Troldtekt®
akustik

Om akustik

Gode toner i arkitekturen

Det ombyggede kraftvarmeværk på havnen i Århus huser i dag Filmbyen, hvor akustikken er reguleret med lydabsorberende loftsbeklædning.



God akustik på tegnebrættet 2

Kapitel 1
Grundlæggende akustiske begreber 3-6

Kapitel 2
Efterklang og absorption 7-9

Kapitel 3
De forskellige absorbenttyper 10-13

Kapitel 4
God akustik 14-17

Kapitel 5
Taleforståelighed og taleforståelighedsmål 18-19

Kapitel 6
Myndighedernes krav 20-22

Stikordsregister 23

Udgivet af: L. Hammerich A/S, 2009
Foto: Helene Høyer Mikkelsen, Henrik Bjerregrav og Poul Pedersen
Design: www.ineo.dk
Tekst: www.protekst.dk

God akustik på tegnebrættet

Der er en glædelig udvikling i gang inden for akustisk kvalitet i byggeriet. Både bygherre og slutbruger har fået ørerne op for akustisk komfort og den betydning, akustikken har for menneskers velbefindende. Derfor har branchen som sådan også øget fokus på akustik.

Traditionelt er akustik ellers et fjernt og eksotisk felt. Et felt, befolket med specialister, forskere og andet godtfolk, som først bliver fløjet ind, når skaden er sket og et nybyggeri står færdigt med en akustik, der skriger til himlen. Resultatet, når man iværksætter akustiske lappeløsninger, er hverken æstetisk eller økonomisk fordelagtigt.

Det øgede fokus på akustiske kvaliteter hænger måske sammen med den minimalistiske byggestil, der indtil nu har kendetegnet 2000-tallet. Med sine rene linjer, åbne rum og glatte flader er stilen æstetisk velfungerende, men enhver, der har prøvet at føre en samtale i de minimalistisk indrettede "samtalekøkkener", ved, hvad akustik er (eller rettere sagt ikke er).

Selvom arkitekter og planlæggere måske naturligt har større fokus på form, materialer, belysning, farver og – selvfølgelig – økonomi, er der altså gevinster at hente ved at tænke akustisk kvalitet ind i projekteringsfasen. Viden, erfaring og materialer står i dag til rådighed, så akustik og æstetik kan gå hånd i hånd. Og erfaringen viser, at det ikke er dyrere (eller kun marginalt dyrere) at tegne akustiske komfortkrav ind fra begyndelsen.

Men hvad er god akustik? Hvordan frembringer man en akustik, der er i overensstemmelse med bygningsreglementets krav og tilfører komfort til byggeriet? Og hvordan skal man gribe det akustiske aspekt an, mens byggeriet endnu kun er streger på papir?

I hæftet her introducerer vi de begreber, beregningsmetoder og parametre, der skal i spil for, at vi allerede på tegnebrættet kan skabe behagelige, velafbalancerede rum, som er indrettet på deres anvendelse og har en tydelig og klar lydgengivelse og -oplevelse. Hæftet er ikke ment som en udtømmende gennemgang af emnet, og det er ikke hensigten, at man efter endt læsning nødvendigvis selv kan få det akustiske regnestykke til at gå op. Derimod er det hensigten, at hæftet kan være en øjenåbner og inspirationskilde, så akustikken i fremtiden kan vinde gehør i arkitekturen.

Jan Voetmann

Figurer uden kildeangivelse er Jan Voetmanns eller L. Hammerich´s eget materiale

Grundlæggende akustiske begreber

Dette kapitel giver en indføring i de begreber og de beregningsprincipper, der er nødvendige for at kunne beregne lyd og til dels oplevelsen af lyd i et rum. Med den basisviden er det muligt at være opmærksom på – og styre uden om – de akustiske fælder, der kan opstå i byggeri.

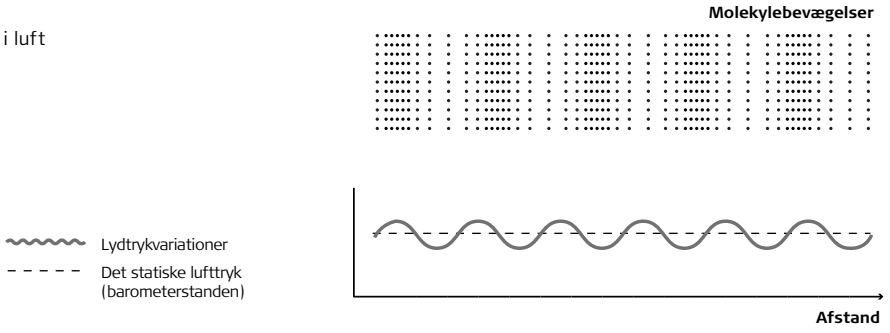
Lyd er elastiske svingninger i luft, væsker eller faste stoffer. Alle stoffer er elastiske, men elasticiteten er størst i luft og mindst i faste stoffer. Tag en cykelpumpe, hold for ventilen, og pump. Den elasticitet, man herved føler, er netop den indespærrede lufts elasticitet.

Det er molekylerne i stofferne, der svinger, for eksempel når en højttalermembran skubber til luftmolekylerne foran membranen. Den opståede svingningsenergi overføres til nabomolekylerne, og på denne måde forplanter lyden (det vil sige lydenergien) sig til omgivelserne. Når energien rammer øret, sættes trommehinden i bevægelse, og vi hører lyden, hvis den har en passende tonehøjde (frekvens) og lydstyrke. (Se figur 1).

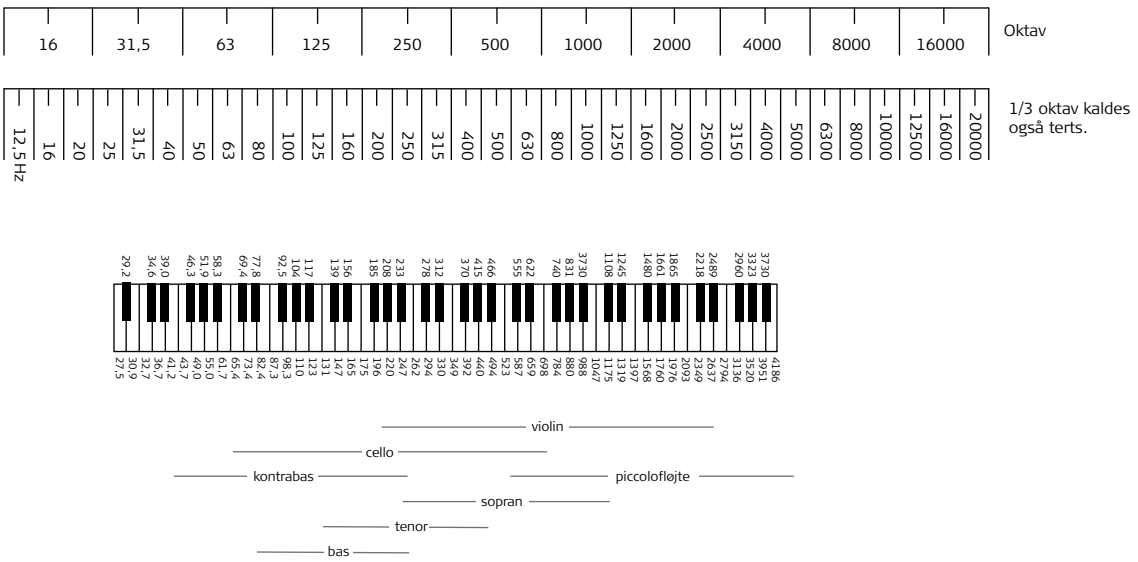
Der kan også opstå lydsvingninger i faste stoffer. Hvis vi borer i en væg med en boremaskine, forplantes lydenergien i væggen, og lyden kan herefter bevæge sig over lange afstande inde i væggen. Det kan beboere i betonbyggeri tale med om.

Figur 1

Udbredelse af en plan lydbølge i luft



Figur 2



Kilde: DELTA

VI FÅR BRUG FOR FØLGENDE DEFINITIONER

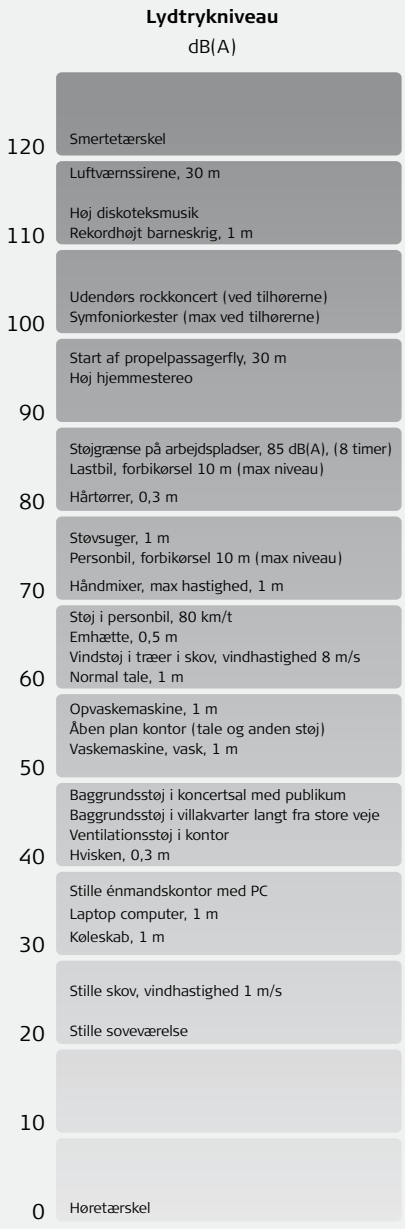
Frekvens er antal (lyd-) svingninger per sekund. Måleenheden er hertz (Hz). Øret er i stand til at opfatte svingninger i frekvensområdet 20 Hz (meget dyb bas) op til 15.000-18.000 Hz (meget høj, lys diskant). Efterhånden som vi bliver ældre, falder evnen til at høre den allerlyseste diskant (for eksempel lyden af græshopper), og i 60-års alderen ligger grænsen på omkring 10.000 Hz.

I bygningsakustikken beskæftiger vi os typisk med, hvorledes bygningsmaterialer fungerer i frekvensområdet fra cirka 125 Hz til cirka 4.000 Hz. I krævende tilfælde fra cirka 63 Hz til cirka 8.000 Hz.

Lydstyrken afhænger af, hvor store udsving lydsvingningerne udfører. Man kan udtrykke lydstyrken på flere måder, men i almindelighed måler man, hvor kraftigt lydtrykket er. Ser man nu på, hvor stort et område øret er i stand til at opfatte, fra svage lydtryk (små udsving) til kraftige lydtryk (store udsving), så viser det sig, at øret dækker et kolossalt stort område. De kraftigste lydtryk er således omkring en million gange kraftigere end de svageste lydtryk, vi kan opfatte. Det er derfor hensigtsmæssigt at skifte til en anden skala, den såkaldte decibelskala. Denne skala, som er logaritmisk, passer bedre til den måde, øret opfatter lydvariationer på. Skalaen er indrettet sådan, at 0 decibel (dB) svarer til den svageste lyd, vi kan opfatte. De kraftigste lyde, vi kommer ud for, ligger på 120-130 dB. Herunder er vist en skala over typiske lydniveauer angivet i dB.

Støjbarometer (Se figur 3)
0 dB betyder ikke, at der slet ikke er lyd tilstede. Det betyder blot, at vi er på grænsen af, hvad vi kan høre. Der kan godt optræde lyde, som er svagere end 0 dB, vi kan bare ikke høre dem.

Figur 3



Kilde: DELTA

A-vægtning

Vi skal lige have knyttet et par andre begreber til lydstyrken, som har at gøre med, hvorledes lydstyrkens karakter påvirker vores hørelse og vores opfattelse af lyden.

Det viser sig, at øret ikke opfatter alle frekvenser lige kraftigt. Generelt opfattes dybe toner som svagere end høje toner, og man taler om, at ørets følsomhed varierer med frekvensen. Når man måler støjens styrke, skal men derfor tage hensyn hertil for at få en måleværdi, der modsvarer den måde, vi opfatter lyden på.

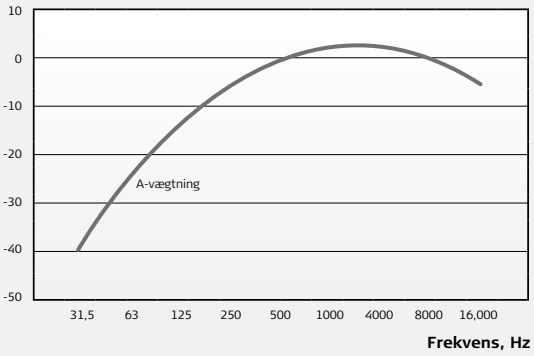
(Se figur 4). Det gøres ved i lydtrykmålere at indbygge et såkaldt A-filter, som dæmper dybe toner i forhold til høje toner, således at den målte værdi (groft sagt) svarer til den måde, vi hører lyden på. Måleværdien kaldes dB(A), og hvis vi ser et støjniveau angivet som for eksempel 65 dB(A), betyder det, at støjen er målt med en lydtrykmåler, hvor A-filtret var indkoblet. Langt de fleste målinger skal udføres på denne måde. Der findes andre vægtninger, men de bruges meget sjældent. Officielle støjkrav angives (næsten) altid i dB(A).

Det ækvivalente, konstante lydtrykniveau, Leq.

(Se figur 5)

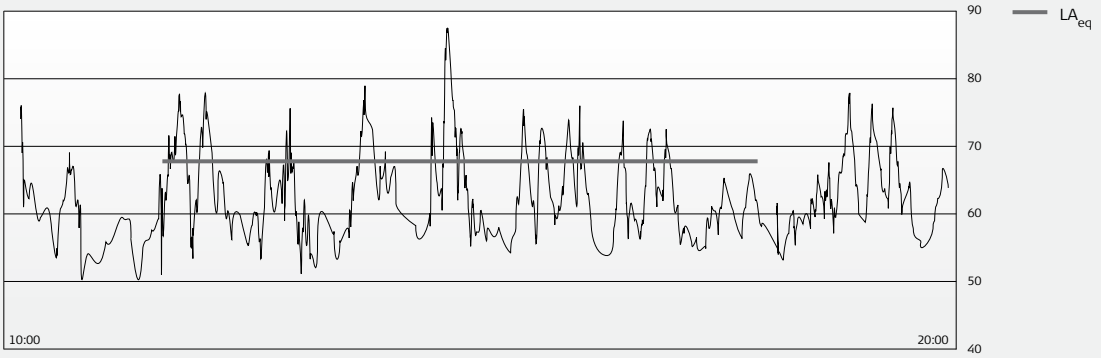
De fleste støjpåvirkninger, vi komme ud for, varierer over tid. Tænk på oplevelsen af trafikstøj, når man står i vejsiden og hører på den. Eller støj på arbejdspladen, der også varierer dagen igennem med skift mellem høj og lav intensitet, pauser og så videre. For at håndtere disse situationer indføres det ækvivalente, konstante lydtrykniveau, Leq. Den er en ren beregningsstørrelse, udført over et bestemt tidsinterval, for eksempel otte timer. Begrebet er indført for at kunne udtrykke den tidsvarierende støj (for eksempel trafikstøj) ved hjælp af et enkelt tal, som over det pågældende tidsrum repræsenterer samme energi som den aktuelle, tidssvarende støj. En varierende støj opsamlet over en bestemt tid repræsenterer en samlet energi.

Figur 4



Figur 5

LA_{eq}-værdien af variende støj



Kilde: DELTA

VI FÅR BRUG FOR FØLGENDE DEFINITIONER

At det er energi, der sammenlignes, hænger sammen med, at teorierne omkring støjskader og støjgener er knyttet til den støjenergi, man har været udsat for. Det vil altså sige, at en kraftig, kortvarig støj har samme skadevirkning som en svagere, længerevarende støj. Det er ikke helt dækkende, men vi har for tiden ikke nogen bedre model. Leq-begrebet er nødvendigvis knyttet sammen med en tid, da det udtrykker en energi. Når man derfor nævner en Leq-værdi, skal den ledsages af en varighed, ellers er den meningsløs. Den officielle skadegrænse for støj på arbejdspladsen hedder således:

"Leq = 85 dB(A) over en daglig arbejdstid på otte timer"

Den støjdosis, man herved får, svarer beregningsmæssigt til 88 dB(A) i fire timer, 91 dB(A) i to timer og så videre. I alle tre tilfælde er støjdosen den samme.

Grunden til, at vi må have Leq-begrebet med i denne gennemgang, er, at det går igen i alle de krav, myndighederne stiller til støj på arbejdspladsen (som lige nævnt), støj fra virksomheder til omgivelserne udendørs, trafikstøj med mere. Og at begrebet i øvrigt meget ofte misforstås, idet man glemmer, at der tale om en middelværdi. Man kan således godt kortvarigt have højere støjniveauer end Leq-værdien og alligevel overholde grænsen.

Peak-værdi

Taler vi om risiko for støjskade, må vi have endnu et begreb på plads, nemlig lydtrykkets spidsværdi eller peak-værdi. Hermed menes det maksimale lydtryk, der kan forekomme i en lydsekvens. Det er lettest at forstå i forbindelse med egentlige impulslyde, for eksempel et skud eller et trommeslag. Betegnelsen for peak-værdien er Lpeak og måles også i dB.

Man kan forestille sig, at Leq-værdien, for eksempel af et skud, taget over selv kort tid kan være meget lav, da varigheden af skuddet kun er få millisekunder. Alligevel viser det sig, at kraftige impulslyde kan give varige høreskader. Det er et tegn på, at teorien om det ækvivalente, konstante lydtrykniveau ikke er skudsikker (undskyld!). Man har derfor udstyret lydtrykmålere med en såkaldt impuls- eller peak-visning, hvor man får registreret den absolutte maksimalværdi, når man for eksempel måler på et skud.

Måling af impulsstøjen foregår med en lydtrykmåler, der er udstyret med denne mulighed. Måleværdien udtrykkes ved Lpeak, for eksempel Lpeak = 127 dB. De officielle grænser fortæller, at øret ikke må udsættes for spidsværdier eller peak-værdier over 137 dB.

RESUMÉ

- Lyd er elastiske svingninger i luft, væsker og faste stoffer. Frekvens, som måles i hertz (Hz), er udtryk for antal svingninger per sekund.
- Øret kan opfatte dybe lyde fra cirka 20 Hz til høje lyde på 15.000-18.000 Hz.
- Bygningsakustik beskæftiger sig i krævende tilfælde med lyde fra cirka 63-8.000 Hz.
- Decibel (dB) er en logaritmisk skala, der beskriver lydstyrke. Skalaen går i praksis fra 0 dB til 120-130 dB. Sidstnævnte lydniveauer kan ødelægge øret.
- Ved at indbygge et A-filter, som tager højde for frekvens, kan lyden måles i dB(A), der mere konkret udtrykker, hvordan øret opfatter lyden.
- Leq-værdi udtrykker lydens gene- og skadevirkning. Skadegrænsen for støj på arbejdspladsen er sat til 85 dB(A) i otte timer, svarende til 88 dB(A) i fire timer, 91 dB(A) i to timer og så videre.
- Spidsværdien for en enkelt kraftig lyd (som et skud) beskriver man ved peak-værdien Lpeak, der aldrig må overstige 137 dB.

Efterklang og absorption

Dette kapitel fortæller om de forhold, der afgør, hvordan vi opfatter akustikken i et rum. Nøgleordet er efterklangstid, og kapitlet anviser, hvordan man måler den for et givent rum. Kapitlet angiver også, hvordan valget af materialer og materialernes evne til at absorbere lyd er afgørende for efterklangstiden. Desuden bliver "Sabines formel" introduceret. Med den kan man beregne efterklangstiden i et rum, allerede mens rummet er på tegnebrættet.

For at forstå, hvad det er, vi oplever ved god og dårlig akustik, er det vigtigt at kende begrebet efterklangstid. Dette er nøglen til forståelsen.

Efterklangstid

Efterklangstiden er – kort fortalt – et mål for, hvor hurtigt lyden dør ud i et givet rum, for eksempel når man klapper i rummet. Helt præcist er det den tid (i sekunder), der går, fra lydimpulsen ophører eller stopper, til lydniveauet er faldet med 60 dB. På figuren (Figur 6) ses tidsforløbet af lydtrykniveauet af et håndklap i et rum med kort efterklangstid sammen med tidsforløbet af håndklappet i et rum med lang efterklangstid. Den "hale", der opstår i tidsforløbet i et rum, reagerer vores ører på, og halen forbinder vi med rummets akustik. Er halen lang, lyder rummet rungende eller klangfuldt. Er halen kort, lyder rummet "tørt". Der er flere karakteristika for efterklangen. Et badeværelse har en forholdsvis lang efterklang og lyder rungende (og er herligt at synge i!), men meget forskellig fra efterklangen i en kirke, der også lyder rungende. Forskellen i klangen er for det første, at de to rum er meget forskellige i størrelse, men også at der i kirkerummet er dybe toner, der klinger ud, og de er ikke til stede i badeværelset. Øret opfatter disse forskelle og forbinder dem med rummenes klang eller akustik. De enkelte frekvenser dør altså ud forskelligt, hvilket er en meget vigtig erkendelse, når man vil skabe god akustik. Man taler om efterklangstidens frekvensafhængighed, også kaldet efterklangskurven, for det givne rum. Og vores ører er meget følsomme over for dette forhold. Vi har nævnt, at rummets størrelse (volumen) har indflydelse på efterklangstiden i et rum. Et stort rum har alt andet lige en længere efterklangstid end et lille rum. Den anden vigtige størrelse, der bestemmer et rums efterklangstid, er absorptionen.

Absorption

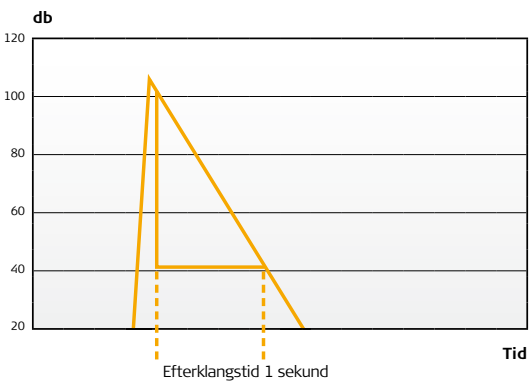
Absorptionen er et mål for, hvor meget lydabsorberende materiale, der findes i rummet. Nogle materialer virker lydabsorberende, selvom det ikke ses umiddelbart. Således virker gipsplader, glas og visse trægulve lydabsorberende i bassen. Det vender vi tilbage til.

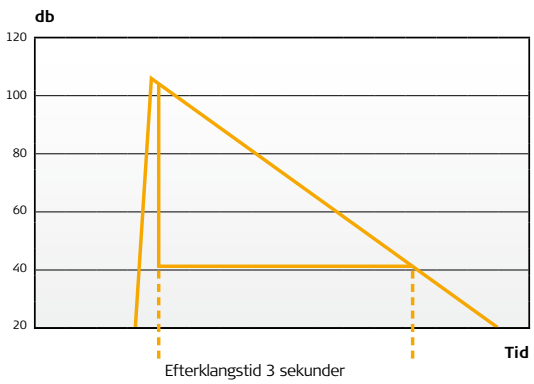
De forskellige materialers lydabsorberende virkning er meget forskellig. Beton og murværk er således praktisk talt helt uden virkning. Tæpper, tekstiler, stenuld og glasuld, træbeton (Troldtekt) med mere. har derimod en kraftig virkning.

Denne egenskab udtrykkes ved absorptionskoefficienten (α). Absorptionskoefficienten er forholdet mellem den lydenergi, der absorberes af materialet (egentlig: den ikke-reflekterede lydenergi), og den lydenergi, der rammer materialet. Absorptionskoefficienten bliver således en faktor mellem 0 og 1, idet 0 udtrykker, at materialet overhovedet ikke absorberer lydenergi, og 1 udtrykker, at materialet absorberer al lydenergien. Beton har typisk en absorptionskoefficient på 0,01-0,02, svarende til 1-2 procent. Troldtekt

Figur 6

Kort og lang efterklangstid





med bagvedliggende mineraluld har typisk en absorptionskoefficient på 0,8-0,9, svarende til 80-90 procent. En lydabsorberende virkning af et materiale i et givent rum er naturligt nok ikke alene afhængig af, hvor stor absorptionskoeficienten er, men også af hvor mange kvadratmeter af materialet, der er bragt ind i rummet. Så absorptionen eller – mere korrekt – **det ækvivalente absorptionsareal** (A) er således produktet af arealet i kvadratmeter multipliceret med absorptionskoefficienten:

$$A = S \times \alpha \ (m^2Sab)$$

Vi kalder måleenheden "kvadratmeter Sabine" (m^2Sab) for ikke at forveksle den med et "normalt" areal. Absorptionen udtrykker den samlede virkning i rummet af det pågældende materiale. Den fysiske betydning af absorptionen kan udtrykkes som arealet af et åbent vindue (som jo absorberer 100 procent, eftersom lyden ikke kommer tilbage igen) med samme lydabsorberende virkning som det aktuelle antal kvadratmeter af materialet.

Vi tager for eksempel 10 kvadratmeter Troldtekt med en absorptionskoefficient på 0,8. Absorptionen bliver 10×0,8 eller 8 kvadratmeter Sabine. Den samme virkning har 8 kvadratmeter åbne vinduer, som absorberer 100 procent. Så akustisk er det altså det samme at placere 10 kvadratmeter Troldtekt i rummet som at åbne 8 kvadratmeter vinduer. I akustikkens barndom anvendte man faktisk udtrykket Open Window Unit, OWU, som betegnelse for absorptionen. Meget pædagogisk.

Vi er nu i stand til at opstille akustikkens vigtigste formel, **Sabines formel**, som sammenkæder efterklangstiden (T) med rummets volumen (V) og absorptionen (A), og proportionalitetsfaktoren på 0,16:

$$T = 0{,}16 \times V/A, \text{ hvor } A = S \times \alpha$$

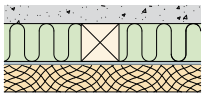
Det primære er altså, at efterklangstiden er proportional med rummets volumen (det vil sige, at dobbelt så stor volumen giver dobbelt så lang efterklangstid) og omvendt proportional med absorptionen (dobbelt så stor absorption giver den halve efterklangstid). Proportionalitetsfaktoren 0,16 er en konstant, som kommer ind for at få pengene til at passe. Efterklangstiden er som bekendt defineret som den tid, det tager lydniveauet at falde med 60 dB. Hvis man havde valgt en anden definition – for eksempel at lydniveauet skulle falde med 40 dB – var faktoren også blevet en anden.

Sabines formel betyder, at det er muligt på forhånd at beregne den resulterende efterklangstid, når rummets størrelse (volumen) er kendt, og man samtidig ved, hvor meget absorption, der bringes ind i rummet. Allerede når rummet eksisterer på tegnebrættet, kan vi altså forudsige den efterklangstid, vi til sin tid vil få i det færdigbyggede rum. For at kunne lave beregningen som beskrevet, skal man, foruden kendskab til rummets dimensioner, også have kendskab til de akustiske egenskaber af de materialer, der skal bruges. Det sker i form af data for absorptionskoefficienten (α) (se for eksempel tabellen side 9). Da materialernes lydabsorberende virkning er frekvensafhængig, afspejles dette i α-værdierne ved de forskellige frekvenser, i almindelighed i frekvensområdet 125-4.000 Hz.

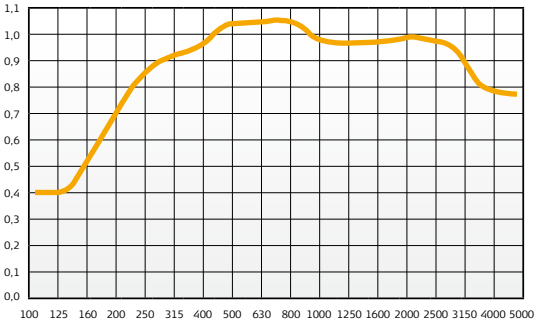
De nødvendige værdier for α for de forskellige materialer kan man typisk hente på de enkelte fabrikanters web-sites (se for eksempel www.troldtekt.dk). I håndbøger og også på internettet kan man finde data for de byggematerialer, der ikke decideret er akustikmaterialer, såsom gulve, vinduer, murværk med videre. Tabellen på næste side kan også anvendes som udgangspunkt. Som det fremgår, er beregningen lineær, det vil sige, at bidragene til absorptionen fra de forskellige materialer og bygningsdele adderes for at få den totale absorption (A), som indgår i Sabines formel. For et givet rum gennemføres beregningen for hvert frekvensbånd for sig. På denne måde får vi rummets efterklangstid i hvert frekvensbånd og dermed efterklangskurven for rummet. Efterklangskurven er netop efterklangstidens frekvensafhængighed for det pågældende rum. Efterklangskurvens form er et vigtigt udtryk for den akustiske kvalitet af det pågældende rum. Det vender vi tilbage til.

Figur 7

Lodret principsnit



Absorptionskoefficient α



α som funktion af frekvensen for diverse materialer og konstruktioner

Materiale		Frekvens i Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Pudset og malet mursten eller beton		0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Støbt beton eller pudset mur		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Upudset murstensvæg		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Pudset murstensvæg med grundpapir og tapet		0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07
Pudset træforskalling		0,03	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
11 mm træpanel med 8 cm luft bagved		0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Døre (lette)		0,25	0,20	0,15	0,10	0,08	0,07
Trægulv på strøer		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Trægulv, lagt i asfalt		0,04	0,04	0,03	0,08	0,02	0,10
Kort, gummi eller vinyl på beton		0,04	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02
Gulvtæppe, 9 mm, på beton		0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Gulvtæppe, med filtunderlag, i alt 16 mm		0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
Velourgardin, 340 g/m², plant		0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,35
Velourgardin, 600 g/m², plant		0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Velourgardin, 600 g/m², draperet til halvt areal		0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Vinduer af 3 mm glas		0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Konstruktionstykkelse, foran mur	**mm**						
Leca-beton	50	0,15	0,19	0,44	0,63	0,52	0,75
Mineraluld	25	0,09	0,23	0,53	0,72	0,75	0,77
Mineraluld	100	0,40	0,65	0,90	0,92	0,95	0,99

Absorptionen for nogle enkeltabsorbenter

Enkeltabsorbenter, m² Sab. pr. stk. (Ved normal tæthed)	Frekvens i Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Tomme træstole (rækker af tilhørerpladser)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05
Træstole med personer (rækker af tilhørerpladser)	0,17	0,25	0,50	0,55	0,60	0,50
Tyktpolstrede tomme stole (rækker af tilhørerpladser)	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,36
Tyktpolstrede stole med personer (rækker af tilhørerpladser)	0,45	0,46	0,47	0,48	0,50	0,45
Siddende barn i skoleklasse, incl. stol + bord	0,20	0,25	0,30	0,35	0,38	0,40

Kilde: DELTA

RESUMÉ

- Efterklangstiden er et mål for, hvor hurtigt lyden dør ud i et givent rum.
- Rummets størrelse og valget af materiale er afgørende for efterklangstiden.
- Når vi kender et materiales absorptionskoefficient og ved, hvor meget af materialet, der er i et rum, kan vi udregne den samlede absorption i rummet. Måleenheden er "kvadratmeter Sabine" (m²Sab).
- Når vi kender rummets størrelse og samlede absorption, kan vi ved hjælp af "Sabines formel" udregne efterklangstiden, allerede inden rummet bliver opført.

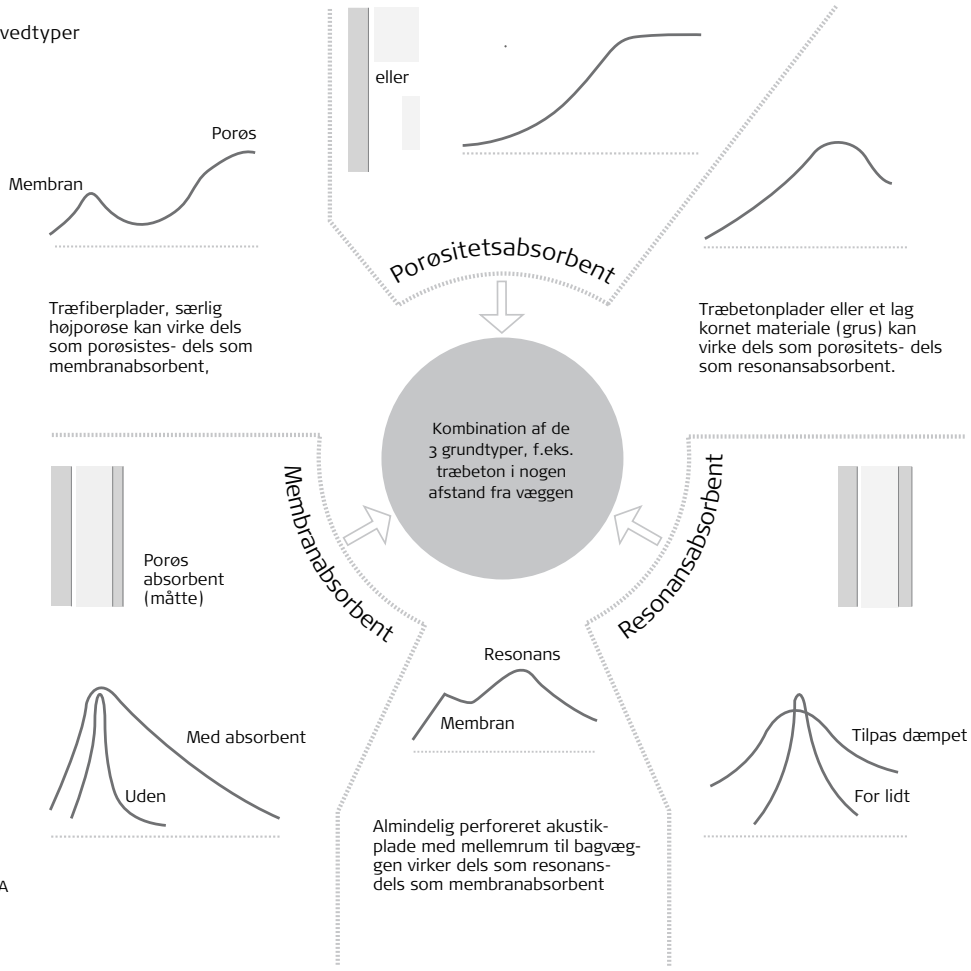
De forskellige absorbenttyper

Rumakustiske problemer opstår, når efterklangstiden ikke forløber ensartet i de forskellige frekvensbånd. Kapitlet her præsenterer de tre absorbenttyper, som – i den rette sammensætning – kan balancere efterklangstiden og give et behageligt akustisk miljø.

Det er vigtigt for den akustiske kvalitet, at den valgte efterklangstid er så uafhængig af frekvensen som muligt. Det betyder i klar tekst, at hvis man har valgt en efterklangstid på for eksempel 0,6 sekunder, så skal den så vidt muligt være den samme både i bassen, i mellemtoneområdet og i diskanten. En måling af efterklangstiden i et givent rum vil meget enkelt kunne afsløre problemerne. En del af de rumakustiske problemer, man møder, stammer fra, at denne balance ikke er i orden. Typisk er situationen den, at efterklangstiden er længere i bassen end i det øvrige frekvensområde. De lydabsorberende materialer er med andre ord frekvensafhængige i deres virkning. Resultatet kan i visse tilfælde give en ubehagelig, buldrende lydoplevelse i rummet, altså en mangel på akustisk komfort.

Et eksempel: Lejlighedsbyggeri af beton fra 1970'erne kan give denne oplevelse, hvis man for eksempel placerer sig i dagligstuens hjørnesofa. Tale og musik lyder mærkelig i bassen. Velkendte lydabsorbenter som mineraluld og lignende er mest effektive i mellemtoneområdet og i diskanten. Så hvis man udelukkende bruger disse typer i sit projekt, kan man løbe ind i de beskrevne problemer med forlænget efterklangstid i bassen. Basproblemet kan i mange typer byggeri løses ved at kombinere to lydabsorbenter, for eksempel ved at montere 25 millimeter Troldtekt med 250 millimeter bagvedliggende mineraluld. Som vi skal se i det følgende, er det ikke kun valget af materiale, men også den måde materialet monteres på, der bestemmer virkningen. Vi skal se lidt nærmere på de forskellige absorbenttyper og deres karakteristiske egenskaber. Der findes tre hovedtyper, se figur 8.

Figur 8
De tre hovedtyper



Kilde: DELTA

Porøse absorbenter

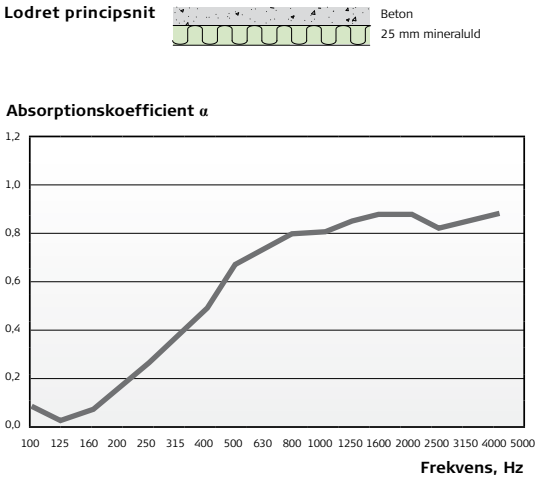
Disse materialer består, som navnet antyder, af porøst materiale. Mineraluld, tekstiler, tøj, gardiner, tæpper og visse former for skumplast er alle af denne type. Den lydabsorberende virkning består i, at lydenergien, når den rammer overfladen, kan trænge ind i materialet. Her omdannes lydenergien til varmeenergi, og dermed kastes kun en lille del tilbage i form af lydenergi. Med andre ord er der sket en lydabsorption i materialet. Troldtekt er i sin lydabsorberende virkning en kombination af en porøsitetsabsorbent og en resonansabsorbent (som beskrives efterfølgende). Som vi alle husker fra skolen, så kan energi aldrig opstå eller forsvinde, kun omdannes. Og i de porøse absorbenter omdannes lydenergi altså til varmeenergi. Man skal dog ikke tro, at man kan udnytte dette forhold til opvarmning. De energimængder, der her er tale om, er ubetydeligt små, kun af størrelsesordenen en milliontedel eller en milliardtedel watt. Som nævnt er de porøse absorbenter mest effektive i mellemtoneområdet og i diskanten, og absorptionskoefficienten forløber typisk som vist på figur 9.

Som det fremgår, er den porøse absorbent, hvor den er bedst, meget effektiv med absorptionskoefficienter på op mod 100 procent, det vil sige fuldstændig absorberende. Til gengæld falder virkningen ned mod de lavere frekvenser, og i bassen virker den praktisk talt ikke. Det er vigtigt her at bemærke, at det samme porøse materiale, for eksempel en 50 millimeter blød mineraluldsplade, vil virke mere eller mindre effektiv afhængig af, hvordan mineraluldspladen monteres. Jo tykkere materialet er, og/eller jo længere væk fra loftet eller væggen den monteres, jo bedre virker den. Se figur 10.

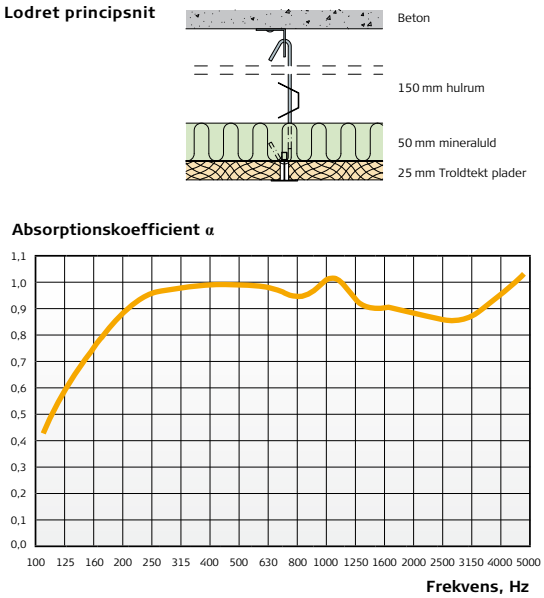
Den optimale afstand mellem det faste loft og et nedhængt akustikloft af mineraluldstypen er i praksis 200-300 millimeter. Herved får man konstruktioner, der er effektive ned til cirka 200 Hz. Bemærk: 35 millimeter Troldtekt og 50 millimeter mineraluld direkte monteret giver omtrent samme resultat som et nedhængt loft. Se figur 11.

Figur 9

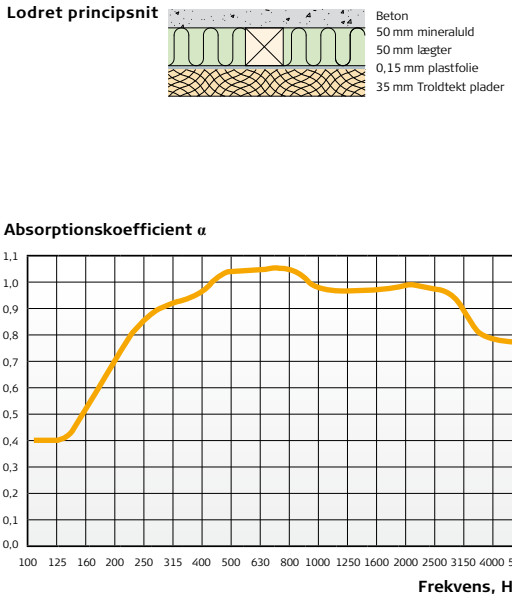
Porøs absorbent



Figur 10



Figur 11



Membranabsorbenter

I basområdet må man se sig om efter andre typer absorbenter, specielt membranabsorbenterne, som er de egentlige basabsorbenter. De udgør en vigtig gruppe absorbenter af flere grunde, men de overses ofte, måske fordi de ikke ligner noget, der kan absorbere. Membranabsorbenten er i sin principielle form en flad kasse, 100-200 millimeter dyb, monteret på væggen med en tynd plade af krydsfiner eller lignende på forsiden og med let mineraluld i kassens hulrum. Se figur 12.

Hvis man banker med blød hånd på forpladen, vil man kunne høre en dyb tone, lidt som en stortromme, men meget svagere. Den tone, man hører, er resonansfrekvensen for det svingende system, der består af forpladen med en vis masse i kombination med den fjeder, som udgøres af den indespærrede luftmængde.

Resonansfrekvensen er også den frekvens, som membransorbenten absorberer ved, idet der bruges lydenergi til at sætte membranen i svingninger. Der sker altså her en energiomsætning, men denne gang fra lydenergi til mekanisk svingningsenergi. Den første væsentlige egenskab ved membranabsorbenten er altså, at den absorberer lydenergi ved lave frekvenser. Se figur 13.

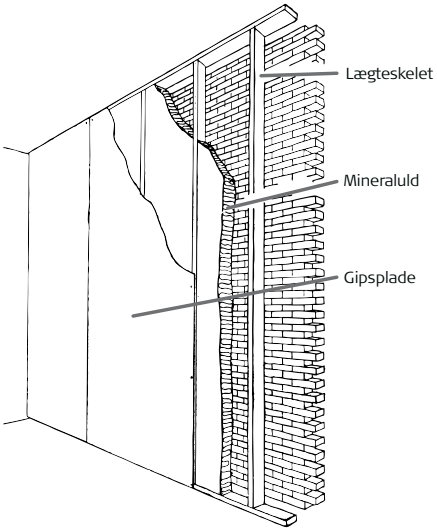
Den anden væsentlige egenskab ved membranabsorbenten er, at den så at sige optræder automatisk i vores dagligdag, idet en del almindelige bygningskomponenter som døre, vinduer, trægulve (på strøer) og gipsvægge er membranabsorbenter i deres virkning. Absorptionskoefficienten er ikke overvældende, måske 15-20 procent, men da de tilsammen udgør et væsentligt areal, er virkningen vigtig. Som eksempel kan nævnes de store glasarealer i moderne byggeri. De giver mange indeklimamæssige problemer, men akustisk betyder de, at efterklangstiden i rummet ikke stiger helt utilladeligt i bassen. Glasarealerne er, fordi de er membranabsorbenter, med til at balancere rumakustikken. Prøv at banke med blød hånd på en stor vinduesrude og hør den meget dybe lyd, der fremkommer. Det er i dette frekvensområde, glasruden virker absorberende. Man skal huske, at membranabsorbenter kun virker i bassen og dermed reflekterer lyd ved højere frekvenser. Glasarealerne kan derfor give ubehagelige lydrefleksioner eller ekkovirkninger, som må modvirkes på anden måde. Man skal også være opmærksom på, at trægulve på strøer, som jo er membranabsorbenter, kan give forøget trommelyd, det vil sige støj, der opstår ved gang på gulvet i samme lokale. Hvis dette er et problem, kan man prøve at lægge tæppe eller en løber ud på dele af gulvet. Situationen kan være aktuel i for eksempel storrumskontorer.

Resonansabsorbenter

Den tredje hovedtype er resonansabsorbenterne. De bygger på samme princip, som det der frembringer en tone, når man blæser hen over mundingen på en ølflaske. Tonen i flasken opstår ved, at det svingende system, der består af luftproppen i flaskehalsen, svinger på den fjeder, som udgøres af den luftmængde, der befinder sig nede i flasken. Mekanismen kaldes en Helm-

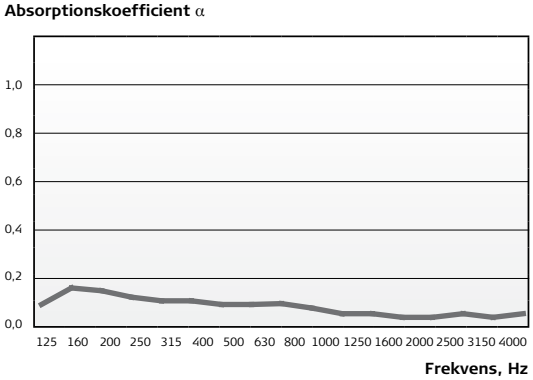
Figur 12

Membranabsorbent, gipspladevæg



Figur 13

Membranabsorbent, parketgulv på strøer

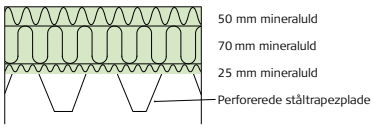


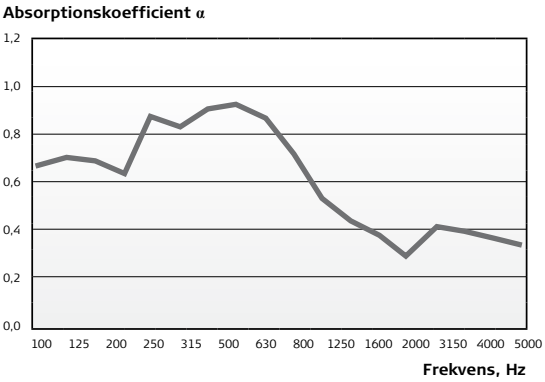
holtz-resonator, og man genfinder den i mange systemer, blandt andet tværfløjter, hydrauliske lyddæmpere og ventilationskanaler. Som ved membranabsorbenten er det sådan, at den resonansfrekvens, man hører, er den frekvens, som absorberes, idet der sker en energiomsætning fra lydenergi til mekanisk svingningsenergi. I sin rene form ville absorbenten kun absorbere ved én frekvens, hvilket ikke ville være praktisk til rumakustiske formål (men meget effektiv for eksempel i hydrauliske lyddæmpere). Virkelige akustiske absorbenter af resonans-typen er for eksempel perforerede gipsplader, perforerede metaltrapezplader og metalkassetter. Her svarer hullerne i pladen til flaskehalsen, og hulrummet bag pladen til "flaskebeholderen". Se figur 14.

Perforerede gipsplader er normalt kombineret med en porøs absorbent i hulrummet bag gipspladen og/eller en tynd filt umiddelbart bag pladen. Da der også optræder en vis membranabsorbent-virkning i gipspladen, får den normalt et ganske bredt virkeområde. Se figur 15.

Figur 14

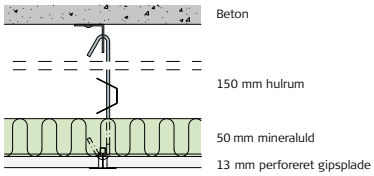
Typisk perforeret ståltrapezplade

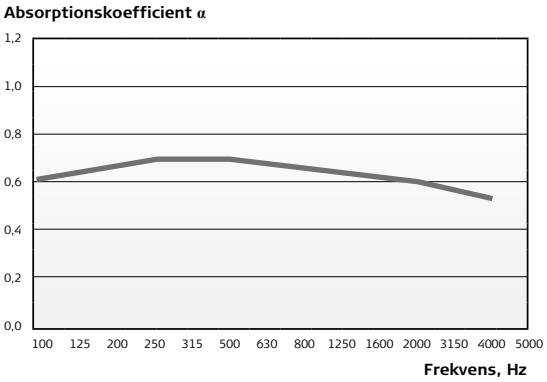




Figur 15

Typisk perforeret gipsplade





RESUMÉ

- De tre hovedtyper af absorbenter (porøse absorbenter, membran- og resonansabsorbenter) kan kombineres, så man opnår en på forhånd valgt efterklangstid, der er i frekvensmæssig balance.
- Ofte er det nok at kombinere to typer, for eksempel en porøs absorbent og en membranabsorbent.
- Det er meget vigtigt at tilstræbe en efterklangstid, der er den samme i hele frekvensområdet. Sammen med rummets facon og fordelingen af de anvendte lydabsorbenter har den afbalancerede efterklangstid afgørende betydning for den oplevede akustiske komfort, som er det endelige mål.

God akustik

God akustik handler ikke kun om at styre efterklangstiden. Dette kapitel redegør for de fem parametre, som skal opfyldes for at skabe akustisk komfort.

Hvad er god akustik? Kan man overhovedet tale om god akustik sådan generelt? Det kan man, og da akustik om noget er baseret på erfaringen, har der gennem tiden udkrystalliseret sig en best practice, som – hvis den følges – resulterer i, hvad de fleste vil synes er gode akustiske forhold. Hermed mener vi en situation, hvor det pågældende rum (og vi taler stadig udelukkende om rumakustik) vil opfattes som behageligt, velafbalanceret, indrettet på dets anvendelse og med en tydelig og klar lydgengivelse og -oplevelse. God akustik er knyttet sammen med menneskers velbefindende. Det er et spørgsmål, om man føler sig godt tilpas i de akustiske omgivelser, hvad enten det er hjemme, på restaurant, til koncert, i teatret, eller hvor det nu kan være. Man taler i disse år meget om akustisk komfort som den subjektive oplevelse af god akustik, der i sig selv er en mere objektiv sag. Vi vil her prøve at se lidt mere på, hvilke objektive elementer der indgår. Den klassiske lære om akustik opstiller fem punkter, der, når de opfyldes, vil resultere i god akustik:

- passende efterklangstid
- ensartet lydfordeling
- passende lydstyrke
- passende lav baggrundsstøj
- intet ekko eller flutterekko

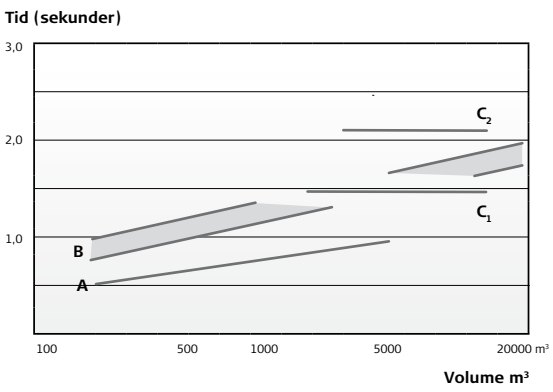
Læg mærke til ordet passende. Det betyder, at de enkelte faktorer skal afpasses efter forholdene. Vi tager dem én ad gangen.

Passende efterklangstid

Passende efterklangstid er et resultat af følgende: Efterklangstiden skal rette sig efter det rum og den anvendelse, som rummet har, og efterklangstiden skal i almindelighed have et fladt forløb, det vil sige, den skal være nogenlunde den samme i hele frekvensområdet. Undtagelsen er koncertsale for klassisk musik, hvor efterklangstiden godt må vokse lidt mod lavere frekvenser. Der findes en række anbefalinger, der kæder rummets størrelse, dets anvendelse og den deraf følgende efterklangstid sammen. Vi har her valgt W. Furrers anbefalinger. Se figur 16.

Her har vi rummets størrelse (volumen i kubikmeter) på den vandrette akse og som parametre de typiske anvendelser. Som det fremgår, kan diagrammet bruges ved rumstørrelser fra cirka 200 kubikmeter og op til 20.000 kubikmeter. For eksempel bør et rum på 1.000 kubikmeter, der både skal anvendes til musik og tale (altså et multirum), have en efterklangstid på omkring 1,2 sekunder. Rum større end cirka 20.000 kubikmeter, for eksempel visse stadions, er ikke velegnede til de anførte anvendelser.

Figur 16,
Optimal efterklangstid



A: Tale
B: Tale og musik
C_1: Klassisk musik og moderne musik
C_2: Klassisk musik, romantisk periode

Kilde: W. Furrer

Foruden efterklangstiden på 1,2 sekunder er der som nævnt også kravet om, at denne efterklangstid så vidt muligt skal holde sig konstant i hele frekvensområdet. Udover de anbefalinger, der fremgår af skemaet, findes der en række erfaringsværdier, som kan bruges på specifikke anvendelser, som lydstudier, biografer og andet. De erfaringsværdier kan man hente i faglitteraturen eller på internettet.

Ensartet lydfordeling

Kravet om en ensartet lydfordeling er i virkeligheden meget banalt. Det går ud på, at man i større rum som teatre eller auditorier skal kunne høre godt overalt, eller sagt med andre ord, at lydtrykniveauet i dB kun må variere lidt hen over tilskuerpladserne. Det er oplagt et vigtigt krav i et teater, at alle skal kunne høre, også på de bageste pladser. Kravet om en ensartet lyddækning kan formuleres ganske enkelt, ved at lydniveauet på tilskuerpladserne kun må variere få dB, for eksempel ± 5 dB. Dette kan man nemt konstatere med en lydtrykmåler på udvalgte tilskuerpladser, og man kan også let bygge det ind som et funktionskrav til salen, inden man går i gang med at designe akustikken.

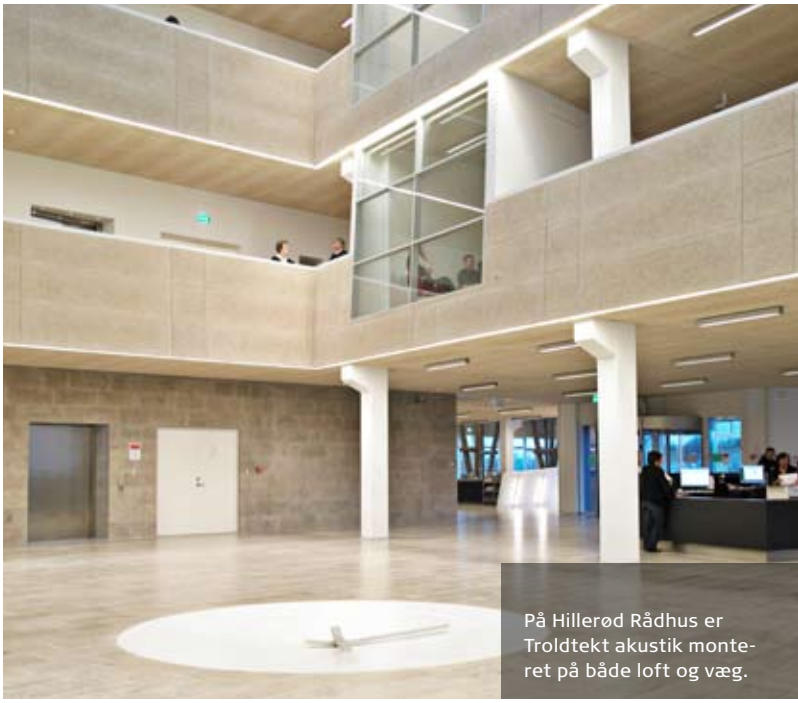
At opnå en ensartet lydfordeling har ikke alene noget at gøre med, hvor meget lydabsorption man tilfører rummet, men især om fordelingen af det lydabsorberende materiale samt om rummets udformning, om brug af reflektorer med mere. Her kommer rummets arkitektur ind i billedet. Hvis man for eksempel har opnået den rigtige efterklangstid med et akustikloft (for at opfylde det første krav, se ovenfor), så kan samme akustikloft medføre, at lyden dæmpes for meget hen over loftet, før den når de bageste rækker, så det er måske en uheldig løsning. Det lydabsorberende materiale skal derfor ikke nødvendigvis koncentreres i loftet, men fordeles på flere flader. Vi er allerede i fuld gang med akustisk design, altså at få de forskellige akustiske krav til at harmonere med de øvrige krav til rummet.

Hvis der også er et højttalersystem inde i billedet, et såkaldt PA-system (Public Address), så er det i virkeligheden højttalersystemets vigtigste formål at skabe en ensartet lyddækning. Troldtekt højttalere, som er indbygget og skjult i Troldtekt akustikpladerne, er et eksempel på et sådant PA-system.

Som nævnt vil et krav om en variation i lydfordelingen på max ± 5 dB overalt i salen sikre en god lydfordeling. Denne diskussion er kun aktuel i større rum som teatre, auditorier og så videre.

Passende lydstyrke

Der skal være et tilpas højt lydniveau i forhold til baggrundsstøjniveauet. Med den udbredte brug af elektrisk forstærkning af musik og tale er dette sjældent det store problem. Her er det derimod nogle gange et spørgsmål om at begrænse lydudfoldelserne, for eksempel af hensyn til naboerne.



På Hillerød Rådhus er Troldtekt akustik monteret på både loft og væg.

I almindelig kommunikation ligger lydniveauet af vores tale på 60-65 dB(A) i en meters afstand. På en befærdet gade kan lydniveauet på fortovet sagtens ligge på 70-85 dB(A) og så skal vi hæve stemmen eller råbe for at blive hørt.

For folk med nedsat hørelse vil almindelig talestyrke ofte ikke være nok til, at de kan høre, hvad der bliver sagt. Altså må man enten hæve stemmen, eller den pågældende må benytte et høreapparat, som netop har til formål at forstærke lydniveauet tilstrækkeligt til at kompensere for høretabet.

I store forsamlinger, hvor en taler henvender sig til et publikum, vil et passende dimensioneret højttaleranlæg i et tilstrækkelig dæmpet rum fint kunne løse problemet med passende lydstyrke og god taleforståelighed.

Lavt baggrundsstøjniveau

De ovenfor fremsatte bemærkninger om passende lydstyrke er tæt forbundet med kravet om lav baggrundsstøj. Forskellen mellem det disponible lydniveau (den passende lydstyrke) og den uundgåelige baggrundsstøj kaldes dynamikområdet, og det skal være så stort som muligt.

Når man taler om baggrundsstøj, er der ofte fokus på udefrakommende støjkilder – for eksempel trafikstøj – men baggrundsstøj kommer også fra tekniske installationer som for eksempel projektionsapparater, computere og ventilationsanlæg.

Man skal være meget opmærksom på baggrundsstøjen, fordi den helt kan ødelægge oplevelsen af rummets gode akustik. Der bør derfor stilles krav til baggrundsstøjen, og igen retter de aktuelle krav sig efter anvendelserne. Normalt tænker vi ikke meget over situationen, men i krævende situationer, det vil sige, når vi



Ved ombygningen af Brædstrup Skole er der taget højde for de akustiske forhold.

skal anstrenge os for at høre, hvad der bliver sagt, så træder problemet frem: det kan være i undervisningslokalet, hvor læreren gerne skal kunne høres, i teatret, hvor skuespillerens stemmestyrke er en givet, begrænsende faktor, på restauranten, hvor det er vanskeligt at høre, hvad personen over for os siger. Alle tre er eksempler på, hvorledes baggrundsstøjen kan genere den primære funktion og spolere oplevelsen.

I små lokaler er der sjældent de store problemer, men så snart vi kommer op i rumstørrelser som undervisningslokaler, storrumskontorer og lignende, skal man være opmærksom på baggrundsstøjen. I virkeligt krævende rum som teatre og koncertsale er kravet om et lavt baggrundsstøjniveau simpelthen et af de væsentligste akustiske kriterier. Og det kan være meget dyrt at overse dette.

Læg mærke til, at koncertsale og operahuse ofte har et betydeligt foyerområde, der helt omslutter salen. Det er ikke blot for, at publikum kan få sig en drink i pausen, men for at udgøre en bufferzone, der isolerer salen støjmæssigt mod omverdenen.

Baseret på erfaringen anbefales følgende værdier for det maksimalt acceptable baggrundsstøjniveau:

Lydstudie	15-20 dB(A)
Koncertsal	20-25
Teater	25-30
Biograf	30-35
Undervisningsrum	35-40
Kontor	35-40
Konferencerum	40-45

Intet ekko eller flutterekko

Også en ret oplagt sag: I et akustisk godt rum må der ikke optræde ekko eller flutterekko. Ekko kender vi allesammen. Når efterklangen i et (stort) rum skaber kraftige enkeltstående refleksioner, opfatter vi det som ekko. Det kan være tilfældet, hvis vi har en stor glat og hård væg i den modsatte ende af et i øvrigt dæmpet rum, samtidig med at vi befinder os i den modsatte ende af rummet. Hvis vi klapper i hænderne (én gang), kan vi udløse et sådant ekko. Der skal en vis tidsforsinkelse til, for at øret kan opfatte denne forsinkede lyd. Tidsforsinkelsen skal være større end cirka 50 millisekunder svarende til, at lyden bevæger sig cirka 17 meter. Hvis der altså er mere end cirka 8,5 meter ned til den reflekterende væg, vil vi kunne høre et ekko. Flutter-ekko er en lidt anden sag. Det optræder typisk, hvor vi har to store glatte og hårde vægflader, der er parallelle og befinder sig over for hinanden, som det for eksempel kunne være tilfældet i en gymnastiksal. Hvis vi klapper i hænderne (én gang), kan vi udløse et ekko, der vandrer frem og tilbage mellem de to parallelle vægge. Det høres som et hurtigt impulstog, der reflekteres mellem væggene. De fleste af os har oplevet det, måske uden at spekulere på, hvad det var. En smule lydabsorberende materiale på den ene væg fjerner effektivt flutter-ekkoet. Hvis rummet er udformet med ikke-parallelle vægge, kan flutter-ekkoet slet ikke opstå.

Diffusitet

Vi har nu beskrevet de fem klassiske krav til god akustik. Hertil kommer en ekstra faktor, som har vist sig at have stor indflydelse på oplevelsen af god akustik. Det er diffusiteten. Begrebet er lidt vanskeligt at forklare, da der ingen egentlig definition er, og da man ikke direkte kan måle den. Det handler her om, at lyden skal/bør spredes rundt i rummet på en tilfældig måde. Sabines formel er kun gyldig, når lydfeltet er diffust, så hvordan sikrer man sig dette, når der ikke er en fast definition? Vi har her valgt en betragtningsmåde, hvor vi opstiller tre tommelfingerregler, som – hvis de overholdes – sikrer tilstrækkelig diffusitet til, at Sabines formel kan bruges med rimelig nøjagtighed. Samtidig er de, sammen med de fem grundregler, der allerede er opstillet, en opskrift på god akustik. At lydfeltet i rummet skal være diffust, kunne man betragte som en sjette grundregel.

Et diffust lydfelt opnår man ved at:

- **Fordele absorbenterne på flere ikke-parallelle flader**
  Det betyder, at man ikke skal koncentrere de absorberende materialer på for eksempel loft og gulv, men hellere på loft og bagvæg.

- **Bruge så mange lydspredende elementer som muligt**
  "Savtakprofil" på vægge, diffusorer, møblering, uorden – jo mere desto bedre.

- **Bruge ikke-regulære rumformer**
  Altså ingen kugle-, terning- eller cylinderform. Kasseformen kan dog være svær at undgå

- **Sørge for, at specielt kontrolrum, lytterum og biografer opbygges symmetrisk omkring et lodret plan midt gennem rummet.**

De to første punkter er oplagt de vigtigste, de to sidste lidt mere eksotiske.

Ved at følge disse anbefalingerne er det muligt at designe et rum med en oplevet god akustik, det vil sige med akustisk komfort.

RESUMÉ

- Den klassiske lære om akustik opstiller fem punkter, der, når de er til stede, resulterer i god akustik:
  - **Passende efterklangstid** afhænger af rummets størrelse. W. Furrers anbefalinger kan bruges ved rum, der er mellem 200 og 20.000 kubikmeter. Med mindre der er tale om en koncertsal til klassisk musik, skal efterklangstiden så vidt muligt være den samme i hele frekvensområdet.
  - **Ensartet lydfordeling** er vigtig i store rum og sale, hvor lyden skal kunne høres ens overalt. Det er vigtigt at tage højde for lydfordelingen i arkitekturen. En variation på max ± 5 dB overalt i rummet er et passende krav.
  - **Passende lydstyrke** er i almindelig tale 60-65 dB og på en befærdet gade 70-85 dB. I store forsamlinger kan et højttaleranlæg i et dæmpet rum sikre den passende lydstyrke.
  - **Passende, lav baggrundsstøj** er et af de væsentligste akustiske kriterier – især i koncertsale og teatre. I et rum kan baggrundsstøjen komme fra tekniske installationer eller ventilation.
  - **Intet ekko eller flutterekko** må optræde, hvis akustikken skal være god. Det er let at fjerne med en smule lydabsorberende materiale på væggen.
- At lydfeltet i et rum er diffust, kan man betragte som yderligere en grundregel. Det sikrer man ved at fordele lydabsorbenterne på flere ikke-parallele flader, undgå kugle-, terning- eller cylinderformer i rummet, bruge så mange lydspredende elementer som muligt samt ved at sørge for, at specielt kontrolrum, lytterum og biografer opbygges symmetrisk omkring et lodret plan midt gennem rummet.

Taleforståelighed og taleforståelighedsmål

Dette kapitel indfører begrebet taleforståelighed, som angiver, hvor godt man opfatter det talte ord i et givent rum. Dette er en væsentlig kvalitetsfaktor – ikke mindst i rum, som er beregnet til formidling. Desuden introducerer kapitlet de målemetoder, som kan sikre en god taleforståelighed – specielt i de situationer, hvor der er et lydanlæg i kæden mellem taler og lytter.

Det er væsentligt, hvor godt man opfatter det talte ord i et givent rum. Ikke mindst i rum skabt til formidling, som for eksempel auditorier og teatre – eller hvad med en banegård?

Taleforståelighed er i akustikken et veldefineret begreb, som angiver, hvor godt man opfatter talen i et rum – enten direkte i rummet med en taler og et antal lyttere, eller via et lydanlæg med mikrofon, forstærker og højttaler(e). I sin klassiske form måles taleforståeligheden ved, at man simpelthen opregner, hvor mange ord, lytterne opfatter korrekt i en tekst, der oplæses af en velartikuleret taler i det aktuelle rum. Hvis lytterne i gennemsnit for eksempel opfatter 60 procent af ordene korrekt, så er taleforståeligheden 60 procent eller 0,6. Taleforståelighed som begreb blev skabt i telefonteknikkens barndom i 1920'erne for at få et mål for telefonkvaliteten. Det er let at forestille sig, at denne proces kan være ret tidskrævende, og derfor har man gennem mange år arbejdet på metoder, hvor man enten kunne beregne eller direkte måle taleforståeligheden i en given situation, både i et virkeligt rum som for eksempel et auditorium eller igennem et lydanlæg, for eksempel til en banegård.

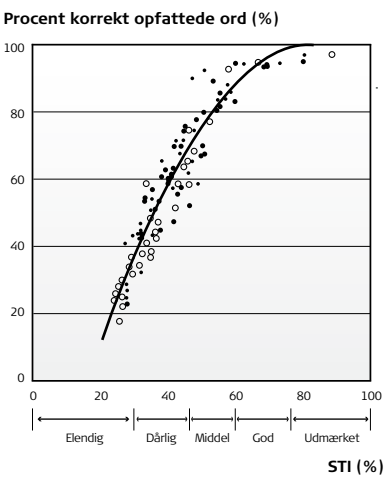
Der findes i dag en række metoder til at angive taleforståeligheden, men den metode, der i dag må betragtes som standard, er det såkaldte Speech Transmission Index, STI. STI er en måle- og beregningsmetode, hvori der indgår en række parametre om rummet, og på basis af dem kan man beregne den taleforståelighed, der vil kunne opnås under de givne omstændigheder.

Omvendt vil man som bygherre ved hjælp af STI kunne stille krav til taleforståeligheden i for eksempel et undervisningsrum, således at man får sikkerhed for, at kvaliteten på dette punkt er i orden, når projektet er færdigt. Man måler STI med et dertil indrettet apparatur, og måleværdien kan direkte sammenlignes med de opstillede krav. STI værdien ligger mellem 0 og 1 (eller mellem 0 og 100 procent), hvor 0 betyder en helt uantageligt dårlig taleforståelighed, og 1 er udtryk for den perfekte situation. Kravet til STI vil typisk afhænge af de aktuelle forhold, men et typisk krav til taleforståeligheden vil i praksis være en STI-værdi bedre end 0,6. Dette vil normalt resultere i tilfredsstilende taleforståelighed. (Figur 17)

Metoden kan også anvendes i de tilfælde, hvor der indgår et højttalersystem (et lydanlæg) i "kæden" mellem taler og lytter. Taleforståeligheden bliver i denne situation et resultat af den samlede virkning af rummet og lydsystemet. Et ganske udmærket lydsystem vil således alligevel kunne resultere i en dårlig taleforståelighed, hvis rummet har en lang efterklangstid, samtidig med at lytteren befinder sig langt fra højttaleren. Man har her mulighed for at stille krav til taleforståeligheden, for eksempel i form af STI for den samlede kæde bestående af højttalersystem og rum. Det er så systemleverandøren eller lyddesignerens ansvar at sørge for, at kravene kan opfyldes af det færdige anlæg i det pågældende rum. Men bygherren sikrer sig på denne måde et velfungerende anlæg. Den erfarne lyddesigner kan bruge beregningerne til at sikre sig, at hans anlæg får en rimelig chance i det pågældende rum. Det kunne jo vise sig, at rummets akustik i sig selv var uegnet til

Figur 17

Taleforståelighed som funktion af STI, Speech Transmission Index





Med respekt for den eksisterende bygningskarakter er der taget højde for de akustiske krav ved indretningen af De Kunstneriske Uddannelser på Holmen.

et højttaleranlæg, og at man først skulle sætte ind her. Et højttaleranlæg kan ikke rette op på en dårlig rumakustik. Har man at gøre med et lydsystem (et højttaleranlæg) i et rum, findes der en forenklet målemetode til måling af taleforståeligheden. Metoden kaldes STI-Pa, og her anvender man et specielt målesignal, der afspilles over lydanlægget. Ved hjælp af en speciel lydmåler kan man direkte i rummet måle STI-Pa-værdien af det samlede anlæg inklusive rummet. En STI-Pa værdi over 0,6 betyder et godt anlæg. Det skal i parentes bemærkes, at andre taleforståelighedsmål, som har været anvendt gennem tiderne, såsom AI (Articulation Index), ALcons (konsonantforståelighedstabet) og RASTI (Rapid Speed Transmission Index) i dag alle må betragtes som utidssvarende.

RESUMÉ

- Begrebet taleforståelighed angiver i procent, hvor mange ord lytterne i et rum opfatter korrekt, når en velartikuleret taler læser op – enten direkte eller via et lydanlæg.
- Med metoden Speech Transmission Index (STI) kan man ved hjælp af et særligt apparat måle, hvor god taleforståeligheden i et rum er. Resultatet bliver mellem 0 (0 procent) og 1 (100 procent). Et typisk krav til rummet vil være en STI-værdi højere end 0,6.
- STI-Pa er en variant specielt beregnet til at måle på lydanlægget. Den måler man ved at udsende et særligt lydsignal gennem lydanlægget og bruge en specielt indrettet lydmåler. STI-Pa på over 0,6 betyder, at lydanlægget yder en tilfredsstillende lydkvalitet.

Myndighedernes krav

Myndighederne stiller krav til de akustiske forhold i alle typer arbejdslokaler. Kapitlet præsenterer Arbejdstilsynets vejledning fra 2008, "Arbejdsstedets indretning - A.1.16". Denne vejledning medtager også de krav til skoler og daginstitutioner, der er nedfældet i Bygningsreglementet fra 2008, BR08.

At-vejledninger vejleder om, hvordan reglerne i arbejdsmiljølovgivningen skal fortokles. Arbejdstilsynet vurdere de akustiske forhold i arbejdsrum efter disse retningslinjer. En ny At-vejledning, 'Arbejdsstedets indretning - A.1.16' fra december 2008, erstatter den veltjente At-anvisning nummer 1.1.0.1, 'Akustik i arbejdsrum', fra november 1995. Her har man nu medtaget de krav, der stilles til skoler og daginstitutioner, og som fremgår af Bygningsreglementet fra 2008 (BR08). Vejledningen indeholder forklaringer og definitioner på grundlæggende akustiske begreber samt gode råd om beregning af efterklangstid i rum.

I det følgende vil vi se nærmere på krav og vejledninger om efterklangstid med mere, som de er formuleret i Arbejdstilsynets vejledning samt i Bygningsreglementet fra 2008.

Akustik i arbejdsrum, At-vejledning A. 1.16.
Her er retningslinjerne delt op efter lokaletype. For mindre rums vedkommende er krav og vejledninger formuleret til efterklangstid og for større rum til absorptionsarealet. Forklaring følger.

Som det ses, opererer Arbejdstilsynet med både efterklangstid og absorptionsareal (A) i kvadratmeter Sabine. I kapitlet 'Efterklang og Absorption' så vi, at absorption (mere korrekt: det ækvivalente absorptionsareal) og efterklangstid er kædet sammen gennem Sabines formel. Så hvis man ønsker et dæmpet rum, kan man enten forlange en kort efterklangstid eller en høj absorption. For større rum er det ofte en fordel at basere vurderingen af rummets akustik på en vurdering af absorptionen i rummet, fordi kravet om diffust lydfelt ikke altid er opfyldt. Se også afsnittet 'God Akustik'.

Arbejdstilsynest vejledende gennemsnitsværdier for efterklangstider og absorptionsarealer

Lokaletype	**Efterklangstid** i sekunder, maksimal gennemsnitsværdi i frekvensområdet 125-2000 Hz	**Absorptionsareal** A i m², middelværdi i frekvensområdet 125-2000 Hz	**Maksimal afvigelse** fra den anbefalede værdi i noget frekvensinterval
Produktionslokaler			
Under 200 m³	0,8 s.		+ 0,2 s.
1000 m³	1,3 s. + 0,2 s.		
Mellem 200 og 1000 m³	Der udregnes en forholdsmæssig værdi	+ 0,2 s.	
Over 1000 m³		A bør være mindst 0,6 × grundarealet	- 0,1 × gulvarealet
Over 1000 m³, hvor lofthøjden overstiger 5 m		A bør være mindst 0,7 × grundarealet	- 0,2 × gulvareal ved 125 og 250 Hz - 0,1 ved øvr. frekv.
Kontorer m.v.			
Flerpersonerskontor, mindre end 300 m³		A bør være mindst 0,8 × gulvarealet	- 0,2 × gulvareal ved 125 og 250 Hz - 0,1 ved øvr. frekv.
Flerpersonerskontor, større end 300 m³		0,9 × gulvarealet	- 0,2 × gulvareal ved 125 og 250 Hz - 0,1 ved øvr. frekv.

Kilde: At-vejledning, Arbejdsstedets indretning - A.1.16, Bilag 1

Et eksempel:
I et produktionslokale på 1000 kubikmeter (længde × bredde × højde = 25 × 10 × 4 meter) bør absorptionen (A) være mindst 0,6 gange gulvarealet (250 kvadratmeter), altså A = 150 kvadratmeter Sabine eller 150 kvadratmeter absorption. Via Sabines formel fås T = 0,161 × V / A, det vil sige en efterklangstid på T = 1,07 sekunder (hvis lydfeltet var diffust).

Hvis samme produktionslokale har en loftshøjde på 5 meter (for eksempel svarende til længde × bredde × højde = 20 × 10 × 5 meter), skulle absorptionen være 0,7 gange gulvarealet (200 kvadratmeter), altså A = 140 kvadratmeter absorption. Dette svarer til en efterklangstid på T = 1,15 sekunder (ved diffust lydfelt).

Ved, at myndighederne har krav eller retningslinjer for absorptionen, kan man ved større rum mere bekvemt fremskaffe en beregningsmæssig dokumentation for de akustiske forhold. Det er typisk denne dokumentation, Arbejdstilsynet vil forlange.

Bygningsreglementets (BR08) krav til akustikken i skoler og daginstitutioner

Kravene i Bygningsreglementet (BR08) er på lignende måde formuleret ved en blanding af efterklangstider og ækvivalente absorptionsarealer. For skoler gælder følgende krav:

Efterklangstid, T	
Klasserum	≤ 0,6 sek.
Fællesrum	≤ 0,4 sek.
Absorptionsareal A	
Åbne undervisningsområder	≥ 1,3 × gulvarealet
Fællesrum med rumhøjde større end 4 m og rumvolumen større end 300 m³	≥ 1,2 × gulvarealet
Støjniveau, LAeq	
Undervisningsrum, hidrørende fra tekniske installationer og trafik	≤ 30 dB

I princippet skal værdierne være opfyldt for hver enkelt 1/1 oktav i frekvensområdet 125-4.000 Hz. For støjniveauet er kravet formuleret til det A-vægtede, ækvivalente støjniveau, som er nærmere omtalt i kapitlet 'Grundbegreber'.



For daginstitutioner ser kravene således ud:

Efterklangstid, T	
Opholdsrum	≤ 0,4 sek.
Absorptionsareal A	
Opholdsrum med rumhøjde større end 4 m og rumvolumen større end 300 m³	≥ 1,2 × gulvarealet
Støjniveau, LAeq	
I opholdssrum fra tekniske installationer og trafik	≤ 30 dB

Her gælder samme bemærkninger som for skemaet ovenfor.

Den meget korte efterklangstid på 0,4 sekunder eller derunder kan kun opfyldes, hvis man foruden loftet også inddrager vægarealerne i den akustiske regulering.

Herudover indeholder Bygningsreglementet krav til undervisningsrum under 250 kubikmeter til korsang og akustisk musik, undervisningsrum under 250 kubikmeter til elektrisk forstærket sang og musik, åbne undervisningsområder og større fællesrum.

Bygningsreglementet indeholder også værdier for undervisningsrum til sløjd, for gymnastiksale, svømmehaller, fællesgange og trapperum.

Et eksempel fra en daginstitution:

I et lokale på 120 kubikmeter (længde × bredde × højde = 8 × 6 × 2,5 meter) skal efterklangstiden i lokalet være ≤ 0,4 sekunder ifølge Bygningsreglementet. Hvorledes opnås dette?

Ifølge Sabines formel skal absorptionen i lokalet være mindst 48 kvadratmeter (= 0,16 × 120 / 0,4). Dette skal også være opfyldt ved 125 Hz. Hvis vi tager et materiale med en absorptionskoefficient på 0,6, skal der anvendes 48 / 0,6 = 80 kvadratmeter (idet S × α = A, eller A / α = S). Lokalets loftareal er på 48 kvadratmeter, så det er altså ikke tilstrækkeligt at dække loftet. Der skal tilvejebringes ekstra 32 kvadratmeter lydabsorberende materiale, som altså må placeres på disponible vægarealer. Der er til rådighed [(2 × 8) + (2 × 6)] × 2,5 = 70 kvadratmeter. Så det er altså en betragtelig del af vægarealet, der også skal dækkes. Her skal man huske, at vægabsorbenter skal være robuste over for mekaniske påvirkninger, hvor loftsabsorbenter typisk er mere "af vejen".

‹ Bygningsreglementet (BR08) stiller konkrete krav til lydabsorptionen i skoler og daginstitutioner. SBI-anvisning 216 forklarer og fortolker bestemmelserne i BR08., og her findes blandt andet anvisninger om akustik i kontorer. AT-vejledninger vejleder om, hvordan reglerne i arbejdsmiljølovgivningen skal fortolkes. Vejledning om akustik i produktions- og kontorlokaler findes i ny AT-vejledning, Arbejdsstedets Indretning A.1.16 udgivet i december 2008.



Kontorlokale i Filmbyen, Århus.

Vi har taget udgangspunkt i materialets absorptionskoefficient ved 125 Hz ud fra den betragtning, at hvis materialet kan klare kravene (α = 0,6) ved 125 Hz, så vil α typisk være større ved højere frekvenser, og dermed opfyldes kravet. Det kan man se af materialeeksempler rundt omkring i dette hæfte.

Til slut skal det nævnes, at SBi-anvisning 216, som understøtter Bygningsreglementet (BR08), indeholder følgende forslag til projekteringsværdier vedrørende lydregulering i kontorbyggeri:

- i enkeltpersonskontorer og møderum bør efterklangstiden ikke overstige 0,6 sekunder.
- i flerrumskontorer bør absorptionsarealet A værre større end 1,1 × gulvarealet

Og hvad angår hospitaler, lægehuse, klinikker med videre foreslås følgende projekteringsværdier:

- i sengestuer bør efterklangstiden ikke overstige 0.8 s
- i undersøgelsesrum, behandlingsrum med videre, bør efterklangstiden ikke overstige 0,6 s

RESUMÉ

- Arbejdstilsynet vurderer til akustiske forhold i arbejdsrum efter retningslinjerne i At-vejledning A. 1.16, 'Arbejdsstedets indretning' udgivet i december 2008. I den indgår også de krav til skoler og daginstitutioner, som Bygningsreglementet stiller.
- For daginstitutioner, undervisningsrum mv. er der tale om krav til grænseværdier, mens der for kontorer, produktionslokaler mv. er tale om retningslinjer.
- Der er forskellige krav/vejledninger til rum, alt efter hvor store de er. For små rum opererer man med gennemsnitsværdier for efterklangstid, mens det for store rum er værdier for absorptionsarealet. Værdierne fremgår af tabellerne i kapitlet.
- Ved at benytte Sabines formel er det muligt at regne sig frem til, hvor meget absorberende materiale, der skal benyttes i et rum således at det lever op til krav/vejledninger.

Stikordsregister

Absorptionen
Også kaldet det ækvivalente absorptions areal er produktet af arealet af materialet gange med materialets absorptionskoefficient.

Absorptionskoefficient
Er for et materiale forholdet mellem den absorberede (egentlig den ikke-reflekterede lydenergi) og den mod materialet indfaldende lydenergi. Ligger mellem 0 og 1, idet en absorptionskoefficient på 0 markerer at materialet overhovedet ikke absorberer, mens en absorptionskoefficient på 1 markerer, at materialet er fuldstændig lydabsorberende.

At-vejledning, A.1.16
Arbejdstilsynets vejledning fra december 2008 med vejledninger til de akustiske forhold i arbejdslokaler.

A-vægtning
Et elektronisk filter indbygget i en lydtrykmåler, som får den til at vægte den målte støj på (næsten) samme måde, som vores ører gør det. Typisk får de dybe toner ikke så stor indflydelse på måleresultatet som diskanten.

Bygningsreglementet (BR 08)
Bygningsreglementet indeholder bl.a. krav til de akustiske forhold i boliger og i skoler og daginstitutioner.

Det ækvivalente, konstante lydtrykniveau, Leq
Det middel-lydtryk, der over måletiden (fx en arbejdsdag) resulterer i samme lydenergi som det aktuelle, tidsvarierende lydtryk.

Diffusitet
Diffusitet betyder (lyd)spredning. Det fænomen, at lyden pga. af rummets facon eller forhindringer i rummet (fx møbler) spredes på en tilfældig måde rundt i rummet. Er i almindelig medvirkende til en god akustik i rummet.

Efterklangstiden
Den tid (i sekunder), som det tager lydniveauet at falde med 60 dB, efter at lydkilden (fx en højttaler) er stoppet.

Ekko
En enkelt hørbar lydimpuls, der reflekteres fra en (stor) flade, når man sender en lydimpuls (fx et håndklap) ind mod fladen.

Flutterekko
Udtales "flotterekko". Et hurtigt impulstog, der reflekteres mange gange frem og tilbage mellem to (store) parallelle vægge. Kan frembringes ved, at man stiller sig mellem de to vægge og klapper én gang i hænderne.

Frekvens
Antal svingninger pr. sekund, måleenheden er Hertz, Hz. Mål for tonehøjden ("bas", "diskant" osv.) Øret er groft sagt i stand til at høre fra ca. 20 Hz op til 18.000-20.000 Hz.

Impulstog
Se flutterekko.

Lydstyrken
Måles i dB (decibel). Øret er i stand til at opfatte meget svage lyde omkring 0 dB. Opadtil er der ingen grænse, men lydniveauer på 120-130 dB kan ødelægge hørelsen ved blot kortvarig påvirkning. Måles med en lydtrykmåler, der direkte er kaliberet i dB.

Membranabsorbent
Absorbent bestående af en tynd plade med et hulrum bagved, fx en gipsvæg eller et trægulv på strøer. Virker ved, at pladen svinger som en membran, og absorberer herved lyd specielt ved lave frekvenser (bassen).

Peak-værdi
Spidsværdien (dvs. den absolutte maksimumsværdi) af lydtrykket, fx fra et skud.

Porøs absorbent
Absorbenttype, der består af porøst materiale, fx mineraluld, stof, tekstil og tæpper. Den porøse absorbent er en typisk mellemtone-højtone absorbent, men den absorberer ikke i bassen.

Resonansabsorbent
Absorbent bestående af en perforeret plade, typisk af gips eller metal med hulrum bagved. Resonansabsorbenten absorberer bedst i mellemtoneområdet og er mindre effektiv ved lave og høje frekvenser.

Sabine's formel
Sabine's formel siger, at efterklangstiden (i sekunder) for et rum er lig en konstant gange rummets volumen (i m3) divideret med den totale absorption i rummet (i m^2 Sabine, "kvadratmeter Sabine").

Speech Transmission Index
Et mål for taleforståeligheden i et rum eller fra et højttaleranlæg. Anvender et specielt testsignal og et specielt måleapparat, hvor Speech Transmission Index (STI) direkte kan aflæses for den pågældende situation.

Støjbarometer
Populær grafisk fremstilling af sammenhængen mellem dB-værdier og en række dagligdags situationer.

Taleforståelighed
Er et rums eller et højttaleranlægs evne til at gengive en tale tydeligt, så lytterne opfatter ordene korrekt.

Ækvivalent absorptionsareal
se Absorption.

(se også index Praktisk Elektroakustik)

Troldtekt akustik

En introdution til akustik

Rumakustik er en væsentligt, men ofte overset, parameter for, om en bygning er velfungerende. Hos L. Hammerich ønsker vi at skærpe især arkitekters opmærksomhed på god akustik i praksis. Til formålet har vi allieret os med akustikspecialist Jan Voetmann, som her i hæftet giver en indføring i rumakustik. Samarbejdet mellem L. Hammerich og Jan Voetmann er båret af producentens og rådgiverens fælles interesse i at øge fokus på akustikken i arkitekturen. Det er nemlig muligt at skabe æstetisk flotte løsninger med god akustik – det gælder blot om at tegne akustikken ind i arkitekturen fra begyndelsen.

Jan Voetmann har mere end 40 års erfaring som rådgiver i rum- og elektroakustik med baggrund fra Teknologisk Institut, Lydteknisk Institut og DELTA. Han er nu selvstændig konsulent med speciale inden for akustik i kulturbygninger. Jan Voetmann har desuden omfattende undervisnings- og skribentaktiviteter.



VOETMANN·AKUSTIK

L. Hammerich A/S har siden 1935 produceret Troldtekt akustik. Et produkt, der i al sin enkelhed består af rene naturmaterialer – træ og cement. Troldtekt akustikløsninger til loft- og vægbeklædning er blandt de absolut førende og mest udbredte til at sikre en god akustik, effektiv brandsikring og et sundt indeklima.
Læs mere på **www.troldtekt.dk**

L HAMMERICH AS

Sletvej 2-4
DK-8310 Tranbjerg J
Tlf +45 8747 8100
Fax +45 8747 8111
info@troldtekt.dk

www.troldtekt.dk

Rev. 02/09