

EFICACIA DE LA UTILIZACIÓN DE CUMBRERAS EN LAS BARRERAS ACÚSTICAS

REFERENCIA PACS: 43.50.Gf

Prof. Dr-Ing Michael Möser
Institut für Technische Akustik
Universidad Técnica
Berlín

1. PROPIEDADES DE LOS REFLECTORES CON IMPEDANCIA SUPERFICIAL CERO O INFINITA

Como punto de partida para entender las barreras acústicas con cumbreras que tienen una cierta impedancia, trataremos el comportamiento de los casos especiales en los que la superficie es un absorbente ideal (impedancia cero) o una superficie rígida ideal (impedancia infinita), respectivamente.

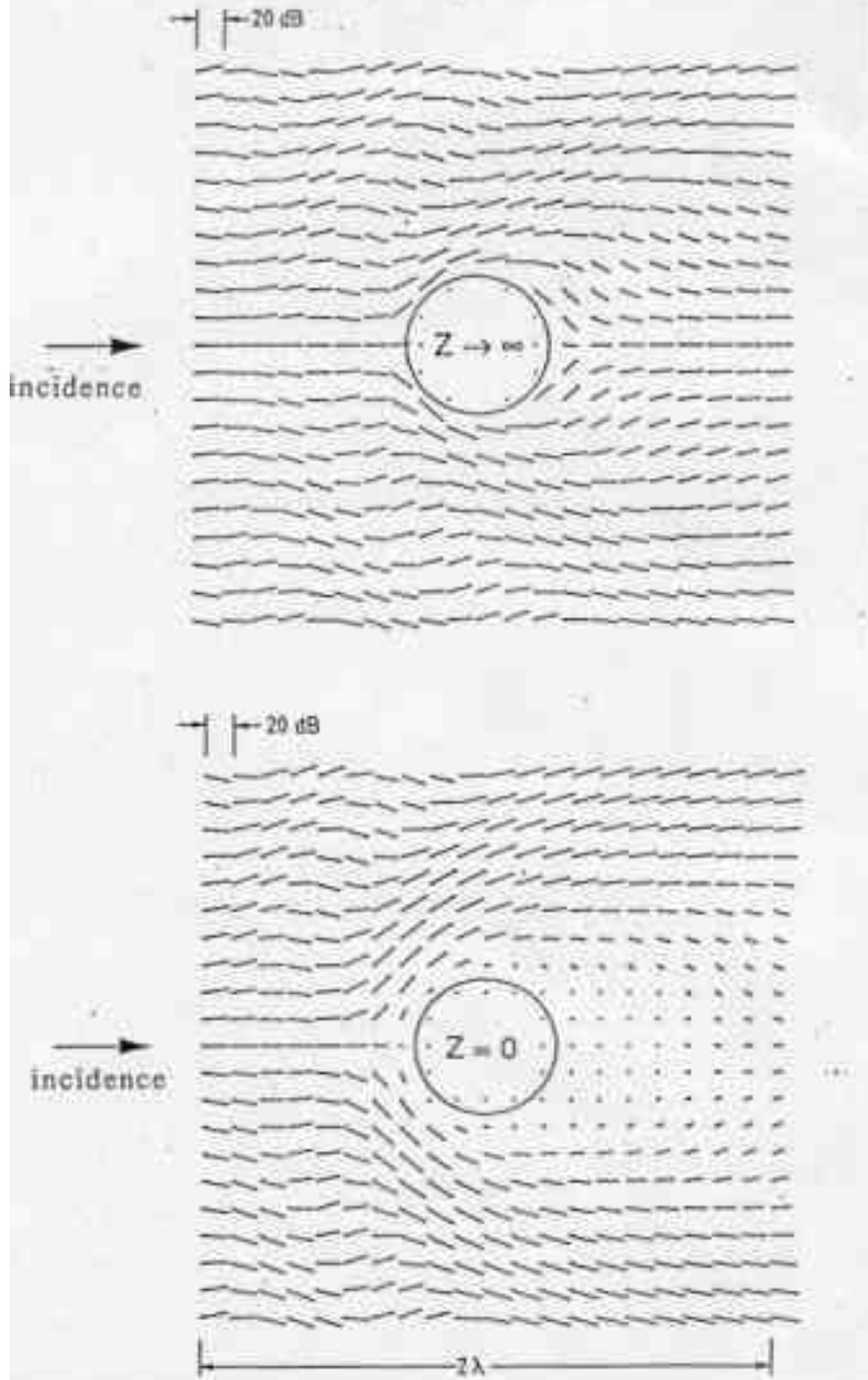
El campo acústico frente a una superficie rígida se conoce ampliamente. La componente de la velocidad de las partículas de aire normal a una superficie rígida desaparece, lo que da como resultado que la presión es aproximadamente el doble del campo incidente sin perturbar. Ello implica a la vez una presión no-cero y una velocidad tangencial en la superficie con un flujo de volumen tangencial y un transporte de energía.

Lo contrario es cierto para el campo acústico cercano a cuerpos con impedancia cero. Ya que la presión desaparece ahora en la superficie, lo mismo ocurre con la velocidad de partículas tangencial: en una superficie paralela a una superficie absorbente ideal, no hay ni flujo de volumen ni de potencia.

Estas diferencias aparecen claramente en una comparación entre las distribuciones de la intensidad espacial que aparece en la figura 1 para el caso de cuerpos cilíndricos reflectantes: para impedancia cero el campo no se ajusta a la superficie como lo hace en el caso de superficie rígida. Para $z = 0$, el campo es apartado del reflector.

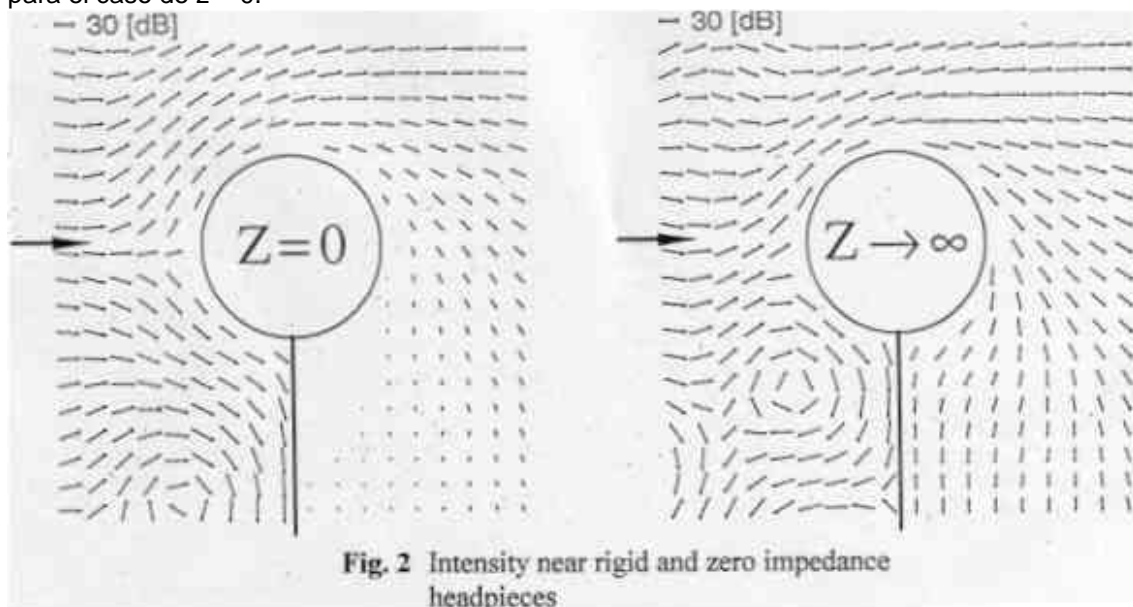


Fig. 1 Intensity near rigid and zero impedance surfaces of a cylinder



Consideremos ahora una barrera sin recubrimiento. Se esperaría en este caso que el flujo de potencia alrededor del borde resultase en una fuente no deseada de potencia hacia el campo de sombra. ¿No se podría utilizar una cumbre con impedancia cero para dispersar el flujo de intensidad incidente, y no daría como resultado una sombra amplificada?

Para encontrar que cálculo numérico respondería a esta cuestión, se ha investigado un modelo teórico. Este modelo consiste en una lámina rígida semi-infinita (la pantalla) con un cilindro fijado en el borde, y que tiene una cierta impedancia. Esta estructura se excita con una onda plana que incide bajo un cierto ángulo. Utilizando funciones de Bessel de orden igual a medio entero, se encuentra fácilmente una representación en serie del campo acústico (y se puede programar), con los procedimientos usuales. Uno de los resultados se muestra en la figura 2: de nuevo es una comparación entre superficies rígidas y absorbentes ideales, pero en este caso para cilindros fijos sobre la pantalla. La diferencia es obvia: teóricamente el campo acústico que entra en el área de la parte posterior de la pantalla es mucho más débil en el caso de impedancia cero, aún para los cuerpos tan pequeños utilizados. La razón de este hecho son los transportes de potencia y de flujo de volumen interceptados sobre y cerca de la superficie. En otras palabras: el campo incidente es mucho más rechazado hacia direcciones oblicuas para el caso de $z = 0$.



La figura 2 indica que este efecto no está restringido a una pequeña zona detrás de la barrera. De hecho, si las pérdidas por inserción en el campo lejano se calculan teóricamente, se encuentra que se hacen independientes de la distancia a la pantalla y que están fuertemente relacionadas con el llamado ángulo de difracción β (que se define entre las líneas del borde al punto de observación y la prolongación del campo incidente: ello significa simplemente que β se tiene en cuenta para el límite de la sombra geométrica). La figura 3 muestra las pérdidas por inserción teóricas por encima de β en el campo lejano para diferentes tamaños del cilindro (variación del diámetro con respecto a la longitud de onda en saltos de 1/3 de octava). Nótese que se ha encontrado que el ángulo de incidencia no tiene casi influencia sobre los resultados dados en la figura 3. Esta figura indica que impedancias cero se podrían utilizar para mejorar la sombra acústica detrás de las barreras.

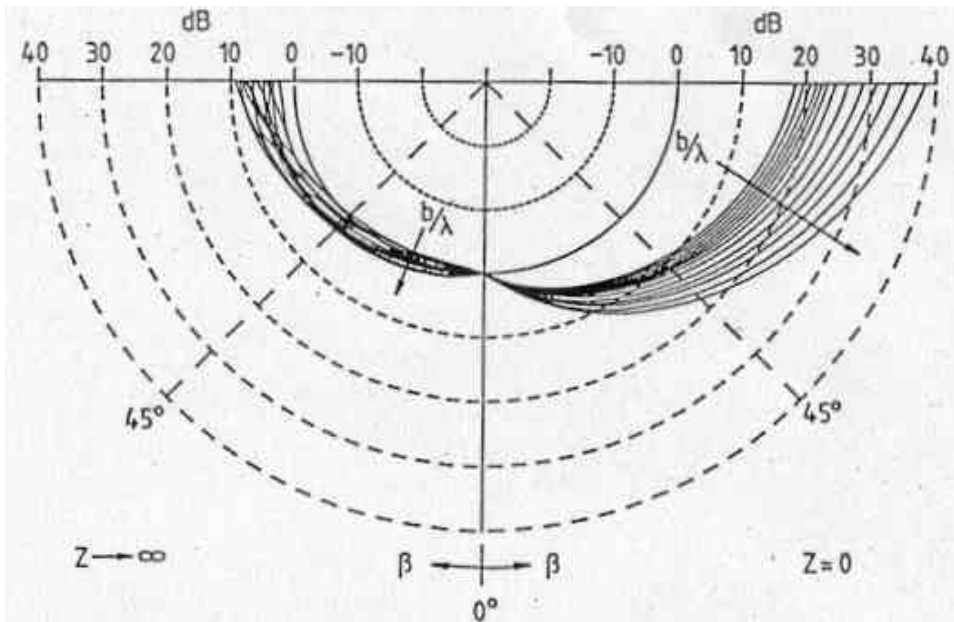


Fig. 3 Farfield insertion loss, 45° incidence

$$b/\lambda = 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, \dots, 1.6$$

2. INFLUENCIA DE LAS IMPEDANCIAS FINITAS

Es bien sabido que se puede obtener una impedancia cero mediante resonadores, únicamente a su frecuencia de resonancia. Por tanto, es muy importante desde el punto de vista práctico la cuestión de la influencia de una impedancia no cero, sino finita, y está relacionada directamente con el ancho de banda del efecto mencionado anteriormente.

Para encontrar una respuesta, supongamos que:

- la distribución espacial del campo acústico cerca de la superficie viene impuesta por la onda incidente, y que
- el aire dentro de una pequeña lámina que está en contacto directo con la superficie de la cumbre actúa como una masa pura.

La onda que pasa actúa entonces sobre la combinación de esta lámina con masa y la impedancia superficial relacionada. Sea

p_i la presión incidente sin perturbar fuera de la lámina

p_s la presión directamente sobre la superficie, con $p_s = z v$

siendo v la velocidad de la lámina de masa m'' y de la superficie;

por tanto, como $p_i - p_s = j\omega m'' v$, se llega fácilmente a la expresión del cociente de presiones

$$p_i / p_s = 1 + j\omega m'' / z$$



(nótese que en este artículo se utiliza la convención $\exp(+j\omega t)$).

Es de esperar ahora que el nivel en la región de sombra es tanto menor cuanto menor sea la presión en la superficie, p_s . Por tanto, un cociente de presiones grande indicaría pérdidas por inserción grandes debido a la cumbre; un cociente próximo a la unidad indicaría que no hay mejora, y uno menor que la unidad resultaría en una pérdida por inserción negativa.

A partir de estas consideraciones se deduce la influencia principal de los diferentes tipos de la impedancia z :

a) Tipo masa, $z = \rho c z$

El cociente de presiones es siempre mayor que 1 y converge monótonamente hacia 1 al crecer $\rho c z$. Por tanto, para una impedancia tipo masa la pérdida por inserción decrecerá monótonamente con $\rho c z$.

b) Impedancia real $z = \rho c z$

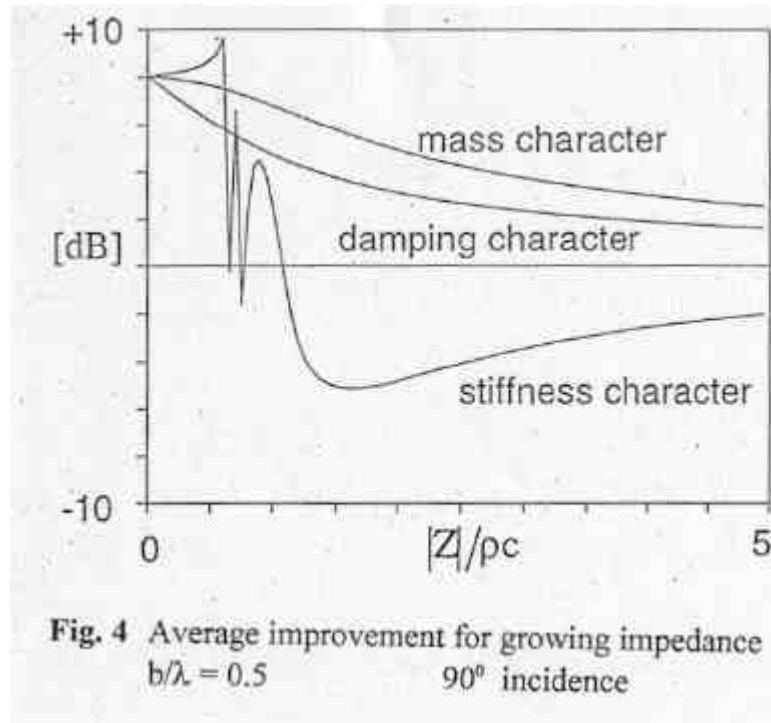
Lo mismo ocurre para impedancias reales, pero creciendo $\rho c z$ el doble de rápido que para impedancias tipo masa.

c) Tipo muelle, $z = -j \rho c z$

Para impedancia tipo muelle, solamente valores de $\rho c z$ pequeños producen una pérdida por inserción positiva. Si $\rho c z$ supera el valor $\omega m''$, la pérdida por inserción se hace negativa. Como la masa m'' se puede estimar mediante $m'' = I / 2 p$, el valor de la impedancia crítica $\rho c z = r c$ es igual a la impedancia de propagación de la onda en el aire. Esto desprecia claramente la influencia de la curvatura de la superficie.

Las estimaciones anteriores – derivadas de consideraciones más fundamentales – se comparan ahora con los cálculos teóricos del campo acústico para el caso de campo lejano. Para mayor claridad, en la figura 4 se observa la pérdida por inserción media en la región de sombra (las presiones elevadas al cuadrado e integradas sobre un cierto margen de ángulos de difracción). Se puede ver que las consideraciones simples hechas más arriba parecen describir bastante bien el comportamiento real.





La pérdida por inserción media para una cumbre de tipo resonador se muestra en la figura 5. Puede verse que no solo la frecuencia fundamental ha sido tenida en cuenta. La mejora principal con el aumento de la frecuencia se debe al hecho de que cada resonancia viene acompañada por una banda ancha con comportamiento de masa, cambiando el signo en cada antiresonancia (ceros de la impedancia recíproca, es decir, la admitancia), cambiando así al tipo muelle en estas frecuencias.

3. RESULTADOS DE MEDIDA

Se han llevado a cabo mediciones en cámara anecoica para validar las consideraciones teóricas anteriores, y también in situ en una instalación de pruebas de Deutsche Bahn AG cerca de Munich.

La instalación en la cámara anecoica se muestra en la figura 6. La longitud de la barrera es 5 m, y forma la hipotenusa de un triángulo cuyos catetos son las paredes absorbentes de la cámara.

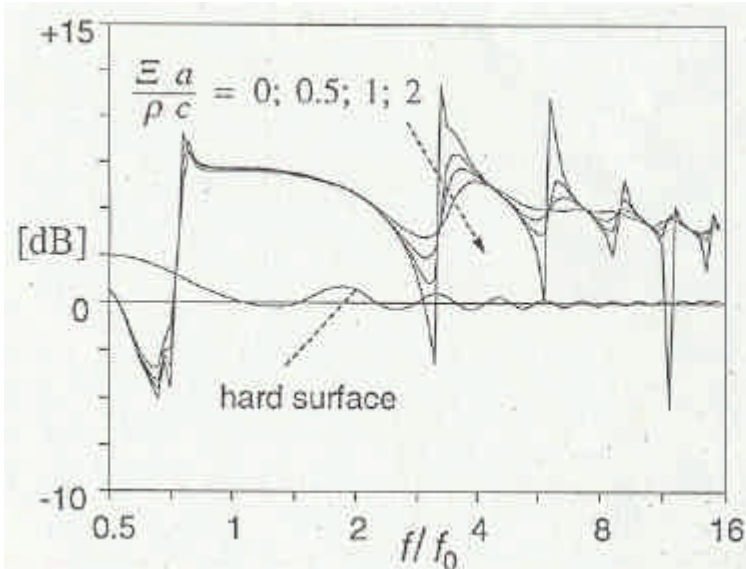
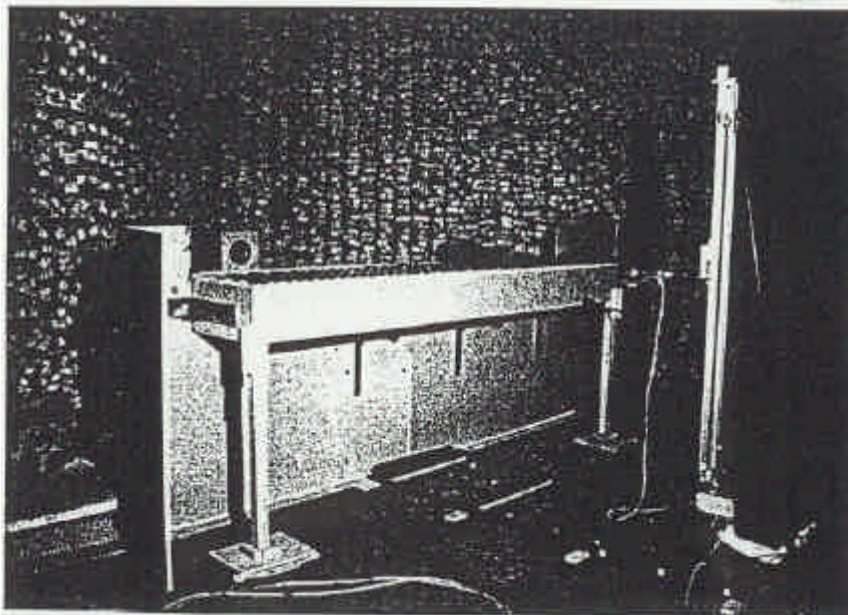


Fig. 5
Average improvement for a resonator type headpiece, 25% filled with damping material, varying flow resistance. $b/\lambda = 0.3$ at resonance 60° incidence

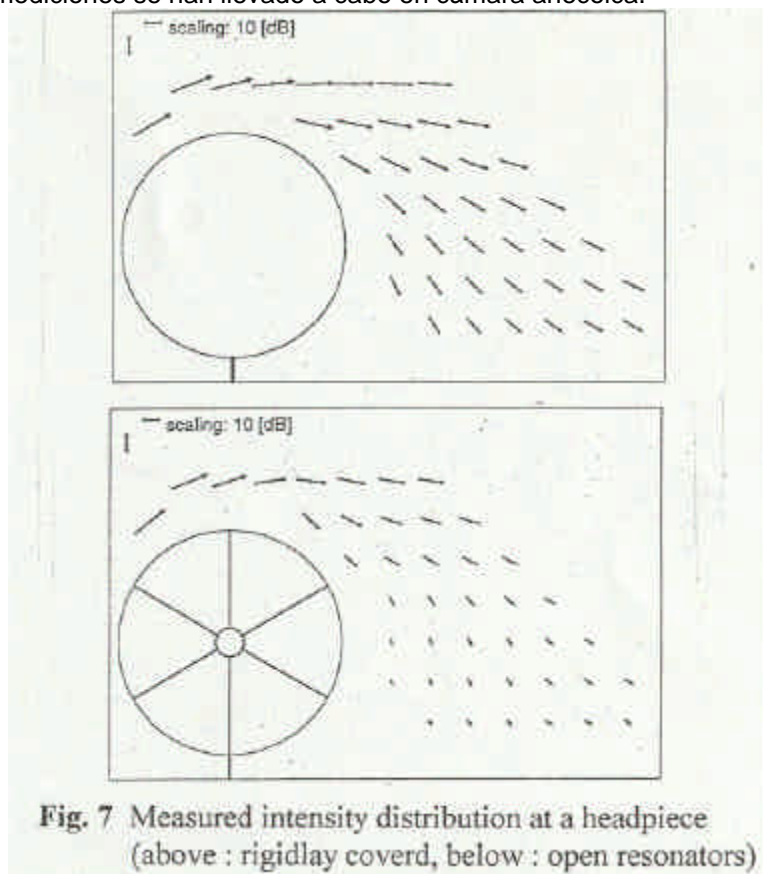
En una primera fase del proyecto se ha utilizado como superficie del tipo resonador una cumbre cilíndrica con seis segmentos interiores. El resultado ha sido satisfactorio pues también de las mediciones se observa que el flujo de intensidad alrededor de una cumbre rígida es mucho mayor que en el caso de una cumbre tipo resonador para la resonancia. (véase la figura 7, utilizando una banda de ruido blanco de anchura 1/3 de octava alrededor de la frecuencia de resonancia).

Fig. 6 Measurement setup in the anechoic room



El último desarrollo consiste en una cumbre hecha con muchos tubos abiertos de sección cuadrada, como se muestra en la figura 8, junto con las mejoras obtenidas. En la banda de octava que incluye la resonancia, la mejora varía entre, digamos, 3 y 6 dB. En la siguiente octava las diferencias son pocas para el caso rígido, habiéndose encontrado en las

mediciones una mejora de unos 3 dB para la octava más alta mostrada. Ha de hacerse notar que las diferencias de nivel en este caso NO incluyen el aumento de altura: se muestran las diferencias entre “cubrería cubierta, rígida” y “cubrería no cubierta, abierta”. Para los resultados mostrados en la figura 8, los tubos se han amortiguado cuidadosamente con una pequeña cantidad de material absorbente para obtener un mayor ancho de banda. Sin el amortiguamiento, en la resonancia, se han medido pérdidas por inserción aún mejores (hasta 10 dB). Estas mediciones se han llevado a cabo en cámara anecoica.



Finalmente, en la figura 9 se observa el dispositivo de prueba in situ en una instalación cercana a una vía de ferrocarril. Los resultados expuestos son similares a los de las mediciones en laboratorio.

Los valores que se dan en la figura 9 corresponden a una excitación con altavoz. Debido a la longitud muy limitada de la cubrería en ensayo (10 m), el ruido de los trenes que pasaban no se pudo utilizar como señal de medida. En el futuro, se ha planeado instalar un dispositivo de prueba mucho más largo, que se utilizará para hallar la ventaja real que proporcione un tipo de cubrería de esta naturaleza.

Fig. 22

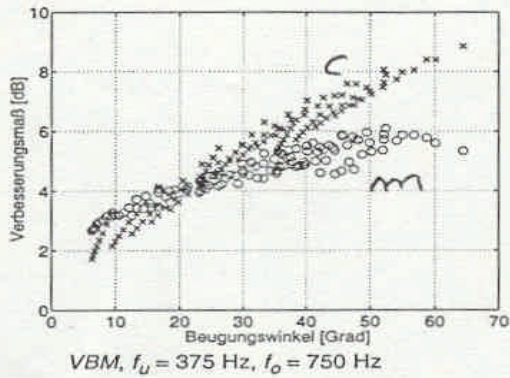


Fig. 23

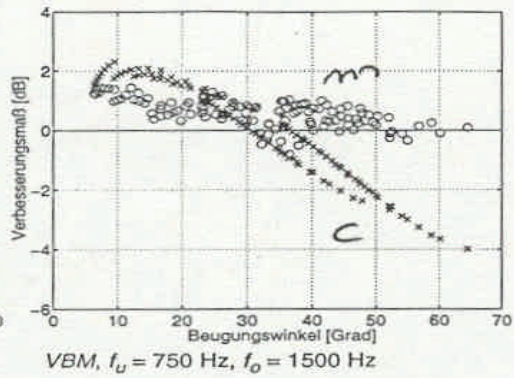


Fig. 24

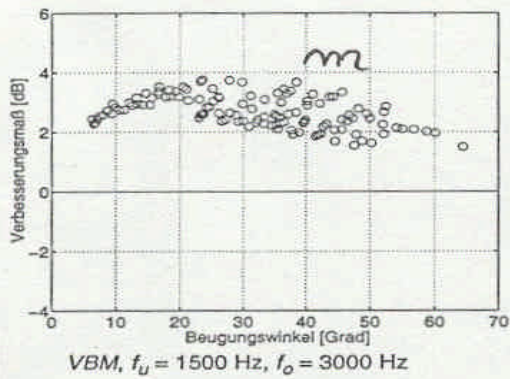


Fig. 25

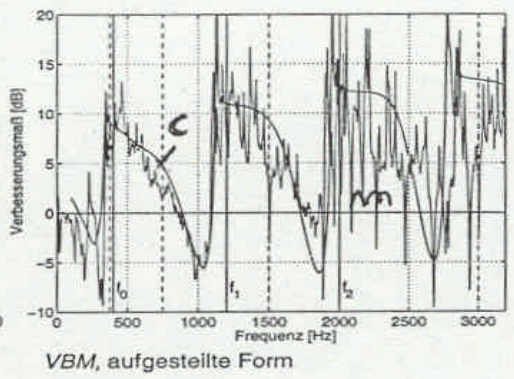


Fig. 26

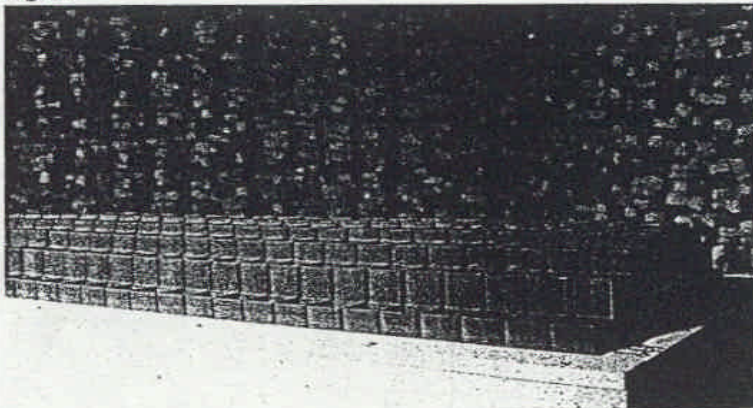
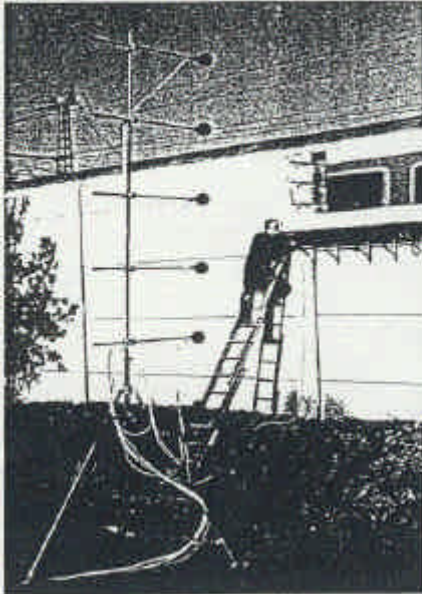


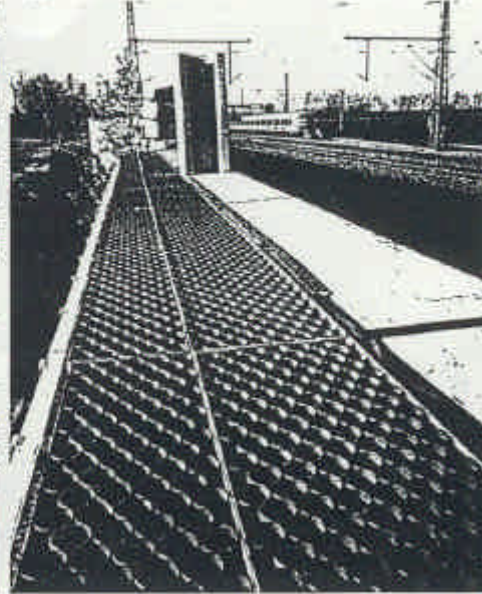
Fig. 8 Measured (m) and calculated (c) improvement of the headpiece below in one third octaves and for one point over frequency (from a german report)

Fig. 35



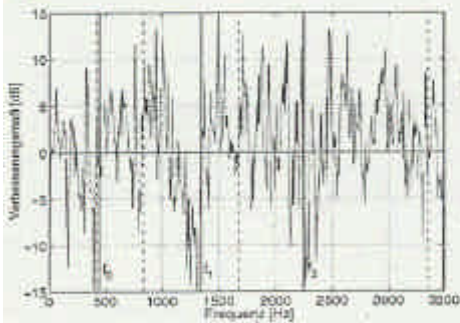
Maßmikrofonanordnung

Fig. 36



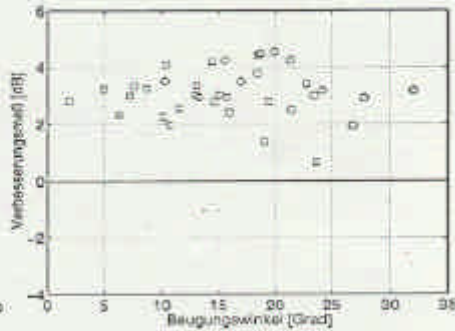
Aufsatzoberseite

Fig. 37



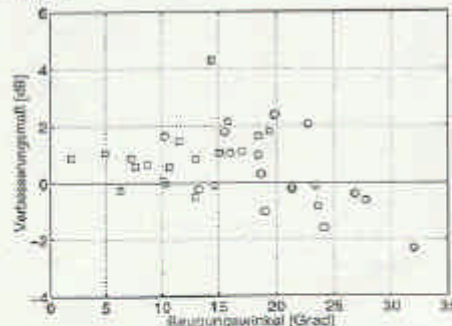
VBM, Aufmessung

Fig. 38



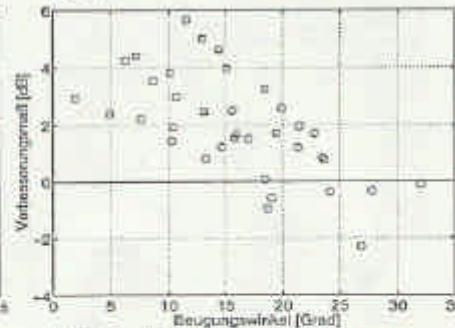
VBM, $f_u = 420$ Hz, $f_o = 840$ Hz

Fig. 39



VBM, $f_u = 840$ Hz, $f_o = 1680$ Hz

Fig. 40



VBM, $f_u = 1680$ Hz, $f_o = 3360$ Hz

Fig. 9 In situ measurement of the headpiece shown together with the improvement (from a german report)

Pies de figura:

Figura 1.- Intensidad en las proximidades de un cilindro con superficie casi rígida y de impedancia cero.

Figura 2.- Intensidad en las proximidades de cubreras casi rígida y de impedancia cero.

Figura 3.- Pérdida por inserción en el campo lejano, incidencia de 45°.

$$\beta / \lambda = 0,1; 0,125; 0,16; 0,2; \dots; 1,6$$

Figura 4.- Mejora media para impedancia creciente

$$\beta / \lambda = 0,5 \quad \text{incidencia } 90^\circ$$

Figura 5.- Mejora media para una cubrera del tipo resonador, relleno un 25 % con material amortiguador, variando la resistencia al flujo. $\beta / \lambda = 0,3$, incidencia 60°

Figura 6.- Instalación de medida en la cámara anecoica.

Figura 7.- Distribución de intensidad medida en la cubrera (arriba, cubierta rígidamente; abajo, resonadores abiertos).

Figura 8.- Mejora medida (m) y calculada (c) de la cubrera que se muestra, en bandas de 1/3 de octava en un punto sobre la frecuencia (de un informe alemán).

Figura 9.- Medidas in situ de la cubrera, y mejoras obtenidas (de un informe alemán).