

Måling af luftskifte

Af civilingeniør Ole Valbjørn,
Statens byggeforskningsinstitut

Der er ofte tvivl om ventilationens størrelse i både mekanisk og naturligt ventilerede rum. Ved hjælp af en luftskiftemåling kan ventilationens størrelse bestemmes uden indgreb i bygningen eller ventilationsanlæggene.

Luftskiftet for et rum er et udtryk for, hvor stor en ventilationsmængde der pr. tidsenhed tilføres rummet, udtrykt i antal gange rumvoluminet.

Et målt luftskifte på 3 gange i timen betyder derfor, at ventilationen i rummet svarer til, at rummet tilføres en luftmængde på 3 gange rumvoluminet pr. time.

Luftskiftemålingen er den eneste mulighed, der gives for at måle den naturlige ventilation, og den kan bruges til kontrol af luftmængder ved mekanisk ventilation. Det er ofte en lettere metode end at måle i kanalerne med pitotrør, da den ikke kræver bygningsmæssige indgreb.

Grundlag

Princippet i en luftskiftemåling er, at man opblander en bestemt mængde af en kendt og målelig luftart i rumluften og derefter måler sammenhørende værdier for luftartens koncentration og tiden for målingen. Koncentrationen af luftarten aftager med tiden på grund af ventilationen, og luftskiftet kan beregnes, idet der er en entydig sammenhæng mellem koncentration, tid og luftskifte.

Denne sammenhæng udledes af stofbalanceligningen, hvori udtrykkes, at den ændring, der sker i mængden af en luftart i rumluften, er lig den mængde, der tilføres, minus den mængde, der bortføres med den udsugede luft.

Stofbalanceligningen lyder
 $V_R dc = q dt + n V_R c_i dt - n V_R c dt$
 hvor V_R er rummets volumen i m^3 ,
 c koncentrationen af luftarten i rummet i m^3/m^3 , og da der er forudsat ideel blanding, den samme koncentration c_u som i den udsugede luft,

q den tilførte mængde af luftarten i m^3/h ,

τ tiden i timer,

n luftskiftet i antal gange pr. time og

c_i koncentrationen af luftarten i den indblæste luft i m^3/m^3 .

Integreres denne ligning, og sættes til tiden $\tau = 0$ koncentrationen $c = c_0$, fås det almenlydende udtryk, fortynningsligningen.

$$c = \frac{q}{n V_R} (1 - e^{-n\tau}) + (c_0 - c_i) e^{-n\tau} + c_i$$

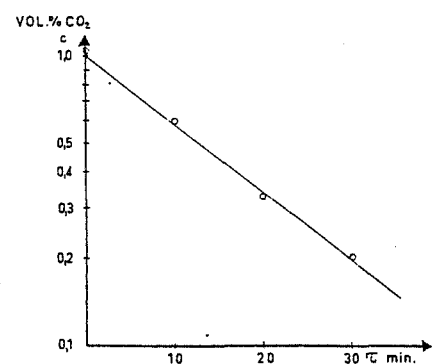
Sættes i denne ligning $q = 0$, der tilføres ikke mere af luftarten, fås ligningen

$$c - c_i = (c_0 - c_i) e^{-n\tau}$$

og løses denne med hensyn til $n\tau$ fås

$$n\tau = 1n \frac{(c_0 - c_i)}{(c - c_i)}$$

Såfremt den indblæste luft er fri for den tilsatte luftart er $c_i = 0$, og ligningen lyder



$$n = 2.3 \frac{\log \frac{c_1}{c_2}}{\tau_2 - \tau_1} = 2.3 \frac{\log \frac{1.0}{0.2}}{0.5 - 0} = 3.2 \text{ gange pr. time}$$

Fig. 1. Eksempel på grafisk afbildning i enkeltlogaritmisk koordinatsystem og en beregning af luftskiftet.

$$n\tau = 1n \frac{c_0}{c}$$

Opblandes en luftart i rumluften til koncentrationen c_0 , og udtages to prøver af rumluften til tiden τ_1 og τ_2 med koncentrationerne c_1 , henholdsvis c_2 fås

$$n\tau_1 = 1n \frac{c_0}{c_1}$$

$$n\tau_2 = 1n \frac{c_0}{c_2}$$

der løst med hensyn til n og omskrevet til 10-talslogaritmer giver

$$n = 2.3 \frac{\log \frac{c_1}{c_2}}{\tau_2 - \tau_1}$$

(lign. 1)

Såfremt c_i ikke er 0, men konstant, fås

$$n = 2.3 \frac{\log \frac{c_1 - c_i}{c_2 - c_i}}{\tau_2 - \tau_1}$$

(lign. 2)

Sammenhørende værdier for koncentration og tid ligger altså på en ret linie i et enkeltlogaritmisk koordinatsystem, hvor den ene akse er logaritmen til koncentrationerne, den anden tiden. Foretages 4-5 målinger, som afsættes i et sådant koordinatsystem, kan den rette linie gennem punkterne tegnes. To par sammenhørende værdier fra denne linie indsættes i ligningen (1), og luftskiftet n beregnes (fig. 1).

Sporgasser og måleinstrumenter

Egnede sporgasser er kvælstof, ilt, kuldioxid, helium. De krav, man må stille til en sporgas, er, at den i den anvendte koncentration er ugiftig, ikke eksplosiv og målelig, samt at den, hvis den forekommer i normal frisk luft,

	Kuldioxid CO ₂	Helium He	Kvælstof- forilte N ₂ O	Ilt O ₂
friskluftindhold vol. %	0,03	0	0	21
1 stillesiddende person afgiver/optager m ³ /h (ved hårdt arbejde tidobles tallet)	0,025	—	—	0,025
massefylde, ρ kg/m ³ (0°C)	2,13	0,18	1,98	1,43
forbrug for 100 m ³ rum	3–4 kg	1–2 m ³	0,2–0,3 kg	6–7 m ³
måleområde, vol. %	0–1,5	0–1	0–0,1	21–27
ca. pris excl. fragt og ekspedition	1,5 kr./kg	65 kr./m ³	7 kr./kg	3,50 kr./m ³

Tabel 1. Karakteristika for sporgasser til luftskiftemålinger, måleområde, forbrug og pris.

Fabrikat måleprincip	Pris for måle- udstyr ca. kr.	Kul- dioxid CO ₂	Helium He	Kvælstof- forilte N ₂ O	Ilt O ₂	Krypton kr.
Dräger absorption i fast stof	500	x				
Riken ændring i brydningsforhold	3000	x	x			
Hartmann & Braun, Beckman, MSA absorption af in- frarøde stråler	20000	x		x		
Siemens, Hartmann & Braun, Servomex ændring i magne- tisk flux	8–10000				x	
ændring af varme- overgangstal		x			x	
radioaktivitet	25000*)					x

*) Prisen for en rekvireret måling udført af Isotopcentralen er fra 2000 kr.

Tabel 2. Principper og priser for måleudstyr til måling af sporgaskoncentrationer til luftskifte-målinger. De angivne fabrikater er de af SBI kendte. Det udelukker ikke, at der eksisterer andre fabrikater, der er egnede til luftskiftemålinger.

indgår i luften med en konstant koncentration. I særlige tilfælde, hvor der er tale om store rum og små luftskifter, anvendes radioaktive luftarter, men da radioaktiviteten kan være farlig, må de kun anvendes efter tilladelse fra sundhedsstyrelsen.

Hvilken sporgas man vælger, må afhænge af de midler, der er til rådighed til måleapparatur, prisen på sporgassen, den ønskede nøjagtighed for målingen, om man vil måle med personer i rummet, men også af hvor let transportabelt udstyret og sporgassen er.

Af tabel 1 fremgår visse nyttige karakteristika for sporgassen. Sammenholdt med tabel 2, der angiver priser for måleudstyr til de forskellige sporgasser, ses at kuldioxid, ilt og helium kræver den mindste investering.

Til de fleste luftskiftemålinger i forbindelse med ventilationstekniske

opgaver drejer det sig om hurtigt og let at måle sporgaskoncentrationen, med så let transportabelt udstyr som muligt. En koncentrationsmåling må helst kunne udføres på 2–3 minutter. Det er upraktisk at skulle hjemtage prøver til senere analyse.

De principper, som derfor er anvendelige og anvendes til måling af sporgaskoncentration, bygger på et af de følgende nævnte principper: absorption i et fast stof, absorption af infrarød varmestråling, brydningsforholdet i luftarten, indflydelsen på varmeovergangstal, luftartens paramagnetiske egenskaber og luftartens radioaktive egenskaber.

Absorption i et fast stof anvendes ved måling af kuldioxid-koncentration med f. eks. Dräger-ampuller, der fås til måling af en lang række luftarter. Målingen sker ved at ampullen monteres i en håndbetjent bæltpumpe

(fig. 2), med hvilken der gennem røret suges et veldefineret kvantum af luften. Det vil være nødvendigt at anvende flere ampul typer for at opnå tilfredsstillende nøjagtighed i hele området. Ampullens indhold farves afhængig af den absorberede mængde kuldioxid. Prisen for en bæltpumpe er ca. 6–700 kr. og for ampullerne 3–4 kr. pr. stk.

Absorption af infrarød varmestråling anvendes i Hartmann & Brauns instrument URAS til måling af kuldioxid og kvælstofilte (lattergas). Den indsigende prøves absorption af den infrarøde stråling sammenlignes med en kontrolluftart. Den mængde varme, der passerer de to luftarter, absorberes i hver sit kammer med en temperaturstigning til følge. Forskellen i temperaturstigningen er et mål for koncentrationen. Prisen for udstyret er ca. 20.000 kr. Det er udviklet som overvågningsudstyr og kan måle og registrere koncentrationen kontinuerligt. Andre fabrikater er Beckman og MSA.

Forskellen i brydningsforholdet mellem forskellige stoffer anvendes i den japanske Riken gasanalysator, der er udviklet til kontrol af skadelige luftarter ved minedrift. I dette instrument sammenlignes en lysstråles brydning gennem en indsuget luftprøve med brydningen gennem en kontrolluftart. Princippet er enkelt, og instrumentet er meget robust og let at håndtere og kan til dette formål anvendes til måling af kuldioxid og helium. Prisen er ca. 3000 kr.

Måling af ilt og kuldioxid kan ske ved at måle en luftblandings varmeledningsevne, der afhænger af koncentrationen af luftarterne i blandingen. En luftstøm trækkes forbi en varmetråd med høj temperatur, og ændringen i trådens afkøling er da afhængig af varmeovergangstallet, dvs. af luftens ændring i ilt- eller kuldioxidkoncentrationen. Det instrument, SBI er bekendt med, er udgået af produktionen, men princippet kan tænkes at blive anvendt i andre fabrikater.

Specielt til iltkoncentrationsmålinger kan også anvendes instrumenter, der udnytter iltens paramagnetiske egenskaber som f. eks. i Siemens iltmåler, Hartmann & Brauns iltmåler eller iltanalysatoren af fabrikatet Ser-

voixex. I instrumenterne udnyttes på forskellig måde iltens særlige magnetiske egenskaber. Instrumenternes pris ligger fra 8000 til 10.000 kr.

Til radioaktive luftarter anvendes et udstyr, der måler radioaktiviteten. Udstyret er dyrt, til f. eks. måling af krypton koster det ca. 25.000 kr. Da der endvidere kræves tilladelse fra sundhedsstyrelsen til at anvende radioaktive luftarter, har det normalt ingen interesse at anskaffe dette udstyr, men Isotopcentralen kan udføre målinger og kan i tilfælde, hvor det findes nødvendigt, rekvireres til målinger. Prisen for en måling er af størrelsesordenen 2000 kr. Hygiejnisk Institut, Århus Universitet, har også udstyr til at udføre sådanne målinger.

Tabel 2 viser en oversigt over måleudstyr, der er tilgængeligt til måling af de nævnte sporgasser. De angivne fabrikater udelukker ikke, at der eksisterer andre fabrikater, der er anvendelige til de omtalte målinger, ligesom der muligvis findes andre metoder.

Praktisk udførelse

Det forudsættes, at man ønsker at finde det *gennemsnitlige luftskifte* i et rum.

Til målingen skal anvendes

1 eller 2 aksialventilatorer (2-4000 m³/h fritblæsende) til opblanding af sporgassen.

beholder med sporgas (den luftart, der opblandes), stopur,

apparat til måling af sporgassens koncentration i volumenprocent eller ppm.

Den mængde sporgas, der skal bruges, kan beregnes ved at multiplicere begyndelseskoncentrationen med rummets volumen, $c_0 \cdot V_R$. En del af sporgassen bortventileres under opblandingen, så der må anvendes lidt mere, end beregningen viser.

Ventilatorerne placeres, så de giver den bedst mulige omrøring i luften. Sporgassen tilsættes til lidt over det ønskede begyndelsesniveau. Det letteste er at anskaffe sporgassen i beholdere med en mængde, som passer til målingen, men ellers vil en måling af koncentrationen vise, om der er tilsat nok. Når sporgassen er godt opblandet, hvilket kontrolleres med et par målinger forskellige steder i lokalet, påbegyndes selve målingen, idet tid og

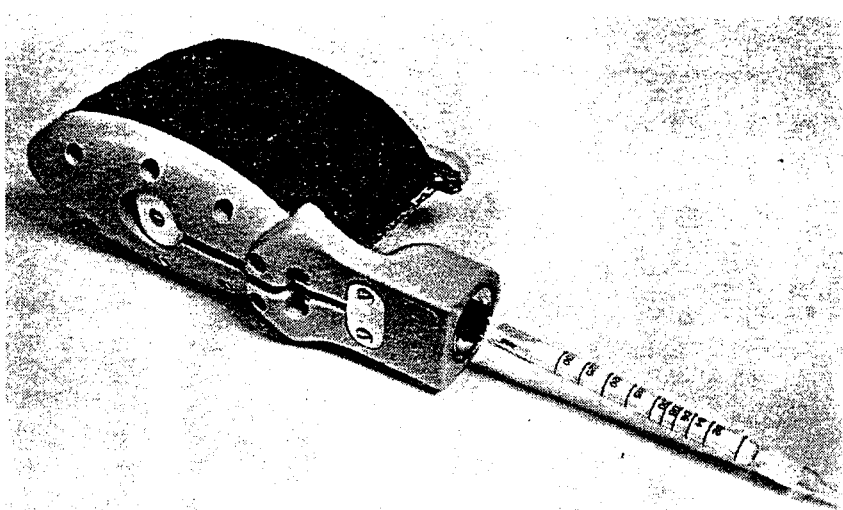


Fig. 2. Enkleste måleudstyr til sporgasmåling: Bælgpumpe og prøverør til måling af kuldioxid-koncentrationen.

koncentration samtidig måles og noteres. Under målingen skal ventilatorerne være igang.

Nøjagtigheden af målingen bedres ved at tage en række målinger og ved grafisk afbildning at bestemme kurven for tid og koncentration (en ret linie i et enkeltlogaritmisk koordinatsystem).

Fig. 3 viser en luftskiftemåling og fig. 1 viser resultaterne afbildet grafisk i et enkelt logaritmisk koordinatsystem. Det ses, at målenøjagtigheden har været god.

Måleperiodens længde afhænger af luftskiftets størrelse, fordi det til eksempel varer ca. 1,5 time, før koncentrationen af sporgassen er faldet til 1/5 af udgangsværdien, når luftskiftet er 1 gang pr. time, mens det ved et luftskifte på 5 gange pr. time kun varer ca. 20 min.

I mekanisk ventilerede rum kan man derfor påregne en måletid på ca. 30 min., mens man i naturligt ventilerede rum må anvende fra én til flere timer for at få værdier, hvis differens har en rimelig størrelse i forhold til usikkerheden på målingen.

Når de målte værdier er grafisk afbildet som i fig. 1, beregnes luftskiftet, idet der udtages to sammenhørende værdier for tid og koncentration, som indsættes i ligningen for n.

Måles luftskiftet i mekanisk ventilerede rum *uden* at omrøre luften med ventilatorer, fås som regel et tal, der er mindre end det gennemsnitlige luft-

skifte, idet ventilationen alene sjældent omrører luften så godt, at koncentrationen er den samme overalt i rummet som forudsat i fortyndingsligningen, oftest er den lavest ved udsugningsåbningen.

Fortolkning af resultaterne

Luftskiftet, der måles, er forårsaget af den mekaniske ventilation og den naturlige ventilation. I tilfælde, hvor der holdes overtryk i rummet i forhold til omgivelserne, er luftskiftet dog alene et udtryk for den indblæste luftmængde, idet det naturlige luftskifte er nul, når ventilationen er igang. Er der undertryk i rummet i forhold til omgivelserne, er det målte luftskifte et udtryk for den udsugede luftmængde. Overtryk eller undertryk kan f. eks. konstateres ved at iagttage, hvilken vej røg fra en røgampul bevæger sig ved døre og vinduer.

Hvis der ikke er overtryk eller undertryk i forhold til alle de omgivende rum og det fri, er det ikke muligt at få et nøjagtigt udtryk for den mekaniske ventilations størrelse.

Luftmængden beregnes ved at multiplicere luftskiftet med rummets nettovolumen V_R dvs. rumvolumet minus inventarvolumet.

SBI har i flere tilfælde ved praktiske undersøgelser foretaget kontrol af luftskiftemålinger ved at måle de indblæste luftmængder i kanalerne og fundet god overensstemmelse (bedre end $\pm 5\%$).

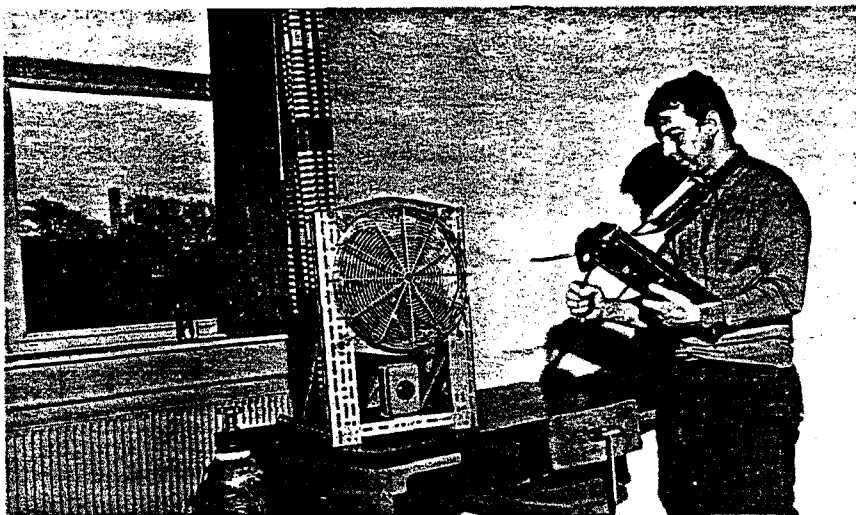


Fig. 3. En luftskiftemåling. Sporgassen er kuldioxid, måleinstrumentet en Riken gasanalysator. Ventilatoren bruges til opblanding af sporgassen.

Nøjagtigheden af luftskiftemålingen afhænger af nøjagtigheden af den enkelte måling af koncentrationen, af måleperiodens længde, luftskiftets størrelse og antallet af målinger i perioden. Den groveste måling fås med Dräger-ampullerne, hvor kuldioxidkoncentrationen i måleområdet ikke bestemmes bedre end med 10 % nøjagtighed. Ved et luftskifte på 3 gange i timen og en måleperiode på 30 min. med 4 enkeltmålinger bestemmes luftskiftet n med ± 5 %. Forøges måleperioden, falder usikkerheden proportionalt, forudsat at koncentrationen også i slutningen kan måles med samme nøjagtighed.

Ved Riken-apparatet er målenøjagtigheden for kuldioxidkoncentrationen bedre end 5 %. Ved de øvrige apparater er målenøjagtigheden større, men kun i særlige tilfælde vil der være behov for større nøjagtighed end almindeligt forekommende ventilationsopgaver. Alene ændringer i vindforhold kan ændre luftskiftet mere end 5 %.

Fejlmuligheder

Når der er personer tilstede under målingerne, og der anvendes kuldioxid eller ilt som sporgas, begås en fejl, hvis man ikke tager hensyn til den mængde kuldioxid, der afgives, eller ilt, der optages. Fejlen er for et luftskifte på 2 gange i timen i et rum på 10 m³ rumvolumen pr. person til stede ca. 12 % for kuldioxidmålin-

gen, når personerne udfører stillesiddende arbejde, mens den for iltmålingen er af størrelsesorden 1-2 %. Når fejlen er mindre ved iltmængden skyldes det, at der ved målingerne bruges forskellige koncentrationer af kuldioxid og af ilt. Ved iltmålingen er indflydelsen fra personer altså forholdsvis ringe.

Viser det sig, at den afbildede kurve i det enkeltlogaritmiske system er krum, har luftskiftet enten ændret sig, eller også er der sket ændringer i den indblæste lufts sporgas-indhold; således vil en manglende hensyntagen til indblæsningsluftens indhold af sporgas, uanset det er konstant, bevirke at kurven bliver krum.

Flere sporgasser har en tendens til at lagdele sig, når de tilsættes rumluften. Det er for at modvirke denne lagdeling, at en mekanisk opblanding anvendes. Når luftarten først er opblandet, vil luftarten ikke lagdele sig. De koncentrationsforskelle, man måske efter nogen tid vil måle i rummet, hvis der ikke konstant omrøres, skyldes, at ventilationsanlægget ikke ventilerer rummet effektivt overalt. Ilt blander sig dog særdeles godt og i (2) anføres, at for luftskifter mellem 0 og 2,5 gange i timen er det ikke nødvendigt at anvende ventilatorer for at få en jævn opblanding i rumluften. Til gengæld kan man ikke med ilt vise, om der er områder i rummet, der ventileres dårligere end andre. Undersøges et rum for eventuelle dårligt

ventilerede områder, må man gøre sig klart, om tilstedeværelsen af personer eller brug af varmeudviklende maskiner vil øge de termiske strømninger og derved skabe andre forhold end i det ubenyttede rum.

Arbejder et ventilationsanlæg med recirkulation, må man kontrollere, om der sker ændringer i den indblæste lufts indhold til sporgassen. Men som regel fortyndes sporgassen så meget, at det recirkulerede ikke får indflydelse på målingen, når ventilationsanlægget betjener andre rum end det, der måles i.

Anvendes kuldioxid som sporgas, kan koncentrationen i indblæsningsluften også ændres under målingen, hvis de øvrige lokaler er i brug af mange personer og luften recirkuleres.

Det luftskifte, der måles, når et ventilationsanlæg med indblæsning og udsugning arbejder med recirkulation, er forårsaget af den totale indblæste luftmængde. Ønsker man at måle frisklufttilførelsen, må man derfor samtidig måle blandingsforholdet. Hvor det er muligt, anbefales det at sætte anlægget til at arbejde med friskluft.

Resumé

En luftskiftemåling er et hjælpemiddel til bestemmelse af ventilationen i et rum. Til brug for luftskiftemålingen anvendes en sporgas, der tilsættes rumluften og opblandes. Koncentrationen vil efter opblandingen have et eksponentielt aftagende tidsforløb, og ved at måle en række sammenhørende værdier for koncentration og tid, kan luftskiftet bestemmes.

Det enkleste udstyr til brug for luftmålinger fås til sporgassen kuldioxid. Udstyret består af en håndbetjent bæltpumpe og prøveampuller (f. eks. fra Dräger Werk), en flaske med kuldioxid, et stopur samt en eller to aksialventilatorer til opblandingen. Dette udstyr kan anskaffes for 1000-1500 kr. og giver i de fleste tilfælde tilfredsstillende resultater, og usikkerheden er af størrelsesorden 5 %.

Litteraturlistefortegnelse

- (1) Poul Becher, Varme og Ventilation, Bind 5, Teknisk Forlag, 1965.
- (2) G. Labohm, Ein Beitrag zum Problem der Messung der Lüftung von Wohn- und Aufenthaltsräumen, Heizung-Lüftung-Haus-technik 15 (1964) Nr. 7.