



## Bauwerksanalyse und -überwachung mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern

Werner Daxinger <sup>1</sup>, Martin Joch <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Zivilgeometer, Stadtplatz 24, 4400 Steyr*

<sup>2</sup> *Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, Technische Universität Graz, Kopernikusgasse 24/II, 8010 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **93** (4), S. 159–165

2005

BibT<sub>E</sub>X:

```
@ARTICLE{Daxinger_VGI_200516,  
Title = {Bauwerksanalyse und -{\u}berwachung mit Hilfe von  
Beschleunigungsaufnehmern},  
Author = {Daxinger, Werner and Joch, Martin},  
Journal = {VGI -- {\u}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {159--165},  
Number = {4},  
Year = {2005},  
Volume = {93}  
}
```





## Bauwerksanalyse und -überwachung mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern

Werner Daxinger, Steyr, Martin Joch, Graz

### Kurzfassung

Unter Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern kann das Response-Verhalten einer Gebäudestruktur auf Einwirkungen von baubedingten Erschütterungen a-priori bestimmt werden und beabsichtigte Bauvorhaben können angepasst werden. Folglich ist eine Schadensprävention und Abwendung von nachhaltigen Schädigungen der Bausubstanz gegeben.

### Abstract

The use of accelerometers allows the a-priori analysis of the characteristics and reaction of a building on dominant man-made vibrations occurring during construction processes; as a consequence construction methods can be adapted and structural damages of the building can be averted.

### 1. Einleitung

Der Geodät wird seit jeher zur exakten Bestimmung auftretender Bewegungen und Setzungen von Bauwerken herangezogen. Diese können hochgenau mit klassischen Methoden wie Nivellement, terrestrischer Netzbeobachtung, Einsatz von Rissmonitoren, Distometer usw. erfasst werden. Bei größeren Strukturen und größeren Bewegungen werden auch GPS Instrumente eingesetzt.

Diese klassische Vorgangsweise hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Bewegungen werden meist in diskreten Messintervallen erfasst und können nur festgestellt, nicht aber präzisiert und folglich vermieden werden. Auch bei Fernabfrage und kontinuierlicher Messung wird die Objektbewegung ermittelt, nicht aber die zugrundeliegende physikalisch-dynamische Ursache beobachtet, die nach längerer Einwirkung letztendlich die Bewegung und Schädigung des Bauwerks bewirkt.

In vielen Fällen auftretender Setzungen und Bewegungen an Gebäuden ist die potentielle Ursache im Vorhinein bekannt: Durch eine Bautätigkeit in unmittelbarer Umgebung ist eine negative Auswirkung zu befürchten. Die Bauweise und Methodik der Einbringung der Materialien in den Untergrund mitsamt Ihren Eigenschaften stehen bereits nach Abschluss der Planung fest. Eine Analyse der Erschütterungswirkung der Baumaßnahmen sowie eine baodynamische Untersuchung des gefährdeten Gebäudes erlauben einerseits Maßnahmen zur Reduktion dieser Auswirkungen zu treffen und andererseits Grenzwerte für die zulässigen

dynamischen Einwirkungen zu definieren. Folglich ist es somit möglich, gefährdete Bauwerke nach eingehender Untersuchung vor Beginn der Bautätigkeit vor auftretenden Bewegungen und Erschütterungen zu schützen. Im Falle einer Echtzeit-Überwachung dieser vorab definierten Grenzwerte während der Bauphase ist somit eine tatsächliche Schadensprävention gegeben.

### 2. Theoretische Grundlagen

Eine in der nahen Umgebung des gefährdeten Bauwerks vorhandene Bautätigkeit bewirkt mechanische Erschütterungen. Diese sind abhängig von der Art und Frequenz des Erregers sowie von Struktur, Zustand und Material des Bauwerks und von der Beschaffenheit des Untergrundes. Besonders kritisch wirken sich diese Erschütterungen aus, wenn die Erregerfrequenzen nahe den Eigenfrequenzen des Bauwerks liegen und Resonanzeffekte bewirken.

Diese Erschütterungen sind mechanische Schwingungen und können als Bewegungen einer Masse gegenüber einem Ausgangspunkt betrachtet werden. Zwischen der dadurch auftretenden Beschleunigung  $a [m/s^2]$ , der Schwinggeschwindigkeit  $v [m/s]$  und dem Schwingweg  $s [m]$  ist ein funktionaler Zusammenhang gegeben:

$$\frac{d^2s}{dt^2} = a(t)$$

$$\frac{ds}{dt} = v(t) = \int a(t) dt \quad (1)$$

$$s(t) = \int v(t) dt = \iint a(t) dt^2$$

Nachdem  $a$  mit Hilfe von Beschleunigungssensoren gemessen werden kann, können  $v$  und  $s$  durch numerische Integration bestimmt werden. Ordnet man jeweils drei Beschleunigungssensoren orthogonal zueinander an, so erhält man die entlang der Achsen auftretenden Beschleunigungen und in weiterer Folge Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege. Beziehung (1) ist dann komponentenweise in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung anzuwenden.

Die Schwinggeschwindigkeit ist gemäss gültigen Normen (ÖNORM S 9020) als entscheidender Parameter für auftretende Bauwerksschäden heranzuziehen. Für historische und erschütterungsempfindliche Bausubstanzen wird für die resultierende Schwinggeschwindigkeit im Fundamentbereich ein Grenzwert von

$$v_{max} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = 1,8 - 5,0 \text{ mm/s} \quad (2)$$

empfohlen [1].

Werden diese Grenzwerte nicht überschritten, so ist bei kurz andauernden Erschütterungen eine strukturelle Schädigung des Gebäudes unwahrscheinlich. Für eine konkrete Festlegung des Grenzwertes in allen drei Achsrichtungen ist eine objektbezogene Expertise eines bau- und bodendynamischen Sachverständigen notwendig.

### 2.1. Anforderungen an die Beschleunigungsaufnehmer

Die Bauwerksüberwachung stellt hohe Anforderungen an die eingesetzten Beschleunigungsaufnehmer. Die zu messenden Beschleunigungen sind im Vergleich zu den beim Handling und

Transport auf den Aufnehmer einwirkenden Beschleunigungen sehr klein. Daraus resultiert einerseits die Forderung nach hoher Empfindlichkeit und Auflösung, aber gleichzeitig auch nach einer dem Umfeld einer Baustelle entsprechenden Robustheit.

Die Überwachung von Bauwerken ist eine über einen längeren Zeitraum, im hier beschriebenen Fall über mehrere Monate, andauernde Messaufgabe. Der Nullpunkt und die Empfindlichkeit des verwendeten Beschleunigungsaufnehmers müssen daher eine entsprechende Stabilität aufweisen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass eine Verschiebung des Nullpunktes des Aufnehmers z.B. als Setzung des Gebäudes oder eine Zunahme der Empfindlichkeit als eine sich vergrößernde Schwinggeschwindigkeitsamplitude interpretiert wird.

In Gebäuden wie etwa in einem Turm treten bereits über den Tagesverlauf beträchtliche Temperaturschwankungen auf. Daraus resultiert die Forderung nach einem auf Nullpunkt und Empfindlichkeit vernachlässigbaren Temperatureinfluss oder nach der Möglichkeit den Einfluss der Temperatur auf Nullpunkt und Empfindlichkeit zu korrigieren. Dies kann mittels einer Temperaturmessung im Aufnehmer und einem mathematischen Modell, das den Zusammenhang zwischen Nullpunkt, Empfindlichkeit und Temperatur beschreibt, erfolgen. Aufgrund der im Vorhergehenden angeführten Anforderungen wurden Aufnehmer des Typs QA700/20 der Firma Honeywell verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften dieses Aufnehmers sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Spezifikation QA700/20	
<b>Eigenschaften</b>	
Verstimmung des Nullpunktes	< 8 mg
Wiederholbarkeit innerhalb eines Jahres	< 1200 $\mu$ g
Temperatureinfluss	< 70 $\mu$ g/°C
Empfindlichkeit	1,33 mA/g $\pm$ 10%
Wiederholbarkeit innerhalb eines Jahres	< 1200 ppm
Temperatureinfluss	< 200 ppm/°C
Ansprechschwelle	< 1 $\mu$ g
<b>zulässige Umgebungsbedingungen</b>	
Arbeitstemperatur	-55 bis 96 °C
Schockfestigkeit	250 g
Vibrationsfestigkeit	25 g

Tab. 1

## 2.2. Funktionsweise der Beschleunigungsaufnehmer

Beim QA700/20 handelt es sich um einen Servo Beschleunigungsaufnehmer. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau: Ein Pendel ist mit einem Gehäuse über eine Biegefeder verbunden. Wirkt eine Beschleunigung in Messrichtung auf das Pendel, so wird es ausgelenkt und diese Auslenkung wird über ein kapazitives Wegmesssystem gemessen. In Abhängigkeit der Auslenkung werden die auf dem Pendel befindlichen Spulen von einem Verstärker bestromt. In Kombination mit den im Gehäuse angebrachten Permanentmagneten wird eine entgegen der Auslenkung wirkende Rückstellkraft erzeugt. In der Praxis bleibt daher die Auslenkung des Pendels sehr klein, weshalb die stets vorhandenen Nichtlinearitäten des Biege gelenkes und des Wegmesssystems vernachlässigt werden können. Darüber hinaus kann das Biege gelenk sehr weich ausgeführt werden, wodurch der Einfluss der Hysterese des Gelenks wegfällt. Beschleunigungsaufnehmer, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden als Closed-Loop oder Servo-Beschleunigungsaufnehmer bezeichnet.

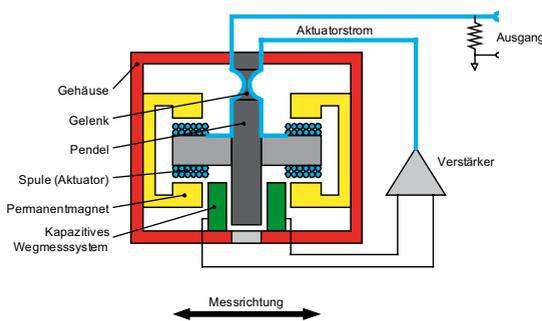


Abb. 1: Funktionsprinzip QA700

Sowohl das Pendel als auch die Biegefeder sind aus Quarz gefertigt, da Quarz im Vergleich zu metallischen Werkstoffen einen viel kleineren Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist. Eine Längenänderung des Pendels und damit eine Veränderung der Empfindlichkeit infolge Temperatureinfluss bleibt daher gering.

Der Einfluss der Temperatur auf die Empfindlichkeit und den Nullpunkt kann mittels eines mathematischen Modells korrigiert werden. Die Temperatur des Aufnehmers wird von einem integrierten Temperaturfühler erfasst und mit Polynomen werden die temperaturkompensierte Empfindlichkeit und der temperaturkompensierte Nullpunkt errechnet. Die Koeffizienten der Polynome werden vom Hersteller für jeden Aufnehmer

im Rahmen von Laborversuchen ermittelt. Somit kann das elektrische Ausgangssignal in eine von Temperatureffekten weitgehend bereinigte Beschleunigung umgerechnet werden.

## 3. Das Bauvorhaben Tiefgarage Pfarrplatz Linz

Am Pfarrplatz im Zentrum von Linz wird derzeit eine unterirdische Tiefgarage mit 4 Geschossen und 244 Stellplätze in Deckelbauweise errichtet (Abb. 2).

In unmittelbarer Umgebung befindet sich die Pfarrkirche samt Glockenturm, welche unter Denkmalschutz steht. Das Mittelschiff und der Turm wurden in einer ersten Bauphase Ende des 12. Jahrhunderts errichtet, erst später wurde die Kirche um die beiden Seitenschiffe und diverse Zubauten erweitert. Die Schiffrichtung der Pfarrkirche verläuft in Ost-West Richtung.

Das Natursteinwerkmauerwerk der tragenden Mauern ist auf Streifenfundamenten wahrscheinlich mit einer Einbindetiefe von nur wenigen Dezimetern gegründet worden. Der Untergrund wird aus lockeren bis mitteldicht gelagerten Donaukiesen gebildet.

Der Kirchturm der Pfarrkirche Linz ist symmetrisch in die Portalwand eingelassen. Der Turm weist eine Gesamthöhe von rund 70 m auf (bis zum Knauf), das Mauerwerk reicht bis in eine Höhe von rund 47 m. Die Türmerstube befindet sich in einer Höhe von rund 41 m.

Der Kirchturm trägt insgesamt 6 Glocken, die eines der bedeutendsten Barockgeläute Österreichs darstellen und seit 1990 teilweise an Stahljochen (zuvor Holzjoche) angebracht sind. Dieser Umbau führte zu verstärkten, die Bausubstanz gefährdenden Turmschwingungen, weshalb die beiden größten Glocken nicht mehr geläutet werden. Die Läuterichtung liegt in Schiffrichtung, also Ost-West.

Die Bausubstanz der Kirche und des Turmes wird als besonders erschütterungsempfindlich eingestuft. Aufgrund der Gesamtstruktur sind Schwingungsverstärkungen nach oben zu erwarten [1].

Da die Bautätigkeiten bei der Errichtung der Tiefgarage im Bereich der Apsis bis 5 m an die Pfarrkirche heranreichen, ist eine umfassende Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Pfarrkirche und des Turmes notwendig, um jegliche Schädigung zu vermeiden.

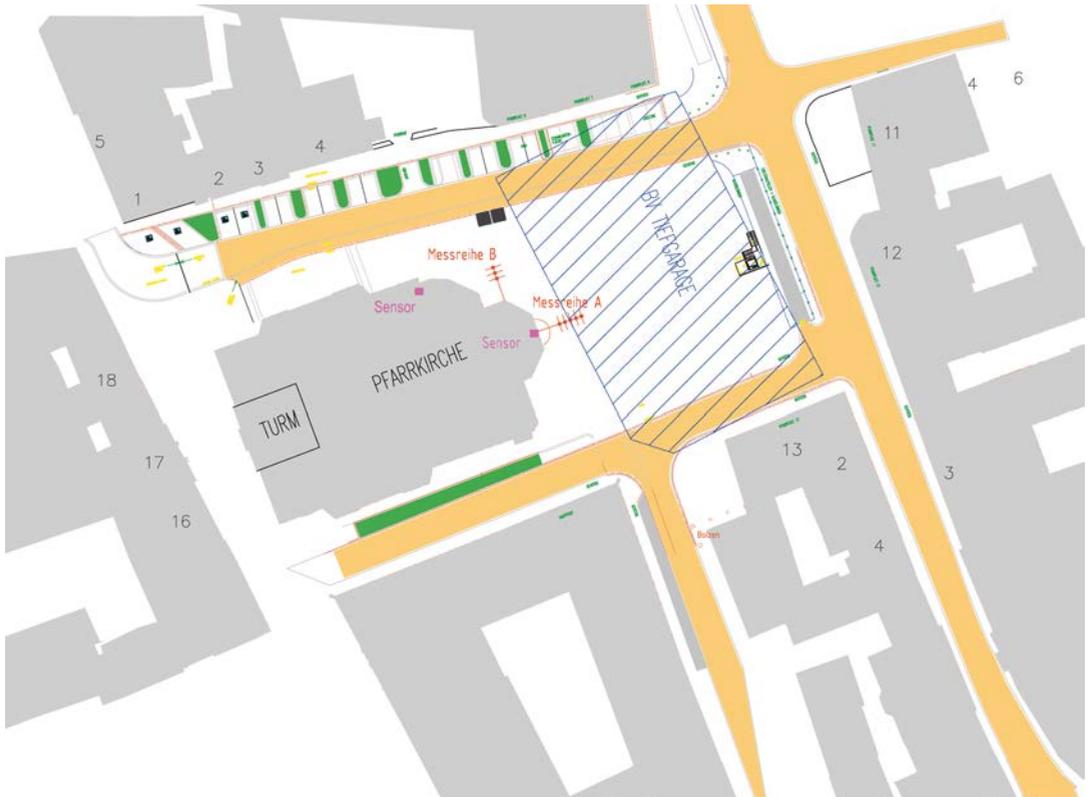


Abb. 2: Bauvorhaben Tiefgarage Pfarrplatz Linz

Daher wurde vor Baubeginn im Frühsommer 2005 das dynamische Verhalten der Kirche und des Kirchturms der Pfarrkirche Linz dokumentiert.

Im Falle des Kirchturmes wurden die abgeleiteten Kenngrößen aus Umweltrauschen und Glockenläuten bestimmt: Im Kirchturm wurden drei Beschleunigungssensoren angebracht, und zwar in einer Höhe von 14 m ein Sensor in Ost-West Richtung (Läuterichtung), sowie je ein Sensor in Ost-West und Nord-Süd Richtung in der Türmerstube (41 m Höhe), orthogonal zueinander. Die Sensoren wurden beide auf einer Nordwand befestigt, und annähernd in einer Lotlinie angeordnet (Abb. 3).

Die Sensoren wurden einige Wochen später auf eine Ostwand versetzt und zwar ein Sensor in einer Höhe von rund 15 m in Nord-Süd-Richtung; die beiden anderen wurden nahe der Mauerkrone in rund 46 m Höhe angebracht (Ostwand) und zwar wieder in Ost-West und Nord-Süd Richtung.

Die Sensoren sind während der Messungen fest mit dem Gebäude verbunden und messen kontinuierlich mit einer Rate von 100 Messungen

je Sekunde (100 Hz) die Beschleunigung  $a$ . Aus dieser kann dann die Schwinggeschwindigkeit  $v$  in den Messrichtungen ermittelt werden, sowie mittels Fourier-Analyse [2] die Eigenfrequenzen und die Auslenkung  $s$  des Turmes, siehe Beziehung (1).



Abb. 3: Beschleunigungsaufnehmer Honeywell QA 700

Details wie Steifigkeit der Sensorplattform, Filter-Einstellungen und Aliasing-Effekte werden

hier nicht weiter behandelt, sind jedoch von entscheidendem Einfluss auf die Ergebnisse.

Die aufgezeichneten Messungen wurden ausgewertet und grafisch dargestellt. Die Abszisse der Grafiken ist die Zeitachse, gemessen in Sekunden seit der ersten Messepoche. Die erste Messepoche ist auf den Grafiken jeweils rechts oben angemerkt.

Es lassen sich dominante Eigenfrequenzen für den Turm von 1,25 Hz in Ost-West Richtung ableiten, sowie von 1,55 Hz in Nord-Süd Richtung.

Durch die Läutvorgänge zeigen sich an der Mauerkrone hervorgerufene Schwinggeschwindigkeiten von bis zu  $\pm 6,0$  mm/s. Die entsprechenden Auslenkungen betragen bis zu  $\pm 0,8$  mm, siehe Abb. 4 bis 6.

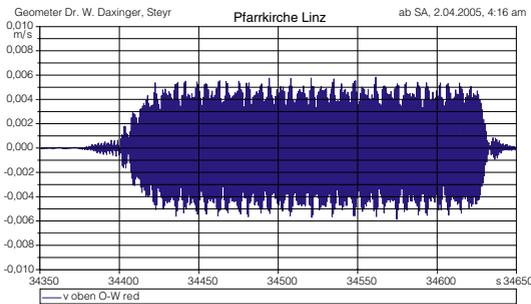


Abb. 4

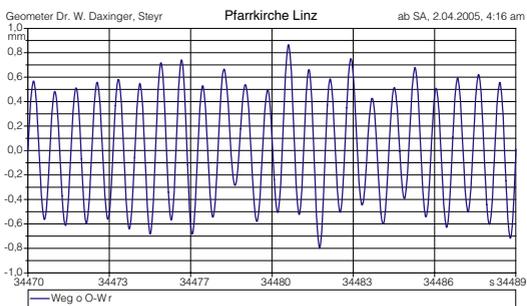


Abb. 5



Abb. 6

Um die Auswirkungen der Bautätigkeit auf die Kirche selbst, insbesondere auf die im Abstand von 5 m zur Bautätigkeit befindliche Apsis abschätzen zu können, wurden mit Hilfe einzeln generierter Impulse Bodenwellen erzeugt. Die Übertragung der Wellenausbreitung im Boden (Scherwelle und Kompressionswelle) und an der Oberfläche (Rayleigh-Welle) sowie allfällig auftretender Reflexions- und Refraktionseffekte auf das Gebäude kann durch die Messungen erfasst werden. Anders gesagt, kann das System Boden-Bauwerk als Gesamtes auf Basis tatsächlicher Auswirkungen und frei von Annahmen und Abschätzungen analysiert werden.

In der Kirche wurden im Bereich der Apsis insgesamt sieben Beschleunigungssensoren angebracht. Hinter dem Altar am Fundament innen wurden drei jeweils in Süd-Nord, in Ost-West und in Lotrichtung orientierte Sensoren angebracht. Oberhalb des Kirchengewölbes, an der Mauerkrone der Apsis, etwa über dem ersten Sensor-Trio wurden 3 weitere ident orientierte Sensoren befestigt. Der siebte Beschleunigungsaufnehmer wurde im nördlichen Seitenschiff nahe der Mauerkrone angebracht und in Ost-West Richtung ausgerichtet.

Die künstliche Wellenanregung erfolgte mit Hilfe eines zylindrischen, gedrungnen Metallkörpers mit einer Masse von rund 1050 kg. Dieser wurde in einem definierten Horizontalabstand vom Bauwerk an einer Kette mit einer Bagger-schaufel bis zu einer definierten Höhe hochgezogen und dann fallen gelassen (Abb. 7). Der so eingebrachte Impuls breitet sich im Boden in Form von Wellen aus und wird auf das Bauwerk übertragen. Die Sensoren messen die auftretenden Beschleunigungsänderungen, woraus in weiterer Folge Frequenzspektren und Schwinggeschwindigkeiten entlang der Sensor-Achsen ermittelt werden können.

Die Abb. 2 gibt das Messschema wieder: Für die Messreihe A erfolgte die Impulsanregung im Abstand von 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m von der Kirche, jeweils aus einer Höhe von 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m.

Für die Messreihe B erfolgte die Impulsanregung im Abstand von 3 m, 4,5 m und 6 m aus identen Höhen wie in Messreihe A.

Sämtliche Messungen wurden mehrfach ausgeführt, um ausreichend Datenmaterial zu erhalten.



Abb. 7: Anordnung zur Impulsanregung

Die Auswertung zeigt, dass die dominant auftretenden Frequenzen der Einheit Boden-Bauwerk im Bereich zwischen 10 und 40 Hz liegen (Abb. 8). Die hervorgerufenen Schwinggeschwindigkeiten betragen an der Mauerkrone bis zu  $\pm 3,0$  mm/s, am Fundament bis zu  $\pm 2,5$  mm/s (Lage, jeweils in einer Komponente), bzw. bis zu  $\pm 5,0$  mm/s in der vertikalen Richtung.

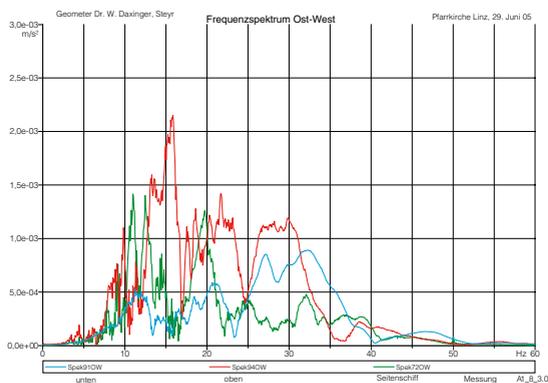


Abb. 8

Die resultierende Schwinggeschwindigkeit (Wurzel aus der quadratischen Addition der Einzelkomponenten der drei orthogonalen Richtungen SN, OW, z) beträgt bis zu knapp 6 mm/s.

Die dominanten Frequenzen berechnet aus Schwingwegen sind  $< 30$  Hz.

Als Ergebnis liegt eine baulastdynamische Analyse des Kirchengebäudes und des Kirchturmes vor, die es dem bau- und bodendynamischen Sachverständigen erlaubt, Grenzwerte und Warnwerte für die auftretenden Belastungen zu definieren. Diese Warnwerte werden während der Bautätigkeit kontinuierlich überwacht und bei Überschreiten derselben wird eine Warnung per SMS-Nachricht an die Verantwortlichen ausgegeben.

Die hierfür notwendige Messkette ist in Abb. 9 dargestellt. Die Signale der Beschleunigungsaufnehmer werden stromproportional zum Messverstärker übertragen. Stromproportionale Signale bieten den Vorteil einer sehr hohen Störsicherheit. Im Messverstärker erfolgt eine Signalkonditionierung, sowie eine 20-Bit analog/digital Umsetzung. Das eingesetzte Messverstär-

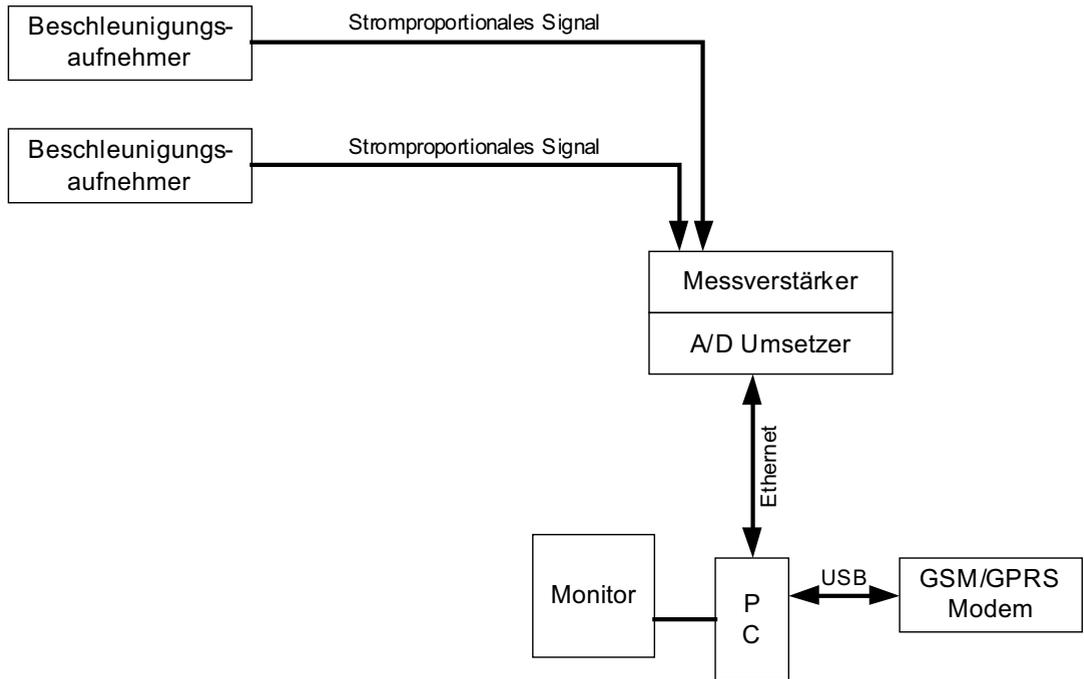


Abb. 9: Messkette

kersystem des Typs MGCplus ist stand-alone fähig, wird aber aus Gründen des Bedienkomforts und der umfangreicheren Möglichkeiten der Online-Visualisierung von einem PC aus gesteuert. Die Messdaten werden im PC gespeichert und überwacht. Bei Eintritt verschiedener per Software vorgegebener Bedingungen (Überschreitung von Grenzwerten, Störungen, etc.) werden verschiedene Kurzmitteilungsnachrichten (SMS) automatisch versandt.

Weiters werden als Ergebnis der baulastdynamischen Analyse die Bauverfahren modifiziert (Art der Schlitzwandherstellung) und Begleitmaßnahmen verfügt: Die Abschirmung der Emissionen erfolgt durch Herstellung einer Düsenstrahlwand zwischen der Tiefgaragenaußenwand und der Kirche.

#### 4. Schlussfolgerungen

Eine apriori baulastdynamische Analyse der durch eine nahe Bautätigkeit gefährdeten Bausubstanz ermöglicht einerseits eine Modifikation der Einbringungsverfahren als auch Schutzmaßnahmen zur Reduktion auftretender Erschütterungen. Damit werden aufwendige Bauvorhaben sicherer für die bauliche Umgebung und das Risiko einer nachhaltigen Schädigung insbesondere einer

historischen Bausubstanz wird erheblich verringert. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Statikern, bau- und bodendynamischen Sachverständigen und Vermessungsingenieuren kann ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung auftretender Beeinträchtigungen geleistet werden. Dies trägt sowohl den Interessen des Bauherrn als auch jenen der Anrainer Rechnung, da einerseits eine verzögerungsfreie Abwicklung der Bautätigkeit gewährleistet ist und andererseits optimale Prävention von Schäden gegeben ist.

#### Literatur

- [1] Adam, D. (2005): Bau- und bodendynamisches Gutachten zum Projekt Tiefgarage Pfarrplatz Linz; Mödling.
- [2] Bretterbauer, K. (1995): Mathematische Methoden in der Geodäsie; Vorlesungsskriptum, Technische Universität Wien.
- [3] Schlemmer, H. (1996): Grundlagen der Sensorik; Verlag Wichmann, Heidelberg.
- [4] Lawrence, A. (1998): Modern Inertial Technology, 2. Auflage, Springer Verlag 1998.

#### Anschrift der Autoren:

Dr. Werner Daxinger, Zivilgeometer, Stadtplatz 24, 4400 Steyr

Dipl.-Ing. Martin Joch, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, Technische Universität Graz, Kopernikusgasse 24/II, 8010 Graz.