



Materials Science & Technology

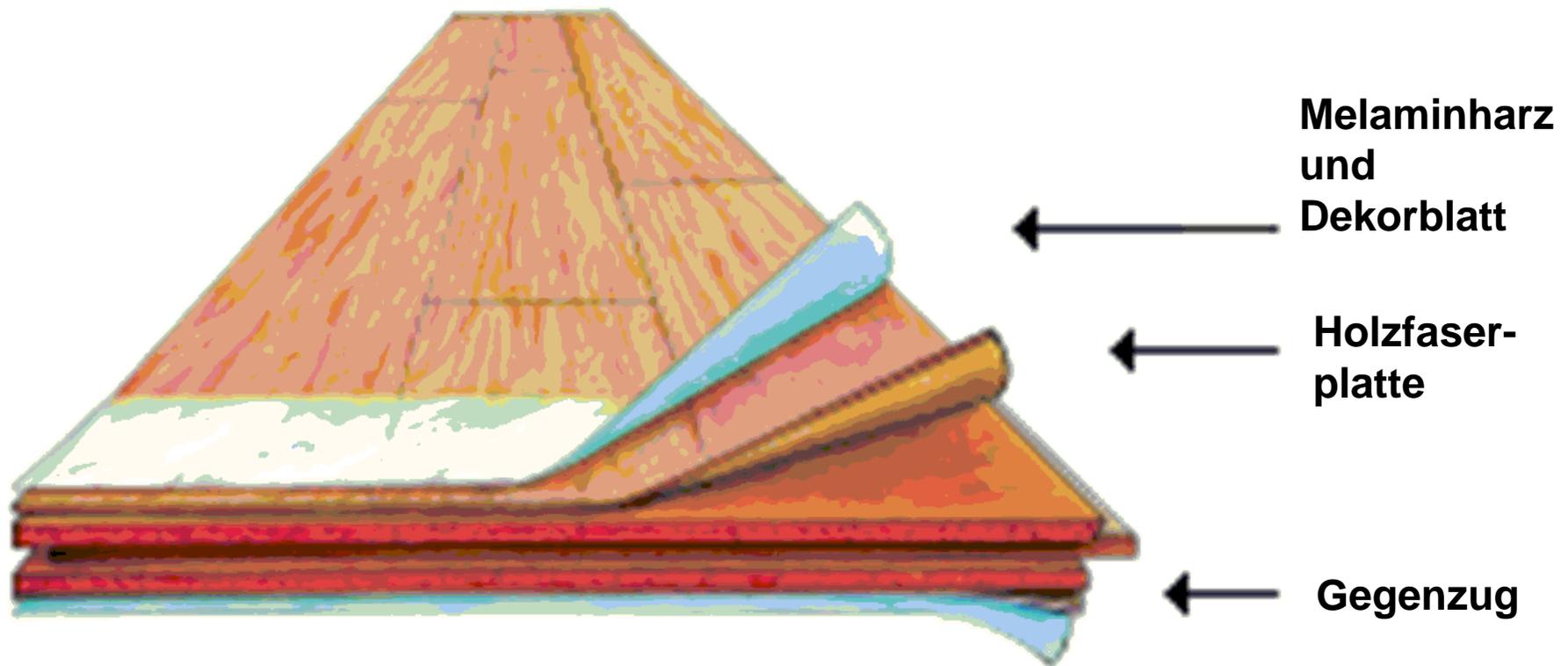
Gehschall: Modellierung und Messung

R. Bütikofer
Abteilung Akustik



**Ergebnisse aus Arbeiten für
European Producers of Laminate Floorings**

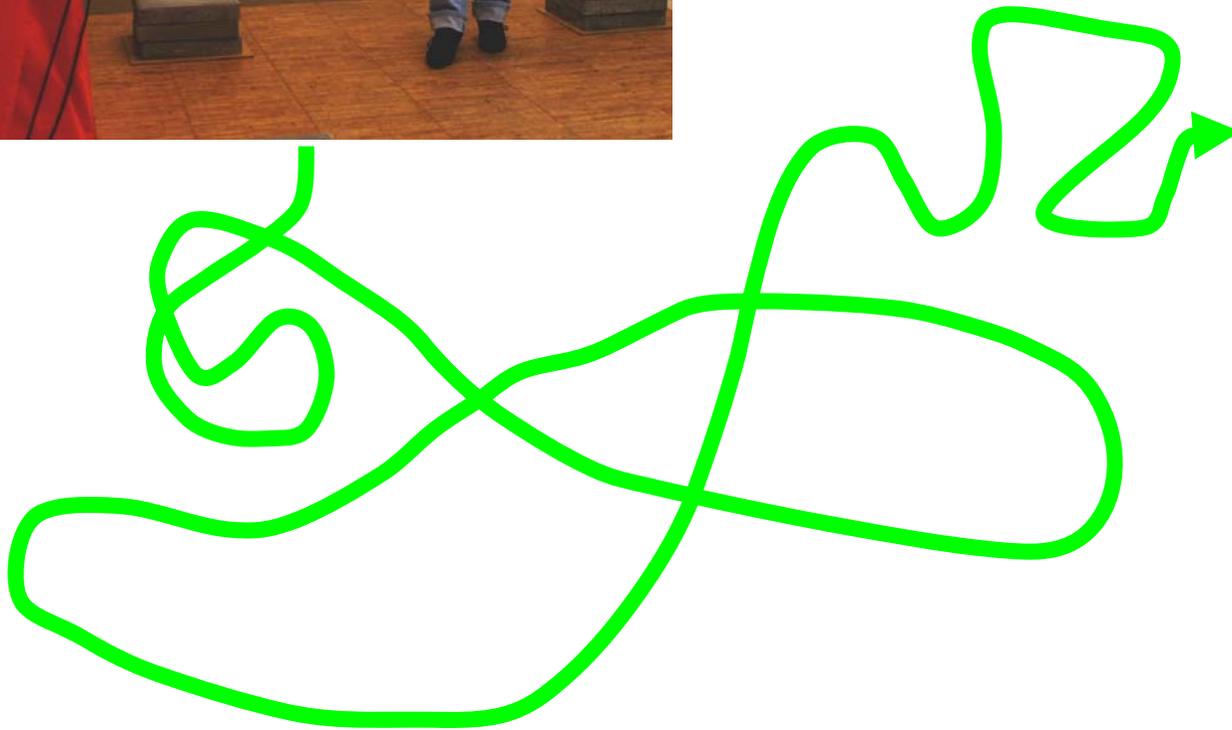
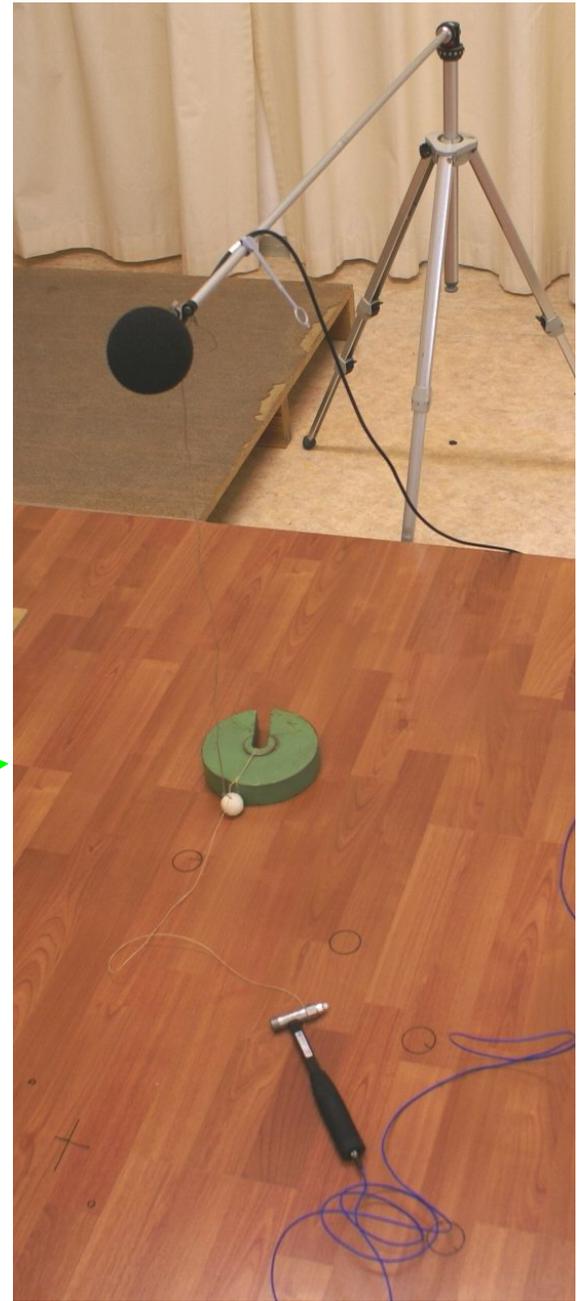
Typischer Laminataufbau

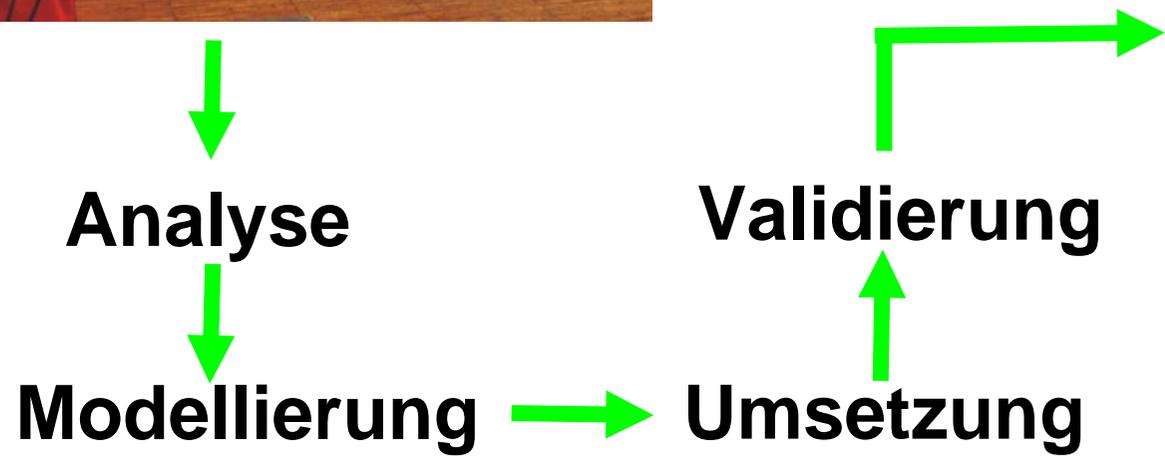












Teil 1: Analyse

- Der Schritt
- Störquellen
- Antwort der Laminatplatte
- Anforderung an die Messung

Analyse

Der Schritt

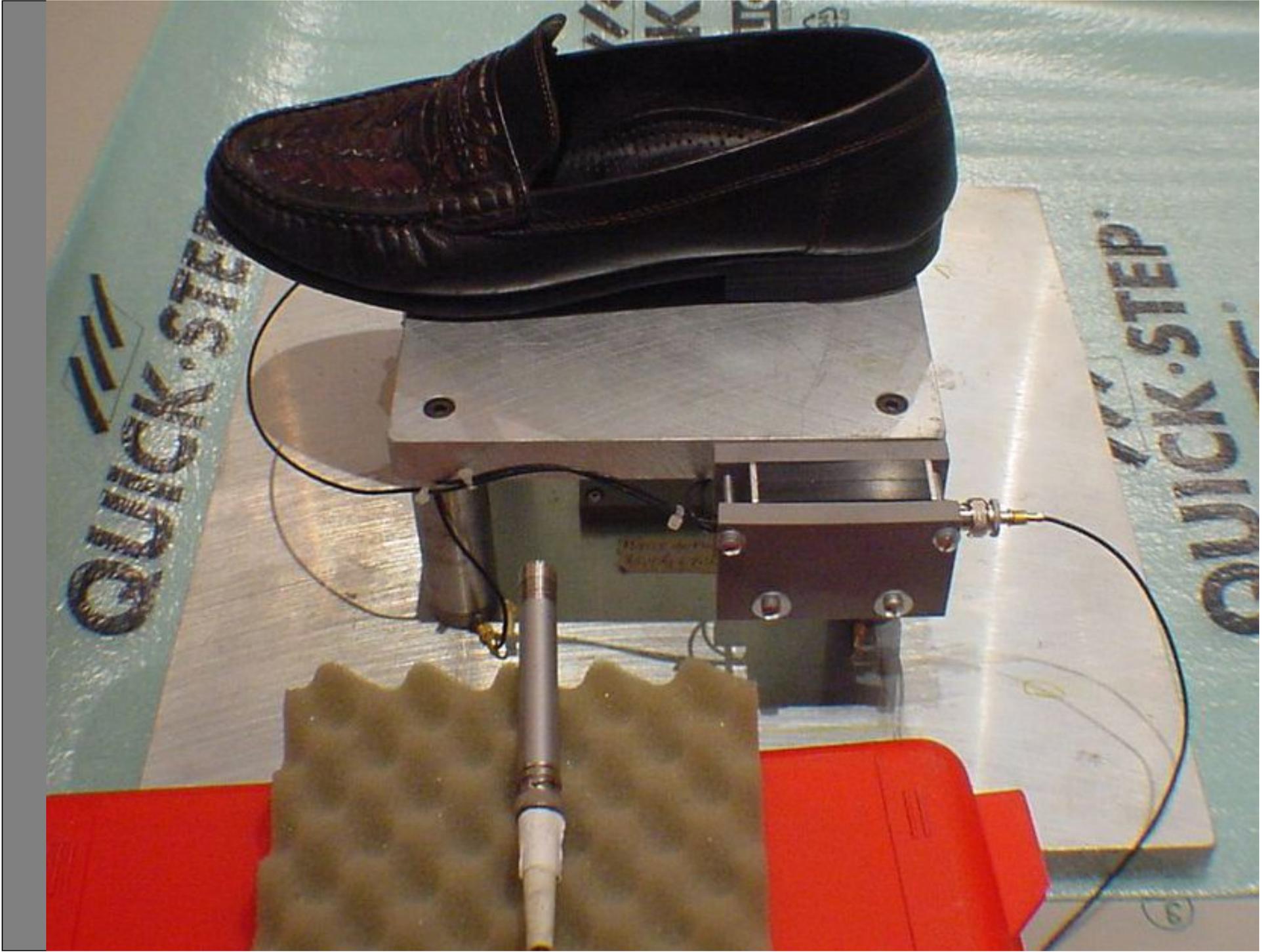












Der Schritt: Kraftverlauf

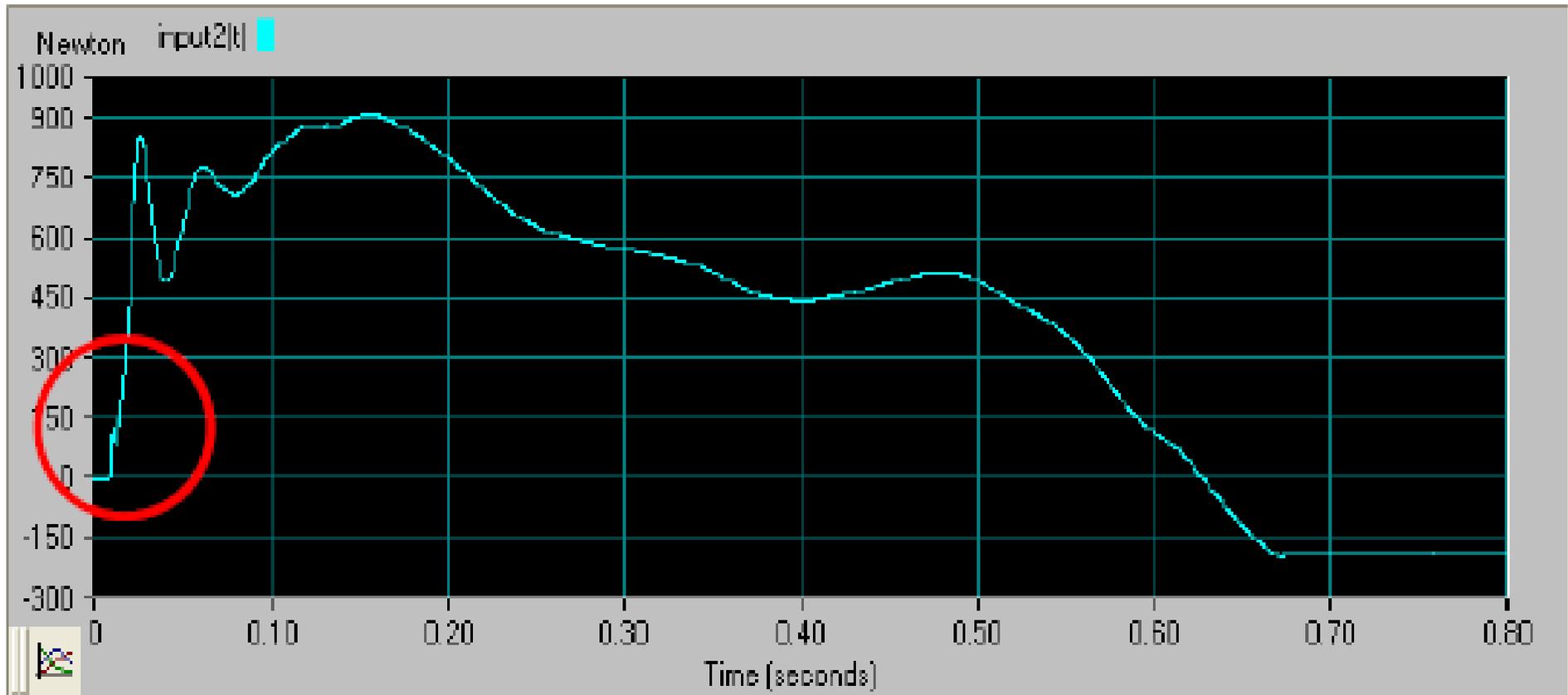


Figure 7-2 Time history over 800 ms of the force of a single step

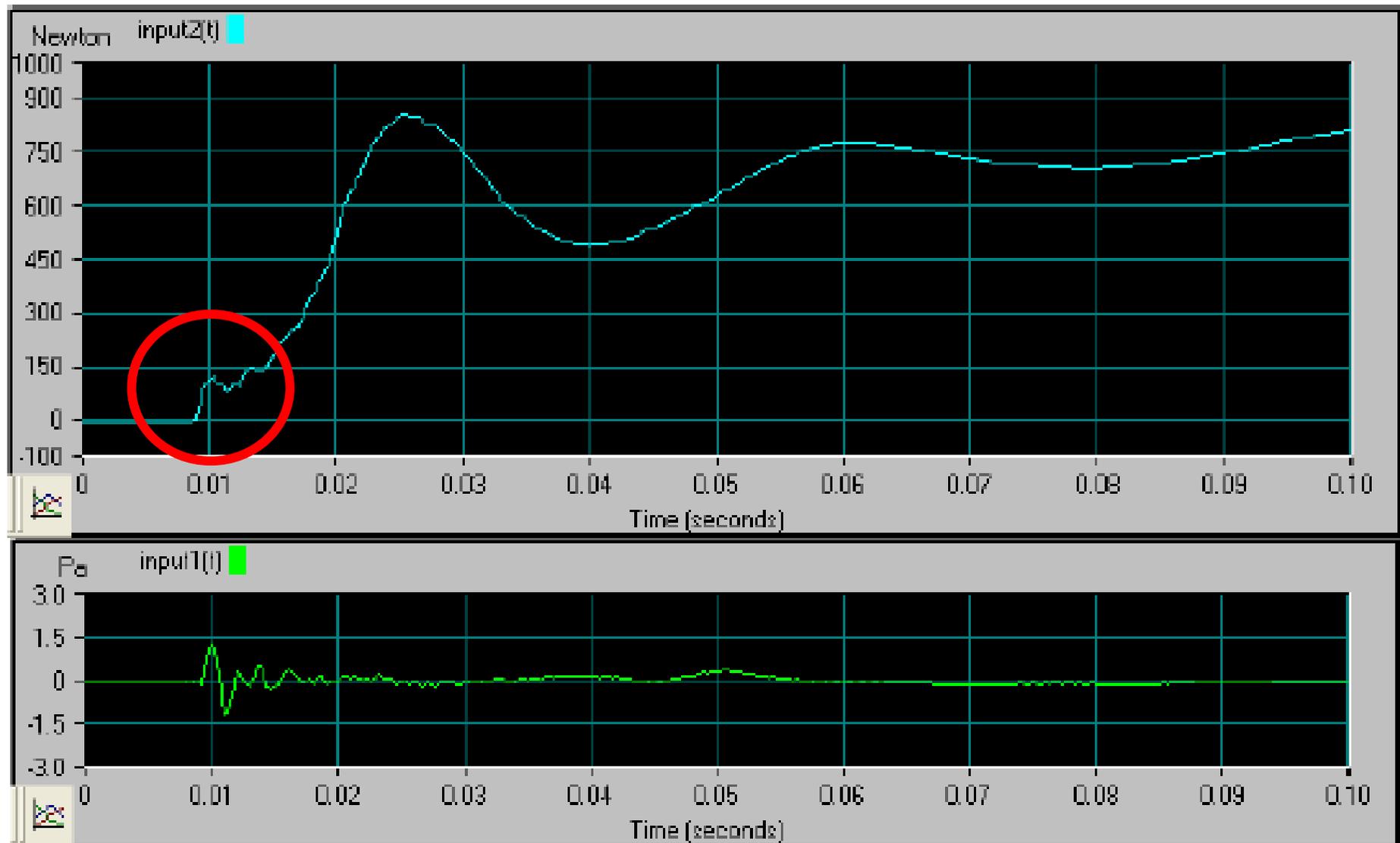


Figure 7-3 Detail of Figure 7-2 (top) and sound pressure (below) over 100 ms

Meilenstein 1:

Es ist nicht der Gehprozess, nicht der Schritt,

Es ist der erste Aufprall des Absatzes

- Die Stossdauer beträgt nur etwa 2 Millisekunden
- Es wirkt nur die kleine Kontaktfläche der Absatz-Kante



- Beim Sport z.B. bei einem Sprung auf dem Hallenboden, wirkt der Unterschenkel und Fuss als dynamische Masse von etwa 4.5 kg
- Beim Gehschall ist der Schlag so kurz, dass der Schuh dynamisch vom Fuss entkoppelt ist

Meilenstein 2:
Der Absatz allein
erzeugt den
Gehschall



Analyse

Störquellen

Störquellen

- Schwingungsanregung des Schuhs (bzw. des Hammers) durch den Kraftstoß
- Aufklatschen der Schuhsole
- Raschelgeräusche von Kleidern
- „Knirschen“ des Schuhleders beim Gehen

Analyse

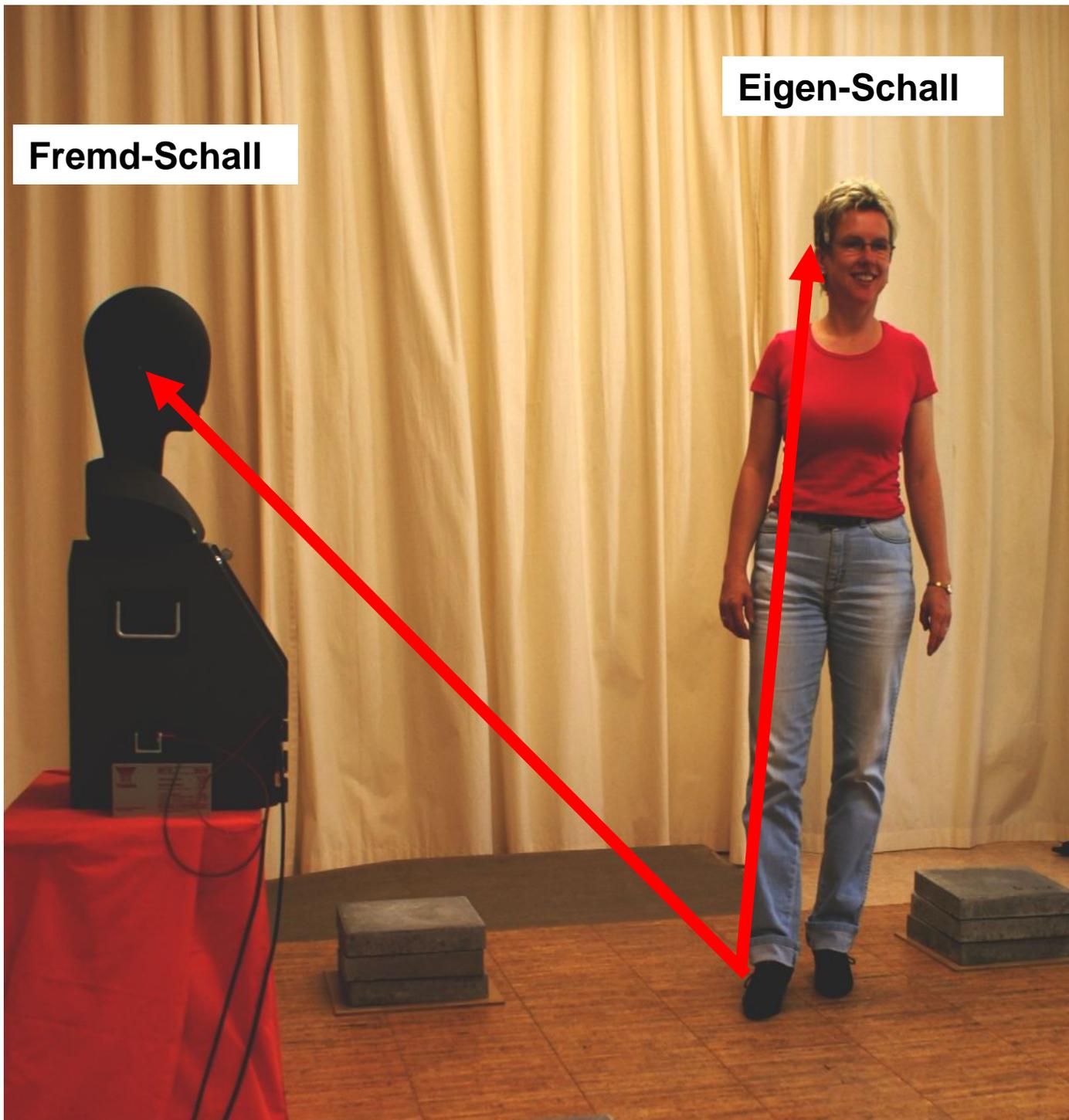
Antwort der Laminatplatte

Antwort der Laminatplatte

- Koinzidenzfrequenz um 3 kHz
- Abstrahlmaximum bei 300 ... 800 Hz
- Punktförmige Abstrahlung, örtlich eng begrenzt
- Abstrahlcharakteristik hängt leicht von der Richtung ab

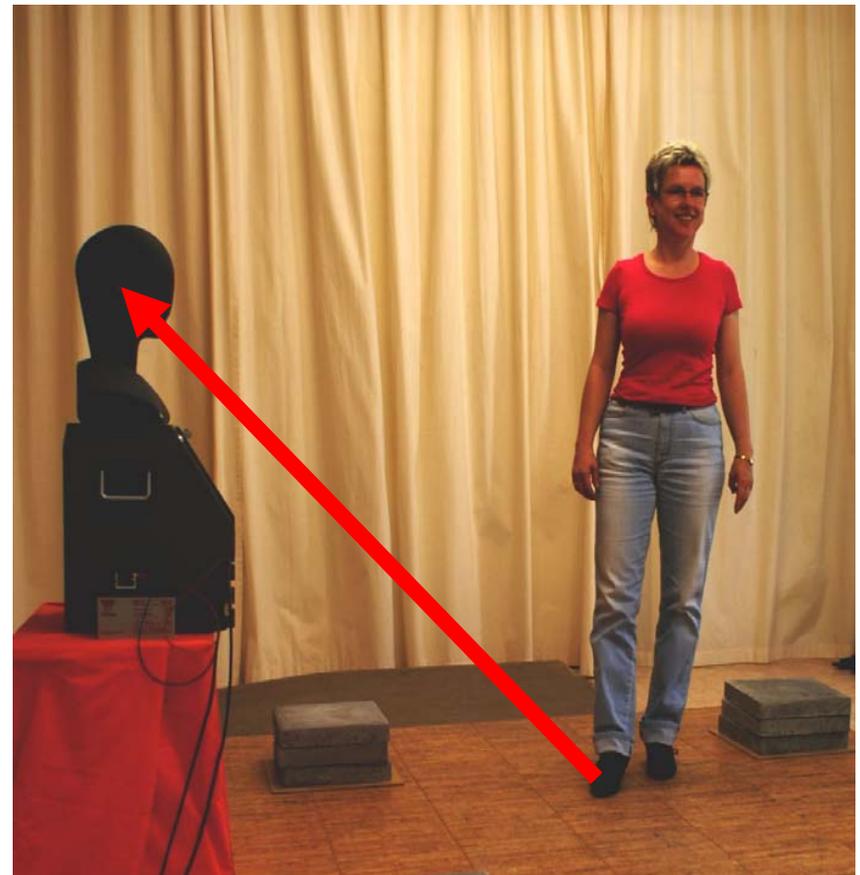
Fremd-Schall

Eigen-Schall



Festlegungen

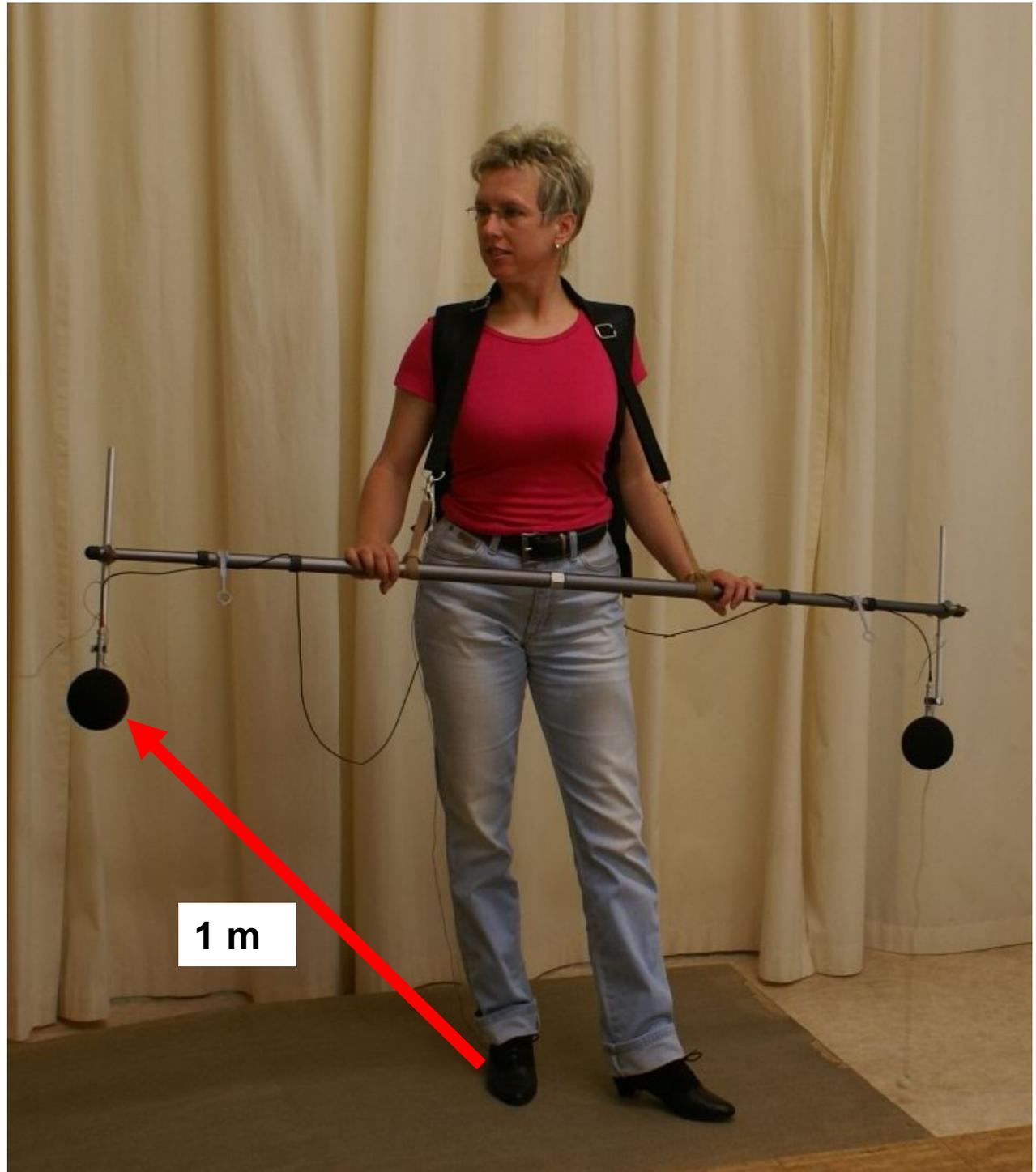
- Messung nur 45° seitlich
(Fremd-Schall \Rightarrow Belästigung)
- Messung im Freifeld
(reflexionsarmer Raum)



Analyse

Anforderung an die Messung des Gehschalls

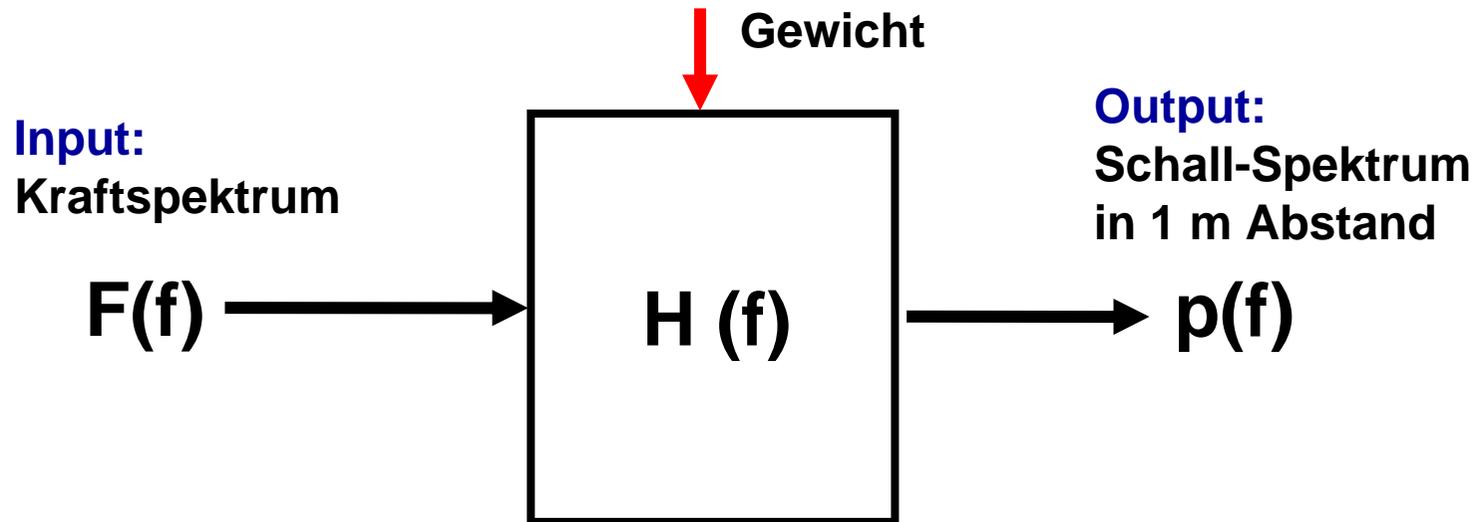
- Freifeld:
Abstand vom
Aufprallort des
Schuhs zum
Mikrofon
muss konstant
bleiben
- Festlegung:
Mikrofon in
1 m Abstand,
seitlich,
unter 45 Grad



Teil 2: Modellierung

- Der Laminatboden als lineares System
- Kraftspektrum einer Masse
- Die Kraftmessung mit dem Impulshammer

Der Laminatboden als lineares System



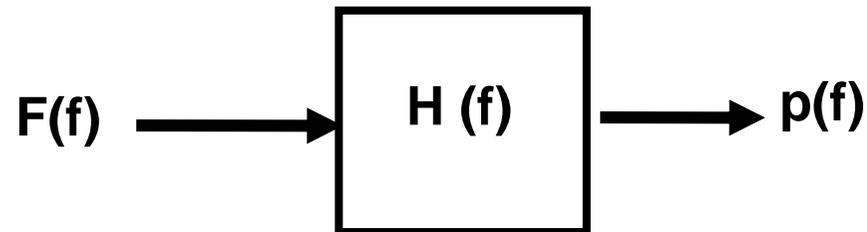
H ist die „Material“-Konstante (incl. Abstrahleffekte etc.)

Einfluss des Personen-Gewichts: kommt „viel“ zu spät

Analoge Situationen:

Luftschall: H ist die Luftschalldämmung R einer Wand

Trittschall: H ist die Trittschalldämmung L_n einer Decke



Paradigmawechsel beim Gehschall:

NICHT die „Materialkonstante“ H ist gesucht, sondern wie laut ist es beim Zuhörer bei einer bestimmten Anregung.

⇒ Frage nach der „**Normanregung**“ (Schuh-Typ, Gangart)

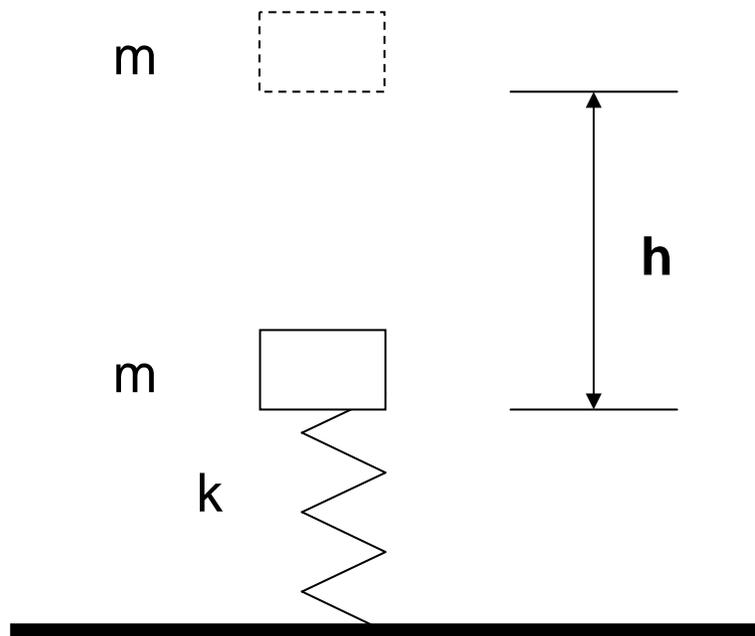
Da H mit einem Impulshammer problemlos gemessen werden kann, konzentrieren sich somit die weiteren Untersuchungen auf **das Kraftspektrum $F(f)$**

Modellierung

Kraftspektrum $F(f)$ einer Masse

Kraftspektrum $F(f)$ einer Masse (I)

Feder-Masse-System



Resonanzfrequenz:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Unabhängig von der Fallhöhe bzw. der Schlagstärke !

m: Masse des Schuh-Absatzes

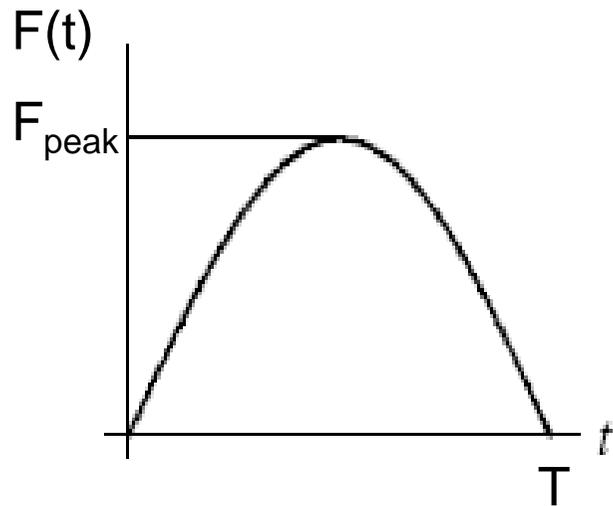
k: resultierende Federkonstante

h: Fallhöhe

Kraftspektrum F(f) einer Masse (II)

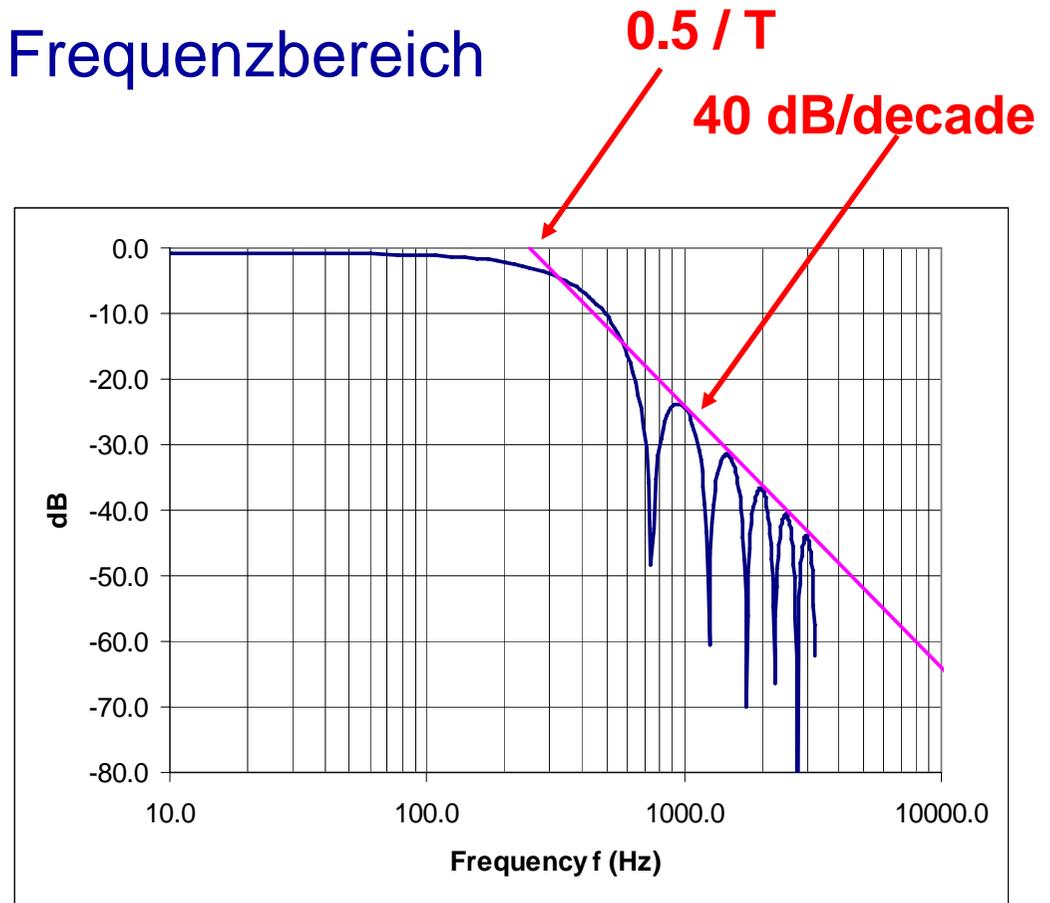
Zeitbereich

Halbe Sinusschwingung



$$T = \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Frequenzbereich



$$F(f) = 2 \cdot F_{\text{peak}} \frac{T}{\pi} \left| \frac{\cos(\pi \cdot f \cdot T)}{1 - (2 \cdot f \cdot T)^2} \right|$$

Meilensteine

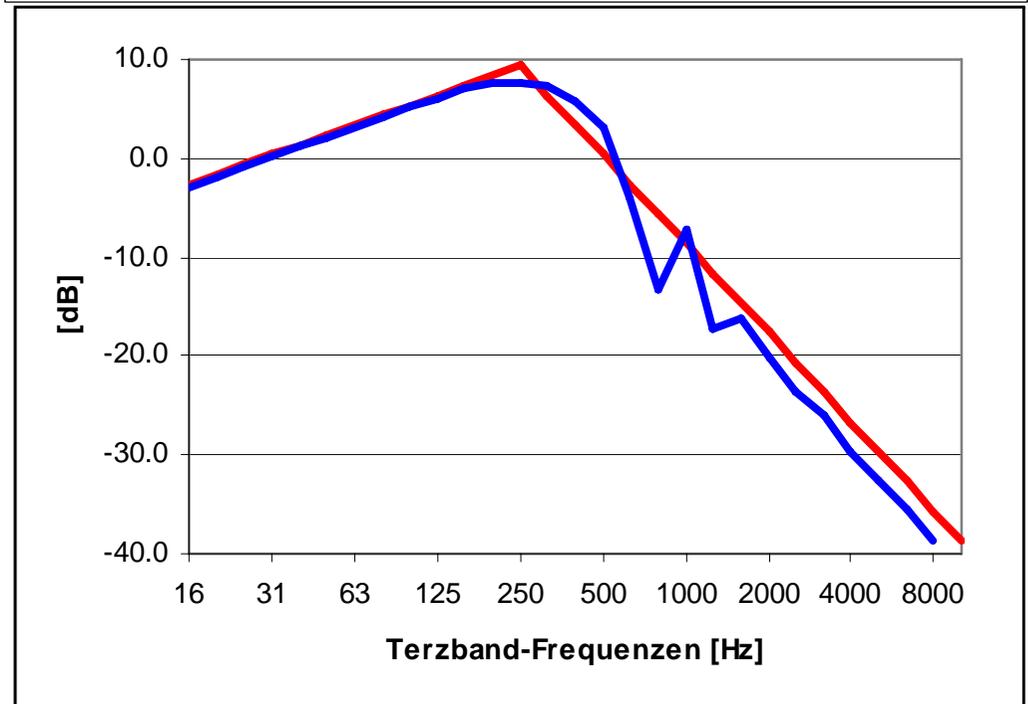
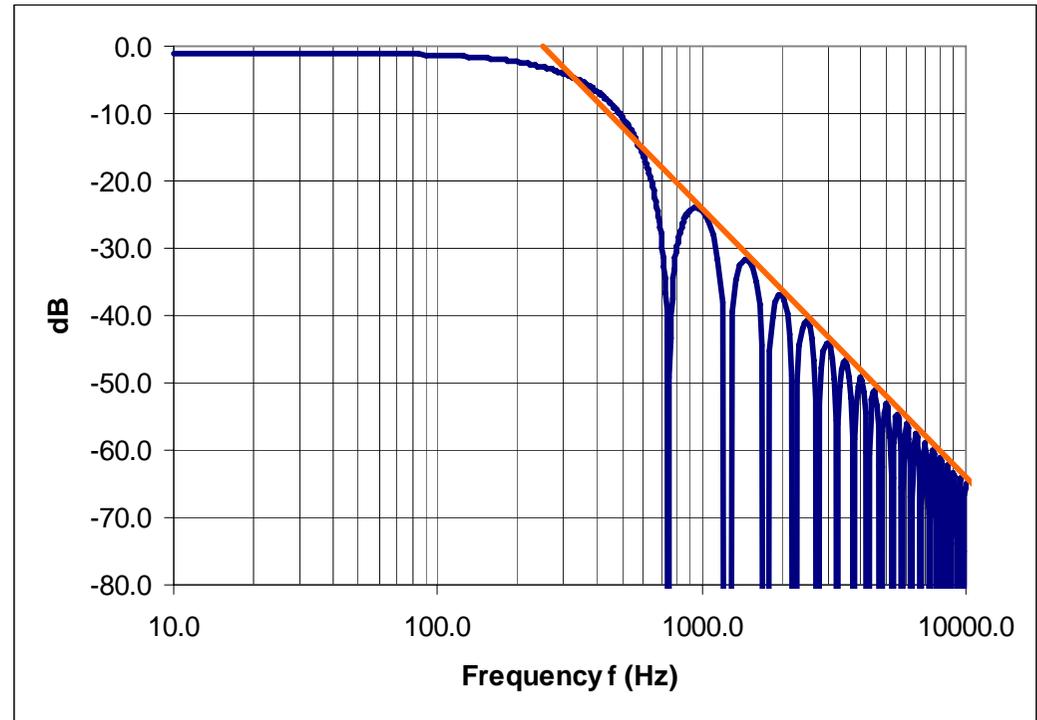
- Das Kraftspektrum hängt nur von der Schlagdauer T ab.
- Die „Grenzfrequenz“ des Kraftspektrums liegt bei $0.5 T$
- Die Schlagdauer T hängt nur vom Verhältnis m/k ab.
- Die Schlag**stärke** hat (innerhalb des linearen Bereichs) **keinen** Einfluss auf das Kraftspektrum.

$$T = \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Kraftspektrum in der Terzband-Darstellung

Bei der Terzband-Frequenzanalyse werden mit zunehmender Frequenz immer breitere Frequenzbänder zu einem Wert zusammengefasst

- Scheinbarer Pegelanstieg mit 1 dB/Terz
- Mittelung bei hohen Frequenzen



JASA 37/4 1965

B.G. Watters:

Impact-Noise
Characteristics of
Female Hard-Heeled
Foot Traffic

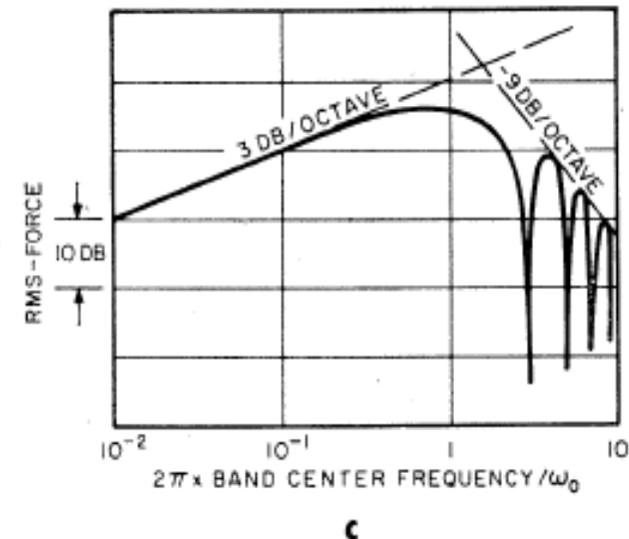
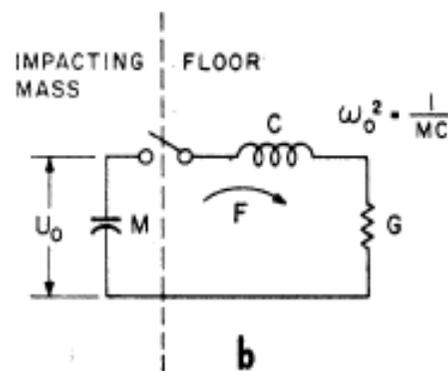
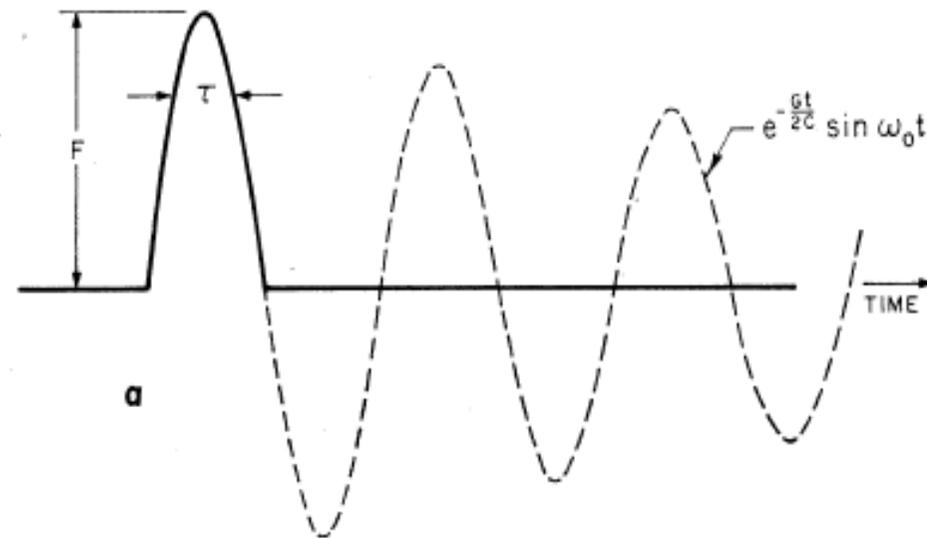
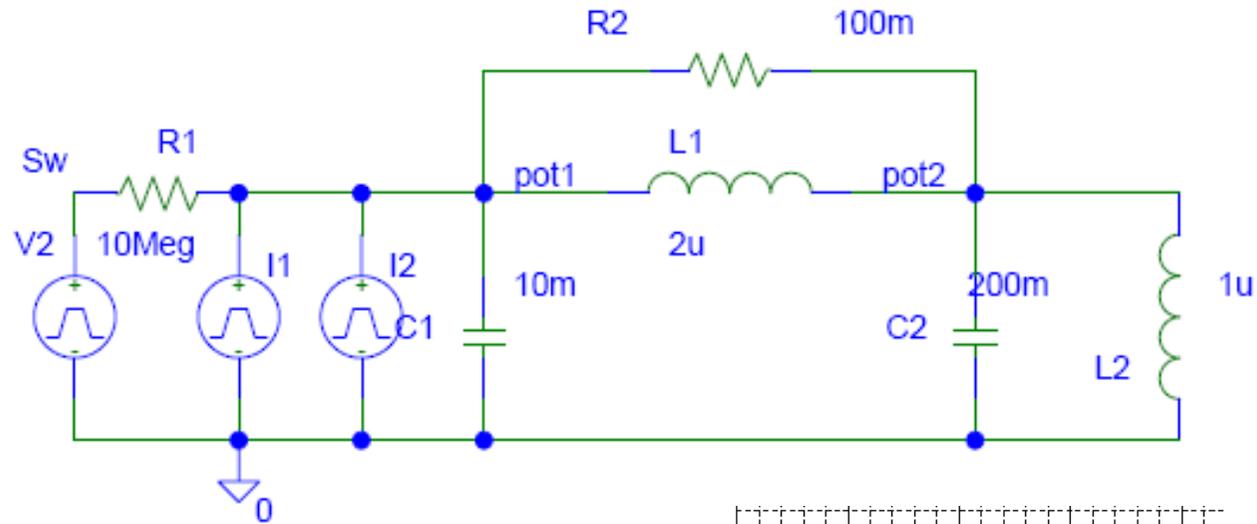
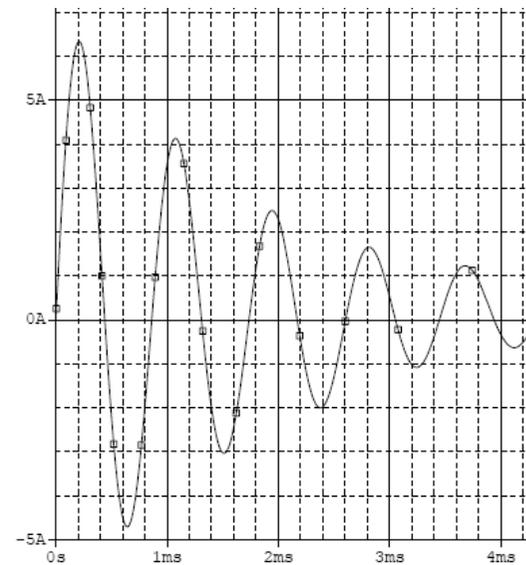


FIG. 2. (a) Idealized force waveform for impacting mass. (b) Equivalent circuit for mass (M), surface compliance (C), and conductance (G). (c) Frequency spectrum for force waveform measured in proportional bands.

Modellierung mit Software Pspice



70 gr Marmel auf Laminat



Modellierung

Die Kraftmessung mit dem Impulshammer

Der Impulshammer

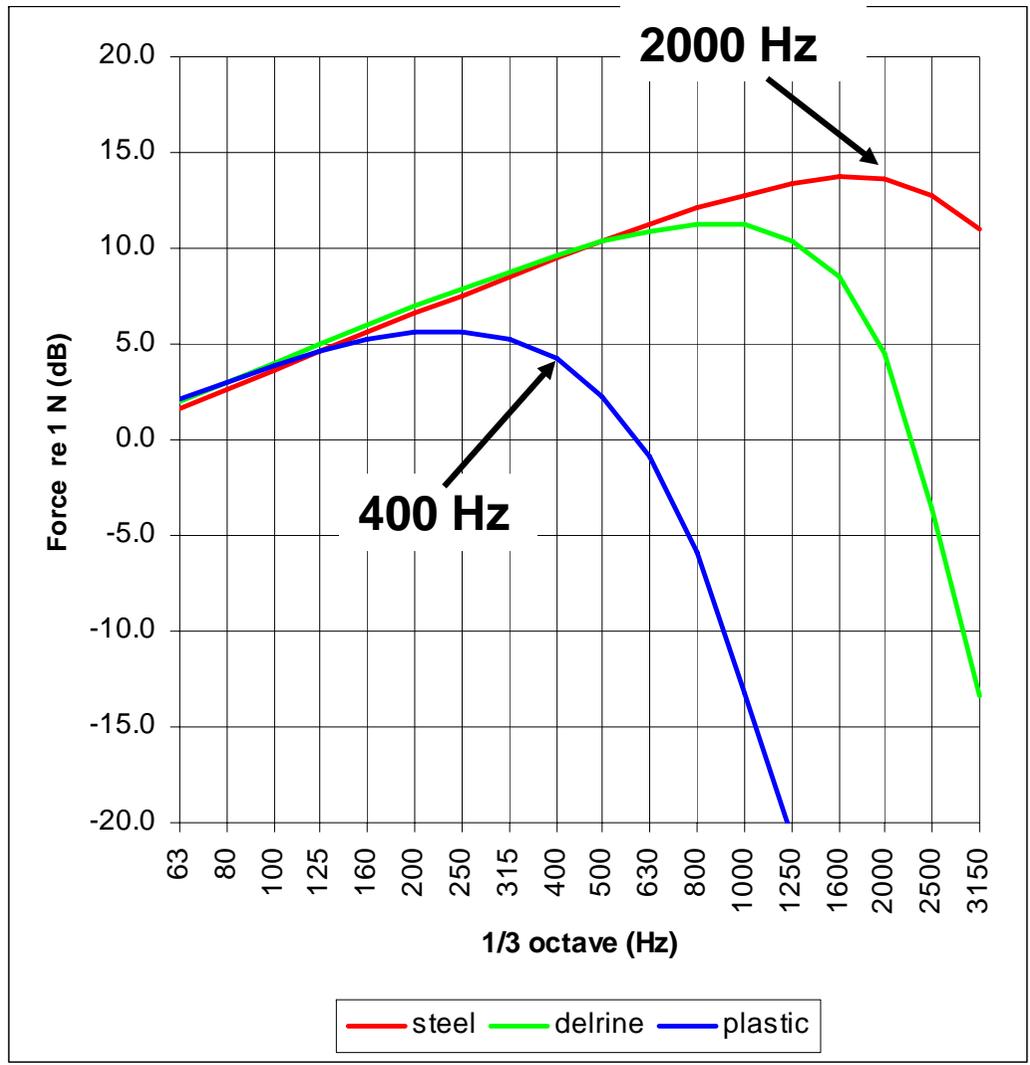
Zusatzgewicht (aufschraubbar)



Kraftmessdose

Austauschbarer Schlagkopf

Kraftspektren bei verschiedenen weichen Hammerspitzen

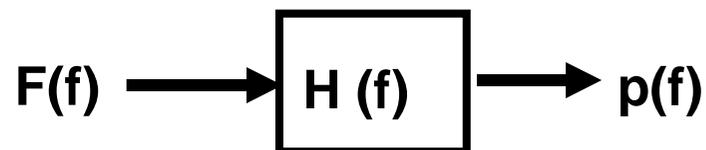


rot: Stahl
 grün: Delrine
 blau: Plastik

Teil 3: Umsetzung

- Substitution
- Kraftspektren diverser Schuhe auf Beton
- Impedanzen
- Optimierter Hammer
- Messung

Substitution (Bestimmung der unbekannten Quelle)



Schritt 1:

Messung mit Impulshammer:

Die Anregung (Kraftspektrum) und der resultierende Luftschall werden gemessen.

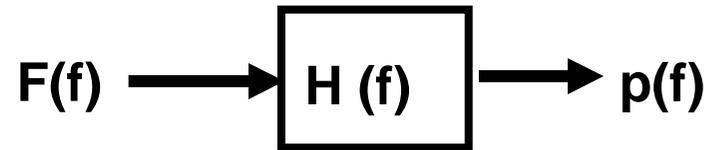
Schritt 2:

Eine unbekannte Anregung ergibt einen bestimmten Luftschall

Die dazugehörige Anregung berechnet sich aus:

Kraftspektrum des Impulshammers plus Unterschied zwischen den beiden Luftschallmessungen

Substitution (Bestimmung der unbekanntenen Quelle)



$$H = p/F$$

$$p = F * H$$

$$F = p/H$$

Logarithmisch (nur für die Amplitudenwerte)

$$L_H = L_p - L_F$$

$$L_p = L_F + L_H$$

$$L_F = L_p - L_H$$

Schritt 1: Messung mit Impulshammer von L_{F0} und $L_{p0} \Rightarrow L_H$

Schritt 2: Unbekannte Anregung ergibt L_{px}

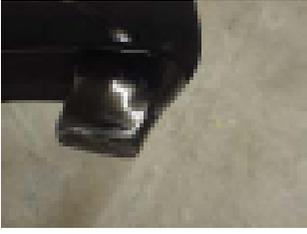
Dazugehöriges Kraftspektrum ist:

$$L_{Fx} = L_{px} - L_H = L_{F0} + (L_{px} - L_{p0})$$

Umsetzung

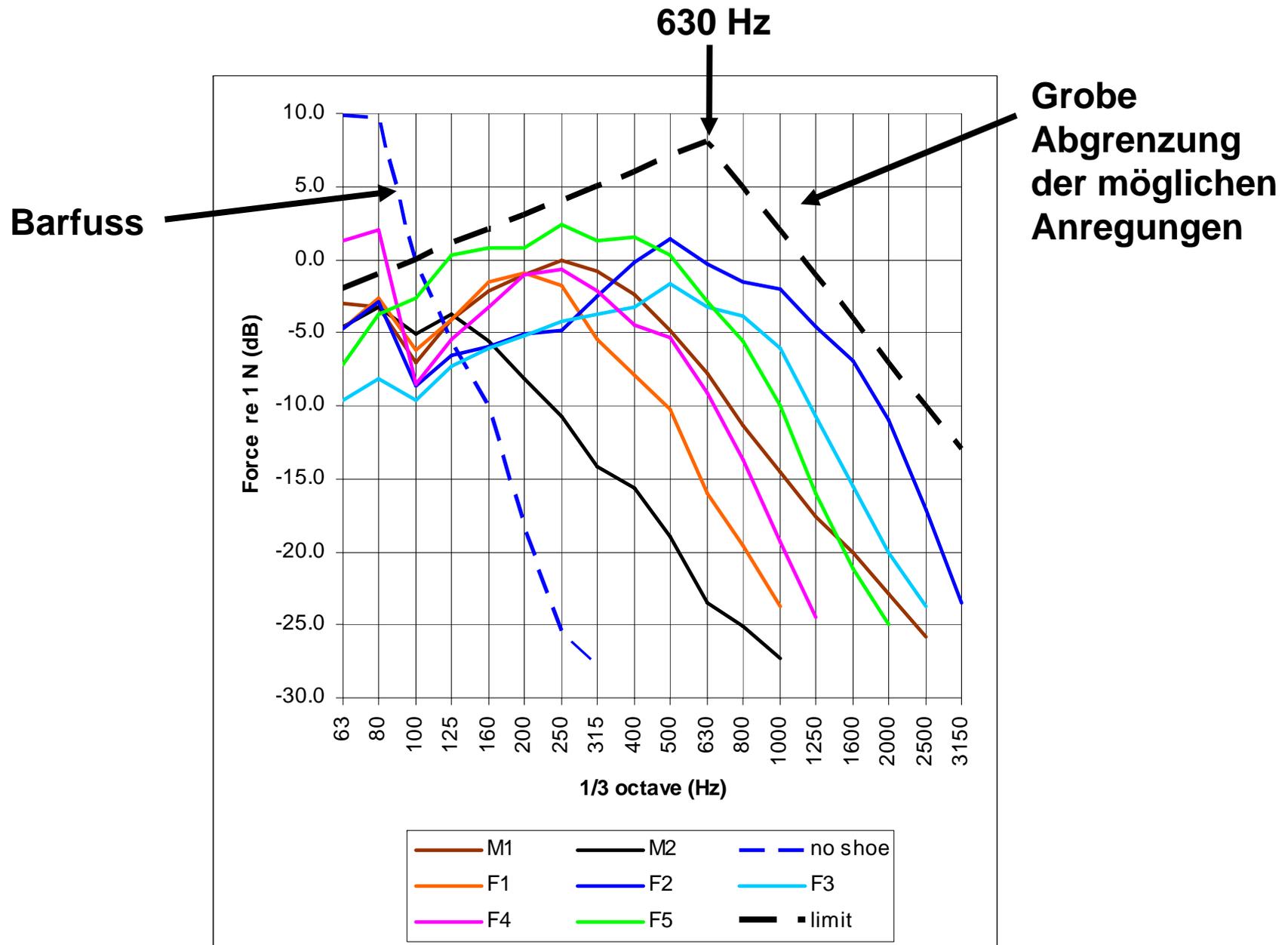
Kraftspektren diverser Schuhe auf Beton

7 Schuhe auf Betonboden

F1		
F2		
F3		
F4		

F6		
M1		
M2		

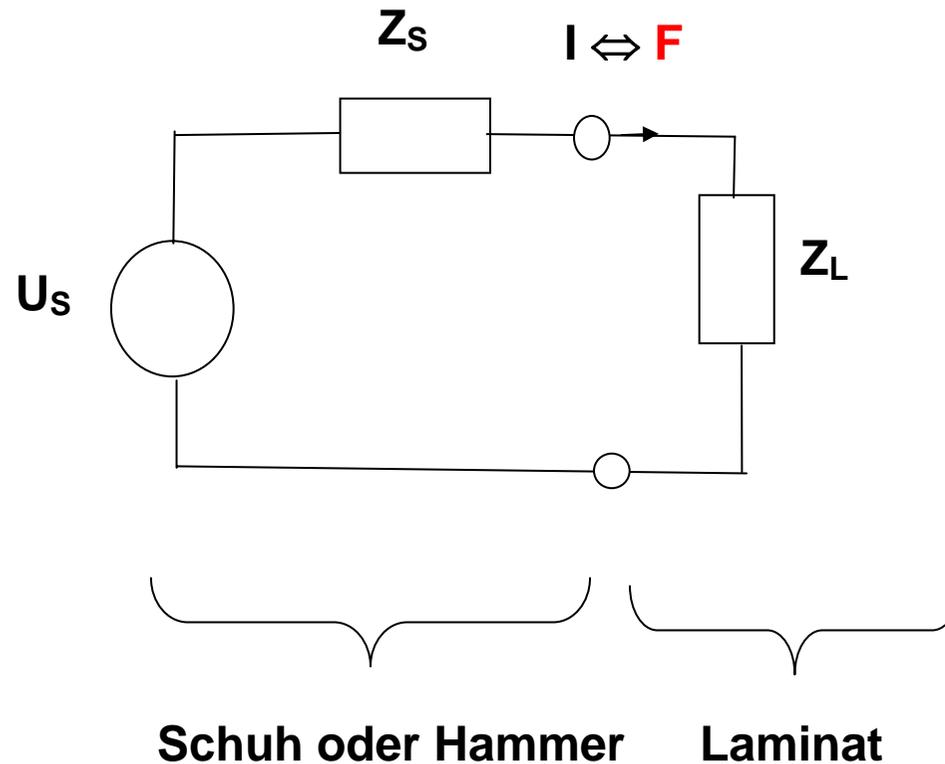
Terzbandspektren der 7 Schuhe und Barfuss



Umsetzung

Impedanzen

Kraftspektrum F hängt vom Laminat ab !



**Z: Kombination
von Masse und
Steifigkeit
bzw. C und L**

Der künstliche Schuh

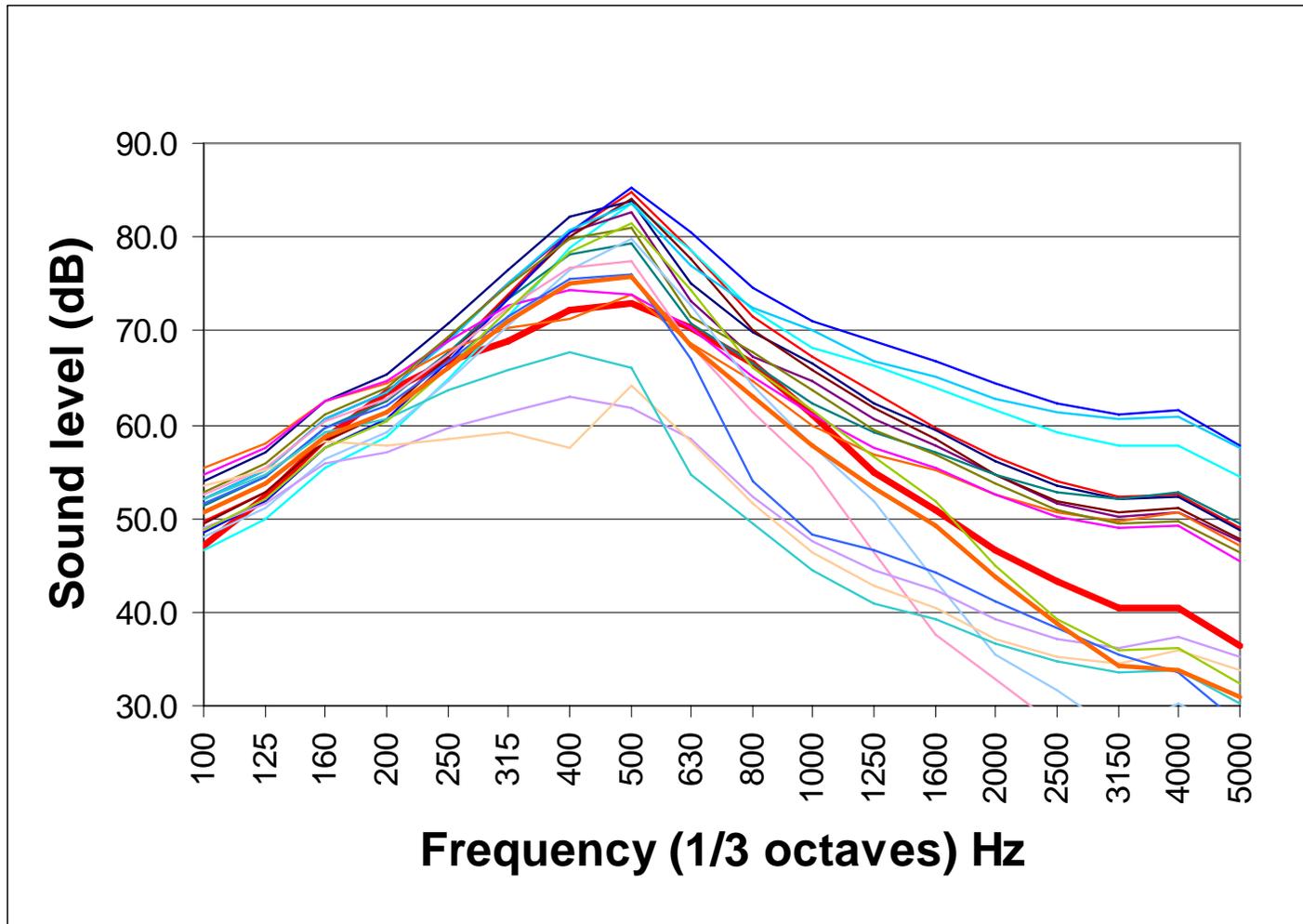


gleiche
Masse

Gleiche
Steifigkeit



Beispiele von Klangfarben des Impulshammers mit verschiedenen Gewichten und Spitzenverkleidungen.



Ziel: Imitiere das rote Spektrum des Schuhs

Umsetzung

Der optimierte Hammer

Optimierter Hammer:

- Spitze von 5 mm Durchmesser und 4 mm Dicke aus dem Sohlenmaterial SBR1
- Wirksame Masse des Hammers: 200 Gramm



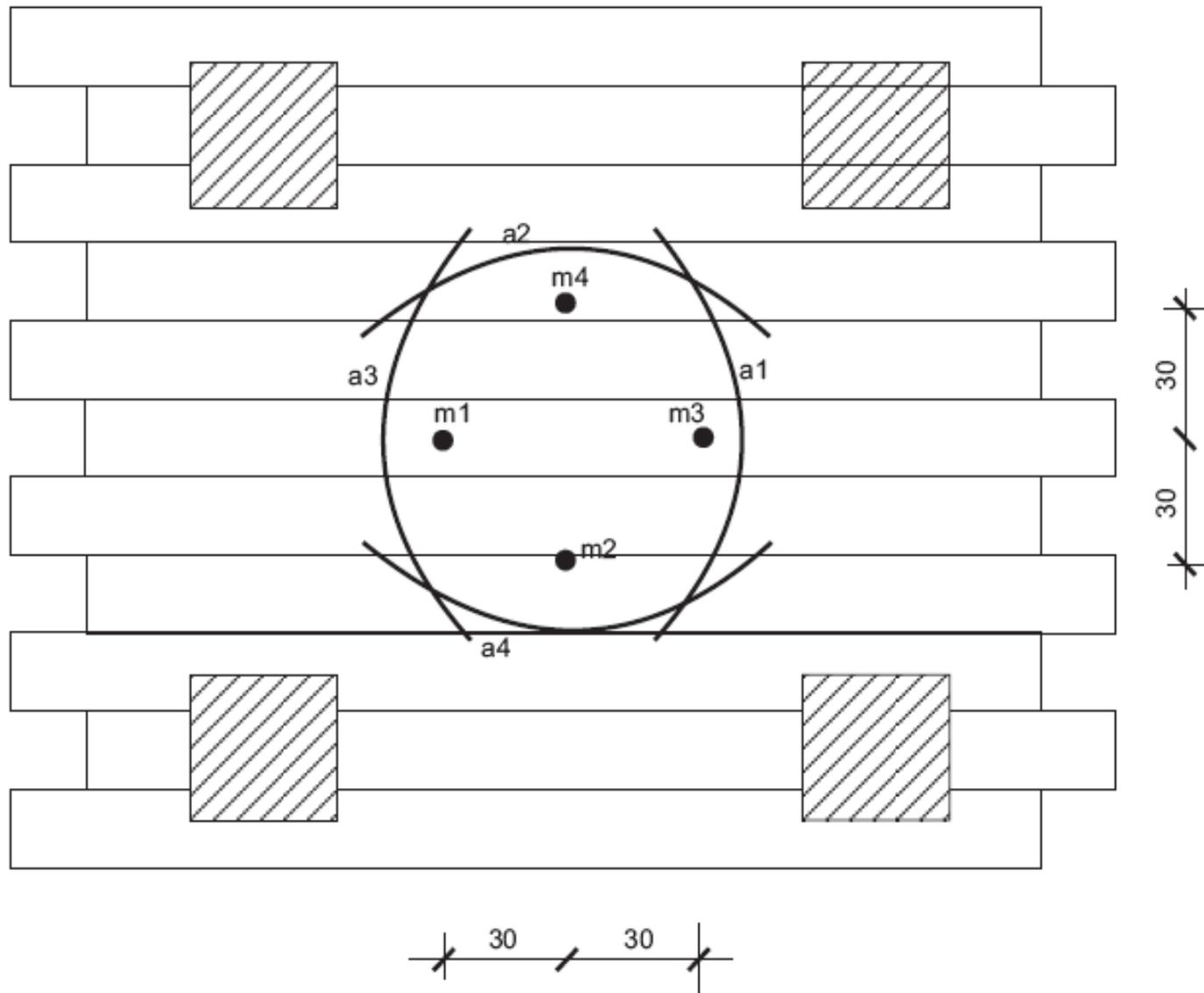
Umsetzung

Messung

Messung (I)

- Messung im Freifeld
⇒ Abstand Schlagort zu Mikrophon muss konstant sein
- Örtliche Mittelung über das Laminat
⇒ Messung auf 4 Kreissegmenten mit 71 cm Radius
- Mikrophonhöhe 71cm
⇒ 1 m Abstand unter 45 Grad

Messanordnung: 4 Kreisbogen



Messung (II)

- „Klang“ (Kraftspektrum) ist mit dem „künstlichen Schuh“ gewährleistet. Es bleibt die Normierung der Schlagkraft
- Gleichzeitiges Messen der Terzbänder von Kraft und Luftschall über eine beliebige Zeit.
- Skalierung des Luftschall-Spektrums im Verhältnis von gemessenem Kraftspektrum zu Referenzwert, der von der Begehung abgeleitet wurde.

Teil 4: Validierung

- Subjektive Beurteilung
- Übereinstimmung Beurteilung und Messung

Subjektive Beurteilung (I)



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Untersuchungen durchgeführt von **M. Brink**, ETH Zürich

- Kunstkopfaufnahmen von 10 Böden
- Befragung von 300 Personen mit Jury-Testing Methode:
akustischer Vergleich und Erstellung einer Rangliste in
Bezug auf Lautheit

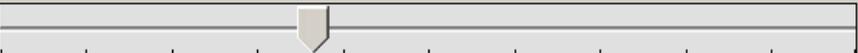
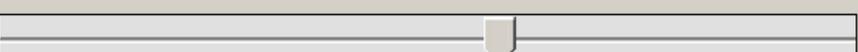
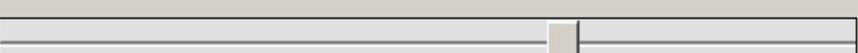
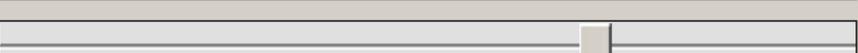
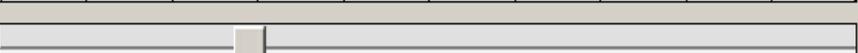
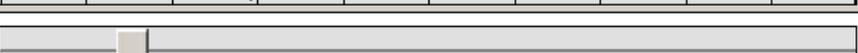
Subjektive Beurteilung (II)



Subjektive Beurteilung (III)

Lautstärke

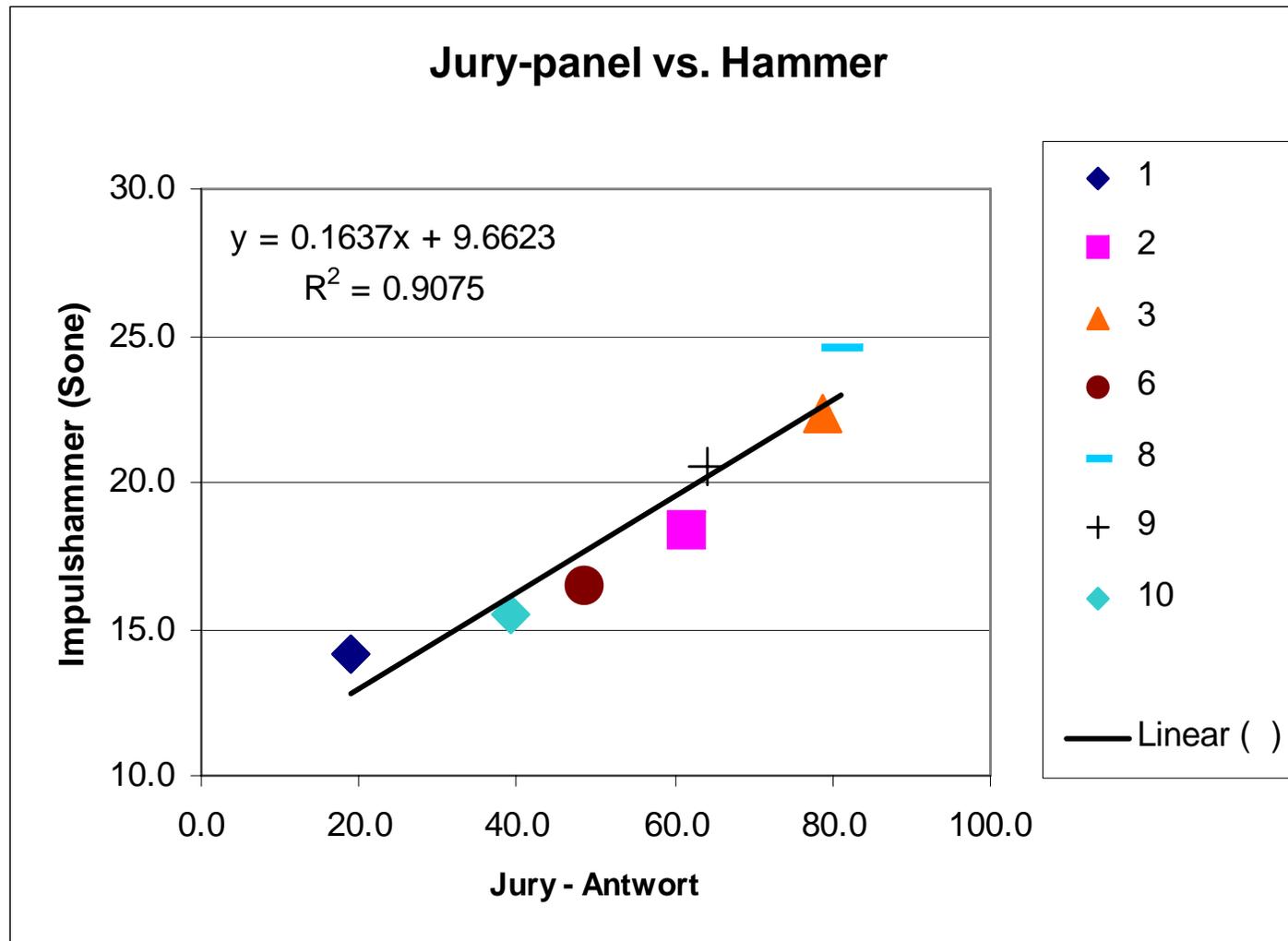
1. Klicken Sie unten auf (), um Geräusch 1 abzuspielen.
2. Bewerten Sie das Geräusch mit dem Schieberegler ().
3. Gehen Sie zum nächsten Geräusch und wiederholen Sie den Vorgang.

		eher leise		eher laut	
Geräusch 1					
Geräusch 2					✓
Geräusch 3					✓
Geräusch 4					✓
Geräusch 5					
Geräusch 6					✓
Geräusch 7					✓
Geräusch 8					✓
Geräusch 9					✓
Geräusch 10					✓

Validierung

Übereinstimmung Beurteilung und Messung

Übereinstimmung Beurteilung und Messung



Zusammenfassung

Rückblick

- Gehschall = Schlag des Absatzes
- Spezielle Situation, da beim Laminat die Masse und Steifigkeit ähnlich gross sind wie bei der Anregung (Schuh-Absatz)
⇒ technischer Test **muss** den Schuh imitieren
- Kraftmessung erlaubt die Normierung der Schlagstärke
- Impulshammer mit 200 Gramm und Hartgummi-Spitze erfüllt die Anforderungen

Ausblick

- Umsetzung in Messvorschrift erlaubt objektive Vergleiche von Laminat-Boden-Systemen
- Ein Ringversuch dazu ist im Gang

Dank

Dank an Herrn U. Scholbe von Sekisui-Alveo in Luzern für seine unermüdliche Unterstützung und Mithilfe.

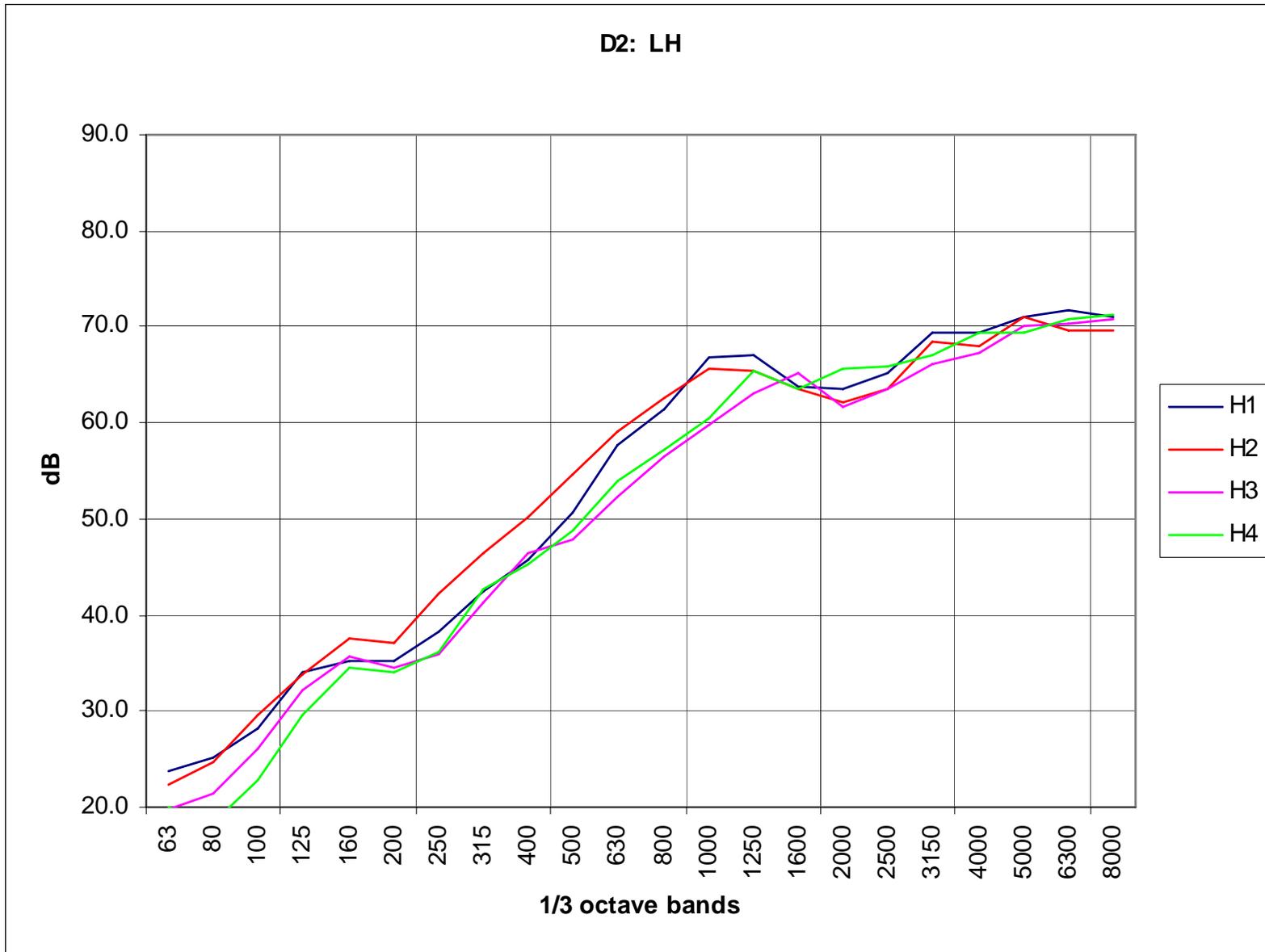
Dank an Herrn T. Smet, Leiter der EPLF-Arbeitsgruppe, für die finanzielle Ausdauer über all die Hindernisse hinweg.

Ende

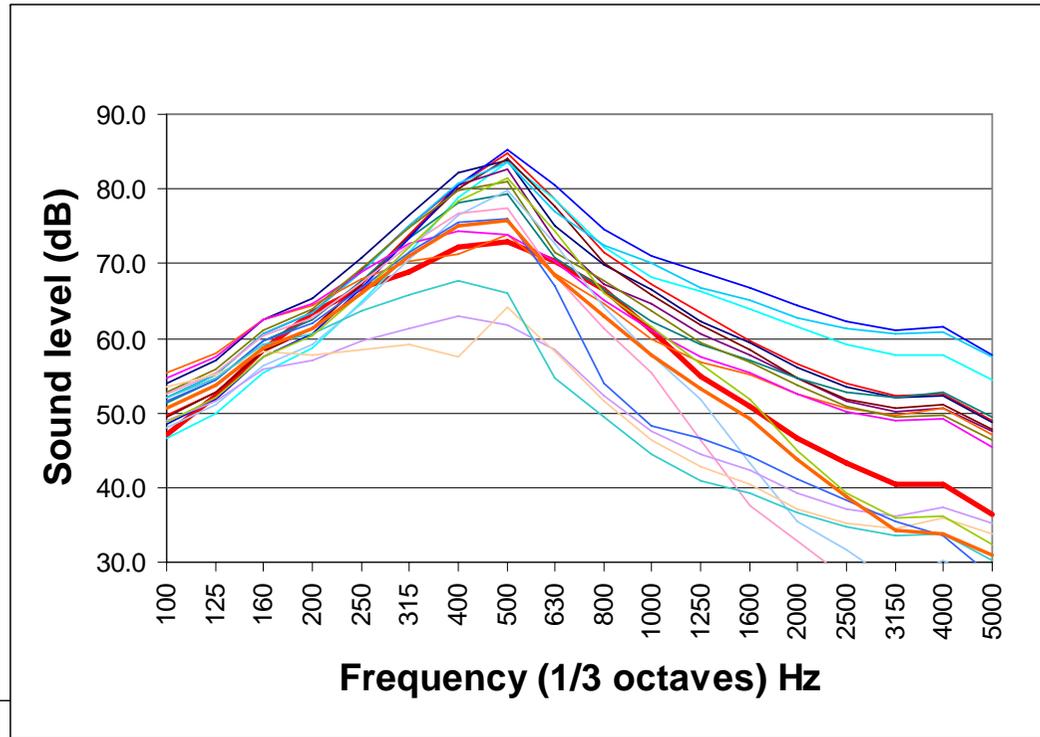
Skalierung

- Referenz: Auftreffgeschwindigkeit des Absatzes
⇒ Impuls $m \cdot v$
 - Rückprall des Hammers je nach (örtlich variierender) Unterlage
 - Kraftmessung liefert die Impulsänderung incl. Rückprallgeschwindigkeit.
 - Rückprallgeschwindigkeit kann einfach aus dem Verhältnis der Zeitabschnitte beim mehrmaligen Nachprellen bestimmt werden.
- ⇒ Zusatzmessung mit prellendem Hammer und Messen der Zeiten des 2. und 3. Aufpralls

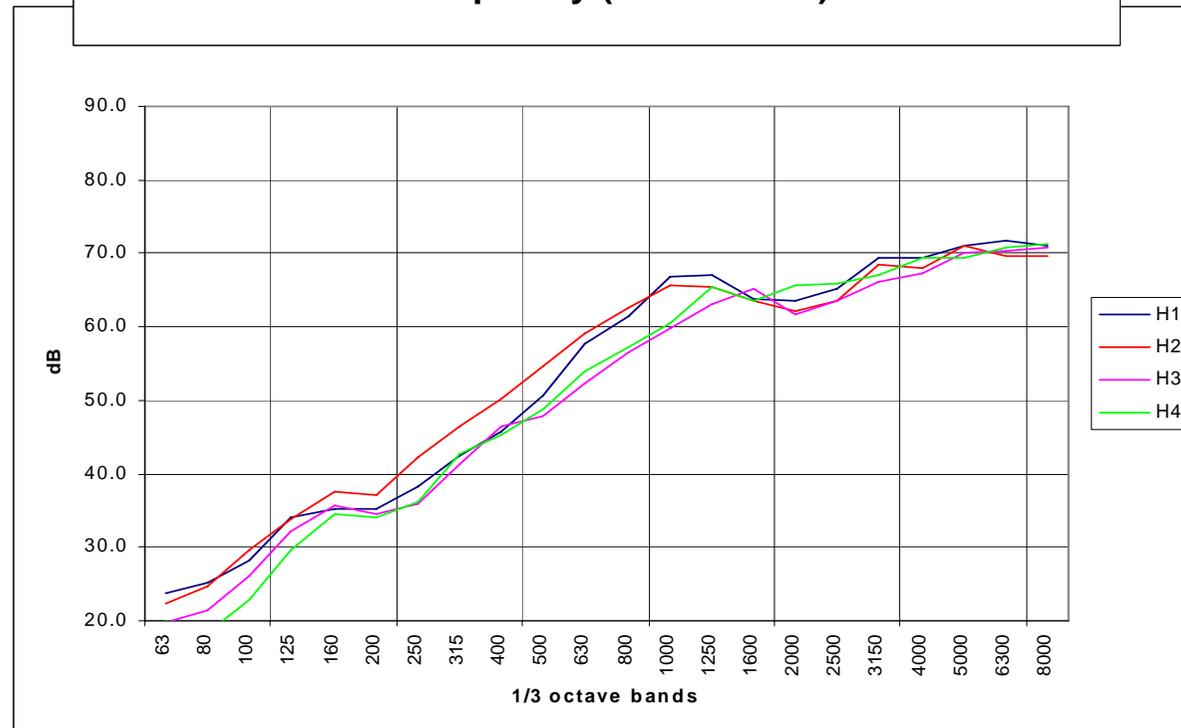
H eines Laminats, gemessen auf 4 Kreisbogen



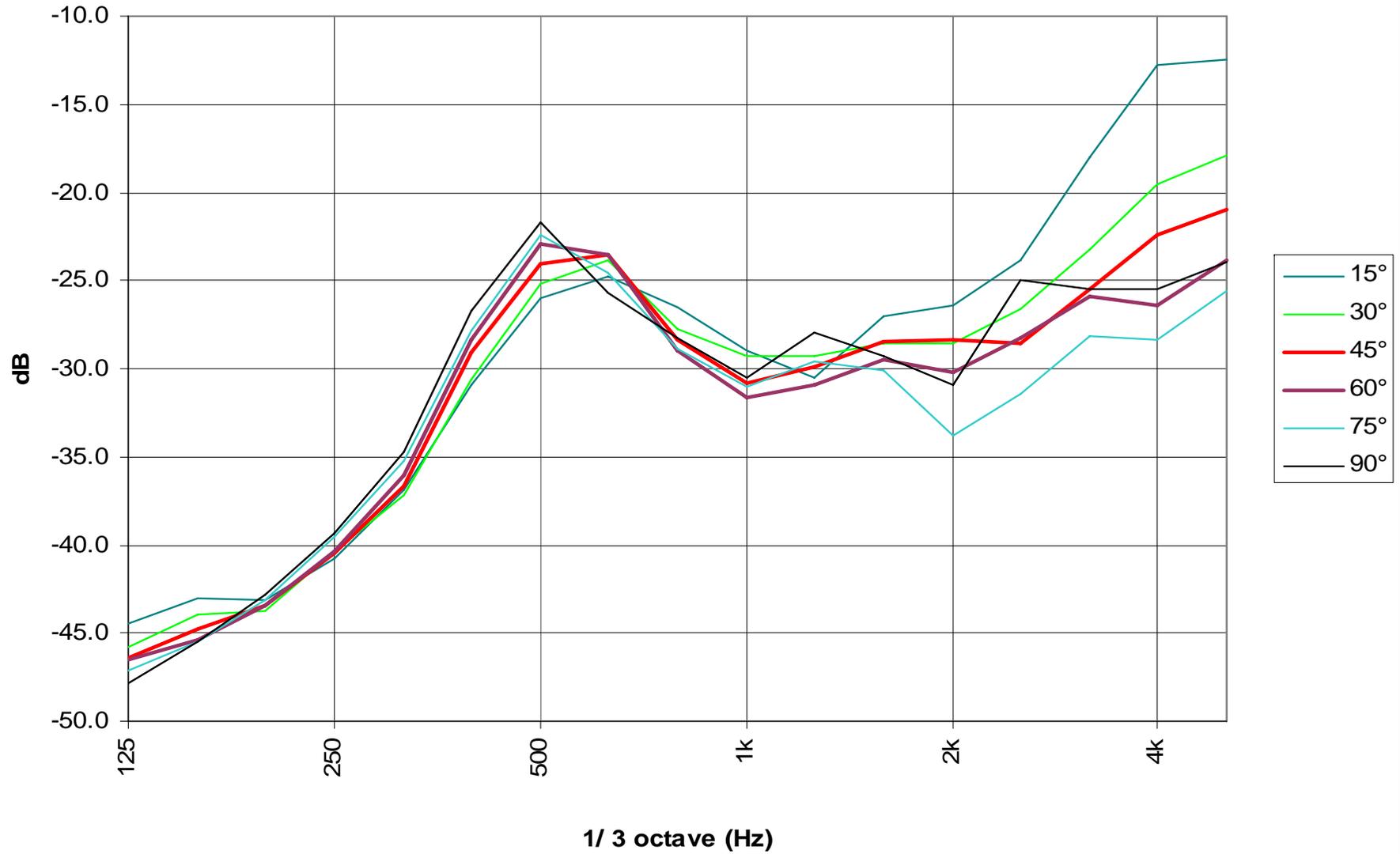
F(f)



H(f)



Average sound level per angle, normalised to Lv@2.5cm



0° = in plane, 90° = perpendicular

Impulshammer 1 kg



