

# Erschütterungsausbreitung bei Stanzmaschinen

Martin Stolz, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, 3401 Burgdorf

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Betriebe die mit Bearbeitungsmaschinen arbeiten verursachen Erschütterungen. Je nach Anwendung können sie unterschiedliche Einflüsse haben.

Schnell-laufende Kartonstanzmaschinen (Bild 1) erzeugen Vibrationen auf der Geschossdecke, welche die Maschine selbst im Betrieb behindern. Der Maschinenhersteller limitiert in diesem Fall die Schwingungsamplituden auf der Geschossdecke, indem er eine minimale Eigenfrequenz der Decke vorschreibt. Dazu kommen Vibrationen, welche sich auf der Geschossdecke ausbreiten und angrenzende Maschinen wie zum Beispiel Druckmaschinen im reibungslosen Betrieb beeinträchtigen. Stanzmaschinen für diese Anwendung können auf Geschossdecken oder auf Blockfundamenten direkt auf dem Baugrund aufgestellt werden.



Bild 1 Kartonstanzmaschine Bobst MasterCut 145 PER  
(Quelle: [www.bobst.com](http://www.bobst.com))

Pressen, welche für die Erstellung von geformten Blechen, zum Beispiel für die Autoindustrie, eingesetzt werden, erzeugen Schläge, welche in der Nachbarschaft deutliche Immissionen und Belästigungen hervorrufen können. Solche Maschinen (Bild 2) werden in der Regel auf Blockfundamenten (Bild 3) direkt auf dem Baugrund aufgestellt.



Bild 2 Säulenpresse Neff 4SP250 (Quelle [www.neff-pressen.de](http://www.neff-pressen.de))



Bild 3 Beispiel eines Blockfundaments

Diese Pressen sind an sich zwar ebenfalls anfällig auf Bewegungen im Betrieb. Zusätzlich werden hier jedoch Emissionen erzeugt, welche in der Halle und in der näheren Umgebung zu Problemen führen können. Beschwerden von Nachbarn sind häufig und führen zu langwierigen Diskussionen. Bei neuen Baubewilligungsverfahren werden deshalb Auflagen bezüglich Immissionen in der Nachbarschaft gemacht.

In dieser Abhandlung wird auf die Prognose von Erschütterungen in der Nachbarschaft eingegangen. Die Beurteilung der Immissionen auf Nachbarn und die Beeinträchtigung der Maschine selbst durch die auftretenden Schwingungen wird nicht behandelt.

Nach der Darstellung des Berechnungswegs wird kurz auf die Aussagekraft einer solchen Prognose eingegangen, indem alle Eingangsgrößen mit einer Zuverlässigkeit verknüpft werden.

## 1.2 Methodik

Das Vorgehen zur Bestimmung der Immissionen auf einem Nachbargrundstück kann in unabhängige Schritte aufgeteilt werden. Bild 4 zeigt ein schematisches Modell einer Maschine auf einem Blockfundament.

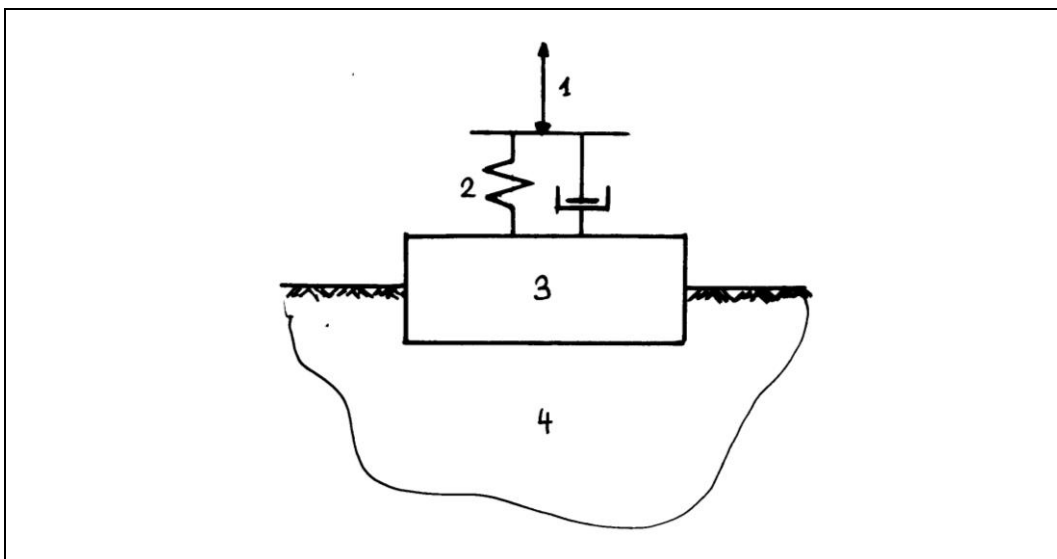


Bild 4 Maschine auf einem Blockfundament

- 1: Anregung der Maschine; 2: Feder und Dämpfer
- 3: Betonfundament; 4: mitwirkender Baugrund

Zur Prognose von Erschütterungen in der Nachbarschaft sind folgende Arbeitsschritte nötig:

- Bestimmung der Anregung durch die Maschine oberhalb der Federn
- Bestimmung der Schwingungseigenschaften des Blockfundaments, welches durch die Federn angeregt wird
- Bestimmung der Amplituden unterhalb des Blockfundaments auf dem Baugrund
- Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens im Baugrund
- Bestimmung der Ankoppelung an ein Nachbargebäude und Verstärkung im Gebäude

Diese Methodik basiert auf der Annahme, dass die Schwingungen der Maschine nach jedem Schlag abklingen, bevor der nächste Schlag auftritt. Diese Annahme ist zulässig, weil mit einer solchen Maschine etwa 30 Bleche pro Minute geformt werden. Dies ergibt eine Anregung von  $f = 0.5$  Hz. Bild 5 zeigt, wie dieser Ausschwingvorgang aussieht.

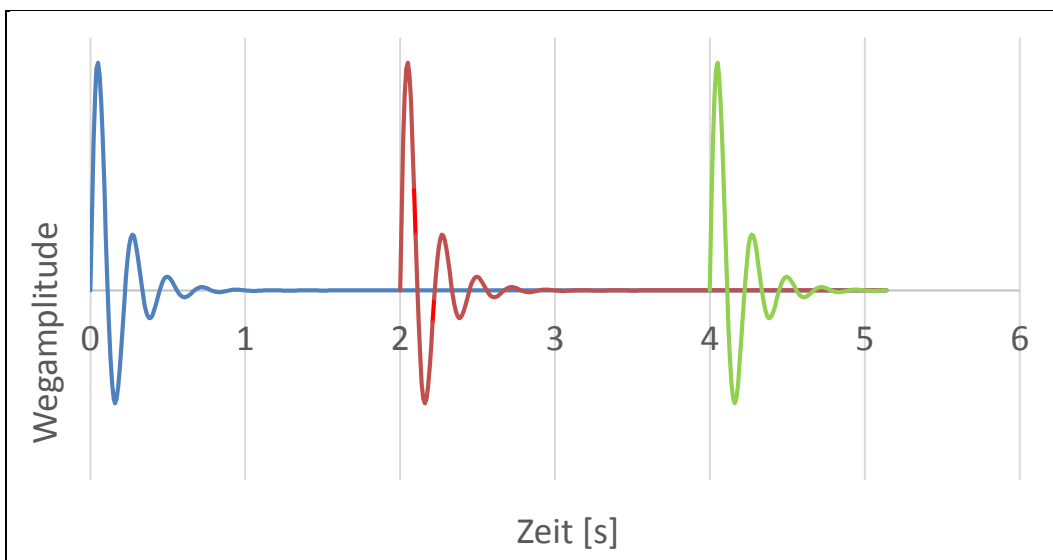


Bild 5 Ausschwingvorgang zwischen den Pressvorgängen (0.5 Hz) unter Annahme einer Eigenfrequenz der Feder von ca. 5 Hz und Dämpfung von 20%



### 3 Berechnungen

Die im Folgenden angegebenen Methoden bzw. Formeln sind entweder aus der allgemeinen Theorie des Einmassenschwingers hergeleitet oder dem Buch

[1] Studer J., Ziegler A., Bodendynamik, Springer Verlag Berlin, 1986

entnommen.

#### 3.1 Betrieb der Maschine und Anregung der Federn auf dem Fundament

Die Maschine wird als Einmassenschwinger mit einem Freiheitsgrad modelliert. Somit lässt sich auch nur eine vertikale Eigenfrequenz bestimmen. Die Zahlenwerte in Klammern sind die Ergebnisse mit den Eingabegrößen aus Kapitel 2. Kipp- und Torsionsschwingungen auf den 4 bis 6 einzelnen Federn können mit diesem Modell nicht untersucht werden.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_f}}; f = \frac{\omega}{2\pi} (\omega=26.3 \text{ s}^{-1}; f=4.2 \text{ Hz}) \quad [1]$$

Die maximale Geschwindigkeit auf der Feder ergibt sich aus dem Impuls.

$$v = \frac{I}{m_f} (v=88.4 \text{ mm/s}) \quad [2]$$

Der maximale Weg ergibt sich aus  $v$  und  $\omega$ .

$$d = \frac{v}{\omega} (d=3.32 \text{ mm}) \quad [3]$$

Die maximale Kraft auf die Federn entsteht aus der Federkonstante  $k$  und der Amplitude  $d$

$$F = k * d (F=134 \text{ kN}) \quad [4]$$

### 3.2 Anregungen des Fundaments durch die Federn

Wie in Bild 5 gezeigt, wirken die Pressvorgänge als einzelne Ereignisse auf das Blockfundament. Deshalb darf dieses wiederum als durch die Federkraft angeregter Einmassenschwinger betrachtet werden.

Der Berechnungsweg ist in diesem Fall komplizierter, da nun die Federeigenschaften des Baugrunds ermittelt werden müssen. Die genaue Beschreibung ist in [1] zu finden. Grundsätzlich beruht er jedoch auch diesmal auf der Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Steifigkeit und der Masse.

Die Federsteifigkeit  $k_{dyn}$  des Baugrunds ist nach [1] von folgenden Bodenkennwerten abhängig:

- Scherwellengeschwindigkeit des Bodens  $v_s$
- Dichte des Bodens  $\rho$
- Querdehnungszahl des Bodens  $\nu$
- Ersatzradius  $r$  des flächengleichen kreisförmigen Fundaments

$$k_{dyn} = \frac{4 \cdot G \cdot r}{1 - \nu}, \text{ wobei } G = v_s \cdot \rho \text{ und } a \cdot b = \pi \cdot r^2 \quad (k_{dyn} = 1'263'5521 \text{ kN/m}) \quad [5]$$

Die Masse des Fundaments wird nach [1] um einen Anteil des mitwirkenden Bodens erhöht. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

- Bestimmung des Massenverhältnisses  $B$  der mitwirkenden Masse
- Bestimmung der fiktiven, zusätzlichen Masse  $m_{Boden}$
- Bestimmung der gesamten Masse  $m_{gesamt}$

$$B = m_{Fund} \frac{1 - \nu}{4 \cdot \rho \cdot r^3} \quad (B = 0.1699) \quad [6]$$

$$m_{Boden} = 0.27 \frac{m_{Fund}}{B} \quad (m_{Boden} = 65'155 \text{ kg}) \quad [7]$$

$$m_{gesamt} = m_{Fund} + m_{Boden} \quad (m_{gesamt} = 41'000 + 65'255 = 106'155 \text{ kg}) \quad [8]$$

Die Eigenfrequenz des Blockfundaments  $f_{Fund}$  berechnet sich nun aus der Steifigkeit des Baugrunds  $k_{dyn}$  und der gesamten Masse des Blockfundaments und des mitwirkenden Bodens  $m_{gesamt}$ .

$$\omega_{Fund} = \sqrt{\frac{k_{dyn}}{m_{gesamt}}}, f_{Fund} = \frac{\omega_{Fund}}{2 * \pi} \quad (f_{Fund}=17.4 \text{ Hz}) \quad [9]$$

Nachdem das Verhalten des Fundaments bestimmt ist, muss noch die maximale Schwinggeschwindigkeit des Fundaments bestimmt werden.

Dazu werden folgende Größen benötigt:

- Dynamischer Verstärkungsfaktor  $V$
- Dämpfung des Fundaments  $D_{Fund}$
- Frequenzverhältnis Anregung zu Eigenfrequenz  $\beta$
- Statische Einsenkung  $d_{stat}$
- Dynamische Einsenkung  $d_{dyn}$

$$D_{Fund} = \frac{0.425}{\sqrt{B}} \quad (D_{Fund}=1.03) \quad [10]$$

$$\beta = \frac{f}{f_{Fund}} \quad (\beta=0.24) \quad [11]$$

$$V = [(1 - \beta^2)^2 + (2D\beta)^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (V=0.937) \quad [12]$$

$$d_{stat} = \frac{F}{k_{dyn}} \quad (d_{stat}=0.1063 \text{ mm}) \quad [13]$$

$$d_{dyn} = d_{stat} * V \quad (d_{dyn}=0.0997 \text{ mm}) \quad [14]$$

$$v_{Fund} = \omega * d_{dyn} \quad (2.66 \text{ mm/s}) \quad [15]$$



### 3.3 Ausbreitung der Erschütterung und Immission auf Nachbarn

Nachdem nun bekannt ist, wie das Blockfundament schwingt, kann angenommen werden, dass die errechnete Schwinggeschwindigkeit  $v_{\text{Fund}}$  direkt auf den Boden übertragen wird.

Zur Berechnung der Immission in einer gewissen Distanz können Messungen durchgeführt werden. Dazu wird ein Gewicht aus einer definierten Höhe auf den Boden geworfen. Mit Erschütterungsmessgeräten kann in verschiedenen Distanzen die Anregung gemessen werden. Es ist zu beachten, dass dies nur eine grobe Näherung sein kann. Bild 6 zeigt eine solche Vorrichtung. Die Messkette ist in Bild 7 dargestellt.



Bild 6 Impulsanlage Ziegler Consultants



Bild 7 Messkette Ziegler Consultants im Freien

Bild 8 zeigt die Resultate einer solchen Messung.

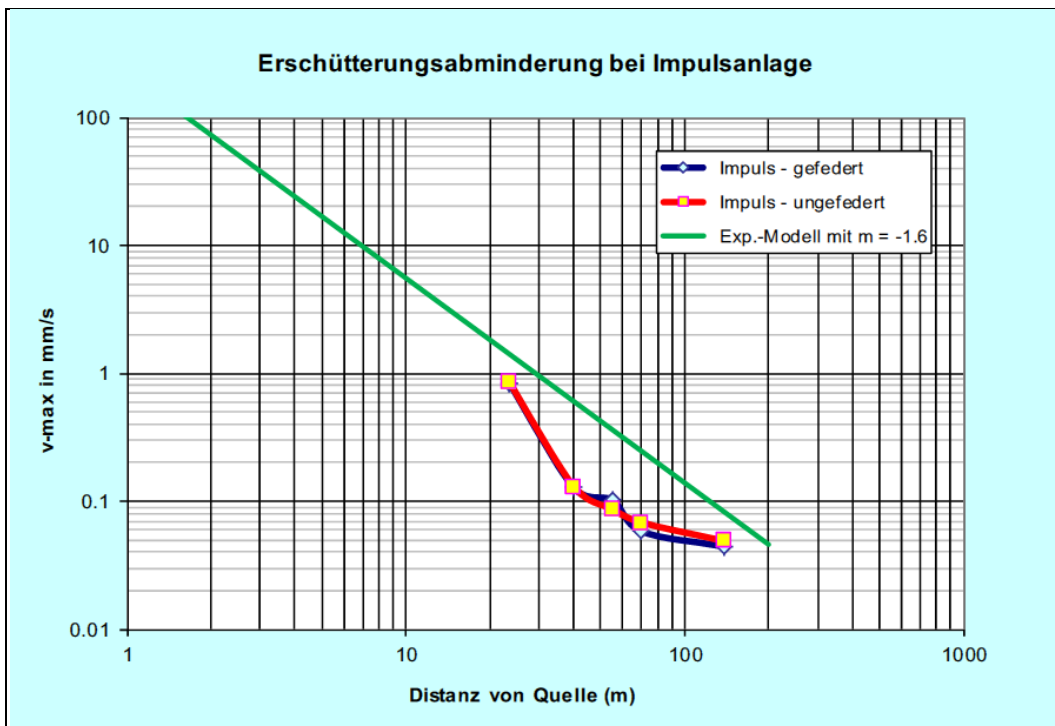


Bild 8 Ausbreitung der Erschütterungen, welche durch die Impulsanlage erzeugt wurden (Quelle: Ziegler Consultants)

Mit unserem Rechenbeispiel würden wir in einer Distanz von 50m vom Fundamentmittelpunkt eine Schwinggeschwindigkeit von  $v \approx 0.005 \text{ mm/s}$  auf dem gewachsenen Boden erhalten.

## 4 Genauigkeit der Prognose

Nachdem nun der Berechnungsgang erläutert ist, werfen wir einen Blick auf die Aussagekraft des Resultats.

In Abschnitt 2, Benötigte Kennwerte, sind Annahmen der Zuverlässigkeit der Eingangsgrössen willkürlich festgelegt worden. Diese müssen für reale Untersuchungen Fallweise bestimmt werden.

Diese Analyse zeigt folgendes Bild:

- Eingangsgrössen mit geringem Einfluss  
Geometrie und Masse des Fundaments
  
- Eingangsgrössen mit mittlerem Einfluss  
Masse der Maschine  
Federeigenschaften  
Impulsanregung
  
- Eingangsgrössen mit grossem Einfluss  
Scherwellengeschwindigkeit des Bodens  
Querdehnungszahl des Bodens  
Abminderung bis zum Empfänger  
Ankoppelung an den Immissionsort und Verstärkung im Gebäude

Dies bedeutet, dass diejenigen Grössen, welche genau bestimmt werden können, da sie aus industrieller Fertigung stammen bzw. mit Baustellengenauigkeit erzeugt werden, einen kleinen bis mittleren Einfluss und diejenigen Grössen, welche nur sehr aufwändig und teuer bestimmt werden können, einen grossen Einfluss haben.

## 5 Schlussfolgerungen

Für die Abschätzung von Immissionen aufgrund von benachbarten Maschinenfabriken bestehen Rechenmethoden. Diese Methoden basieren auf Eingangsgrössen, welche einen unterschiedlichen Einfluss auf das Resultat haben.

Die kritischen Grössen

- Querdehnungszahl  $\nu$  des Bodens
- Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  des Bodens
- Übertragungsfunktion
- Ankoppelung und Verstärkung im Gebäude

müssen einerseits konservativ eingesetzt und andererseits falls möglich messtechnisch bestimmt werden.

Der Einsatz der gezeigten Impulsanlage ermöglicht eine genauere Prognose der Distanzabhängigkeit, der Ankoppelung ans Gebäude und der internen Verstärkung.

Messungen nach Installation der Maschinen würden es erlauben, die effektiven Immissionen zu bestimmen und somit auch das Rechenmodell, welches doch auf einigen zu hinterfragenden Annahmen beruht, zu eichen.

Die Lebensdauer von technischen Massnahmen wie Feder-Dämpfer-Systemen ist zu berücksichtigen. So ist vorzusehen, dass diese Massnahmen auch ohne grossen Installationsaufwand ersetzt werden können.