

Erschütterungsanalyse bei einer Walzenmühle in M'Sila /Algerien

Markus Ringger, Dr. phil. Physiker, Gruner AG Brugg / Basel

Zusammenfassung

Dieser Beitrag soll zeigen, wie durch die Anwendung von Auswertungsgrößen für den MR 2002, die über ein einfaches Fourierspektrum hinausgehen, zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden können. Speziell wird dies am Beispiel der Analyse einer Walzenmühle mit Hilfe von Autokorrelations-Funktion und der Kreuzkorrelations-Funktion gezeigt. So konnte der hauptsächliche Schwingmode der Walzenmühle identifiziert und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächen-Welle in unmittelbarer Umgebung der Mühle bestimmt werden. Dies half, den Grund für die übermässigen Vibrationen in einer nahegelegenen Unterstation zu finden und entsprechende Massnahmen zu planen

1 Einleitung

In M'Sila/Algerien wurde vor kurzem eine neue Zementfabrik in Betrieb genommen.



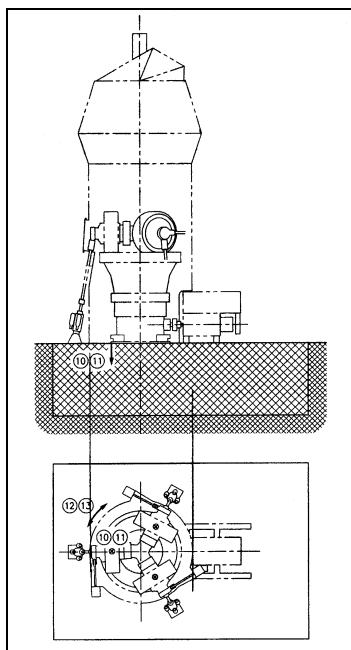
Bild 1: **Ansicht des Zementwerkes in M'Sila** Deutlich sichtbar ist von links nach rechts: Rohstofflager, Förderanlage für Rohstoffe, Kalkmühle und Silos der Ausgangsstoffe für den Rohrofen, Rohrofen, Klinkerlager, Förderanlage mit Klinkermühle, Zementsilos

Ein wichtiges Teil eines solchen Zementwerkes ist die Kalkmühle. Im Fall von M'Sila handelt es sich um eine Walzenmühle, die den Kalk zu Pulver zermalmt.



Bild 2: **Zylinderförmige Walzenmühle** Der zu Pulver gemahlene Kalk wird mittels heisser Luft und starken Gebläsen aus der Mühle in die dahinterliegenden Silos transportiert. Rechts von der Mühle steht die Unterstation mit den von aussen zugänglichen Transformatoren und den Steuerschränken im Innern.

Die Schwingungen des Fundaments werden durch die impulsartigen Kräfte verursacht, welche die Walzen auf das Fundament der Mühle ausüben.



Grafik 1: **Aufbau der Walzenmühle** Das Mahlgut wird auf den Drehteller aufgebracht und durch drei darauf laufende Walzen zermalmt. Der Teller dreht dabei mit einer Umlaufgeschwindigkeit von 25 Umdrehungen pro Minute. Bezogen auf die 3 Walzen heisst dies, dass ein Punkt auf dem Drehteller alle 0.8 s unter eine Walze gerät. Da der Anpressdruck der Walzen auf den Teller nicht durch das Gewicht der Walzen sondern hydraulisch sichergestellt wird, können leichte Walzen verwendet und somit die Trägheitskräfte reduziert werden. Die Mühle steht auf einem 4.5 m dicken Betonfundament und wiegt gesamthaft 704 Tonnen.

Das Fundament der Mühle befindet sich direkt auf einer siltig / tonigen Schicht.



Bild 3: **Oberer Aufbau des Untergrundes in M'Sila** Unter einer harten, verwitterten Schicht von ca. 3 - 5 m Mächtigkeit folgt eine bis zu 17 m dicke, siltig / tonige Schicht über einer harten Tonschicht.

Schon kurz nach Inbetriebnahme zeigten sich unüblich starke Vibrationen in der Nachbarschaft der Walzenmühle, wobei diese Vibrationen nicht überall gleich stark auftreten. Die Vibrationen wirkten sich speziell auf die neben der Mühle gelegene Elektro-Unterstation aus, wo es zu starken Schwingungen der Steuerschränke kam.



Bild 4: **Steuerschränke in der Unterstation** Es wurden die Vibrationen der Decke über UG und die Vibrationen auf den Steuerschränken gemessen. Dabei wurden Resonanzfrequenzen der Decke zwischen 15 und 20 Hz beobachtet. In der Unterstation lag keine homogene Decke vor. Da die Steuerschränke von unten her angeschlossen werden, sind breite Schlitz in die Decke geschnitten. Die Decke im Bereich der Schränke besteht somit nur aus einer Reihe von Balken.

Die Gruner AG wurde beauftragt

- > den Grund für die unerwartet hohen Vibrationen zu eruieren und
- > Massnahmen für die Reduktion der Vibrationen vorzuschlagen.

2 Vorgehensweise

Für die Analyse der Schwingungen werden die Autokorrelations- und die Kreuzkorrelations-Funktion verwendet. Diese Funktionen erlauben eine vertiefte Darstellung der kausalen Zusammenhänge zwischen zwei Zeitsignalen.

Die Kreuzkorrelations-Funktion $R_{xy}(\tau)$ für zwei ergodische Prozesse $x(t)$ und $y(t)$ ist wie folgt definiert (ergodisch heisst, dass das Schar-Mittel durch das Zeit-Mittel ersetzt werden kann):

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau)$$

Wenn $x(t) \equiv y(t)$ spricht man von der Autokorrelations-Funktion. Mit Hilfe der Auto- und der Kreuzkorrelations-Funktion können im Besonderen Uebertragungsfunktionen bestimmt werden und daraus Grössen wie Dämpfungen und Zeitverzögerungen abgeleitet werden.

Die Kreuzkorrelation-Funktion hängt mit dem Spektrum $S_{xy}(f)$ wie folgt zusammen:

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \cdot e^{-2\pi i f \tau} \cdot d\tau$$

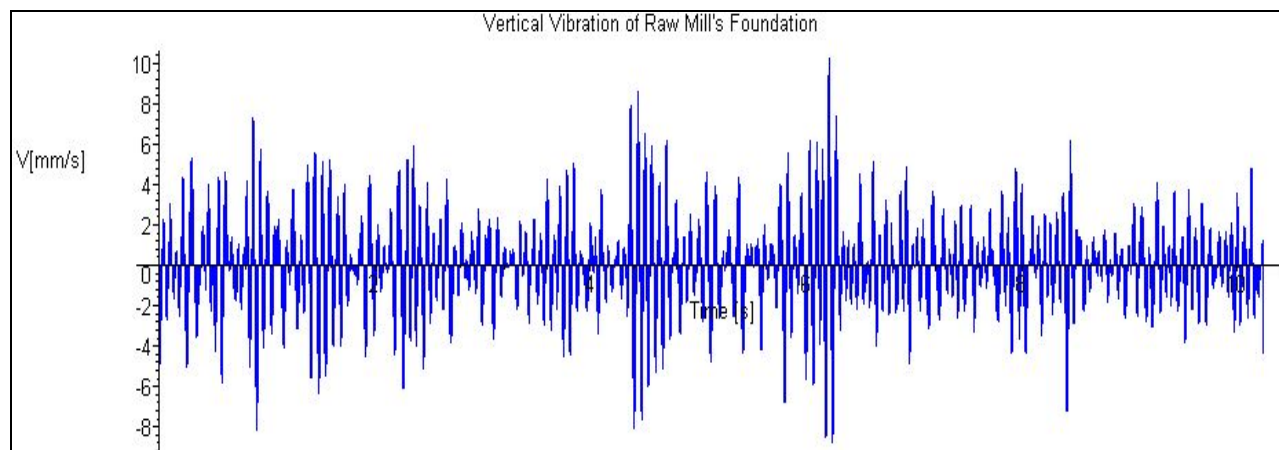
Somit führt eine Zeitverzögerung in der Kreuzkorrelation-Funktion zu einer Phasenverschiebung im Spektrum nach:

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau - \tau_0) \cdot e^{-2\pi i f \tau} \cdot d\tau = e^{2\pi i f \tau_0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \cdot e^{-2\pi i f \tau} \cdot d\tau$$

3 Analyse

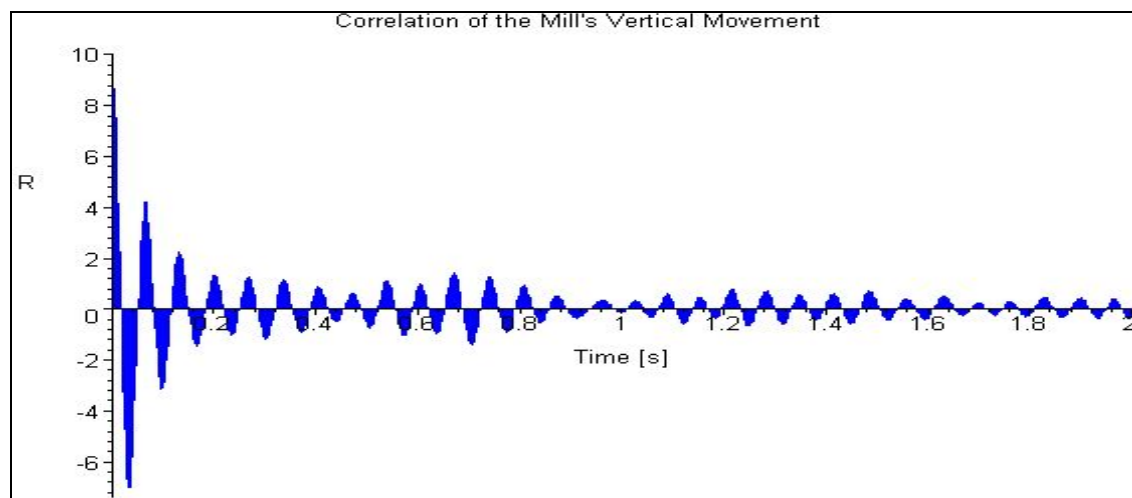
3.1 Vibrationen des Fundaments

Zuerst wurden die Vibrationen auf dem Fundament der Mühle selbst gemessen.



Grafik 2: Vertikale Vibration des Mühlenfundaments Die Messung wurde am Fuss der Mühle durchgeführt

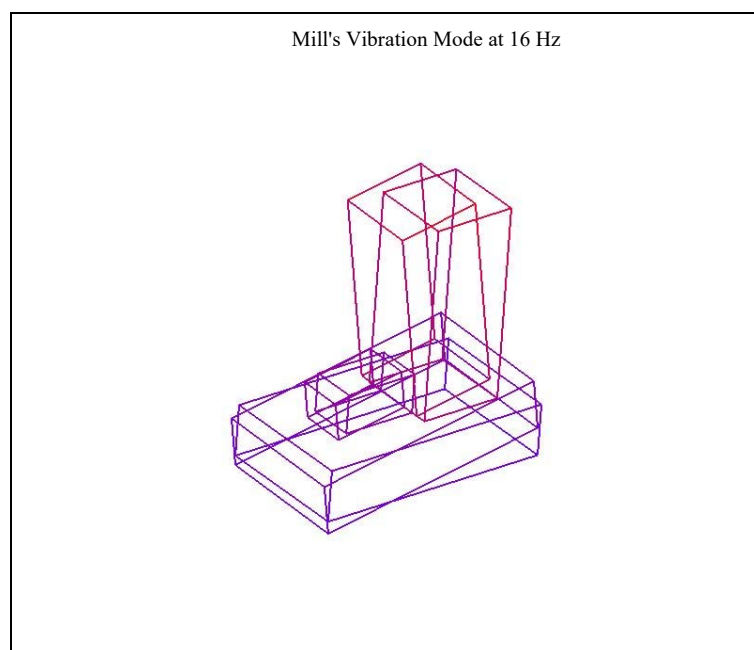
In obiger Grafik kann man erahnen, dass Schwingungen vorliegen. Aber es ist etwas schwierig, die Frequenz oder Dämpfungen zu bestimmen. Besser wird es, wenn man die Autokorrelation betrachtet.



Grafik 3: **Autokorrelationsfunktion der vertikalen Vibration der Mühle** Schön sieht man neben der gedämpften Hauptschwingung von 16 Hz auch ein zweites Maximum nach etwa 0.7 s. Dies stammt von der nachfolgenden Walze. Theoretisch müsste das zweite Maximum nach 0.8 s erfolgen. Aber vermutlich werden die Bruchstücke beim Brechen etwas nach vorne gestossen, sodass diese etwas früher bei der nächsten Walze eintreffen.

Die Form der Autokorrelationsfunktion ist genau diejenige, die man von einer gedämpften Schwingung erwarten würde. Das Fundament führt demnach bei jedem Schlag auf die Walzen und den Drehteller, der durch die Zertrümmerung der Kalkbrocken entsteht, eine gedämpfte Schwingung aus. Gut kann man der Grafik die Hauptfrequenz und die Dämpfung der vertikalen Schwingung entnehmen. Danach schwingt das Fundament auf dem Untergrund mit einer Frequenz von ca. 16 Hz.

Durch Korrelation dreier auf das Fundament installierter Messgeräte kann auch der Schwingmode bei 16 Hz identifiziert werden.



Grafik 4: **Schwingmode bei 16 Hz** Aufgrund der Hebelwirkung erfolgt eine Nick-Bewegung der Mühle und deren Fundament.

Damit kann erklärt werden, warum die Vibrationen nicht überall gleich stark auftreten. Diese Art der Schwingung wirkt wie ein Strahler 1. Ordnung (Dipol) und durch Interferenzen sind die Vibrationen in verschiedener Richtung unterschiedlich stark.

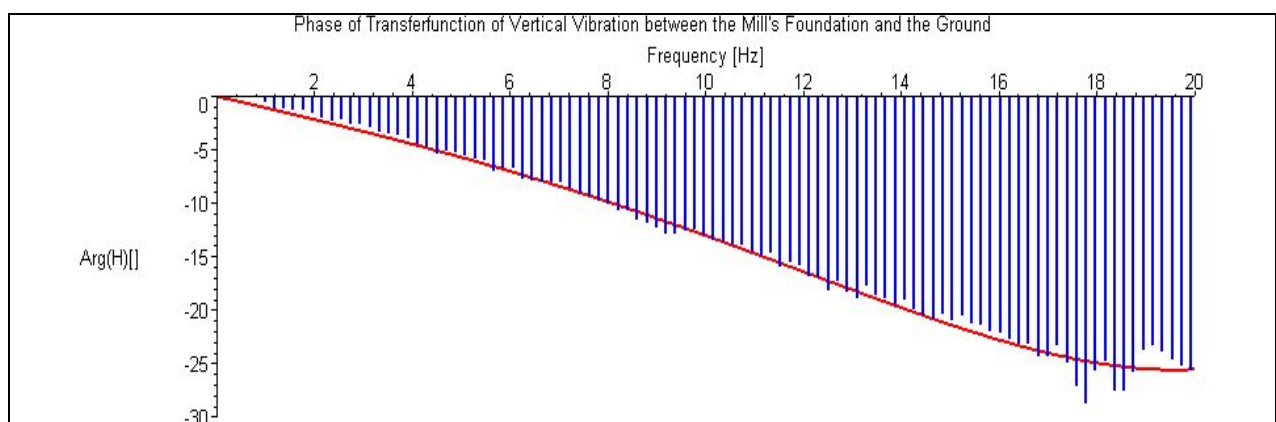
3.2 Ausbreitung der Vibrationen

Durch Plazieren eines Sensors auf dem Fundament und zeitgleich am Boden in unterschiedlicher Distanz zum vorderen Rand des Fundaments (bei 4.0 m, 8.5 m, 16.5 m, 32.5 m, 47.0 m) kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächen-Wellen gemessen werden.



Bild 5: Messen der Vibrationen in einem Abstand zur Mühle

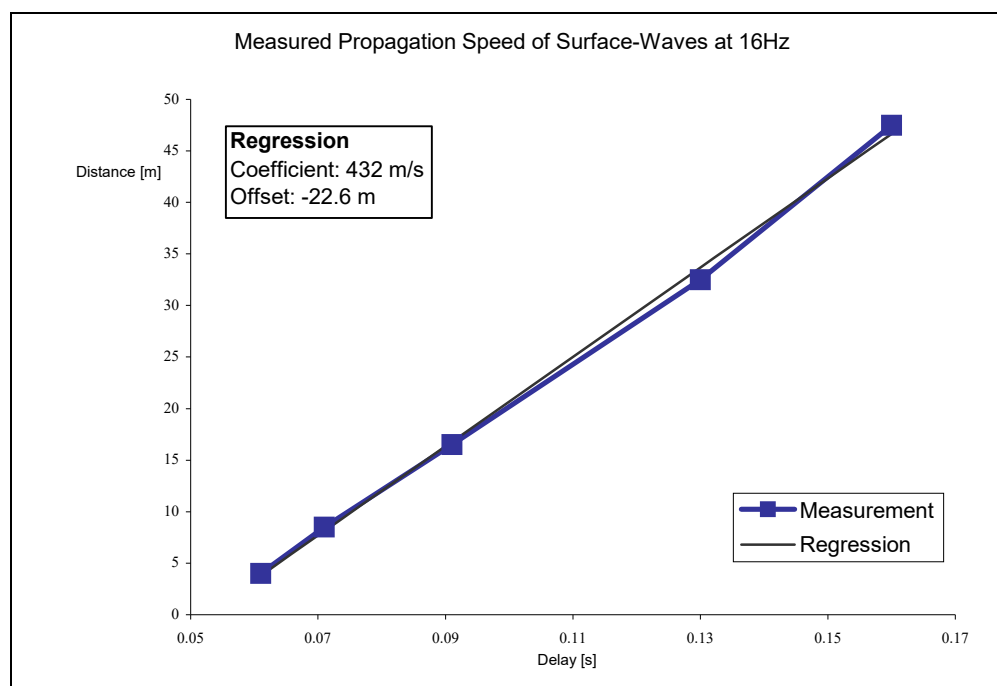
Mit Hilfe der Kreuzkorrelations-Funktion wird die Zeitverzögerungen bestimmt. Die Zeitverzögerung führt zu einer mit der Frequenz ändernden Phase im Kreuz-Spektrum.



Grafik 5: Phase des Kreuz-Spektrums zwischen der Vibration der Mühle und des Bodens in 47 m Entfernung. Zur einfacheren Anschaulichkeit ist neben der gemessenen Phase (blau) ein Spline 3. Grades (rot) eingezeichnet. Je steiler die Phasenänderung desto grösser ist die Zeitverzögerung und desto kleiner ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Damit ist ersichtlich, dass in diesem Fall Dispersion vorliegt.

Da der Boden geschichtet ist und die Tiefe einer Oberflächen – Welle von der Frequenz abhängt, kann die Frequenz einer Oberflächen – Welle dazu verwendet werden, die Eigenschaften eines Bodens zu testen. Je tiefer die Frequenz ist, desto tiefer "dringt" die Oberflächen – Welle in den Boden ein (nebenbei: dies ist die Grundlage der sog. SASW - Methode, Spectral Analysis of Surface Waves). Da das Fundament gross ist und eine Nickbewegung ausführt, handelt es sich nicht um eine reine Punktquelle. Deshalb sind die Messwerte für eine vertiefte quantitative Analyse zur Bestimmung der Bodenparameter in Abhängigkeit der Tiefe schlecht geeignet.

Aber immerhin erlauben die Messwerte eine qualitative Aussage. Klar nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit steigender Tiefe zu und auch bei geringer Tiefe ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht. Nur in einem mittleren Bereich ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit minimal (maximale Steigung der Phase). Somit lässt sich die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit bei 16 Hz einfach ermitteln.



Grafik 6: **Regression der Zeitverzögerung in Funktion der Distanz zum vorderen Rand des Mühlenfundaments (4.0 m, 8.5 m, 16.5 m, 32.5 m und 47.0 m) bei 16 Hz** Danach ergibt sich eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Oberflächen-Welle von 432 m/s. Dies ergibt einen mittleren Schermodul des Untergrundes von 373 MPa. Die Regression ergibt auch einen Offset. Dieser stammt daher, dass die Distanzen vom vorderen Rand des Fundaments gemessen wurden, der Schwerpunkt der Mühle sich aber am hinteren Rand befindet. Tatsächlich befindet sich der Schwerpunkt 14.2 m vom vorderen Rand entfernt.

Nimmt man den mittleren, experimentell bestimmten Schermodul von 373 MPa und berechnet rückwärts die Resonanzfrequenz des Fundaments, so erhält man eine Frequenz von 16.0 Hz, dies in Übereinstimmung mit der gemessenen Resonanzfrequenz. Die Oberflächen-Welle hat dabei eine Wellenlänge von ca. 27 m.

4 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Analyse der Ausbreitung kann darauf geschlossen werden, dass die übermäßigen Vibrationen auf den Untergrund zurückzuführen sind: eine weiche, siltig / tonige Schicht. Dies führt zu tieferen Resonanz-Frequenzen der Mühle als üblich und die Resonanzfrequenz fällt in den Bereich der Eigenschwingungen der Decke der Unterstation.

Grundsätzlich muss in Zukunft bei solchem Untergrund eine spezielle Lagerung des Mühlenfundaments in Betracht gezogen werden. Da dies in M'Sila aber nachträglich nicht mehr möglich ist, können nur noch passive Massnahmen zum Einsatz kommen.

Eine Möglichkeit wäre der Einbau eines Bodenschlitzes. Aber aufgrund einer Wellenlänge von 27 m wäre ein Schlitz von vergleichbarer Tiefe notwendig und deshalb zu aufwendig. Darum blieb nur die Versteifung der Decke der Unterstation durch den Einbau von Stahlstützen. Zusätzlich wurden die Steuerschränke, um die Vibrationen weiter zu reduzieren, gegeneinander versteift.



Bild 6: **Beispiel einer nachträglich eingebauten Stahlstütze im Untergeschoss der Unterstation** Gut ersichtlich ist, wie aufgrund der Schlitz unter den Steuerschränken nur noch Balken verbleiben.