Lärmpegel der hier thematisierten Einrichtungen, gleichbedeutend mit der größten Verkehrsbelastung und damit auch den höchsten zu erwartenden Eintrag an Erschütterungen durch den Straßenverkehr. Da die Sammlung Bollert näher an der Straße liegt, sollten die Auswirkungen des Straßenverkehrs auf die Schwingungsbelastung an und in Gebäuden sinnigerweise dort aufgezeigt werden können. Eine weitere Besonderheit des Hauses stellen die teilweise in alten Bunkeranlagen aus dem 2. Weltkrieg untergebrachten Depots dar. Von besonderem Interesse ist das künftige Steindepot des Museums, in dem Messungen an Boden, Wand und Stützpfählern möglich sind.

Durch seine Entstehungsgeschichte als Kunstgewerbemuseum sind im Bayerischen Nationalmuseum alle Arten an Kunstgegenständen vertreten. Dem Raum- und Ausstellungskonzept dieser Sammlungen folgend, wurde auch der Ausstellungsraum themengerecht gestaltet: Daher sind im Museum verschiedene historische Bodenbeläge verarbeitet. Diese können auf ihr Verhalten gegenüber Besucheremissionen, Transportwägen und auf ihre Eigenfrequenzen hin untersucht werden. Schließlich finden sich in den Häusern unterschiedlichste Sockel- und Vitrinenkonstruktionen, an denen sich die Weiterleitung von Erschütterungen und ihr Resonanzverhalten ablesen lassen.

Der Kunstbau  
Königsplatz 1  
80333 München

Bauweise: reiner Stahlbetonbau  
Sammlungsgut: Graphik/Gemälde/Skulptur  
Besonderheiten: kurzfristige Ausstellungszeiträume  
Ausstellungsräume 1.UG in U-Bahnzwischengeschoss  
Bauarbeiten Lenbachhaus

Boden: Pararendzina aus carbonatreichem Schotter

Verkehr: U2 Zwischengeschoss

Lärmkarten:	Straßenlärm: Tag 55–75 dB(A)	Nacht 45–65 dB(A)
	Schienenlärm: Tag 40–45 dB(A)	Nacht 30–35 dB(A) <sup>3</sup>
	Gewerbelärm: Tag 0 dB(A)	Nacht 0 dB(A) <sup>4</sup>



**Abbildung 2**  
Der Kunstbau; Auszug aus  
den Münchner Lärmkarten

<sup>3</sup> Hier ist nur der oberirdisch messbare Lärm aufgeführt. Für den Kunstbau ist folglich der Lärmeintrag durch den Straßenverkehr überbewertet, der für den Schienenverkehr jedoch unterbewertet.

<sup>4</sup> Lärmkarten München 2007.

Aufgrund seiner einzigartigen Lage im Zwischengeschoss der U-Bahnstation Königsplatz bietet der Kunstbau die Möglichkeit, die Auswirkungen der U-Bahn auf die Erschütterungsbilanz von Exponaten zu beurteilen, umso mehr, da im Bereich einer Haltestation sowohl Bremsvorgang als auch Beschleunigung stattfinden. Bei diesen Fahrmanövern werden in besonderem Maße Kräfte freigesetzt. So steht der Kunstbau an der Spitze der erfassten Einrichtungen, was die Belastungen durch U-Bahnemissionen betrifft. Als bauliche Besonderheit ist die ca. 25 m lange, freitragende Rampe anzusehen, die den Eingangsbereich mit dem Ausstellungssaal verbindet. In Ermangelung einer Treppe wird der gesamte Besucherstrom über diese abgewickelt. Zu klären bleibt also, in wieweit dieses Bauteil die Baustruktur und Ausstellungsstücke beeinflusst. Den Auswirkungen einer auf der, der Betonwand vorgesetzten Wandverkleidung, angebrachten Klanginstallation wird ebenfalls auf den Grund gegangen.

### Die Neue Pinakothek

Barer Str. 29  
80799 München

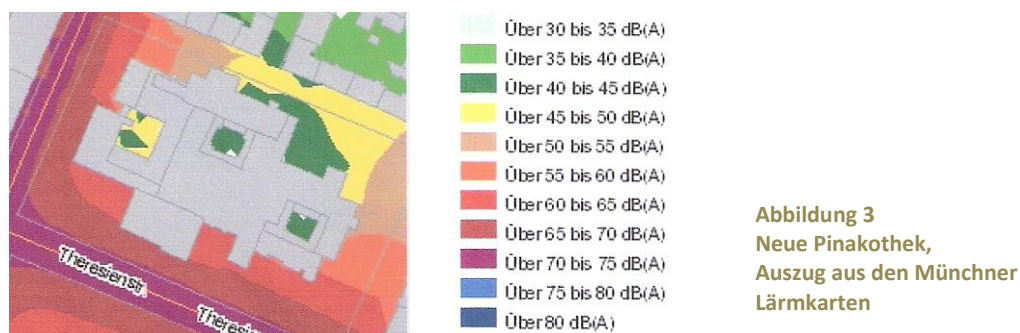
Bauweise: verkleideter Stahlbetonbau

Sammlungsgut: Gemälde/Skulptur

Boden: Pararendzina aus carbonatreichem Schotter

Verkehr: Tram, Seite Barer Straße

Lärmkarten: Straßenlärm: Tag 55–70 dB(A)      Nacht 45–65 dB(A)  
 Schienenlärm: Tag 45–65 dB(A)      Nacht 35–65 dB(A)  
 Gewerbelärm: Tag 0 dB(A)      Nacht 0 dB(A)<sup>5</sup>



Die Neue Pinakothek ist ähnlich starkem Straßenlärm wie das Bayerische Nationalmuseum ausgesetzt, zusätzlich verkehren die Tram 27 sowie die Buslinie 100 regelmäßig an der, dem Museum zugewandten Straßenseite der Barer Straße. Dort befinden sich an der Ecke Theresienstr./Barer Str. die Haltestellen Pinakotheken. Nachdem erst im letzten Jahr die Fahrbahn und der Unterbau samt Gleisbett saniert wurden, stellt sich die Frage, ob die durch die Trambahn induzierten Schwingungen im Gebäude noch messbar sind.<sup>6</sup> Überdies verfügt die Gemäldegalerie über diverse, bereits nach den Empfehlungen der Fachgremien

<sup>5</sup> Lärmkarten München 2007.

<sup>6</sup> Mündliche Auskunft Abteilung Ingenieurbau Technisches Rathaus München.

der Restauratoren modifizierte Transportwägen für Bildformate verschiedener Größen.<sup>7</sup> Diese können in einem nachgestellten Transportvorgang Depot/Sammlung verglichen werden. Dabei können auch Effekte des in großen Häusern obligatorischen Lastenaufzugs und die für die Neue Pinakothek als bauliche Besonderheit zu wertenden Rampengänge untersucht werden. Gleichfalls von Interesse sind die Gitterziehwände zum platzsparenden Hängen in den Gemäldedepots.

## Nymphenburg

### Hauptschloss und Orangerie

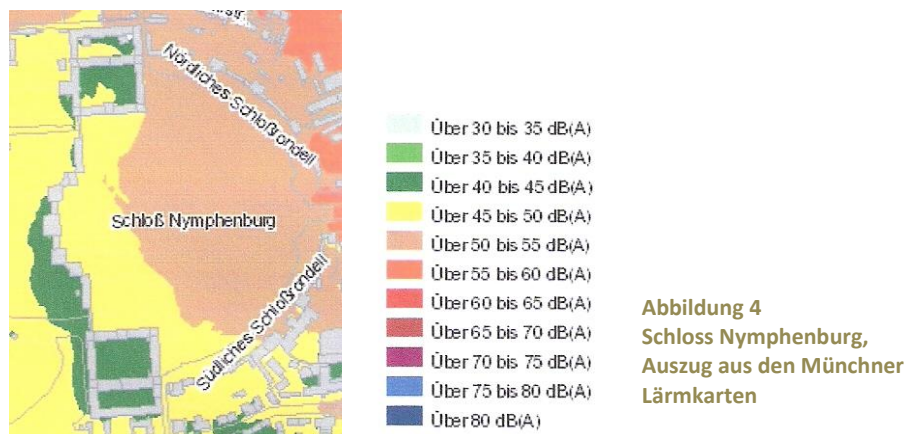
Bauweise: Ziegelbau mit Holzbalkendecken

Samlungsgebiet: historische Bausubstanz/Ausstattung

Boden: Ackerpararendzina

Verkehr: nur mit Ausnahmegenehmigung

Lärmkarten:	Straßenlärm: Tag 45–50 dB(A)	Nacht 35–40 dB(A)
	Schienenlärm: Tag 35–40 dB(A)	Nacht 30–35 dB(A)
	Gewerbelärm: Tag 0 dB(A)	Nacht 0 dB(A) <sup>8</sup>



Durch seine verkehrsisolierte Lage ist in Nymphenburg der direkte Einfluss der von Besuchern induzierten Erschütterungen besser zu bewerten. Außerdem können die dort gemessenen Intensitäten zu einem Vergleich des Einflusses der verschiedentlichen Bauart von Geschossdecken auf die gemessenen Erschütterungen herangezogen werden. Damit kann die Frage geklärt werden, ob nun Holzbalkendecken oder Stahlbetondecken leichter zum Schwingen angeregt werden, historische Gebäude also mehr unter Erschütterungen leiden als ihre moderneren Nachfolger.

<sup>7</sup> MECKLENBURG 1991; STÜHLER 1988; STOLOW 1979.

<sup>8</sup> Lärmkarten München 2007.



## Physikalische Grundlagen

Die korrekten physikalischen und mathematischen Modelle von Erschütterungen, ihrer Entstehung, ihrer Form, ihrer Ausbreitung und der Veränderungen, die sie dabei erfahren, werden umso komplexer, je weiter sie sich der Realität annähern. Was bei homogenen, neuwertigen, d.h. keinen Alterungsphänomenen unterliegenden Materialien leicht zu beschreiben ist, wird für ein gealtertes, vielschichtiges und aus heterogenen Naturstoffen aufgebautes Kunstwerk oder Baudenkmal schnell zu einer schier unlösbaren Aufgabe. Deshalb werden im Folgenden lediglich die wichtigsten Grundlagen geschaffen und die benötigten Größen zur Beschreibung von Erschütterungen und der Ableitung des daraus erwachsenden Schadenspotentials beschrieben. Die Arbeit beschränkt sich darauf, Tendenzen und maßgebende Einflüsse zu nennen und im direkten Zusammenhang mit stark vereinfachten Bildern beispielhaft zu erklären sowie anhand der Meßwerte zu belegen.<sup>9</sup> Zugunsten der Verständlichkeit wurde ein gewisses Maß an Redundanz bewusst in Kauf genommen.

Erschütterungen sind nichts anderes als eine Vielzahl an Schwingungen/Wellen die von den unterschiedlichsten Quellen ausgehen, sich wandeln und überlagern. Daher verlieren sie ihre regelmäßige Gestalt, wie wir sie etwa von harmonischen Schwingungen kennen und bilden eher chaotische Muster. Deren Einzelkomponenten können wir nicht mehr auf einen Blick erfassen und ohne die Hilfe datenverarbeitender Systemen klassifizieren. Im Grunde werden aber auch diese Signale wie ihre harmonischen Verwandten und alle anderen wellenartigen Phänomene über die Komponenten jeder Schwingung beschrieben. Dabei handelt es sich um einen Bewegungsvorgang, der, da es sich um dynamische und keine statischen Vorgänge handelt, über eine bestimmte Zeitspanne hinweg betrachtet wird. In dieser Zeitspanne tritt eine Änderung ein. Bei einer Schwingung bezieht sich diese Änderung auf die Position eines Teilchens. Startend an einem Ruhepunkt, wird dieses nach oben bis zum Umkehrpunkt ausgelenkt, durch den Ruhepunkt in entgegengesetzter Richtung nach unten und zurück, bis sich das Teilchen wieder in seine Ruhelage eingependelt hat. Diese Änderung aus der Ruhelage/Amplitude wird in der Terminologie der Erschütterungen als Auslenkung bezeichnet. Eine sinnvolle Angabe bildet hier allerdings nur die maximale Auslenkung, da alle anderen Wegpunkte beim Hin- und Herschwingen mehrfach passiert werden und daher nicht eindeutig zuordenbar sind. Im Falle einer Leinwand bezieht sich die maximale Auslenkung, im Falle des ersten Schwingmodus, auf den Mittelpunkt der Leinwand. Bei der konvexen bzw. konkaven Durchbiegung (Hin- und Herschwingen) der Leinwand erfährt er die größte Auslenkung aus der Ruhelage.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> RÜCKER 2011.

<sup>10</sup> Weitere Schwingmodi sind unter dem Begriff Chladnische Klangfiguren im Glossar zu finden.

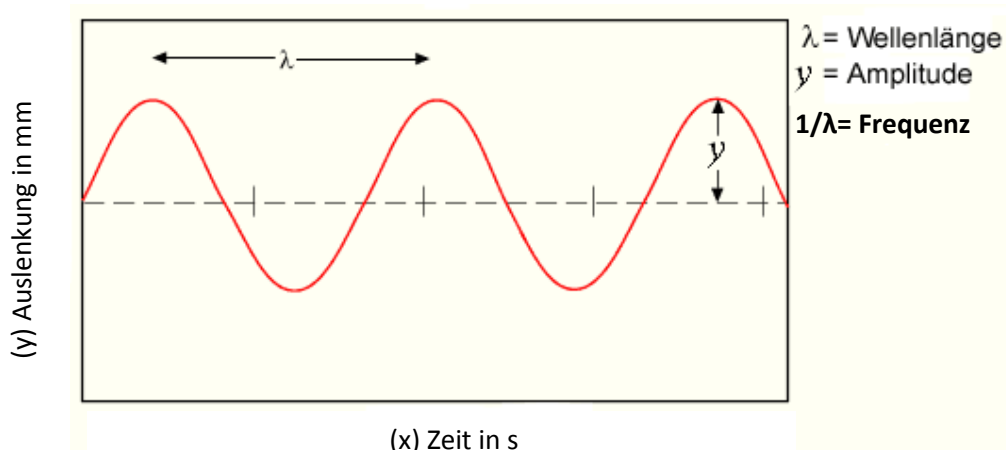


Abbildung 5 Eine Harmonische Schwingung und ihre Kenngrößen, GÖBEL 1998

Das einmalige Durchlaufen der einzelnen Positionen, bzw. x-Koordinaten bis zurück in die Ruhelage beschreibt einen Schwingzyklus. Die Frequenz einer Schwingung zeigt an, wie oft ein Schwingzyklus pro Sekunde [Hz] durchlaufen wird. Je höher die Frequenz, umso mehr Schwingzyklen pro Sekunde finden statt. Über der Hörschwelle bestimmt die Frequenz der Schallwellen die Höhe eines Tons. Dass niedrige Töne, niedrige Frequenzen aufweisen, also wenige Schwingzyklen pro Sekunde kann man bei Pauken, Kontrabässen oder den hauseigenen Hi-Fi-Boxen beobachten. Hier kann man die Auslenkungen sehen. Bei hohen Tönen können die schnellen Schwingzyklen, gleich dem Flügelschlag eines Kolibris nicht mehr mit dem Auge aufgelöst werden. Dies liegt aber auch an den in der Regel geringeren Auslenkungen bei hochfrequenten Schwingungen. So erschließt sich einer der zentralen Zusammenhänge für die Beschreibung von Erschütterungen und deren Schadenspotential: Bei gleichem Kraftaufwand ist die Auslenkung bei niedrigeren Frequenzen deutlich höher als bei hohen Frequenzen. Die teilweise enormen Auslenkungen bei niedrigen Frequenzen können z. B. in Verbindung mit ungünstigen Hebelverhältnissen bei ausladenden Figuren zum Bruch und damit zum Verlust von Armen, Flügeln usw. führen.

Beschleunigung	Frequenz	Auslenkung
<b>9,81 m/s<sup>2</sup></b>	2 Hz	120 mm
<b>9,81 m/s<sup>2</sup></b>	20 Hz	1,25 mm
<b>9,81 m/s<sup>2</sup></b>	100 Hz	0,05 mm

Tabelle 1 Frequenzabhängigkeit der Auslenkung bei gleichem Kräfteintrag/Energieeintrag<sup>11</sup>

<sup>11</sup> GREEN 1987.



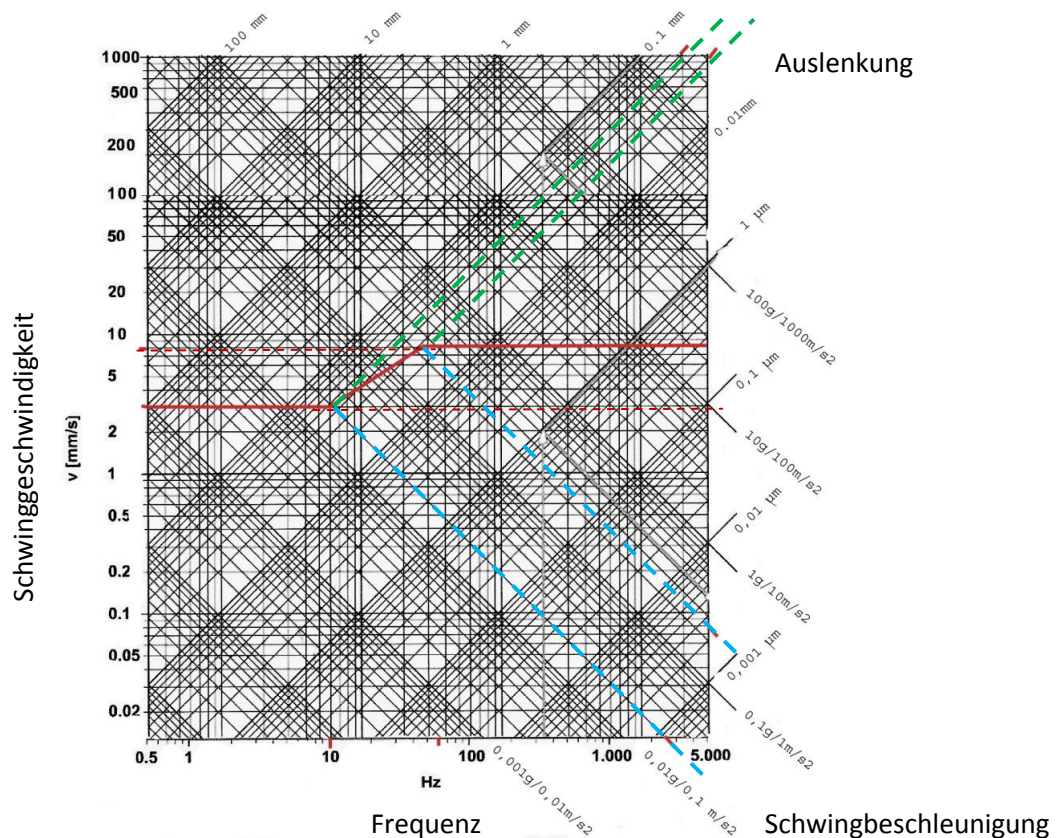
Der oben genannte Kräfteintrag und somit die Energie einer Schwingung wird durch die Größen Schwinggeschwindigkeit [mm/s] und Schwingbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ] beschrieben.<sup>12</sup> Diese Größen sind ebenfalls auf das durch die Erschütterung in Bewegung/Schwingung versetzte Teilchen bezogen: seine Geschwindigkeit und die von ihm erfahrene Beschleunigung! Um Verwechslungen vorzubeugen bleibt anzumerken, dass in dem thematisch verwandten Bereich Schallschutz der Wert der Schallgeschwindigkeit die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle beschreibt, die in der Bewertung von Erschütterungen nicht zugrunde gelegt wird. Mit einem Beispiel wird dieser Unterschied deutlicher: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit vermittelt die Information wie lange ein Wellenkamm benötigt, bis er einen Punkt beispielsweise den Strand erreicht. Die Schwinggeschwindigkeit bezogen auf Erschütterungen würde dagegen die Auf- und Abbewegungen einer Boje beschreiben die auf den Wellen tanzt.

In der DIN 4150 sowie in zahlreichen anderen nationalen Normierungskommissionen hat man sich zur Beschreibung und Bewertung der Erschütterungen auf die Verwendung der Schwinggeschwindigkeit verständigt und ihr als zweites Bewertungskriterium die Frequenz zur Seite gestellt.<sup>13</sup> Dennoch koexistieren in der Fachliteratur je nach Nationalität und Berufshintergrund des Autors die unterschiedlichsten Größenangaben. Mit Hilfe von zwei bekannten Größen könnten die anderen berechnet werden. Allerdings sind die dazu nötigen Rechenoperationen, wie Ableitung oder Integration sehr komplex und die entsprechenden Computerprogramme nicht selbstverständlich zur Hand. In dem folgenden Diagramm könne die gewünschten Größen durch Antragen und schlichtes Ablesen ermittelt werden. Mit Hilfe der Graphik wird auch deutlich, warum eine Schwingung allein mit der Angabe der Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung nicht beschrieben und mit anderen Messungen verglichen werden kann. Diesem Grundsatz oft nicht folgend, verlieren leider viele der Publikationen auf dem Gebiet der Restaurierung und Denkmalpflege zum Thema Erschütterungen ihre Aussagekraft.

---

<sup>12</sup> Die Schwingbeschleunigung wird oft in  $g$ , dem Vielfachen der Erdbeschleunigung angegeben. Da diese normative Größe jedoch von Ort zu Ort und in unterschiedlichen Höhen variiert, sollte diese Fehlerquelle möglichst vermieden werden und die Beschreibung der Beschleunigung nur in [ $\text{m/s}^2$ ] erfolgen. Ansonsten ergeben sich Differenzen der in einem Gebäude oder etwa während eines Transportfluges gemessenen Erschütterungswerten; GÖBEL 1998.

<sup>13</sup> STUDER O. A., KONON 1983; ATHANASOPOULOS 2000.



**Diagramm 1** Diagramm zur Umwandlung von erschütterungsrelevanten Größen  
**Anwendungsbeispiel: Richtwert für Erschütterungsgrenzen bei historischen und sensiblen Bauwerken nach DIN 4150-3<sup>14</sup>**

Zur weiteren Veranschaulichung hier ein Beispiel:

Die DIN-Norm 4150-3 bezüglich Bauwerkserschütterungen empfiehlt für historische und sensible Bauten einen frequenzabhängigen Richtwert. Bei Frequenzen von 0 – 10 Hz sollte die Schwinggeschwindigkeit nicht über 3 mm/s betragen. Bei 10 – 50 Hz liegt der erlaubte Korridor bei 3 – 8 mm/s. Ab 50 Hz bilden 8 mm/s die Grenze. Diese Richtlinie ist im Diagramm 1 als **rote Linie** eingetragen. Dabei wird der Schwinggeschwindigkeitswert an der y-Achse abgelesen, der zugehörige Frequenzwert an der x-Achse. Bei der Verlängerung der Werte schneiden sich diese in dem zugehörigen Punkt. Da die Tabelle ursprünglich in der x-Achse auf die Größe Umdrehungen/min ausgelegt war, stimmen die Markierung der Achse nicht immer mit den auf dieser Achse senkrecht stehenden Rasterlinien überein. Für das korrekte Ablesen und Umrechnen der Werte sind die Teilstriche auf der x-Achse ausschlaggebend.

Angenommen, in einer Publikation werden Erschütterungen durch die Schwingbeschleunigung mit der zugehörigen Frequenz beschrieben: Für diesen Fall sind die diagonal angegebenen **Schwingbeschleunigungen (blau)** mit einzubeziehen. Die Werte werden entsprechend der Skalierung entworfenen Linien verlängert. Liegt der

<sup>14</sup> Modifiziert auf Grundlage eines Nomogramms der Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co KG

Kreuzungspunkt dieser Wert unterhalb der roten Linie, wird die Norm erfüllt, liegt er oberhalb besteht ein erhöhtes Schadensrisiko. Entsprechend kann mit Angaben in **maximaler Auslenkung (grün)** verfahren werden. Wichtig ist nur, dass von den vier unterschiedlichen Größen mindestens zwei angegeben werden müssen: **Ansonsten wird weder die Schwingung eindeutig beschrieben noch ihre Schadenspotential.**<sup>15</sup> **Eine Schwinggeschwindigkeit von 5 mm/s liegt bei einer Frequenz von 100 Hz in der Norm. Tritt diese Schwinggeschwindigkeit mit einer Frequenz von 10 Hz auf, liegt diese oberhalb der Norm und muss als potentiell gefährlich eingestuft werden. Wird nur die Schwinggeschwindigkeit gemessen oder angegeben ist eben diese Unterscheidung nicht zu treffen!**

## Eigenfrequenzen – Resonanz und Dämpfung

Eine wichtige Rolle für die Beurteilung der Gefährlichkeit von Erschütterungen für Bausubstanz und Kunstgegenstände ist ihre Eigenfrequenz. Materialien haben spezifische Frequenzen, mit denen sie schwingen, wenn ein Einzelereignis Kraft auf das System überträgt. Diese Frequenz wird **Eigenfrequenz** oder Resonanzfrequenz genannt. Sie variiert abhängig von Faktoren wie der geometrischen Gestalt des Körpers, der Richtung der Krafteinwirkung, vom Material und möglichen Materialkombinationen, Anschlüssen an andere Systeme, der Materialfeuchte etc. Daher besitzt ein Körper mehrere Eigenfrequenzen. Erfolgt eine Anregung von außen mit einer Frequenz, die der Eigenfrequenz entspricht, so antwortet das angeregte System mit immer größer werdenden Amplituden. Somit wird die Auslenkung einer Membran (Trommel) aus ihrer Ruhelage im Resonanzfall größer, als die Auslenkung durch den anfänglichen Input (Auslenkung durch den Stocks Schlag). Die maximale Resonanzverstärkung tritt bei genauer Übereinstimmung von Eigen- und Erregerfrequenz auf. Erschütterungsverstärkende Effekte finden jedoch bereits in einem Frequenzbereich statt, in dem das Verhältnis von Anregungs- zu Eigenfrequenz den Faktor  $\sqrt{2} = 1,41$  nicht übersteigt. Bei hinreichender Dauer der Anregung, schaukelt sich das System bis zum Kollaps auf. In der Folge versagen Bindungskräfte, es kommt zu Brüchen in und zwischen Materialien/Bauteilen und der Fall der **Resonanzkatastrophe** tritt ein. In allen anderen Frequenzbändern hat das Material dämpfende Wirkung auf Vibrationen. Doch ergeben sich auch hier für bestimmte Frequenzen Maxima. Grundsätzlich gilt, je höher die Frequenz einer Schwingung, umso stärker wird sie mit wachsender Entfernung gedämpft. Der Verlauf ist exponentiell. Bei ortsgebundenen Punktquellen (z. B. Einschlagen eines Nagels in eine Wand) ist die entfernungsabhängige Dämpfung doppelt so stark als bei Linienquellen (siehe Straßenverkehr). D. h. der Gefährdungsbereich im Umkreis einer sich bewegenden Erschütterungsquelle ist doppelt so groß als der einer stationären Maschine mit vergleichbaren Emissionswerten.

---

<sup>15</sup> Eine Kopiervorlage dieses Diagramms befindet sich im Anhang.

Das Wissen um die Eigenfrequenzen von Denkmälern und Kunstobjekten ist existentiell, um effektiven Erschütterungsschutz zu betreiben. Vorhersagen bezüglich der Eigenfrequenzen sind wegen der zahlreichen Variablen, der Heterogenität der verwandten Materialien und dem unbekanntem Grad des Materialabbaus in Folge von Alterung jedoch selten zu treffen und keineswegs als zuverlässig zu betrachten. Sie bedürfen im Vorfeld weitgehender Untersuchungen der Materialkonstanten, der ein enormer Rechenaufwand folgt.<sup>16</sup>

Die verlässlichere Methode ist das Ermitteln der Eigenfrequenzen während der Erschütterungsmessungen mittels **Heel Impact Test**: Man stellt sich auf die Zehenspitzen und lässt sich dann nach hinten auf die Fersen fallen. Dies kommt einem „perfekten“ Stoßereignisse nahe, das per se keine Anregungsfrequenz besitzt und senkrecht zum Boden wirkt. Durch den relativ geringen Kraftaufwand dieser Bewegung, die ebenso während des Aufenthalts von Besuchern in einer Sammlung von diesen ausgeführt werden könnte, entstehen erstaunlich hohe Schwinggeschwindigkeiten. Je nach Materialdämpfung klingen diese Signale innerhalb einiger Millisekunden, bzw. Sekunden ab. Dieses Nachschwingen wird wie bereits besprochen in der bevorzugten Schwingfrequenz des Bauteils erfolgen. Mittels der Rechenoption Fast-Fourier-Transformation kann die Eigenfrequenz mit Hilfe des Softwareprogramms ermittelt werden.<sup>17</sup> In der Frequenzanalyse wird sie durch einen scharfen Peak repräsentiert. Da keine homogenen Materialien untersucht wurden, treten mehrere Peaks auf. Zwar variiert der Kräfteintrag durch den Heel impact, die erreichten Schwinggeschwindigkeiten geben aber dennoch Aufschluss über die Anregbarkeit der untersuchten Struktur. Vergleichbare Ereignisse im wissenschaftlichen Sinne könnten durch das Fallen eines Normgewichtes aus einer Normhöhe (z.B. 5 kg aus einer Höhe von 1m) erlangt werden, der Vorteil des Heel Impact Tests liegt aber für diese Arbeit in der vereinfachten Durchführbarkeit. Darüber hinaus bilden die so erlangten Schwingungsmaxima realistische Ereignisse im Museumsalltag ab, wie das Stoßen gegen eine Vitrine, das Umfallen eines Ausstellungsschildes, das Wippen eines Besuchers oder das Trampeln von Kinderfüßen etc.

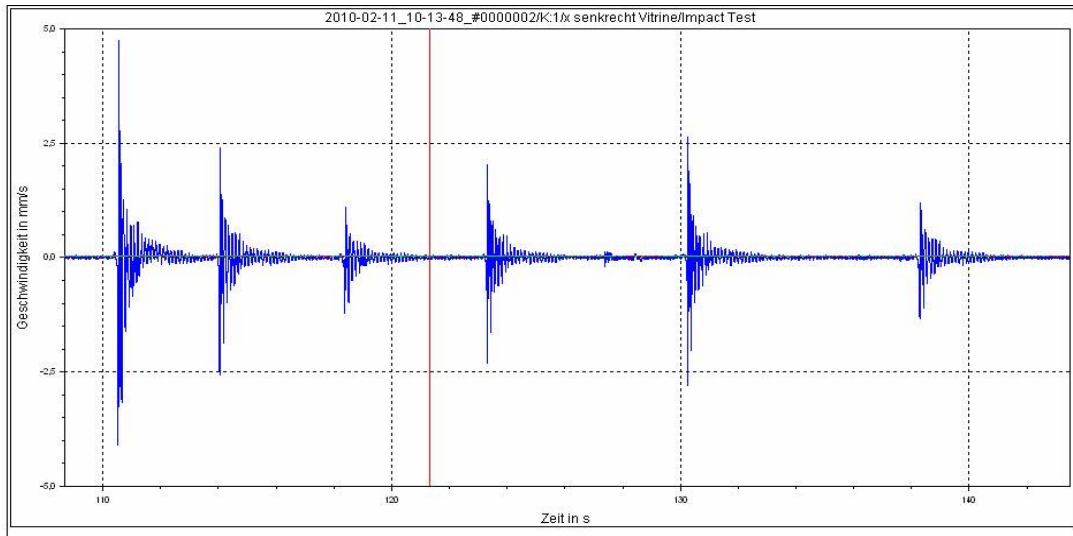
Was heute mit viel technischem Aufwand betrieben wird, ist vom Prinzip her bereits lange bekannt und wurde bereits 1772 von den Jesuiten praktiziert. Dabei wird der Schwingungsmesser (Accelerometer) durch eine einfache Trommel ersetzt, auf der eine Metallkugel liegt. Anschließend ließ man aus großer Höhe ein Gewicht fallen. Der so angeregte Erdboden gab die Schwingung an die Trommelmembran weiter. Dadurch wurde die Metallkugel beschleunigt und nach oben geschleudert. Sie begann einen Rhythmus zu schlagen, der der Eigenfrequenz des Untergrundes entsprach. So konnten Rückschlüsse auf die Festigkeit des Untergrundes und seine Eignung als Fundament für ein Bauwerk gezogen werden.<sup>18</sup>

---

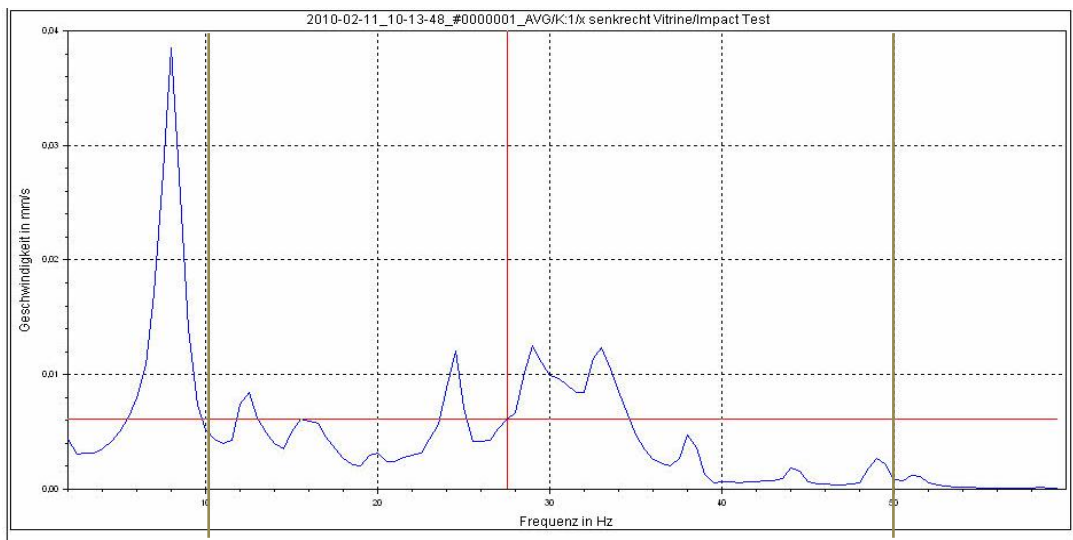
<sup>16</sup> BUTENWEG et al 2005.

<sup>17</sup> Parameter der Rechenoperation: Mitteln der Spektren; Fensterbreite 1,9996; Scrollbreite 1,0; Fenstertyp Hanning; Mittelungsart linear.

<sup>18</sup> IZZO 1772, nach Auskunft HÄFNER, Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen.



MEDA 9.001



MEDA 9.001

### Diagramm 2

#### Meßsignal eines Impact Tests:

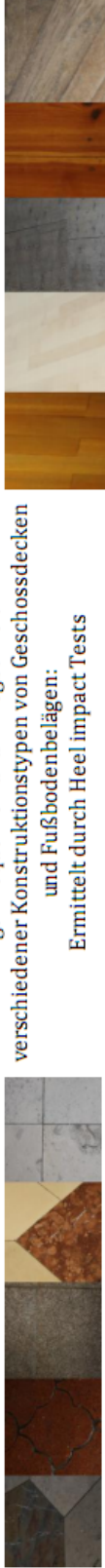
Der Krafteintrag erfolgt am Fußboden, der Meßstempel befindet sich auf einem Vitrineneinlegeboden; Ermitteltes Eigenfrequenzspektrum mit Grenzfrequenzen nach DIN 4150-3 bei 10 und 50 Hz (braune Linien)

Die ermittelten Eigenfrequenzen wurden in die Kategorien Geschosdecken und verschiedene Bauteile einsortiert und zu Tabellen zusammengefasst. Dabei konnten die Aussagen aus der Literatur, dass Eigenfrequenzen von Geschosdecken im Bereich von 8 – 15 Hz bei Holzbalkendecken und 15 – 35 Hz bei Stahlbetondecken anzusiedeln sind, nicht für alle Fälle bestätigt werden.<sup>19</sup> In einigen Sälen des Bayerischen Nationalmuseums traten im Falle von Parkettböden Eigenfrequenzen um die 35 – 40 Hz auf. Diese liegen nur marginal über den genannten Werten für Stahlbetondecken, bei Steinfliesenböden mit Agnether Rotmarmor und Sollnhofner Platten befinden sich die Eigenfrequenzen jedoch mit 66 – 68 Hz klar über den in der Literatur genannten Werten. Über die Ursache kann lediglich spekuliert werden. Ob in diesen Fällen eventuell nicht die gesamte Geschosdecke angeregt werden konnte, bleibt unklar.

<sup>19</sup> ACHMUS 2006.



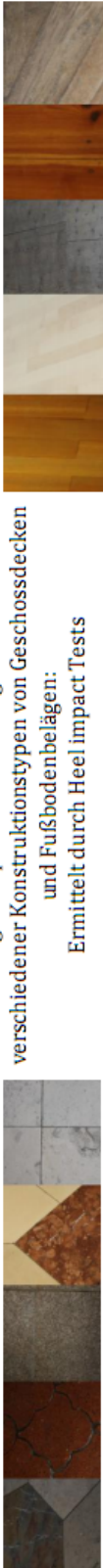
Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Konstruktionstypen von Geschossdecken  
und Fußbodenbelägen:  
Ermittelt durch Heel impact Tests



	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxxx}$ senkrecht	$a_{maxxy}$ parallel	$a_{maxxz}$ waagrecht	Frequenzen
Granitboden Halle; Stahlbetondecke (Neue Pinakothek)	-1,58	-0,48	-0,45	0,62	0,20	-0,17	$f_{0x}$ : 14; 24 Hz $f_{0y}$ : 14; 24; 49,5; 68; 78,5 Hz $f_{0z}$ : 14; 24,5; 58,5; 68; 78,5 Hz
Granitboden Saal 6; Stahlbetondecke (Neue Pinakothek)	2,34	0,94	0,72	-0,60	-0,32	-0,26	$f_{0x}$ : 16; 27; 35; 40; 48; 55; 71,5 Hz $f_{0y}$ : 16; 26,5; 39,5; 42; 47,5; 54; 57,5; 61; 72 Hz $f_{0z}$ : 16; 27; 40,5; 51,5; 57; 72 Hz
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Halle; Stahlbetondecke (BNM)	7,14	3,30	-2,56	5,89	1,35	1,32	$f_{0x}$ : indifferent 0-220 Hz $f_{0y}$ : 66; 71,5; 78; 82 Hz $f_{0z}$ : 66; 70,5; 98,5 Hz
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Saal 1; Stahlbetondecke (BNM)	-5,06	3,04	-3,25	4,58	1,53	-1,46	$f_{0x}$ : Abfl. 19,5; 56; 74,5; 84; 93,5; 110; 141,5 Hz $f_{0y}$ : 24,5; 36,5; 50,5; 60,5; 66; 77; 84,5; 97,5; 110; 112,5 Hz $f_{0z}$ : 24,5; 43; 68; 70; 76; 84,5; 111; 113 Hz
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Vorraum Hubertussaal Orangerie; Holzbalkendecke (Nymphenburg)	-2,96	-0,31	0,16	-0,33	0,07	0,05	$f_{0x}$ : 8 Hz $f_{0y}$ : 8; 84,5 Hz $f_{0z}$ : 8; 84,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$

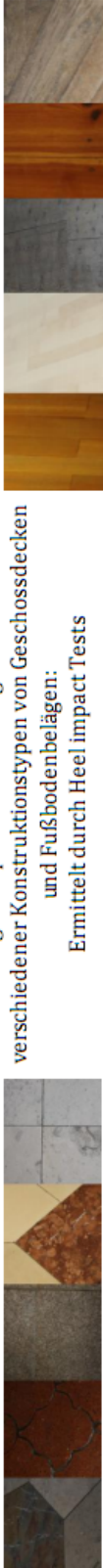
Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Konstruktionstypen von Geschossdecken  
und Fußbodenbelägen:  
Ermittelt durch Heel Impact Tests



	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Steinermer Saal Hauptschloss; Gewölbedecke (Nymphenburg)	-5,46	-0,86	-3,14	-0,77	-0,28	0,75	$f_{0x}$ : 8,5-9,5; 10,5; 18,5; 23,5; 29,5 Hz $f_{0y}$ : 8,5; 10,5; 13,5; 17; 29; 35; 52 Hz $f_{0z}$ : 6; 9,5; 17,5; 20; 26,5; 29; 38,5; 47-54 Hz
Steinfliesenboden Sollhofner Platten Saal 133; Stahlbetondecke (BNM)	-1,24	-0,44	-0,20	1,23	-0,29	-0,13	$f_{0x}$ : 79,5; 112; 210 Hz $f_{0y}$ : 80; 112 Hz $f_{0z}$ : 62; 80; 112,5 Hz
Terracottafliesen mit Relief Saal 51; Stahlbetondecke (BNM)	-1,01	0,29	-0,33	-0,33	0,12	0,11	$f_{0x}$ : 11,5; 29,5; 37,5; 43,5; 56,5; 64,5; 72; 96,5; 106 Hz $f_{0y}$ : 3,5; 9; 11; 12; 18; 24,5; 29,5; 33,5; 72; 100 Hz $f_{0z}$ : 7,5; 11,5; 12,5; 14,5; 17,5; 21,5; 25; 29; 38; 54,5; 62; 64; 72; 99,5; 135 Hz
Terracottafliesen Depot Neue Sammlung Kellergeschoss (Sammlung Boilert)	-0,81	-0,46	0,63	-0,69	0,21	0,28	$f_{0x}$ : 11; 65; 76,5; 103; 125; 162; 189,5-196,5; 219,5-224; 273-279 Hz $f_{0y}$ : 64,5; 77 Hz $f_{0z}$ : 4,5; 6; 12; 64,5; 77 Hz
Parquetboden Eiche Saal 1; Stahlbetondecke (Neue Pinakothek)	-2,25	-1,58	0,92	0,63	0,29	0,19	$f_{0x}$ : Abfl. 35; 40; 77; 115; 129; 159 Hz $f_{0y}$ : indifferent 0-30; 35; 39,5; 78,5 Hz $f_{0z}$ : 35; 39,5; 84,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Konstruktionstypen von Geschossdecken  
und Fußbodenbelägen:  
Ermittelt durch Heel impact Tests

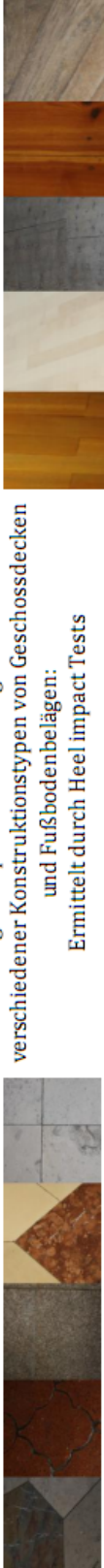


	V <sub>maxx</sub> senkrecht	V <sub>maxy</sub> parallel	V <sub>maxz</sub> waagrecht	a <sub>maxx</sub> senkrecht	a <sub>maxy</sub> parallel	a <sub>maxz</sub> waagrecht	Frequenzen
Parquetboden Eiche Saal 16 Anbau; Stahlbetondecke (Neue Pinakothek)	-0,95	-0,38	0,26	-0,53	0,08	-0,07	f <sub>0x</sub> : indifferent 0-30; 34,5; 93 Hz f <sub>0y</sub> : indifferent 0-30; 34,5; 36,5; 92 Hz f <sub>0z</sub> : indifferent 0-30; 36,5; 87; 91 Hz
Parquetboden Eiche Saal 22; Stahlbetondecke (BNM)	10,50	3,46	7,84	2,91	0,90	1,68	f <sub>0x</sub> : 15,5; 20; 25,5; 36; 40,5; 44,5; 49,5; 84 Hz f <sub>0y</sub> : 41 Hz f <sub>0z</sub> : 35,5 Hz
Parquetboden Eiche Saal 24; Stahlbetondecke (BNM)	12,46	9,84	-13,54	-2,31	-1,58	1,58	f <sub>0x</sub> : 12,5; 17,5; 30; 38,5; 55,5 Hz f <sub>0y</sub> : 17,5; 31,5; 38 Hz f <sub>0z</sub> : 17,5 Hz
Parquetboden Eiche Saal 85; Stahlbetondecke (BNM)	2,65	0,30	0,36	0,27	0,05	0,06	f <sub>0x</sub> : 4,5; 6,5; 12 Hz f <sub>0y</sub> : 4,5; 6,5; 9,5; 12; 15,5; 17,5; 20,5; 22,5; 24,5; 31; 33; 38; 40; 42,5; 49 Hz f <sub>0z</sub> : 4,5; 6,5; 9,5; 13; 15,5; 17,5; 20; 22,5; 24,5;
Parquetboden Eiche Hubertussaal Orangerie; Holzbalkendecke (Nymphenburg)	12,50	5,19	-5,36	-0,32	-0,15	0,09	f <sub>0x</sub> : 5; 15; 20-22 Hz f <sub>0y</sub> : 23,5 Hz f <sub>0z</sub> : 26 Hz
Parquetboden Eiche Schönheitenkabinett Hauptschloss Holzbalkendecke (Nymphenburg)	16,66	3,09	3,76	1,17	0,37	-0,48	f <sub>0x</sub> : 7; 9,5; 13; 18,5 Hz f <sub>0y</sub> : 7; 9,5; 13; 18,5; 22,5 Hz f <sub>0z</sub> : 5-7; 9,5; 12,5; 18; 23 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>



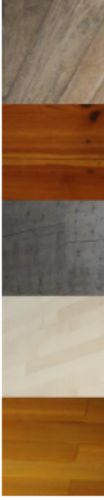
Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Konstruktionstypen von Geschossdecken  
und Fußbodenbelägen:  
Ermittelt durch Heel impact Tests



	V <sub>maxx</sub> senkrecht	V <sub>maxy</sub> parallel	V <sub>maxz</sub> waagrecht	a <sub>maxx</sub> senkrecht	a <sub>maxy</sub> parallel	a <sub>maxz</sub> waagrecht	Frequenzen
Parquetboden Eiche Verbindungsgang Schönheitenkabinett Steinermer Saal Hauptschloss; Holzbalkendecke (Nymphenburg)	22,61	11,05	-10,38	3,53	1,00	-1,08	f <sub>0x</sub> : 10; 12,5; 17; 19; 26 Hz f <sub>0y</sub> : 10; 12,5; 17; 18,5; 25,5 Hz f <sub>0z</sub> : 10,5; 12,5; 17; 21; 25,5; 29 Hz
Parquetboden Eiche Raum 1 (Sammlung Bollert)	6,40	-2,71	1,93	-0,58	0,34	-0,25	f <sub>0x</sub> : 12,5; 18,5; 23; 29,5; 52; 55 Hz f <sub>0y</sub> : 5, 14, 18,5; 23; 25,5; 33; 39; 51,5 Hz f <sub>0z</sub> : 5,5; 12,5, 14, 18,5; 23; 26; 29,5; 31,5; 39; 42; 43; 46; 52 Hz
Parquetboden Eiche Raum 2 (Sammlung Bollert)	-3,42	1,94	2,91	0,78	0,29	-0,47	f <sub>0x</sub> : 5,5; 22; 28,5; 36; 85,5; 112,5; 134; 138 Hz f <sub>0y</sub> : 5,5; 22,5; 29; 36 Hz f <sub>0z</sub> : 5,5; 22; 29 Hz
Parquetboden Eiche Raum 3 (Sammlung Bollert)	-8,17	-6,21	2,55	1,26	-0,79	0,53	f <sub>0x</sub> : 5,5; 19; 28,5; 32 Hz f <sub>0y</sub> : 5,5; 19; 31,5 Hz f <sub>0z</sub> : 5,5; 15,5; 19,5; 27,5; 32; 37,5 Hz
Dielenboden Lärche Saal 103/104; Stahlbetondecke (BNM)	12,48	2,18	-4,40	4,59	-0,52	1,39	f <sub>0x</sub> : 26; 27,5; 44 Hz f <sub>0y</sub> : 26; 28; 65,5 Hz f <sub>0z</sub> : 22,5; 28,5; 44,5; 65,5 Hz

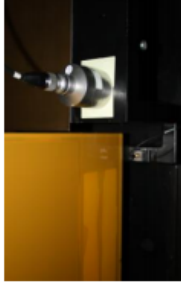
Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>

Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Konstruktionstypen von Geschossdecken  
und Fußbodenbelägen:  
Ermittelt durch Heel Impact Tests



	$V_{max}$ senkrecht	$V_{max}$ parallel	$V_{max}$ waagrecht	$a_{max}$ senkrecht	$a_{max}$ parallel	$a_{max}$ waagrecht	Frequenzen
hist. Dielenboden Nadelholz Empore Steinerner Saal; Holzbalkendecke (Nymphenburg)	26,44	5,17	-2,16	1,56	-0,42	0,22	$f_{0x}$ : 5,5; <u>11</u> ; 34 Hz $f_{0y}$ : 5,5; <u>13</u> ; 15,5; 18,5; 20,5; 23; 25; 27; 34 Hz $f_{0z}$ : 5,5; <u>11</u> ; 22,5; 25,5; 34 Hz
Betonboden Depot Kojie 104; Stahlbetondecke (Neue Pinakothek)	-5,47	0,93	3,20	-0,31	-0,06	0,07	$f_{0x}$ : <u>10,5</u> ; 56; 66; 85-97,5; 115; 138; 193; 204; 229; 247; 267; 276 Hz $f_{0y}$ : indifferent 10-30; <u>71</u> ; 76; 84,5; 95,5; 117; 160 Hz $f_{0z}$ : indifferent 10-40; <u>71,5</u> Hz
Betonboden mit Linoleum künftiges Steindepot (BNM)	-0,35	0,09	0,69	-0,31	-0,06	0,07	$f_{0x}$ : <u>10,5</u> ; 56; 66; 85-97,5; 115; 138; 193; 204; 229; 247; 267; 276 Hz $f_{0y}$ : indifferent 10-30; <u>71</u> ; 76; 84,5; 95,5; 117; 160 Hz $f_{0z}$ : indifferent 10-40; <u>71,5</u> Hz

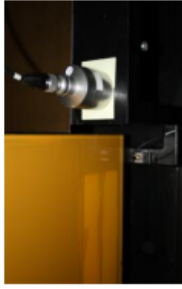
Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$



Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Bauteile und Strukturen  
Ermittelt durch Impact Tests

	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Betonwand Depot Koje 104 Neue Pinakothek	0,51			0,28			$f_{0x}$ : 63,5; 85,5; 91; 103,5; 115,5; 116,5; 123; 146 Hz
Betonwand Depotzugang Kunstabau	-0,01			0,00			$f_{0x}$ : Abfl. 10; 12; 14,5; 26; 43; 100 Hz
Betonwand Depot Neue Sammlung Kellergeschoss Sammlung Borchert			0,25			0,17	$f_{0z}$ : Abfl. 7,5; 12; 13,5; 16,5; 17,5; 20; 22; 24,5; 30,5; 34,5; 37,5 Hz
Betonwand künftiges Steindepot BNM			(-2,31)			-0,61	$f_{0z}$ : 0-13 Hz
Pfeiler künftiges Steindepot BNM			-0,32			0,11	$f_{0z}$ : 3,5; 6; 9,5 Hz
Holzverkleidung Fenstermitte mit guter Wandanbindung Hubertusaal Nymphenburg	-0,25	-0,43	0,39	0,41	1,06		$f_{0x}$ : 189; 420 Hz $f_{0y}$ : 0-8; 330-590 Hz $f_{0z}$ : 0-13 Hz
Balken Aufhängung Decke Hubertusaal Nymphenburg	-3,90	-0,78	-1,48	-0,31	0,14		$f_{0x}$ : 11,5 Hz $f_{0y}$ : 11,5; 27; 32,5 Hz $f_{0z}$ : 11,5; 27 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Eigenfrequenzen und Anregbarkeit  
verschiedener Bauteile und Strukturen  
Ermittelt durch Impact Tests

	V <sub>max x</sub> senkrecht	V <sub>max y</sub> parallel	V <sub>max z</sub> waagrecht	a <sub>max x</sub> senkrecht	a <sub>max y</sub> parallel	a <sub>max z</sub> waagrecht	Frequenzen
Spante Deckenkehle Hubertussaal Nymphenburg	0,02			0,003			f <sub>0x</sub> : <u>3,5</u> ; 8 Hz
Sockel mit Marmorstatue Anregung vertikal Saal 1 Neue Pinakothek	2,67	-1,04	1,75	-3,72	-0,73	-0,72	f <sub>0x</sub> : 5,5; <u>25</u> ; 28; <u>40</u> ; 57,5; 67; 70-130; 420-500 Hz f <sub>0y</sub> : Abfl. 4,5; 40,5; 58; <u>66</u> Hz f <sub>0z</sub> : Abfl. 4,5; 8,5; <u>41</u> ; 58 Hz
Sockel mit Marmorstatue Anregung horizontal Saal 1 Neue Pinakothek	-3,27	2,47	-3,21	-3,34	-1,69	-1,77	f <sub>0x</sub> : 6; 16,5; 23,5; <u>40,5</u> ; 58; 91,5 Hz f <sub>0y</sub> : Abfl. <u>6</u> ; 40,5 Hz f <sub>0z</sub> : Abfl. 6; <u>40,5</u> ; 58 Hz
Vitrinenkonstruktion Saal 85 BNM	7,80	-2,06	5,21	1,49	-0,39	-0,87	f <sub>0x</sub> : <u>32,5</u> ; 38,5 Hz f <sub>0y</sub> : 19,5; 24,5; <u>30,5</u> ; 38,5 Hz f <sub>0z</sub> : 19; <u>24,5</u> ; 30; 32,5 Hz
Vitrinenkonstruktion Saal 3 Sammlung Borchert	10,40	1,31	-1,50	-3,22	0,56	0,48	f <sub>0x</sub> : 3,5; 10; <u>12,5</u> ; 18; 24; <u>37,5</u> ; 43; 52,5; 71; 78,5; 81; 91; 109 Hz f <sub>0y</sub> : 7; 10; <u>12,5</u> ; 20; 24; 25,5; 38; 44,5; 60 Hz f <sub>0z</sub> : 3,5; 7,5; 9,5; <u>12,5</u> ; 15; 17,5; 20; 25; 29,5; 36,5; 43,5; 53; 58; 71,5; 78 Hz
Regalsystem Depot Neue Sammlung im Kellergeschoss der Sammlung Borchert	3,12	4,41	0,78	0,92	0,41	-0,24	f <sub>0x</sub> : 8,5; <u>11,5</u> ; 15,5; 18; 23,5; 51; 53; 56,5; 59,5; 68; 72 Hz f <sub>0y</sub> : 8,5; 13; <u>14</u> Hz f <sub>0z</sub> : 4,5; <u>9</u> ; 12,5; 15,5; 20; 23; 27; 34; 43,5; 48; 71,5; 83 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>

## Übertragungswege von Erschütterungen

Erschütterungen sind Schwingungen, die sich in allen Medien ausbreiten und zwischen ihnen wechseln können. In der Luft breiten sie sich als Druckwellen, den sogenannten Schallwellen aus. Dabei wechseln sich Bereiche mit Überdruck, mit solchen, in denen Unterdruck herrscht ab: Besser vorzustellen als eine Wagenkolonne, deren Autos im Abstand von einigen Sekunden an einem Fußgänger vorbeifahren. Dieser spürt den Druck der Luft, den ein näherkommendes Auto vor sich her schiebt und den Sog, wenn es an ihm vorbeigefahren ist, bis der Druck durch das folgende Auto wieder anwächst. Pflanzen sich Erschütterungen in flüssigen oder festen Medien fort, gibt es neben der Propagation in Form einer Druckwelle auch den Fall der Fortpflanzung über eine Oberflächenwelle, der sog. Rayleighwelle (siehe auch Abbildung 6). Hier drückt sich die Schwingbewegung in Wellenbergen und Wellentälern aus. Bei Erschütterungen treten beide Wellentypen gleichzeitig auf. Sie sind allerdings unterschiedlichen Dämpfungsmechanismen ausgesetzt. Daher spielen die schwächer gedämpften Rayleighwellen bei den gemessenen Erschütterungswerten eine vordergründige Rolle. Tritt die Welle von einem Medium in ein Anderes über, so erfährt sie Veränderungen ihres Frequenzinhaltes, ihrer Intensität und gegebenenfalls ihrer Form.

In der Norm DIN 4150 werden einzelne Quellentypen klassifiziert und die Dämpfung über wachsende Entfernung beschrieben (siehe auch Diagramm 3):

- Geometrische Quellentypen: Punkt- oder Linienquellen (PQ/LQ)
- Zeitliche Quellentypen: harmonisch/stationär oder impulsförmig (HS/I). Bei der harmonischen Anregung erfolgt diese an derselben Stelle in den immer gleichen Zeitintervallen. Bei der impulsförmigen Anregung erfolgt sie ungeordnet.
- Wellenart: Raumwelle (R) oder Oberflächenwelle (O)

Mittels dieser Parameter lässt sich jede Emissionsquelle beschreiben

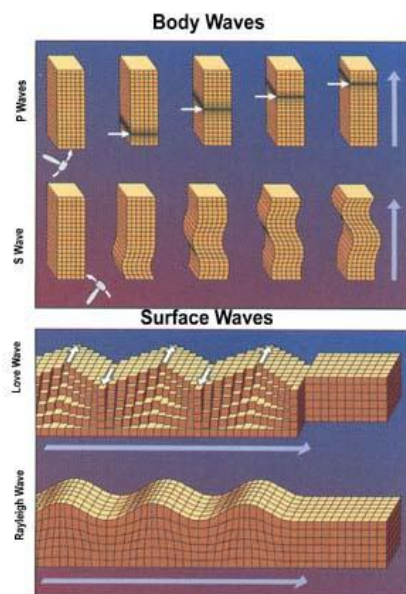


Abbildung 6 Unterschiedliche Arten der Körperschwingungen,  
www.national geological survey.com

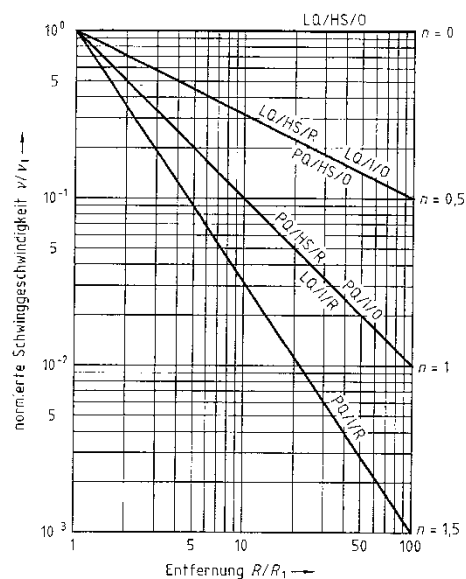
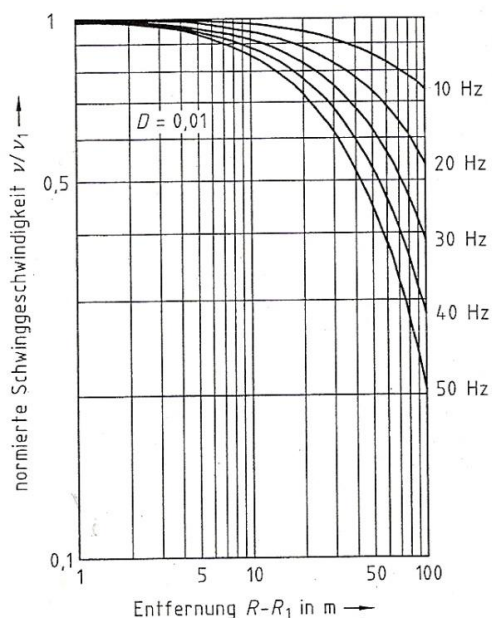


Diagramm 3 Das Dämpfungsverhalten der verschiedenen Quellentypen; DIN 4150-1

## Weiterleitung von Erschütterungen - Bestimmende Einflüsse

### Entfernung<sup>20</sup>

Je größer die Entfernung Quelle/Empfänger, desto länger die Strecke, auf der die Schwingungen gedämpft werden und desto geringer ist die Intensität der gemessenen Erschütterung beim Empfänger. Da hohe Frequenzen eine stärkere Dämpfung erfahren als niedrige ist die Abnahme der Schwinggeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung frequenzabhängig. Nähert man sich einem Ort an dem Musik spielt, hört man erst nur die Basstöne, bis man schließlich das gesamte Tonspektrum wahrnimmt: Bei dieser Beobachtung aus dem Alltagsleben handelt es sich genau um den gleichen Effekt. Mit Hilfe des nachfolgenden Diagramms können für bekannte Anregungsfrequenzen für den Erschütterungsschutz relevante Entfernungen abgelesen werden. Beispielsweise werden Erschütterungen mit einer Frequenz von 30 Hz, wie sie etwa von einer Straßenwalze emittiert werden, innerhalb von 70 m um die Hälfte ihrer Ausgangsintensität gedämpft. Leider kann nicht davon ausgegangen werden, dass vermeintlich weit entfernte Baustellen etc. automatisch als unbedenklich eingestuft werden können, da bestimmte Gesteinsschichten, geologische und bauliche Phänomene bestimmte Frequenzen nahezu ungedämpft passieren lassen. Für historische Bauten kann es daher sinnvoll werden, ein Bodenprofil des Standortes erstellen zu lassen. Eine schnelle Einschätzung, ob Handlungsbedarf entsteht, kann dem vorliegenden Diagramm dennoch entnommen werden.



**Diagramm 4**  
**Frequenzabhängige Reduktion der Schwinggeschwindigkeit auf eine bestimmte Entfernung. Die Dämpfung  $D = 0,01$  entspricht dem Wert für Lockergestein.**

<sup>20</sup> DIN 4150-1.



### **Luft- oder bodeninduzierte Schwingungen**

Erschütterungen, die durch Luftschall ausgelöst wurden, enthalten in höherem Maße hochfrequente Schwingungen, da diese im Medium Luft wegen dessen geringer Dichte weniger stark gedämpft werden, als dies im Boden der Fall ist. Der Schall, der von außen auf das Gebäude wirkt, kann Fensterscheiben zum Klirren bringen und im Falle bereits bestehender Spannungen im Glas die Scheibe brechen. Ein weiteres Vordringen ist wegen der starken Dämpfung sehr unwahrscheinlich. Dasselbe gilt für, im Inneren des Gebäudes emittierte Schallwellen, wenn sie auf eine Trennschicht zwischen Kunstwerk und Raum trifft, wie sie etwa durch eine Vitrinenverglasung besteht. Bei einer direkten Anregung sollte sich das Schadenspotential in Grenzen halten, da es sich – wie bereits erwähnt – um hochfrequente Schwingungen mit in der Regel niedrigen Schwinggeschwindigkeiten handeln dürfte.

### **Beschaffenheit des Bodens/Untergrundes**

Felsige Untergründe werden wegen ihres großen Gewichtes schwer angeregt. Sie leiten tiefe Frequenzen deutlich schlechter als weiche sog. nichtbindige Böden. Unter Umständen können jedoch Frequenzen über der Hörschwelle übertragen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Problematik in New York: Hier werden Erschütterungen, ausgelöst durch die U-Bahn, in die Hochhäuser eingeleitet und dort als Sekundärschall hörbar an die Räume abgegeben. Hinsichtlich tiefer Frequenzen leiten Schichten von 7 – 15 m aus Tonerde am besten.<sup>21</sup> Für den Erschütterungsschutz sind diese Böden demnach am ungünstigsten einzustufen.

### **Jahreszeiten**

Im Winter gibt es bis zu 50 % weniger Beschwerden hinsichtlich als störend empfundener Erschütterungen, obwohl weniger geschäftiges Treiben herrscht und daher Erschütterungen stärker wahrgenommen werden. Im Frühjahr gehen dagegen am meisten Beschwerden ein. Als Ursache gilt, die im Winter gefrorene Erde, die in dieser Zeit das Verhalten von Felsgründen zeigt, die bekanntlich schwerer angeregt werden und daher Erschütterungen weniger gut transportieren. Im Frühjahr dagegen taut die Erde und die Grundwasserspiegel steigen auf die höchsten Jahrespegel, was die Ausbreitung von Erschütterungen begünstigt.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> BUJA 2007.

<sup>22</sup> HUNAIDI 2000.

## Die Meßausstattung

Der für die damalige Zeit sicher als genial zu bezeichnende Meßaufbau der Jesuiten ist (siehe Kapitel Eigenfrequenzen Seite 13), wenn auch nicht inhaltlich, so doch in puncto Ausstattung im Laufe der Jahre erheblich weiterentwickelt worden.

### Die Aufnehmer

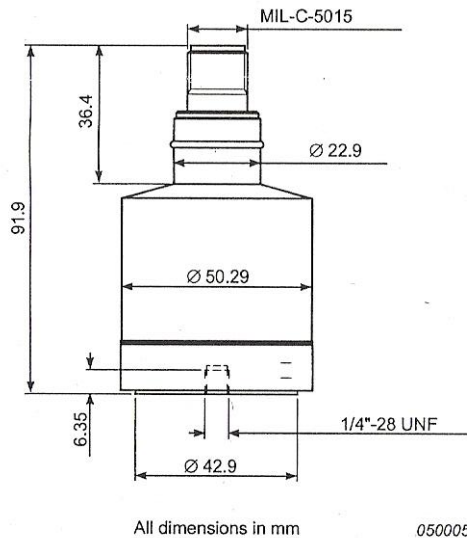
Grundsätzlich existieren zwei Optionen, die Stärke von Erschütterungen zu erfassen: Mittels Geophon oder Accelerometer. Geophone messen Vibrationen in der physikalischen Größe Schwinggeschwindigkeit und eignen sich vor allem für tieffrequente Schwingungen, da sie zum Detektieren seismischer Aktivitäten konzipiert wurden. Dementsprechend besitzen sie auch die größte Meßsensibilität im Frequenzbereich von Erdbeben, der bei etwa um die 6 Hz anzusiedeln ist. Allerdings sind diese Art Aufnehmer äußerst kostenintensiv und durch Größe, Gewicht und zusätzlich notwendiger technischer Ausstattung für museale und denkmalpflegerische Fragestellungen ungeeignet. Außerdem bedingt ihre enorme Meßempfindlichkeit eine ebenso hohe Anfälligkeit für Störsignale. Accelerometer dagegen messen die Schwingbeschleunigung. Sie sind in verschiedenen Größen und Eigengewichten erhältlich. Daher wurden zur Erhebung der Meßwerte in dieser Arbeit je nach Örtlichkeit und Meßaufbau drei unterschiedliche Ausführungen von Aufnehmern verwandt, die im Folgenden mit ihren technischen Daten aufgeführt sind.

In den benutzten Meßfühlern sind sogenannten Piezoelemente/-kristalle verarbeitet. Diese bestehen vereinfacht ausgedrückt aus „übereinandergeschichteten“ Moleküllagen unterschiedlicher Ladungszustände. Setzt eine Erschütterung diesen Kristall in Schwingung durchdringen sich die Schichten, dabei kommt es zum Elektronenfluss. Ein elektrisches Signal ist die Folge, das je nach Intensität der auslösenden Erschütterung mehr oder weniger stark ausfällt. Die elektrische Spannung wird am Element abgenommen, das Signal umgewandelt und digitalisiert.



### Zum Einsatz kamen:

Bei der Anregung von schweren Bauteilen, wie Geschossdecken und Wänden, der Accelerometer Typ 8340.



Delta Tron® Accelerometer  
Typ 8340

Brüel & Kjær

Technische Angaben:

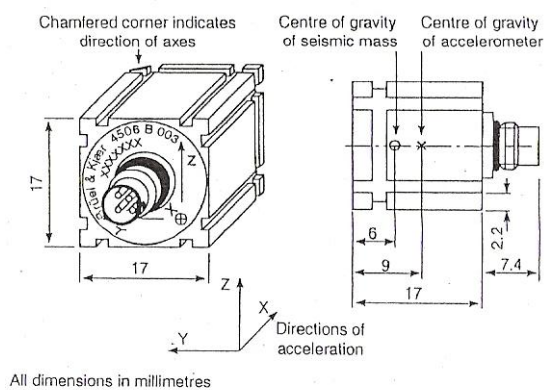
Frequenzbereich 0,025 Hz – 13 kHz;

Meßbereich/-fehler +/- 4,9 m/s<sup>2</sup> (< 1%);

Eigengewicht 775 g

Abbildung 7 Skizze Accelerometer Typ 8340,  
Datenblatt Brüel & Kjær

Zur Schwingungsmessung an leichten Bauteilen, wie Sockel und Vitrinenböden in drei aufeinander senkrecht stehenden Raumrichtungen, der triaxial Accelerometer Typ 4506.



Triaxial Delta Tron® Accelerometer

Typ 4506 B 003

Brüel & Kjær

Technische Angaben:

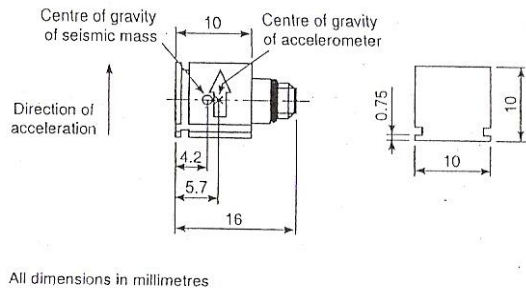
Frequenzbereich 0,3 Hz – 2 kHz;

Meßbereich/-fehler +/- 140 m/s<sup>2</sup> (< 5%);

Eigengewicht 18 g

Abbildung 8 Skizze Accelerometer Typ 4506 B003,  
Datenblatt Brüel & Kjær

Zur Messung an leichten Bauteilen in einer Raumrichtung, der Accelerometer Typ 4507.



#### Delta Tron® Accelerometer

Typ 4507 B 005

Brüel & Kjær

Technische Angaben:

Frequenzbereich 0,4 Hz – 6 kHz;

Meßbereich/-fehler +/- 70 m/s<sup>2</sup> (< 5%);

Eigengewicht 4,6 g

All dimensions in millimetres

**Abbildung 9** Skizze Accelerometer Typ 4507 B 005,  
Datenblatt Brüel & Kjær

Da Entwicklung und Markt ständig in Bewegung sind stellt diese Auswahl nur eine Momentaufnahme dar.<sup>23</sup> Kombi-Datenlogger, wie sie bei den bisherigen Transportuntersuchungen benutzt wurden, mit integrierten Sensoren für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Neigungsereignisse und Erschütterungen, sind nur für die Erhebung von Daten geeignet, wenn sehr hohe Schwingbeschleunigungen zu erwarten sind.<sup>24</sup> Der unbestreitbare Vorteil dieser Geräte ist die kompakte Bauweise mit unabhängiger Stromversorgung. Allerdings sprechen diese Art Instrumente erst bei starken Erschütterungen an und ihre Meßgenauigkeit liegt je nach Herstellung zwischen +/- 0,2 g (1,9 m/s<sup>2</sup>) bis +/- 1,5 g (14,7 m/s<sup>2</sup>)<sup>25</sup>. Um diese Angaben einordnen zu können, sei darauf hingewiesen, dass die gemessene Maximalbeschleunigung im Zusammenhang dieser Arbeit ca. 18 m/s<sup>2</sup> beträgt. Bei der Anschaffung eines Vibrationsdatenloggers ist je nach Meßvorhaben, neben den Aufnahmebereichen von Frequenz und Schwingbeschleunigung, erhöhtes Augenmerk auf die Meßgenauigkeit zu legen.

#### Die Software

Zum effektiven Auslesen und Visualisieren der Meßdaten ist ein speziell zugeschnittenes Softwarepaket nötig. Zwar könnte dies auch mit dem weit verbreiteten Tabellenkalkulationsprogramm Excel und anderen Freeware Programmen bewerkstelligt werden, jedoch müssten in diesem Fall Zusatzoptionen vom Benutzer eigens programmiert werden. Deshalb empfiehlt es sich auf Spezialpakete zurückzugreifen. Diese werden von

<sup>23</sup> Die von SAUNDERS, WATTS, BERRY, DE JOIA und PHILIPOTT verwandten Logger Noreletek/Wanderer WST 10/2 werden allem Anschein nach nicht mehr vertrieben. Der Zugriff auf technische Datenblätter ist nicht möglich.

<sup>24</sup> SAUNDERS 2005, BEGOV UND KUSCHEL 2007.

<sup>25</sup> Häufig gehandelte Geräte: Lamerholm, RD 298 Shock Recorder; MONILOG® EnDaL curve; Hanwell Shockbug.

den Meßgeräte vertreibenden Firmen angeboten. Der Nachteil liegt dabei jedoch im hohen Anschaffungspreis.

Die in dieser Arbeit verwandte Software MEDA, der Firma Wölfel, wurde für den Zeitraum der Diplomarbeit unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Neben einer Reihe graphischer Optionen, sind die benötigten mathematischen Rechenoperationen Bewegungsgrößenumrechnung (Ableitung und Integration), Frequenzanalyse über Fast-Fourier-Transformation (FFT/Mittelung) und Hochpassfilter dort einfach anzuwenden. Ohne eine Möglichkeit zur Frequenzanalyse sind die erhobenen Daten des Meßfühlers (ob nun in Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung) in den allermeisten Fällen nutzlos, wie in Diagramm 1 samt Beispielfall, klar nachzuvollziehen ist.

Ob sich die Investition, von Software samt Aufnehmer, für ein Museum oder eine Institution rechnet, hängt von der Auslastung der Ausrüstung ab. Für von Zeit zu Zeit auftretende Fragestellungen ist die Vergabe von Meßaufträgen an spezialisierte Ingenieurbüros sicher sinnvoll.

## Das Meßverfahren

### Die Anwendung bestehende Richtlinien aus der Norm DIN 45669 und DIN 4150

DIN 45669 besteht aus zwei Teilen. Der erste regelt die Kalibrierung und Zertifizierung der Meßfühler und spielt daher für die Produktion der Aufnehmer eine Rolle. Teil 2 beschreibt die Vorgaben für das eigentliche Meßverfahren, wie etwa die geforderte Ankopplung des Meßfühlers an das Bauteil und die Platzierung der Aufnehmer. Alle genutzten Instrumente entsprechen der Norm und wurden mit der geforderten Gewichts- bzw. Klebekraft an den Oberflächen der Bauteile befestigt. Die Messungen am Boden wurden zumeist mit großen Delta Tron® Accelerometern Typ 8340 aufgenommen. Drei davon wurden in einem

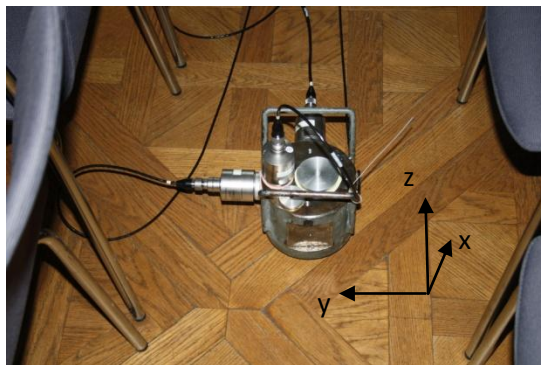


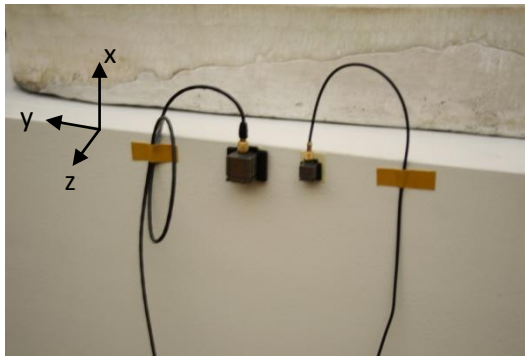
Abbildung 10 Der Meßstempel mit den drei Aufnehmern vom Typ 8340

Rechtssystem an einem Metallstempel befestigt. Dazu wurden für die Aufnehmer Grundplatten in den drei aufeinander senkrecht stehenden Raumrichtungen x, y, z mit Hilfe einer PE-Kunstharz Spachtelmasse<sup>26</sup> an einen Metallstempel geklebt. Auf die Grundplatten wiederum werden die Aufnehmer aufgeschraubt. An der Unterseite des Metallstempels befinden sich drei Dornen. Mit einem Gewicht von etwa 22,5 kg besitzt dieser Meßaufbau genügend Anpressdruck im Sinne der DIN

45669, dass der Stempel ohne weitere Befestigung auf den Fußboden gestellt werden darf. Für das Verständnis der Meßprotokolle und Auswertungsblätter ist von erheblicher Bedeutung, dass die Raumrichtungen nicht denen eines naturwissenschaftlichen

<sup>26</sup> NIGRIN Füllspachtel INTER-UNION Technohandel GmbH.

Diagramms entsprechen. Die x-Richtung bildet immer das Lot auf die waagrechten Meßoberflächen, sprich senkrecht zum Fussboden und nimmt die vertikalen Schwingungen auf. Y wird immer parallel zu einer bestimmten Struktur gewählt, z.B. einer Außenwand oder Straße. Mit der dazu waagrecht rechtwinklig ausgerichteten z-Achse beschreiben y und z die horizontalen Schwingkomponenten. Alle anderen Oberflächen werden auf das Rechtssystem des Bodens bezogen.

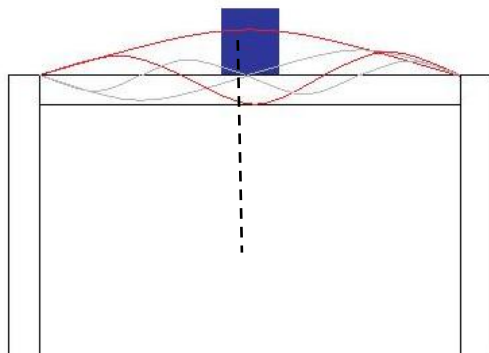


**Abbildung 11** Accelerometer Typ 4506 und 4507 am Sockel einer Marmorstatue

Bei den mit 18 g und 4,6 g im Vergleich sehr leichten Aufnehmern Triaxial Delta Tron® Accelerometer Typ 4506 B 003 und Delta Tron® Accelerometer Typ 4507 B005 wird die benötigte Anbindung bereits mit Verwendung eines doppelseitigen Klebandes erreicht. Die unterschiedlichen Arten der Befestigung (teilreversibles Klebeband, irreversible Klebung von Aufnehmerplatten mittels PE-Kunstharz) beeinflussen bei den Meßvorhaben in den Museen und Denkmälern entscheidend die

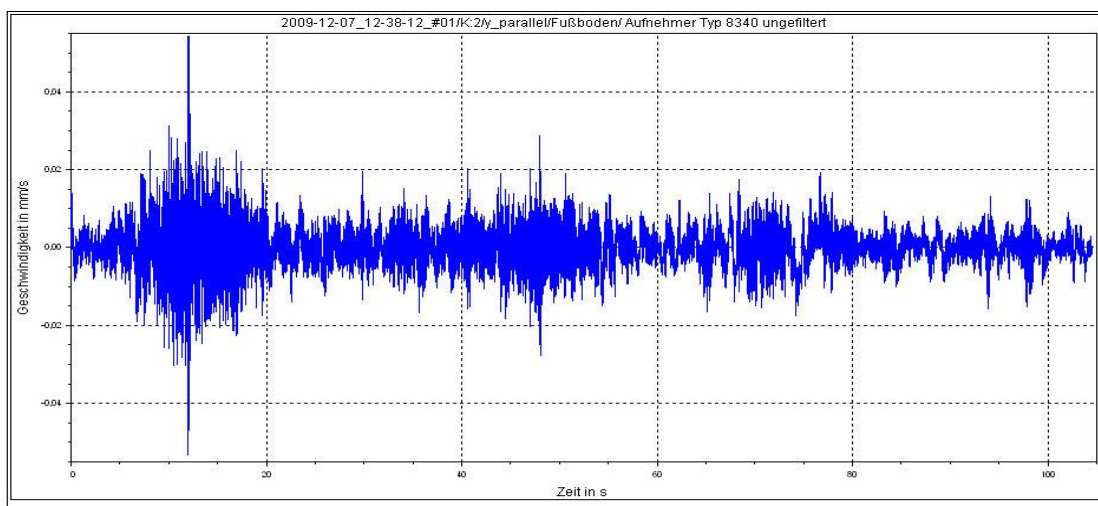
Wahl des Aufnehmertyps. So kann die Verwendung der nicht reversiblen Kunstharzmasse nur auf Oberflächen erfolgen, an denen die Grundplatte belassen, bzw. die Schadstelle, die durch das Entfernen zwangsläufig entsteht verhältnismäßig erscheint.

Neben der Art der Befestigung fließen noch andere Komponenten in die Wahl des Meßaufnehmers ein. Dabei handelt es sich um das Verhältnis Gewicht Aufnehmer zu Gewicht angeregte Struktur, die Meßgenauigkeit sowie die Frequenzauflösung des Accelerometers. Ist das Gewicht der Meßapparatur zu groß, so beeinflusst dies die Anregbarkeit des Bauteiles oder Ausstattungstückes. Da schwere Strukturen schwerer anzuregen sind als leichte, fällt der Maximalwert der Schwingbeschleunigung/-geschwindigkeit kleiner aus. Dies kommt einer Unterbewertung der Erschütterungsintensität gleich. Darüber hinaus hat dieses Missverhältnis Auswirkungen auf die ermittelten Frequenzen, bei denen es bei einigen Schwingmodi zu einer Verschiebung hin zu tieferen Frequenzen kommt. Schwingungen deren Knotenpunkt den verlängerten Schwerpunkt des Zusatzgewichtes schneiden werden davon nicht tangiert.

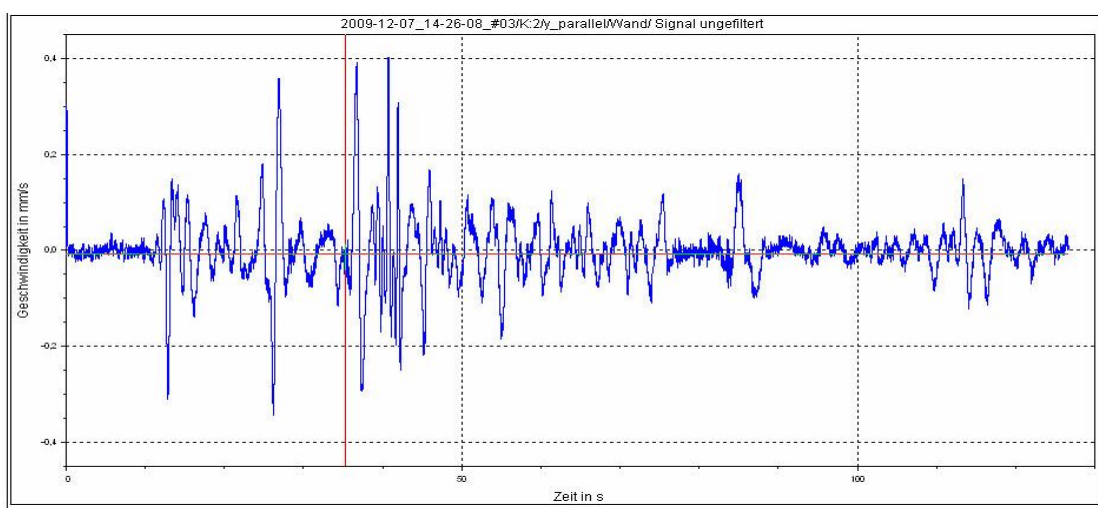


**Abbildung 12** Beeinflussung der Schwingungen durch Gewichtsbelastung der Struktur; Während die grauen Schwingungsmodi nicht tangiert werden, verändert das Gewicht die roten Modi in Frequenzinhalt und Intensität.

Trotz der augenscheinlichen Unterbewertung und Frequenzverschiebung wurde in Ausnahmefällen dem schwereren Typ 8340 Accelerometern der Vorzug gegeben. Diese Aufnehmer bilden die Eingangssignale im tieffrequenten Bereich zwischen 2 und 8 Hz eindeutiger ab. Bei den kleinen Aufnehmern zeigt sich in diesem Bereich eine Grundschiwingung, auf der sich zusätzlich das gemessene Erschütterungssignal abbildet. Durch diese Überzeichnung wirkt das Signal verfremdet und vermittelt den Eindruck erheblich stärkerer Intensitäten. Mit Hilfe der Option Hochpassfilter können tiefe Frequenzen zwar herausgefiltert und damit das Signal geglättet werden, dadurch wird die Messung aber zugleich verfälscht. Bei den im Laufe der Arbeit gemessenen Erschütterungen spielen oftmals gerade die tiefen Frequenzen von 3 – 8 Hz eine große Rolle. Aus allen Signalen der kleinen Accelerometer wurde der niederfrequente Anteil unter 3 Hz herausgefiltert. Welches Vorgehen größere Meßfehler bedingt kann nicht mit Klarheit belegt werden.



#EDA: 9/001



#EDA: 9/001

**Diagramm 5** Vergleich der ungefilterten Meßsignale der Accelerometer Typ 8430 und 4506 B003; Im unteren Diagramm existiert technisch bedingt eine Grundschiwingung die sich auf das gemessene Signal aufaddiert und dieses verfälscht.

## Die DIN 4150

Sie bestimmt mit welchen Werten Erschütterungsemissionen im Hinblick auf das Schadenspotential am treffendsten beschrieben werden. Sie stellt weiterhin die wichtigsten Schwinggrößen vor und visualisiert mittels Graphen Zusammenhänge. Die Auswirkungen von Schwingungen werden zum einen auf den Menschen, zum anderen auf Bauwerke beurteilt und in Richtlinien verarbeitet. Diese stellen keine verbindlichen Grenzwerte dar, bilden aber einen aus Erfahrungswerten abgeleiteten Konsens zur Vermeidung von Belästigung und Schäden durch Erschütterungen. Dabei definiert sie Erschütterungen allgemein als mechanische Schwingungen fester Körper mit potentiell schädigender oder belästigender Wirkung. Für das menschliche Wohlbefinden werden Frequenzen von 0 – 80 Hz betrachtet. Bei höheren Frequenzen sind die Normen für Schallschutz zuständig. Für den Schutz von Bauteilen gelten keine Frequenzeinschränkungen.

### Die Standortwahl

Um nach der Norm vergleichbare Werte für Baustrukturen zu erheben, kommen als Meßorte für die Fundamentalschwingung die unterste Geschossebene, das Fundament der Außenwand, Aussparungen an oder in der Außenwand in Frage. Bei nicht unterkellerten Gebäuden sollte die Messung nicht höher als 0,5 m über Geländeniveau betragen. Zusätzliche Messungen in der Mitte von Geschosdecken zeigen die Anregungsmaxima in den darüber liegenden Ebenen. Darüber hinaus kann selbstverständlich überall da gemessen werden, wo das Wissen über die dortigen Erschütterungsintensitäten von Interesse ist.

### Die Auswertung

Mit den erhaltenen Werten aus den Messungen muss im Sinne der Din 4150 folgendermaßen Verfahren werden:

Als erstes werden die in Schwingbeschleunigung gemessenen Werte in Schwinggeschwindigkeit umgerechnet. Anschließend macht man sich auf die Suche nach dem absoluten Spitzenwert aus allen drei Meßrichtungen. Meistens ist dieser senkrecht zur Oberfläche des vermessenen Bauteiles zu finden. Für Erschütterungen im Bereich Fußböden hieße dies in der vertikalen Schwingrichtung  $x$ . Anschließend muss, soweit noch nicht geschehen, eine Frequenzanalyse der betreffende Meßrichtung durchgeführt werden. In dem errechneten Frequenzspektrum wird wiederum der Spitzenpeak gesucht. Die so identifizierte maximale Schwinggeschwindigkeit  $v_{\max}$  und Hauptfrequenz  $f$  definieren das Schadenspotential der Bauwerksschwingung und werden mit den Richtwerten der DIN 4150-3 abgeglichen.

### Die Richtwerte nach DIN 4150

Sie wurden von einer Expertenkommission empfohlen und sind von Erfahrungswerten abgeleitet: Es handelt sich dabei um nichtrechtsgültige Grenzwerte. Bei ihrer Einhaltung besteht nur ein minimales Risiko, dass Gebäude Schäden erleiden. Ein Schaden im Sinne der DIN 4150-3 ist die dauerhafte Minderung des Gebrauchswertes einer Immobilie im Hinblick auf ihre Nutzung und die Beeinträchtigung der Standsicherheit bzw. Verminderung der Tragfähigkeit wichtiger Bauteile. Für den Fall von sensibler und historischer Bausubstanz definiert die DIN eine Schädigung als das Entstehen von Rissen in Putz und Wänden, das Ausdehnen bestehender Risse, das Abreißen von Zwischenwänden und tragenden Bauteilen. Ob eine solche eher brachiale und euphemistische Schadensdefinition für historische Bauten und Kulturgüter sinnvoll ist, bleibt zu bezweifeln: Und doch liegen im Falle der Deutschen Industrienorm die strengsten Grenzwerte weltweit vor. In den folgenden Diagrammen werden die in Nordamerika von den Sprengingenieuren vorgeschlagenen und im Laufe der Jahre abgewandelten und etablierten Grenzwerte und die Schweizerischen Norm SN 640 312a jeweils mit den Werten aus der DIN 4150-3 graphisch in Relation gestellt. Dabei handelt es sich immer um Empfehlungen für historische Bausubstanz.

Zwischenzeitlich bildet China (seit 2008) auf dem normativen Sektor den Spitzenreiter in punkto Sensibilisierung in Bezug auf historisch bedeutsame, stark gealterte Bausubstanz. Hier gelten nun Grenzwerte von 1,8 mm/s bei Frequenzen zwischen 10-30 Hz. Für den Betrieb der neu etablierten Teilstrecken der Linien 6 und 8, die direkt unter dem historischen Kern Pekings verlaufen, wurden die Grenzwerte sogar auf 0,1 mm/s herabgesetzt. Dieser Grenzwert ist inspiriert vom derzeit technisch Machbaren und seine rigoreuse Durchsetzung sicher nicht in allen Situationen angemessen.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Informationen entnommen aus dem Vortrag JAQUET, THOMAS: *Planung des Erschütterungsschutzes bei Metrolinien im historischen Stadtbereich von Peking*, Forum Erschütterungen Wölfel 2010.



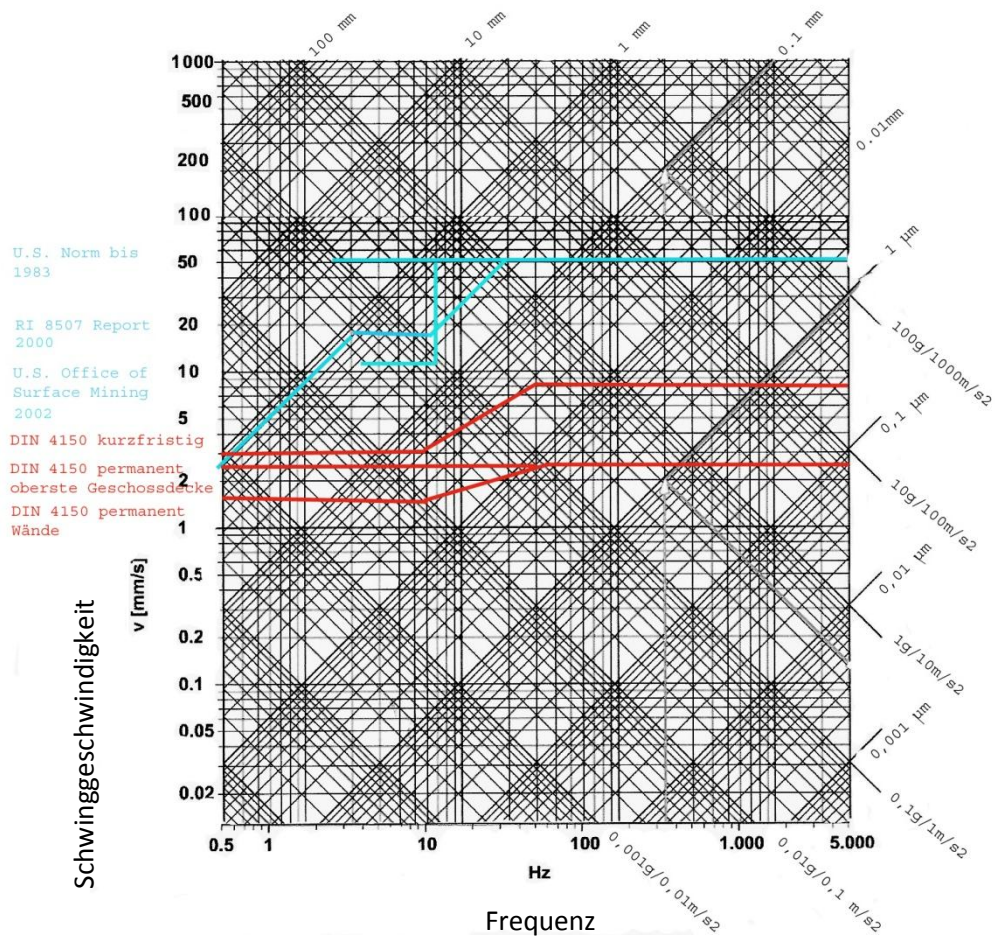


Diagramm 6 Graphischer Vergleich der Richtwerte aus der DIN 4150-3 (rot) mit den in Nordamerika anerkannten Grenzwerten (blau)<sup>28</sup>. Zum Ablesen der jeweiligen Werte folgen Sie der Linie beginnend mit dem Wert bei der niedrigsten Frequenz auf Höhe der Beschriftung bis zur höchsten Frequenz;  
 Modifiziertes Diagramm nach Hofmann

<sup>28</sup> KONON 1983, SVINKIN 2002.



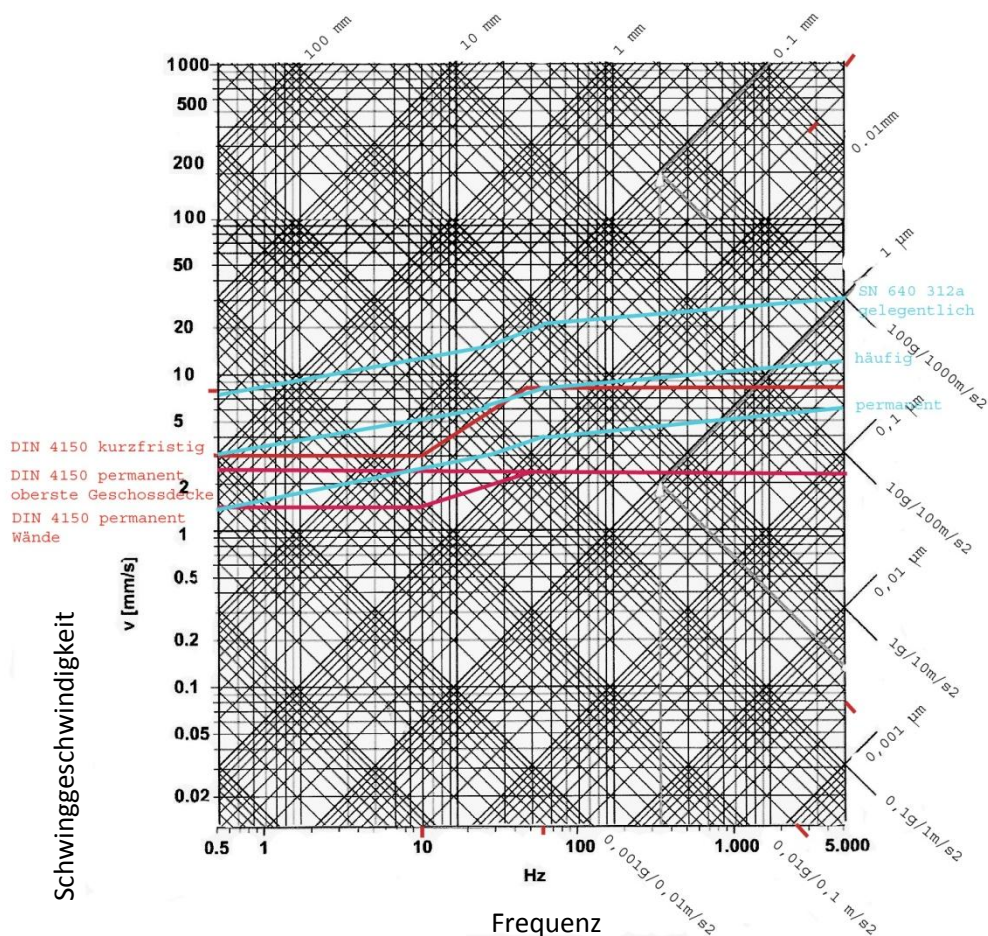


Diagramm 7 Graphischer Vergleich der Richtwerte aus der DIN 4150-3 mit der Schweizer Norm SN 640 312a<sup>29</sup>; Modifiziertes Diagramm nach Hofmann

Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, schätzen sowohl die Schweizer Norm als auch die DIN das Schadenspotential von Erschütterungen höher ein als die amerikanischen Richtlinien. In der nordamerikanischen Fachliteratur werden die Deutschen Richtlinien als zu konservativ und nicht einhaltbar diskutiert. Weiter stört man sich an der Art ihres Zustandekommens in Form eines Expertenkonsenses, während die amerikanischen Grenzwerte durch die Auswertung von 718 Sprengereignissen erarbeitet wurden. Da in Einzelfällen Schädigungen durch Erschütterungen, die unterhalb der Grenzwerte von DIN 4150 lagen, berichtet wird, haben die konservativ wirkenden Richtlinien Deutschlands sowie der Schweiz dennoch ihre Berechtigung.<sup>30</sup> In Ermangelung anderer sinnvoller Grenzwerte, insbesondere für Kunstgegenstände und Ausstattungstücke wird die Richtlinie aus DIN 4150-3 als Anhaltspunkt für die Einschätzung der Gefährdung durch die für konkrete Fallbeispiele gemessenen Erschütterungen verwandt.

<sup>29</sup> STUDER o.A.

<sup>30</sup> SVINKIN 2002, Unterlagen der Abteilung Meßtechnik.

## Erschütterungsbelastung durch Erdbeben

Erdbeben sind nicht nur für die Anrainer der San-Andreas-Spalte in Kalifornien oder im italienischen Assisi ein ernstzunehmendes Problem. Auch in Deutschland gibt es täglich mehrere Mikrobeben, besonders im Saarland und in Südwestdeutschland, insbesondere der Region um den Kaiserstuhl. Die Hauptfrequenz von Erdbeben ist bei 6 Hz auszumachen. In Gebieten mit starker seismischer Aktivität erreichen die Schwinggeschwindigkeiten während eines Bebens 25 – 1500 mm/s in horizontaler und bis zu 600 mm/s in vertikaler Schwingrichtung.<sup>31</sup> Dabei kommt es zum strukturellen Kollaps von Bauwerken. Hier stößt man in einigen Fällen an die Grenzen der Wirksamkeit von Maßnahmen zum Erschütterungsschutz.

Während eines Erdbebens wurden in den saarländischen Städten Falscheid und Eidenborn Erschütterungsmessungen durchgeführt. Die Auswertung zeigte Schwinggeschwindigkeiten zwischen 6,6 mm/s und 22 mm/s bei Frequenzen von 4 – 12 Hz für die besagten Erdstöße an. Im Vergleich zu den großen Erdbeben wirken diese Werte zwar lächerlich klein, allerdings empfiehlt die DIN Frequenzen unter 10 Hz 3mm/s als Höchstwert. Dieser wird während der in Deutschland stattfindenden Mikrobeben teils deutlich überschritten. Es handelt sich demnach zwar um leichte Beben, jedoch mit dem Potential historische Gebäude zu schädigen.<sup>32</sup>

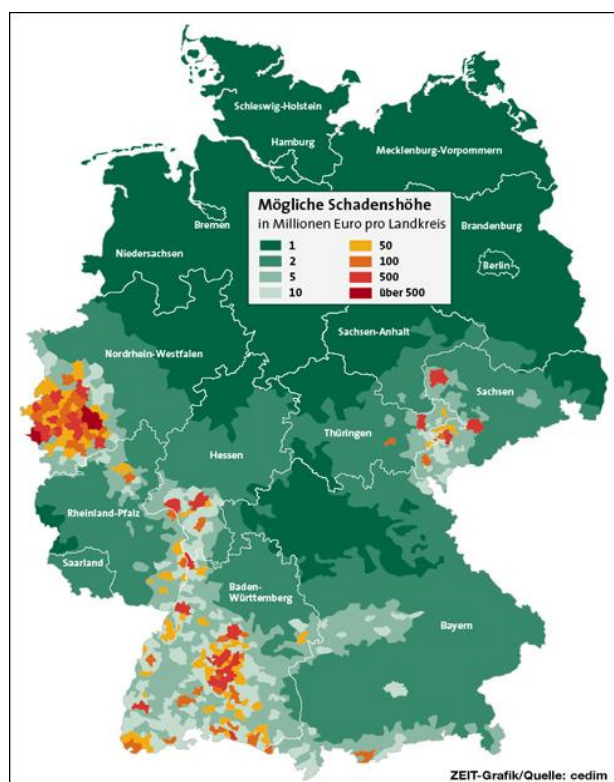


Abbildung 13 Erdbebenkarte 2008 Deutschland

<sup>31</sup> BAROV 1994.

<sup>32</sup> SROKA O.A.

## Erschütterungsbelastung durch Bauarbeiten

Unter dem Begriff Bauarbeiten versammeln sich die unterschiedlichsten Tätigkeiten, deren invasiver Charakter sich beträchtlich voneinander unterscheidet. Die Bandbreite deckt die Baugrundsprengung in der Nachbarschaft genauso ab, wie die Installation neuer Rauchmelder in einem Galerieraum oder die Montage von Hängesystemen und Beschilderungen. Differenzieren und verhältnismäßig Handeln lautet hier das oberste Gebot! Wie bereits aufgezeigt<sup>33</sup>, hängt die Intensität der beim Empfänger gemessenen Erschütterungsgrößen von vielen Faktoren ab. Da die Stratographie des Baugrundes, die Umgebungsbebauung sowie der Aufbau der Gebäudehülle als Ortskonstanten zu betrachten sind, variiert die potentielle Schädlichkeit hauptsächlich mit den Kenngrößen der verwendeten Baumaschinen sowie deren Entfernung zum Empfänger. Von gesteigertem Interesse sind der Krafteintrag und die Arbeitsfrequenz der Maschine.

### Die maßgebenden Frequenzen

Bei Handwerkzeugen, wie etwa einem Hammer, mit dem ein Nagel in eine Wand geschlagen wird, bestimmt der Benutzer die anregende Frequenz. Hämmert er schneller, ist die Frequenz höher, hämmert er langsamer, ist sie niedriger. Normal sind etwa 120 Schläge in der Minute, also 2 Schläge in der Sekunde, folglich eine Frequenz von 2 Hz.<sup>34</sup> Im Falle von einmaligen Stößen gibt es keine regelmäßige Anregung, d.h. keine anregende Frequenz, hierbei ist demnach die Eigenfrequenz des direkt angestoßenen Bauteiles maßgebend. Angenommen, ein Stoß wirkt auf den Boden ein, etwa durch das Absetzen einer Last, z.B. einer Palette mit Baumaterialien, so wird die dabei auftretende Kraft in die Geschosdecke eingeleitet. Um bildlich bei den Schwingungen zu bleiben, verursacht das Gewicht der Palette eine Auslenkung der Geschosdecke nach unten. Da es sich um eine elastische Struktur handelt, ist das Bauteil bestrebt in die Ruhelage zurück zu kehren. Der Energieüberschuss führt allerdings dazu, dass die Decke über den Ruhepunkt hinaus auf die entgegengesetzte Seite schwingt. Diese Wechsel finden so lange statt, bis die Dämpfung die Bewegung gegen Null auslaufen lässt. Die Frequenz dieser Schwingung ist die Eigenfrequenz des Bauteils, die eine in der Intensität minimale, jedoch permanent präsente Schwingung des Körpers darstellt. Das Stoßereignis verstärkt diese bereits stattfindende Schwingbewegung. Für angrenzende Bauteile stellt nun die Eigenfrequenz der Geschosdecke die anregende Frequenz dar. An einer auf diesem Boden stehenden Skulptur, erhielt man bei einer Erschütterungsmessung Werte, die zum einen in der resultierenden Schwinggeschwindigkeit das Gewicht der abgesetzten Palette, bzw. deren Krafteintrag abbilden und zum anderen als Hauptfrequenz die Eigenfrequenz der Geschosdecke beinhalten.

---

<sup>33</sup> Siehe Kapitel physikalische Grundlagen.

<sup>34</sup> Der Krafteintrag, d. h. die aus den Schlägen resultierende Schwinggeschwindigkeit, kann in Näherung rechnerisch ermittelt werden. Dazu sind die Schlaggeschwindigkeit und die Schlagfläche des Hammers bzw. der Nagelquerschnitt nötig. Da sich zwangsläufig eine hohe Fehlerquote ergibt, sind Versuchsmessungen der Erschütterungen sicher der bessere Weg.

### Die erreichten Schwinggeschwindigkeiten

Grundsätzlich gilt in Näherung: Je schwerer die Baumaschine ist, desto mehr Kraft steht hinter der ausgeführten Bewegung und umso höher ist die daraus resultierende Schwinggeschwindigkeit in der angeregten Struktur. Wie immer spielt die Entfernung Erschütterungsquelle/Empfänger eine große Rolle. Allerdings ist bei Bauarbeiten zu beachten, dass sich der Standort und Angriffspunkt der Baumaschinen öfter ändern.

### Erschütterungsintensive Arbeiten

Es erscheint sinnvoll, Bauarbeiten in zwei Gruppen zu unterteilen. Zum einen in Bauarbeiten an Grundstücken und Gebäuden in der Nachbarschaft von Museen, zum anderen in Bauarbeiten in und am Museumsbau<sup>35</sup>.

Im ersteren Fall sind nur Sprengungen und Arbeiten unter Einsatz schwerer Maschinen zu berücksichtigen. Diese betreffen den Aushub und die Grundverdichtung, das Rammen von Spundwänden sowie Abbrucharbeiten. Für Baumaschinen gelten zwei Grundtendenzen:

- je kleiner, leichter die Maschine umso geringer ihre Kraftübersetzung
- und umso höher die Arbeitsfrequenzen<sup>36</sup>.

Daher werden die bereits ausgeschlossenen Bauarbeiten mit kleineren Maschinen auf steigende Entfernung zu stark gedämpft, um am Museumsbau anzukommen und werden nur im Falle Bauarbeiten im Museum berücksichtigt.

### Sprengungen

Hinsichtlich Sprengerschütterungen liefert DIN 4150 mit den angesetzten Richtwerten die zuverlässigste Einschätzung. Da mit Sprengungen ganz selbstverständlich Gefahr assoziiert wird, liegen hier aus unzähligen Gutachten konkrete Werte für resultierende Schwinggeschwindigkeiten in Entfernung zur Sprengstelle und sogar für die Propagation über Geschossdecken vor. Die relevanten Beschreibungskriterien einer Sprengung sind Sprengkraft und die zeitliche Folge der Zündungen, da es sich selten um eine einzige Sprengladung handelt. Die Zündfolge gibt also eine Anregungsfrequenz vor. Ab einer Distanz von etwa 800 m<sup>37</sup> beginnt die Eigenfrequenz des Bodens (je nach Art 10 – 28 Hz)<sup>38</sup> zu dominieren. Genauso verhält es sich in Gebäuden: Während am Fundament und der 1. Geschossdecke noch die Eigenfrequenz des umgebenden Erdbodens maßgeblich ist,

---

<sup>35</sup> Handelt es sich bei dem Denkmal oder Museum nicht um ein freistehendes Gebäude, sind Bauarbeiten in den angrenzenden Häusern wie im Gebäuden stattfindend zu bewerten.

<sup>36</sup> Die meisten Maschinen führen Drehbewegungen aus. Je kleiner die Maschine, umso kleiner ihr Zubehör (Sägeblätter, Fräser, Bohrer). Denkt man an einen Eiskunstläufer beim Drehen von Pirouetten, lässt sich beobachten, dass dieser durch das Anlegen der Arme an den Körper seinen Durchmesser reduziert und dabei an Drehgeschwindigkeit gewinnt. Höhere Drehgeschwindigkeit bedeuten mehr Umdrehungen pro Zeitintervall, folglich höhere Drehfrequenz. Je kleiner also der Werkzeugdurchmesser, desto höher die Arbeitsfrequenzen.

<sup>37</sup> DIN 4150-1:2001-06 S. 17.

<sup>38</sup> Siehe Tabellen Eigenfrequenzen Böden S. 19 – 23.

überwiegt in den folgenden Geschossdecken deren Eigenfrequenz.<sup>39</sup> Konkret bedeutet dies für die dargestellte „Mustersprengung“:

Entfernung	Schwinggeschwindigkeit	Dominante Frequenz
0 – 800 m	26 – 0,38 mm/s <sup>40</sup>	50 Hz
800 – 1500 m	0,38 – 0,12 mm/s	8 Hz
Fundament/Kellerdecke	0,79 – 1,22 mm/s	8 Hz
Weitere Geschossdecken	1,81 – 1,92 mm/s	22 Hz

Tabelle 2 Werte aus einer repräsentativen Gewinn-/Baugrundsprengung

Legt man die Tabelle zu Grunde, kann man sowohl die entfernungsabhängige Abnahme der Schwinggeschwindigkeit, sowie die resonanzbedingte Erhöhung von Geschossdecke zu Geschossdecke ablesen. Hier fällt die Steigerung von Kellerdecke zu Decke EG (0,59 mm/s), zu Decke 1. OG (0,11 mm/s) kleiner aus. Bezieht man in die Sicherheitsüberlegungen für Museen und Denkmäler nun möglich ungünstige Voraussetzungen ein, wie Frequenzen im Resonanzbereich des Gebäudes und schlechte Dämpfung bei der Ausbreitung im Erdreich, sind Sprengungen dieser Größenordnung im Radius von **500 m** als potentiell gefährlich zu betrachten. SISKIND hat 2000 im Auftrag des U.S. Bureau of Mines 718 Sprengvorgänge auf resultierende Schäden hin untersucht. In seinem Bericht RI 8507 sind 233 Vorfälle bei Schwinggeschwindigkeiten von 13 – 279 mm/s dokumentiert.<sup>41</sup> Die protokollierten Schwinggeschwindigkeiten liegen in Gänze über den in Deutschland geltenden Richtlinien für kurzzeitige Erschütterungseinwirkungen bei historischen Gebäuden. Dies spricht für eine hohe Sicherheit bei Einhaltung der in der Norm vorgeschlagenen Werte.

#### Rammen und Walzen

Baugruben werden oft aus Sicherheitsgründen durch die vor Beginn der Ausschaltarbeiten eingebrachten Spundbohlen gesichert. Obwohl es sich dabei nicht im eigentlichen Sinne um bodenverdichtende Maßnahmen handelt, werden die gleichen Geräte verwandt, um das Rammgut (Bohlen und Pfähle) in den Boden einzubringen.

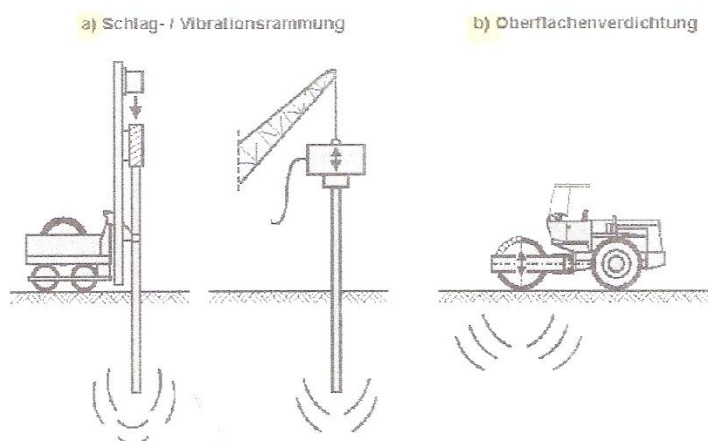


Abbildung 14  
Beispiele erschütterungsintensiver  
Verfahren zur Fundamentgründung  
und Bodenverdichtung, ACHMUS 2006

<sup>39</sup> DIN 4150-1:2001-06 S. 19.

<sup>40</sup> Freifeldmessung ohne Verlust Übergang Gebäude.

<sup>41</sup> SVINKIN 2002 zu SISKIND 2000.



Die Kennzahlen von bodenverdichtenden Maschinen können stark variieren und sollten im Vorfeld immer aus den Herstellerangaben entnommen werden. Ob diese während des Betriebs wirklich erreicht bzw. eingehalten werden, ist dabei nicht gesichert.

Maschinentyp	Schwinggeschwindigkeit	Anregungsfrequenz <sup>42</sup>
Schlagrammen	7 mm/s (20 m); 25 mm/s (1,5 m) <sup>43</sup>	13 – 40 Hz <sup>44</sup>
Vibrationsrammen	27 mm/s (5 m) – 0,1 mm/s (130 m)	Variabel: 30 – 40 Hz <sup>45</sup>
Walzen	-	25 – 40 Hz
Tandemwalzen	-	50 Hz
Vibrationsstampfer	-	57 – 75 Hz

**Tabelle 3 Kennziffern bodenverdichtender Baumaschinen**

Berücksichtigt man die Verschiebung zu tieferen Frequenzen im Erdreich liefern beide Arten der Rammung ab einer Entfernung von **40 m** zur Quelle keine Schwinggeschwindigkeiten über den Richtlinienwerten der DIN, gesetzt den Fall, es treten keine Resonanzphänomene auf. Allerdings geht von dieser Art Maschinen durch die Regelmäßigkeit der Anregung noch eine weitere Gefährdung aus: Ab einer Schwingbeschleunigung von  $3,3 \text{ m/s}^2$  bei 0-48 Hz kommt es vermehrt zu Kornumlagerungen im Erdreich. Dadurch entstehen bzw. verfüllen sich Hohlräume im Untergrund. Daraus resultieren Setzbewegungen, die Folgeschäden struktureller Natur an den Gebäuden hervorrufen können. Typisch sind diagonale Risse an Schwachstellen wie den Ecken von Fenster- und Türleibungen.

Eine eher seltene, aber dennoch verheerende Folge von Bodenschwingungen ist die Bodenverflüssigung. Dabei handelt es sich um den erschütterungsbedingten, kurzzeitigen Verlust der Tragfähigkeit des Untergrundes.<sup>46</sup>

### Abbrucharbeiten/Fallende Massen

Darunter sind alle Vorgänge zusammenzufassen, bei denen kompakte Massen (Fallgewichte, Zementbrocken etc.) oder vergleichsweise ausladende Bauteile auf den Baugrund oder andere Gebäudestrukturen aufprallen. Die Intensität der resultierenden Erschütterung hängt von der Fallenergie, dem Produkt aus Fallhöhe und Gewicht des fallenden Körpers ab. Wird der Abbruch durch eine Sprengung in die Wege geleitet, ist der Erschütterungseintrag durch die umstürzenden Bauteile höher einzuschätzen als die der Sprengung selbst.<sup>47</sup> Die maximalen Schwinggeschwindigkeiten können dreistellige Werte erreichen. Auf derartige Arbeiten ist also in einem weit größeren Radius um das Museum herum zu achten.

<sup>42</sup> ACHMUS 2006.

<sup>43</sup> In der Klammer sind die zugehörigen Entfernungswerte aufgetragen. Der erste Wert bezieht sich auf einen Dieselmäher mit 13 Hz Arbeitsfrequenz, der Zweite auf ein Exemplar mit 40 Hz.

<sup>44</sup> ATHANASOPOULOS 2000.

<sup>45</sup> DIN 4150-1:2001-06.

<sup>46</sup> Siehe auch **Erschütterungsbedingte Schäden**.

<sup>47</sup> DIN 4150-1:2001-06 S. 9.

## Maßnahmen

Die beschriebenen Vorgänge Sprengung, Bodenverdichtung und Abbruch sind in der Lage gefährlich hohe Schwinggeschwindigkeiten zu induzieren. Glücklicherweise gibt es jedoch in jedem der Fälle Möglichkeiten, die Erschütterungsemissionen auf ein für historische Bauwerke vertretbares Maß zu minimieren. Voraussetzung dafür ist allerdings frühzeitige Kenntnis von Planungsvorhaben im Umkreis von 500 – 1000 m um ein Denkmal bzw. ein Museum, um das Gespräch mit den Verantwortlichen zu suchen. Dies eröffnet den Zugang zu wichtigen Informationen zum geplanten Arbeitsablauf. Eine mögliche Einflussnahme hin zu erschütterungsärmerem Vorgehen auf der Baustelle ist nicht von vornherein zum Scheitern verurteilt, da dies nicht immer mit einer Kostenerhöhung für den Bau verbunden sein muss. Dabei kann es sich um organisatorische Veränderungen wie das Auseinanderlegen von sonst gleichzeitig ausgeführten Arbeitsschritten, der Reduzierung der Sprengerschütterung durch Vermehrung der Sprengstufen, dem Auswechseln bestimmter Maschinentypen oder Modifikation deren Arbeitsweise oder dem Aufschütten eines dämpfenden Fallbettes<sup>48</sup> aus Schotter bei Abbrucharbeiten. Ein Beispiel für das Modifizieren einer Baumaschine ist das Fahren von Vibrationsbären (-rammen) bei möglichst hohen Frequenzen (>32 Hz). Damit werden Resonanzphänomene im Untergrund und Bebauung ausgeschlossen. Weiter gibt es diese Vibrationsaggregate auch mit der Option, beim Anlaufen des Motors diesen zu entkoppeln. Beim Anlaufen des Motors von 0 Hz bis zur Arbeitsfrequenz wird die Übertragung auf Baumaschine und Rammgut verhindert, diese setzt dann gleich mit der Arbeitsfrequenz ein. So finden sich für jede Erschütterungsquelle Möglichkeiten der Emissionsreduktion. Diplomatisches Geschick ist förderlich, da die in der Norm angegebenen Richtwerte keine rechtlich relevante Grundlage bilden, also keinen Rechtsanspruch gewähren. Da jede Prognose einer Erschütterungsentwicklung von der Baustelle hin zu den für Restauratoren und Denkmalpflegern schützenswerten Gebäuden und Ausstattungsteilen wegen der vielen Variablen immer als unsicher zu bewerten ist, sollten im Zweifelsfall begleitende Messungen stattfinden. Gegenmaßnahmen an Erschütterungen ausgesetzten Bauteilen gestalten sich beim Schutz der Bausubstanz als äußerst schwierig. Barrieren im Grund (bis zu 10 m tiefen Schlitze im Erdreich) sind äußerst kostspielig und führen im besten Fall zu einer Reduktion von 25 % der Einträge<sup>49</sup>. Der Schutz von Ausstellungsstücken hingegen lässt sich einfacher bewerkstelligen. Dies kann durch dämpfende Unterlagen, wie etwa Filz oder speziell auf bestimmte Frequenzwerte ausgelegte Schaumstoffe erfolgen. Dabei gilt: Je niedriger die Anregungsfrequenz, umso schwieriger gestaltet sich die Dämmung, bzw. umso geringer ist ihr Wirkungsgrad. Überwiegt die Gefährdung<sup>50</sup> trotz getroffener Sicherheitsmaßnahmen die Risiken einer Evakuierung einzelner Stücke oder gesamter Räume, müssen diese an sichere Orte verbracht werden.

---

<sup>48</sup> So kann der Fall eines Schlotens mit einem Gewicht von 3t auf eine resultierende Schwinggeschwindigkeit von 30 mm/s bei 8 Hz gedrückt werden.

<sup>49</sup> HARTMANN 2005.

<sup>50</sup> Siehe Belastungen Innerhaustransporte. Es gilt die Höhe Einzelereignisse und die durch Dauererschütterungen fortschreitende Materialermüdung abzuwägen.

### Bauarbeiten am und im Gebäude

Neben den bereits aufgeführten erschütterungsreichen Bauarbeiten, die natürlich auch in seltenen Fällen im Zusammenhang mit dem Museumsbau selbst eine Rolle spielen, zeigen alle Arbeiten an Raumhülle und Einrichtung Wirkung. Ob davon eine Gefährdung ausgeht, liegt an der mehr oder weniger starken Dämpfung der Schwingungen. Aussagen dazu lassen sich über die Arbeitsfrequenzen der jeweiligen Maschinen treffen.

Baumaschine	Arbeitsfrequenz <sup>51</sup>
Hammer (Handwerkszeug)	2 Hz
Betonschleifmaschinen (Estrich glätten) DIMU	2,5 Hz
Spindeldreher (Erdborher) DIMU	3 Hz
Betonfräse grob DIMU	6,5 Hz
Betonfräse fein DIMU	10 Hz
Kernbohrgeräte Dr. Schulze GmbH	9,5/23,5/48,5 Hz
Handkreissäge Mafell	16,6 Hz
Baukreissäge mit Maschinentisch Mafell	35 Hz
Kettensägen/-stemmer Mafell	50 Hz
Bohrhammer (Fabrikat unbekannt)	90 Hz
Fugenfräse/Trennschleifer STIHL	133 Hz
Oberfräse Mafell	166 Hz
Bohrmaschine Metabo	0–600 Hz

Tabelle 4 Arbeitsfrequenzen verschiedener Baumaschinen

In Näherung gilt, dass bei spanabnehmenden Arbeiten (Schneiden, Fräsen, Bohren) die Arbeitsfrequenzen steigen, je kleiner der Werkzeugdurchmesser ist. Je härter das zu bearbeitende Material, umso geringer werden die Drehzahlen gewählt und umso niedriger sind die Arbeitsfrequenzen. Unter Belastung sinkt die Arbeitsfrequenz ebenso, die Drehgeschwindigkeit wird gebremst.<sup>52</sup> Mit Hilfe dieser Informationen kann jede Baumaschine im Vergleich zu anderen eingeordnet werden. Bei schlagenden Maschinen findet man die Schlagfrequenzen im dazugehörigen Datenblatt. Vergleichende Messungen der Schwingungsemissionen verschiedener Arbeitsgeräte an Bauteilen wurden bei der Literaturrecherche nicht gefunden. Allerdings gilt auch hier wieder: Je größer die wirkende Kraft, desto größer der Erschütterungseintrag. Im Rahmen der Messungen in der Neuen Pinakothek konnten die Signale zweier Bohrhämmer beim Ausbrechen einer Feuerschutztüre eingefangen werden. Zwischen Quelle und Empfänger lagen dabei räumlich gesehen 50 – 100 m. Bei der Messung<sup>53</sup> auf dem Parkettfußboden in Saal 16 lag der Spitzenwert der Schwinggeschwindigkeit bei 0,11 mm/s bei 90 Hz. Die Hintergrundbelastung der Geschossdecke, gemessen in einer Bohrpause liegt bei 0,02 mm/s. Auf die Distanz gesehen stellt also die Steigerung um 0,07 mm/s durch die Bohrhämmer in Saal 16 keine Gefährdung dar.

<sup>51</sup> Es wurden immer die niedrigsten Werte angesetzt.

<sup>52</sup> Holztechnik 1999.

<sup>53</sup> Meßstempel mit drei Accelerometern vom Typ 8340 Brühl & Kjær.



### Überlegungen zu angemessenen Grenzwerten

Den wohl ersten ernsthaften Versuch einer Grenzwert-Festlegung für den Fall Bauarbeiten im Museum unternahmen SAUNDERS, SLATTERY und MULDER 1999. Die Grundlage für ihre Überlegungen bildeten die 1991 erfolgte Untersuchung zur mechanischen Belastbarkeit von Gemälden von MECKLENBURG und TUMOSA, die bei einer Belastung von 10 g ( $98 \text{ m/s}^2$ ) keine Risse an Gemälden feststellen konnten. Da bei diesen Versuchen Dummies mit relativ neuen und damit elastischeren Überzügen benutzt wurden, lehnen dies die Autoren von 1999 ab. Bei ihren eigenen Untersuchungen zur Stoßbelastung bei Außerhaustransporten konnten sie bei Erschütterungssimulationen auf Rütteltischen bei Frequenzen über 50 Hz keine Schäden im Bereich von Schwingbeschleunigungen zwischen 0,5 und 1 g ( $4,9 - 9,8 \text{ m/s}^2$ ) feststellen. Die Wahl fällt schließlich auf 0,5 g ( $4,9 \text{ m/s}^2$ ), da dies die ungefähren Werte seien, denen Gemälde in gefederten LKWs ausgesetzt sind, ohne hinterher für das Auge sichtbare Schäden davonzutragen. 2002 übernehmen WATTS, BERRY, DE JOIA und PHILIPOTT diesen Grenzwert, weisen jedoch auf die 1999 erschienene Publikation THICKETTS hin, der Schäden von fragilen Statuen bereits bei Belastungen von 0,2 g ( $1,9 \text{ m/s}^2$ ) dokumentiert. Kann dieser Wert als Grundlage für sinnvolle Grenzwerte bilden? – Nein, denn keine dieser Vorschläge nennt zugehörige Frequenzbereiche. Ein frequenzunabhängiger Grenzwert ist jedoch bei Schwinggrößen, ob nun Beschleunigung oder Geschwindigkeit nicht zielführend. Dies lässt sich gut in Diagramm 8, das die verschiedenen Größen wie Frequenz, Schwingweg (Auslenkung), Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung miteinander in Verbindung bringt, veranschaulichen. Dabei wird deutlich, dass ohne eine zugehörige Frequenz bei einer erlaubten Schwingbeschleunigung von  $4,9 \text{ m/s}^2$  alle Schwinggeschwindigkeiten von 0 -  $\infty$  zugelassen wären. Gleiches gilt für den Wert  $1,9 \text{ m/s}^2$ , wenn dieser nicht von zugehörigen Frequenzwerten begleitet wird. Tabelle 3 zeigt, dass es sich bei den Anregungsfrequenzen von Baumaschinen um einen Bereich von 0-600 Hz handelt. Eine indirekte Frequenzangabe nur durch die Bezeichnung „Bauarbeiten“ kann also keinesfalls abgeleitet werden. Zur Veranschaulichung der Problematik solch ungenauer Angaben wurden im Diagramm drei verschiedene Baumaschinen eingezeichnet: ein Betonschleifer (3,5 Hz), eine Baukreissäge (35 Hz) und ein Bohrhammer (90 Hz). Der Schnittpunkt der gelben Frequenzlinie mit der blauen Schwingbeschleunigung ( $1,9$  und  $4,9 \text{ m/s}^2$ ) markiert in horizontaler Verlängerung die dazugehörige Schwinggeschwindigkeit. Um eine Vergleichsgrundlage zu schaffen, ist mit rot die Richtlinie für kurzzeitig auftretende Erschütterungen bei historischen und sensiblen Bauwerken eingezeichnet. Alle Werte oberhalb der roten Grenzlinie halten die DIN Norm Gebäudeschutz nicht ein. Im Falle des Bohrhammers liegen beide Schnittpunkte unter der Grenzlinie, also im grünen Bereich. Für die Kreissäge liegen die Schnittpunkte bei 10 bzw. 20 mm/s, beim Betonschleifgerät sogar bei 110 bzw. 280 mm/s, einer Überschreitung der DIN Norm um das 100 fache! Damit wäre eine starke Gefährdung für das Gebäude gegeben. Konsequenterweise bleibt zu erwähnen, dass bisher keine zufriedenstellende Untersuchung bezüglich der Korrelation von Schäden an Kunstobjekten jeglicher Art und Schwinggrößen in Frequenzabhängigkeit erfolgt ist. Ob also die Richtwerte einer DIN zum Schutz historischer Bausubstanz wirklich auf Kunstgattungen und wenn ja, auf welche anzuwenden ist, kann an dieser Stelle nur

gemutmaßt werden. Wie dem auch sei, ein Grenzwert macht nur in Verbindung mit den zugehörigen Frequenzbereichen Sinn!

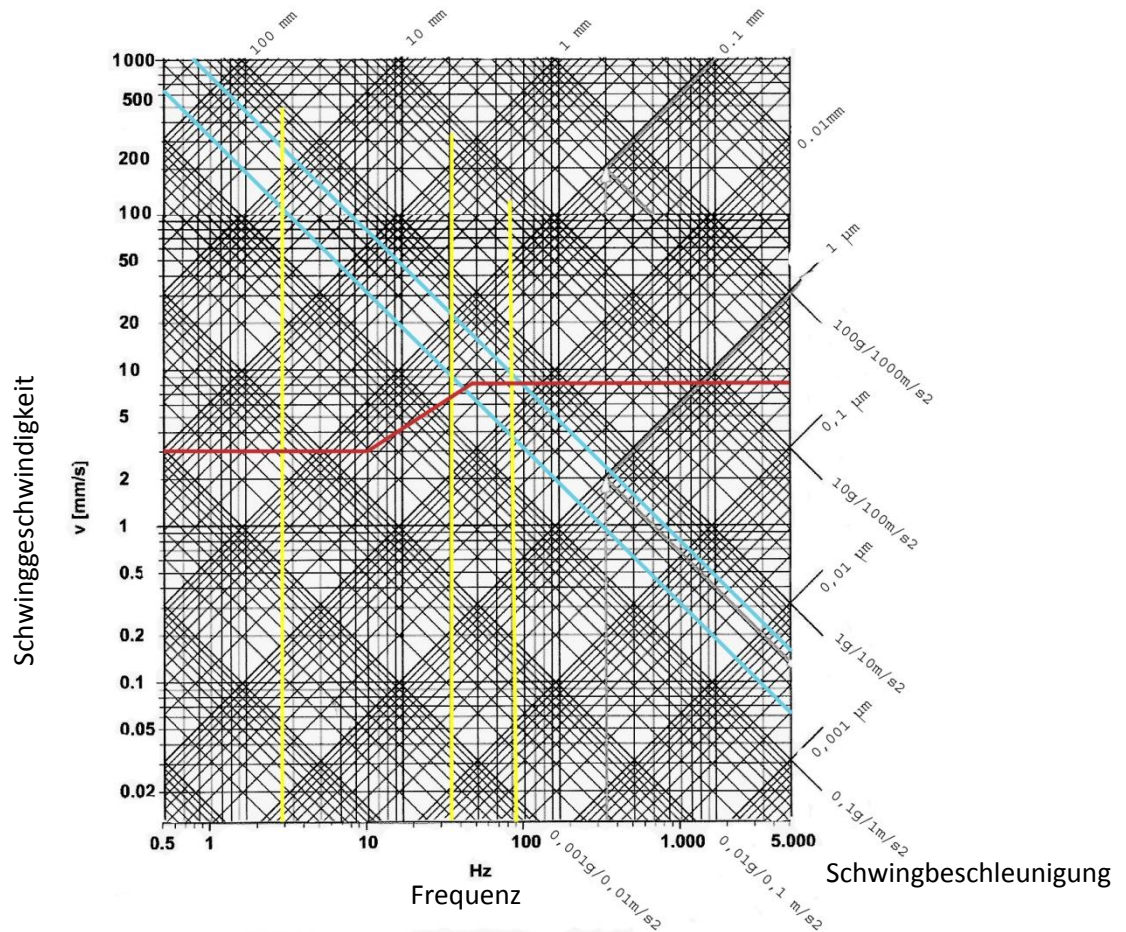


Diagramm 8 Aufzeichnung der **Arbeitsfrequenzen** von Betonschleifer (3,5 Hz), Baukreissäge (35 Hz) und Bohrerhammer (90 Hz) jeweils gelb, gegen die Grenzwertvorschläge für **Bauarbeiten** (blau) und die **Richtwerte** der DIN 4150-3 für historische Bauwerke (rot); Modifiziertes Diagramm nach Hofmann



Erschütterungsbelastung durch Bauarbeiten  
Beispielhaft an Stemmarbeiten im Parkhaus  
der Neuen Pinakothek

	$v_{\max x}$ senkrecht	$v_{\max y}$ parallel	$v_{\max z}$ waagrecht	$a_{\max x}$ senkrecht	$a_{\max y}$ parallel	$a_{\max z}$ waagrecht	Frequenzen
Hintergrundbelastung Boden Saal 16 Neue Pinakothek	0,022	0,015	0,018	-0,013	0,003	0,004	$f_x$ : 7; 10,5; 11,5; 24,5; 36,5; 46,5; 70; 84; <u>92,5</u> ; 95; 100; 109; 117; 124,5; 132,5; 156; 164; 176,5; 184; 191 Hz $f_y$ : 7; 9; 10,5; 14,5; 17,5; 20; 23,5; 24,5; 29,5; 31; 29,5; 31; <u>35</u> ; <u>36,5</u> ; 39; 43,5; 92 Hz $f_z$ : 12; 15,5; 24,5; 29,5; <u>36,5</u> ; 39; 43,5; 62,5; 88,5; 92; 156; 163; 191 Hz
2 Borhämmer beim Ausstemmen einer Feuerschutztüre Messung Boden Saal 16 Neue Pinakothek	0,112	0,035	0,064	0,069	0,010	-0,020	$f_x$ : 37; 43,5; 45,5; 87; <u>91,5</u> ; 130,5; 137; 174; 183; 228,5 Hz $f_y$ : 37; 43,5; 87; 91,5; 130,5; <u>183</u> ; 218; 228,5 Hz $f_z$ : 38,5; 43,5; 45,5; <u>87</u> ; 91,5; 130,5; 137; 174; <u>183</u> ; 228,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$

## Belastung durch Verkehrserschütterungen

Die in den letzten Jahrzehnten gestiegene Mobilität der Gesellschaft bedeutet ein Mehr an Fahrzeugen, Flugbetrieb usw. Damit entstanden zwangsläufig höhere Lärm- und Erschütterungsemissionen. Gegenläufige Tendenzen erwachsen einer gesteigerten Empfindlichkeit des menschlichen Organismus gegen derartige Belastungen. So wurden vor allem in punkto Lärm- aber auch beim Erschütterungsschutz technische Lösungen zum Minimieren von Fahrzeugemissionen am Fahrzeug selbst oder an der Fahrbahn entwickelt und verbaut. Die Gesamtbelastung des Bauwerks und den Anteil der Erschütterungen, die bis zum Kunstwerk vordringen und dort darauf einwirken, können jedoch verlässlich nur durch Messungen an Ort und Stelle ausgemacht werden.

### Verkehr zu Luft/Wasser

Für diese Fälle konnten im Rahmen der Diplomarbeit keine konkreten Werte erhoben werden. Sicher sind diese Verkehrsarten nur in Einzelfällen relevant. Zu prüfen bleibt, ob sich das Denkmal oder Museumsgebäude in einer Ein-/Ausflugschneise (Flughöhe 0 – 3000 m) befindet, da sich Flugzeuge, die die Reishöhe (15 000 m)<sup>54</sup> erreicht haben in zu großer Entfernung befinden, um relevante Erschütterungen an überflogenen Regionen auszulösen. Die Druckwellen von Düsenjets bei Überschallflügen können starke Erschütterungen auslösen, insbesondere die des Überschallknalls.<sup>55</sup> Das Schadenspotential von Überschallflügen lässt sich allein durch den Umstand ablesen, dass diese Ursache neben den Sprengerschütterungen von Gebäudeversicherungen abgedeckt wird.<sup>56</sup>

Erschütterungen als Folge der Nähe zu Gewässern war bereits 1834 hinderlich. „*Innerhalb der Umzäunung von Neu-Archangelsk, wo das Instrument von den Eingeborenen sicher gewesen wäre, ist der Boden Morast und teilweise Granit, gewährt also ein durchaus unsicheres Fundament, das selbst durch den Wellenschlag der See in Erschütterung gebracht wird.*“<sup>57</sup> Museen und Denkmäler in Insellage oder unmittelbar an Wasserstraßen angrenzend sind somit durchaus Erschütterungen ausgesetzt, die durch den Wellenschlag induziert werden. In den seltensten Fällen dürfte der Einfluss der Wasserstraßen so augenscheinlich sein, wie in der Lagunenstadt Venedig. Ein bekanntes und näher gelegenes Beispiel für dieselbe Problematik ist die Bode-Insel Berlin mit ihren Museumsbauten. Derzeit sind jedoch keine konkreten Messwerte über Frequenzinhalt und Höhe der Erschütterungsbelastungen durch Wellenschlag von Wasserstraßen und Binnengewässern bekannt.<sup>58</sup> Da es sich aber mit Sicherheit um niederfrequente Schwingungen, also von potentiell schädigender Art, handelt sollte dieses Versäumnis in naher Zukunft nachgeholt werden.

---

<sup>54</sup> KÜHR 1983.

<sup>55</sup> Überflugdaten der Flugwaffe werden gespeichert und können an einem Bürgertelefon abgefragt werden. Kontaktdaten auf [www.bundeswehr.de](http://www.bundeswehr.de).

<sup>56</sup> Informationsbroschüre HELVETIA Gebäudeversicherung.

<sup>57</sup> WRANGEL 1834.

<sup>58</sup> Für das offene Meer werden als Frequenz des Wellenschlages 0,03 – 0,2 Hz angegeben; MARCON 1991.

## Straßenverkehr

Die Erschütterungsemissionen von Straßenverkehr variieren mit:

- der Entfernung zum Empfänger,
- der Art und Beschaffenheit der Fahrbahn,
- der gefahrenen Geschwindigkeit,
- der Federung des Fahrzeugs,
- dem Gewicht des Fahrzeuges,
- dem stratigraphischen Aufbau des Untergrunds
- und der Jahreszeit.<sup>59</sup>

Dabei führen geringere Entfernungen, schlechter Fahrbahnzustand und Federung des Fahrzeugs, hohe gefahrene Geschwindigkeit und hohes Fahrzeuggewicht jeweils zu einer Erhöhung der Intensität des Erschütterungseintrages.<sup>60</sup> Die Fachliteratur nennt für angrenzenden Gebäude Schwingbeschleunigungen von  $0,005 - 2 \text{ m/s}^2$ , in Schwinggeschwindigkeit ausgedrückt  $0,05 - 25 \text{ mm/s}$ , bei Frequenzen von  $5 - 25 \text{ Hz}$ .<sup>61</sup> Warum bei Untersuchungen der Auswirkung von Verkehrserschütterungen<sup>62</sup> in historischen Kernen tschechischer Städte in den 60er Jahren bei den gleichen Frequenzen die 10 fachen Schwingbeschleunigungen gemessen wurden, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Allerdings zeigt ein kürzlich erstelltes Gutachten der LGAB<sup>63</sup>, in dem der vergleichbare Fall des Erschütterungseintrags durch den Verkehr auf der gepflasterten Katharinengasse in Augsburg auf die Katharinenkirche gemessen wurde, Spitzen in der Schwinggeschwindigkeit von lediglich  $0,5 \text{ mm/s}$  ( $0,005 \text{ m/s}^2$ ) bei  $10 \text{ Hz}$ . Möglicherweise zeigt sich in den unterschiedlichen Werten auch der technische Fortschritt in Sachen Fahrzeugfederung. Bei den im Zuge dieser Arbeit in der Sammlung Bollert in unmittelbarer Nähe zur Prinzregentenstraße an Wand und Boden bei normalem Verkehrsaufkommen gemessenen Werten übersteigt die Schwinggeschwindigkeit  $0,2 \text{ mm/s}$  zu keiner Zeit. Da die meisten Denkmäler und Museen innerhalb von Ortschaften liegen, stellt  $50 \text{ km/h}$  die maximale Geschwindigkeit der Fahrzeuge dar. Erhöhtes Verkehrsaufkommen führt nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung des Erschütterungseintrages, weil dadurch der Verkehrsfluss verringert, ergo die Fahrzeuge langsamer fahren. Die Werte aus dem Gutachten und den Messungen im Zuge dieser Arbeit können also als repräsentativ gelten. Vergleicht man diese mit den Vorgaben aus DIN 4150, die im ungünstigsten Fall von auftretenden Frequenzen unter  $10 \text{ Hz}$  eine Überschreitung von  $3 \text{ mm/s}$  bei historischer Bausubstanz als problematisch ansieht, werden nicht einmal  $20 \%$  dieses Wertes erreicht. Der Straßenverkehr in Städten ist demnach als ungefährlich für historische Bausubstanz und darin aufbewahrte Kunstgegenstände zu bewerten. In welchem Ausmaß dauerhafte Belastungen der gemessenen Intensität über die Jahre zu Materialermüdung führt, ist jedoch wissenschaftlich nicht geklärt.

---

<sup>59</sup> Geordnet nach abnehmendem Einfluss.

<sup>60</sup> DIN 4150-3.

<sup>61</sup> HUNAJDI 2000.

<sup>62</sup> BATA 1967.

<sup>63</sup> LGAB Gutachten 2001.



### Schienenverkehr

München kennt drei verschiedene Arten von Schienenverkehr, die Regional- und S-Bahnen, die U-Bahnen sowie die Trambahnen. Da ähnlich wie im Straßenverkehr das Gewicht des Fahrzeugs, die Geschwindigkeit und Laufruhe sowie Fahrmanöver (Bremsen, Anfahren, Bewältigung von Kurven und Steigungen), Anregungsfrequenz und Krafteintrag durch das Fahrzeug beeinflusst, zeigen alle Bahntypen leicht unterschiedliche Werte. In der gefahrenen Geschwindigkeit bei ca. 50 km/h unterscheiden sich die Bahnen jedoch im Stadtgebiet kaum.<sup>64</sup> Die Ausnahme bildet die Trambahn, die als Teil des Straßenverkehrs häufiger in Bremsmanöver verwickelt ist und im Durchschnitt langsamer fährt. Diesen vermeintlichen Vorteil in Bezug auf das Minimieren des Erschütterungseintrags macht der geringere Gleisdurchschnitt wett, der eine stärkere Durchbiegung ermöglicht. Positiv zu erwähnen ist der gut dämpfende Unterbau (Unterschottermatten, Masse-Feder-Systeme) der Bahnen im Raum München, der die Emissionen stark reduziert. Mit Ausnahme von Untergründen mit nichtbindigen Böden und Weichschichten beträgt die Reichweite von Bahn induzierten Erschütterungen maximal 80 m<sup>65</sup>.

### Die U-Bahn

In einem Gutachten der damaligen Abteilung U-Bahnbau des Technischen Rathauses München über das Schadenspotential des S- und U-Bahnverkehrs unter dem Marienplatz auf die Mariensäule, wurde die Möglichkeit daraus resultierender Schädigung klar verneint. Die am Sockel der Mariensäule gemessenen Werte betragen für die U-Bahn 0,08 mm/s bei 40 – 50 Hz und für die S-Bahn 0,025 mm/s bei 38 – 50 Hz.<sup>66</sup> Da die U-Bahn im Raum München 4 – 10 m unter der Oberfläche verläuft ist der zu messende Erschütterungseintrag sehr gering. Der Münchener Kunstbau, der hauptsächlich Wechselausstellungen moderner Künstler zeigt, liegt im Zwischengeschoss der U-Bahnstation Königsplatz. Wenn überhaupt, sollten demnach hier die Erschütterungen die Belastungsgrenze von Bau- und Kunstwerken erreichen. Doch auch in unmittelbarer Nähe zur U-Bahn lassen sich zwar die unterschiedlichen Tunnelröhren, Fahrrichtungen, Brems- und Anfahrmanöver im Meßsignal deutlich ablesen, die Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit (in der Vertikalen am Fußboden gemessen) überschreiten jedoch nie 0,3 mm/s bei einer Hauptfrequenz von 23 Hz. Da diese Hauptfrequenzen zwischen 10 und 50 Hz liegen, gilt der Richtwert ein 8 mm/s. Damit liegt der Erschütterungseintrag der U-Bahn bei lediglich 4 % des Richtwerts. Für die der U-Bahnstation zugewandte Wand erhält man dem Fußboden



Abbildung 15 Der Kunstbau:  
Ein Museum im Zwischengeschoss der  
U-Bahnstation Königsplatz;  
[www.kunden.wundermedia.de](http://www.kunden.wundermedia.de)

<sup>64</sup> PISCHEK; JUNGHARDT 2002.

<sup>65</sup> DIN 4150.

<sup>66</sup> Gutachten U-Bahnreferat, Abteilung Meßtechnik 1992.

entsprechende Werte: Allerdings verfälscht dort eine Klanginstallation das Ergebnis. Die Pfeiler und anderen Wände weisen Werte um die 0,1 mm/s auf. Von den randständigen Pfeilern, hin zu den mittleren Pfeilern kann man die Abnahme der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten beobachten. An der Wand des Depotzugangs lassen sich bei einfahrender U-Bahn sogar nur noch 0,01 mm/s detektieren. Die Lage des Kunstbaus in unmittelbarer Nähe zur U-Bahn stellt per se somit keine erhöhte Gefährdung für die ausgestellten und aufbewahrten Kunstobjekte dar. Im Depotbereich sind die gemessenen Werte als gänzlich unbedenklich zu bezeichnen. Mit Hilfe der Meßergebnisse kann jedoch ohne großen Aufwand weitergehender Erschütterungsschutz betrieben werden. So sollte z. B. bei einer vorgesehenen Hängung von Bildern die der Station abgewandte Wand bevorzugt werden. Gleiches gilt für die Betonpfeiler. Hier sollten die mittigstehenden gewählt werden. Befinden sich Gemälde an der Wand, ist von einer Klanginstallation, deren Lautsprecher an ebendieser Wand angebracht sind, abzuraten, einer der Pfeiler wäre in diesem Fall die bessere Wahl. Ist der Aufwand verhältnismäßig, sollten derartige Überlegungen und vorbeugendes Handeln immer eine Rolle spielen, da die schädigende Wirkung von Erschütterungen auf die Vielzahl der unterschiedlichen Kunstwerke bisher nur unzureichend geklärt ist.

#### **Die Trambahn**

Während der Messungen in der Neuen Pinakothek konnte am Fussboden des Anbaus von Saal 16 das Signal der in einer Entfernung von 25 m vorbeifahrenden Trambahn aufgenommen werden. Die Schwinggeschwindigkeit betrug 0,23 mm/s bei 35 Hz. In dem Signal finden sich allerdings auch Anteile aus dem Betrieb zweier Borhämmer. In der Raummitte von Saal 16 konnte das Trambahnsignal bereits nicht mehr eindeutig zugeordnet werden. Ähnlich der U-Bahn stellt auch die Trambahn mit einem Eintrag von ca. 3% des Richtwertes von 8 mm/s somit keine Gefahr für die Bausubstanz und höchstwahrscheinlich auch nicht für das Sammlungsgut dar.





Erschütterungsbelastung durch Schienenverkehr  
im Besonderen  
U-Bahn (Kunstbau) und Trambahnen (Neue Pinakothek)

	$v_{max\ x}$ senkrecht	$v_{max\ y}$ parallel	$v_{max\ z}$ waagrecht	$a_{max\ x}$ senkrecht	$a_{max\ y}$ parallel	$a_{max\ z}$ waagrecht	Frequenzen
Hintergrundbelastung Boden Ausstellungssaal Kunstbau	-0,036	-0,017	0,016	-0,012	-0,021	0,015	$f_x$ : 7; 15,5; 23; 24,5; 28,5; 34; 50; 58; 62 Hz $f_y$ : 18; 24,5; 28,5; 34; 50; 58 Hz $f_z$ : 5,5; 25; 28,5; 33,5; 58 Hz
U2 Hauptbahnhof/ Feldmoching Ausfahrt aus Station Boden Ausstellungssaal Kunstbau	-0,181	0,090	-0,063	-0,050	-0,021	0,015	$f_x$ : 23; 24,5; 28,5; 33,5; 40,5; 55; 58,5; 63,5; 108 Hz $f_y$ : 24,5; 35; 55-60 Hz $f_z$ : 24,5; 33; 39,5; 55-60; 78-84 Hz
U2 Feldmoching/ Hauptbahnhof Einfahrt in Station Boden Ausstellungssaal Kunstbau	-0,283	-0,092	-0,061	-0,097	-0,025	-0,016	$f_x$ : 15; 23; 28; 34; 39,5; 54,5; 57; 58,5; 64; 67,5 Hz $f_y$ : 24,5; 28; 34,5; 57; 58,5; 64; 67,5 Hz $f_z$ : 24,5; 32,5; 57; 59,5; 64; 81 Hz
Hintergrundbelastung Pfeiler mittig Ausstellungssaal Kunstbau	-0,027	-0,026	0,021	-0,003	-0,003	0,003	$f_x$ : 4; 5,5; 7; 8,5; 12; 14,5; 21,5; 23; 27,5 Hz $f_y$ : Abfl. 9; 18; 23; 25; 27,5; 43; 49; 87 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 7; 11,5; 14; 23,5; 34,5; 43,5; 61; 65; 75 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Erschütterungsbelastung durch Schienenverkehr  
im Besonderen  
U-Bahn (Kunstbau) und Trambahnen (Neue Pinakothek)

	$V_{max x}$ senkrecht	$V_{max y}$ parallel	$V_{max z}$ waagrecht	$a_{max x}$ senkrecht	$a_{max y}$ parallel	$a_{max z}$ waagrecht	Frequenzen
U2 Feldmoching/ Hauptbahnhof Einfahrt in Station Betonpfeiler mittig Ausstellungssaal Kunstbau	-0,074	-0,105	0,186	-0,025	-0,026	0,080	$f_x$ : Abfl. 11; <u>14</u> ; 15,5; 60,5; 74,5 Hz $f_y$ : Abfl. <u>22,5</u> ; 24,5; 50; 55,5; 88 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 25; 52,5; 60,5; 64; <u>75</u> Hz
Hintergrundbelastung Pfeiler randständig Ausstellungssaal Kunstbau	-0,020	0,020	-0,223	-0,008	-0,009	0,011	$f_x$ : Abfl. <u>4</u> ; 11; 15,5; 36; 75,5 Hz $f_y$ : Abfl. <u>4</u> ; 6,5; 26,5 Hz $f_z$ : Abfl. 11; 22,5; 27,5, 61; <u>66</u> ; <u>75,5</u> Hz
U2 Feldmoching/ Hauptbahnhof Einfahrt in Station Betonpfeiler randständig Ausstellungssaal Kunstbau	-0,070	0,311	-0,354	0,014	-0,021	0,031	$f_x$ : Abfl. <u>15</u> ; <u>16,5</u> ; 25; 75 Hz $f_y$ : Abfl. <u>27</u> Hz $f_z$ : Abfl. <u>22,5</u> ; 27; 75,5 Hz
Hintergrundbelastung der U-Bahn abgewandten Wand Ausstellungssaal Kunstbau	-0,025	-0,029	0,204	-0,005	-0,005	0,024	$f_x$ : Abfl. 15,5; <u>23</u> ; 27,5; 34,5; 50; 54; 89; 97; 100 Hz $f_y$ : Abfl. 4,5; 15,5; <u>19</u> ; 23 Hz $f_z$ : <u>5</u> ; 12; 15,5; 19 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Erschütterungsbelastung durch Schienenverkehr  
im Besonderen  
U-Bahn (Kunstabau) und Trambahnen (Neue Pinakothek)

	$V_{max x}$ senkrecht	$V_{max y}$ parallel	$V_{max z}$ waagrecht	$a_{max x}$ senkrecht	$a_{max y}$ parallel	$a_{max z}$ waagrecht	Frequenzen
U2 Feldmoching/ Hauptbahnhof der U-Bahn abgewandte Wand Ausstellungssaal Kunstabau	0,062	-0,023	-0,183	-0,015	-0,005	0,023	$f_x$ : Abfl. <u>3,5</u> ; 15,5; 23; 27,5; 34,5; 54; 68 Hz $f_y$ : Abfl. <u>15</u> ; <u>19</u> ; 24 Hz $f_z$ : Abfl. 4,5; 9; 11,5; <u>15,5</u> ; 19; 22,5; 29; 36 Hz
Hintergrundbelastung (mit Kleininstallation) der U-Bahn zugewandten Wand Ausstellungssaal Kunstabau	-0,067	-0,179	0,220	0,054	-0,048	-0,059	$f_x$ : Abfl. <u>22</u> ; 26,5; 33; 38; 50; 62; 95 Hz $f_y$ : Abfl. <u>24,5</u> Hz $f_z$ : Abfl. <u>6</u> ; 11,5; 15,5; 17,5; 19; 22; 26,5; 37; 50; 62 Hz
U2 Feldmoching/ Hauptbahnhof der U-Bahn zugewandte Wand (mit Klang- installation) Ausstellungssaal Kunstabau	-0,081	-0,284	0,352	0,059	0,051	-0,069	$f_x$ : Abfl. 6; 11,5; 14; 22; 26; <u>33,5</u> ; 37,5; 43; 45; 48; 49,5; 61; 69; 72; 315-390 Hz $f_y$ : Abfl. 15,5; <u>23</u> ; 28,5; 33; 43; 45; 46 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 6; 10,5; 15,5; 16,5; 19; 24; 26,5; 33,5; 35; 37,5; 49,5; 60,5; 66; 72; 75; 95; 290-340 Hz
Hintergrundbelastung Wand Depot gemessen auf Betonoberfläche Kunstabau			-0,004			0,001	$f_z$ : <u>10</u> Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>



Erschütterungsbelastung durch Schienenverkehr  
im Besonderen  
U-Bahn (Kunstbau) und Trambahnen (Neue Pinakothek)

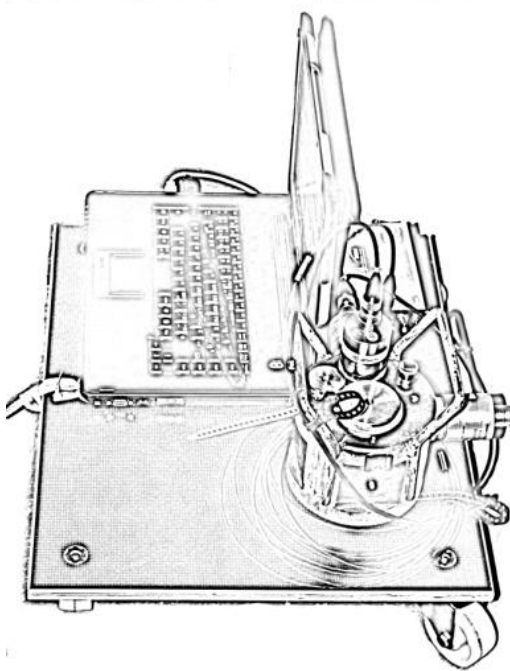
	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
U2 Wand Depot gemessen auf Betonoberfläche Kunstbau			-0,007			0,002	$f_z$ : 10; 12; 14,5; 26; 43; 100 Hz
Hintergrundbelastung (mit 2 Bohrhämmern bei Stemmarbeiten) Boden Saal 16 Anbau Neue Pinakothek	0,067	-0,014	-0,179	-0,052	0,007	0,008	$f_x$ : 87,5; 91,5; 156; 174,5; 183 Hz $f_y$ : 34,5; 87,5; 91,5; 156; 164; 174; 183 Hz $f_z$ : 10,5; 24,5; 36,5; 39; 43; 87,5; 91,5; 164,5; 174,5; 183; 190; 218,5; 229 Hz
Bremsvorgang Haltestelle Tram-Bahn (mit 2 Bohrhämmern bei Stemmarbeiten) Boden Saal 16 Anbau Neue Pinakothek	-0,227	0,057	0,038	-0,185	-0,028	-0,024	$f_x$ : 87,5; 91,5; 156; 174,5; 183 Hz $f_y$ : 34,5; 87,5; 91,5; 156; 164; 174; 183 Hz $f_z$ : 10,5; 24,5; 36,5; 39; 43; 87,5; 91,5; 164,5; 174,5; 183; 190; 218,5; 229 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>

## Transportsimulation - Einfluss des Fahrbelags

Bisher war im Zusammenhang mit Kunsttransporten der Fokus der Fachwelt auf Transporte außer Haus, von einem Museum zum anderen, gerichtet. Die langen Strecken, die bei solchen Transporten überwunden werden, und ihre schiere Dauer, legten ein hohes Sicherheitsrisiko für die transportierte Kunst nahe. Tatsächlich kommt es jedoch auch bei den Verladevorgängen<sup>67</sup> zu immensen Stoßbelastungen. Um dem Leihverkehr möglichst unbeschadet zu überstehen, wurden an verschiedenen Stellen<sup>68</sup> Forschungen durchgeführt, die eine möglichst optimal schützende Transportverpackung entwickeln sollten. Doch wie belastet sind Kunstwerke durch die im Haus stattfindenden Bewegungen, für die sie in den seltensten Fällen eigens verpackt werden?

Alle zu diesem Thema erhobenen Werte wurden aus Fahrten mit Wagen A gewonnen. Durchgeführt wurden diese auf Böden des Bayerischen Nationalmuseums, des Kunstbaus, der Neuen Pinakothek sowie im Nymphenburger Schloss. Im Zentrum des Interesses stand der Vergleich verschiedener Bodenbeläge und Deckenkonstruktionen.



Wagen A

Maße: 590 x 590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5 kg;

Meßapparatur 22,5 kg<sup>69</sup>

Stempel Bodenplatte:

3x Delta Tron® Accelerometer

Typ 8340 Brüel & Kjær

Meßrichtungen:

x: senkrecht auf Wagen

y: parallel zur Zugrichtung

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)

Nachdem alle Fahrten über verschiedene Fußböden ausgewertet und nach der Stärke der verursachten Belastungen sortiert sind, ergibt sich folgendes Bild: Die größten Erschütterungen verursacht das Fahren über Beläge mit starkem Oberflächenrelief. Dies

<sup>67</sup> Palettieren 62,8 m/s<sup>2</sup>, Container verladen 68,7 m/s<sup>2</sup>; Transport auf Rollfeld 171,7 m/s<sup>2</sup> (Werte von g in m/s<sup>2</sup> transferiert); BEGOV und KUSCHEL 2007.

<sup>68</sup> STÜHLER, 1986; LEBACK, 19987; SAUNDERS 1998 um die wichtigsten zu nennen.

<sup>69</sup> Das Gewicht des Meßstempels führt in diesem Aufbau nicht zu einer Verfälschung der Ergebnisse, da dieses in etwa dem des zu transportierenden Kunstgegenstandes entspricht.

kann durch Prägungen, Fugennetze, Sprünge, Störstellen, wie herausgealterte Äste und Querholznägel bei historischen Dielenböden oder Besonderheiten des Materials bedingt sein. Daneben zeigen sich Defekte im Unterbau und im Bereich der Nut- und Federverbindungen, vor allem bei schwimmend verlegten Holzböden. Weiter lässt sich der Einfluss der Elastizität der verbauten Fußbodenbeläge ablesen. Am wenigsten Emissionen an das Transportgut werden durch die elastischen Holzböden abgegeben, gefolgt von Laminatböden, Beton- und Steinböden. Die Art der Geschossdecke, ob nun Holzbalken- oder Stahlbetondecke, spielt dagegen eine untergeordnete Rolle. Die am stärksten angeregten Frequenzen werden durch die Bauart und Ausführung des Wagens bestimmt. Einflüsse der Fußböden können lediglich in den Nebenfrequenzen beobachtet werden.<sup>70</sup>

Die Schwinggeschwindigkeiten beim Überfahren der Böden variieren je nach Belag zwischen 30 und 250 mm/s, die Schwingbeschleunigungen von 3–10 m/s<sup>2</sup> bei Hauptfrequenzen um die 20 Hz<sup>71</sup>. Sieht man von den bei BEGOV und KUSCHEL publizierten Spitzenwerten beim Außerhaustransporten ab und legt die von LEBACK vorgelegten Werte in einem luftgefederten LKW-Hänger zugrunde, zeigt sich das Ausmaß der Gefährdung bei Innerhaustransporten: Die gemessenen Werte rangieren zwischen 0,39 und 0,88 m/s<sup>2</sup> bei Frequenzen von 1,5 Hz; 10–12 und 17–25 Hz. Mittels Umrechnungstabelle ergeben sich Schwinggeschwindigkeiten um die 4–100 mm/s. Die Belastungen bei Innerhaustransporten sind also vergleichbar mit den Belastungen Außerhaus, in Ausnahmefällen sogar höher. Erschwerend kommt hinzu, dass bei einer Beförderung von Depot zu Fotostelle oder von Atelier zum Ausstellungssaal der adäquaten Verpackung wenig Bedeutung zugemessen wird.

Fazit:

Die Bewegung von Kunstgütern im Museum birgt das höchste Gefahrenpotential: Ein Einschreiten hin zu erschütterungsminimierenden Maßnahmen ist geboten. Ob nun wirklich ein ähnlicher Aufwand des Verpackens, wie für das Verschicken an ein anderes Museum obligatorisch, aus Zeit- und Kostengründen sinnvoll erscheint, sei dahingestellt. Die Lösung liegt eher in einer Optimierung des Transportweges, der Wartung von Böden bzw. Wegen und der Entwicklung eines stärker entkoppelten Transportwagens<sup>72</sup>.

---

<sup>70</sup> Siehe Tabelle Seite 66 ff.

<sup>71</sup> Die hier erhobenen Werte sind durch den am schlechtesten dämpfenden Wagen A bedingt. Allerdings zeigen die optimierten Wägen immer noch Schwinggeschwindigkeiten im Bereich dessen, was in den LKW-Hängern gemessen wurde.

<sup>72</sup> Vergleiche auch Kapitel Vergleichsfahrten.



Transportfahrten mit einem handelsüblichen Möbelhund  
Maße: 590x590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5kg, Meßapparat 22,5 kg

y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung



	dominierende Einflüsse	Boden $V_{maxx}$ senkrecht	Boden $V_{maxy}$ parallel	Boden $V_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Tonfliesenboden gebrannte Fliesen, Muster mit starkem Relief (BNM)	sehr starkes Relief, bei hartem Material	251,05	84,65	-81,99	10,50	5,07	6,07	$f_x$ : 13,5; 22; 42,5 Hz $f_y$ : Abfl. 7; 20; 22,5; 24,5; 26,5 Hz $f_z$ : Abfl. 13; 14; 22; 25; 27,5 Hz
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten (Nymphenburg Hauptschloss)	brüchige, teils fehlende Verfugung	-202,34	-77,70	57,95	10,02	5,46	5,78	$f_x$ : 21 Hz $f_y$ : indifferent 0-65 Hz $f_z$ : 21,5; 29 Hz
Hist. Dielenboden (Nymphenburg Hauptschloss)	starke Verformung (Schüsself)	-154,85	-110,84	-89,98	9,57	5,87	5,30	$f_x$ : 19,5 Hz $f_y$ : 4 Hz $f_z$ : indifferent 0-52 Hz
Parkettboden Eiche Musterverlegung (BNM)	Schaden Unterbau	138,94	-44,56	48,43	9,41	3,62	5,60	$f_x$ : 5,5; 22 Hz $f_y$ : Abfl. 8,5; 23; 24; 25,5; 28; 28; 29; 32 Hz $f_z$ : Abfl. 8,5; 22,5; 31; 33,5 Hz
Granitboden aufgerauht, Rampen (Neue Pinakothek)	Stoßereignis Anfahrt Rampe	-123,35	-22,16	36,88	7,83	-2,00	4,25	$f_x$ : 22,5 Hz $f_y$ : Abfl. 5,5; 7,5; 10,5; 22,5; 26; 39,5 Hz $f_z$ : Abfl. 10; 15; 22,5; 29,5 Hz
Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Musterverlegung (BNM)	ausgeprägtes Fugennetz, Inhomogenität Rotmarmor (Versätze)	-113,04	-24,83	42,20	8,70	3,41	3,71	$f_x$ : 22,5 Hz $f_y$ : Abfl. 30,5 Hz $f_z$ : Abfl. 23; 26,5; 29; 31 Hz

Schwinggeschwindigkeiten (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>



Transportfahrten mit einem handelsüblichen Möbelhund  
Maße: 590x590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5kg, Meßapparat 22,5 kg  
y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung



	Boden $v_{max,x}$ senkrecht	Boden $v_{max,y}$ parallel	Boden $v_{max,z}$ waagrecht	Boden $a_{max,x}$ senkrecht	Boden $a_{max,y}$ parallel	Boden $a_{max,z}$ waagrecht	Frequenzen
Betonboden mit Anstrich-Anstrich (Neue Pinakothek)	-83,80	-47,97	45,08	7,16	2,36	-3,25	$f_x$ : 20; <u>22</u> Hz $f_y$ : 5,5; 22; 29,5 Hz $f_z$ : 5,5; 8; 10,5; 22; 30,5; 33; 36 Hz
Steinfliesenboden Muschelkalkfliesen poliert homogen verfugt (BNM)	71,47	-38,11	-44,07	7,22	2,18		$f_x$ : <u>22,5</u> Hz $f_y$ : Abfl. 8; 11,5; 17; 23; <u>28,5</u> ; 30; 31,5 Hz $f_z$ : Abfl. <u>24,5</u> ; <u>32,5</u> ; <u>35</u> Hz
Laminatboden; glatte Oberfläche (Kunstabau)	57,21	-47,01	18,09	7,42	5,33		$f_x$ : <u>22</u> Hz $f_y$ : Abfl. 5; 9,5; <u>23,5</u> ; 33 Hz $f_z$ : Abfl. 10,5; 25; <u>33,5</u> Hz
Parquetboden Eiche (Neue Pinakothek)	56,62	-36,03	45,63	8,73	2,87		$f_x$ : <u>22</u> ; 24,5 Hz $f_y$ : 6,5; 11; 14,5; 16,5; <u>23,5</u> ; 29,5 Hz $f_z$ : Abfl. 7,5; 30,5 Hz
Parquetboden Eiche Musterverlegung (Nymphenburg Hauptschloss)	53,77	-36,69	46,37	5,13	1,66		$f_x$ : <u>20,5</u> Hz $f_y$ : <u>6,5</u> Hz $f_z$ : <u>31,5</u> Hz
Sisalteppich (Nymphenburg Hauptschloss)	28,58	-18,08	-38,19	3,01	1,06	-1,19	$f_x$ : 3; 6; 10; 12,5; <u>15,5</u> ; 24 Hz $f_y$ : 5 Hz $f_z$ : <u>23,5</u> Hz

Schwinggeschwindigkeiten (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>

## Transportsimulation – Überwinden von Höhenunterschieden

Aufzugfahrten haben sich im Laufe der Meßvorhaben als starke Belastung für das Transportgut herausgestellt. Dabei kam die Frage auf, ob nicht die Benutzung eines Personenliftes eventuell günstiger wäre, als die eines Lastenaufzuges. Natürlich, gesetzt den Fall, der Platz den ein Personenlift bietet würde genügen. Vielleicht wäre aber auch das Tragen über Treppen das Mittel der Wahl?

Um dies zu klären, wurde je eine Fahrt mit Wagen A im Lastenaufzug der Neuen Pinakothek und dem Personenlift des BNM durchgeführt. Ergänzend wurde der gesamte Meßaufbau von zwei Personen eine Treppe hinaufgetragen. Auf eine genaue Aufführung der Aufzugtypen und Kenngrößen wird im Folgenden verzichtet, da die Meßdaten von der Konstruktion des Fahrstuhlschachtes, der Aufhängung etc. beeinflusst werden. Dem anschließenden Vergleich zur Überwindung von Höhenunterschieden, mag es an der quantitativen Vergleichbarkeit mangeln, qualitative Aussagen lassen sich aber sehr wohl treffen.

Bei der Analyse der Aufzugsignale wurden diese in Einzelvorgänge zerlegt und ausgewertet. Zu nennen sind: Die Einfahrt in den Aufzug über eine Schwelle, das Anfahren des Aufzugs, die eigentliche Aufzugfahrt, der Bremsvorgang und das Ausfahren aus dem Aufzug, wiederum über die Schwelle. Dabei zeigt sich, dass die Aufzugfahrt per se mit einem Eintrag von ca. 5 mm/s Erschütterungsbelastung sehr gering ist. Doch leider ist dies belanglos, da Anfahren/Bremsen und Schwellen in etwa gleich mit bis zu 200 mm/s zu Buche schlagen. Zwar zeigt der Personenlift minimal kleinere Schwinggeschwindigkeiten, muss jedoch mit Hauptfrequenzen von 4 und 8 Hz als potentiell gefährlicher angesiedelt werden, als der bei 22 Hz einzuordnende Lastenaufzug. Durch das Tragen des Wagens treten vergleichbare Schwinggeschwindigkeiten, wie im Falle der Fahrstuhlfahrten auf. Allerdings zeigt dort die Schwingbeschleunigung, die ansonsten immer die Entwicklungen der Schwinggeschwindigkeit widerspiegelt, weit geringere Werte. Da keine der bisher bekannten Richtlinien oder Arbeiten auf dem Gebiet der Erschütterungen einen klaren Zusammenhang zwischen der Schwingbeschleunigung und einer möglichen Schädigung von Strukturen oder Materialien herstellt, kann somit keine klare Empfehlung zum Überwinden von Höhenunterschieden ausgesprochen werden. Vermutlich ist allerdings der dämpfenden Wirkung des menschlichen Körpers beim Tragen über eine Treppe der Vorzug zu geben. Diese Empfehlung gilt natürlich nur so lange Gewicht und Ausmaße des Gegenstandes dies zulassen und kein erhöhtes Sturzrisiko provozieren.

Transportsimulation Aufzufahrten mit handelsüblichem Transporthund  
 Maße: 590x590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5 kg, Meßapparat 22,5 kg

Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung

	Boden $V_{max}$ senkrecht	Boden $V_{max}$ parallel	Boden $V_{max}$ waagrecht	Boden $a_{max}$ senkrecht	Boden $a_{max}$ parallel	Boden $a_{max}$ waagrecht	Frequenzen
Fahrt über Schwelle in den Lastenaufzug (Neue Pinakothek)	204,66	38,03	53,84	9,81	-3,09	5,03	$f_x$ : 6; <u>21</u> Hz $f_y$ : Abfl. 10,5; <u>22,5</u> ; 29; 36; 37,5 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 22 Hz
Anfahren des Lastenaufzug (Neue Pinakothek)	-175,08	-36,57	100,96	8,59	3,37	-2,98	$f_x$ : 6; <u>21</u> Hz $f_y$ : Abfl. 10,5; <u>22,5</u> ; 29; 36; 37,5 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 22 Hz
Fahrt mit Lastenaufzug (Neue Pinakothek)	-4,06	-0,34	-0,91	0,02	-0,03	-0,05	$f_x$ : 6; <u>21</u> Hz $f_y$ : Abfl. 10,5; <u>22,5</u> ; 29; 36; 37,5 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 22 Hz
Bremsvorgang und Fahrt über Schwelle aus Lastenaufzug (Neue Pinakothek)	-179,14	-24,86	-57,24	8,92	2,39	5,26	$f_x$ : 6; <u>21</u> Hz $f_y$ : Abfl. 10,5; <u>22,5</u> ; 29; 36; 37,5 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 22 Hz
Fahrt über Schwelle in den Personenlift (BNM)	-160,23	-92,17	-41,48	10,14	6,60	-4,13	$f_x$ : 10,5; 17,5; 20; <u>22</u> Hz $f_y$ : Abfl. 4,5; 11; 13,5; 26,5 Hz $f_z$ : Abfl. <u>3,5</u> ; 6,5; 8,5; 10,5; 12; 14,5; 18; 20,5; 28; 31,5; 37 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

Transportsimulation Aufzufahrten mit handelsüblichem Transporthund  
Maße: 590x590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5 kg, Meßapparat 22,5 kg

Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung

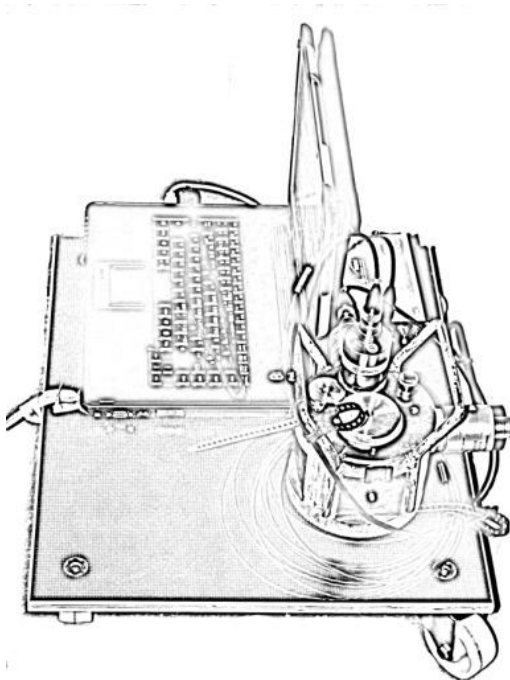
	Boden $v_{maxx}$ senkrecht	Boden $v_{maxy}$ parallel	Boden $v_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Fahrt mit Personenlift (BNM)	153,52	-7,58	-6,46	-3,03	0,24	0,33	$f_x$ : 4,5; 21,5 Hz $f_y$ : 4; 8,5; 12; 23; 31,5; 33 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 8; 11,5; 23; 25,5 Hz
Fahrt über Schwelle aus Personenlift (BNM)	73,66	-146,94	85,92	7,13	4,22	4,69	$f_x$ : 4,5; 7; 9; 11; 13,5; 16,5; 20; 21,5; 24; 28; 30; 31,5; 34 Hz $f_y$ : Abfl. 6; 8,5 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 6,5; 8,5; 11,5; 12,5; 18; 19 Hz
Tragen des Transport- wagens über eine Treppe	-230,55	-126,09	-116,20	2,19	1,05	-0,88	$f_x$ : 0-13 Hz $f_y$ : 0-13 Hz $f_z$ : 0-13 Hz
Granitboden aufgeraut auf Rampe nach oben ziehen Wagen A	-123,35	-22,16	36,88	7,83	-2,00	4,25	$f_x$ : 22,5 Hz $f_y$ : Abfl. 5,5; 7; 10,5; 22,5; 26; 39,5 Hz $f_z$ : Abfl. 10; 15; 22,5; 29,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

## Transportsimulation Depot/Ausstellung

Die Neue Pinakothek besitzt eine Reihe verschiedener Bildertransportwägen. Größtenteils werden diese zum Transport von Gemälden verwandt und sind daher mit einer Mittelwand konzipiert. An diese werden die Bilder zur zusätzlichen Stabilisierung angebunden. Die Wahl der Bereifung folgt dem derzeitigen Kenntnisstand<sup>73</sup>, der möglichst weiche Reifen mit guter Schmiegun (elastische Kunststoffe, Weichgummi, Moosgummi, Pneus usw.) empfiehlt. Die Transportsimulation soll aufzeigen, wie hoch die Erschütterungsbelastungen während des Vorganges werden und an welchen Stellen die Maxima auftauchen. Im Vergleich der Wägen und ihrer jeweiligen Abstimmung sollten die Auswirkungen von Eigengewicht, Bauart und Bereifung gegeneinander abgewägt werden können. So sollten neben der Verortung des Risikos Schäden am Kunstwerk durch Innerhaustransporte zu verursachen, mögliche vorbeugende und schwingungsminimierende Maßnahmen abgeleitet werden können.

### Versuchsanordnung



Wagen A

Maße: 590 x 590 mm

Bereifung: Hartkunststoff

Gewicht: Eigengewicht 5 kg;

Meßapparatur 22,5 kg<sup>74</sup>

Stempel Bodenplatte:

3x Delta Tron® Accelerometer

Typ 8340 Brüel & Kjær

Meßrichtungen:

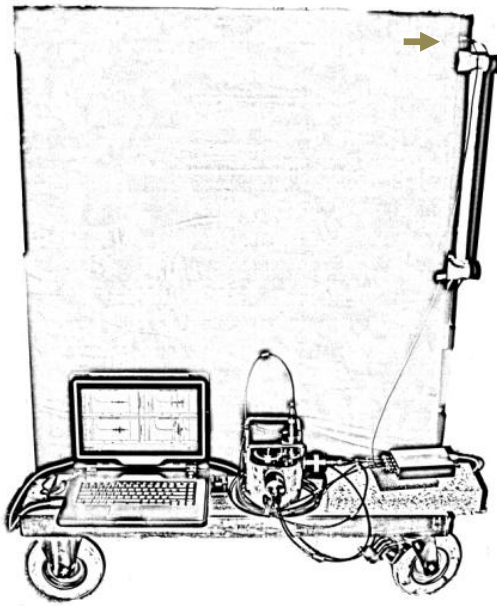
x: senkrecht auf Wagen

y: parallel zur Zugrichtung

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)

<sup>73</sup> STÜHLER 1988; MECKLENBURG (Hrsg.) 1991; BEGOV und KUSCHEL 2007.

<sup>74</sup> Das Gewicht des Meßstempels führt in diesem Aufbau nicht zu einer Verfälschung der Ergebnisse, da dieses in etwa dem des zu transportierenden Kunstgegenstandes entspricht.



## Wagen B

Maße: 1100 x 750 x 1600 mm

Bereifung: Pneu

Gewicht: geschätztes Eigengewicht ca. 80 kg;

Meßapparatur 22,5 kg

Stempel Bodenplatte:

Delta Tron® Accelerometer

Typ 8340 Brüel und Kjær

Meßrichtung:

x: senkrecht auf Wagen

y: parallel zur Zugrichtung

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)

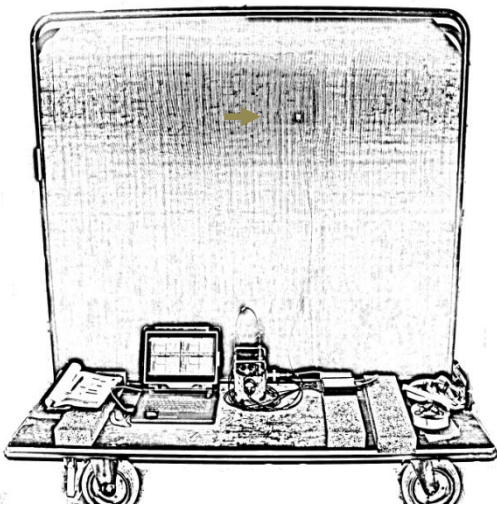
Meßfühler Mittelwand:

Triaxial Delta Tron® Accelerometer

Typ 4506 B 003 Brüel &amp; Kjær

Meßrichtung:

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)



## Wagen C

Maße: 1700 x 950 x 1700

Bereifung: Weichgummi

Gewicht: geschätztes Eigengewicht ca. 100 kg;

Meßapparatur 22,5 kg

Stempel Bodenplatte:

Delta Tron® Accelerometer

Typ 8340 Brüel &amp; Kjær

Meßrichtung:

x: senkrecht auf Wagen

y: parallel zur Zugrichtung

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)

Meßfühler Mittelwand:

Triaxial Delta Tron® Accelerometer

Typ 4506 B 003 Brüel &amp; Kjær

Meßrichtung:

z: quer zur Zugrichtung (waagrecht)

### **Die Strecke**

Der Transport startet im Gemäldedepot. Auf dem dortigen Betonboden mit Antirutschbeschichtung wird der jeweilige Wagen über die Türschwelle in den Vorraum zum Lastenaufzug gezogen. Der dortige Bodenbelag entspricht dem Betonboden des Depots. Über eine weitere Schwelle geht es dann in den Aufzug, mit dem zwei Stockwerke nach oben gefahren werden. Anschließend wird im Verwaltungs- und Ateliertrakt ein Stäbchenparkett aus Eiche befahren. Durch eine Tapetentür gelangt man dann in die Säle, deren Fußböden teils mit Eichenparkett, teils mit Granitplatten belegt sind. Zunächst führt die Fahrt über die Parkettböden. Granitböden treten bei der Fahrt über die Rampenaufgänge der Neuen Pinakothek auf. Gemessen wird je eine Fahrt abwärts und eine Fahrt aufwärts. Die Strecke wurde in Einzelmessungen unterteilt und immer nach Überfahren der Schwelle zu einer abweichenden Fußbodenoberfläche neu begonnen. Abschließend wurde die Rückfahrt zum Depot als kompletter Vorgang aufgenommen.

### **Die Interpretation der Meßwerte**

Obwohl die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten von Wagen zu Wagen unterschiedlich hoch ausfallen, lassen sich eindeutige Tendenzen in der Belastung durch die Oberflächenbeschaffenheit der unterschiedlichen Fußbodenbeläge aufzeigen. Die Kriterien sind hierbei: Die Ebenheit des Belages, die Art der Verlegung, den Zustand des Bodenbelags sowie die Elastizität des Untergrundes. Bei einem Fußboden mit geschliffenen Steinfliesen zum Beispiel sind die Fliesen glatt, was niedrige Erschütterungseinträge zu Folge hat. Allerdings sind die Störstellen, in diesem Fall das Fugennetz, im Normalfall viel ausgeprägter als etwa die Übergänge von einer Holzdielen zur anderen. Je kleiner nun die Fliesen, bzw. je ausgewaschener oder schadhafter die Verfugung, umso häufiger treten die Störstellen auf und umso höher sind die gemessenen Werte. Der scheinbar wegen seiner glatten Oberfläche unbedenklichere Steinfliesenboden zeigt sich also hier als ungeeignet. Hinzu kommt, dass ein Holzboden im Bezug auf Aufbau und Material elastischer ist als besagter Steinboden. Holzböden federn also einen Teil der Energie ab, während Steinböden die Stöße härter übertragen. Da der Transportvorgang in der „Lebensspanne“ eines Kunstwerks eine kurzfristige Belastung bedeutet, ist auf möglichst geringe Spitzenwerte zu achten. Daher überwiegt als Kriterium die Art und Häufigkeit der Störstellen in der Fußbodenoberfläche. Diese Überlegungen spiegeln sich in den Meßwerten wieder. Der Granitboden schneidet am schlechtesten ab, gefolgt von den Betonböden ( $\approx 60\%$  Granitwert) im Depot. Am wenigsten Erschütterungen erreichen das transportierte Kunstwerk beim Überfahren der Parkettböden ( $\approx 50\%$  Granitwert).



Bezogen auf die Einzelereignisse ergibt sich für den Transportvorgang folgende Rangliste der gefährlichsten, belastendsten Vorgänge:

- Das Stoßen gegen Wände,
- Die Fahrt im Lastenaufzug (im Besonderen der Bremsvorgang),
- Das Hochschieben der Wägen über die Rampen/schrägen Ebenen,
- Das Überfahren von Schwellen,
- Fahren auf Granitböden/Betonböden/Parkettböden.

Die Frequenzanalyse zeigt, dass den größten Einfluss auf den Frequenzinhalt der Transportwagen selbst ausübt. Die unterschiedlichen Ereignisse haben nur geringe Auswirkung. Je schwerer der Wagen ist, umso niedriger sind die gemessenen Frequenzen. Bei den Wägen B und C liegen diese zwischen 4 und 13 Hz, bei Wagen A um die 22 Hz. Legt man die Risikoeinschätzung von DIN 4150 zugrunde, gilt für Wagen B und C ein Richtwert von bis zu 3 mm/s, für Wagen A bis zu 8 mm/s. **Die gemessenen Werte für den Transportvorgang liegen aber zwischen 238 und 21 mm/s, einer Überschreitung bis zum 30 fachen des empfohlenen Wertes!**

Die Empfehlung für die Bereifung<sup>75</sup> von Transportfahrzeugen rät von Hartkunststoffrollen ab. Ihre Nutzung spiegelt sich auch in den erhobenen Schwinggeschwindigkeiten für Wagen A wieder: Die Werte erreichen hier das bis zu dreifache der anderen Wägen. Allerdings darf nicht vernachlässigt werden, dass der kleine Transporthund lediglich 20-25% der Masse besitzt und deshalb viel leichter durch Erschütterungen angeregt wird. Demzufolge ist der Einfluss der Bereifung nicht so groß wie erwartet. Wagen B und C schneiden im Vergleich, bis auf kleine ereignisspezifische Besonderheiten, in etwa gleich ab.

Wie in dem Ranking ersichtlich, ist beim Überfahren von Rampen und schrägen Ebenen mit erhöhten Erschütterungseinträgen zu rechnen. Die Spitzenwerte bewegen sich zwischen 120 und 340 mm/s. Diese können in jeglicher Raumrichtung auftreten. Treffen die Reifen beispielsweise nicht senkrecht auf die Rampe, sondern stehen leicht schräg, wird ein Stoß mit starker Richtungskomponente y und z eingeleitet. Je schräger eine Rampe ist, d. h. je größer die Steigung, umso stärker sind die Stöße beim Anfahren der Rampe.

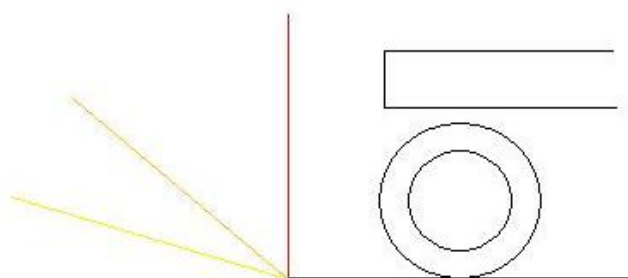


Abbildung 16 Je steiler eine Rampe, umso stärker das Stoßereignis beim Anfahren der Rampe. Der Extremfall wäre die senkrechte Wand.

<sup>75</sup> STOLOW 1979.

Die überraschendste Tendenz, wenn auch vom physikalischen Standpunkt logisch, ist das in jeder Transportsituation stärkste Signal der an der Mittelwand gemessenen horizontalen Komponente. Selbst unter Berücksichtigung der vergleichsweise erhöhten Sensibilität für Störungen des triaxialen Aufnehmers bei niedrigen Frequenzen, die mit Hilfe eines Hochpassfilters bei 8 Hz eliminiert wurden, handelt es sich weiterhin um die Spitzenwerte. In Zahlen ausgedrückt um das Dreifache des, am Boden mit der vertikalen Komponente  $x$  als am stärksten ausgeprägten, Signals. Je höher die Mittelwand bzw. das zu transportierende Gemälde, desto größer wird der Hebel und damit der Erschütterungseintrag in horizontaler Richtung.

### Die Maßnahmen

Aus den Meßergebnissen folgt, dass Fußbodenbeläge bzw. Strecken, auf denen transportiert wird, möglichst wenige Störstellen aufweisen sollten. Rampen sind zu meiden, besonders wenn sie aufwärts bewältigt werden müssen. Je steiler die Rampe, desto größer ist die Stoßenergie, die beim Auftreffen des Reifen auf den Anfang der Steigung übertragen wird. Bereits in der Planungsphase einer Rampe sollte ein Anlaufradius berücksichtigt werden.

Eine Verbesserung der Bereifung, der Lagerung der Räder und wie oben zu entnehmen einer Erhöhung des Eigengewichtes des Transportwagens orientieren scheinen wenig zielführend. Vor allem, da eine Gewichtserhöhung die vom Transportwagen ausgesandten Stöße und Vibrationen verstärkt, also eine Erhöhung der Belastung für Bausubstanz und Gegenstände in Räumen, durch die der Transport führt, bedingt. Desweiteren können diese Modifikationen Ereignissen wie dem Bremsvorgang eines Lastenaufzuges nichts entgegensetzen. Die nachträgliche Dämpfung eines Aufzuges sollte, wenn überhaupt möglich, dann doch mit erheblichen Ausgaben verbunden sein. Daher muss der Weg über die Entwicklung eines zweiteiligen Transportwagens führen. Es bestünde die Möglichkeit über dem Fahrgestell eine Art Transportplattform oder Korb einzuhängen und durch Federsysteme weitestgehend zu isolieren. Die geeignetste Konstruktion ist über begleitende Meßreihen zu ermitteln, da Schätzungen und Berechnungen im Vorfeld wegen der vielen zu berücksichtigenden Faktoren immer Unsicherheiten bergen.

Im Hinblick auf die mit der Größe des transportierten Gegenstandes anwachsenden horizontalen Belastungen sollte besonders bei größeren Formaten die empfindlichste und am leichtesten durch Schwingungen anzuregende Seite in Richtung der geringsten Kräfte, also **vertikal** gelagert werden. Übertragen auf ein Leinwandgemälde ergibt sich folgender Sachverhalt: Der Bilderrahmen ist mit seinen im Querschnitt rechteckigen Leisten und den Eckverbindungen als steif zu betrachten. Eine Anregung durch Schwingungen ist in alle Richtungen etwa gleich schwer zu bewerkstelligen. Anders die Leinwand, die ähnlich einer Trommel durch ihre geringe Dicke im Vergleich zu ihrer großen Fläche gut anzuregen ist. Die stärkste Auslenkung ist für den 1. Schwingungsmodus zu erwarten, bei dem sich eine konkave und konvexe Wölbung abwechseln. Wenn also bei Leinwandgemälden die größte Auslenkung quer zur gespannten Leinwand ist, so muss diese quer zur stärksten

anregenden Kraft positioniert werden. Da, wie bereits mehrfach erwähnt, die Schwinggeschwindigkeiten in horizontaler Richtung an der Mittelwand meist die größten Werte annehmen, sollte die Leinwand nicht quer zu dieser Krafrichtung transportiert werden. Für Gemälde bedeutet dies, soweit es die Türöffnungen zulassen, einen **liegenden** Transport, bei der Verwendung herkömmlicher Wägen.

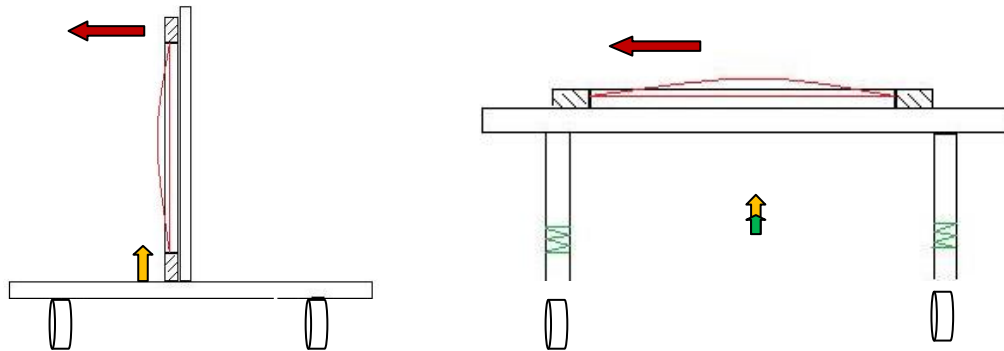


Abbildung 17 Vergleich der Erschütterungseinträge bei unterschiedlicher Ausrichtung der Gemäldeleinwand; Für den liegenden Transport ist der Wagen vom Fahrgestell zusätzlich durch Stoßdämpfer entkoppelt. Dadurch lässt sich der vertikale Eintrag weiter minimieren.

### Fazit

Die hohen Schwinggeschwindigkeiten in Verbindung mit Spitzenpeaks bei niedrigen bis mittleren Frequenzen, bescheinigen den bei Innerhaustransporten bewegten Kunstgegenständen eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit. Da die Erregerfrequenzen nahe der Eigenfrequenzen z. B. von Leinwandgemälden liegen, ist auch mit Resonanzerscheinungen zu rechnen, was die Gefahr einer Schädigung zusätzlich erhöht.



Transportsimulation Neue Pinakothek  
handelsüblicher Transporthund (A)/Gemäldewagen mittel (B)/ Gemäldewagen groß (C)  
Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung  
v und a waagrecht im oberen Bereich der Gemäldewagenstellwand



	Boden $V_{maxx}$ senkrecht	Boden $V_{maxy}$ parallel	Boden $V_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Wand $V_{maxz}$ $a_{maxz}$	Frequenzen
Betonboden mit Antirutsch-Anstrich Depot Wagen A	-83,80	-47,97	45,08	7,16	2,36	-3,25		$f_x$ : 20; <u>22</u> Hz $f_y$ : 5,5; 22; 29,5 Hz $f_z$ : 5,5; 8; 10,5; 22; 30,5; 33; 36 Hz
Betonboden mit Antirutsch-Anstrich Depot Wagen B	29,14	-63,27	50,47	-1,67	0,72	1,35		$f_x$ : 4; 5; 8; 5; <u>12</u> Hz $f_y$ : Abfl. 0-15; 20-22 Hz $f_z$ : Abfl. <u>5,5</u> ; 8; 23 Hz <b>Wand</b> $f_z$ : Abfl. <u>4</u> ; 8 Hz
Betonboden mit Antirutsch-Anstrich Depot Wagen C	25,65	45,23	21,76	-1,77	-0,65	0,65		$f_x$ : <u>11</u> ; 19,5 Hz $f_y$ : Abfl. 0-18 Hz $f_z$ : Abfl. <u>5,5</u> ; 11; 19,5 Hz <b>Wand</b> $f_z$ : Abfl. <u>8,5</u> ; 13 Hz
Fahrt mit Lastenaufzug Wagen A	204,66	38,03	100,96	9,81	3,37	5,26		$f_x$ : 6; <u>21</u> Hz $f_y$ : Abfl. 10,5; <u>22,5</u> ; 29; 36; 37,5 Hz $f_z$ : Abfl. 21; 22 Hz
Fahrt mit Lastenaufzug Wagen B	-69,96	56,67	42,87	4,87	3,03	2,09		$f_x$ : 3; 5,5; 9,5; <u>11,5</u> ; 13; 22,5; 42,5 Hz $f_y$ : Abfl. 0-12 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 23 Hz <b>Wand</b> $f_z$ : 6; 7,5; 9,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Transportsimulation Neue Pinakothek  
handelsüblicher Transporthund (A)/Gemäldewagen mittel (B)/ Gemäldewagen groß (C)  
Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung  
v und a waagrecht im oberen Bereich der Gemäldewagenstellwand



	Boden $v_{maxx}$ senkrecht	Boden $v_{maxy}$ parallel	Boden $v_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Wand $v_{maxz}$ $a_{maxz}$	Frequenzen
Fahrt mit Lastenaufzug Wagen C	121,35	-58,90	-61,16	5,72	4,08	-2,63	100,00 6,27	$f_x$ : 5,5; 10,5; 18; 22; 29; 31,5; 33 Hz $f_y$ : Abfl. 5,5; 8,5 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 7,5; 10 Hz Wand $f_z$ : Abfl. 8,5; 12,5 Hz
Stoß gegen Tapentür samt Schwelle beim Übergang in Ausstellungsräume Wagen A	-238,32	-21,33	80,96	9,47	3,39	5,57		$f_x$ : Abfl. 8,5; 22 Hz $f_y$ : 5; 7; 10,5; 18; 19,5; 22 Hz $f_z$ : indifferent 0-48 Hz
Stoß gegen Tapentür samt Schwelle beim Übergang in Ausstellungsräume Wagen B	136,84	-56,17	-35,61	-3,00	1,81	-1,78	124,91 8,72	$f_x$ : 3; 11; 12 Hz $f_y$ : 4,5; 9,5 Hz $f_z$ : 4,5; 9,5; 10,5; 21,5; 22,5 Hz Wand $f_z$ : 4,5; 9,5; 10,5 Hz
Stoß gegen Tapentür samt Schwelle beim Übergang in Ausstellungsräume Wagen C	145,93	49,17	-32,12	6,64	2,51	2,76	64,22 4,73	$f_x$ : 3; 10,5; 21,5 Hz $f_y$ : Abfl. 5; 10; 12,5; 18 Hz $f_z$ : 3; 5; 8; 10,5; 12,5; 14,5; 18; 19; 21,5; 23 Hz Wand $f_z$ : 3; 4,5; 9; 12,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Transportsimulation Neue Pinakothek  
handelsüblicher Transporthund (A)/Gemäldewagen mittel (B)/ Gemäldewagen groß (C)  
Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung  
v und a waagrecht im oberen Bereich der Gemäldewagenstellwand

	Boden $V_{maxx}$ senkrecht	Boden $V_{maxy}$ parallel	Boden $V_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Wand $V_{maxz}$ $a_{maxz}$	Frequenzen
Parquetboden Eiche Ausstellungsräume Wagen A	56,62	-36,03	45,63	8,73	2,87	2,44		$f_x$ : Abfl. 8,5; <u>22</u> Hz $f_y$ : <u>5</u> ; 7; 10,5; 18; 19,5; 22,5 Hz $f_z$ : indifferent 0-48 Hz
Parquetboden Eiche Ausstellungsräume Wagen B	-22,61	56,35	-59,25	1,41	0,46	1,38	105,99 2,41	$f_x$ : 4,5; 7; <u>11</u> ; 23,5; 40,5; 41,5 Hz $f_y$ : indifferent 0-14 Hz $f_z$ : Abfl. 10; 22,5 Hz Wand $f_z$ : Abfl. 10 Hz
Parquetboden Eiche Ausstellungsräume Wagen C	47,03	44,61	-30,47	3,88	1,20	1,14	62,01 3,87	$f_x$ : 10,5 Hz $f_y$ : <u>9</u> ; 13 Hz $f_z$ : 5,5; 7,5; 9; 10,5; 19 Hz Wand $f_z$ : <u>3</u> ; 9; 12; 24,5; 33,5 Hz
Granitboden aufgeraut auf Rampe nach oben ziehen Wagen A	-123,35	-22,16	36,88	7,83	-2,00	4,25		$f_x$ : 22,5 Hz $f_y$ : Abfl. 5,5; 7; 10,5; <u>22,5</u> ; 26; 39,5 Hz $f_z$ : Abfl. 10; 15; <u>22,5</u> ; <u>29,5</u> Hz
Granitboden aufgeraut auf Rampe nach oben schieben Wagen B	132,25	339,81	258,84	5,59	5,02	5,95	225,28 18,08	$f_x$ : 4,5; 5,5; 11; <u>12</u> ; 23,5; 38,5 Hz $f_y$ : Abfl. 5,5; <u>10</u> Hz $f_z$ : Abfl. 10,5; 22,5 Hz Wand $f_z$ : Abfl. <u>6</u> ; 7; 10,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$





Transportsimulation Neue Pinakothek  
handelsüblicher Transportthund (A)/Gemäldewagen mittel (B)/ Gemäldewagen groß (C)  
Y im Folgenden parallel zur Wagenzugrichtung  
v und a waagrecht im oberen Bereich der Gemäldewagenstellwand



	Boden $V_{maxx}$ senkrecht	Boden $V_{maxy}$ parallel	Boden $V_{maxz}$ waagrecht	Boden $a_{maxx}$ senkrecht	Boden $a_{maxy}$ parallel	Boden $a_{maxz}$ waagrecht	Wand $V_{maxz}$ $a_{maxz}$	Frequenzen
Granitboden aufgerauht auf Rampe nach <b>unten</b> schieben Wagen B	48,08	128,60	96,81	2,82	1,01	1,04	176,76 3,97	$f_x$ : 5; 7; <u>12</u> ; 22,5; 40,5 Hz $f_y$ : Abfl. 10 Hz $f_z$ : 5; 9; 22,5 Hz <b>Wand <math>f_z</math></b> : <u>6,5</u> ; <u>9</u> Hz
Granitboden aufgerauht auf Rampe nach oben schieben Wagen C	-214,00	-81,11	-42,82	8,27	5,07	2,91	91,97 7,50	$f_x$ : <u>10,5</u> ; 19,5 Hz $f_y$ : 9 Hz $f_z$ : <u>5</u> ; 7,5; 10,5; 19,5 Hz <b>Wand <math>f_z</math></b> : <u>3</u> ; 8,5; 12,5; 33,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Gitterwände mit Deckenlaufschienen  
zur Hängung von Bildern im Depot  
Neue Pinakothek  
Messung des Erschütterungseintrag am Betonboden

	$v_{maxx}$ senkrecht	$v_{maxy}$ parallel	$v_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Zur Gitterwand gehen Koje 103	-0,30	0,15	0,19	-0,20	0,07	0,08	$f_x$ : 56,5; 59; 69; 71,5; 84 Hz $f_y$ : Abfl. 59; 72; 84; 91,5; 97 Hz $f_z$ : Abfl. 5, 60; 72; 84; 91,5; 126,5 Hz
Herausziehen der Gitterwand (nicht bis Anschlag) Koje 103	0,23	0,33	0,13	-0,25	-0,17	0,07	$f_x$ : 56-72; 87 Hz $f_y$ : 59,5; 68; 70; 73; 76,5; 85,5; 87 Hz $f_z$ : 73; 84,5; 87, 127 Hz
Einschieben der Gitterwand Koje 103	0,10	0,19	-0,10	-0,09	0,10	-0,05	$f_x$ : 56-72; 87 Hz $f_y$ : 59,5; 68; 70; 73; 76,5; 85,5; 87 Hz $f_z$ : 73; 84,5; 87, 127 Hz
Herausziehen und Einschieben der Gitterwand Koje 104	-0,10	-0,11	0,08	-0,02	0,01	-0,01	$f_x$ : 5; 7,5; 9,5; 16,5; 21; 23,5; 65,5; 77-82,5 Hz $f_y$ : 3; 5; 7,5; 9,5; 21; 23,5 Hz $f_z$ : 5; 8; 9,5; 21 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

## Transportsimulation – Auswirkungen von Fahrten auf die umgebende Baustruktur

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Erschütterungseintrag während der Transportphase auf Wägen beschrieben. Umgekehrt stellt das Befahren von Ausstellungssälen und historischen Räumen durchaus eine Belastung für die Baustruktur dar. Dieser Umstand soll im 2003 restaurierten und rekonstruierten<sup>76</sup> Hubertussaal im 1. OG der Orangerie Nymphenburg untersucht werden. Da der Saal für verschiedene Veranstaltungen angemietet und dieses gut angenommen wird, finden im Saal mehrmals wöchentlich Auf- und Abbauarbeiten statt. Ob Bestuhlung, Tische, Bühne, Bühnentechnik oder Catering, alles wird auf großen Wägen und Rollcontainern durch die Räume der Orangerie gefahren. Vor dem Hintergrund des Auftauchens mehrerer, teils tiefer Risse in der Hohlkehle der Saaldecke, ist nun von Interesse wie stark die verursachten Erschütterungen im Bereich des Bodens sind und wie ihre Weiterleitung in Wände und schlussendlich in die Decke weiterverläuft. Sicherlich kann im Rahmen der Untersuchungen und in Ermangelung an Erfahrungswerten die Ursache der strukturellen Verschiebungen im Deckenbereich nicht zwingend in den Gebäudeschwingungen festgemacht werden. Allerdings können die erhobenen Meßwerte aufzeigen, ob und wie starke Erschütterungen im Deckenbereich ankommen.

Hinderlich bei den Messungen war die volle Bestuhlung des Saales am Meßtag. Dadurch konnte mit dem Bühnenwagen der Orangerie (Wagen D) nur im Randbereich und mit gedrosselter Geschwindigkeit gefahren werden. Dies hat eine Unterbewertung der eingebrachten Erschütterungen zur Folge.



Wagen D

Maße: 1000 x 1800 mm

Bereifung: Weichgummireifen

Gewicht: Eigengewicht 100 kg

(Zuladung optional 100 kg)

### Der Meßaufbau

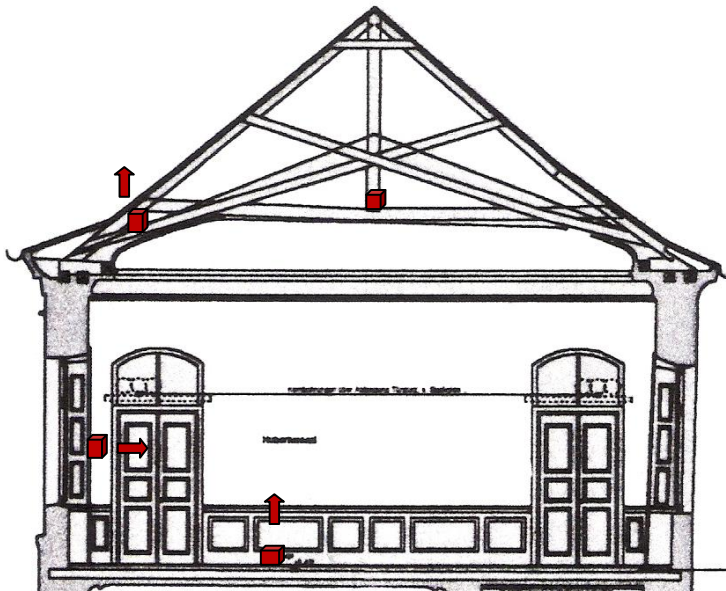
Die Fragestellung wurde in zwei Versuchsreihen getrennt: den Belastungstest mit Wagen D und der Übertragungsrate in die Geschosdecke mittels Stoßweiterleitung. Beide Male wird auf dem Fußboden des Hubertussaales der Meßstempel mit den, im Rechtssystem angeordneten Aufnehmern Typ 8340 aufgestellt. Gleichzeitig wird der triaxiale Meßfühler

<sup>76</sup> Der Parkettboden ist eine Neuanfertigung. Mündliche Auskunft Schlossverwaltung Nymphenburg.

Typ 4506 B 003 an der Holzverkleidung der Fensternische mittels doppelseitigen Klebebandes angebracht. Ein Zugang zur Wand ist im ganzen Saal nicht möglich<sup>77</sup>. Die direkte Anbindung des Bauteils an die Wand verspricht allerdings der Wand ähnliche Werte zu liefern.

Da der Signalwandler vier Eingänge hat und demnach vier Signale verarbeiten kann, wird je die Hauptschwingrichtung (größte erwartete Werte) der Hauptmessung zugeschaltet. Im Falle der Messung am Boden wird das Wandsignal z waagrecht, im Falle der Messung an der Wand/Verkleidung wird das Bodensignal x senkrecht zusätzlich aufgezeichnet.

Die Messung der Deckenschwingung muss indirekt von oben im Dachgeschoss erfolgen. Dabei wird der Meßstempel auf den Längsbalken gestellt. An diesem ist die Saaldecke aufgehängt. Der vierte Meßkanal wird genutzt, indem der Triaxialaufnehmer auf eine der Spanten der Deckenkehle aufgebracht wird. Ein Anbringen auf der wärmedämmenden Bockshaut ist nicht zielführend, da diese die Schwingungen dämpft.



**Abbildung 18**  
Schnitt durch den Hubertussaal:  
Positionierung der Aufnehmer  
unter Angabe der Meßrichtung  
mit Kanal 4; BSSV Nymphenburg

### Die Ergebnisse

Die in senkrechter Richtung am Boden gemessenen Spitzenwerte erreichen 3,3 mm/s bei 10,5 Hz. Laut DIN 4150 ist diese knapp innerhalb der als sicher geltenden Richtlinien, da die Bewertungsgrenze bei 10 Hz (erlaubte Schwinggeschwindigkeit < 3 mm/s) liegt. Mit einer Hauptfrequenz von 10,5 Hz gilt also der noch als angemessen empfundene Bereich zwischen 3 und 8 mm/s. Während der Messung war zu beobachten, dass die Spitzenwerte vor allem durch eine wohl im Unterbau schadhafte Stelle des Parkettbodens ausgelöst wurden. Für die Gefährdung von Ausstattungsgegenständen oder ausgestellten Kunststücken (hier beides nicht der Fall), wäre dieser Umstand für die Beurteilung der Gefährdung irrelevant. Was die Belastung der Bausubstanz betrifft, muss gemutmaßt

<sup>77</sup> Einzig die Fensterlaibungen sind zugänglich. Dort liegt der Putz allerdings hohl, was zu nicht tolerierbaren Meßfehlern führen würde.

werden, dass die Schadstelle zu einer zusätzlichen Schwingung des Fußbodenbelages kommt, ohne die Geschoßdecke im gleichen Maße anzuregen. Die Norm bezieht ihre Richtwerte auf das eher starre Skelett eines Gebäudes und damit auf die frequenzbewertete Schwinggeschwindigkeit von Fundamenten und Geschossdecken. Damit ist der Wert 3,3 mm/s überbewertet. Der Erschütterungseintrag durch das Fahren der Container stellt nach DIN 4150 somit keine erhöhte Gefährdung für die Bausubstanz dar. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die schlichte Erfüllung der Norm in Bezug auf historische Bausubstanz nicht zwangsläufig mit unbedenklich zu übersetzen ist.

Bemerkenswert sind die trotz der Zuladung von 100 kg niedrigeren gemessenen Werte als bei der Fahrt mit dem leichten Wagen D. Dieses Ergebnis stützt die Vermutung, dass Fahrgeschwindigkeit den bei weitem größeren Einfluss auf den Erschütterungseintrag ausübt als das Gewicht des Erregers. Wie bereits erwähnt, war die vorhandene Bestuhlung hinderlich und der schwerere Wagen auch ungenauer zu lenken, was zu einer langsameren Fahrt führte.

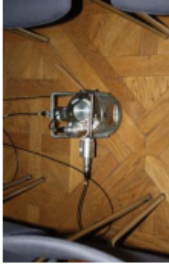
Im Vorraum zum Hubertussaal wurde ebenfalls eine Fahrt mit dem leichten Wagen D über den Fußboden gemessen. Als Fußbodenbelag sind hier Steinplatten aus Agnether Rotmarmor und Sollnhofner Platten im Wechsel auf einer Holzbalkendecke verbaut. Die Geschossdecke ließ sich hier besonders leicht anregen. Dies führte zu Spitzenwerten bei  $x$  senkrecht von 4,2 mm/s bei 9 Hz. Damit ist der Richtwert von 3 mm/s von 0 – 10 Hz überschritten. Die Spitzenwerte von 0,8 mm/s an der Verkleidung Fensternische betragen bis zu 25 % der am Fußboden eingebrachten Erschütterungsintensitäten.

Für die Stoßereignisse ergibt sich für die Spitzenwerte folgendes Bild: 12,5 mm/s bei 22 Hz am Boden; 0,4 mm/s bei 0-8 Hz an der Wandverkleidung und 0,4 mm/s bei 11,5 Hz an der Deckenaufhängung. Daraus lassen sich zwei Erkenntnisse ableiten: Je stärker und punktueller die Anregung, umso stärker „verfälscht“ die Schadstelle Unterbau die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten am Boden. Die Schwingungen der Decke sind leicht höher als die an der Wand gemessenen. Eine Verstärkung im Sinne einer Überhöhung des Bodenwertes tritt nicht ein. Die Spitzen an Wand und Decke sind nach DIN 4150 unerheblich und für historische Bauwerke als normal zu betrachten. Eine Auffälligkeit findet sich allerdings beim Vergleichen der Erschütterungsmessungen an der Deckenaufhängung und den Spanten: Während die Schwinggeschwindigkeiten im Bereich Spanten mit 0,02 über Hintergrundmessung und verschiedener Ereignismessungen eher konstant bleiben, ändert sich  $v_{\max}$  im Bereich der Deckenaufhängung von 0,07 – 0,3 mm/s. Ob darin eine mögliche Mitursache der Rissbildung in der Längsrichtung von Decke und Hohlkehle gesehen werden darf, ist nicht klar.

Das Befahren des Vorraums zum Hubertussaal ist kritisch zu betrachten. Und auch im Hubertussaal könnten mehrere zugleich fahrende Rollwägen zur Überschreitung der Norm führen. Wie gezeigt liegt, in der Gewichtsreduktion der Wägen nicht der Schlüssel zur Minimierung der Erschütterungseinträge. Eventuell könnte man Wägen konzipieren, mit denen die Richtwerte klar unterschritten werden, so dass diese für Transporte in der Orangerie vorgeschrieben und zur Verfügung gestellt werden könnten. Beim Punkt Geschwindigkeit muss man es wohl bei der Bitte, langsam zu fahren, belassen. Solange

keine Kunstobjekte im Saal ausgestellt werden, schafft die Schadstelle im Unterbau keinen Handlungsbedarf. Erschütterungen übertragen sich über die Wände auf die Decke: Überhöhungen sind dabei aber nicht festzustellen, vielmehr tritt eine Dämpfung ein.





Erschütterungsbelastung von Bauteilen  
durch Transportwagen (Catering/Veranstaltungsequipment)  
v und a mono waagrecht im oberen Bereich der Gemäldewagenstellwand

	$V_{\max x}$ senkrecht	$V_{\max y}$ parallel	$V_{\max z}$ waagrecht	$a_{\max x}$ senkrecht	$a_{\max y}$ parallel	$a_{\max z}$ waagrecht	$V_{\max x,z}$ $a_{\max x,z}$ senkrecht Boden/ Wand	Frequenzen
Wagen Schieben Holzbalkendecke mit Parkettauflage Hubertussaal Orangerie Hauptmessung Boden	-3,28	-1,89	-0,86	0,51	-0,28	-0,13		$f_x$ : 10,5; 23,5; 30 Hz $f_y$ : 24 Hz $f_z$ : 10,5; 26 Hz alter: $f_z$ : 10,5; 23,5 Hz
Wagen Schieben + 100 kg Holzbalkendecke mit Parkettauflage Hubertussaal Orangerie Hauptmessung Boden	-2,02	1,38	0,80	-0,38	0,21	0,14		$f_x$ : 10,5; 23,5; 30 Hz $f_y$ : 24 Hz $f_z$ : 10,5; 26 Hz alter: $f_z$ : 10; 23,5 Hz
Wagen Schieben + 100 kg Holzbalkendecke mit Parkettauflage Hubertussaal Orangerie Hauptmessung Wand	0,04	0,90	0,84	0,03	-0,01	0,01		$f_x$ : indifferent 0-160 Hz $f_y$ : indifferent 0-12 Hz $f_z$ : indifferent 0-12; 22-24 Hz alter: $f_x$ : 10,5; 26,5 Hz
Wagen Schieben Holzbalkendecke mit Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Vorraum Hubertussaal Messung Boden	-4,25	-1,47	2,04	-1,82	0,71	-0,79		$f_x$ : 9 Hz $f_y$ : 8,5; 16; 84 Hz $f_z$ : 22,5; 49, 84 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteile und Strukturen  
Belastung auf Boden  
Antwort Wand, Deckenabhängung, Spanten Deckenkehle

	$V_{\max x}$ senkrecht	$V_{\max y}$ parallel	$V_{\max z}$ waagrecht	$a_{\max x}$ senkrecht	$a_{\max y}$ parallel	$a_{\max z}$ waagrecht	$V_{\max x,z}$ $a_{\max x,z}$ alter.	Frequenzen
Stoßereignisse Holzbalkendecke mit Parkettauflage Hubertussaal Orangerie Hauptmessung Boden; alter. Verkleidung Wand	-12,50	5,19	-5,36	-2,47	0,71	-0,83	0,20 0,04	$f_1$ : 5; 15; 20-22 Hz $f_2$ : 23,5 Hz $f_3$ : 26 Hz alter. $f_1$ : 3 Hz
Stoßereignisse Holzbalkendecke mit Parkettauflage Hubertussaal Orangerie Hauptmessung Verkleidung Fensterische, da Wand nicht frei zugänglich; alter. Boden	-0,25	-0,43	0,39	0,41	-1,06	0,25	0,24 0,03	$f_1$ : 189; 420 Hz $f_2$ : indifferent 0-8; 330-590 Hz $f_3$ : indifferent 0-13 Hz alter. $f_1$ : 18,5; 26 Hz
Stoßereignisse Holzbalkendecke mit Parkettauflage Dachgeschoss über Hubertussaal Hauptmessung Balkenaufhängung Decke, alter. Spanten Deckenkehle	-0,31	0,29	-0,43	0,08	-0,05	0,07	0,02 0,003	$f_1$ : 11,5 Hz $f_2$ : 11,5; 27,5; 32,5 Hz $f_3$ : 10,5; 27,5 Hz alter. $f_1$ : 2,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

## Belastungen durch den Erschütterungseintrag von Besuchern

Kunstwerke erfüllen keinen Selbstzweck. Sie brauchen den Betrachter, auf den sie wirken können, um ihren Sinn nicht zu verlieren. Überdies ist es nicht möglich und bestimmt auch nicht erwünscht alle Kunstgegenstände durch Repliken zu ersetzen und so kommen diese zwangsläufig in Kontakt mit den Kunstwerken. Vielerorts wurde jedoch der Besucher als eine der Hauptursachen für Schäden entlarvt: Ob nun durch die Veränderungen im Raumklima, das Ausdünsten von Schadstoffen, den Eintrag von Stäuben und nicht zuletzt der Unachtsamkeit den Objekten gegenüber. Wie stark ist aber der Erschütterungseintrag durch die Bewegungen der Besucher in einem Museum für das Bauwerk, die Ausstattungsstücke und ausgestellte Kunstgegenstände? Und wie lässt sich der Besucher im Vergleich zu anderen Emissionsquellen einordnen?

Eine wichtige Voraussetzung, das Schadenspotential durch Besucher abzuschätzen, ist die Kenntnis über die Anregungsfrequenzen, die aus den Aktivitäten von Personen erwachsen. Langsames Gehen induziert Frequenzen von 1,6 Hz, schnelles Gehen 2,2 Hz.<sup>78</sup> Bei rhythmischen Bewegungen wie Tanzen treten Frequenzen um die 4 Hz auf.<sup>79</sup> Der Umstand, dass es sich hierbei um sehr tieffrequente Emissionen handelt, weist bereits auf eine mögliche Gefährdung für Bauwerk und Sammlungsgut hin. Da die Eigenfrequenzen von Gebäuden zwischen 4 und 18 Hz liegen, wobei historische Bauten eher zum niedrigeren Ende tendieren, lassen sich die Geschossdecken durch die Besucher leicht anregen. In Ausnahmefällen, wenn sich die Anregungsfrequenz der Besucher und die Eigenfrequenz der Bauteile lediglich um den Faktor  $\sqrt{2} = 1,41$  unterscheiden, kann es sogar zu Resonanzerscheinungen kommen. Bei den durchgeführten Messungen lagen Anregungs- und Eigenfrequenzen jedoch stets zu weit auseinander, um eine Überhöhung des Erschütterungssignals zu beobachten. Allerdings spiegeln die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten die leichtere Anregbarkeit von Bauteilen mit niedriger Eigenfrequenz, geringem Eigengewicht und großen Spannweiten wieder. Als dominant stellt sich der Konstruktionstyp der Geschossdecke heraus. Bohlenbalkendecken lassen sich wegen ihres geringeren Eigengewichts und der höheren Elastizität leichter anregen, als Stahlbetondecken: Daher stehen die Schwinggeschwindigkeiten, die in Nymphenburg detektiert, wurden mit 13 und 6 mm/s an der Spitze. Der Umstand, dass trotz der Stahlbetondecken im Bayerischen Nationalmuseum die Meßwerte in Saal 24 in diese Phalanx einbrechen konnten, liegt sehr wahrscheinlich an den Schäden am Unterbau des Fussbodens. Dafür spricht auch die lokale Begrenztheit der verstärkten Anregbarkeit. Trifft der Besucher beim Umhergehen die schadhafte Stelle, so betragen die Emissionen ein Vielfaches der beim Auftreten an jeder anderen Stelle im Raum eingetragenen Erschütterungen. In diesen Fällen suggeriert die hohe Schwinggeschwindigkeit ein erhöhtes Schadenspotential. Hinsichtlich des Bauwerks bedeutet dies eine Überbewertung der Gefährdung. In Vitrinen, auf Sockel oder direkt auf dem Boden platzierte Kunstwerken in unmittelbarer Nähe zur Erschütterungsquelle wirkt dieses ansonsten eher lokale Phänomen

---

<sup>78</sup> DIAZ und REYNOLDS 2010.

<sup>79</sup> ALLEN und PERNICA 1998.

jedoch in voller Stärke ein. Erschwerend kommt hinzu, dass die Schadstellen über die Zeit durch die Belastung und Abnutzung durch den Besucher entstehen und sich daher auf den stark frequentierten Laufwegen manifestieren. Wird dagegen nichts unternommen, schreitet der Schaden im Fußbodenaufbau fort, wodurch sich in der Folge der Bewegungen des Publikums Erschütterungen mit höheren Schwinggeschwindigkeiten ergeben. Wegen der großen Auslenkungen aus der Ruhelage, der Schwingamplituden, gestalten sich dämpfende Maßnahmen schwierig. Das Dämmmaterial müsste entsprechend dick gewählt werden. Ist eine Reparatur am Boden nicht möglich, sollten im Einflussbereich der Schadstelle keine Kunstwerke am Boden, Sockel und Vitrinen ausgestellt werden. Zumindest sollten dort keine empfindlichen oder vorgeschädigten Stücke präsentiert werden.

Einen Ausreißer in die entgegengesetzte Richtung repräsentiert der für Nymphenburger Verhältnisse sehr geringe Wert von gemessenen 0,6 mm/s auf dem Fussboden des Steinernen Saals. Darüber hinaus erreichen die horizontalen Schwinggeschwindigkeiten  $y$  und  $z$ , ähnliche Werte wie die in vertikaler Richtung  $x$ . Typischerweise bewegen sich die horizontalen Werte zumeist bei 50 % der vertikalen Werte und darunter. Die Ausnahme bilden Erschütterungseinträge mit einer starken horizontalen Richtungskomponente, ähnlich einem schlurfenden Gehen. Im Falle des Steinernen Saals sind die Gründe jedoch an anderer Stelle zu suchen. Oberflächlich betrachtet, müsste der Saal wegen seiner hohen Spannweite die höchsten Erschütterungswerte liefern. Mit Hilfe der Gebäudepläne ist die Hauptursache für die geringen Werte schnell ausgemacht: Der Saal wird durch ein darunterliegendes Kreuzgewölbe gestützt. Dabei ist die Pfeilerstellung sehr eng, wodurch sich kleine Joche ergeben. Entsprechend kann der Saalboden nicht ungehindert als Ganzes durchschwingen. Vielmehr schwingen die anhand der Pfeilerstellung definierten Kompartimente, die aber entsprechend kleiner dimensioniert sind. Zusätzlich behindert die Wölbung im Gegensatz zu einer Flachdecke die Schwingung.

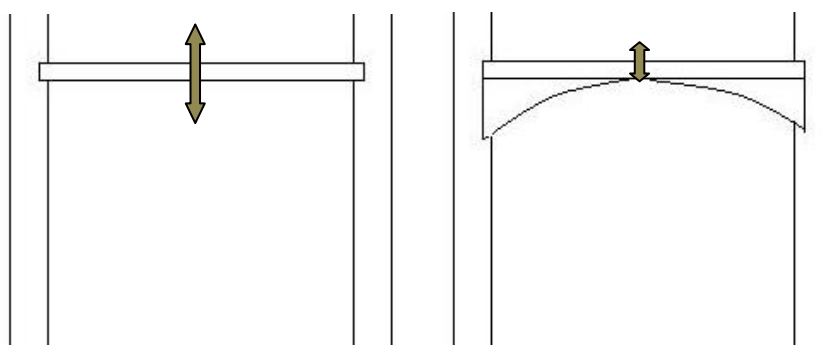


Abbildung 19  
Schwingverhalten und  
Anregbarkeit von  
Flachdecken/ Gewölbedecken

Als letzten Grund, warum der Erschütterungseintrag im Steinernen Saal im Vergleich zu den anderen Räumen im Nymphenburger Hauptschloss so gering ausfällt, bleibt der Unterbau des Steinfliesenbodens zu nennen. Die obere Seite des Gewölbes ist mit Schutt und Sand verfüllt. Die Fliesen aus Agnether Rotmarmor und Sollnhofner Kalkstein sind mittels kleiner

Mörtelportionen auf das Schüttungsmaterial geklebt und anschließend verfugt worden. Dieser eher lose Verband und die Schuttschicht sollten zusätzlich dämpfend wirken.

Die Entfernung Erschütterungsquelle zu Empfänger, in diesem Fall das Kunstwerk, ist im Falle von Bauarbeiten, Verkehrsemissionen usw. ein stets zu beachtendes Kriterium. Im Falle des Besuchereintrages gilt dies sicher auch. Allerdings ist ein Vergrößern des Abstandes Publikum/Kunstwerk über einen angemessenen Sichtabstand hinaus nicht realisierbar. Gerade filigrane und daher empfindliche Objekte wirken verstärkt auf Nahsicht, die dem Besucher nicht verwehrt werden sollte. Der Erschütterungseintrag von Personen wurde durch Umhergehen im Raum, gelegentlich in unmittelbarer Nähe zu den Aufnehmern gemessen. Da aber auch die Besucher zu den Kunstwerken nicht mehr Abstand halten, stellen die erhobenen Spitzenschwinggeschwindigkeiten in den Bauteilen keine Überbewertung dar, vielmehr entsprechen sie der Realität der Belastung für die Kunst durch den Besucher. Gilt das Augenmerk der Baustruktur, kann den Erschütterungen durch Schwingungsisolatoren entgegengewirkt werden. Ansonsten ist die Anzahl der Besucher auf ein verträgliches Maß, im Bereich der Grenzwerte der DIN 4150, zu reduzieren. Müssen Kunstwerke und Ausstattungsgegenstände vor den Erschütterungen geschützt werden, sollten sie an den Übergängen von Boden zu Vitrine und Sockel, Wand zu Aufhängung und gegebenenfalls zwischen Vitrinenboden und Kunstgegenstand durch speziell entwickelte Schaumstoffe oder Filz gedämpft bzw. entkoppelt werden.

Die Auswertung der Meßergebnisse zeigt, dass Anzahl und Gewicht der Quelle weniger Einfluss auf die Intensität der Erschütterungen hat als die Anzahl der durchlaufenen Anregungszyklen pro Zeiteinheit. Mit anderen Worten ist die Gehgeschwindigkeit der Besucher ausschlaggebend.<sup>80</sup> Die Steigerung der Schwinggeschwindigkeit bei schnellem Gehen im Vergleich zu langsamen Gehen, fällt umso größer aus, je leichter sich ein Bauteil anregen lässt. An den in Saal 85 des Bayerischen Nationalmuseums gemessenen Werten können diese Tendenzen abgelesen werden. Der Meßstempel wurde zentral im Raum platziert, in dem sich eine große zusammenhängende Vitrinenarchitektur befindet, die eine Freifläche in der Raummitte und einen Gang zwischen Wand und Schaukästen bildet. Beim gleichzeitigen Umhergehen zweier Personen in der Raummitte traten Schwinggeschwindigkeiten von 0,42 mm/s bei 8 Hz auf. Durch das schnelle Durchschreiten des Ganges zwischen Wand und Vitrine kam es jedoch bereits bei einem Besucher zu Intensitäten von 0,47 mm/s. Obwohl die Entfernung zum Meßstempel mindestens das Drei- bis Vierfache betrug und der Boden durch den Eintrag am Rand der Schwingfläche sowie durch das Gewicht der Ausstellungsarchitektur in diesem Fall schwerer anzuregen war, kam es zu diesen relativ hohen Werten. Unter gleichen Bedingungen sollte demnach die Differenz der Schwinggeschwindigkeiten weit mehr als 10% betragen. Bei den Messungen im Steinernen Saal in Nymphenburg waren einmal 4 Personen anwesend, das andere Mal 10 Personen. Kurioserweise lagen die eingebrachten Schwinggeschwindigkeiten der 10 Personen mit 0,55 mm/s geringer, als die der 4 Personen mit 0,65 mm/s. Dies zeigt deutlich, dass bei dynamischen Vorgängen nicht so sehr die Anzahl der Erschütterungsquellen im Vordergrund steht, sondern wo und wie sie sich bewegen. Bei der

---

<sup>80</sup> Siehe auch Argumentation Gewicht/Fahrgeschwindigkeit Auswirkungen der Transporte auf die Baustruktur.

statischen Betrachtung wird die maximale Gewichtslast für ein Bauteil und somit die Zahl der Besucher festgelegt. Für welche Besucheranzahl ein Bauteil aus dynamischen Gesichtspunkten gesperrt werden sollte, ist dagegen nicht so klar zu beantworten. Wenn eine Besuchergruppe von drei Personen bei moderaten Bewegungen auf der Sängerempore des Steinernen Saales, die als Flachdecke konzipiert ist, bereits Einträge von Schwinggeschwindigkeiten von 6,5 mm/s bei 11 Hz verursacht, bleibt zu prüfen, ob die statisch als unbedenklich angesehene Anzahl von 30 Besucher für die Empore wirklich als „unbedenklich“ bezeichnet werden darf. Zugrundegelegt wird hier nicht die Sicherheit der Besucher, sondern ihr Schadenspotential für das Deckengemälde an der Unterseite der Empore. Neben der Begrenzung der Besucherzahlen und dem mehr oder weniger subtilen Durchschleusen der Besucher in gebührender Entfernung zu den Objekten, sollte das schnelle Durchschreiten von Räumen möglichst verhindert bzw. reduziert werden. Dies soll kein Apell zum Aufstellen von Geschwindigkeitsbegrenzungen á la Straßenverkehr sein. Bei der Neukonzipierung von Ausstellungen sollte deshalb darauf geachtet werden, dass der Besucher nach Möglichkeit auf einem Rundgang geführt wird. Dabei sollte vermieden werden, dass Räume mehrmals betreten werden müssen. Solange sich der Besucher interessiert einem Kunstwerk nach dem anderen zuwendet, sind die Bewegungen langsam und der Eintrag von Erschütterungen dementsprechend gering. War er jedoch bereits in einem Raum wird er ihn entsprechend schneller durchschreiten. Legt man zugrunde, dass der Erschütterungseintrag der Besucher gleichwertig neben schweren Bauarbeiten rangiert, ist Handlungsbedarf gegeben.

Auch der Fußbodenbelag hat Einfluss auf die durch den Besucher induzierten Erschütterungen: Er verändert die Eigenfrequenzen des Bauteils Boden. Dabei spielt die Anbindung an die Geschossdecke, bzw. den Estrich eine große Rolle. Wird der Belag mit dem Untergrund verklebt, entsteht durch die feste Verbindung ein „kompaktes“ Bauteil mit einem eher schmalbandigen Eigenfrequenzspektrum. Eine verstärkte Anregung wird also nur bei wenigen Frequenzen möglich. Trifft eine Anregungsfrequenz jedoch genau diesen Bereich, kommt es auch zu einer verstärkten Reaktion. Wird der Parkettboden im Gegenzug schwimmend verlegt, d. h. ohne feste Verbindung zum Rohboden, existieren im Bauteil, wegen der unabhängigen Schichtung mehrere Eigenfrequenzen nebeneinander. Das Spektrum ist breitbandiger. Solche Bauteile reagieren in der Folge auf mehrere Anregungsfrequenzen. Durch die mangelnde Kopplung treten dabei gleichzeitig Dämpfungsmechanismen in Erscheinung. Das Bauteil wird zwar leichter angeregt, die Antwort fällt in der Intensität aber geringer aus. Da beide Modelle, je nach Sammlungsgut und Ausstellungskonzept, durchaus Vor- und Nachteile hinsichtlich eines effizienten Erschütterungsschutzes bieten, sollten diese Überlegungen bei der Neu- und Umbauten von Museen für den Einzelfall mit einbezogen werden.

Das Material, aus dem der Fußbodenbelag besteht, übt vor allem Angesichts seiner Elastizität großen Einfluss auf den Eintrag durch die Besucher aus. Je weicher das Material, umso höher die Dämpfung und umso geringer die zu messenden Schwinggeschwindigkeiten. Dem steht entgegen, dass Steinfliesenböden zwar die geringere Elastizität im Vergleich zu Holzböden aufweisen, allerdings das Gewicht der Geschossecke



vergrößern.<sup>81</sup> Schwerere Bauteile sind auch schwerer anzuregen. Diese Tendenzen spiegeln sich in den Meßwerten aus allen vier Meßkampagnen wieder. Eine klare Reihenfolge lässt sich wegen der Dominanz der Geschossdecken und zahlreicher Einzelphänomene nicht klar ablesen. Hierzu sind Versuche mit festen Variablen nötig.<sup>82</sup> Einzig die Sisalteppiche erzielen sichtbar geringere Schwinggeschwindigkeiten. Hier überwiegen aber die Nachteile in punkto Staubentwicklung, sodass eine Empfehlung für Teppiche in Sammlungen nicht ausgesprochen werden kann.

---

<sup>81</sup> CORSARO 1990.

<sup>82</sup> Tendenzen sind der Tabelle Trittschalldämmmaß im Anhang zu entnehmen.



Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$V_{\max x}$ senkrecht	$V_{\max y}$ parallel	$V_{\max z}$ waagrecht	$a_{\max x}$ senkrecht	$a_{\max y}$ parallel	$a_{\max z}$ waagrecht	Frequenzen
2 Besucher Parkettboden Eiche Verbindungsgang Steinerer Saal/Schönheitenkabinett Hauptschloss Nymphenburg	12,880	6,739	-6,565	1,898	0,598	-0,688	$f_x$ : 8,5; <u>10,5</u> ; 13; 17,5; 19,5; 27; 28,5 Hz $f_y$ : 4; 8,5; 10; 14; <u>18</u> ; 26; 28,5 Hz $f_z$ : 10,5; 15,5; <u>18</u> ; 26 Hz
3 Besucher hist. Dielenboden Nadelholz Empore Steinerer Saal Hauptschloss Nymphenburg	6,410	-2,043	-2,040	-0,754	0,254	-0,331	$f_x$ : <u>11</u> ; 14,5; 18,5; 20; 22,5; 34 Hz $f_y$ : <u>13,5</u> ; 15,5; 20; 23,5; 27; 34 Hz $f_z$ : 8; 11,5; 14,5; 18,5; 23,5; <u>25,5</u> ; 34 Hz
3 Besucher Parkettboden Eiche Raum 3 Sammlung Bollert	-4,886	-5,704	-1,088	0,599	-0,687	-0,156	$f_x$ : <u>19,5</u> ; 30,5; 41,5; 43; 118; 119,5-122 Hz $f_y$ : <u>19,5</u> Hz $f_z$ : 20; <u>27,5</u> ; Hz
2 Besucher Parkettboden Eiche Schönheitenkabinett Hauptschloss Nymphenburg	4,323	1,272	2,077	-0,498	0,142	0,260	$f_x$ : <u>7</u> ; 11; 15; 18,5 Hz $f_y$ : 7,5; 9,5; <u>19</u> ; 23 Hz $f_z$ : 7,5; 9,5; 13; <u>19</u> ; 23 Hz
3 Besucher Kind plumpst auf den Boden Parkettboden Eiche Saal 22 BNM	3,403	1,104	0,641	1,646	0,379	-0,134	$f_x$ : Abfl. 16; 24,5; 28,5; 36; <u>47</u> ; 51; 60; 65-90; 100 Hz $f_y$ : Abfl. 22; 24,5; <u>41,5</u> ; 46; 54; 55,5; 76, 85 Hz $f_z$ : Abfl. 22; 24,5; 32; <u>36</u> ; 47 Hz

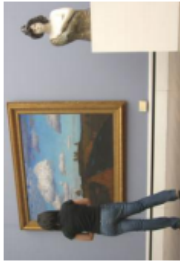
Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$



Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
2 Besucher Parkettboden Eiche Saal 24 BNM	-3,325	4,183	-6,569	-0,473	-0,458	-0,831	$f_x$ : Abfl. 9, 13,5; 17,5; 22; 24,5; 31,5; 38,5; 49; 50-90 Hz $f_y$ : Abfl. 9; 11; 13,5; 17,5; 25,5; 32; 38,5; 44; 49 Hz $f_z$ : Abfl. 8; 13,5; 17,5; 25,5; 32,5; 38,5 Hz
2 Besucher Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Vorraum Hubertussaal Orangerie Nymphenburg	3,046	-0,419	-0,331	-0,254	0,122	0,090	$f_x$ : 8,5 Hz $f_y$ : 8,5; 85 Hz $f_z$ : 8,5; 23; 85; 142 Hz
3 Besucher Parkettboden Eiche Hubertussaal Orangerie Nymphenburg	-1,700	0,963	-0,586	-0,324	-0,146	0,088	$f_x$ : 10,5; 23,5 Hz $f_y$ : 24 Hz $f_z$ : 10,5; 26 Hz
3 Besucher Parkettboden Eiche Raum 1 Sammlung Bollert	-1,256	-0,653	0,426	0,410	0,101	0,079	$f_x$ : 13; 18,5; 20,5; 23; 27; 31,5; 37; 42; 48,5; 51,5; 55,5; 60 Hz $f_y$ : 14; 18,5; 20,5; 23; 55,5 Hz $f_z$ : 4; 13; 18,5; 20,5; 23; 26,5; 31,5; 42; 55,5 Hz

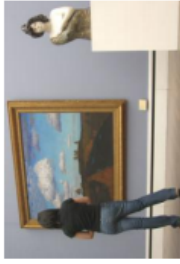
Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$v_{maxx}$ senkrecht	$v_{maxy}$ parallel	$v_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
5 Besucher Granitboden Saal 6 Neue Pinakothek	1,161	0,679	-1,046	0,496	0,274	0,362	$f_x$ : 16,5; 23,5; <del>27</del> ; 31; 39; 41; 45; 51; 63,5; 71,5 Hz $f_y$ : 16; 24; 27; 31; 57,5; <del>71,5</del> Hz $f_z$ : 16,5; 27; 41,5; <del>58</del> ; 71,5; 127 Hz
4 Personen Betonboden Depot Kojie 103 Neue Pinakothek	-1,069	0,275	-0,417	-0,258	-0,106	0,101	$f_x$ : Abfl. <del>56,5</del> ; 59; 69; 71,5; 84 Hz $f_y$ : Abfl. 59; 72; <del>84</del> ; 91,5; 97 Hz $f_z$ : Abfl. 5; 60; <del>72</del> ; 84; 91,5; 126,5 Hz
2 Besucher Sockel Raummitte Raum 2 Sammlung Bollert	0,690	-0,375	-0,300	-0,151	0,035	-0,029	$f_x$ : 11,5; 16; <del>22,5</del> ; 28; 32,5; 39,5; 41,5; 44; 47,5; 55 Hz $f_y$ : 4; <del>11,5</del> ; 16; 22,5; 28; 41,5 Hz $f_z$ : 4,5; <del>15,5</del> ; 20; 22,5; 47,5 Hz
4 Besucher Steinfliesenboden Agnether Rotmarmor/ Sollhofner Platten Steinerne Saal Hauptschloss Nymphenburg	-0,635	0,619	-0,387	0,118	0,201	0,100	$f_x$ : 6,5; 9; 17; 18,5; 24; 27,5 Hz $f_y$ : 6,5; <del>8,5</del> ; 10,5; 14; 18; 34,5; 58 Hz $f_z$ : <del>8-11</del> ; 18; 24; 25,5; 27,5; 56 Hz

Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$



Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$V_{\max}$ senkrecht	$V_{\max}$ parallel	$V_{\max}$ waagrecht	$a_{\max}$ senkrecht	$a_{\max}$ parallel	$a_{\max}$ waagrecht	Frequenzen
2 Besucher Parkettboden Eiche Raum 2 Sammlung Bollert	-0,449	0,317	0,335	-0,138	0,037	-0,084	$f_x$ : 9,5; 12; 23; 25; 29; 31,5; 46,5; 55,5; 133; 135 Hz $f_y$ : <u>23</u> ; 25; 29; 35,5-37,5 Hz $f_z$ : 12,5; 16; 18,5; 23; 25; <u>29</u> ; 37,5 Hz
2 Besucher Parkettboden Eiche Saal 85 BNM	-0,421	-0,057	0,079	-0,054	0,012	-0,008	$f_x$ : <u>8</u> ; 12,5; 17,5; 24,5; 25,5; 31; 38,5; 49; 102,5-105,5 Hz $f_y$ : 4; 8; 12,5; 17,5; 24,5; 30,5; <u>38</u> ; 40; 49 Hz $f_z$ : 4; 11; 17,5; 22; <u>24,5</u> ; 31; 38; 49 Hz
10 Besucher, Stühle rücken Steinfliesenboden Agnether Marmor/Sollinhofer Platten Halle BNM	-0,356	-0,270	-0,081	0,309	0,139	0,059	$f_x$ : 17,5; 30,5; <u>32,5</u> ; 34,5; 36,5; 42,5; 52; 64; 72; 89; 108; 110-155 Hz $f_y$ : 24,5; 30,5; 48; <u>76</u> ; 109 Hz $f_z$ : 29; 43; <u>72</u> ; 110 Hz
3 Besucher Parkettboden Saal 1 Neue Pinakothek Messung an Sockel Marmorstatue	0,256	0,804	-0,862	0,557	0,128	0,090	$f_x$ : Abfl. 19; <u>23,5</u> ; 28,5; 29,5; 31; 42; 90-140; 445-515 Hz $f_y$ : Abfl. <u>5,5</u> ; 24; 31; 34; 41,5; 58,5; 66 Hz $f_z$ : Abfl. <u>5,5</u> ; 24; 31; 34; 41,5; 58,5; 66 Hz
3 Besucher Parkettboden Saal 1 Neue Pinakothek Messung am Boden Marmorstatue	0,224	-0,047	-0,080	-0,151	0,018	-0,022	$f_x$ : 7; 16,5; <u>23</u> ; 35; <u>78</u> ; 90-180 Hz $f_y$ : 12; 16; 24; 30; <u>35</u> ; 40 Hz $f_z$ : 24; 35; <u>40</u> ; 86 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$v_{maxx}$ senkrecht	$v_{maxy}$ parallel	$v_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
15 Kindergartenkinder Granitboden Halle Neue Pinakothek	0,221	0,039	0,022	0,285	0,036	-0,014	$f_x$ : 11; 14; 18; <u>24</u> ; 29; 31; 42,5; 78,5; 200-270 Hz $f_y$ : 13,5; 24; 49,5; <u>79</u> Hz $f_z$ : 10,5; 14,5; 24; 40; <u>68,5</u> ; 128 Hz
4 Besucher Terracottafliesenboden mit Relief Saal 51 BNM	0,168	0,191	-0,249	-0,099	0,052	-0,097	$f_x$ : <u>11</u> ; 16,5; 22,5; 32,5; 49; 63,5 Hz $f_y$ : 3,5; 11; 18; 24; 39,5; 49; 55; 63,5; <u>72,5</u> Hz $f_z$ : 3,5; 7,5; 11; 17,5; 20; 23,5; 49; 55; 63; 72; 100 Hz
2 Person Laminatboden Ausstellungsraum Kunstbau	0,147	-0,030	0,028	0,062	-0,013	0,006	$f_x$ : 15,5; 22,5; <u>26,5</u> ; 34,5; 50; 54; 66; 74,5; 99,5; 200 Hz $f_y$ : 15,5; 22,5; 25; 26,5; 30; <u>33</u> ; 36; 50; 54; 66; 74,5; 83; 200 Hz $f_z$ : 17; <u>29</u> ; 83,5; 123 Hz
3 Personen Betonboden Depot Neue Sammlung Kellergeschoss Sammlung Bollert	0,125	0,082	-0,132	0,129	0,032	0,044	$f_x$ : 9,5; <u>12</u> ; 18; 26,5; 66,5; 77; 122,5; 202 Hz $f_y$ : 66; <u>77,5</u> Hz $f_z$ : 3; 9,5; 12; 16,5; 17,5; 18,5; 20; 66; <u>77,5</u> Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$





Erschütterungseintrag durch Besucher  
gemessen an  
unterschiedlichen Bauteilen und Ausstattungsstücken

	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
3 Besucher Dielenboden Lärche Saal 103/104 BNM	0,030	0,046	0,148	0,113	0,019	-0,018	$f_x$ : 9; 17,5; 22,5; 24,5; 29; 35,5; 40; 44; 49; 162 Hz $f_y$ : 17,5; <u>24,5</u> ; 28,5; 35 Hz $f_z$ : 9; 17,5; 22; <u>24,5</u> ; 25,5; 28,5; 40; 44 Hz
3 Personen Betonboden künftiges Steindepot BNM	-0,025	0,257	-0,017	-0,005	0,001	-0,001	$f_x$ : 11; <u>13,5</u> ; 16; 20; 24,5; 34; 35,5; 43,5 Hz $f_y$ : indifferent 0-6 Hz $f_z$ : <u>14</u> ; <u>17</u> ; 24,5; 46; 49 Hz
3 Personen Betonpfeiler künftiges Steindepot BNM			-1,439			-0,020	$f_z$ : indifferent 0-33 Hz
3 Personen Betonwand künftiges Steindepot BNM Sehr hart angeregt!			-0,203			0,003	$f_z$ : indifferent 0-18 Hz
3 Personen Betonwand Depot Neue Sammlung Kellergeschoss Sammlung Bollert			0,143			0,004	$f_z$ : 15,5; <u>20</u> ; 25 Hz
4 Personen Betonwand Depot Kojе 103 Neue Pinakothek			0,034			-0,006	$f_z$ : indifferent 0-18; 20-30; 80-100 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$

## Propagation von Erschütterungen Übertragung auf Ausstattungstücke, Sockel und Vitrinen

Im Rahmen der Arbeit interessierte natürlich im besonderen Maße, ob Kunstgegenstände in Vitrinen bzw. auf ihren Sockeln vor von Besuchern oder anderen Quellen induzierten Bauwerksschwingungen sicher sind. Der Erschütterungseintrag durch leichte Stöße gegen Vitrinen und Sockel etwa mit der Fußspitze oder dem Ellenbogen, wie sie im Museumsalltag ständig vorkommen, ist ebenso von Interesse. Gerade Vitrinen und Schaukästen suggerieren einen geschützten Raum. Erschütterungen haben, wie die Meßergebnisse zeigen, sowohl Vitrinen als auch die Sockelkonstruktionen nichts entgegenzusetzen. Bei den Beispielen in der Neuen Pinakothek und Nymphenburg wurde die Schwingung im Vergleich zum Erschütterungseintrag über den Fussboden zwar leicht gedämpft, allerdings sind die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten am Vitrinenboden und auf der Tischplatte mit 3 mm/s und 10 mm/s in einem Frequenzbereich von 10 – 50 Hz an der obersten Grenze, der nach der DIN 4150-3 empfohlenen Werte von 3 – 8 mm/s. Im Falle der Sammlung Bollert und der Vitrinenkonstruktion in Saal 85 des Bayerischen Nationalmuseums kommt es sogar zu einer leichten Signalüberhöhung. Die Werte liegen hier bei 5 – 18 mm/s auf der Standfläche der Kunstwerke. In allen Fällen sollten deshalb erschütterungshemmende Maßnahmen ergriffen werden. Das Unterlegen von Filzen und Schaumstoffen der auf das Vitrinen- oder Sockelgewicht abgestimmten Dichte ist am einfachsten zu realisieren. Schwingungsdämpfer, z. B. Masse-Feder-Systeme, können mit Hilfe von Diagramm 9 bestimmt werden. Aus Platzmangel ist deren Benutzung leider nicht in allen Fällen möglich.

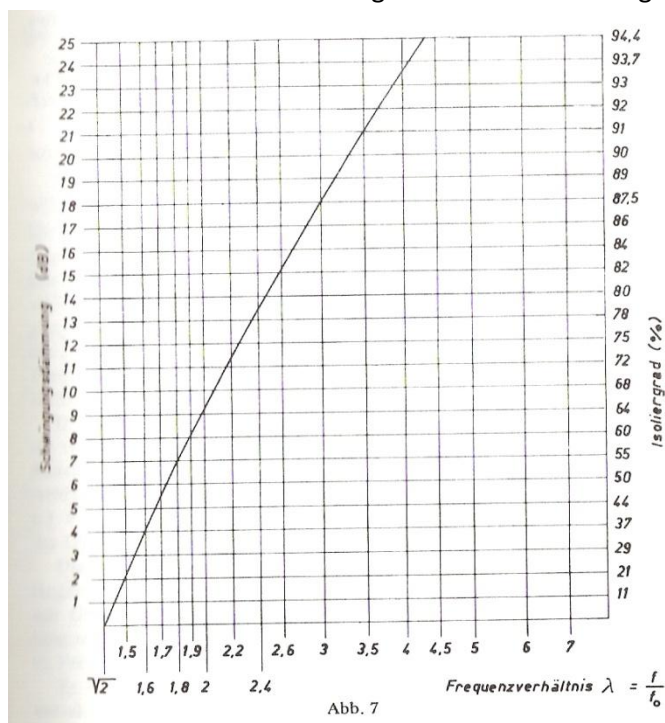


Abb. 7

Diagramm 9 Der gewünschte Isoliergrad von Erschütterungen kann über das Verhältnis Störfrequenz/Eigenfrequenz Bauteil bestimmt werden., Stolz 1979



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Erschütterungseintrag Fußboden  
Antwort Vitrine

	$V_{max x}$ senkrecht	$V_{max y}$ parallel	$V_{max z}$ waagrecht	$a_{max x}$ senkrecht	$a_{max y}$ parallel	$a_{max z}$ waagrecht	Frequenzen
Stoßereignisse Stahlbetondecke mit Parkettauflage Saal 85 BNM Messung in Vitrine	4,74	-1,29	4,34	0,76	-0,19	-0,43	$f_x$ : 8; 12,5; 15; 21,5; 23; 30; 33; 38 Hz $f_y$ : 7,5; 12; 14; 16,5; 17,5; 21; 23; 24,5; 30,5; 38,5; 41,5 Hz $f_z$ : 7,5; 12,5; 15,5; 17,5; 21,5; 23; 24,5; 27,5; 30; 32,5 Hz
Öffnen und schließen Vitrinentür Saal 85 BNM Messung in Vitrine	0,51	-0,37	-1,27	-0,08	-0,07	-0,14	$f_x$ : 8; 12,5; 15,5; 19,5; 24,5; 29,5; 33; 38; 44; 49 Hz $f_y$ : 7,5; 12,5; 17,5; 19,5; 24,5; 30; 38,5; 44 Hz $f_z$ : 8; 11; 12,5; 14; 17,5; 19,5; 22,5; 24,5 Hz
Stoßereignisse Parkettboden Raum 2 Sammlung Bollert Messung auf Standfläche Figur	18,93	3,70	1,43	3,98	0,64	-0,19	$f_x$ : 22; 32; 41 Hz $f_y$ : 11,5; 15,5; 22; 32; 41 Hz $f_z$ : 15,5; 22 Hz
Stoßereignisse Parkettboden Raum 3 Sammlung Bollert Messung an Vitrinenkonstruktion	-0,98	0,64	-0,64	0,32	0,14	0,13	$f_x$ : 3,5; 10,5; 13; 17,5; 24; 31; 36; 38; 43; 44,5; 50; 54; 70,5; 76,5; 100; 140 Hz $f_y$ : Abfl. 13; 24; 44 Hz $f_z$ : Abfl. 3,5; 9,5; 13,5; 18; 19,5; 21; 23,5; 25; 29,5; 36,5 Hz

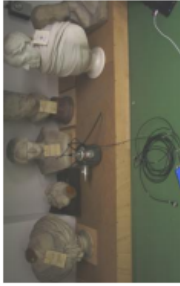
Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Erschütterungseintrag Fußboden  
Antwort Vitrine

	$V_{\max}$ senkrecht	$V_{\max}$ parallel	$V_{\max}$ waagrecht	$a_{\max}$ senkrecht	$a_{\max}$ parallel	$a_{\max}$ waagrecht	Frequenzen
Stoßereignisse Glashaube Vitrine Raum 3 Sammlung Bollert Messung an Vitrinenkonstruktion	1,90	0,59	-4,89	0,11	0,04	-0,14	$f_x$ : 3,5; 9,5; 12; 13,5; 38 Hz $f_y$ : 3,5; 12 Hz $f_z$ : 3,5; 9,5; 12 Hz
Stoßereignisse Vitrine Raum 3 Sammlung Bollert Messung an Vitrinenkonstruktion	10,40	1,31	-1,50	-3,22	0,56	0,48	$f_x$ : 3,5; 10; 12,5; 18; 24; 37,5; 43; 52,5; 71; 78,5 Hz $f_y$ : 7; 10; 12,5; 20; 24; 25,5; 38; 44,5; 60 Hz $f_z$ : 3,5; 7,5; 9,5; 12,5; 15; 17,5; 20; 25; 29,5; 36,5; 43,5; 53; 58; 71,5; 78 Hz

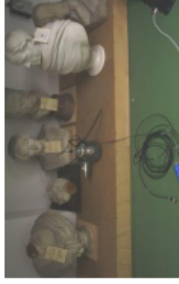
Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Belastung auf Boden  
Antwort Sockel/Vitrine

	$V_{max}$ senkrecht	$V_{max}$ parallel	$V_{max}$ waagrecht	$a_{max}$ senkrecht	$a_{max}$ parallel	$a_{max}$ waagrecht	Frequenzen
Gehen Stahlbetondecke mit Parkettboden Eiche Saal 1 Neue Pinakothek Messung an Sockel	0,26	0,80	-0,86	0,56	0,13	0,09	$f_x$ : Abfl. 19; 23,5; 28,5; 29,5; 31; 42; 90-140, 445-515 Hz $f_y$ : Abfl. 0-20 Hz $f_z$ : Abfl. 0-20 Hz
Gehen Stahlbetondecke mit Parkettboden Eiche Saal 1 Neue Pinakothek Messung auf Fußboden	0,14	-0,06	-0,04	0,09	-0,01	-0,01	$f_x$ : 16,5; 23,5; 34; 77 Hz $f_y$ : 16,5; 23,5; 34,5; 38,5 Hz $f_z$ : 10; 16,5; 24; 34,5; 38,5 Hz
Stoßereignisse Stahlbetondecke mit Parkettboden Eiche Saal 1 Neue Pinakothek Messung an Sockel	-2,74	0,76	-2,68	-0,97	-0,24	-0,60	$f_x$ : 5,5; 24,5; 28; 40; 57 Hz $f_y$ : 5,5; 8,5; 25; 40; 57,5 Hz $f_z$ : 5,5; 8,5; 40; 57,5 Hz
Stoßereignisse Stahlbetondecke mit Parkettboden Eiche Saal 1 Neue Pinakothek Messung auf Fußboden	-2,25	-1,58	0,92	0,63	0,29	0,19	$f_x$ : Abfl. 35; 40; 77; 115; 129; 159 Hz $f_y$ : 0-30; 35; 39,5; 78,5 Hz $f_z$ : 35; 39,5; 84,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Belastung auf Boden  
Antwort Sockel/Vitrine

	$V_{max,x}$ senkrecht	$V_{max,y}$ parallel	$V_{max,z}$ waagrecht	$a_{max,x}$ senkrecht	$a_{max,y}$ parallel	$a_{max,z}$ waagrecht	Frequenzen
Stoßereignisse Stahlbetondecke Depot Kojе 103 Neue Pinakothek Messung an Sockel	3,27	-3,27	3,19	-0,55	-0,25	-0,32	$f_x$ : 7,5; 20,5; 23 Hz $f_y$ : 7,5 Hz $f_z$ : 7,5; 9,5; 21 Hz
Stoßereignisse Stahlbetondecke Depot Kojе 103 Neue Pinakothek Messung auf Fußboden	-5,47	0,93	3,20	1,63	-0,16	-0,61	$f_x$ : 5; 8; 10,5; 13 Hz $f_y$ : 5; 8; 67; 70,5; 72,5; 76; 79; 81,5; 83,5; 86; 89,5; 92; 99 Hz $f_z$ : 5; 8; 10,5; 13; 70; 73 Hz
Stoßereignisse Stahlbetondecke Depot Kojе 103 Neue Pinakothek Messung an Wand	0,51			0,28			$f_x$ : 63,5; 85,5; 91; 103,5; 115,5; 116,5; 123; 146 Hz
Gehen Stahlbetondecke mit Sollhofner Platten Saal 134 BNM Messung auf Vitrinенboden	0,03	0,05	0,16	0,01	0,02	0,01	$f_x$ : 8,5; 13,5; 17,5; 24,5; 31; 39,5; 49; 68,5; 75-76; 102,5; 108,5; 137; 153; 175; 179; 200; 205; 217; 225 Hz $f_y$ : 24,5; 38,5; 49; 64; 68,5; 76,5 Hz $f_z$ : Abfl. 24,5; 68,5 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in m/s<sup>2</sup>





Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Belastung auf Boden  
Antwort Sockel/Vitrine

	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Gehen Stahlbetondecke mit Sollhofner Platten Saal 134 BNM Messung auf Fußboden	-0,06	0,03	0,02	0,08	-0,01	-0,01	$f_x$ : 10,5; 17,5; 24,5; 49; 81; 113; 216; 285 Hz $f_y$ : 12; 16,5; 18; 24,5; 80; 114 Hz $f_z$ : Abfl. 9; 12; 24,5; 49; 63; 81; 113,5 Hz
Stoßereignisse an Vitrine Saal 143 BNM Messung Vitrinenboden	1,81	-0,09	-0,53	-0,08	-0,03	-0,05	$f_x$ : 8,5; 17,5; 19,5 Hz $f_y$ : 8,5; 15,5; 17,5; 19,5; 21; 24,5; 38,5; 43; 49; 62,5; 69; 75 Hz $f_z$ : 8,5; 24,5; 69; 75 Hz

Schwinggeschwindigkeit (v) in mm/s; Schwingbeschleunigung (a) in  $m/s^2$



Kopplung und Propagation  
in angrenzende Bauteilen und Strukturen  
Erschütterungseintrag Fußboden  
Antwort Ausstattungsstück

	$V_{maxx}$ senkrecht	$V_{maxy}$ parallel	$V_{maxz}$ waagrecht	$a_{maxx}$ senkrecht	$a_{maxy}$ parallel	$a_{maxz}$ waagrecht	Frequenzen
Gehen auf Holzbaikendecke mit Parkettauflage Verbindungsgang Steirner Saal/ Schönheitenkabinett Hauptschloss Nymphenburg Messung Boden	12,88	6,74	-6,56	4,42	3,19	2,17	$f_x$ : 8,5; <u>10,5</u> ; 13; 17,5; 19,5; 27; 28,5 Hz $f_y$ : 4; 8,5; 10; 14; <u>18</u> ; 26; 28,5 Hz $f_z$ : 10,5; 15,5; <u>18</u> ; 26 Hz
Vorbeigehen an Tischplatte aus Agnether Rotmarmor auf Holzgestell Verbindungsgang Steirner Saal/ Schönheitenkabinett Hauptschloss Nymphenburg Messung auf Tischplatte	10,31	1,10	-1,50	0,86	0,14	0,15	$f_x$ : 3,5; 10,5; 12; 13,5; <u>15</u> ; 18,5; 21; 30; 33,5 Hz $f_y$ : <u>5</u> ; 10; 21; 30,5 Hz $f_z$ : <u>3,5</u> ; 7; 15; 19; 32 Hz

Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) in mm/s; Schwingbeschleunigung ( $a$ ) in  $m/s^2$

## Schadensmechanismen

### Direkte Schädigung, Bruch und Verlust

Sowohl bei Kunst- als auch bei Bauwerken handelt es sich in der Mehrzahl um vielschichtige, inhomogen strukturierte Objekte. Daher zeigen sich bei Überschreiten der jeweiligen Belastungsgrenze unterschiedliche Arten von Brüchen. Zu nennen sind Kohäsions- und Adhäsionsbruch, also einmal ein Versagen im Material und einmal an der Fugestelle beim Übergang von einem zum anderen Material.<sup>83</sup> Ein Maß für die Elastizität/Sprödigkeit eines Materials ist der E-Modul. Er zeigt, wie lange eine Verformung reversibel, bzw. vom Materialgefüge toleriert wird, bis es zum Bruch kommt. Ein hoher E-Wert spricht für ein sprödes Material.

Die Form des Objektes hat neben dem Material, aus dem es besteht, großen Einfluss, ab welchem Krafteintrag eine Struktur bricht und an welcher Stelle. Das Material mit den stärksten Bindungskräften auf molekularer Ebene kann leicht zerbrochen werden, liegt es nur dünn genug vor oder ist durch Fehlstellen, bzw. Leerstellen im Materialgefüge dementsprechend geschwächt. Bei einem kompakten Gegenstand ist daher mehr Kraft aufzuwenden, um einen Bruch hervorzurufen, als bei einem filigranen und durchbrochenen Objekt aus demselben Material. Zur Überschreitung der Belastungsgrenze reicht ein Einzelereignis. Daher ist auch die Bemessungsgrundlage der DIN 4105, die als Referenz die maximale Schwinggeschwindigkeit der Richtungen x, y und z zugrunde legt, der absolute Spitzenwert aus den drei Richtungen. Die mittlere Schwinggeschwindigkeit kann auf noch so geringem Niveau liegen: Wenn es zu einer Belastungsspitze über der Bruchgrenze kommt, tritt der Schaden ein. Schwingungen sind per se wiederkehrende Belastungen in und entgegengesetzt der Krafrichtung und führen deshalb leichter zu Schäden als statische Belastungen. Erlaubt sind etwa 10 % der statischen Höchstlasten. Erwartungsgemäß sollten andauernde Erschütterungen eher zu Materialbrüchen führen. Die DIN 4150 trägt dem auch Rechnung, der Einfluss ist jedoch in den mittelfristigen Zeiträumen<sup>84</sup> für die, die Norm entworfen ist, relativ klein. So ist die untere Grenze für Deckenschwingungen historische Bauten lediglich von 3 mm/s auf 2,5 mm/s verschoben. In jedem Falle gilt: Ein Objekt ist nur so stabil, wie es an seiner schwächsten Stelle ist. Leider ist dies bei gealterten Kunstgegenständen, genau wie bei gealterten Bauwerken, nur für den konkreten Einzelfall abzuschätzen. Materialanalysen sind kostenaufwendig und oft nicht zerstörungsfrei durchzuführen. Dabei bilden die so erhobenen Werte immer nur eine Momentaufnahme eines begrenzten, derzeit betrachteten Ausschnittes und können nicht zwingend auf das Gesamtgefüge übertragen werden. Je komplexer die Strukturen, umso unsicherer ist eine Vorhersage über Belastungsgrenzen. Oft zeigen erst bestehende Schäden auf, wo Schwachstellen liegen.

---

<sup>83</sup> HABENICHT 1997.

<sup>84</sup> Langfristige Auswirkungen von Erschütterungen siehe Punkt Materialermüdung

### Verlust von Material

Die bereits stark vorgeschädigte Malschicht auf einem leicht anregbaren Träger verhält sich ähnlich einem Pastell. Die Farbschollen sind nicht mehr in die Malschicht eingebunden und fungieren als einzelne Partikel. Da viele Kunstwerke in diesem Zustand vorliegen, ist die Reaktion auf Erschütterungen von gesteigertem Interesse. Gesetzt den Fall es würden aus allen Raumrichtungen Erschütterungen derselben Intensität auf eine Leinwand mit starker Schollenbildung einwirken, würde die Leinwand doch in die Richtung ihrer geringsten Materialdicke schwingen. Ist sie dabei liegend positioniert, wirkt auf die einzelne Scholle hauptsächlich die Bewegungsenergie der Schwingung, die potentielle Energie wird durch die Auflage der Scholle auf der Leinwand negiert. Ist die Leinwand dagegen stehend einer gleichstarken Schwingung ausgesetzt, wirkt neben der Bewegungsenergie die potentielle Energie der Scholle verstärkt auf dies ein. Dies wird erst möglich, da sie durch die Wölbung der Leinwand gegen die darunterliegende Scholle nach vorne versetzt wird und nun durch diese Scholle nicht mehr abgestützt wird (siehe Abbildung 20). Die Gegenkraft bzw. der Halt durch die untere Scholle ist nicht mehr gegeben. Bei gleichen Schwingungseinträgen ist demnach für Gemälde mit brüchigen Malschichten und lose aufliegenden Pigmenten der waagrechte Transport, bzw. Lagerung im Hinblick auf den Erschütterungsschutz zu vorzuziehen.

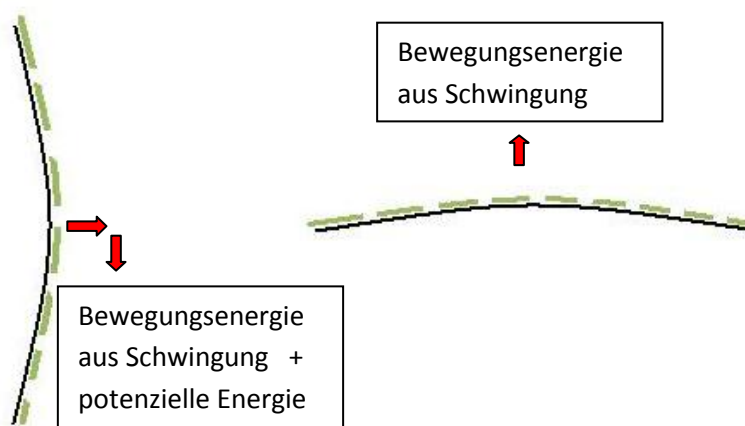


Abbildung 20 Krafteinwirkung auf brüchige Malschichten bei unterschiedlicher räumlicher Ausrichtung

Den Untersuchungen anlässlich des VASARI Projekts ist zu entnehmen, dass Verluste von Malschicht in Folge von Erschütterungseinträgen hauptsächlich an den Ecken und Kanten von Gemälden erfolgen. Dies hängt damit zusammen, dass die Leinwand an den Ecken an zwei Seiten festgehalten wird. Ein freies Schwingen ähnlich dem der Mitte der Leinwand ist nicht möglich. Die Kräfte können nicht abgeleitet werden, es kommt zu erhöhten Zugbelastungen. Kann eine elastische Leinwand die Dehnung unbeschadet mitmachen, bricht eventuell eine spröde Malschicht. Ist die Leinwand selbst zu starr, um sich zu dehnen kommt es zu Rissen im gesamten Gefüge. Der andere Grund, warum Ecken und Ränder besonders bedroht sind, ist die „Kante“ des Keilrahmens, gegen den die Leinwand bei jedem Schwingungszyklus gedrückt bzw. gezogen wird.

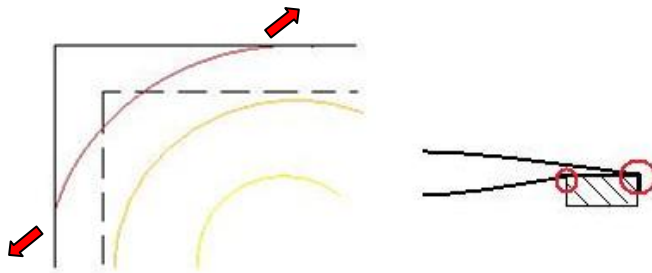


Abbildung 21  
Eck- und Randkonflikt bei  
Leinwandgemälden: die  
bevorzugten Stellen für Risse  
und Verluste der Malschicht  
aufgrund von Erschütterungen

### Sekundärschäden

In einigen Fällen kommt es trotz einer deutlichen Unterschreitung der zum Materialbruch führende Kräfte bzw. Schwingintensitäten zu Schäden an den Kunstgegenständen. Indem die Schwingungen andere Vorgänge auslösen, begünstigen oder beschleunigen, sind die daraus erwachsenden Folgen trotzdem auf Erschütterungen zurückzuführen.

### Materialermüdung

Dauerhaft wirkende Erschütterungen unter der Bruchgrenze von Strukturen und Werkstoffen führen zur Ermüdung des Materials. Da im Laufe der Zeit, die bei Kunstwerken und Denkmälern in Jahrzehnten und Jahrhunderten bemessen werden muss, die Materialien fortwährend intoleranter gegen Krafteinwirkung werden, treten Brüche bei immer kleineren Belastungen auf.

Eine mögliche Erklärung, wie Erschütterungen zur Reduktion des Elastizitätsmodules, d. h. zur Versprödung beitragen, könnte in einer anderen Theorie zur mechanischen Alterung von Leimen zu finden sein.<sup>85</sup> Warmleime bestehen auf molekularer Basis aus langen Strängen. Während des Abkühlvorganges nimmt die Beweglichkeit der Einzelstränge ab und sie erstarren in einer Art Knäuel. Klimaschwankungen, wie etwa eine leichte Erhöhung der Temperatur, führen der Leimatrix Energie zu. Es kommt zu partieller Erweichung und einer erhöhten Beweglichkeit von Strängen bzw. Strangabschnitten. Dadurch ist es den Molekülen möglich, sich in einem energetisch günstigeren Zustand zusammenzulagern, was während des schnellen Abkühlens nicht möglich war. Der günstigste Zustand ist der der kristallinen Anordnung. Dabei sind die Moleküle gleich organisiert und im geringst möglichen Abstand zueinander angeordnet. Allerdings sind innerhalb der kristallinen Bereiche keine großen Verschiebungen der Moleküle gegeneinander möglich. Erhöhung der Kristallinität bedeutet Versprödung und zugleich einen geringeren Kraftaufwand, um die Struktur zu brechen. Wird ein Material durch Schwingungen angeregt, wird auch hier

<sup>85</sup> DIETEMANN 2007, Skript zum internen Gebrauch.

Energie auf die Moleküle übertragen. Bei der Dämpfung wird die anschließend „fehlende“ Energie sogar in Wärme (= Molekülbewegung) umgewandelt und zum Teil wieder abgegeben. Ob Erschütterungen ähnlich wie Klimaschwankungen tatsächlich zur Versprödung von Materialien führen, ist nicht geklärt, aber vorstellbar. Die Stärke dieses Effektes lässt sich für keine der Ursachen benennen.

### Kippen und Wandern von Gegenständen

Um ein Objekt Umfallen zu lassen bedarf es einer seitwärts gerichteten Bewegung mit deren Hilfe der Gegenstand über den Eckpunkt und den spezifischen Winkel  $\theta$  hinaus gekippt wird. Wie leicht oder schwer dies zu bewerkstelligen ist, liegt an den Abmessungen des Gegenstandes, seinem Gewicht und der Lage des Schwerpunktes. In Näherung gilt, je größer das Verhältnis von Höhe zu Breite oder Tiefe<sup>86</sup> und je höher der Schwerpunkt liegt, desto kleinere Auslenkungen (Winkel  $\theta$ ) sind nötig, um einen Körper umzustoßen. Versetzen Erschütterungen den Untergrund (Fußboden, Tischplatte usw.) eines Gegenstandes in Schwingung, passieren mehrere Dinge gleichzeitig. Zwar werden Schwingungen stellvertretend in den drei Raumrichtungen x, y und z gemessen, jedoch treten sie in jede beliebige Raumrichtung auf. Sie weisen dabei allerdings je nach Quelle und Ausbreitungsweg verschiedene Frequenzen und Schwinggeschwindigkeiten, d. h. Intensitäten auf. Da eine seitwärts gerichtete Kraft nötig ist, um den Kippvorgang auszulösen, kommt den horizontalen Schwingungen y und z erhöhte Bedeutung zu. Doch auch die senkrechte Komponente x muss Berücksichtigung finden. Diese senkrechte Schwingung beschleunigt den Gegenstand nach oben und wirkt dabei der Erdbeschleunigung entgegen, will sagen, reduziert für den Augenblick das Gewicht des Körpers. Ab einer Beschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$  wird die Erdanziehung überwunden und beispielsweise eine Vase hüpfte auf dem Regalboden. Je größer also die Schwingkomponente x, desto leichter kippt ein Körper, bzw. desto kleiner kann die horizontale Krafteinwirkung sein, die zu einem Kippen führt. Ausschlaggebend sind aber nach wie vor die horizontalen Einträge für die Bewertung der Kippgefahr.<sup>87</sup>

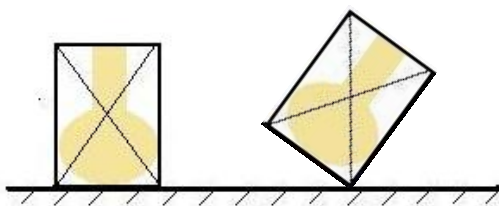


Abbildung 22 Auslenkung einer Kiste hin zum Kippunkt

Wandern von Gegenständen beobachtet man in den Fällen, in denen die Intensität einer Erschütterung für ein Umkippen nicht ausreicht, aber die Haftung am Untergrund überwunden wird. Der Krafteintrag reicht somit aus, das Objekt zu verschieben. Jeder kennt

<sup>86</sup> Der kleinere der beiden Werte sollte in die Rechnung einfließen.

<sup>87</sup> WILSON 1987.

den Anblick eines Regentropfens, der auf eine Wasserpfütze fällt. Dabei entstehen ausgehend von der Stelle des Auftreffens konzentrische Kreise oder Wellen, die sich nach außen ausbreiten. So kann man sich auch den ersten Schwingmodus, bei dem es eine Durchbiegung mit der größten Auslenkung im Zentrum gibt, vorstellen. Die Wellenkämme entstehen dadurch, dass die Auslenkungsbewegung sich noch nicht bis zum Rand fortgepflanzt hat, wenn im Zentrum die Auslenkung bereits in die Gegenrichtung beginnt. Stark vereinfacht kann man sich das Wandern von Gegenständen als ein von Wellenkamm zu Wellenkamm bis an den Rand der Stellfläche Getragenwerden denken. Davon können minimale abrasive Schäden verursacht werden. Über den Rand der Stellfläche hinausgetragen erfolgt jedoch unweigerlich ein Sturz, der je nach Fallhöhe und Art des Objektes selten ohne irreversible Verformungen überstanden wird.



Abbildung 23 konzentrische Wellenbewegung  
vergleichbar mit dem 1. Schwingmodus;  
[www.musikschwingungsresonanz.ch](http://www.musikschwingungsresonanz.ch)

Versuche auf Rütteltischen veranlassen THICKETT<sup>88</sup> zur Aussage, dass ein Wandern von Gegenständen nur solche betrifft, die leichter als 0,5 kg sind. Das Material der Regalböden wirkt sich ebenfalls aus. Je glatter die Oberfläche, umso kleinere Schwingbeschleunigungen sind nötig, ein Objekt zum Wandern zu bringen. Bei Plexiglas genügt ein Eintrag von 0,1 g, auf Glasböden zeigt dies keine Wirkung. Lackierte Metallregalböden erlauben bereits bei 0,02 g ein Wandern der leichten Objekte. Ohne eine Angabe der zugehörigen Frequenzen kann die Aussage dieser Untersuchung nur qualitativ erfolgen. Lackierte Metallböden begünstigen das Wandern der darauf gestellten Objekte, gefolgt von Plexiglasuntergründen. Glasböden schneiden von den drei Materialien am Besten ab. Ähnlich verhält es sich mit dem Forschungsbericht von BAROV: Allerdings geht hier aus dem Text hervor, dass mittels Rütteltisch Erdbeben simuliert wurden. Die Hauptfrequenz von Beben liegt bei ca. 6 Hz, womit die gemessenen Schwingbeschleunigungen eingeordnet werden können und auf andere Situationen übertragbar sind. Die bis zu 4 kg schweren Keramikvasen kippten ab einer horizontalen<sup>89</sup> Schwingbeschleunigung von 0,3 g (2,94 mm/s<sup>2</sup> oder 100 mm/s).<sup>90</sup>

---

<sup>88</sup> THICKETT 2002.

<sup>89</sup> Bei Erdbeben die dominante Komponente.

<sup>90</sup> BAROV 1994.



### Maßnahmen

Eine Möglichkeit zur Sicherung leichter Kunstwerke ist das Anbinden mit Monofilamenten, in Form einer transparenten Angelschnur. Bei Belastungen scheuert diese und es kommt zu Materialverlusten. BAROV et al. schlägt dagegen eine Verstärkung der Haftung der Vase durch das Aufbringen kleiner Portionen Kittmasse an die Standfläche der Objekte vor. Die geprüften Wachsmassen hielten Belastungen bis zu 0,8 g bzw.  $7,8 \text{ m/s}^2$  stand. Vor dem Hintergrund, dass ab 0,45 g ( $4,4 \text{ m/s}^2$  oder  $150 \text{ mm/s}$ ) bereits erste Schäden an der Baustruktur auftreten, reichen die so erzielte Standfestigkeit aus ein Wandern der Gegenstände zu unterbinden.

### Setzungen im Baugrund

Ab einer Schwingbeschleunigung von  $3,3 \text{ m/s}^2$  bei 0-48 Hz kommt es vermehrt zu Kornumlagerungen im Erdreich. Dadurch entstehen bzw. verfüllen sich Hohlräume im Untergrund. Daraus resultieren Setzbewegungen, die Folgeschäden teils struktureller Natur an den Gebäuden hervorrufen. Typisch sind diagonale Risse an Schwachstellen wie die Ecken von Fenster- und Türleibungen.

Eine eher seltene aber dennoch verheerende Folge von Bodenschwingungen ist die Bodenverflüssigung. *„Bei wassergesättigtem locker gelagertem (kohäsionslosem) Sand wird bei zyklisch wiederholter dynamischer Beanspruchung unter Wirkung der Vertikalspannung das Korngerüst sukzessive in eine dichtere Lagerung gebracht, weshalb sich das Volumen verkleinern möchte. Da aber das Porenwasser nicht entweichen kann, ergibt sich keine Volumenabnahme, sondern eine Erhöhung des Porenwasserdrucks. Während der Porenwasserdruck stetig zunimmt, sinkt die Scherfestigkeit. Sobald der Porenwasserdruck den Überlagerungsdruck erreicht, ergibt sich Bodenverflüssigung und die Scherfestigkeit fällt auf null.“*<sup>91</sup> Dieser Effekt ist vergleichbar mit Treibsand. Der Boden unter dem Gebäudefundament gibt schlagartig nach. Erschütterungsbedingte Bodenverflüssigung ist bei „optimalen“ Bedingungen bereits ab Schwingbeschleunigungen von  $1\text{-}2 \text{ m/s}^2$  möglich. Ausschlaggebend für die Bodenverflüssigung, den schlimmsten anzunehmenden Fall, ist die Bodenbeschaffenheit. Mit Hilfe der Sieblinie können relevante Aussagen getroffen werden. Im Fallbeispiel eines betroffenen Bauernhofes zeigt sich, dass 85% der Bodenbestandteile mit ihrer Korngröße im Korridor einer wahrscheinlichen Bodenverflüssigung liegen. 65% davon sogar im inneren Bereich

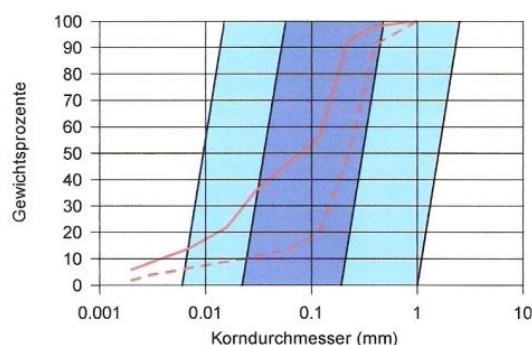


Abbildung 24 Charakteristische Sieblinie und bodenverflüssigungsgefährdete Bereiche des Fallbeispiels, STEINHAUSER 2005

<sup>91</sup> STEINHAUSER O. A.

## Der Schadensnachweis

Jeder, der mit seinem Fahrzeug einmal auf einer Straße mit schadhaftem Straßenbelag gefahren oder dessen Gläser im Schrank wegen eines Düsenjets beim Übungsflug bedrohlich zu klirren begonnen haben, hat in diesem Moment wohl unwillkürlich die Stirn gerunzelt. Was das Gefühl betrifft, scheint uns also klar zu sein, dass Erschütterungen für fragile Dinge eine Gefahr darstellen, ihnen zumindest nicht gut tun. Immer wiederkehrende Belastungen müssen zwangsläufig zu einer Schwächung führen. Den wissenschaftlichen Beweis zu führen, dass Erschütterungen, wie sie im Verlauf des „Lebens“ eines Kunst- oder Bauwerkes auf dieses einwirken, Schäden verursachen bzw. verschlimmern ist dagegen eine heikle Angelegenheit.

STOLOW mutmaßt 1979, Stöße und Erschütterungen würden bei bereits bestehenden Spannungen und entsprechender Vorschädigung das Zünglein an der Waage darstellen.<sup>92</sup> SCHROEDER und HAMM beschreiben 1975 nach dem Transport von Dummys aus Kreidegrund mit Pastell-Malschicht auf Karton, Schollenbildung und Verluste nach einem Transportvorgang per LKW.<sup>93</sup> MECKLENBURG folgert 1991 aus seinen Versuchen mit Gemäledummys (610 x 610 mm), die er bei 1,7 Hz mit bis zu 30 g (294 mm/s<sup>2</sup>) belastet und bei denen keine Risse auftauchen, dass Transporterschütterungen zu keinen direkten Schäden führen.<sup>94</sup> Wer behält nun Recht? Momentan keiner und alle, denn alle Theorien und Aussagen weisen Schwachstellen<sup>95</sup> auf, die eine Übertragung der Ergebnisse auf die Realität nicht zulassen. Wie MECKLENBURG richtig konstatiert: *„Die Erschütterungsforschung ist nie an dem Punkt angelangt, der eine klare Beschreibung der Effekte dieser Anregung auf kulturelle Objekte erlaubt.“*<sup>96</sup>

Im Rahmen des VASARI Projects '89 – '92 wurde eine hochauflösende Digitalkamera (10 pix/mm) samt problemorientierter Software entwickelt. Spezielle Halterungen für Kamera und Gemälde bilden ein Bezugssystem das reproduzierbare und vergleichbare Abbildungen liefert. Mit Hilfe der so gewonnenen Aufnahmen<sup>97</sup> können im Vergleich von Vorher/Nachher Veränderungen an der Oberfläche sichtbar gemacht werden. Mikrorisse von 0,1 mm, mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar, und Deformationen werden von der Software farblich markiert und als veränderter Bereich ausgegeben. Bei 100 – 200 Jahre alten Bildern, die entsprechend der hohen Standards für Kunsttransporte in Klimakisten verschickt wurden, traten im Einzelfall bis zu 70 Veränderungen auf. Besonders betroffen waren hierbei die Ecken der Gemälde.<sup>98</sup> Der Vorteil realistischer Transportbedingungen, weil nicht simuliert, stellt auf der anderen Seite einen Nachteil im Hinblick auf den Nachweis von Schäden durch Erschütterungseinträge dar. Man kann den Zeitpunkt der

---

<sup>92</sup> STOLOW 1979.

<sup>93</sup> SCHROEDER 1975

<sup>94</sup> MECKLENBURG 1990.

<sup>95</sup> Beispielsweise ist der Versuchsaufbau nicht hinreichend beschrieben, andere Faktoren, wie etwa Klimaschwankungen sind nicht ausgeschlossen oder die angefertigten Dummys verhalten sich nicht wie gealterte Kunstwerke usw.

<sup>96</sup> MECKLENBURG 1990.

<sup>97</sup> Doerner Institut, München.

<sup>98</sup> BURMESTER und MÜLLER 1992.

Schädigung genauso wenig benennen, wie die weiteren schädigenden Faktoren auf die man keinen Einfluss hat. Allerdings sollten Spannungen ausgelöst durch Klimaschwankungen dank der puffernden Wirkung der gewählten Transportkisten minimiert werden. Dadurch kann der Erschütterungseintrag als relevante Schadensquelle festgeschrieben werden. **Welcher Anteil den Erschütterungen zukommt, bzw. welche Umstände einen Schaden begünstigen, bleibt weiter unklar. Art der Beförderung, Art der Verpackung, Aufbau des Kunstwerkes, Form des Kunstwerks, verwendete Materialien, Art und Umfang der Vorschädigung, Richtung der Krafteinwirkung, Resonanzverhalten des Kunstwerks sowie des Umfeldes, die Liste scheint schier endlos.**

Während die hochauflösende Kamera Oberflächenveränderungen nachweisbar macht, kann durch gezielte Anregung Degradation in Materialien nachgewiesen werden.<sup>99</sup> Untersuchungen an Holzleisten zeigen bei gezielter Schädigung ein Absinken der Eigenfrequenz<sup>100</sup> um 5 %. Leider beträgt der Unterschied der anfänglich gemessenen Eigenfrequenz teils 23 % von einer Leiste zur anderen. Damit sind Aussagen über den Grad des Abbaus von Holzsubstanz nur im Falle dokumentierter Werte des Vorzustandes zulässig. Ähnliche Versuche fanden an Holzböden auf Holzbalkendecken statt. Die Eigenfrequenz eines derartigen Bauteils liegt zwischen 9 und 22 Hz. Da die Eigenfrequenz von der Biegesteifigkeit, der Masse und Spannweite der Böden sowie den Anschlusslösungen abhängt, wurden gleichartige Szenarien geschaffen. Dabei stellte sich heraus, dass die stark abgebauten Böden mit schadhafter Balkenlage Eigenfrequenzen um die 10 Hz also im niedrigen Bereich aufwiesen, die unbeschädigten Böden lagen bei etwa 13 – 22 Hz.<sup>101</sup> Auch hier scheint eine verallgemeinernde Ausweitung der Ergebnisse auf reale Objekte schwierig. Nicht jeder Deckenaufbau ist schadhaft, nur weil er eine niedrige Eigenfrequenz besitzt. Dafür geben die Autoren der Texte selber zu viele Faktoren an, die die Eigenfrequenz beeinflussen, wie etwa die Dielenlängen und Spannweiten, Art und Wachstum der verwandten Hölzer, die Konstruktion der Böden und vieles mehr.

In der Kombination der genannten Untersuchungsverfahren und in Verbindung mit dem Aufspüren oberflächlicher Veränderungen sowie dem Detektieren von Änderungen in der Eigenfrequenz, die sich, wie aus den Versuchen zu entnehmen, auch für homogene oder mehrschichtige Strukturen eignet, sollten sich sowohl qualitative als auch quantitative Nachweisverfahren zur schädigenden Wirkung von Erschütterungen entwickeln lassen. Sinnvoll erscheint es vor allem, die Untersuchungen nach und nach vom Kleinen zum Großen; vom einfachen zum komplexen Aufbau zu steigern.

---

<sup>99</sup> HU 2006.

<sup>100</sup> Fichtenleisten 1200 x 25 x 51 mm; in gesundem Zustand liegt die Eigenfrequenz der Testkörper bei 113 – 147 Hz, bzw. 304 – 363 Hz bei der 2. Harmonischen Schwingung.

<sup>101</sup> Ross et al. 2001.

## Zusammenfassung

Zu Anfang der Arbeit stand die Frage im Raum, ob Kunstwerke, Ausstattungsstücke und historische Bauten tatsächlich in erschütterndem Maße Stößen und Schwingungen ausgesetzt sind. Resümierend muss gesagt werden, dass dem so ist! Wenn auch nicht vordergründig durch die Erschütterungsquellen, die einem im Vorfeld als bedrohlich erschienen sind, wie dem zusammenfassenden Diagramm 10 auf Seite 105 zu entnehmen ist. Hier wurden die Ergebnisse der gesamten Versuchsreihen zusammengeführt und konnten erstmals in der relativ jungen Geschichte des Kulturgüterschutzes, in Bezug auf Schwingungsbelastungen, hilfreich visualisiert werden. Hinzu kommt eine wesentliche Vereinfachung, da das Umwandeln von Bezugsgrößen (Auslenkung, Schwinggeschwindigkeit, Schwingbeschleunigung und Frequenz) nunmehr keine komplexen Rechenoperationen bedarf, sondern die Werte schlicht abgelesen werden können. So bildet das Diagramm die perfekte Diskussionsgrundlage bei Schwingungsproblematiken und erleichtert das gegenseitige Verständnis der beteiligten Disziplinen (Techniker, Ingenieure, Architekten, Restauratoren, Historiker usw.).

Letzten Endes erreichten die Belastung durch den Verkehr, ob nun zu Straße oder Schiene, bei keiner der zahlreichen Messungen nach heutigem Wissensstand bedenkliche Werte. Zwar stimmen die Anregungsfrequenzen durch den Straßenverkehr genau mit den Eigenfrequenzen der Geschosdecken überein, die nachweislich erreichten Spitzenschwinggeschwindigkeiten von 0,3 mm/s, sprechen allerdings unter „normalen“ Bedingungen für geringe Erschütterungseinträge. Ja selbst Sprengungen belasten die Güter, die wir zu schützen trachten, durch die teils großen Distanzen, in der sie stattfinden, ebenfalls nur in Einzelfällen in gefährlichem Maße. Die Einschätzung von Baustellen ist weit komplexer zu erachten. Das unberechenbare an Baustellen ist, dass sie sich bewegen und dabei verschiedenste Gesteinsschichten oder Bauteile anregen können. Darüber hinaus kommen unterschiedlichste Baumaschinen mit einer großen Bandbreite an möglichen Intensitäten und Anregungsfrequenzen zum Einsatz. Dies erklärt auch die im Diagramm unter Bauarbeiten am Beispiel Bohrhämmer angetragene Spanne von 0,1 – 20 mm/s, wobei der vorliegende Maximalwert<sup>102</sup> der Literatur entnommen ist. Wollte man Bauarbeiten per se visualisieren, entspräche dies im allgemeinen Fall einer nicht näher zu begrenzenden Fläche im Erschütterungsdiagramm. Im Gegensatz zum Straßenverkehr kann im Fall der Bauarbeiten allerdings der Nachteil, der aus der scheinbaren Unbestimmtheit der resultierenden Erschütterungsemissionen erwächst durch die Möglichkeit eines Eingreifen bezüglich der Anregungsfrequenzen mehr als nur wett gemacht werden. Neben den Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Fabrikate von Baumaschinen, können auch Verfahren ausgetauscht werden, wie etwa Schlagende in Schneidende. Die zahlreichen Ansatzmöglichkeiten erlauben eine Verringerung der Erschütterungseinträge bereits im Vorfeld von Bauarbeiten und das Gefahrenpotential für Kunstwerk und Bausubstanz während den Maßnahmen zu minimieren.

---

<sup>102</sup> THICKETT 2002. Wegen der fehlenden Frequenzangabe und der großen Messtoleranz der Messfühler ist der Wert kritisch zu betrachten!

Klammert man die in einem Atemzug mit Erschütterungen gern als „Worst Case Scenario“ genannten Erdbeben aus, die deckungsgleich mit der Anregungsfrequenz von 8 Hz genau im Resonanzbereich von Geschossdecken liegen sicherlich das Potential für extreme Schäden in sich tragen, bleiben zwei Personengruppen, die den Hauptanteil an den Erschütterungseinträgen verursachen. Zum einen ist dies der Besucher historischer Gebäude und musealer Ausstellungen: Durch das Umhergehen in Räumen und das Stoßen gegen Vitrinen und Sockel werden regelmäßig Erschütterungen über den aus der DIN 4150-3 adaptierten Richtwerten eingebracht. Bei der elastisch gelagerten Holzbalkenkonstruktion von historischen Gebäuden konnten bei einer Hauptfrequenz von 10 Hz sogar Schwinggeschwindigkeiten über 10 mm/s gemessen werden. Diese Maximalwerte lassen sich mit den Einträgen der im Saarland auftretenden Erdbeben vergleichen und selbst die gemessenen Minimalwerte hinsichtlich des Besucheraufkommens in Ausstellungen und Museen spiegeln in etwa die Höchstwerte des Eintrages durch die beschriebenen Verkehrsarten wieder.

Schwingungen, die ab einer Schwinggeschwindigkeit von 20 mm/s bei 22 Hz ausnahmslos weit über den Grenzwerten liegen, werden durch die Transporte von Kunstgegenständen verursacht. Dabei werden die Kunstwerke bei Bewegungen innerhalb des Hauses im Gegensatz zu den Außerhaustransporten für gewöhnlich nicht verpackt. Ein direkter Vergleich des Schadenspotentials beider Transportvorgänge ist leider wegen den mangelnden Frequenzangaben in der bisherigen Fachliteratur zum Thema Kunsttransporte nicht möglich. Dass die Betrachter sowie die Verantwortlichen für Denkmäler und Kunstwerke in ihrem Bestreben die Kunstwerke zugänglich zu machen und zu erhalten zugleich ihre größte Gefahr darstellen, ist betrachtet man die Historie des Denkmalschutzes und der Restaurierungsgeschichte keine Neuigkeit: Dies sollte uns aber nicht davon abhalten erworbenes Wissen zur Verbesserung der Lage einzusetzen.



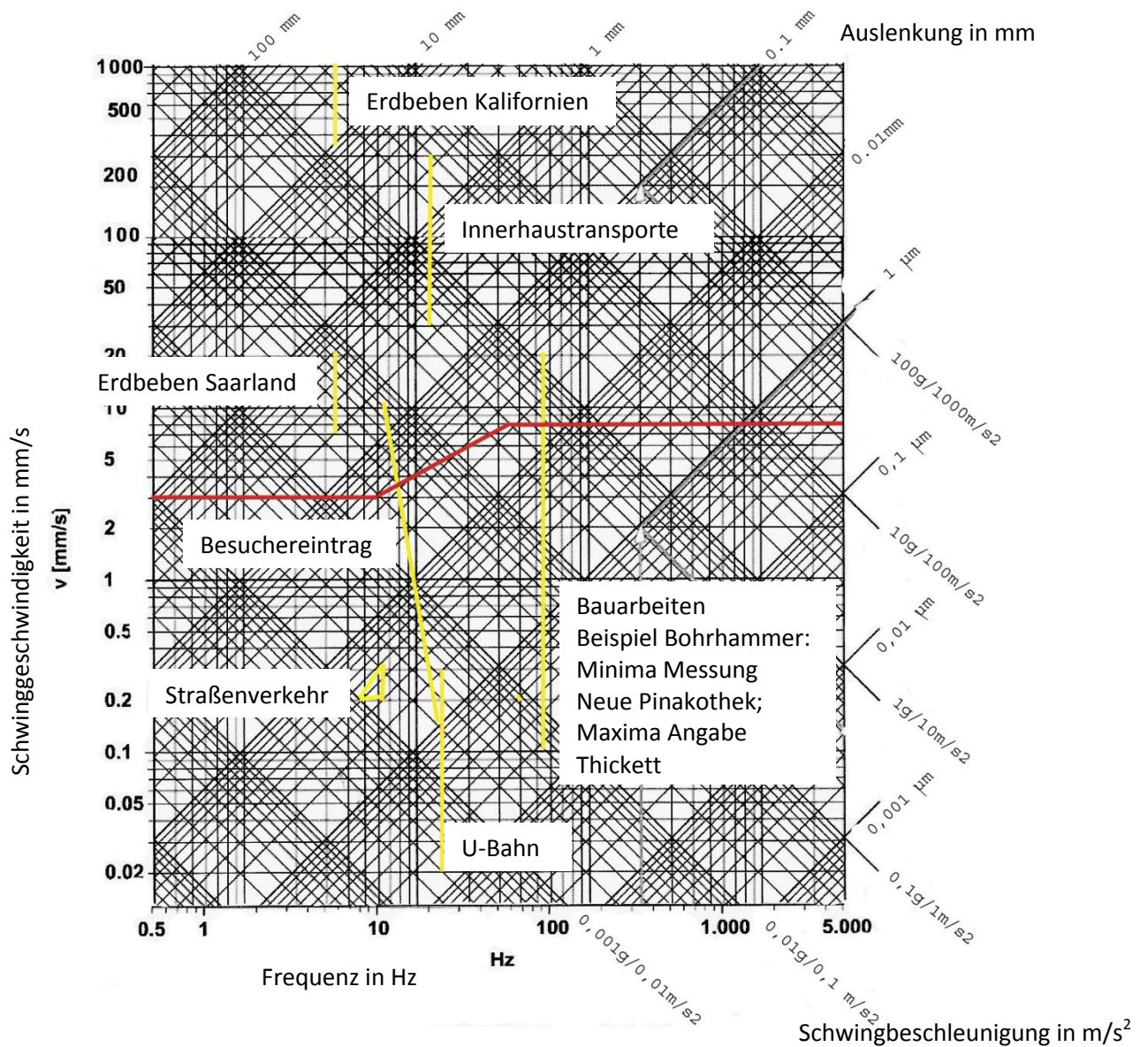


Diagramm 10 Graphische Zusammenfassung der Meßergebnisse und Werten aus der Literatur;  
Modifiziertes Diagramm nach Hofmann

## Ausblick

Obwohl die Forschung auf dem Gebiet der Erschütterungen, vor allem was das Verständnis von Zusammenhängen, Tendenzen und deren wissenschaftlicher Verifizierung, noch weite Wege beschreiten muss. Sprengt, dass was es darüber zu sagen gäbe, bereits diese Arbeit. Doch erst, wenn das existente Problem der Erschütterungsbelastungen im Museumsalltag wahrgenommen wird und die Verantwortlichen im Umgang mit Kunstwerken und Denkmälern auch in diese Richtung sensibilisiert werden, kann eine Reaktion erfolgen. Diese sollte zum Einen in der Erforschung der Hintergründe, Tendenzen und Mechanismen vor allem für gealterte Materialien erfolgen. Zum Anderen sollten in der musealen Praxis, die in der Arbeit rudimentär anhand der Messdaten andiskutierten Realitäten entsprechend, gehandelt werden.

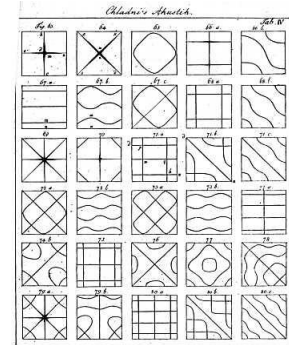


## Glossar

**Accelerometer** Messfühler der empfindlich den bei Bewegungen enthaltenen Beschleunigungsvorgang reagiert und diesen misst.

### Chladnische Klangfiguren

Visualisierung der Schwingungsmodi an Membranen und Platten. Dabei wird Sand auf die Probestfläche gestreut und diese in Schwingung versetzt. An den Knotenpunkten, an denen es keine Amplitudenänderung gibt, sammelt sich der Sand. Es entstehen verschiedene Bilder.



**Fernfeld** im entfernten Gelände

**Freifeld** Geländefläche ohne Bebauung, die die Ausbreitungen von Erschütterungen beeinflusst.

### Geometrischen Quellentypen

Punktquellen (Schlagloch) und Linienquellen (Straßenverkehr); Mit zunehmenden Abstand wird aus jeder Linienquelle eine Punktquelle.

**Körperschall** Befindet sich eine Schallwelle in einer anderen Materie als Luft wird diese Körperschall genannt. Erschütterungen sind demnach die spürbaren Auswirkungen von Körperschall

**Luftschall** Die Ausbreitung von Geräuschen mittels Druckwellen in der Luft

**Nahfeld** Umgebung der Emissionsquelle

**Raumwellen** Kompressionswellen Wechslen von Druck und Unterdruckzonen

**Rayleighwelle** Oberflächenwelle mit Wellentälern und Wellenbergen

**Trittschall** Der als Luftschall abgestrahlte Anteil der Anregung eines Fußbodens durch dessen Benutzung

### Zeitliche Quellentypen

Harmonisch/stationär und impulsförmig

## Anhang

### Durchgeführte Messungen

Zur besseren Übersicht sind hier die Einzelmessungen noch einmal unter den Museen in denen sie durchgeführt wurden, zusammengefasst. In der vorliegenden Arbeit sind die Messungen und ihre Ergebnisse der jeweiligen Fragestellung zugeordnet. Die Meßprotokolle und Datenblätter mit der Auswertung der jeweiligen Messung sind unter den im Folgenden aufgelisteten Nummern im digitalen Anhang zu finden.

### Bayerisches Nationalmuseum

Am 29.12.2009

Messung 1:	11-04-57 #1	Halle Hintergrund
	11-04-57 #2	Halle Frequenzanalyse
	11-04-57 #3	Halle Besuchereintrag
Messung 2:	11-26-36 #1	Saal 103/104 Besuchereintrag
	11-26-36 #2	Saal 103/104 Türen betätigen, Aufzugruf
	11-26-36 #3	Saal 103/104 Frequenzanalyse
Messung 3:	11-47-34 #1	Saal 134 Vitrine Besuchereintrag
	11-47-34 #2	Saal 134 Vitrine Hintergrund
	11-47-34 #3	Saal 134 Vitrine Frequenzanalyse
Messung 4:	12-05-10 #1	Saal 134 Besuchereintrag
	12-05-10 #2	Saal 134 Frequenzanalyse
Messung 5:	12-23-20 #1	Saal 1 Hintergrund
	12-23-20 #2	Saal 1 Besuchereintrag
	12-23-20 #3	Saal 1 Frequenz
Messung 6:	12-50-27 #1	Saal 22 Hintergrund
	12-50-27 #2	Saal 22 Besuchereintrag
	12-50-27 #3	Saal 22 Frequenzanalyse
Messung 7:	13-15-36 #1	Saal 24 Besuchereintrag
	13-15-36 #2	Saal 24 Hintergrund
	13-15-36 #3	Saal 24 Frequenzanalyse
Messung 8:	13-47-36 #1	Saal 85 Besuchereintrag
	13-47-36 #2	Saal 85 Besuchereintrag
	13-47-36 #3	Saal 85 Frequenzanalyse
Messung 9:	14-12-36 #1	Saal 51 Besuchereintrag
	14-12-36 #2	Saal 51 Hintergrund
	14-12-36 #3	Saal 51 Frequenzanalyse
Messung 10:	15-10-58 #1	Treppenhaus 1.OG Transport Wagen A
Messung 11:	15-14-03 #1	Vorraum Saal 103 Transport Wagen A
Messung 12:	15-18-31 #1	Personenlift Transport Wagen A
Messung 13:	15-21-08 #1	Saal 22 Transport Wagen A

Messung 14:	15-24-49 #1	Saal 21 Transport Wagen A
Messung 15:	15-28-02 #1	Saal 21/22 Treppe Tragen
Am 11.02.2010		
Messung 1:	10-13-48 #1	Saal 85 Vitrine Besuchereintrag
	10-13-48 #2	Saal 85 Vitrine Frequenzanalyse
	10-13-48 #3	Saal 85 Vitrine Türchen öffnen
Messung 2:	10-56-16 #1	Bunkeranlage Steindepot Hintergrund
Messung 3:	11-03-53 #1	Bunkeranlage Frequenzanalyse
Messung 4:	11-13-36 #1	Bunkeranlage Wand Hintergrund
	11-13-36 #2	Bunkeranlage Wand Frequenzanalyse

### Sammlung Bollert

Am 11.02.2010		
Messung 1:	12-03-18 #1	Depot Neue Sammlung Besuchereintrag
	12-03-18 #2	Depot Neue Sammlung Frequenzanalyse
	12-03-18 #3	Depot Neue Sammlung Regalsystem Hintergrund
	12-03-18 #4	Depot Neue Sammlung Regalsystem Frequenzanalyse
Messung 2:	12-19-56 #1	Depot Neue Sammlung Wand Verkehr
	12-19-56 #2	Depot Neue Sammlung Wand Frequenzanalyse
Messung 3:	12-52-43 #1	Raum 1 Hintergrund
Messung 4:	12-57-22 #1	Raum 1 Frequenzanalyse
	12-57-22 #2	Raum 1 Geräuschkulisse Fernsehapparat
Messung 5:	13-06-59 #1	Raum 2 Besuchereintrag
	13-06-59 #2	Raum 2 Besuchereintrag
Messung 6:	13-17-49 #1	Raum 2 Sockel Hintergrund
	13-17-49 #2	Raum 2 Sockel Besuchereintrag
	13-17-49 #3	Raum 2 Sockel Frequenzanalyse
Messung 7:	13-38-15 #1	Raum 3 Besuchereintrag
	13-38-15 #2	Raum 3 Frequenzanalyse
Messung 8:	13-52-49 #1	Raum 3 Vitrine Besuchereintrag
Messung 9:	13-56-50 #1	Raum 3 Vitrine Frequenzanalyse
	13-56-50 #2	Raum 3 Vitrine Frequenzanalyse

**Kunstbau**

Am 07.12.2009

Messung 1:	12-33-50 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 1 U-Bahn Hauptbahnhof-Feldmoching
Messung 2:	12-38-12 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 1 U-Bahn Feldmoching-Hauptbahnhof
Messung 3:	12-44-47 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 1 U-Bahn Hauptbahnhof-Feldmoching
Messung 4:	12-48-09 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 1 U-Bahn Feldmoching-Hauptbahnhof
Messung 5:	12-53-09 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 U-Bahn Hauptbahnhof-Feldmoching
Messung 6:	12-58-01 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 U-Bahn Feldmoching-Hauptbahnhof
Messung 7:	13-00-34 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 U-Bahn Feldmoching-Hauptbahnhof
Messung 8:	13-06-02 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 U-Bahn Hauptbahnhof-Feldmoching
Messung 9:	13-13-07 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 Rampe
Messung 10:	13-14-43 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 2 U-Bahn Hauptbahnhof-Feldmoching
Messung 11:	13-44-16 #1	Ausstellungsraum Pfeiler mittig U-Bahn
Messung 12:	13-48-37 #1	Ausstellungsraum Pfeiler mittig U-Bahn
Messung 13:	13-59-12 #1	Ausstellungsraum Pfeiler mittig U-Bahn
Messung 14:	14-26-08 #1	Ausstellungsraum Wand 1 U-Bahn
	14-26-08 #2	Ausstellungsraum Wand 1 U-Bahn
	14-26-08 #3	Ausstellungsraum Wand 1 Hintergrund
Messung 15:	14-50-47 #1	Ausstellungsraum Transport Wagen A
Messung 16:	15-09-29 #1	Ausstellungsraum Meißaufbau 3 U-Bahn, Musikinstallation
	15-09-29 #2	Ausstellungsraum Meißaufbau 3 U-Bahn, Musikinstallation
	15-09-29 #3	Ausstellungsraum Meißaufbau 3 Besuchereintrag, Musikinstallation
Messung 17:	15-27-38 #1	Ausstellungsraum Pfeiler randständig U-Bahn
	15-27-38 #2	Ausstellungsraum Pfeiler randständig U-Bahn
	15-27-38 #3	Ausstellungsraum Pfeiler randständig U-Bahn
Messung 18:	15-49-53 #1	Ausstellungsraum Wand 2 Hintergrund
	15-49-53 #2	Ausstellungsraum Wand 2 U-Bahn
	15-49-53 #3	Ausstellungsraum Wand 2 U-Bahn

**Neue Pinakothek**

Am 20.01.2010

Messung 1:	10-19-15 #1	Halle Besuchereintrag
	10-19-15 #2	Halle Frequenzanalyse
Messung 2:	10-45-02 #1	Saal 1 Sockel Besuchereintrag
	10-45-02 #2	Saal 1 Sockel Frequenzanalyse
	10-45-02 #3	Saal 1 Sockel Frequenzanalyse
Messung 3:	10-57-35 #1	Saal 1 Besuchereintrag
Messung 4:	11-03-28 #1	Saal 1 Besuchereintrag
	11-03-28 #2	Saal 1 Frequenzanalyse
	11-03-28 #3	Saal 1 Frequenzanalyse
Messung 5:	11-24-49 #1	Saal 6 Besuchereintrag
	11-24-49 #2	Saal 6 Frequenzanalyse
	11-24-49 #3	Saal 6 Frequenzanalyse Anregbarkeit
Messung 6:	11-43-15 #1	Saal 16 Besuchereintrag, Bohrhammer
	11-43-15 #2	Saal 16 Bohrhammer, Hintergrund
	11-43-15 #3	Saal 16 Frequenzanalyse
	11-43-15 #5	Saal 16 Frequenzanalyse
Messung 7:	11-59-32 #1	Saal 16 Anbau Bohrhammer, Trambahn
	11-59-32 #2	Saal 16 Anbau Verkehr Frequenzanalyse
Messung 8:	12-47-10 #1	Koje 103 Besuchereintrag
	12-47-10 #2	Koje 103 Frequenzanalyse
Messung 9:	12-54-59 #1	Koje 103 Gitterwand ziehen
Messung 10:	12-57-44 #1	Koje 104 Besuchereintrag
	12-57-44 #2	Koje 104 Frequenzanalyse, Bilderwand ziehen
	12-57-44 #3	Koje 104 Podest Frequenzanalyse
Messung 11:	13-17-57 #1	Koje 103 Wand Besuchereintrag
	13-17-57 #2	Koje 103 Wand Frequenzanalyse
Messung 12:	15-02-10 #1	Depot Transport Wagen B
	15-02-10 #2	Lastenaufzug Transport Wagen B
	15-02-10 #3	Personalgang Transport Wagen B
	15-02-10 #4	Ausstellungsräume Transport Wagen B
	15-02-10 #5	Aufgänge Rampen runter Transport Wagen B
	15-02-10 #6	Aufgänge Rampen rauf Transport Wagen B
	15-02-10 #7	Gesamtstrecke zurück Transport Wage B
Messung 13:	15-28-16 #1	Depot Transport Wagen C
	15-28-16 #2	Lastenaufzug Transport Wagen C
	15-28-16 #3	Personalgang Transport Wagen C
	15-28-16 #4	Ausstellungsräume Transport Wagen C
	15-28-16 #5	Aufgänge Rampen runter Transport Wagen C
	15-28-16 #6	Aufgänge Rampen rauf Transport Wagen C
	15-28-16 #7	Gesamtstrecke zurück Transport Wagen C

Messung 14:	15-49-09 #1	Depot Transport Wagen A
	15-49-09 #2	Lastenaufzug Transport Wagen A
	15-49-09 #3	Personalgang Transport Wagen A
	15-49-09 #4	Ausstellungsräume Transport Wagen A
	15-49-09 #5	Aufgänge Rampen rauf Transport Wagen A
	15-49-09 #6	Gesamtstrecke zurück Transport Wagen A

## Nymphenburg

Am 20.01.2010

Messung 1:	10-49-07 #1	Hubertussaal Besuchereintrag
	10-49-07 #2	Hubertussaal Frequenzanalyse
	10-49-07 #3	Hubertussaal Besuchereintrag, Stühle rücken
	10-49-07 #4	Hubertussaal Transport Wagen D
	10-49-07 #5	Hubertussaal Transport Wagen D + Zulast
Messung 2:	11-17-11 #1	Hubertussaal Holzbekleidung Fensternische Besuchereintrag
	11-17-11 #2	Hubertussaal Verkleidung Frequenzanalyse
	11-17-11 #3	Hubertussaal Transport Wagen D + Zulast
Messung 3:	11-40-36 #1	Vorraum Hubertussaal Besuchereintrag
	11-40-36 #2	Vorraum Hubertussaal Transport Wagen D
	11-40-36 #3	Vorraum Hubertussaal Frequenzanalyse
Messung 4:	12-36-45 #1	Dachgeschoss über Hubertussaal Hintergrund
	12-36-45 #2	Dachgeschoss über Hubertussaal Transport Wagen D
	12-36-45 #3	Dachgeschoss über Hubertussaal Besuchereintrag
	12-36-45 #4	Dachgeschoss über Hubertussaal Winddruck
	12-36-45 #5	Dachgeschoss über Hubertussaal Frequenzanalyse
Messung 5:	14-15-53 #1	Hauptschloss Empore Besuchereintrag
	14-15-53 #2	Hauptschloss Empore Frequenzanalyse
	14-15-53 #3	Hauptschloss Empore Transport Wagen A
Messung 6:	14-32-49 #1	Hauptschloss Steinerner Saal Transport Wagen A
Messung 7:	14-35-18 #1	Hauptschloss Schönheitenkabinett Transport Wagen A
Messung 8:	14-37-51 #1	Hauptschloss Verbindungsgang Steinerner Saal/ Schönheitenkabinett Transport Wagen A
Messung 9:	14-43-03 #1	Hauptschloss Schönheitenkabinett Besuchereintrag
	14-43-03 #2	Hauptschloss Schönheitenkabinett Besuchereintrag
	14-43-03 #3	Hauptschloss Schönheitenkabinett Frequenzanalyse
Messung 10:	14-52-24 #1	Hauptschloss Verbindungsgang Steinerner Saal/ Schönheitenkabinett Besuchereintrag
	14-52-24 #2	Hauptschloss Verbindungsgang Steinerner Saal/ Schönheitenkabinett Frequenzanalyse



Messung 11:	15-14-20 #1	Hauptschloss Verbindungsgang Steiner Saal/ Schönheitenkabinett Tisch Besuchereintrag
Messung 12:	15-23-19 #1	Hauptschloss Steiner Saal Standort 1 Besuchereintrag
	15-23-19 #2	Hauptschloss Steiner Saal Standort 1 Frequenzanalyse
Messung 13:	15-31-01 #1	Hauptschloss Steiner Saal Standort 2 Besuchereintrag
	15-31-01 #2	Hauptschloss Steiner Saal Standort 2 Frequenzanalyse

### Formelsammlung

Etliche, der im Anschluss aufgeführten Formeln beinhalten sog. Beiwerte oder Kennzahlen, die empirisch an Ort und Stelle erhoben, bzw. mit Werten aus ähnlichen Situationen ausgedrückt werden. Für den Laien bedeutet dies, dass mit Hilfe der Formel kein konkreter Wert berechnet werden kann. Trotzdem macht die Auflistung der Formeln sind, da daran Tendenzen abgelesen werden können. Bei der folgenden Formel gestaltet sich dies wie folgt: Weder Federsteifigkeit des Untergrundes noch die Masse des Gebäudes sind dem Restaurator im Normalfall bekannt. Aber die Position der Federsteifigkeit im Zähler gibt an, dass mit zunehmender Federsteifigkeit, also „Härte“ des Untergrundes, der Wert unter der Wurzel größer wird, gleichbedeutend mit einer höheren Eigenfrequenz des Gebäudes. Gebäude auf Felsengrund tendieren also zu höheren Eigenfrequenzen als diejenigen auf sandigen Untergründen. Eine höhere Gebäudemasse verkleinert den Wert unter der Wurzel, da die Masse im Nenner steht. Schwerere Bauwerke besitzen also tendenziell niedrigere Eigenfrequenzen.

Eigenfrequenzen von Bauwerken

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_B}{m_B}}$$

$f_B$	Eigenfrequenz Bauwerk
$k_B$	Federsteifigkeit des Untergrundes
$m_B$	Masse Bauwerk

Stockwerksregel – Eigenfrequenzen von senkrechten Bauteilen (horizontale Anregung)

$$f \approx \frac{10}{n} \text{ in Hz}$$

$f$	die Frequenz in Hz
$n$	die Anzahl der Stockwerke

## Schwinggeschwindigkeiten bei Sprengungen

$$v_{max} = k \left( \frac{L}{1 \text{ kg}} \right)^b \left( \frac{R}{1 \text{ m}} \right)^{-m}$$

- $v_{max}$  Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit im Freifeld, in mm/s  
 $L$  Lademenge Sprengstoff, in kg je Zündzeitstufe  
 $R$  Entfernung von der Sprengstelle in mm  
 $k$  Beiwert, in mm/s, empirisch ermittelt  
 $b, m$  Kennzahlen empirisch ermittelt

## Schwinggeschwindigkeiten bei Fallenden Massen

$$v_{max} = k \left( \frac{E}{1 \text{ kJ}} \right)^{0,5} \left( \frac{R}{1 \text{ m}} \right)^{-m}$$

- $v_{max}$  Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit im Freifeld, in mm/s  
 $E$  Fallenergie ( $E = Gh$ )  
 $R$  Entfernung von der Fallstelle in mm  
 $k$  Beiwert, in mm/s, empirisch ermittelt  
 $m$  Kennzahlen empirisch ermittelt

Kippwinkel<sup>103</sup>

$$\tan \theta = a/b$$

- $\theta$  Maximaler Winkel bis zum Kippen in °  
 $a$  Maximale Ausdehnung Höhe  
 $b$  Maximale Ausdehnung Breite oder Tiefe

---

<sup>103</sup> WILSON 1987.

Auslenkung von Teilchen durch Schwingung<sup>104</sup>

$$D = \frac{a}{0,511 f^2}$$

$D$  Maximale Auslenkung Teilchen  
 $a$  Schwingbeschleunigung  
 $f$  Frequenz der Schwingung

Anregungsfrequenz durch Störstellen<sup>105</sup>

$$f_A = v_z/d$$

$v_z$  Geschwindigkeit Fahrzeug  
 $d$  Störstellenabstand

---

<sup>104</sup> GREEN 1987

<sup>105</sup> DIN 4150-3.

Tabelle 5 Zwar handelt es sich bei Trittschall, um den hörbaren, in die Luft abgestrahlten Anteil der durch den Besucher eingebrachten Erschütterungen. Die Dämmtendenzen sind allerdings vergleichbar.<sup>106</sup>

Gehbeläge	Trittschallverbesserungsmaß $\Delta L_w$
Linoleum 2,5 mm	7 dB
Linoleum auf Filzpappe (800 g/m <sup>2</sup> )	14 dB
Linoleum auf 2mm Korkment	15 dB
Linoleum auf 5 mm porösen Hartfaserplatten (380 kg/m <sup>3</sup> )	16 dB
Korklinoleum 3,5 mm	15 dB
Korklinoleum 7 mm	18 dB
Korkparkett 6 mm	15 dB
PVC-Beläge 1,5 – 2 mm	5 dB
PVC-Belag mit 2 mm Korkment	14 dB
PVC-Belag mit 3 mm Filz	15 – 19 dB
Gummibelag 2,5 mm	10 dB
Gummibelag 5 mm, davon 4 mm Porengummi	24 dB
Kokosfaser-Läufer	17 – 22 dB
Teppichböden	24 – 30 dB
Nadelfilzbeläge	17 – 22 dB
Riemenböden auf Lagerhölzern direkt auf Decke	16 dB
Riemenböden auf Lagerhölzern auf Schlackenschüttung 6 cm	21 dB
Riemenböden auf Lagerhölzern auf 1cm dicken Dämmstreifen aus Mineralwolle oder Kokosfasern	24 dB
Parkettbeläge auf 2 cm Kork	6 dB
Parkettbeläge auf 0,7 cm Bitumenfilz	15 dB
Parkettbeläge auf 1 cm Holzfaserplatte	16 dB
Parkettbeläge auf Holzwolle-Leichtbauplatten	17 dB
Parkettbeläge auf Mineralfaserplatten	28 dB
Zementestriche auf Dämmung mit:	
Holzfaserplatten	15 – 26 dB
Holzwolle Leichtbauplatten	16 dB

<sup>106</sup> GÖSELE et al. 1965.

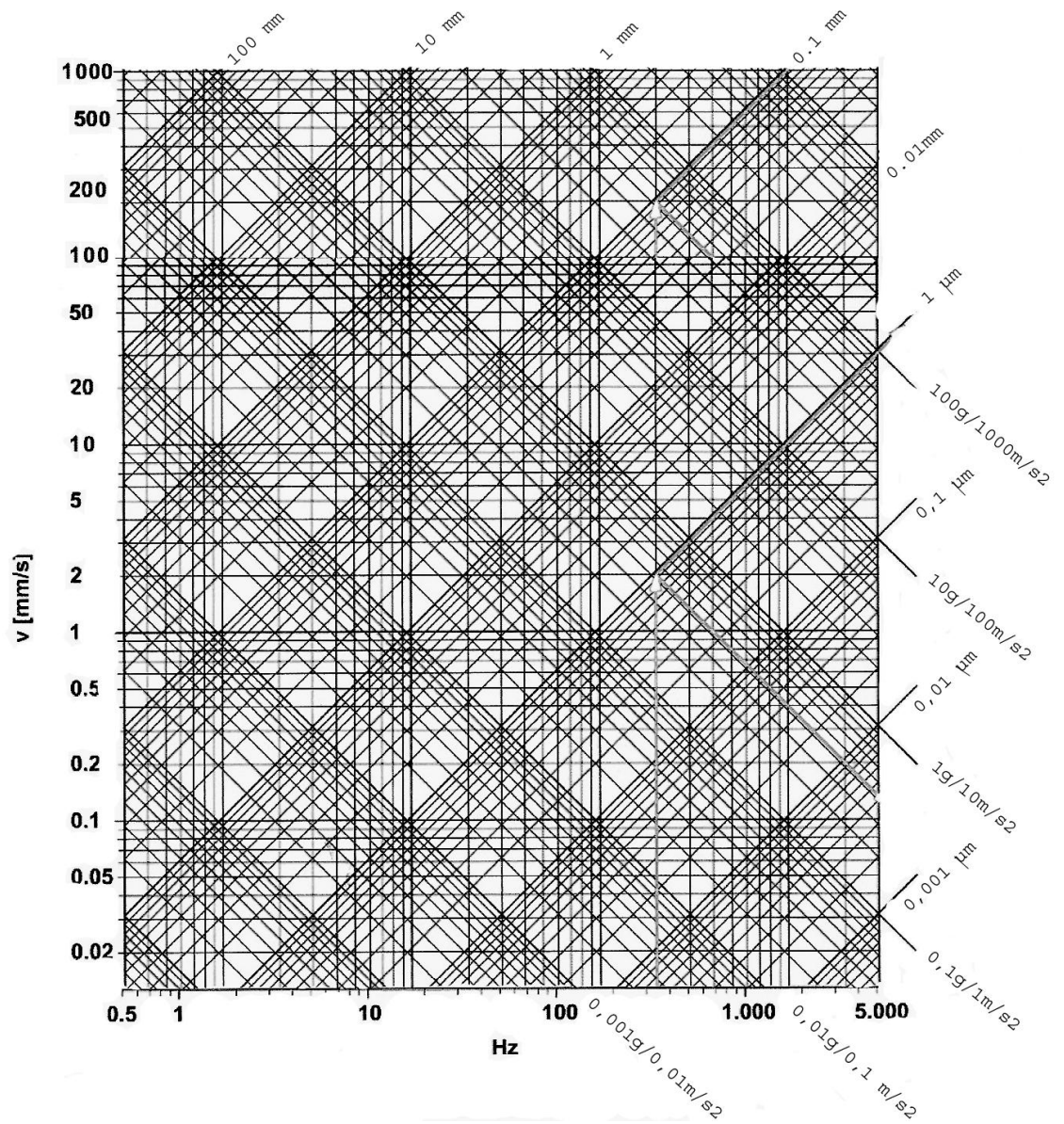


Diagramm 11 Kopiertvorlage Umrechnungstabelle Erschütterungsmeßgrößen;  
Modifiziert nach Diagramm von Hofmann

## Literaturverzeichnis

- ACHERMANN, MARCEL: *Neubauten im Bereich bestehender U-Bahnen*,  
in: Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke TU Dresden,  
*Baustatik – Baupraxis 9: Berichte der Fachtagung am 14. und 15. März 2005  
in Dresden*, Dresden 2005, S. 61 – 70
- ACHMUS, M.; KAISER, J.; TOM WÖRDEN, F.: *Bauwerkerschütterungen durch Tiefbauarbeiten*,  
Institut für Bauforschung e. V. Hannover,  
Internetpublikation: [www. bauforschung de](http://www.bauforschung.de). Stand 12.11.2009
- ALLEN, D. E.; PERNICA D. E.: *Control of Floor Vibration*,  
in: Publikationen des National Research Council Canada,  
Internetpublikation: [www. nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n22.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n22.html)  
Stand 12.11.2009
- ATHANASOPOULOS, G. A.; PELEKIS G. C.: *Ground vibrations from sheeptide drivinig in urban  
environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants*,  
in: *Soil dynamics and Earthquake Engineering 19*, 2000, S. 371 – 387
- BAROV, Z.; FABER, C.; SENNETT, R.: *The developement os an earthquake-safe mounting system  
for a collection of ancient greek vases*,  
in: ASHOK, ROY; SMITH, PERRY (Hrsg.): *IIC-Preventive Conservation Practice,  
Theory an Research Preprints Ottawa Congress 12 – 16. Sept. 1994*,  
Ottawa 1994, S. 233 – 237
- BATA, MIROSLAV: *Historic monuments seriously in threatened by uncontrolled traffic*,  
in: *Památková péce 27*, 1967, S. 38 – 44
- BEGOV, EVE; KUSCHEL, LUTZ: *Kunst auf Reisen – Shock- und Vibrationsmessungen  
bei Kunsttransporten*, in: *Restauro* Bd. 113; 2007, S. 258 – 265
- BUJA, HEINRICH OTTO: *Praxishandbuch Ramm- und Vibrationstechnik*, Berlin 2007
- BURMESTER, ANDREAS; MÜLLER, MANFRED: *The Registration of Transportation Damage  
using Digital Image Processing*,  
in: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung  
Jahrgang 6/1992*, S. 335 – 345.
- CORSARO, ROBERT; SPERLING, L. H.: *Sound and vibration damping with polymers*,  
in: *ACS symposium series 424*, Dallas 1989



- DAXBÖCK, HEINZ: *Erschütterungsschutz beim Transport von Kulturgütern*,  
in: *Denkmalschutz und Denkmalpflege*, Wien 1970
- DIAZ, IVÁN; REYNOLDS, PAUL: *Acceleration feedback control of human-induced floor vibrations*,  
in: *Engineering Structures* 32, 2010, S. 163 – 173
- DIELS, HERMANN: *Simplicius, In Aristoteles physicorum libros quattuor  
posteriors commentaria*, Berlin 1895
- DIN 4150-1:2001-06: *Erschütterung im Bauwesen:  
Vorermittlung von Schwingungsgrößen*, Berlin 2001
- DIN 4150-2:1999-06: *Erschütterung im Bauwesen:  
Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden*, Berlin 1999
- DIN 4150-3:1999-02: *Erschütterung im Bauwesen:  
Einwirkung auf bauliche Anlagen*, Berlin 1999
- DIN 4150-3 Ergänzung: *Anhaltswerte für Sprengerschütterungen*, Berlin 1991
- GÖBEL, RUDOLF (Hrsg.): *Wissensspeicher Physik*, Berlin 1998
- GÖSELE, KARL; SCHÜLE, WALTER; KÜNZEL, HELMUT: *Schall, Wärme, Feuchte*,  
Wiesbaden 1997, S. 15 – 164
- GREEN, TIMOTHY: *Shock and vibration – Test results for framed paintings on canvas supports*,  
in: GRIMSTAD, KIRSTEN (Hrsg.) *ICOM committee for conservation, 8<sup>th</sup> triennial meeting:  
Sydney, Australia 1987*, London 1987, S. 585 – 596
- GREEN, TIMOTHY: *Vibration control: paintings on canvas supports*,  
in: MECKLENBURG, MARION (Hrsg.): *Art in Transit*, Washington 1991, S. 59 – 67
- HABENICHT, GERD: *Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, Berlin 1997
- Holztechnik, Fachkunde*, 17. Auflage, Haan-Gruiten 1999
- HUNAIDI, OSAMA: *Traffic Vibrations in Buildings*  
in: Publikationen des National Research Council Canada,  
Internetpublikation: [www. nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n39.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n39.html)  
Stand 12.11.2009
- KÜHR, WOLFGANG: *Der Privatflugzeugführer*,  
in: *Luftrecht, Luftverkehrs- und Flugsicherungsvorschriften*, Band 5 1983

- KONON, WALTER; SCHURING JOHN R.: *Vibration criteria for historic and sensitiv older buildings*  
in: Publikationen des National Research Council Canada, Internetpublikation:  
[www.arblast.osmre.gov/downloads/  
Other%20parts/Historical20limits%20\(1983\).pdf](http://www.arblast.osmre.gov/downloads/Other%20parts/Historical20limits%20(1983).pdf) Stand 12.11.2009
- Lärmkarten München 2007,  
Internetpublikation: <http://muenchen.de/laerm/laermminderungsplan.html>  
Stand 24.03.2010
- LGAB Gutachten: *Katharinengasse Augsburg*, unveröffentlicht 2001
- MARCON, PAUL: *Shock, vibration and protective package design*,  
in: MECKLENBURG, MARION (Hrsg.): *Art in Transit*, Washington 1991, S. 107 – 120
- MARCON, PAUL: *Shock, vibration and the shipping environment*,  
in: MECKLENBURG, MARION (Hrsg.): *Art in Transit*, Washington 1991, S. 121 – 132
- MECKLENBURG, MARION: *Applied mechanics of materials in conservation research*,  
in: *Materials issues in art and archaeology II: symposium April 1990*,  
San Francisco 1990, S. 105 – 122
- MERVIN, RICHARD; MECKLENBURG, MARION, TUMOSA, CHARLES:  
*Technical Considerations for the Transport of Panel Paintings*,  
in: DARDES, KATHLEEN; ROTHE, ANDREA (Hrsg.): *The structural conservation of  
panel paintings: proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum,  
April 1995*, Los Angeles 1995, S.525 – 556
- PALMBACH, CORNELIUS: *Messungen transportbedingter Schwingungen an textilen Bildträgern*,  
Bern 2007
- PATER; J. B. IZZO: *Elemens de l'architecture civile, a l'usage de  
cavaliers du college roial Thérésien par le P. J. B. Izzo, de la compagnie de Jésus*,  
Wien 1772
- PISCHEK; JUNGHARDT: *Die Münchner U-Bahn:*  
*Unterirdisch durch die deutsche Landeshauptstadt*, München 2002
- PIEPER, KLAUS: *Sicherung historischer Bauten*, München 1983
- RICHARD, MERVIN; MECKLENBURG, MARION F.; MERRIL ROSS M.: *Art in transit:*  
*Handbook for Packing and Transporting Painting*, Washington 1997
- ROSS, ROBERT; HUNT, MICHAEL; WANG, XIPING; SOLTIS, LAWRENCE: *Floor vibration:*  
*A Possible Assessment Method for Historic Buildings*,  
in: *APT Bulletin Vol. 32*, 2001, S. 23 – 25

- RÜCKER, WERNER: *Baudynamik*, o. A. 2011
- SAUNDERS, DAVID: *Monitoring Shock and Vibration during the Transportation of Paintings*,  
in: *National Gallery technical bulletin Bd. 19*, London 1998, S. 64 – 73
- SAUNDERS, DAVID: *The effect of orientation during air transportation*,  
in: VERGER, ISABELLE (Hrsg.): *ICOM committee for conservation 14<sup>th</sup> triennial meeting  
The Hague September 2005*, 2005 S. 700 – 707
- SAUNDERS, DAVID; SLATTERY, MARK; GODDARD, PATRICIA:  
*Packing case design and testing for the transportation of pastels*,  
in: BRIDGLAND, JANET (Hrsg.): *ICOM committee for conservation  
12<sup>th</sup> triennial meeting*, Lyon 1999, S. 100 – 105
- SAUNDERS, DAVID; SLATTERY, MARK; MULDER, ISCHA: *Building work, vibration  
and the permanent collection*, in: *Conservation news 68*, 1999, S. 10 – 13
- SCHROEDER, O. E. H.; HAMM F. M.: *Art in Transit*, in: *Maltechnik restauro Bd.81*, 1975,  
S. 225 – 227
- SCOBLE, M. J.; LIZOTE, Y. C.; PAVENTI, M.; MOHANTY, B. B.: *Measurement of blast damage*,  
in: *Mining Engineering*, Canada 1997 S. 103 – 108
- SROKA, ANTON: Gutachten in: Saarland, Ministerium für Wirtschaft S. 3 – 8,  
über: [www. portal-lebach.de](http://www.portal-lebach.de), Stand: 12.03.2010
- STEINHAUSER, PETER: *Erschütterungen als Ursache von Bauwerksschäden*, auf: [www.oge.or.at](http://www.oge.or.at)
- STEINHAUSER, PETER: *Neue Möglichkeiten zur Erschütterungsuntersuchung  
durch das VibroScan advanced technology Verfahren*, auf: [www. VibroScan.at](http://www.VibroScan.at)
- STOLOW, NATHAN: *Conservation standard for works of art in transit and on exhibition*,  
in: *museum and monuments 17*, Genf 1979
- STÜHLER, WALDEMAR: *Analyse der dynamischen Eigenschaften  
verschiedener Verpackungsarten bei Holz-Tranportkisten  
für Kunstgegenstände speziell für Gemälde*, unveröffentlicht 1986
- STÜHLER, WALDEMAR: *Maßnahmen und Hinweise zur Reduzierung der  
dynamischen Belastungen von Kunstgegenständen  
beim Transport-Schwingungstechnische Anforderungen für den Transport  
von Kunstgegenständen 1. Entwurf*, unveröffentlicht 1988
- STUDER, JOST A.: *Erschütterungseinwirkungen auf Bauteile*,  
Fachveranstaltung: Erschütterungen und Körperschall:  
eine bautechnische Herausforderung, Internetpublikation, S. 1 – 12

- SVINKIN, MARK R.: *Drawbacks of blast vibration regulations*,  
Internetpublikation: [www.vulcanhammer.net](http://www.vulcanhammer.net), Cleveland 2002
- THICKETT, DAVID: *Vibration damage levels for museum objects*,  
*Vontobel, Roy (Hrsg.) 13<sup>th</sup> triennial meeting, Rio de Janeiro 22 – 27 September 2002*,  
o.A. 2002, S. 90 – 95
- THORP, VALERIE; WILSON, COLLEEN:  
*Moving the collections at the Royal British Columbia Museum*,  
in: ASHOK, ROY; SMITH, PERRY (Hrsg.): *IIC – Preventive Conservation Practice, Theory and Research Preprints Ottawa Congress 12 – 16 Sept. 1994*,  
Ottawa 1994, S. 48 – 52
- THULL: U-Bahn-Referat, Abt. T IV GP Meßtechnik: *Meßbericht Nr. Sch 4 /6 /92: Erschütterungsmessungen an der Münchner Mariensäule*, München 1992
- WATTS, SIOBHAN; BERRY, JANET; DE JOIA, AMY; PHILIPOTT, FIONA:  
*In control or simply monitoring? The protection of museum collections from dust and vibration during building works*,  
in: VONTOBEL, ROY (Hrsg.): *ICOM committee for conservation 13<sup>th</sup> triennial meeting, Rio de Janeiro, 22 – 27 September 2002*, o.A. 2002; S. 108 – 115
- WILSON, PETER: *Mathematical predictions of transit case performance; "Topplability", Thermal insulation, Weight and Volume*,  
in: GRIMSTAD, KIRSTEN (Hrsg.): *ICOM committee for conservation 8<sup>th</sup> triennial meeting: Sydney, Australia 1987*, S. 617 – 619
- WRANGEL, F. V.: *F. v. Wrangels Beobachtungen der stündlichen Variationen der Abweichung zu Sitka, auf der Nordwestküste Amerikas*.  
in: POGGENDORF, J. C. (Hrsg.) *Annalen der Physik und Chemie* Band 31, No. 13. 1834
- WEI, W.; KRAGT, W.; VISSER, A.: *Non-contact measurement of vibrations in paintings using laser Doppler vibrometry*, in:

## Abbildungsnachweis

Soweit nicht näher beschrieben, wurden sämtliche Abbildungen mit freundlicher Erlaubnis der Museen von der Autorin aufgenommen.

Die Abbildungen Meßtabelle konnten nicht mit einem Verweis gekennzeichnet werden. Sie werden in der Folge extra aufgeführt.

- Seite 46, Abbildung aus [www.makita.de](http://www.makita.de)
- Seite 51 – 55, Abbildungen aus [www.mvvv.de](http://www.mvvv.de)
- Seite 83 – 88, Abbildungen Pressefotos des Münchner Merkurs Onlineversion