# Schwingungsanregung durch Schallwellen

Cosmas Savary Ziegler Consultants Gladachstr. 121 CH-8044 Zürich <u>savary@z-c.ch</u>, Tel +41 44 260 70 13

# 1. Einführung

Kann Schall ein Bauwerk in gefährlichem Ausmass in Schwingung versetzen? Die Antwort auf diese Frage ist nicht offensichtlich – immerhin ist der umgekehrte Effekt bekannt als Körperschall.



Bild 1.1a Der Taj Mahal

Bekannt ist die Beschädigung der Kuppel des Taj Mahal, eines der Wahrzeichen Indiens, als Folge eines in der Nähe stattfindenden Rockkonzertes im Jahre 1996. Der Taj Mahal wurde in den Jahren 1632-52 erbaut. Die Kuppel hat einen Durchmesser von 28 m.

Als es konkret darum ging, ob beim im folgenden beschriebenen Objekt bei Veranstaltungen und Konzerten irgendwelche Grenzwerte zu definieren seien, wurde die Frage zwischen Akustikern und Baudynamikern hin- und hergeschoben, bis das nächste "Event" unmittelbar bevorstand. Angesichts der

knappen Zeit und der beschränkten Ressourcen entschlossen wir uns, das Phänomen am konkreten Objekt experimentell zu untersuchen.

## 1.1. Markthalle Basel

Die Markthalle Basel wurde 1929 errichtet und bis 2004 für den Marktbetrieb genutzt. Die Halle soll neu als "Event"-Halle (Konzerte, Ausstellungen, Parties...) genutzt werden.

Der Entwurf der Markthalle Basel stammt von dem Architekturbüro Gönner & Rhynner. Sie wurde nach den Plänen und Berechnungen von Franz Dischinger, einem Pionier auf dem Gebiet des Stahlbeton- und Spannbetonbaus in Deutschland, ausgeführt. Das Schalengewölbe der Achteckkuppel hat eine Spannweite von 60 m und ist damit die drittgrösste Kuppel aus Stahlbeton. Die Halle steht heute unter Denkmalschutz.

Eine sehr ähnliche Konstruktion, ebenfalls berechnet von Franz Dischinger, ist mit einer Spannweite von 65 m die Markthalle von Leipzig - nach der Form und der Funktion der beiden Kuppeln, "Kohlrabizirkus" benannt. Eine der beiden Kuppeln wird im Winter als Indoor-Schlittschuhbahn genutzt, die andere Kuppel wird seit 2000 ebenfalls für "Events" genutzt.



Die Kuppel hat im Querschnitt die Form eines Zykloids. Das Schalengewölbe besteht im Grundriss aus 8 Segmenten die durch Stahlbetonrippen gehalten werden. Das Schalengewölbe aus Stahlbeton hat eine Stärke von nur 8 cm. Aussen ist das Schalengewölbe durch Eternitplatten abgedeckt. Die Rippen sind mit Kupferblech verkleidet. (siehe Bild 2.1c)

Bild 1.1b Markthalle Basel - Innenansicht

## 2. Messmethodik und Messsyteme

Zur Bestimmung des Einflusses von Schall auf das Bauwerk und zur Quantifizierung der durch Schall verursachten Erschütterungen wurden drei Messungen durchgeführt:

- 1. Messung der Eigenschwingung des Bauwerks ohne gezielte Anregung ("ambient vibration").
- 2. Anregung durch breitbandigen Schall
- 3. Schmalbandige Anregung einzelner Frequenzen.

Um eine für "Events" realistische Situation zu simulieren, wurde als Schallquelle eine konzerttaugliche Verstärker- und Lautsprecheranlage, die etwa 140 dB Schalldruck generieren kann, gemietet.

#### 2.1. Messanordnung

Die Erschütterungen wurden zeitgleich an 4 Punkten mit jeweils 3 orthogonalen Achsen gemessen:



- MP 1: Sensor auf der Kuppellaterne (oberer Kranz)
- MP 2: Sensor in der Mitte eines Segments
- MP 3: Sensor am Rande des Segments, bei Trägerrippe, auf gleicher Höhe wie MP 2
- MP 4: Sensor auf der Kuppelbasis.

Bild 2.1a Anordnung der Sensoren und der Schallquelle im Querschnitt



Die Beschallung erfolgte von der dem gemessenen Segment gegenüberliegenden Seite aus. Die Distanz zum Schalengewölbe beträgt etwa 30 - 40 m

Bild 2.1b Anordnung der Sensoren und der Schallquelle im Grundriss

Aufgrund der knappen zur Verfügung stehenden Zeit konnten die Sensoren auf halber Höhe (MP 2 und MP 3) nicht von innen am Schalengewölbe befestigt werden. Sie wurden von der Kuppellaterne (oben) auf einer Art Schlitten an einer Kette bis zur gewünschten Höhe heruntergelassen.



Bild 2.1c Montage des Sensors in der Mitte der Segmentschale

### 2.2. Messsysteme

Für die Erschütterungsmessung wurden 4 MR2002-CE verwendet. Die Messgeräte waren in einem Netzwerk mit dem NCC Netzwerkcontroller. Einerseits war dies hilfreich zum gleichzeitigen Starten der Messung und zum sofortigen Zugriff auf die Messwerte der nicht gut zugänglichen Instrumente, andererseits auch aus Sicherheitsgründen – das Setzen von Alarmschwellen in den Messgeräten hätte im Falle einer übermässigen Beanspruchung des Bauwerks einen sofortigen Stopp der Beschallung ermöglicht.

Für die Messung des Schalls in Terzbandspektren wurde ein Norsonic NOR121 Schallananlysator eingesetzt. Das Schallmessgerät war mit der Erschütterungsmessung gekoppelt, sodass die beiden Systeme synchron aufzeichnen.

# 3. Messergebnise

### 3.1. "Ambient Noise"

Diese Messungen zeigen nicht für alle Standorte eine eindeutige Eigenfrequenz. Die dominanten Frequenzen liegen im Bereich 4-30 Hz. Beispielhaft wird in Bild 3.1 a eine Registrierung des Zeitverlaufs und das gemittelte Amplitudenspektrum für den Standort MP 2 (Segmentmitte) gezeigt. Das Schalensegment schwingt in radialer Richtung. In tangentialer Richtung sind die Schwingungen sehr schwach







Bild 3.2c Amplitudenspektren des Zeitverlaufs aus Bild 3.2b

#### 3.2. Breitbandiger Schall

Der generierte breitbandige Schall ist ein "rosa" Rauschen (wird auch als 1/f Rauschen bezeichnet). In der Akustik wird das 1/f-Rauschen als ein Geräusch empfunden, bei dem ein durchschnittlicher Mensch alle Frequenzbereiche des hörbaren Schallspektrums etwa gleich laut empfindet. Die Leistungsdichte des Frequenzspektrums nimmt dabei zu höheren Frequenzen hin um 3 Dezibel pro Oktave ab. Die Leistungsdichte für jedes Terzband ist gleich.

Bild 3.2a zeigt das gemessene Spektrum des "rosa" Rauschen. Bei Frequenzen < 40 Hz fällt der Schallpegel aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Schallquelle langsam ab



Bild 3.2a Schalldruckspektrum (gemessen) bei "rosa" Rauschen

Die Messungen beim Standort MP2 zeigen, dass das Schalensegment mit ca. 4.3 mm/s in vertikaler und mit ca. 1.7 mm/s in horizontaler Richtung schwingt. Offenbar wird das Schalengewölbe durch den Schall angeregt und schwingt mit Frequenzen im Bereich 35 - 50 Hz, mit einer Spitze bei 42 Hz (siehe Bild 3.2c).



**Bild 3.2b** Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit beim Standort MP2 in - von oben nach unten - tangentialer, radialer und vertikaler Richtung während der Anregung mit "rosa" Rauschen



Bild 3.2c Amplitudenspektren des Zeitverlaufs aus Bild 3.2b

#### 3.3. Schmalbandige Anregung einzelner Frequenzen

Bei der Anregung einzelner Frequenzen ging es darum, die Resultate der Versuche mit breitbandigem Schall zu verifizieren und Grenzwerte für den Betrieb in der Markthalle festzulegen. Die Beschallung bei den einzelnen diskreten Frequenzen (25, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 160 Hz) erfolgte mit unterschiedlicher Intensität, wie in Bild 3.3a dargestellt, während ca. 30 Sekunden.



Bild 3.3a Beschallungsintensität (gemessen) bei der Anregung einzelner Frequenzen

Die Messungen beim Standort MP2 zeigen, dass das Schalensegment unterschiedlich auf die verschiedenen Frequenzen reagiert, erwartungsgemäss ist die Erschütterung bei der Beschallung im Bereich 40-60 Hz am grössten, da diese Frequenzen in der Nähe der vermuteten Eigenfrequenz des Schalengewölbes liegen.



Bild 3.3b Reaktion bei schmalbandiger Anregung

## 4. Analyse der Messungen

Die Messungen aus 3.3 werden nun mit dem gemessenen Schalldruck im entsprechenden Frequenzband (Bild 3.3a) skaliert. Das Bild 3.3b sieht nun etwas anders aus und die Überhöhung im Bereich 40 Hz und 25 Hz tritt viel klarer zum Vorschein.



**Bild4a** Reaktion bei schmalbandiger Anregung, skaliert auf eine Beschallungsintensität (gemessen) von 90 dB im angeregten Frequenzband

Bei den Werten in Bild 4a handelt es sich um einzelne Messungen bei einzelnen Frequenzen. Die Interpolation zwischen den einzelnen Frequenzen ist für eine erste Annäherung zulässig, ein Frequenz-Sweep (kontinuierliche Variation der Frequenz) gäbe sicher ein genaueres Bild. Leider war dies mit der zur Verfügung stehenden Ausrüstung nicht möglich.

### 4.1. Reaktion auf Anregung mit einzelnen Frequenzen

In den meisten Fällen schwingt das Schalensegment in alle Richtungen mit der durch den Schall angeregten Frequenz – in gewissen Fällen hat die gemessene Schwingung aber auch eine andere dominante Frequenz wie die Anregung. Die Bilder 4.1a zeigen den Zusammenhang zwischen Anregung und Reaktion.





**Bild4.1a** Frequenz der Anregung (X-Achse) und Hauptfrequenz der in der Mitte des Schalensegments gemessenen Erschütterung (Y-Achse). Der Durchmesser der Punkte steht für die Stärke der gemessenen Erschütterung (Messwerte skaliert auf einen Schalldruck von 90 dB im entsprechenden Frequenzband).

Bild 4.1b zeigt Anregung mit 40 Hz bei der das Schalensegment in allen Richtungen mit der gleichen Frequenz mitschwingt. Bild 4.1c zeigt die Anregung bei 100 Hz, dabei werden in tangentialer und in vertikaler Richtung tiefe Frequenzen im Bereich 5 - 13 Hz angeregt.



**Bild 4.1b** Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit beim Standort MP2 in - von oben nach unten - tangentialer, radialer und vertikaler Richtung bei der Anregung mit 40 Hz.



**Bild 4.1c** Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit beim Standort MP2 in - von oben nach unten - tangentialer, radialer und vertikaler Richtung bei der Anregung mit 100 Hz.

#### 4.2. Berechnung der anregenden Kraft

Es soll hier auch versucht werden, die anregende Kraft des Schalldrucks zu berechnen. Der Schalldruck p ist definiert als:

 $p (dB) = 20 \log p/p_{ref}$ 

Damit erhält man bei 90 dB Schallpegel einen Druck von 0.63 Pa [N/m<sup>-2</sup>] (RMS), der auf das Schalengewölbe einwirkt. Auf ein Schalensegment sind dies ca. 350 N.

# 5. Bestimmung von Grenzwerten

Ziel der Messungen war das Festlegen von verbindlichen Grenzwerten bezüglich Schall bei "Events" in der Markthalle. Als erstes wurden die Messungen mit den Grenzwerten in der Norm SN 640 312a verglichen:



**Bild 5a** Vergleich der Messwerte (Vektorsumme) bei "rosa" Rauschen mit LAF(max) von 99 dB (gemessen in 30 m von der Schallquelle) mit der SN 640 312a für alle Messpunkte

Das Gebäude wird als "erhöht empfindlich" betrachtet und die Einwirkungsdauer "permanent". Die Grenzwerte werden in Segmentschalenmitte deutlich überschritten, die Norm gilt allerdings für Messpunkte "an Randzonen von Deckenfeldern". Da wird die Norm knapp eingehalten.

Eine fundierte Ermittlung der maximal zulässigen Beanspruchung der filigranen Betonkonstruktion war in der kurzen Zeit nicht möglich, insbesondere, da nichts über die Qualität und die Alterung des Betons bekannt ist. Die Grenzwerte wurden deshalb in Anlehnung an die Norm SN 640 312a "auf der sicheren Seite" festgelegt. Die Grenzwerte der Norm wurden in Anbetracht der grossen Tragweite eines allfälligen Schadens um den Faktor 5 reduziert. Somit ist bei allen Messpunkten ein v<sub>r</sub> max (Vektorsumme) von 0.4 mm/s zulässig.

Für die Festlegung der frequenzabhängigen Grenzwerte wurden die Messungen mit schmalbandinger Anregung bei diskreten Frequenzen verwendet. Für jede Messung wurde das Verhältnis zwischen der maximalen Vektorsumme aller Messpunkte und dem maximal zulässigen Wert (0.15 mm/s Vektorsumme für jede der angeregten Frequenzen) berechnet und der jeweils gemessene Schalldruck (in Pa) mit dem entsprechenden Faktor multipliziert. Bei Überlagerung mehrerer Frequenzen wird damit der oben postulierte Grenzwert eingehalten. Das entstandene Grezwertspektrum wurde A-bewertet und ergibt die in Bild 5b dargestellten frequenzabhängigen Grenzwerte.



Bild 5b Zulässiger Schallpegel in dBA für  $v_r$ -max < 0.15 mm/s

## 6. Schlussfolgerungen

Schall kann eine Kuppel in gefährliche Schwingungen versetzen. Erwartungsgemäss ist die Reaktion des Gebäudes frequenzabhängig.

Eine Simulation von lauten "Events" braucht eine entsprechend leistungsfähige Beschallungsanlage.

Mit einem Sweep im interessierenden Frequenzbereich (20-150 Hz) könnten die kritischen Frequenzen noch genauer bestimmt werden.

Bei "Events" ist eine kombinierte Schall- und Erschütterungsüberwachung notwendig.