

# Metode for kvantifisering av lekkasjemengder med akustisk kamera

Toros Senan,

PhD. forskningsingeniør, akustikk

## Innledning

Lekkasjedeteksjon er nødvendig i mange typer anlegg. Blant de mest kjente er trykkluftsystemer som brukes mange steder, spesielt i produksjonsbedrifter.

## Repetisjon av hvordan ii900/ii910 fungerer

ii900/ii910 benytter 64 mikrofoner plassert i et bestemt matrisemønster. Et kamera midt i matrisen fotograferer scenen. Enheten bruker komplekse algoritmer til å generere et lydkart, eller bilde, av lydkildene, og legger deretter det genererte lydkartet over fotografiet. Mikrofonene mottar lyden til litt forskjellige tidspunkt avhengig av lydkildens posisjon i synsfeltet til ii900/ii910. Tidsforskjellen mellom mikrofonene gjør det mulig å lokalisere lydkildens posisjon: Hvis lyden kommer fra høyre side av enheten, mottar mikrofonene på høyre side av matrisen, lyden en brøkdel av et sekund tidligere enn mikrofonene på venstre side. ii900/ii910 vil vise bildet av denne lyden på høyre side av skjermen.

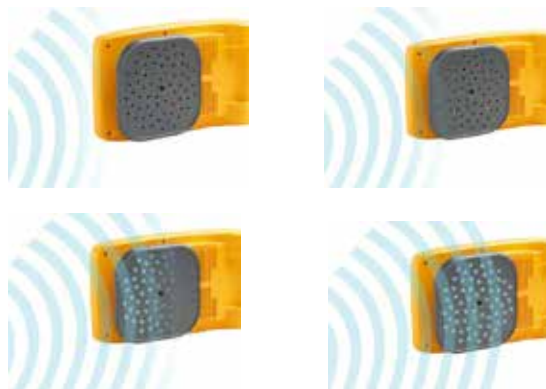
## Hvordan påviser ii900/ii910 lekkasjer?

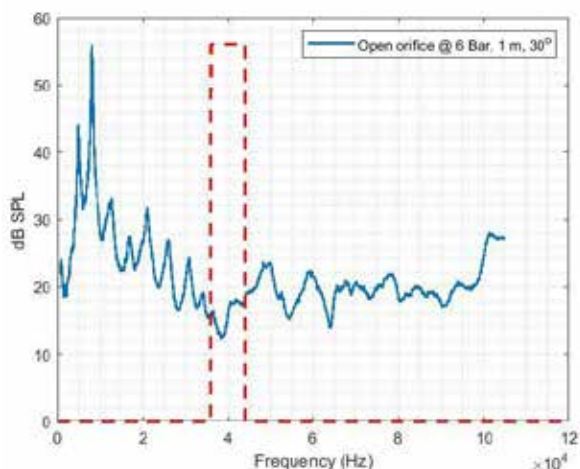
Når det oppstår en lekkasje i et trykkluftsystem, skaper gassmolekylene (luft) som slippes ut, turbulens som fører til raske endringer i trykk og strømningshastighet. Disse endringene kan overføres som lydbølger. ii900/ii910 er i stand til å registrere posisjonen og intensiteten til disse lydbølgene.

Trykkluft som lekker ut i den omgivende atmosfæren, skaper bredbåndsstøy både i det hørbare og i det ultrasoniske frekvensområdet (Eret og Meskell, 2012; Holstein m.fl., 2016). I trykkluftsystemer i industrien bruker ofte smalbands (sentrert rundt 40 kHz) ultralydssensorer til lokalisering av lekkasjer. Bruk av smalbands ultralydssensorer medfører imidlertid noen begrensninger.

Avstanden mellom lekkasjen og måleinstrumentet, og målevinkelen, er avgjørende faktorer som bidrar til ultralydssensorens effektivitet: For det første dempes den høyfrekvente lyden raskt på grunn av atmosfærisk absorpsjon (se Wolstencroft og Neale, 2008).

For det andre varierer lydtryknivået som genereres av en trykkluftlekkasje, med målevinkelen (Wolstencroft og Neale, 2008). I tillegg er støyende omgivelser kjent for å redusere ytelsen til smalbands ultralydssensorer (Eret og Meskell, 2012). Bruk av bredbåndssensorer som opererer i både de hørbare og de ultrasoniske frekvensområdene, gjør at brukeren kan kompensere for begrensningene som nevnes ovenfor. Flexibiliteten de gir i frekvensområdet, gjør lekkasjedeteksjonssystemet mer robust. I figur 1 vises et eksempel på at trykkluft som lekker ut av en åpning ved et systemtrykk på 6 bar, genererer bredbåndsstøy. Figuren viser frekvensområdet med det høyest målte lydtryknivået i det hørbare området. Lydtryknivået målt i frekvensområdet 35–45 kHz (røde stiplede linjer i figur 1), er derimot merkbart lavere enn i resten av frekvensspekteret.





Figur 1: Trykkluft som lekker gjennom en åpning (1/4"). Målingen er tatt med ii910, 1 meter fra lekkasjekilden og med en målevinkel på 30 grader. Den blå linjen viser det utjevnete spekteret, og den røde stiplede linjen indikerer at frekvensområdet er omtrent 40 kHz.

Det finnes et begrenset antall studier som undersøker frekvenskarakteristikken til lyden av trykkluftlekkasjer. Studien til Holstein m.fl. (2016) presenterte frekvensspektre for målinger av trykkluftlekkasjer med systematisk økte strømningshastigheter (se fig. 2 i Holstein m.fl., 2016). Lekkasjekilden var en rund åpning, og målingene ble tatt fra en avstand på 20 cm fra kilden. Frekvensspektrene viser at energien over 50 kHz øker jo større strømningshastighetene blir. Frekvensspektret viser en spiss på rundt 80 kHz for den største strømningshastigheten målt i eksperimentet.

## Faktorer som påvirker lekkasjedeteksjon

Faktorer som påvirker lekkasjedeteksjon diskuteres separat i dette avsnittet. Vær oppmerksom på at faktorene som forklares i denne delen, samhandler med hverandre og bør betraktes som enkeltkomponenter i et bredt, komplekst fenomen.

### Lekkasjekildefaktorer:

#### 1. Systemtrykk

Generelt sett er det slik at større systemtrykk gir større lekkasje og dermed høyere lydintensitet, det gjør detektering enklere.

#### 2. Strømningshastighet

Høyere strømningshastighet i systemet gir større lekkasje og dermed høyere lydintensitet målt ved lekkasjeposisjonen, akkurat som med trykk. Høyere lydintensitet gjør akustisk deteksjon lettere.

### 3. Åpningens størrelse og form

Åpningens størrelse og form må vurderes samlet. De mange ulike potensielle luftlekkasjene gjør det vanskelig å gi en veiledning om virkningen form og størrelse har på lekkasjedeteksjon. Denne listen viser noen av de potensielle lekkasjekildene. Både størrelsen og formen på åpningen varierer for elementene i listen. luftslanger og luftslangeforbindelser eller -koblinger

- slitte koblinger eller koblinger med manglene O-ringer
- filtre, smøreenheter og regulatorer, ved feilmontering
- åpne utblåsningsventiler
- åpne kondensfeller
- lekk eller fuskende avløp
- svikternde gjenger, gjengetetning av lav kvalitet, ukorrekt påført tetningsmiddel
- regulerings- og stengeventiler
- utslitte tetninger og pakninger
  - gamle eller dårlig vedlikeholdte trykkluftverktøy
  - inaktive eller ubruke maskiner og produksjons- utstyr med luftinntak

gass	formel	P (Kg/m <sup>3</sup> )
acetylen	C <sup>2</sup> H <sup>2</sup>	1,173
luft	–	1,2929
ammoniakk	NH <sup>3</sup>	0,7710
argon	A	1,7837
karbondioksid	CO <sup>2</sup>	1,977
karbonmonoksid	CO	1,250
klor	Cl <sup>2</sup>	3,214
etan (10 °C)	C <sup>2</sup> H <sup>6</sup>	1,356
etylen	C <sup>2</sup> H <sup>4</sup>	1,260
helium	He	0,1785
hydrogen	H <sup>2</sup>	0,0899
hydrogensulfid	H <sup>2</sup> S	1,539
metan	CH <sup>4</sup>	0,7168
neon	Ne	0,9003
nitrogenoksid (10 °C)	NO	1,34
nitrogen	N <sup>2</sup>	1,2506
dinitrogenoksid	N <sup>2</sup> O	1,977
oksygen	O <sup>2</sup>	1,429
propan	C <sup>3</sup> H <sup>8</sup>	2,9009
svoveldioksid	SO <sup>2</sup>	2,927
damp (100 °C)	H <sup>2</sup> O	0,598
svovelheksafluorid**	SF <sup>6</sup>	6,17
kjølemiddel R134a***	CH <sup>2</sup> FCF <sup>3</sup>	14,433

Tabell 1: liste over tetthetsverdier for gasser, gasstetthet, P, ved 0 °C og 1 atm\*.

\*Handbook of Chemistry and Physics. 48. utg.

\*\*[https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur\\_hexafluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride)

\*\*\*[https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d\\_1682.html](https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html)

## Flyteegenskaper

Gassens flyteegenskaper påvirker lyden som genereres når den unnslipper gjennom lekkasjen.

### 4. Tetthet

Tabellen nedenfor viser tettheten av gasser i kg/m<sup>3</sup> ved 0 °C og én atmosfæres trykk. Gasstettheten påvirker lekkasjens lydintensitet. Helium har for eksempel lav tetthet; det betyr at lydtryknivåene målt ved lekkasjeposisjonen er lavere enn for trykkluft, hvis strømningshastigheten og trykket er de samme. Praktisk erfaring bekrefter at det er vanskelig å detektere en heliumlekkasje.

### 5. Viskositet

Gassens viskositet påvirker lydtryknivået ved lekkasjeposisjonen. Påvirkningen vil imidlertid være mindre enn for tetthet.

### 6. Omgivelsestemperatur

Vi må ta hensyn til omgivelsestemperaturen både ved lekkasjekilden og i -banen. For lekkasjekilden vil omgivelsestemperaturen påvirke tettheten og viskositeten. Begge disse faktorene vil endre lydtryknivået ved lekkasjeposisjonen. Når omgivelsestemperaturen øker, øker molekylers kinetiske energi, og det fører til økt lydintensitet ved lekkasjen.

### 7. Omgivelsestrykk

Omgivelsestrykket har direkte påvirkning på gasstettheten. Reduksjon i omgivelsestrykket fører til lavere tetthet og dermed lavere lydintensitet ved lekkasjen.

### 8. Avstand fra lekkasjen til kameraet

Måleavstanden påvirker målt lydtryknivå. Når lyden forplantes i alle retninger fra kilden, reduseres intensiteten jo større avstanden er.

### 9. Omgivelsestemperatur

Endringer i omgivelsestemperatur kan endre gassens tetthet og viskositet. Begge disse faktorene påvirker lydets hastighet når den beveger seg gjennom mediet. Lyden beveger seg raskere når temperaturen øker. Endringer i omgivelsestemperatur er en av mekanismene som påvirker mengden akustisk energi som absorberes av atmosfæren. For lave frekvenser og korte avstander er temperaturens påvirkning på mengden luft som absorberes, ubetydelig (Harris, 1966). For svært høye frekvenser og lange avstander kan lydtryknivået imidlertid bli betydelig lavere (Vladišauskas og Jakevičius, 2004).

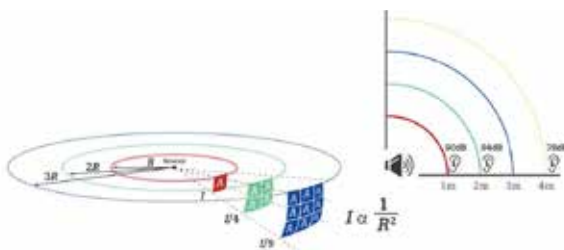
### 10. Luftfuktighet

Luftfuktighet er den andre mekanismen som påvirker lydtryknivået på grunn av luftabsorpsjon. Ved normale forhold er luftfuktighetens påvirkning på lydtryknivået ubetydelig, akkurat som for omgivelsestemperaturen (Harris, 1966). Påvirkningen er merkbar for svært høye frekvenser og høye luftfuktighetsnivåer (Vladišauskas og Jakevičius, 2004).

### 11. Omgivelsestrykk

Omgivelsestrykket påvirker ikke lydtryknivået i beregninger for ideelle gasser, siden både lufttetthet og gasstrykk har lignende, men omvendte effekter på lydshastigheten. De to bidragene utligner hverandre. Det forventes derfor ingen forskjell i lydtryknivå mellom lekkasjeposisjonen og måleposisjonen på grunn av omgivelsestrykket.

## Banefaktorer og atmosfæriske effekter



En doubling av avstanden mellom lyd-kilden og måleposisjonen i frie felt reduserer lydintensiteten med 6 dB.

## Hvilke lekkasjeegenskaper måler ii900/ii910?

ii900/ii910 viser lekkasjetyper og beregner lekkasjens strømningshastighet basert på akustiske data. Et sett med laboratorieeksperimenter ble utformet og gjennomført for å utvikle lekkasjetypeklassifisering og algoritmer for beregning av strømningshastighet.

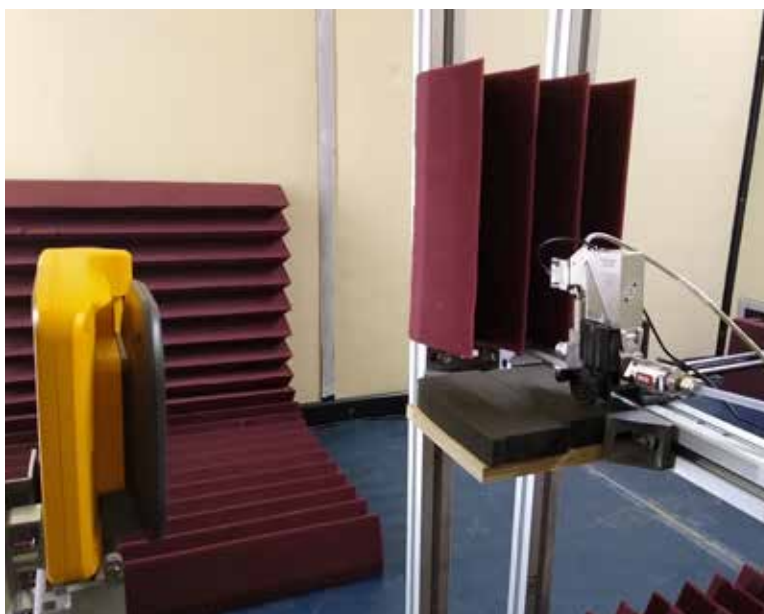
## Lekkasjetypeklassifisering med ii900/ii910

ii900 og ii910 klassifiserer registrerte akustiske lekkasjedata basert på hvor de oppstår: slange, åpen ende, hurtigkobling og gjenget kobling. Fire klassifikasjoner, de fire lekkasjetypene, ble montert på enden av et trykkluftslangesystem, og de akustiske målingene ble utført i et delvis ekkofritt kammer. Figur 3 og 4 viser to eksempler på eksperimentetoppsett. Figur 5 viser koblingene som dannet de fire lekkasjeforholdene i eksperimentet.

- 1. Slange:** Slangen et fleksibelt rør som gjør rørlegging enkelt. I motsetning til metall- og messingrøret er det imidlertid et mer sensitivt materiale. Derfor er det enkelt å lage spesifikke kutt og hull langs slanger som forbinde luftkompressorer med trykkluftsutstyr. En lekkasje fra et kutt i slangen ble brukt for å registrere akustiske data for slangelekkasje, for klassifisering og beregning av strømningshastighet (figur 3 og figur 5a).
- 2. Åpen ende:** Et rør med åpen ende eller en annen åpning er den vanligste typen lekkasje som brukes i vitenskapelige studier (referanser). Dette oppstår når en rørdel i trykkluftsystemet blir stående åpen. Et rør med åpen ende ble brukt til eksperimenter for klassifisering og beregning av strømningshastighet under hele utviklingsstadiet for ii900 (figur 4 og figur 5b).
- 3. Hurtigkobling:** Hurtigkoblinger gjør tilkobling både enkelt og raskt. Hurtigkoblinger skrås så de glir lett i en retning og holder igjen når det trekkes i motsatt retning. Ofte er en eller flere av disse skråflatene skadet, slik at det lekker trykkluft gjennom hurtigkoblingen. Luften spres seg rundt koblingen, og trykkluftlekkasjens retning varierer for hvert deformasjonstilfelle. En deformert hurtigkobling ble brukt til akustiske målinger under utviklingen av klassifisering og beregningsalgoritmer for strømningshastighet for ii900/ii910 (figur 5c).
- 4. Gjenget kobling:** Det er vanlig å bruke et gjenget endelokk på endepunktene i trykkluftsystemet. De gjengede endelokkene må plasseres nøyaktig og justeres riktig med hensyn til antall gjenger som må gli inn i enderøret. Det hender noen ganger at teknikere lar disse endedelene være for løse. Dessuten kan gjengede endelokk bli deformerte når de brukes flere ganger. I slike tilfeller lekker trykkluft gjennom endelokket, og det gjør systemet mindre effektivt. Et løst plassert endelokk ble brukt som lekkasjekilde i eksperimentene (figur 5d).



Figur 3: måling av type slangelekkasje i en vinkel på 30 grader



Figur 4: eksperimentelt oppsett for måling av åpen ende-lekkasje med en vinkel på 90 grader



Figur 5: de fire lekkasjetypene som ble undersøkt i løpet av eksperimentene: slange (a), åpen ende (b), hurtigkobling (c) og gjenget kobling (d).

## Indeks for kvantifisering av lekkasjemengde

ii900/ii910 beregner strømningshastigheten ved lekkasjeposisjonen basert på de akustiske dataene som registreres. Algoritmene for strømningshastighet ble utformet basert på resultatene fra laboratoriemålingene som ble gjort i det delvis ekkofrie kammeret. På grunn av de forskjellige akustiske egenskapene til hver type lekkasje, finnes det en algoritme for beregning av strømningshastighet for hver lekkasjetype. Algoritmer for estimering av strømningshastighet opererer derfor etter klassifiseringsstadiet.

Deretter konverteres den anslåtte strømningshastigheten for en lekkasjetype til indeksen for kvantifisering av lekkasjemengde. Indeksen for kvantifisering av lekkasjemengde tar en verdi mellom 0 og 10. Høyere indeksverdi betyr høyere strømningshastighet ved lekkasjeposisjonen og kan betraktes som et reparasjonsforslag.

## Konklusjoner

ii900/ii910 er et brukervennlig, håndholdt apparat som gir deg effektivt frekvensområde og prøver å kompensere for vanskeligheter og kvantifisering ved lekkasjedeteksjon. Kvantifisering av lekkasjemengde er kritisk for å opprettholde trykkluftsystemets effektivitet, og rapporteringsfunksjonene gjør kommunikasjonen mellom vedlikeholdsingeniørene raskere.

## Referanser

- Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148-159.
- Holstein, P., Barth, M., & Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In *Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (s. 13-17).
- Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 50(1), 46-49.
- Wolstencroft, H., & Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound. *Proceedings of Acoustics (AAS'08)*.

**Fluke.** *Keeping your world up and running.*®

**Fluke Norge AS**  
Postboks 383  
1411 Kolbotn  
Tlf: 800 18 227  
E-mail: cs.no@fluke.com  
www.fluke.no

©2020-2021 Fluke Corporation. Med enerett.  
Informasjonen kan endres uten varsel.  
Vi tar forbehold om trykkfeil.  
06/2021 210581-no

**Endring av dette dokumentet er ikke tillatt uten skriftlig tillatelse fra Fluke Corporation.**