

# Einflussparameter bei körperschallbedingter Geräuschentwicklung einer Maschine

Gh. Reza Sinambari

FH Bingen, FB1- Live Science and Engineering, 55411 Bingen am Rhein, E-Mail: sinambari@fh-bingen.de

IBS Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik GmbH, 67227 Frankenthal, E-Mail: mail@ibs-akustik.de

## Einleitung:

Die durch mechanische Wechselkräfte verursachte körperschallbedingte Geräuschentwicklung einer Maschine ist oft für die Gesamtgeräuschentwicklung der Maschine verantwortlich (Beispiel: Getriebegeräusche). Die Reduzierung solcher Geräusche setzt voraus, dass man die maßgebenden Einflussparameter kennt. Hierbei sind neben den Wechselkräften vor allem die Eingangs- und Übertragungsimpedanzen, die u.a. auch das Resonanzverhalten der Strukturen beschreiben, wesentliche Parameter bei der Körperschallentstehung.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die wesentlichen Einflussparameter bei der Entstehung, Übertragung und Abstrahlung der Körperschallschwingungen von Maschinenstrukturen am Beispiel der Geräuschentwicklung eines Maschinengehäuses vorgestellt.

## Schallentstehung durch mechanische Schwingungen

Die abgestrahlte Schallleistung einer schwingenden Struktur (z.B. Maschinengehäuse), nachfolgend korrekt „Körperschallleistung“ genannt, lässt sich wie folgt darstellen [1], [2]:

$$P_K(f) = \sum_{i=1}^N P_{K,i}(f) = \sum_{i=1}^N \rho \cdot c \cdot v_i^2(f) \cdot \sigma_i(f) \cdot S_i \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$P_K$  Gesamtkörperschallleistung

$P_{K,i}$  Teilkörperschallleistung eines Bauteils bzw. der i-ten Teilfläche

$(\rho c)$  Dichte und Schallgeschwindigkeit der umgebenden Luft

$v_i^2$  mittleres Schnellequadrat auf der i-ten Teilfläche

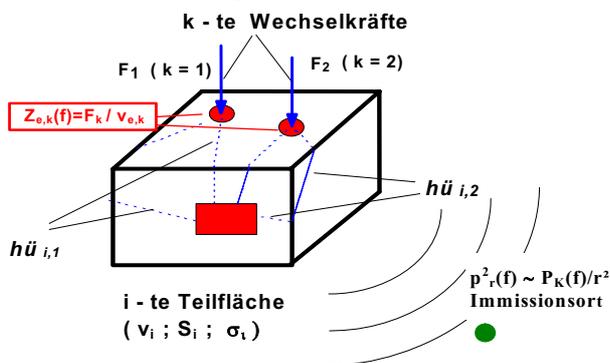
$N$  Gesamtzahl der Teilflächen

$\sigma_i$  Abstrahlgrad der i-ten Teilfläche

$S_i$  i-te Teilfläche der Struktur

$(f)$  bedeutet, dass die angegebenen Größen frequenzabhängig sind

In Bild 1 sind schematisch die Schwingungsanregungen der Teilfläche i eines Modellgehäuses dargestellt [3].



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Schallentstehung durch Wechselkräfte an einem Modellgehäuse

Für die Schwingungsanregungen der i-ten Teilfläche  $S_i$  durch die k-te Wechselkraft  $F_k$  ist vor allem die Einleitungsstelle, die durch die mechanische Eingangsimpedanz  $Z_{e,k}$  definiert ist, von Bedeutung. Die an der Einleitungsstelle  $k$  verursachte Schwingungsgeschwindigkeit  $v_{e,k}$  ist wie folgt definiert [4]:

$$v_{e,k} = \frac{F_k}{Z_{e,k}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

$v_{e,k}$  Schwingungsgeschwindigkeit (Schnelle) an der Einleitungsstelle  $k$

$Z_{e,k}$  mechanische Eingangsimpedanz der Einleitungsstelle

$F_k$  Wechselkraft an der k-ten Einleitungsstelle

Die in die Struktur eingeleiteten Schwingungen sind wiederum für die Schwingungsanregung der gesamten Struktur verantwortlich. Die Schwingungsgeschwindigkeit der i-ten Teilfläche lässt sich wie folgt angeben:

$$v_{i,k} = v_{e,k} \cdot h_{ü,k,i} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

$v_{i,k}$  Schnelle der i-ten Teilfläche, verursacht durch die k-te Wechselkraft

$h_{ü,k,i}$  Übertragungsfunktion zwischen der k-ten Einleitungsstelle und der i-ten Teilfläche bzw. des i-ten Bauteils

Mit Gl. (2) und (3) folgt für das mittlere Schnellequadrat auf der i-ten Teilfläche als Summe über alle Wechselkräfte [3]:

$$v_i^2(f) = \sum_{k=1}^M v_{i,k}^2(f) = \sum_{k=1}^M F_k^2(f) \cdot \frac{1}{Z_{e,k}^2(f)} \cdot h_{ü,k,i}^2(f) \quad (4)$$

Mit Gl. (4) folgt aus Gl. (1) dann die Körperschallleistung einer Struktur:

$$P_k(f) = \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \underbrace{F_k^2(f)}_{\text{Entstehung}} \cdot \underbrace{\frac{1}{Z_{e,k}^2(f)}}_{\text{Übertragung}} \cdot \underbrace{h_{ü,k,i}^2(f)}_{\text{Übertragung}} \cdot \underbrace{\sigma_i(f) \cdot S_i}_{\text{Abstrahlung}} \right] \cdot (\rho \cdot c) \quad (5)$$

Obwohl die Darstellung der Körperschallleistung nach Gl. (5) scheinbar wesentlich komplexer ist als die Darstellung nach Gl. (1), besteht jetzt die Möglichkeit, die konstruktiven Einflussparameter für die Schallentstehung durch mechanische Schwingungen zu erkennen. Bei der Herleitung der Gl. (5) wurde Linearität vorausgesetzt, d.h. dass die Zunahme der Wechselkräfte auch eine proportionale Zunahme der Schwingungen zur Folge hat. Der Einfluss der Resonanzerscheinungen, die in vielen Fällen die Ursache für überhöhte Lärmentwicklung durch Körperschallabstrahlung ist, steckt in den Größen  $Z_{e,k}(f)$  und  $h_{ü,k,i}(f)$ , auf die aber hier nicht näher eingegangen wird. Es sei nur vermerkt, dass Resonanzerscheinungen dazu führen können, dass relativ

kleine Kräfte die Gesamtschallabstrahlung maßgebend beeinflussen, und zwar nicht durch ihre Stärke, sondern durch ihre Frequenzlage.

Aus Gl. (5) können für die Geräuscentwicklung linearer Systeme in Folge mechanischer Schwingungen folgende grundsätzliche Aussagen abgeleitet werden:

- Die Geräuscentwicklung nimmt mit dem Quadrat der Wechselkräfte zu.
- Die Geräuscentwicklung ist umgekehrt proportional zum Quadrat der mechanischen Eingangsimpedanz und proportional zum Quadrat der Übertragungsfunktion.
- Die Körperschallabstrahlung nimmt linear mit dem Produkt aus Abstrahlgrad und Abstrahlfläche zu.

Neben den formalen Abhängigkeiten lassen sich folgende, für die Ermittlung von akustischer Schwachstellen wesentlichen, Aussagen herleiten:

- 1) Für die Körperschallanregung ist grundsätzlich die Summe aller Kräfte verantwortlich. Bei unveränderter Konstruktion sind, bedingt durch die quadratische bzw. energetische Addition (Summation über "k"), nur die größten Kräfte maßgebend.
- 2) Für die Körperschallanregung einer Konstruktion ist neben den Wechselkräften vor allem die mechanische Eingangsimpedanz (Schwingungswiderstand an der Einleitungsstelle) maßgebend.
- 3) Für die Körperschallabstrahlung sind grundsätzlich sämtliche Abstrahlflächen verantwortlich, wobei in der Summe über "i" in Gl. (5) nur die Teilflächen maßgebend sind, bei denen das Produkt " $v_i^2 \cdot \sigma_i \cdot S_i$ " am größten ist.
- 4) Bei der abgestrahlten Körperschalleistung sind nur die Frequenzen von Bedeutung, die pegelbestimmend sind. Hierbei sind resonanzerregte Bauteile<sup>1</sup> besonders kritisch.

### Gesamt- und Teilkörperschalleistungspegel

Für die körperschallbedingte Geräuscentwicklung einer Maschine ist vor allem der Körperschalleistungspegel bzw. dessen Spektrum maßgebend.

$$L_{WK} = 10 \cdot \lg \frac{P_K(f)}{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{K,i}}{P_0} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

Um die Wirkung der einzelnen Parameter besser zu erkennen, wird Gl. (6) als Funktion der Teilkörperschalleistungspegel  $L_{WK,i}(f)$  dargestellt [4],[5]:

<sup>1</sup> Eine Resonanzanregung liegt vor, wenn die Anregungsfrequenzen mit Amplitudenerhöhungen  $h_{i,k,i}$  oder mit Amplitudeneinbrüchen bei der mechanischen Eingangsimpedanz  $Z_{e,k}$  übereinstimmen.

$$L_{WK} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^N 10^{L_{WK,i}/10} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

$$L_{WK,i} = 10 \cdot \lg \frac{\rho \cdot c \cdot v_i^2 \cdot S_i \cdot \sigma_i}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot v_0^2 \cdot S_0} \approx L_{v,i} + L_{S,i} + \sigma'_i \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

$$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} ; S_0 = 1 \text{ m}^2 ; \rho \cdot c \approx \rho_0 \cdot c_0 = 400 \text{ Ns/m}^3$$

$$L_{WK} \approx 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^N 10^{(L_{v,i} + L_{S,i} + \sigma'_i)/10} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Wie aus der Gl. (9) zu erkennen ist, wird die körperschallbedingte Geräuscentwicklung durch die Summe der einzelnen Pegel  $L_{v,i}$ ,  $L_{S,i}$  und  $\sigma'_i$  nach Gl. (8) bestimmt, wobei der Schellepegel  $L_{v,i}$  für die Geräuscentstehung verantwortlich ist:

$$L_{v,i}(f) = 10 \cdot \lg \frac{v_i^2(f)}{v_0^2} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

Die für den Schnellepegel  $L_{v,i}(f)$  bzw. das Schnellequadrat  $v_i^2(f)$  wesentlichen Einflussparameter werden in Gl. (4) beschrieben. Das Summenzeichen in Gl. (9) bedeutet, dass nur die Bauteile einer Maschine für die Geräuscentstehung maßgebend sind, bei denen die Summe nach Gl. (8) am größten ist. Das Summenzeichen in Gl. (4) macht deutlich, welcher der Einflussparameter - Erregerkraft ( $F_k$ ), Einleitungsstelle ( $Z_{e,k}$ ) oder Körperschallübertragungsweg ( $h_{i,k,i}$ ) - für den Schnellepegel des i-ten Bauteils verantwortlich ist. Mit Hilfe der Gln. (7) bis (10) kann man, vor allem durch experimentelle Untersuchungen, quantitativ die körperschallbedingte Geräuscentwicklung einer Maschine bestimmen und akustische Schwachstellen erkennen bzw. lokalisieren. Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die Erregerkräfte sowohl mechanisch als auch strömungstechnisch verursacht werden können [5].

### Literatur

- [1] H. Henn, Gh. R. Sinambari, M. Fallen: Ingenieurakustik, Vieweg+Teubner Verlag, 4. Aufl. 2008
- [2] Heckl, M.; Müller, H.A.: Taschenbuch der technischen Akustik, Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, 2. Auflage 1994
- [3] Sinambari, Gh. R.; Kunz, F.: Primäre Lärminderung durch akustische Schwachstellenanalyse, VDI Berichte Nr. 1491, 1999
- [4] Sinambari, Gh. R., G. Felk, U. Thorn: Konstruktionsakustische Schwachstellenanalyse an einer Verpackungsmaschine, VDI-Berichte Nr. 2052, 2008
- [5] Sinambari, Gh.R., Tschöp,E.: Grundlagenseminar „Konstruktionsakustik I“, Seminarveranstaltung, FH Bingen, 2010