

Identifikation von Knack-Geräuschen in Gebäuden

Dr.M.Ringger, ExpertConsult GmbH, Dübendorf¹

Zusammenfassung

Durch Messen der Laufzeitdifferenzen können Knack-Geräusche geortet werden. Dabei ist eine Hypothese, welche getestet werden kann, hilfreich. Wichtig für die Ortung sind genügend gut platzierte Sensoren, eine Datenerfassung, welche automatisch über Wochen mit einer Abtastrate von mindestens $20'000 \text{ s}^{-1}$ Ereignisse erfassen kann, sowie Routinen, welche die Daten auswerten und analysieren kann.

Einleitung

Knacken entsteht in einer Baukonstruktion durch impulsförmigen Abbau von Spannungen. Dies löst Schock-Wellen innerhalb des Baukörpers aus, und zwar am Ort, wo die Spannung abgebaut wird. Durch Beschleunigungs-Sensoren auf dem Baukörper, welche die Schock-Wellen registrieren, kann über die Eintreffzeit der Wellen-Front bei den Sensoren die Richtung der Welle bestimmt und somit der Ort der Quelle eingegrenzt werden.

Für die Messung bietet sich ein virtuelles Instrument an, wie es in LabVIEW® für einen achtkanaligen USB-A/D-Wandler programmiert werden kann (Abbildung 1). Das Instrument kann Vibrationen an bis zu 8 Beschleunigungs-Sensoren mit einer Abtastrate von $40'000 \text{ s}^{-1}$ bzw. $25 \mu\text{s}$ zwischen zwei Abtastungen messen; ausgehend von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $2'000 \text{ m/s}$ ergibt sich eine örtliche Auflösung von 5 cm . Das verwendete virtuelle Instrument erlaubt die Kalibrierung der Beschleunigungs-Sensoren, besitzt einen Pre-Trigger, speichert Ereignisse, falls ein Schwellenwert überschritten wird, und ermöglicht das nachträgliche Betrachten von gespeicherten Ereignissen. Da es um das Bestimmen der Eintreffzeit geht, also um eine Analyse des Zeitsignals, ist ein Anti-Aliasing Filter nicht nötig.

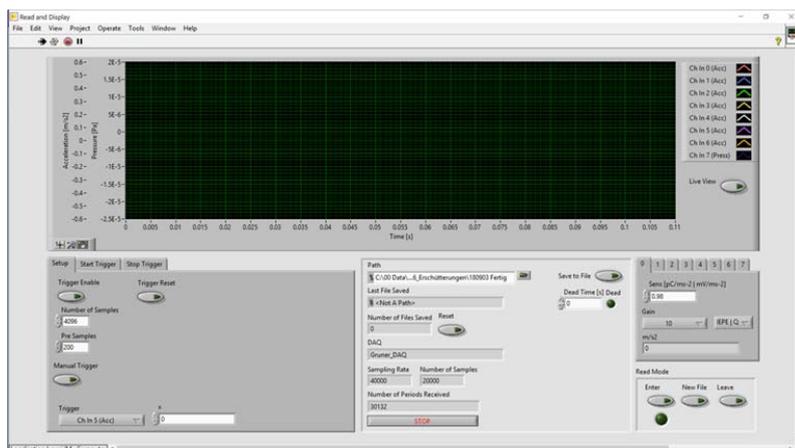


Abbildung 1 Virtuelles Instrument in LabVIEW®

¹ Die vorgestellten Arbeiten wurden bei der Gruner AG, Basel durchgeführt.

Für die Montage der Beschleunigungs-Sensoren an Mauerwerk oder Beton wurden Köpfe von M10 Sechskantschrauben flachgedreht und mit einem M5 Sackloch versehen. Die Sechskantschrauben werden mittels Dübel im Mauerwerk verankert, und die Beschleunigungs-Sensoren mittels Maden auf den Sechskantschrauben montiert (Abbildung 2). Durch Klopfen mit einem Gummihammer auf den Beton kann die Anordnung der Beschleunigungs-Sensoren getestet und kalibriert werden; der Hammer erzeugt auf einer Betondecke in 5 m Abstand eine Spitzen-Beschleunigung von ca. 2 m/s^2 .



Abbildung 2 Beispiel für einen Beschleunigungs-Sensor, montiert auf einem M10 Schraubenkopf mit Dübel Hilti HKD M10x30

Durch einen Impuls in einem Festkörper wird eine Mischung von Wellen erzeugt: Dichtewellen, Biege-Wellen, Oberflächenwellen und Rayleigh-Wellen. Jeder dieser Wellen-Arten hat seine eigene Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche je nach Art zusätzlich von der Frequenz abhängen kann, sogenannte Dispersion. Bei Dispersion ist die Zeit für das Eintreffen der Welle durch die Frontgeschwindigkeit bestimmt, welche der Phasengeschwindigkeit bei der oberen Grenzfrequenz der Messkette entspricht.

Bei einer Serie von hintereinander angeordneten Beschleunigungs-Sensoren ist die genaue Kenntnis der Mischung der Wellen-Arten nicht entscheidend. Unabhängig von der Mischung wird der Beschleunigungs-Sensor, welcher der Quelle am nächsten liegt, zuerst ansprechen; bei geschickter Platzierung der Sensoren genügt dies, um zu entscheiden, ob eine Welle von links oder rechts kommt.

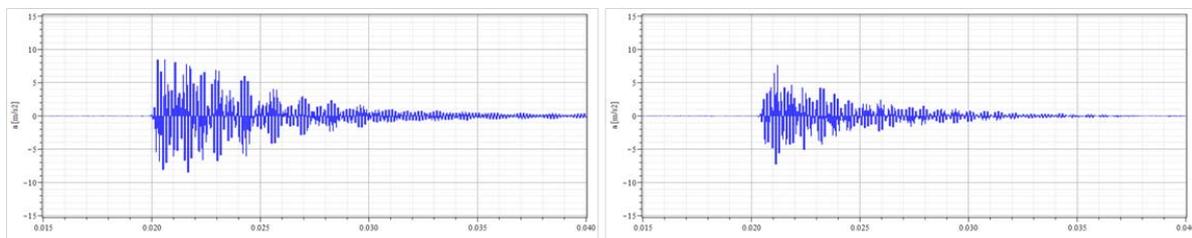


Abbildung 3 Beispiel einer Vibration bei zwei hintereinanderliegenden Beschleunigungs-Sensoren.

Abbildung 3 zeigt die Vibrationen einer Schock-Welle bei zwei 1 m hintereinanderliegenden platzierten Beschleunigungs-Sensoren an einer Betondecke. Die Welle trifft beim zweiten Beschleunigungs-Sensor (rechts) etwa 0.5 ms später ein als beim ersten Beschleunigungs-Sensor (links). Durch die Mischung verschiedener Wellen-Arten und Dispersion verändert sich über einen Meter die Form der Schock-Welle;

das Maximum ist nach dem Eintreffen der Front beim rechten Beschleunigungs-Sensor etwas später als beim linken Beschleunigungs-Sensor.

In Maple® wurden Routinen entwickelt, welche Ereignisse filtern und die genauen Eintreffzeiten bestimmen können.

Beispiel 1

Ein 16-stöckiges Büro-Gebäude verfügt auf jedem Stockwerk über einen Umgang (Abbildung 4).

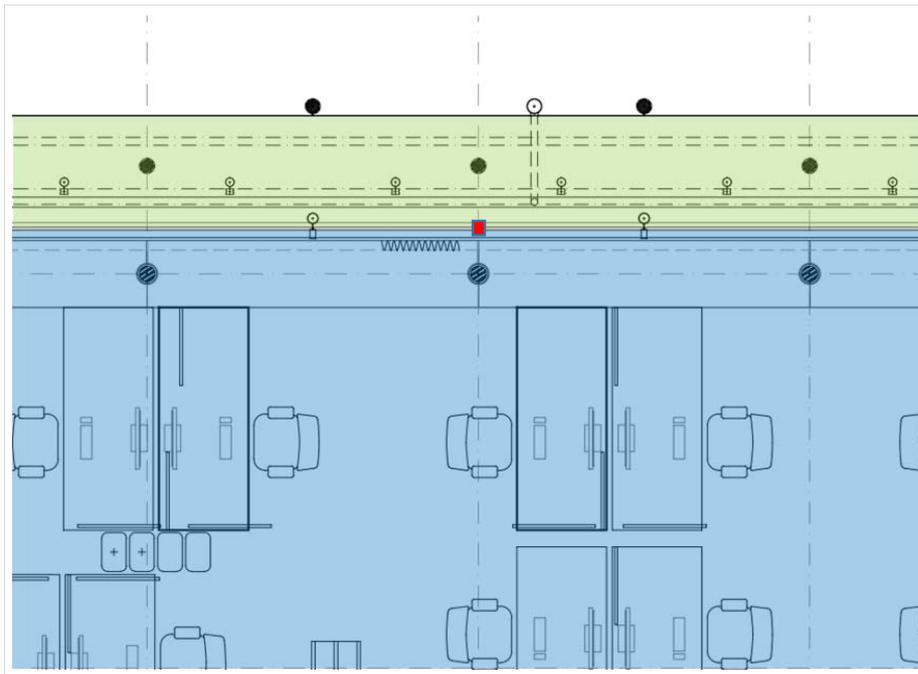


Abbildung 4 Ausschnitt des Gebäudes. Der Umgang (grün) ist statisch unabhängig vom restlichen Gebäude(blau).

Die Umgänge selbst ruhen statisch unabhängig vom Gebäude auf Stahlstützen und sind nur in jedem zweiten Stockwerk in der Mitte jeder Fassade mittels eines Schwertes mit dem Gebäude verbunden. Die Umgänge mit den Stahlstützen bilden quasi eine zweite Haut um das Gebäude.

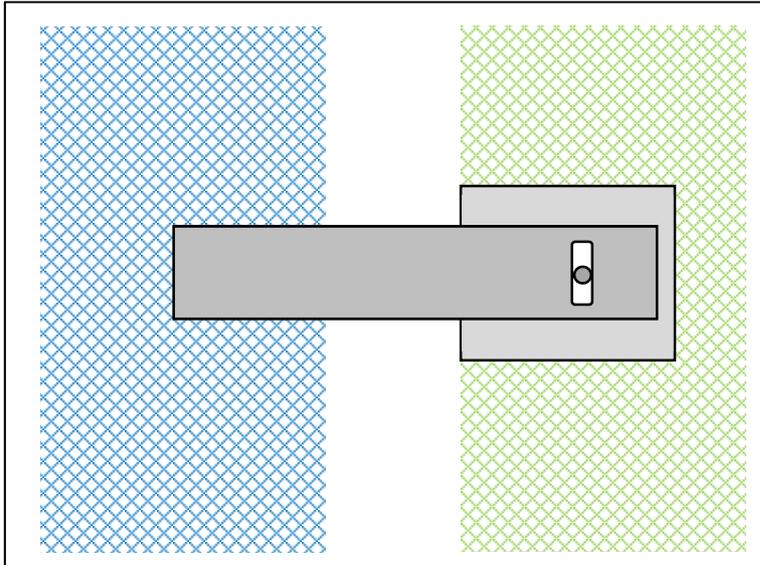


Abbildung 5 Schematische vertikale Darstellung des Schwerter zwischen Betondecke (blau) und Umgang (grün).

Jedes Schwerve führt in einen Stahl-Kasten im Umgang und ist mittels eines Langloches, welches vertikale Bewegungen zulässt, mit einer Achse im Stahl-Kasten verbunden (Abbildung 5).

Die Benutzer in der Nähe eines der Schwerter in der Decke beschwerten sich über Knack-Geräusche, welche sporadisch auftreten. Aus haftungsrechtlichen Gründen ist die Bauherrschaft mit der Frage herangetreten, ob das Schwerve Grund für das Knacken sei. Um die Frage zu beantworten, wurden 7 Beschleunigungs-Sensoren um das Schwerve herum montiert (Abbildung 6).

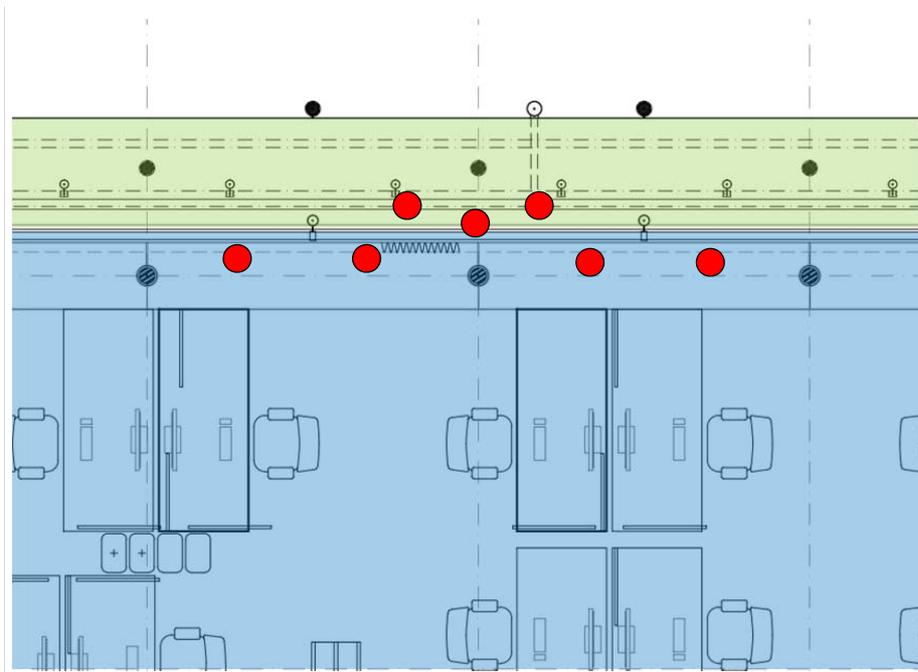


Abbildung 6 Montage der Beschleunigungs-Sensoren an der Fassade

Auf der Innenseite wurden je zwei Beschleunigungs-Sensoren in einem Abstand von 1 m resp. 2 m links und rechts des Schwertes montiert, ein Beschleunigungs-Sensor wurde mit einer speziellen Klammer auf dem Schwert befestigt, und zwei Beschleunigungs-Sensoren wurden auf dem Umgang in einem Abstand von 1 m links und rechts des Schwertes befestigt (Abbildung 6 und Abbildung 7). Ebenfalls wurde die Lufttemperatur auf dem Umgang gemessen.



Abbildung 7 Die vier inneren Beschleunigungs-Sensoren sind mittels Sechskantschrauben an der Betondecke montiert.

Innerhalb von 34 Tagen wurden mehr als 5'000 Ereignisse registriert, welche in der Summe über alle Beschleunigungs-Sensoren mindestens ein Beschleunigung von 0.8 mm/s^2 erzeugten. Von diesen Ereignissen wurden nachträglich diejenigen herausgefiltert, die an einem der inneren Beschleunigungs-Sensoren mindestens eine Beschleunigung von 1.0 m/s^2 erzeugten.

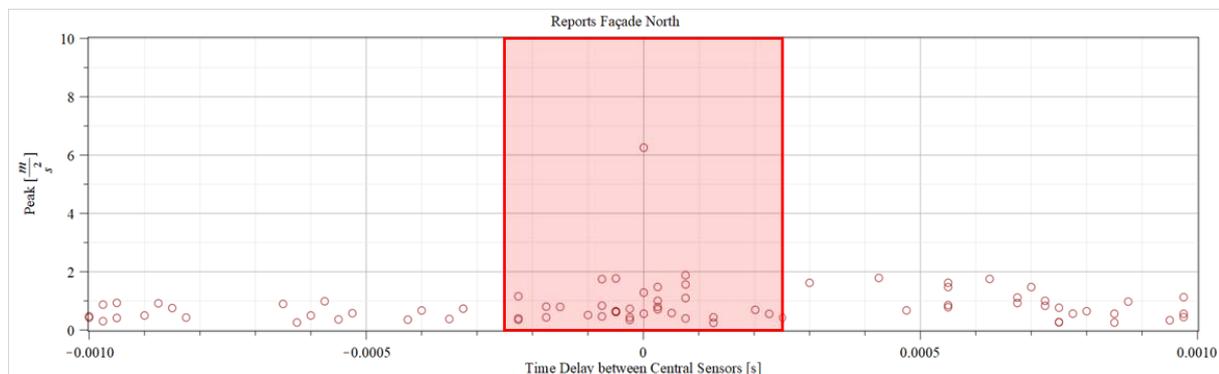


Abbildung 8 Die obige Grafik zeigt die Stärke der gemessenen Vibrationen abhängig vom Eintreffen der Vibrationen bei den beiden mittleren, sich links und rechts des Schwertes befindenden Beschleunigungs-Sensoren auf der Innenseite.

Abbildung 8 zeigt die Stärke der gemessenen Vibrationen abhängig vom Eintreffen der Vibrationen bei den beiden mittleren, sich links und rechts des Schwertes befindenden Beschleunigungs-Sensoren auf der Innenseite. Stammen die Vibrationen vom Schwert, treffen die Vibrationen etwa gleichzeitig bei den beiden Beschleunigungs-Sensoren ein, d.h. die Zeitdifferenz wäre ungefähr Null. Wäre die Quelle links oder rechts der beiden mittleren Beschleunigungs-Sensoren, dann wäre die Zeitdifferenz $+0.4 \text{ ms}$ resp. -0.4 ms , wie mittels Gummihammer gemessen. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit zeigt der

rote Bereich in Abbildung 8 die Ereignisse, die eindeutig aus dem Bereich zwischen den beiden mittleren Beschleunigungs-Sensoren stammen. Eine nähere Analyse der Ereignisse zeigte, dass zwei Arten von Ereignissen unterschieden werden müssen: Ereignisse von Innen und Ereignisse von aussen.

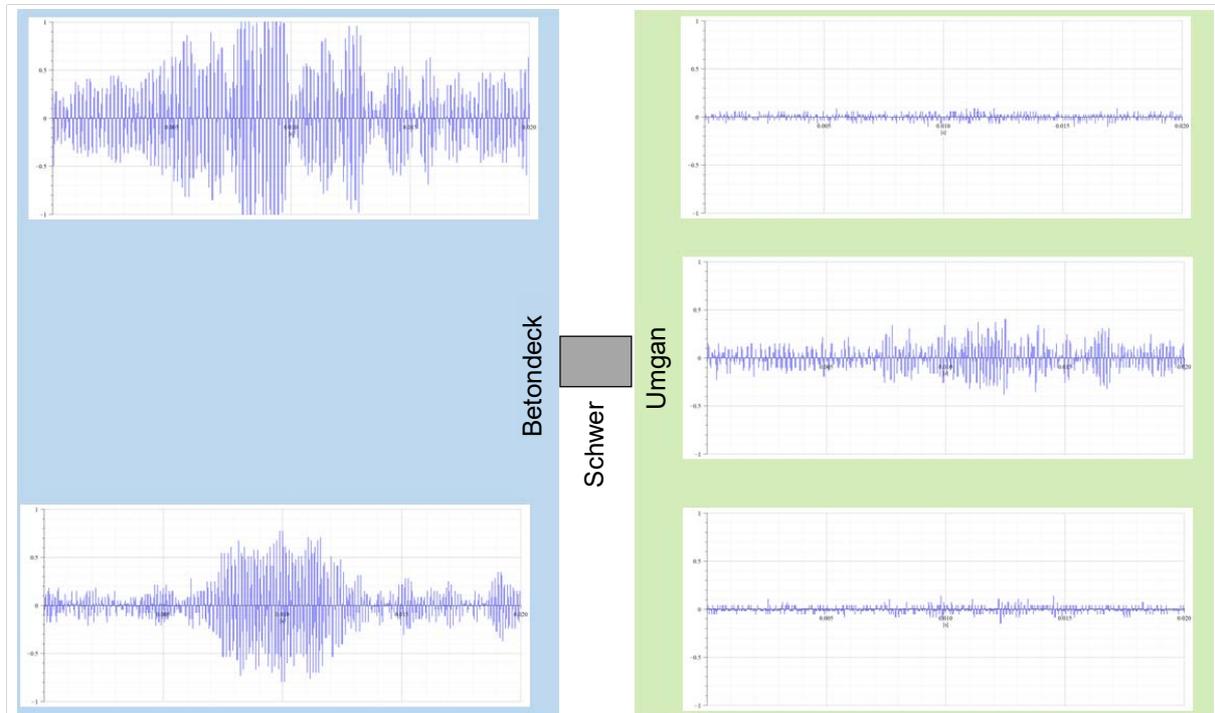


Abbildung 9 Schematische Darstellung eines typischen Ereignisses von Innen.

Das Beispiel eines Ereignisses von Innen (Abbildung 9) zeigt, wie die Erschütterung von links kam (der Beschleunigungs-Sensor im Bild links Oben sprach als erster an) und dann über das Schwert schwach nach Aussen geht. Auf dem Umgang ist in 1.0 m Entfernung zum Schwert kaum mehr ein Signal wahrnehmbar, welches grösser als das Rauschen ist. Anders sehen die Vibrationen aus, welche von aussen kommen, wie ein typisches Beispiel zeigt (Abbildung 10).

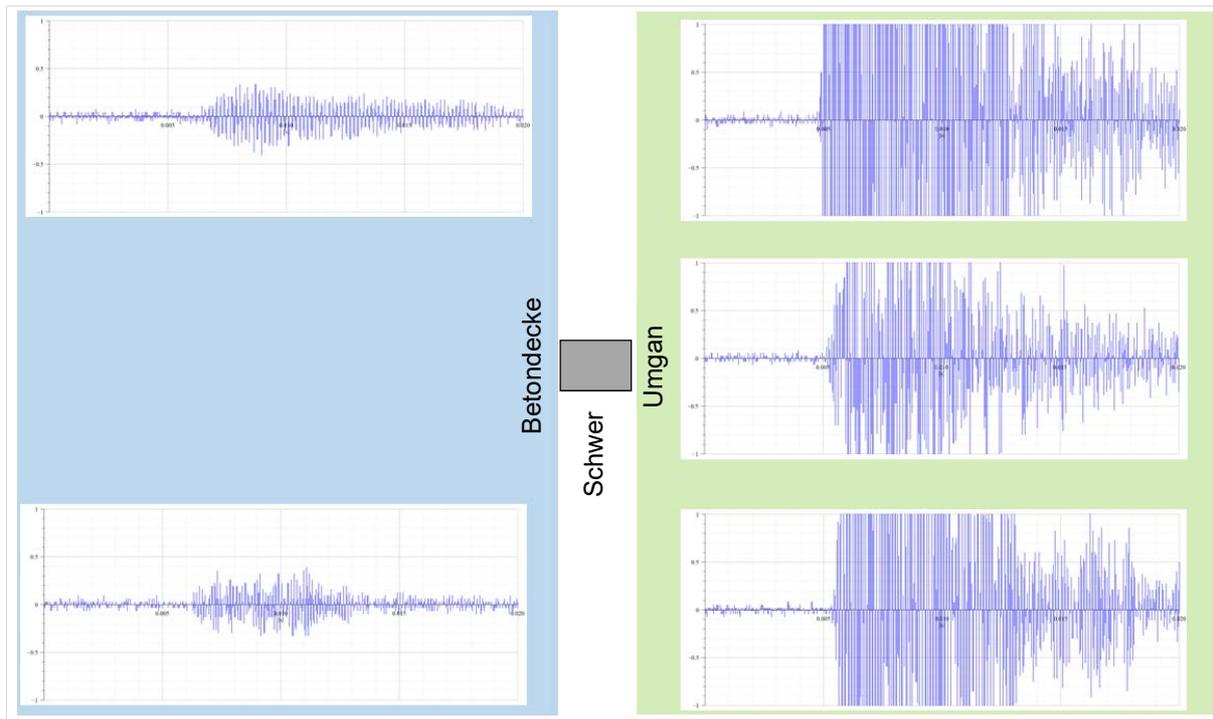


Abbildung 10 Schematische Darstellung eines typischen Ereignisses von aussen.

Die Ereignisse von aussen werden nach Innen durch das Schwert stark gedämpft. Die Beschleunigungs-Sensoren im Raum sprechen gleichzeitig an, da die Uebertragung über das Schwert erfolgt. Wie aber die äusseren Beschleunigungs-Sensoren zeigen, kam die Erschütterung von links; der Beschleunigungs-Sensor links des Schwertes (rechts Oben) sprach als erster an. Weiter traten die Ereignisse von aussen vornehmlich in Perioden der Abkühlung auf (Abbildung 11). Mit kälteren Temperaturen ging auch die Anzahl der Ereignisse zurück.

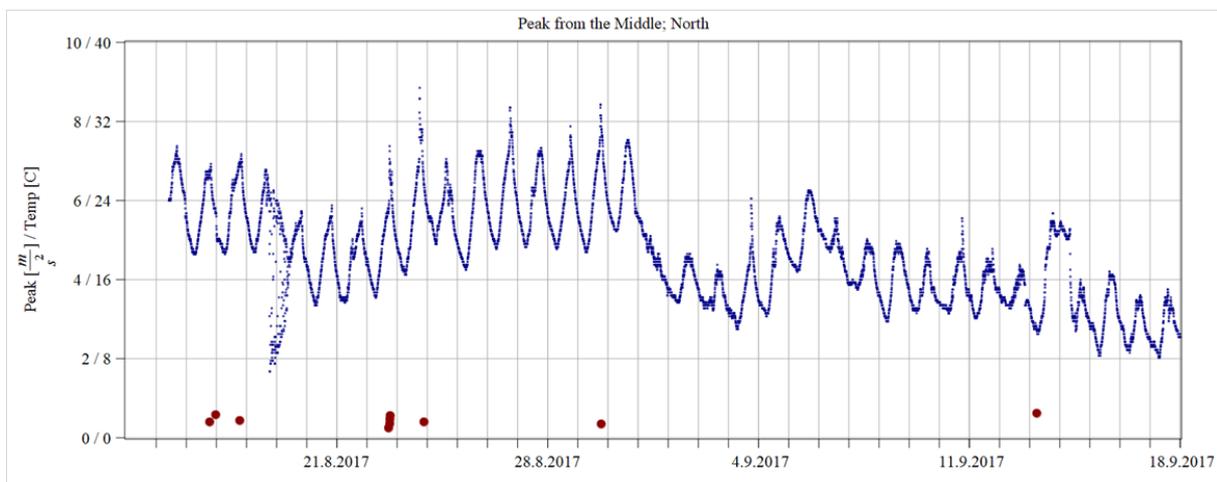


Abbildung 11 Korrelation von Zeitpunkt und Aussen-Temperatur der Ereignisse von aussen

Damit konnte die Frage der Bauherrschaft beantwortet werden. Das Schwert ist nicht verantwortlich für das Knacken, sondern überträgt nur die Vibrationen, die aussen auf dem Umgang vermutlich aufgrund thermischer Spannungen durch die Stahlstützen verursacht werden.

Beispiel 2

Der Besitzer einer Wohnung im Attikageschoss beklagt das Auftreten von Knacken. Der Architekt hat den Verdacht, dass das Knacken von den beiden Dornen-Gruppen stammt, welche links und rechts das Vordach um den Wintergarten herum mit dem restlichen Vordach verbinden, und nicht von den Isokörpern, welche das Vordach halten (Abbildung 12). Falls sich der Verdacht bestätigen würde, müssten die Dornen saniert werden.

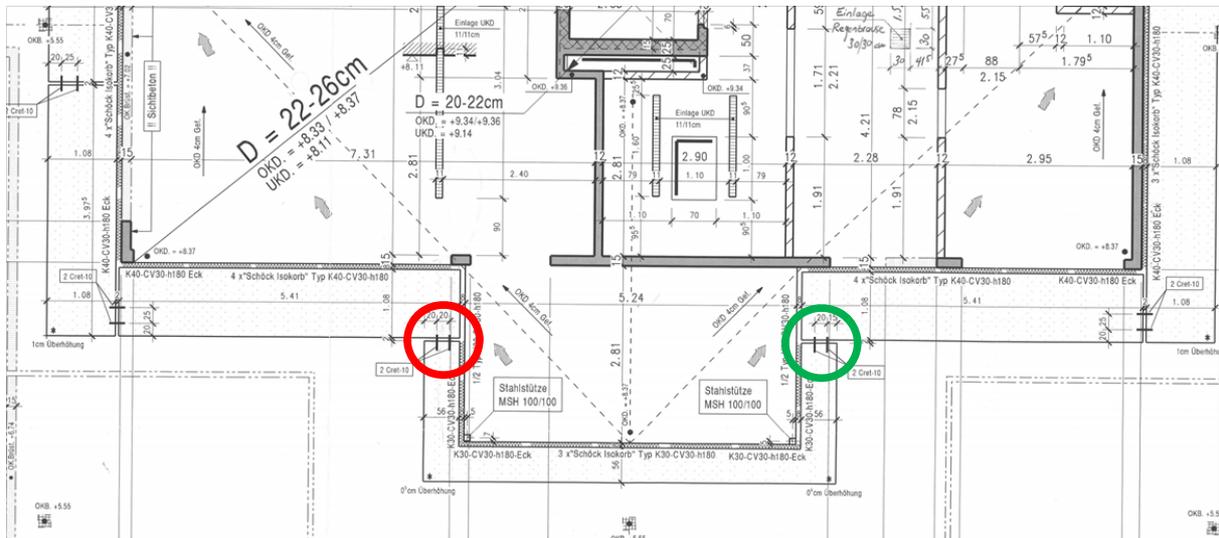


Abbildung 12 Detail des Attikageschosses. Es wird vermutet, dass die Dornen-Gruppen (roter und grüner Kreis), welche das Vordach um den Wintergarten herum mit dem restlichen Vordach verbinden, das Knacken verursachen.

Für die Messung wurden 7 Beschleunigungs-Sensoren um den Wintergarten herum montiert (Abbildung 13 und Abbildung 14).

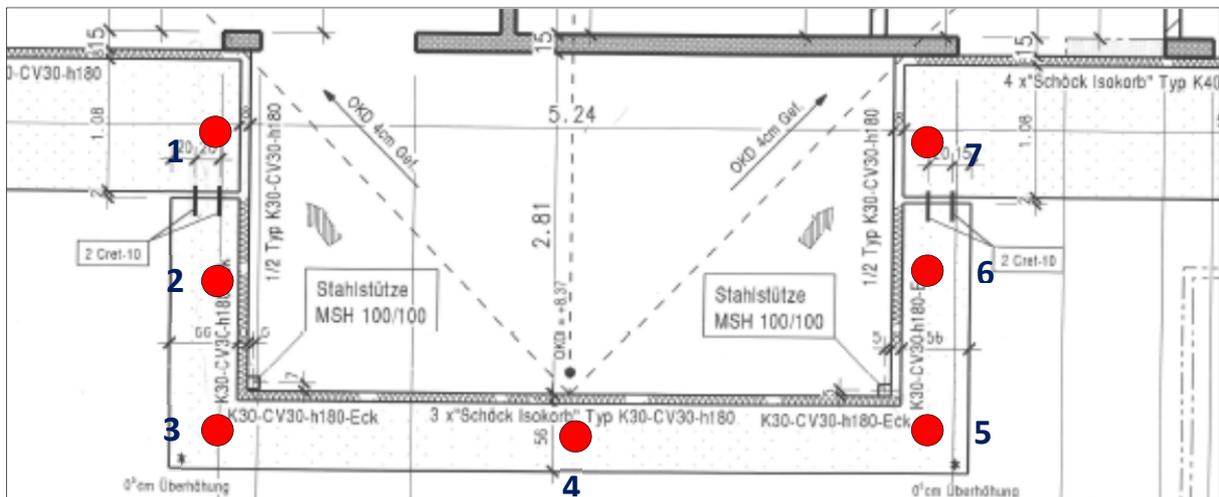


Abbildung 13 Anordnung der Beschleunigungs-Sensoren.



Abbildung 14 Bilder des linken, mittleren und rechten Teils des Wintergartens mit dem Vordach. Im rechten Bild sieht man die Messapparatur.

Die Messung dauerte 10 Tage und es wurden rund 1'200 Ereignisse registriert. Aufgrund der Laufzeitdifferenz konnte der Ort des Knackens auf dem Pfad, worauf die Beschleunigungs-Sensoren waren, bestimmt werden. Der besseren Uebersichtlichkeit wegen wurden die Orte in Klassen mit einer Klassenbreite von einem halben Sensor-Abstand zusammengefasst (Abbildung 15). Der Ort eines Knacks ist wie folgt zu verstehen: Ist der Ort z.B. bei 2.25 dann heisst dies, dass das Knacken zwischen den Beschleunigungs-Sensor 2 und 3 entstanden ist, und zwar näher beim Beschleunigungs-Sensor 2 als beim Beschleunigungs-Sensor 3. Am oberen Rand sind die Anzahl der Knacks bei der entsprechenden Position angegeben. Die Dornen-Gruppen befinden sich zwischen den Beschleunigungs-Sensoren 1 und 2, sowie zwischen den Beschleunigungs-Sensoren 6 und 7. Die Punkte bei 7.25 stammen von Knacks rechts vom Beschleunigungs-Sensor 7, ausserhalb der Messanordnung. Diese Knacks müssen durch eine weitere Quelle rechts der Messanordnung verursacht worden sein.

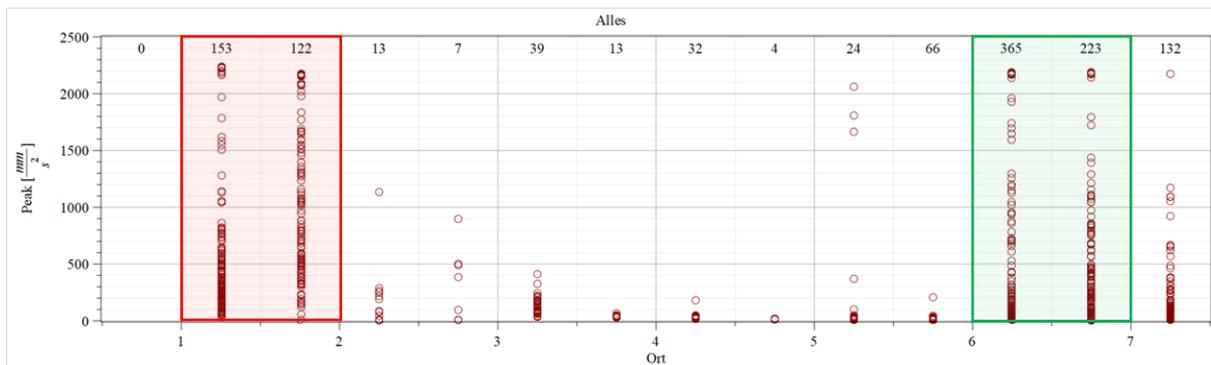


Abbildung 15 Klassifizierte Verteilung der registrierten Ereignisse nach dem Entstehungs-Ort, definiert durch die Sensor-Nummer. Zur Erinnerung: die Dornen-Gruppe links (rot) befinden sich zwischen den Sensoren 1 und 2 und die Dornen-Gruppe rechts zwischen den Sensoren 6 und 7 (grün).

Zusammenfassend stammen 863 der 1193 Ereignisse, also 72 % aus einem Gebiet, wo sich die Dornen-Gruppen befinden. Ebenfalls ist aus Abbildung 15 ersichtlich, dass die stärksten Ereignisse ebenfalls aus dem Gebiet der Dornen-Gruppen stammen. Interessant ist die zeitliche Verteilung des Knackens (Abbildung 16).

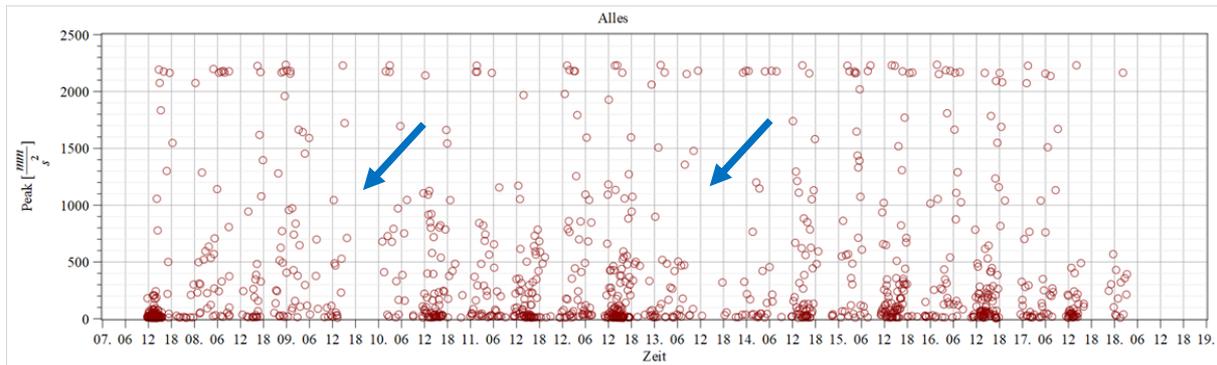


Abbildung 16 Verteilung der Ereignisse nach Zeit und Stärke. Der verwendete Messbereich reichte bis maximal $2'300 \text{ mm/s}^2$, darum sind die obersten Werte plafoniert. Die blauen Pfeile zeigen auf Zeiten mit einem Temperatureinbruch.

Das Knacken trat vor allem an den heißen Tagen auf; der Temperatureinbruch am 9. und am 13. ist deutlich zu sehen (blauer Pfeil).

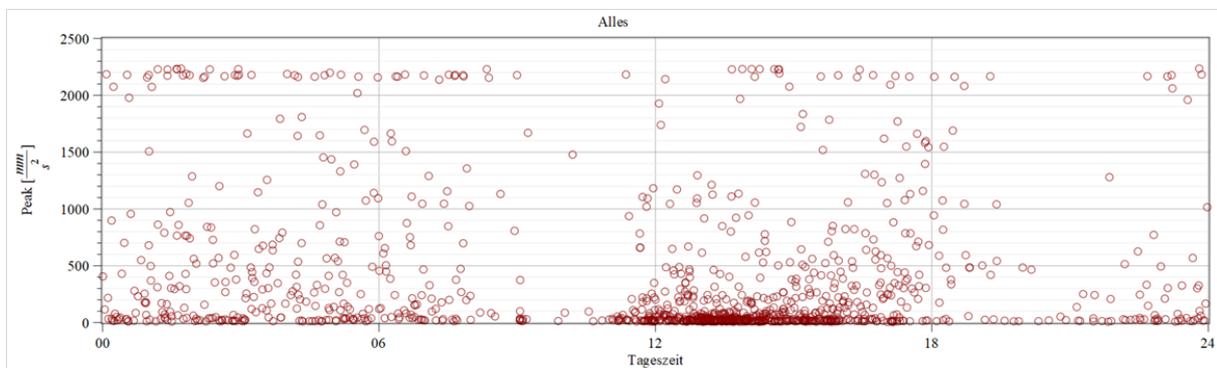


Abbildung 17 Verteilung des Knackens über die Tageszeit und die Stärke.

Das Knacken trat hauptsächlich zwischen 11 und 17 Uhr auf (Abbildung 17). Die fragliche Fassade ist ziemlich genau nach Süden ausgerichtet und das Schwergewicht scheint bei etwa 14 Uhr zu liegen; der Sonnenhöchststand ist um 14.30 (MEZ Sommerzeit). Das Knacken korreliert somit sehr gut mit dem Sonnenstand. Auch beim Zusammenhang nach Ort und Tageszeit (Abbildung 18), zeigt sich, dass die Ereignisse sich auf die beiden Dornen-Gruppen konzentrieren und mit dem Sonnenstand korrelieren. Die Sonne bescheint zuerst die östliche Dornengruppe zwischen den Beschleunigungs-Sensoren 6 und 7, und anschliessend die westliche Dornengruppe zwischen den Sensoren 1 und 2.

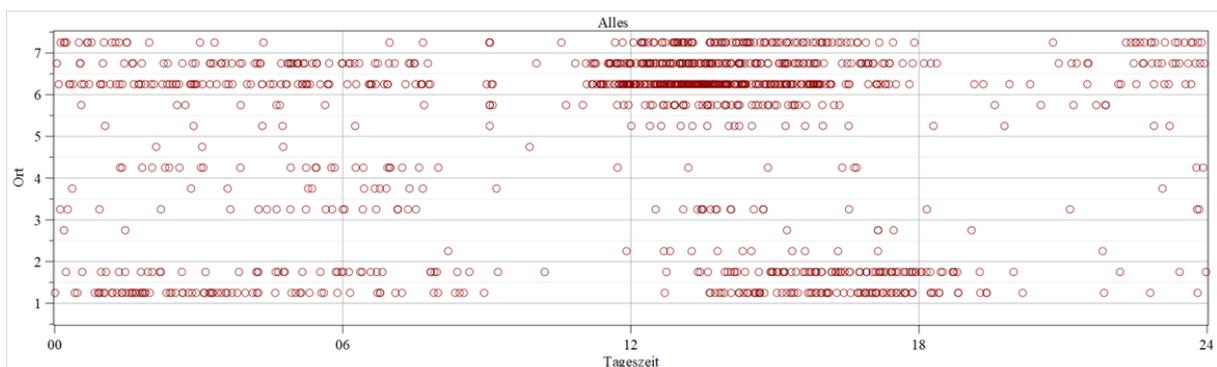


Abbildung 18 Verteilung der Ereignisse nach Tageszeit und Ort

Die Messung zeigte, dass das Knacken hauptsächlich von den beiden fraglichen Dornengruppen stammt.

Schlussfolgerungen

Für den Erfolg bei der Identifikation der Orte von Knacken ist folgendes wichtig:

- Eine Hypothese zu haben, die getestet werden kann.
- Beschleunigung-Sensoren so zu platzieren, dass nur die Eintreffzeiten entscheidend sind, nicht das genaue Wissen über die Ausbreitung der Wellen oder deren Ausbreitungsgeschwindigkeiten.
- Mit bis zu 8 Sensoren und einer Abtastrate von mind. $20'000 \text{ s}^{-1}$ synchronisiert zu messen.
- Ueber Software zu verfügen, um aus Tausenden von Ereignissen die Wesentlichen identifizieren und automatisch auswerten zu können.