



F10 – Rumsakustik, efterklangstid

Seminarieuppgift

En oändligt stor vägg vibrerar med frekvensen 800 Hz. Med en mikrofon uppmäter man ljudnivån 50 dB en bit från väggen.

- Vad är ljudtryckets effektivvärde?
- Bestäm ljudtryckets amplitud, våglängd och vågtal.
- Uttryck ljudtrycket på komplex form.
- Uttryck partikelhastigheten på komplex form.
- Beräkna uppmätt ljudnivå om man placerar en hård vägg 0.1 m bakom mikrofonen. (Bortse från ljud som reflekteras i den vibrerande ytan)
- Var ska man placera väggen för att få helt tyst vid mikrofonen?
- Anta att man lägger en absorber på den bakomliggande väggen med $\alpha = 0.7$. Vad blir ljudnivån vid destruktiv interferens? Vad blir ljudnivån vid konstruktiv interferens?

Kristian Ståhle / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Rumsakustik – 3 modeller över ljudet

- Statistisk rumsakustik
 - Diffust ljudfält, exponentiellt avtagande ljudtryck
- Vågteoretisk rumsakustik
 - Egenfrekvenser, stående vågor, interferens...
- Geometrisk rumsakustik
 - Strålgångsakustik, spegelkällor

Kristian Ståhle / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Statistisk rumsakustik

- Ljudfältet antas vara diffust, d v s jämnt fördelat över volymen
- Ljudtrycket avtar exponentiellt med tiden när ljudkällan tystnar
- Ljudet avtar i och med att en del av det som infaller absorberas mot väggar och andra ytor (golv, möbler, föremål, absorbenter och människor)
- Ju mer absorberande material desto snabbare avtar ljudet – efterklangstid

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Efterklangstid

- Oberoende hur starkt direktljudet är
- Ljudenergin i ett rum klingar av exponentiellt:

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

- T_{60} = tiden det tar för ljudnivån att sjunka med 60 dB efter att källan stängts av

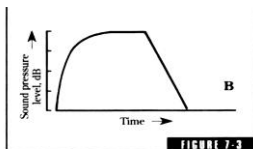


FIGURE 7-3
The growth and decay of sound in a room. (A) Vertical scale in linear sound pressure units. (B) The vertical scale in logarithmic units (decibels).

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Mätning av efterklangstid

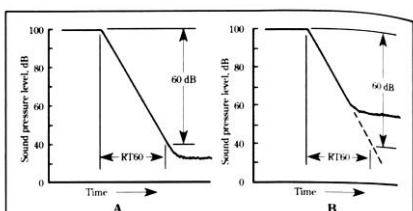
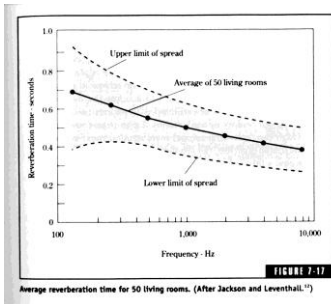


FIGURE 7-4
The length of the decay dependent on strength of the source and the noise level. (A) Rarely do practical circumstances allow a full 60-dB decay. (B) The slope of the limited decay is extrapolated to determine the reverberation time.

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Typiska efterklangstider

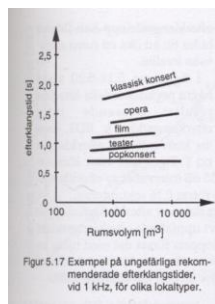


Average reverberation time for 50 living rooms. (After Jackson and Leventhall.)

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Rekommenderade efterklangstider

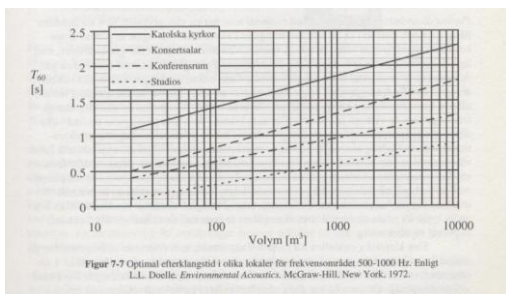
- Tal: $T_{60} < 0.8$ s
- Tolerans ± 0.1 s, eller $\pm 10\%$ över frekvensområdet $125 \text{ Hz} \leq f \leq 8 \text{ kHz}$



Figur 5.17 Exempel på ungefärliga rekommenderade efterklangstider, vid 1 kHz, för olika lokaltyper.

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Rekommenderade efterklangstider



Figur 7-7 Optimal efterklangstid i olika lokaler för frekvensområdet 500-1000 Hz. Enligt L.L. Daelle, *Environmental Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1972.

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

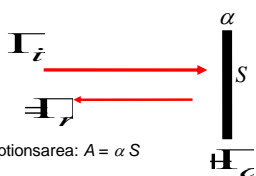
Efterklangstider enl standard SS 25268:2007

Tabell 27 – Längsta efterklangstid i rum, T_{20} , för hotell och restauranger

Typ av utrymme	T_{20} s			
	Ljudklass			
	A	B	C	D
27a Gåstrum	0,5	0,8	0,8	–
27b Utrymme för samtal i grupp exempelvis mötesrum, konferensrum	0,6	0,6	0,6	–
27c Utrymme för matservice större än 100 m ² exempelvis matsal, restaurang, cafeteria	0,5	0,6	0,6	–
27d Övriga utrymnen där människor vistas mer än tillfälligt exempelvis kontor, personalsrum, reception	0,5	0,6	0,6	–
27e Utrymme där människor vistas tillfälligt exempelvis foajé, korridor, entré, hisshall, kapprum, vilorum	0,6	0,8	0,8	–
27f – dock i trapphus	1,0	1,2	1,5	–

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Beräkning av efterklangstid – Absorptionsarea



$$\alpha = \Pi_a / \Pi_i$$

- Absorptionsarea: $A = \alpha S$

[m²] eller [m²S]

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Absorptionskoefficienter – α

Väggar:	125	250	500	1k	2k	4k
Betong	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Tegel	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Tegel, putsad	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Tegel, målad	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Gipsskivevägg	0,12	0,1	0,08	0,06	0,06	0,06
13 Gips på 25 regler	0,16	0,15	0,07	0,07	0,05	0,06
13 Gips på 25 regler med mineralull	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07
13 Gips på 100 regler	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
50 Tråpanel	0,1	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Absorptionsareor – [m²S]

Ljudabsorption per föremål (m ² st):	125	250	500	1k	2k	4k
Stående person i ytterkläder	0,17	0,41	0,91	1,3	1,43	1,47
Stående person i innekädder	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Sittande person	0,17	0,36	0,47	0,52	0,5	0,46
Trästol	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Trästol med klädd sits	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Stol med klädd sits och rygg	0,17	0,23	0,23	0,22	0,19	0,18
Stoppad teaterstol, tom	0,17	0,24	0,31	0,37	0,36	0,31
Stoppad teaterstol, med en pers/stol	0,24	0,38	0,49	0,6	0,61	0,63

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Sabines formel [sä]-bins formel]

- Koppling mellan efterklangstid och absorptionsarea:

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A}$$

- A = absorptionsarea
- V = rummets volym



Wallace C. Sabine (1868-1919)

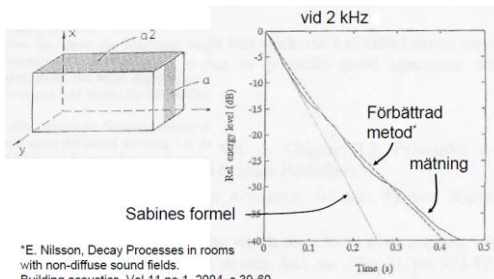
Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Förutsättningar för Sabines formel

- Idealt, diffust ljudfält
- Medelabsorptionsfaktor $\alpha_d < 0.3$
- Ljudabsorberande ytor jämnt fördelade i rummet
- Rummet har inte alltför extrem form, d v s $L \sim B \sim H$
(ex på extrem form: korridor eller kontorslandskap)

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

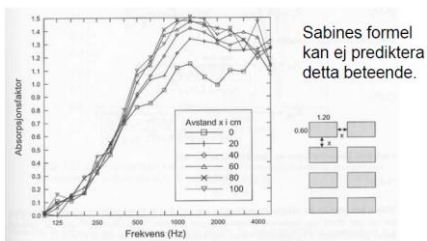
Ojämnt fördelade absorbenter



*E. Nilsson, Decay Processes in rooms with non-diffuse sound fields. Building acoustics, Vol 11 no 1, 2004, s.39-60.

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Uppdelade absorbenter



Sabines formel kan ej prediktera detta beteende.

Figur 5-21 Absorptionsfaktor mät i klångrom för 8 stk. 25 mm mattor av mineralull, totalt areal 5,8 m². Dimensioner och konfiguration som vist i skisse. (Efter avsningsuppgift NTMU).

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Mätning av α i efterklangsrum

- Rum utan absorberent:

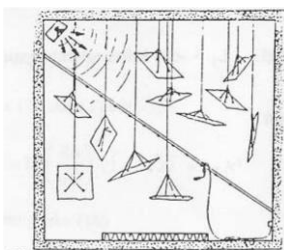
$$T_{60}^I = 0,16 \frac{V}{A^I}$$

- Rum med absorberent:

$$T_{60}^{II} = 0,16 \frac{V}{A^{II}}$$

- Tillsatt absorptionsarea:

$$A = A^{II} - A^I = 0,16V \left(\frac{1}{T_{60}^{II}} - \frac{1}{T_{60}^I} \right)$$



Figur 7. Ljudhårt rum med diffusorer.

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: från boken

- I ett efterklangsrum med volymen $V = 200 \text{ m}^3$ och efterklangstiden $T_{60} = 12 \text{ s}$ för alla frekvenser lägger man in absorbermaterial på en yta av $S = 10 \text{ m}^2$ (standardförfarande). Den nya efterklangstiden mäts upp till $T_{60} = 8 \text{ s}$ vid $f = 100 \text{ Hz}$ och $T_{60} = 2 \text{ s}$ vid $f = 2 \text{ kHz}$. Beräkna absorptionskoefficienten α för de båda frekvenserna.

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Önskade efterklangstider:

Frekvens Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Efterklangstid, s	2,6	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7

- Rummets volym: $23 \times 7.7 \times 46 \approx 8000 \text{ m}^3$
- Antal åhörare: 1000 pers

$$T_{60} = K \cdot \frac{V}{A} \Rightarrow A = K \cdot \frac{V}{T_{60}} \begin{cases} T_{60} = 2,6 \Rightarrow A \approx 500 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 2,0 \Rightarrow A \approx 650 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 1,7 \Rightarrow A \approx 750 \text{ m}^2 \end{cases}$$

Frekvens Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m ²	500	650	750	750	750	750

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Absorptionsarea för en person

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m ²	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46

- Absorptionsarea för 1000 pers:

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m ²	170	360	470	520	500	460

- Återstående absorptionsarea

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m ²	330	290	280	230	226	230

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Golv (1058 m²): trägolv på regel

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionskoefficient α	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Absorptionsyta A, m ²	158	116	105	77	63	77
Återstående absorptionsyta A, m ²	330-158 = 172	290-116 = 174	280-105 = 175	230-77 = 153	226-63 = 163	230-77 = 153

- Sido- och podieväggar (900 m²): plywood

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionskoefficient α	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Absorptionsyta A, m ²	250	198	153	81	90	97
Avvikelse från önskat A, m ²	172-250 = -78	174-198 = -24	175-153 = 22	153-81 = 72	163-90 = 73	153-97 = 56

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Slutresultat:

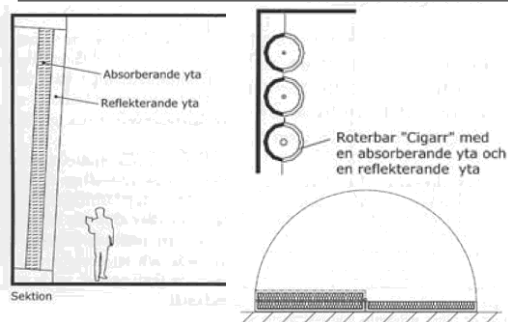
Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Önskad absorptionsarea, m ²	500	650	750	750	750	750
Erhållen absorptionsarea, m ²	578	674	728	678	677	687
Önskad efterklangstid (s)	2,6	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7
Erhållen efterklangstid (s)	2,2	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9

- En bit på väg, men uppfyller fortfarande inte kraven!

Hur kan man variera T_{60} i en befintlig lokal?

Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Variabla absorbenter



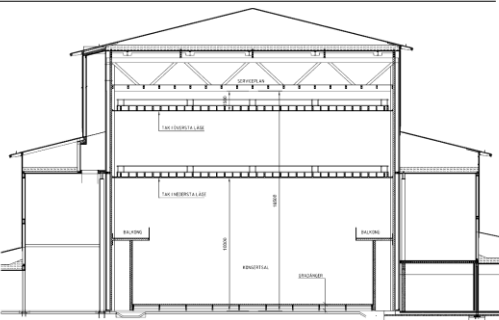
Kristian Stååne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Studio acusticum i Piteå $T_{60} = 1.1 - 2.5$ s



Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Studio acusticum



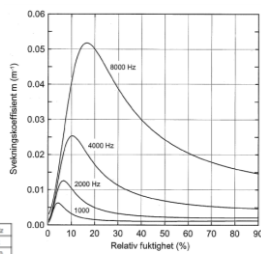
Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Luftabsorption

- Sabines formel korrigeras till

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A + 4mV}$$

- Endast stora salar



a in 10 ³ Pa/kg per metre, for octave bands with centre frequency in Hz									
	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
10 °C, 30% - 50% humidity	0.1	0.2	0.5	1.1	2.7	6.4	20.0		
10 °C, 50% - 70% humidity	0.1	0.2	0.5	0.8	1.8	5.9	21.1		
10 °C, 70% - 90% humidity	0.1	0.2	0.5	0.7	1.4	4.4	15.8		
20 °C, 30% - 50% humidity	0.1	0.3	0.6	1.0	1.9	5.8	20.3		
20 °C, 50% - 70% humidity	0.1	0.3	0.6	1.0	1.7	4.1	13.5		
20 °C, 70% - 90% humidity	0.1	0.3	0.6	1.1	1.7	3.5	10.8		

Kristian Ståhne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01
