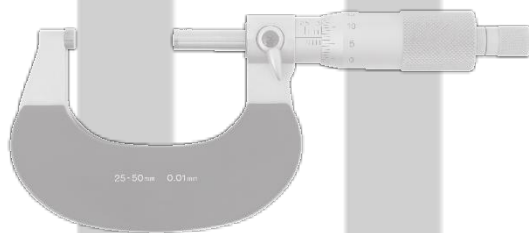


# FLOWMÅLING I GAS

UNDERVISNINGSELEMENT

## F3

—  
UNDERVISNING  
I MÅLETEKNIK

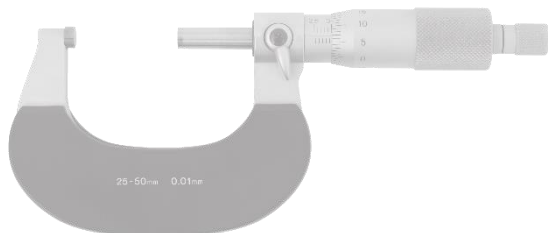


**metrologi.dk**

# FLOWMÅLING - GAS

Erik Jensen og Johan Bunde Kondrup, FORCE Technology

1. udgave – September 2018



Copyright © 2017 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på [www.metrologi.dk](http://www.metrologi.dk).

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

## Indholdsfortegnelse

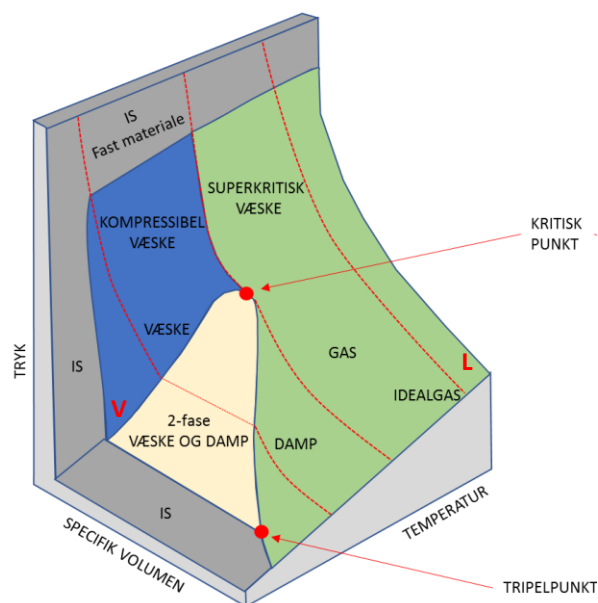
|                                                                                                           |           |                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Indledning .....</b>                                                                                 | <b>1</b>  | 5.3 Skovlhjul.....                          | 12        |
| 1.1 Hvad er gas .....                                                                                     | 1         | 5.4 Lydbølger .....                         | 13        |
| 1.2 Måleenheder og referencetilstand .....                                                                | 2         | 5.5 Varmetransport .....                    | 13        |
| 1.3 Indhold i dette UE .....                                                                              | 3         | 5.6 Tracing .....                           | 13        |
| Boks 1: hvis du vil vide mere .....                                                                       | 3         | 5.7 Coriolis .....                          | 13        |
| <b>2 Generelle måletekniske forhold for gas .....</b>                                                     | <b>4</b>  | 5.8 Vortex målere .....                     | 13        |
| Boks 1: ATEX zone  ..... | 4         | <b>6 Kalibrering af gasmålere .....</b>     | <b>13</b> |
| 2.1 Sikkerhed under måling .....                                                                          | 4         | 6.1 Kalibrering i laboratorie .....         | 14        |
| 2.2 Densiteten af gas .....                                                                               | 5         | Boks 1: Legal metrologi og MID .....        | 15        |
| 2.2.1 Idealgasser .....                                                                                   | 5         | 6.2 Kalibrering på stedet (tracing) .....   | 15        |
| 2.2.2 Kompressibilitetsfaktor, $z$ .....                                                                  | 6         | 6.3 Fortolkning af certifikater .....       | 16        |
| 2.2.3 Beregning af densitet af realgasser .....                                                           | 7         | <b>7 Usikkerhedsbudgettet .....</b>         | <b>17</b> |
| 2.2.4 Måling af densitet .....                                                                            | 7         | 7.1 Gasvolumenmåling med vortex måler ..... | 17        |
| 2.2.5 Fugtig luft .....                                                                                   | 9         | 7.1.1 Systembeskrivelse .....               | 18        |
| 2.2.6 Normalisering .....                                                                                 | 10        | 7.1.2 Komponentusikkerhed .....             | 18        |
| <b>3 Flowmåling i rør .....</b>                                                                           | <b>11</b> | 7.1.3 Systemusikkerhed .....                | 19        |
| <b>4 Flowmåling udenfor rør .....</b>                                                                     | <b>12</b> | 7.1.4 Anvendelse af UE A4 .....             | 20        |
| <b>5 Måleteknologier .....</b>                                                                            | <b>12</b> | 7.2 Gashastighedsmåling med pitotrør. ....  | 20        |
| 5.1 Trykforskelle .....                                                                                   | 12        | 7.2.1 Regnemodellen .....                   | 20        |
| 5.2 Lukket volumen .....                                                                                  | 12        | <b>8 Opsummering .....</b>                  | <b>22</b> |

# 1 Indledning

Flowmåling af gas findes generelt hvor der er gas under tryk i rørføringer eller hvor der måles på luftstrømninger udenfor rør. For begge gælder måletekniske forhold, som ikke eksisterer ved måling på væsker. Det anbefales dog at have studeret UE-F1 inden man begynder på dette undervisningselement.

Flowmåling på gasser findes over alt og bruges blandt andet til at overvåge og styring af procesanlæg, air-condition i bygninger, kontrolinstrumenter i fly og biler samt til at fastlægge gasregninger for en husejer blot for at nævne nogle eksempler.

Udtrykket "gas" er således ikke begrænset til "naturgas" eller "flaskegas" men skal forstås bredt som et medie med en gas karakteristika.



Figur 1 Hvad er gas? Område markeret med grønt er anvendt definition på gas. "V" og "L" indikerer positionen af henholdsvis vand og luft ved 20 °C og 1 atm. Figuren er en skitse og ikke med korrekt skalering.

## 1.1 Hvad er gas

Bortset fra områder med mulighed for 2-fase tilstande er et mediets faser karakteriseret ved afstanden imellem atomerne og deres indbyrdes binding. Idealgasser er således kendetegnet ved at molekylerne ligger frit i forhold til hinanden. Realgasser, som er beskrevet senere i afsnit 2.2.3, er kendetegnet ved at molekylerne ikke er bundet sammen men ligger så

tæt på hinanden, at de ikke bevæger sig frit. Fælles for begge er at der er en elasticitet.

Tabel 1 viser udvalgte data for det kritiske punkt for tekniske gasarter samt vand.

Tabel 1 Kritisk punkt for udvalgte gasser

|                 | Mw     | Kritisk punkt | Kritisk punkt |
|-----------------|--------|---------------|---------------|
|                 | g/mol  | °C            | bara          |
| Luft            | 28,96  | -141          | 37            |
| Nitrogen        | 28,013 | -143,97       | 33,96         |
| Ilt             | 32,0   | -118          | 57            |
| Helium          | 4,003  | -267,96       | 2,275         |
| Argon           | 39,95  | -122,47       | 48,63         |
| Acetylen        | 26,04  | 35,17         | 61,38         |
| Propan          | 44,096 | 96,73         | 42,51         |
| CO <sub>2</sub> | 44,01  | 30,97         | 73,77         |
| Hydrogen        | 2,016  | -240,015      | 12,96         |
| Vand            | 18,015 | 373,94        | 220,6         |

Ved en temperatur på 20 °C og 1 atmosfære vil de relative tryk og temperaturer i forhold til det kritiske punkt for henholdsvis vand og luft være som angivet i tabel 2.

Tabel 2 Relativ temperatur og tryk for luft og vand ved 20 °C og 1 bara.

|      | Tryk   | Temperatur |
|------|--------|------------|
| Luft | 0,027  | 2,2        |
| Vand | 0,0045 | 0,73       |

Som det ses på tabel 1 vil de nævnte gasarter alle være under det kritiske tryk ved 1 bara (1 bara er næsten atmosfærisk tryk, læs mere herom i UE-P1). Temperaturen for nogle gasser vil være over det kritiske punkt og andre under det kritiske punkt ved 20 °C.

Gasarter såsom acetylen, propan og CO<sub>2</sub> kan indplaceres i området "damp" på figur 1. Dette betyder at de ved komprimering kan omdannes til væskeform eller bringes i en 2-faset tilstand.

For luft (og de typer af gas, som luft består af) er den gennemsnitlige lufttemperatur så langt over den kri-

tiske temperatur at de ved og omkring atmosfæretrykket kan beregnes ud fra idealgas betragtninger og dermed enklere at håndtere rent regneteknisk.

Gas kan indeholde mindre mængder af væske. Dette må ikke forveksles med 2 fase medie, da der her er tale om forskellige medier – for eksempel luft og vand, som oftest omtales som fugtig luft. Tilsvarende kan væske indeholde luft eller gasarter.

Fugtig luft behandles senere i afsnit 2.2.5.

## 1.2 Måleenheder og referencetilstand

Som nævnt er gas sammentrykkeligt. Det giver derfor ingen mening at tale om en  $m^3$  luft uden samtidigt at angive som minimum tryk og temperatur. I nogle situationer skal der også angives indholdet af luften, hvilket oftest omfatter luftens fugtighed.

Referencetilstanden er betegnelsen for den tilstand, som er aftalt imellem leverandør og modtager af gasen. Det kan være fastlagt i lovgivningen men oftest vil en kontrakt på levering af gas altid indeholde et afsnit om referencetilstanden og hvilke parametre, som definerer referencetilstanden.

Det kan virke lidt abstrakt at en  $m^3$  gas ikke afregnes som en  $m^3$  men som noget helt andet. Men det skal ses som en sikkerhed for at der ikke opstår diskussion om den leverede mængde.

For luft og naturgas er den normale referencetilstand angivet ved 0 °C og 1,01325 bara. For luft angives ofte et mål for den relative fugtighed %RH. For væske anvendes ofte 15 °C og 1,01325 bara. Det er vigtigt at tjekke den aktuelle definition på referencetilstanden, da udtrykket "standard" i udlandet også kan referer til den tilstand, som vi kalder normaltstand.

I modsætning til volumen, så ændrer massen sig ikke. Der er derfor ikke behov for at angive en referencetilstand for massen.

Tabel 3 Måleenheder

| Enhed  | Målestørrelse                                          |
|--------|--------------------------------------------------------|
| $m^3$  | Volumen                                                |
| $Nm^3$ | Normal $m^3$ , volumen ved 1 atm og 0 °C (273,15 K)    |
| $Sm^3$ | Standard $m^3$ , volumen ved 1 atm og 15 °C (288,15 K) |
| barg   | Tryk – relativt til atmosfæretrykket.                  |
| bara   | Tryk – absolut                                         |
| Atm    | Atmosfæretryk, 1,01325 bara                            |
| kg     | Masse                                                  |
| °C     | Temperatur, Celsius skala                              |
| K      | Temperatur, Kelvin skala                               |
| %-w/w  | Vægt procent                                           |
| %-v/v  | Volumen procent                                        |
| RH     | Relativ fugtighed                                      |
| Mw     | Vægten af en mol [g/mol]                               |
| $R_u$  | Universel gaskonstant<br>8,3145 J/(mol·K)              |
| V      | Volumen, $m^3$                                         |
| v      | Specifik volumen, $m^3/kg$                             |
| $\rho$ | Densitet, $kg/m^3$                                     |
| SG     | Specifik/relativ densitet [-/-]                        |
| Z      | Komprimebilitet                                        |
| J      | Energi, Joule                                          |

Densiteten ændrer sig med temperaturen. Derfor anvendes ofte udtryk som relativ densitet eller "specific gravity" som udtryk for densitet. Den relative densitet sættes i forhold til (tør) luft, hvilket betyder at den relative densitet også kan beregnes som forholdet imellem molvægten af gassen og molvægten af luft.

Tabel 3 viser det oftest anvendte enheder i forbindelse med måling på gasser.

### 1.3 Indhold i dette UE

Undervisningsmodulet "F1 – introduktion til flowmåling" beskriver fællesnævnerne for måling på vaske og gas. I dette dokument gennemgås de forhold, som er specielle for måling på gas. Faktisk er der kun nogle få forskelle på måling mellem væske og gasser – primært det at gasser er kompressible, kan indeholde væske som under visse forhold kan kondensere. Gas kan ligeledes være farligt at indånde. Flydende vand er ej heller sundt at indånde men det vil næppe ske frivilligt. Indånding af gas kan derimod forekomme uden at man opdager det.

Det første afsnit under generelle måletekniske forhold for gas er derfor dedikeret til sikkerhed.

Gas er et kompressibelt medie – hvis det udsættes for tryk, så fylder det mindre. Massen af gassen forbliver dog den samme. På grund af dette så er det vigtigt at være omhyggeligt med måleenhederne, hvis der er tale om volumetriske målinger. Volumen og volumenstrøm henføres til en kendt tryk/temperaturtilstand, hvilket kaldes normalisering. For visse målinger kan der også henføres til andre parametre – såsom luftfugtighed eller indholdet af en bestemt gasart.

Densiteten er således en central parameter i forbindelse med flowmåling på gas og gennemgås ligeledes i afsnit 2.

Det er nemt at regne på densiteten af en gas, hvis det er en idealgas. Omregning til den reelle densitet sker via *kompressibilitetsfaktoren*,  $z$ , som ikke må forveksles med *kompressibiliteten*. Sidstnævnte udtrykker hvor meget et medie ændrer volumen i forhold til en ændring i trykket. Afsnit 2 omhandler således også fastlæggelse af kompressibilitets-faktoren.

For at forstå dette undervisningsmodul er det nødvendigt med kendskab til undervisningselementet UE F1 INTRODUKTION TIL FLOWMÅLING, da afsnittene specielt omkring flowprofiler og måleprincipper kun beskriver de specielle forhold for gas.

#### Boks 1: hvis du vil vide mere ...

Dette undervisningselement udgør kun en af mange elementer, som er relevant i forbindelse med måling på gasflow. Nedenstående er et udpluk af undervisningselementer, som også kan være af interesse i forbindelse med dette undervisningselement.

UE A1 Introduktion til målinger

UE A3 Usikkerhedsbudgetter

UE A4 Metrologi.dk GUM regneark

UE A5 Måleusikkerhed og overholdelse af tolerancer

UE A6 Signalkæder og aflæsning af måledata

UE P1 Trykmåling

UE F1 Introduktion til flowmåling. *Grundlæggende dokument, som forventes læst i dette UE.*

UE F2 Flowmåling væske. Flowmåling med fokus på væske.

UE H1 Introduktion til måling af luftfugtighed.

UE T1 Temperaturmåling

## 2 Generelle måletekniske forhold for gas

UE F1 har beskrevet hvad gas er. Men ud over forståelse for hvad gas er, så vil der for tryksat gas være behov for at kunne lave en korrekt fastlæggelse af densiteten, da denne ikke følger samme simple proportionalitet som en idealgas. Derudover vil der for gasser – det vil sige luft – også kunne opstå fejl som en følge af at luft kan indeholde vand eller som en følge af at lufthastighederne er høje sammenlignet med lydhastigheden.

Disse forhold gør at det er væsentligt at holde fokus på enheder samt ved rapportering af data at sikre normalisering til en fælles referencetilstand.

Ikke mindst er sikkerhed en væsentligt parameter.

### 2.1 Sikkerhed under måling

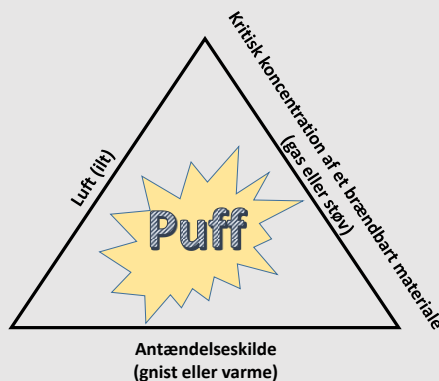
Gas er farlig men er dødeligt at undvære. Lidt groft skrevet er betingelsen for at man som person kan overleve måling er at den gas som indåndes har en sammensætning indenfor rimelig snævre grænser. Overskrides tolerancerne for sammensætningen så udsættes man for en sundhedsrisiko.

Noget så vigtigt som ilt er farligt i de forkerte mængder. For yderligere information kan laves informationssøgning på ordet "iltforgiftning".

Ilt er også det mest brandfarlige medie, som kan håndteres. Ilt er en af de tre betingelser (brandnærende, antændelseskilde og brandbart materiale), som skal være opfyldt for at etablere end forbrænding eller den hurtig forbrænding kaldes eksplosion.

#### Boks 2: ATEX zone

ATEX er en forkortelse af det franske *Atmosphere explosible*. ATEX zoner er områder, hvor der er risiko for eksplosioner som følge af at der kan forekomme en atmosfære bestående af ilt (luft) som er *brandnærende*, *brandbart materiale* (kan oxideres) såsom letantændelige væsker, væsketåger, gasser eller støv. ATEX reglerne beskriver således hvorledes det sikres at det tredje element krævet til at lave en eksplosion – en *antændelseskilde* – ikke vil eksistere samtidigt.



ATEX områderne opdeles i zone 0 (ofte eller altid tilstede), zone 1 (lejlighedsvis tilstede under normal drift) og zone 2 (sandsynligvis ikke tilstede eller kun meget kortvarigt under normal drift).

Ud over olie/gas industri, så findes der også eksplosive områder i forbindelse med korn- og foderstof, tekstilindustrien, sprøjte- og pulverblanding samt industribagerier. En garage med knallerter og/eller biler kan også være zone 2. Direktiv 2014/34/EU (ATEX Direktivet) beskriver hvilke krav og steder, som er omfattet af ATEX områder. Bemærk at ATEX også omfatter mekaniske konstruktioner, hvor der ikke må kunne genereres statisk elektricitet eller være varme overflader, som begge er *antændelseskilder*.

Måling på gas i rør foregår ofte under højt tryk. En læske vil medføre at gassen strømmer ud samtidigt med at den udvides.

Arbejde med flowmåling under tryk kan således være omfattet af PED reglerne (Bekendtgørelse nr. 190 af 19. februar 2015 om indretning m.v. af trykbærende udstyr). Installation af en flowmåler kan dermed være omfattet af krav om trykmåling eller andre sikkerhedsmæssige forhold.

## 2.2 Densiteten af gas

Med få undtagelser er densiteten den vigtigste mediebeskrivende parameter i forbindelse med flowmåling på gas. Både i forbindelse med omregning af for eksempel differenstræk til flow eller ved normalisering af et volumen.

### 2.2.1 Idealgasser

Idealgasser er kendetegnet ved at afstanden imellem molekylerne er tilstrækkeligt stort for at disse kan bevæge sig frit. Dette betyder at densiteten kan beskrives ud fra Avogadro's ligning (idealgasligningen).

Ligning 1:

$$P V = n R_U T$$

hvor P er totaltrykket [Pa], V er volumen [ $\text{m}^3$ ], n er antallet af mol gas,  $R_U$  er den universelle gaskonstant [ $8,345 \text{ J}/(\text{mol K})$ ] og T er den absolutte temperatur [K].

Ligning 1 foreskriver således at med en indesluttet (ideal)gas, så er produktet af V og P konstant.

Da n også er et udtryk for masse, så udtrykker ligning 1 også at mængden af en gas i en beholder (gasflaske) er proportionalt med trykket. Halveres trykket i en gasflaske, så er der ca. kun halvdelen af gasmængden tilbage, så længe temperaturen er konstant.

Molvægten,  $M_w$ , kan findes ved tabelopslag, hvorefter densiteten kan fastlægges som

Ligning 2:

$$\rho = \frac{n M_w}{V}$$

eller

Ligning 3:

$$\rho = \frac{P M_w}{R_U T}$$

Tør luft har en molvægt på  $28,96 \text{ g/mol}$ . Ved  $20^\circ \text{C}$  ( $293,15 \text{ K}$ ) og  $1 \text{ atm}$  ( $101325 \text{ Pa}$ ) kan densiteten således beregnes som

Ligning 4:

$$\rho = \frac{101325 \text{ Pa} \cdot 28,9646 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \cdot 293,15 \text{ K}} = 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabelopslag giver  $1,205 \text{ kg/m}^3$  hvorimod anvendelse af en molmasse på  $29 \text{ g/mol}$  giver  $1,206 \text{ kg/m}^3$ . Ikke en stor forskel men alligevel  $0,1\%$  variation.

Er der ønske om en meget nøjagtig flowmåling, så er det nødvendigt at anvende en høj detaljegråd på anvendte standard data.

Den *gas specifikke gaskonstant*,  $R$ , anvendes ofte. Denne beregnes som  $R = R_U/M_w$  og har enheden  $\text{J}/(\text{kg K})$ . For luft er  $R$  således  $8,3145 \text{ J}/(\text{mol K})/28,9644 \text{ g/mol} = 287,1 \text{ J}/(\text{kgK})$ .

Ligning 1 og 3 kan herefter omskrives til

Ligning 5:

$$P v = R T$$

og

$$\rho = \frac{P}{R T}$$

Det er således vigtigt at sikre sig at man anvender den korrekte gaskonstant, hvilket kan kontrolleres med enhedstjek. Husk her at  $[J] = [N][m]$  og tryk er i  $[Pa] = [N]/[m^2]$ .

For gasser sammensat af forskellige gastyper, luft er igen et eksempel, så beregnes densiteten ved at der fastlægges antallet af mol (eller mol andel) for hver gastype. I kombination med molvægten giver dette således densiteten for (tør) gas.

Tabel 4 Beregning af molvægt af en gasblanding (luft)

| Komponent       | Molvægt              | Andel      | Bidrag               |
|-----------------|----------------------|------------|----------------------|
| Nitrogen        | 28 g/mol             | 78 %       | 21,84 g/mol          |
| Ilt             | 32 g/mol             | 21 %       | 6,72 g/mol           |
| Argon           | 39,95 g/mol          | 0,93 %     | 0,372 g/mol          |
| Kuldioxid       | 44 g/mol             | 0,031 %    | 0,01364 g/mol        |
| "Alt det andet" | 36,82 g/mol          | 0,039 %    | 0,01436 g/mol        |
| <b>TOTAL</b>    | <b>28,9646 g/mol</b> | <b>n/a</b> | <b>28,9646 g/mol</b> |

Ligning 6:

$$\rho = \frac{n_1 M_{w1} + n_2 M_{w2} + \dots + n_i M_{wi}}{V}$$

hvor  $n_i$  er antallet af mol og  $M_{wi}$  molvægten for den  $i$ 'te gastype.

Såfremt der ikke kendes antallet af mol men kun vægtprocenten eller molprocenten af den enkelte gastype, så kan den samlede molvægt beregnes ud fra

Ligning 7:

$$M_{w, gas} = \frac{n_1 M_{w1} + n_2 M_{w2} + \dots + n_i M_{wi}}{n_1 + n_2 + \dots + n_i}$$

hvorefter ligningerne 1 til 4 kan bruges under antagelse af en homogen gasblanding og uden faseovergange.

Tabel 3 viser beregning af lufts molvægt ud fra anvendelse af ligning 6.

### 2.2.2 Kompressibilitetsfaktor, $z$

Når gasmolekylerne ikke har stor indbyrdes afstand men er mere presset sammen, så gælder idealgasligningen ikke længere. Der er tale om reelle gasser, hvorfor udtrykket realgasser anvendes. Udtrykket *kompressibilitet* dækker over den relative volumenændring ved en ændring på trykket. *Kompressibilitet* og *kompressibilitetsfaktor* er således ikke det samme. Sidstnævnte er en korrektionsfaktor.

Idealgasligningen skal udvides med hvad som kaldes kompressibilitetsfaktoren,  $z$ .

[6] angiver for luft at  $z$  ved 300 K og 1 bara er 0,9999, hvilket den er op til ca. 150 bara (indenfor 1 %). Ved 300 bara er  $z = 1,1089$ , hvorefter der bør tages højde for kompressibilitetsfaktoren.

Dermed bliver gasligningen (ligning 1) til

Ligning 8:

$$P V = z n R_U T$$

Indførsel af kompressibilitetsfaktoren som parameter gør at Ligning 8 kan anvendes til beskrivelse af hele P-v-T diagrammet for væske og gas faserne blot  $z$  vælges korrekt.

Densiteten for en realgas skal derfor beregnes som en omskrivning af ligning 3

Ligning 9:

$$\rho = \frac{P M_w}{R_U T z}$$

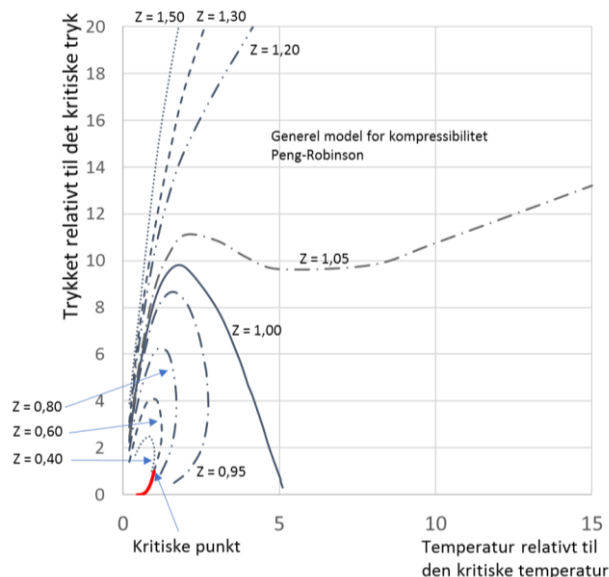
Der er i perioden 1930 og senere lavet en del forskningsarbejde i fastlæggelse af beregningsmetoder for  $z$ . Heraf er der fremkommet nogle internationale accepterede standarder primært indenfor olie- og gasindustrien. I forbindelse med kontrakter med køb/salg af gas vil der kunne findes referencer til beregning af kompressibiliteten som dermed betragtes som korrekte.

Van der Waals (Johannes Diderik van der Waals, 1837-1923) opstillede den første tilstandsligning, som tog højde for realgasser. Senere er der kommet tilføjelser og forbedringer samt helt andre beregningsmodeller.

Peng-Robinson tilstandsligningen er en udvidelse af Van der Waals tilstandsligning og er foreslået oprindeligt i 1976. Jævnfør [7] er der i de efterfølgende 40 år lavet mere end 200 justeringer af formlerne for at til-

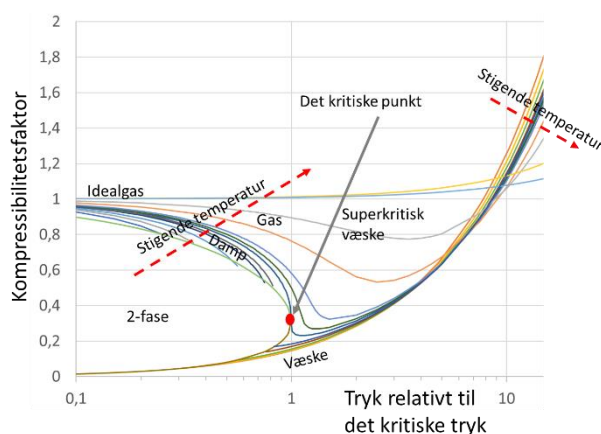
passe modellerne bedre til kendte gasarter. Alene antallet af varianter siger noget om at der ikke findes én model som kan håndtere alle gasarter.

Figur 2 viser eksempler på forskellige kurver for  $z$  i P-T planet beregnet med Peng-Robinson generelle model.



Figur 2 Kompressibilitetsfaktor  $z$  ved forskellige temperaturer og tryk. X markerer luft ved 1 atm og 20 °C.

Ved en  $z$  i intervallet 0,95 til 1,05 antages gasser at være idealgasser. Dette skal selvfølgelig medtages i den betragtning at en afvigelse på  $z$  tilsvarende medfører en afvigelse på densiteten jævnfør ligning 8.



Figur 3 Kompressibilitetsfaktor  $z$  ved forskellige temperaturer og tryk.

Figur 3 viser tilsvarende eksempler på forskellige værdier af  $z$  ved variation af trykket (isoterm kurver). På

Figur 3 ses tydeligt 2-faseområdet, hvor kompressibilitetsfaktoren passerer igennem. Beregningerne gælder dog ikke i dette område, hvorfor kurverne ikke tegnet.

### 2.2.3 Beregning af densitet af realgasser

Som beskrevet i afsnit 2.2.1 og 2.2.2 kan der ud fra et kendskab til sammensætningen af en gas fastlægges en beregnet densitet.

Fastlæggelsen af gassammensætning kan ske ved gaskromatografi, idet disse instrumenter i dag er forholdsvis billige og kompakte. Teknologien beskrives ikke i dette UE men der henvises til beskrivelser fra leverandører og internettet.

Udstyret skal kalibreres periodevis med kendte gassammensætninger, som ligger tæt på den gas, som der måles på. Kvaliteten af referencegassen og sammenlignelighed med gassen under måling er således betydende for hvor god en måling der opnås med gaskromatografen.

Referencegasserne bestilles med en ønsket sammensætning. Producenten af referencegasserne sammensætter derefter gassen via afvejning af de enkelte komponenter.

Omregning til densitet og kompressibilitet (og eventuel varmekapaciteten og andre parametre) sker via anerkendte teknikker – fx AGA-8, SGERG eller lignende. Dansk Gasteknisk Center har på deres hjemmeside et regneark, som kan regne på naturgas ud fra kompositionen.

DS/EN ISO 12213 angiver hvorledes  $z$  beregnes for naturgas. Standarden angiver at  $z$  ligger indenfor 0,1 % for de beskrevne teknikker.

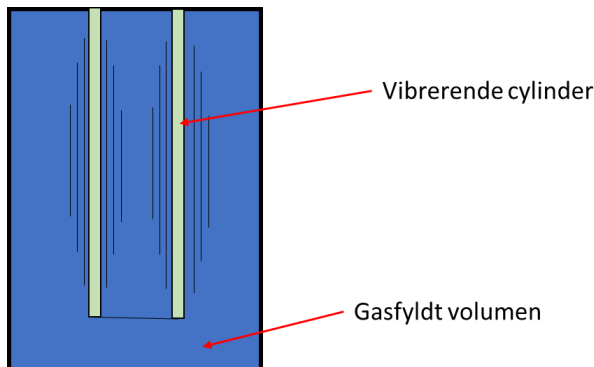
Nøjagtigheden af en beregnet densitet kan findes angivet fra 0,5 % op opefter.

### 2.2.4 Måling af densitet

Alternativet til beregning af densitet ud fra en kendt eller forventet sammensætning er en direkte måling af densiteten.

Der er flere teknikker. Her skal vi blot nævne de mest anvendte teknikker som baserer sig på resonans eller lyd hastighed.

Det vides fra statikken at egensvingningsfrekvensen for en bjælke med et påmonteret lod afhænger af massen af loddet. Jo mere masse, jo lavere frekvens.



Figur 4 Densitetsmåler til gas. Den inderste cylinder vibrerer og via måling af egenfrekvensen beregnes densiteten af gassen i indeslutningen.

Dette udnyttes i et gasdensitometer, som er opbygget som en ydre stiv cylinder og hvori der er en tyndvægget cylinder omgivet af gassen som densiteten ønskes målt på. Den tyndvæggede cylinder bringes i vibrationer som også betyder at den omgivende gas vibrerer. Den resulterende egenfrekvens er derfor et udtryk for gasdensiteten.

En Coriolis måler sælges ofte på at den kan både måle masseflow og densitet. Sidstnævnte gælder dog kun for tykke gasser – dvs. højt tryk og/eller høj molvægt. I datablade er angivet ned til  $0,0002 \text{ g/cm}^3$  (usikkerhed) svarende til  $0,2 \text{ kg/m}^3$ . Det har derfor ingen mening af måle densiteten med en Coriolis måler med mindre der er tale om høje tryk (densitet).

Anvendelse af lydhastigheden som indikation af densiteten anvendes af ultralydsmålere.

Sammenhængen imellem lydhastigheden,  $v$ , og densiteten for en gas er

Ligning 10:

$$v = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \frac{P}{\rho}}$$

eller

$$v = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \frac{R_u T z}{M_w}}$$

hvor  $C_p$  og  $C_v$  er de specifikke varmekapaciteter ved henholdsvis fastholdt volumen og fastholdt tryk.  $P$  er gassens tryk og  $\rho$  er densiteten af gassen.

Forholdet imellem  $C_p$  og  $C_v$  varierer svagt i forhold til densiteten. [7] viser at for realgasser varierer forholdet imellem 1,25 til 1,4 for molvægte imellem 28 g/mol (nitrogen) til 44 g/mol ( $\text{CO}_2$ ). For kulbrinter er samme variation ned til 1,05.

For idealgasser gælder det at forholdet er afhængigt af antallet af atomer.

Ligning 11 viser således at lydhastigheden kan betragtes som en funktion af molvægte ved kendt temperatur.

Ved tabelopslag, [8], kan findes at  $C_p = 1,0061 \text{ kJ/(kg K)}$  og  $C_v = 0,71767$  for luft ved 1 atm og  $20^\circ\text{C}$  svarende til et forhold på 1.402 som er tæt på 1.4, hvis luft betragtes som idealgas. Densiteten er tidligere beregnet til  $1,204 \text{ kg/m}^3$ .

Lydhastigheden kan således beregnes til

Ligning 11:

$$v = \sqrt{\frac{1,0061 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}{0,71767 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} \cdot \frac{101325 \text{ Pa}}{1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 343,5 \text{ m/s}$$

Dette udnyttes i ultralydsmålere, hvor afstanden imellem afsender og modtager af et lydsignal kendes og hvor den gennemsnitlige tidsforskel imellem lydbølger mod og med strømningsretningen kan anvendes til at bestemme densiteten via molvægten. Nogle producenters trasmittere angives til at have en usikkerhed på  $\pm 2\%$  på molvægten i intervallet 2 g/mol til 125 g/mol for hydrokarbon molekyler (fx naturgas). Metoden er derfor noget mere unøjagtigt end måling med vibrerende masser.

Herforuden skal nævnes at der findes andre teknikker indenfor specialiserede områder.

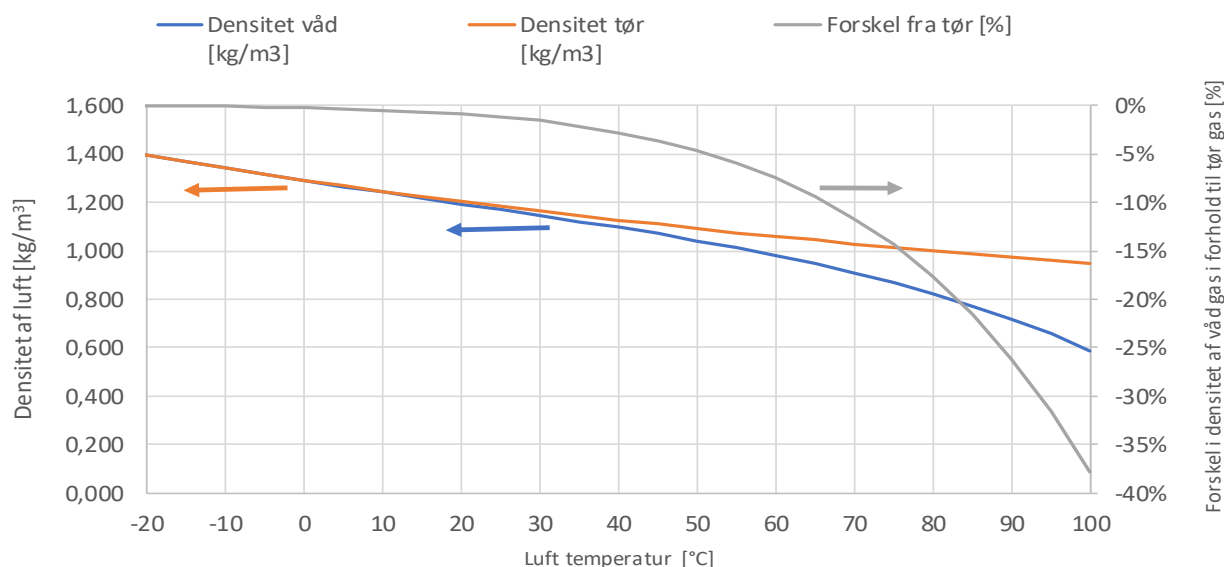
### 2.2.5 Fugtig luft

Når der anvendes atmosfærisk luft som medie, så kan idealgas normalt antages. Der er derfor ikke behov for at anvende avancerede måleinstrumenter til sammensætning eller densitet men kun adgang til opslagsværker om lufts densitet.

gas. Det ses at der ved fra stuetemperatur og opad vil være en forskel i densitet på mere end 1 %.

Der er mindst 3 måletekniske konsekvenser af fugtig luft.

Udfældning af vanddråber (væskedråber) kan have betydning for troværdigheden af måleteknikker, som



Figur 5 Densitet af 100 % fugtig og tør luft ved forskellige temperaturer.

Luftens fugtighed har derimod en betydning, når der tales om densitet.

Som det er de fleste kendt så kan luft indeholde en mængde vand. Jo højere temperatur, jo højere mængde vand kan være optaget i luften. Når temperaturen så falder, så vil mætningsgraden stige og hvis den når op på 100%, så vil vandet begynde at udfældes som dråber. Øges temperaturen, så vil vandet kunne fordampe og optages igen i luften.

Tilsvarende vil et øget tryk betyde at luftens evne til at indeholde vand reduceret.

Luft består primært af ilt og nitrogen. Disse har henholdsvis en molmasse på 28 g/mol og 32 g/mol. Vand har molmassen 18 g/mol. Når vand optages i luften, så optager vandet noget plads som ellers ville være besat af nitrogen og ilt (og de øvrige dele). Dette betyder at den fugtige luft vil være lettere end den tilsvarende tørre luft ved samme temperatur.

Figur 5 viser kurver for luft med 100% relativ fugtighed og tør luft. Dertil er vist en kurve som illustrerer den relative forskel imellem densiteten ved tør og våd

kræver rene gasser. Det kan være termiske eller ultralydbaserede teknikker.

Densitetsforskellen ved omgivelsesluft – for eksempel i ventilationssystemer – kan have en betydning for omregning af differenstryk (fx pito rør) til flowrate hvis der ønskes en høj præcision.

Miljømålinger i skorstene indeholder ofte et krav om måling af røggasflowraten. Der er her tale om høje temperaturer men lavt vandindhold hvilket er lig med lav relativ fugtighed. Standarder, for eksempel reference laboratoriets MEL-25, stiller krav om at densiteten medtager fugtighed, temperatur og tryk.

Alt efter hvor nøjagtigt en måling som ønskes, så kan de fra Figur 5 ses at fugtigheden af luft begynder at have betydning allerede fra 30 °C, hvor forskellen imellem tør og fugtig luft kan betyde en forskel på 1,6 %.

UE H1 *Introduktion til måling af luftfugtighed* omhandler fugtig luft, hvorfor der henvises til dette dokument for mere information.

### 2.2.6 Normalisering

Mulighed for at ændre densitet ved ændring af temperatur og/eller tryk samt ændring af densitet som følge af fugtig gas (behøver ikke være vand, som er opsuget) gør at man måleteknisk ikke kan tale om volumen uden at redegøre for hvilken tilstand, som volumenet er fastlagt ved.

Normalisering er derfor nødvendigt for at sikre at afsender og modtager af data forstår data på samme måde. Det er tidligere nævnt at der kan rapporteres volumener i Nm<sup>3</sup> og Sm<sup>3</sup>. Hvis der skal rapporteres mængder i form af masse, så skal der måske korrigeres for vandindholdet.

Det kan lyde lidt abstrakt men i bund og grund er det et udtryk for at måleværdien skal være accepteret både af den person, som frembringer værdien, og den person som modtager og anvender værdien.

Volumenflow i rør kan måles med et utal af teknikker. I dette eksempel antages at der anvendes enten ultralydsmåler eller vortex måler til fastlæggelse af volumen flow. Disse teknikker fastlægger en flowhastighed og omregner til volumenstrøm ved omregning med kendt rørtværsnit for røret.

Jævnfør gasligningen, ligning 3, er sammenhængen imellem tryk, densitet og temperatur.

Ligning 12:

$$\rho = \frac{P \cdot M_w}{R_U \cdot T \cdot z}$$

Det vælges at omregne til normalstanden (1.01325 bara og 273,15 K). Dette markeres med indeks "ref". Der tages i dette eksempel ikke hensyn til om der er tale om fugtig luft.

Tilsvarende anvendes et indeks "m" for de målte værdier. Da både gaskonstanten og molvægten ikke er ændret ved omregning til normal tryk og temperatur, så bliver densiteten ved henholdsvis den faktiske densitet og densiteten ved referencetilstanden.

Ligning 13:

$$\rho_m = \frac{P_m \cdot M_w}{R_U \cdot T_m \cdot z_m}$$

$$\rho_{ref} = \frac{P_{ref} \cdot M_w}{R_U \cdot T_{ref} \cdot z_{ref}}$$

$$\frac{\rho_{ref}}{\rho_m} = \frac{P_{ref} \cdot T_m \cdot z_m}{P_m \cdot T_{ref} \cdot z_{ref}}$$

Da der normalt ikke anvendes enhederne K og bara men derimod barg og °C, så skal trykket og temperaturen korrigeres for nulpunktet for den valgte enhed.

Massen må være den samme uanset referencetilstanden, så der må gælde at forholdet imellem volumener ved henholdsvis referencetilstand og målte tilstand er

Ligning 14:

$$masse = \rho_m \cdot V_m = \rho_{ref} \cdot V_{ref}$$

og dermed

$$V_{ref} = \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_{ref}} \text{ eller } \frac{V_{ref}}{V_m} = \frac{\rho_m}{\rho_{ref}}$$

Omregning af et volumenflow og når der tages højde for omregning imellem enheder kan derfor samlet skrives som

Ligning 15:

$$\frac{V_{ref}}{V_m} = \frac{(P_m + 1,01325 \text{ bara}) \cdot (273,15 \text{ K}) \cdot z_{ref}}{1,01325 \text{ bara} \cdot (T_m + 273,15 \text{ K}) \cdot z_m}$$

z<sub>ref</sub> er kompressibilitetsfaktoren ved referencetilstanden, hvorimod z<sub>m</sub> er kompressibilitetsfaktoren ved det målte tryk og temperatur.

Eksempel: vi måler på en CO<sub>2</sub> gas i et rør. Vi måler en volumenstrøm på 100 m<sup>3</sup>/timen ved et tryk på 20 barg og ved 25 °C. Via Peng-Robinson beregningsmetoden findes værdier for z som angivet i tabel 5 (nærmere beskrivelse af metoden er udeladt i dette UE).

Tabel 5 Data for eksempel for volumenkorrektion. Baseret på Peng-Robinson model og CO<sub>2</sub> som gasart.

|                    | Målt tilstand | Reference tilstand |
|--------------------|---------------|--------------------|
| Tryk               | 20 barg       | 0 barg             |
| Kritisk tryk       | 73,77 Bara    |                    |
| Relativt tryk      | 0,285         | 0,014              |
| Temperatur         | 25 °C         | 0 °C               |
| Kritisk temperatur | 30,97 °C      |                    |
| Relativ temperatur | 0,98          | 1,09               |
| z                  | 0,877         | 0,996              |
| Molvægt            | 44,01 g/mol   |                    |

Forholdet imellem faktisk volumenstrøm og volumenstrøm ved referencebetingelsen kan via ligning 15 fastlægges til

Ligning 16:

$$\frac{V_{ref}}{V_m} = \frac{21,01325 \cdot 273,15 \cdot 0,996}{1,01325 \cdot 298,15 \cdot 0,877} = 21,578$$

Volumenstrømmen er således  $21,578 \cdot 100 = 2.157,8$  Nm<sup>3</sup>/time. Massestrømmen vil være den samme.

Det er således vigtigt at huske om angivelse af en volumenstrøm er ved en referencebetingelse eller aktuelle forhold.

### 3 Flowmåling i rør

UE F1 INTRODUKTION TIL FLOWMÅLING beskriver i afsnit 3 om flowmåling i rør. I dette afsnit 3 beskrives udelukkende de forhold som er specielle for måling på gasser samt hvad der kan være årsagen til fejlmåling. Afsnittet forudsætter således at der er kendskab til UE F1.

Som nævnt tidligere i afsnit 1 vil gas kunne betragtes på lige fod som væske – det vil sige newtonsk, homogent og ikke-kompressibelt.

Udtrykket *ikke-kompressibelt* er her anvendt som et udtryk for at mediet (gassen) ikke ændrer densitet som følge af hastigheden. Gas er jo kompressibel i den sammenhæng at jo højere tryk jo højere densitet.

#### 3.1 Mach tallet

Mach tallet er et udtryk for hastigheden i forhold til lydhastigheden. Tommelfingerreglen er at så længe Mach tallet er under 0,3, så skal et medie betragtes som ikke-kompressibelt. I ligning 11 blev lydhastigheden beregnet til 343,5 m/s.  $0,3 \cdot 343,5$  m/s er 103,5 m/s eller ca. 371 km/t. Så længe den målte lufthastighed er under dette niveau, så kan man altså betragte gasser rent måleteknisk på samme måde som væske.

#### 3.2 Udfældning af væske

Der er i afsnit 2 beskrevet hvorledes en gas kan være tæt på en 2-fase tilstand eller være fugtig.

Hvis der ikke sker en udfældning af væskefasen enten ved at temperaturen kommer under dugpunktet eller

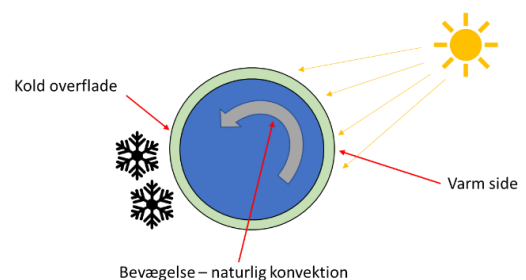
over kogepunktet, så kan gassen betragtes som et homogent medie. Hvis der udfældes væske, så vil målingen kunne påvirkes.

Udfældning af væske i rør kan også betyde at væsken ved horisontal rørføring udfældes i bunden af røret og derved optager noget af rørarealeet. Dette vil give et mindre tværsnit og dermed en for stor hastighed.

#### 3.3 Varmepåvirkning

Gas er til sammenligning med vand nemt at varme op og dermed også nemt at ændre densiteten lokalt.

Forestil dig et langt sort ikke-isoleret rør hvori der er lav hastighed (laminar) eller stillestående gas. Solens varmepåvirkning betyder at den ene side af gassen varmes op men køles ned i den anden side af røret. Konsekvensen er at der etableres et roterende gas-flow. Anvendes for eksempel ultralydsmålere til fastlæggelse af flowhastigheden så vil der være risiko for ikke at måle den korrekte flowrate som følge af den varmeinducerede bevægelse i røret. Figur 6 illustrere dette fænomen.



Figur 6 Varmeindstråling på rør med gas flow kan give afvigende flowprofiler (illustration).

#### 3.4 Lagdeling

Et andet fænomen ved lave flowhastigheder er lagdeling som følge af forskelligheder i densiteter. Densitetsforskelle kan udover temperaturforskelle også være forårsaget af at mediet består af flere typer gasser. Eksemplet kan være flaskegas, som vil lægge sig i bunden af et rum. Naturgas vil derimod lægge under loftet af et rum.

## 4 Flowmåling udenfor rør

Som beskrevet i UE F1 "Introduktion til flowmåling" afsnit 4 er den største risiko ved måling udenfor et rør at luftstrømme kan være påvirkede af læ, tunneleffekter eller have en anden retning end forventet. Herforuden vil luft ikke være en pæn luftstrøm men ofte pulserende. Det vil derfor være nemt at måle en aktuel hastighed men besværligt at omsætte denne til en volumenstrøm, hvis det er ønsket.

Måling på fristrømmende luft er påvirket af andre forhold såsom lufttemperatur, barometerstand og luftfugtighed. Med de rette instrumenter kan der også tages højde for disse forhold.

Flowmåling på gas udenfor rør (i praksis vel udelukkende atmosfærisk luft) er således væsentligt enklere end måling i rør.

## 5 Måleteknologier

UE F1 "Introduktion til flowmåling" beskriver i afsnit 5 måleprincipper ud fra en opdeling i de grundliggende fysiske måleparametre. I dette afsnit 5 beskrives udelukkende de forhold som er specielle for måling på gasser samt hvad der kan være årsagen til fejlmåling. Afsnittet forudsætter således at der er kendskab til UE F1.

### 5.1 Trykforskelle

Flowmåling baseret på trykforskel tager udgangspunkt i Bernoullis energiligning, som skrives for et tabsfrit system

Ligning 17:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

$p$  er det statiske (målbare) tryk,  $\rho$  er gassens densitet,  $v$  er gassens hastighed,  $g$  er tyngdekraften og  $h$  er den hydrostatisk højde.

Hvad der oftest glemmes er at ligning 17 er baseret på ikke-kompressibelt homogent Newtonsk medie. Der gælder derfor at man skal være opmærksom på det aktuelle Mach tal.

#### 5.1.1 Kværk dimension

Et andet fænomen som også er vigtigt er at en kværk i et rør ikke kan gøres uendelig lille.

Uden at komme ind på detaljerne i termodynamikken, så vil det ved et trykforhold større end 2 over en indsnævring – det vil sige dobbelt så stort tryk på opstrøms siden som nedstrøms siden – ikke være trykket som bestemmer mængden af igennem hullet. Det vil være længde og diameter af hullet/røret. Dette udnyttes ved kapillarrør i køleanlæg, hvor der er et meget lang og tyndt rør ind til fordampere.

Omvendt vil et trykforhold mindre end 2 betyde at det er trykforskellen, som bestemmer flowraten. Dette svarer til Kv værdi for ventiler.

Måleteknisk er der således en begrænsning i hvor lille en kværk, som kan anvendes til måling. Måleblænder og venturi bør ikke laves med et diameterforhold på mindre end 0,25. Tilsvarende skal der være en diameterreduktion for at der er en signifikant differensstryk tilgængeligt for måling.

Der henvises til standarderne for måleblænder, venturier og pitot rør for nærmere detaljer.

#### 5.1.2 Udfældning af væske

Anvendes impulsrør til transmission af trykmålinger til differensstrykstransmitteren kan disse ofte være uisolerede og dermed risiko for udkondensering af gasser. Er impulsrørene udformet således at der kan etableres vandlås, så vil der kunne opnås en målefejl på differensstrykket (10 cm vandsøjle ca. lig 1 mbar) og derigennem være en forkert angivelse af flowraten.

### 5.2 Lukket volumen

Afmåling af gas via lukkede volumener giver også risiko for udfældning af væske og derigennem – i tilfælde af manglende udløb for væske – vil ophobe væske og derigennem give en fejlmåling.

### 5.3 Skovlhjul

Måleprincipper baseret på skovlhjul – specielt udenfor lukkede rør – kan være følsomme overfor om skovlhjulets akse er parallelt med gassens strømningsretning. Det samme som gælder for pitotrør.

Nogle anemometre er udstyret med en fane således at den orienteres direkte imod gasstrømmen.

På grund af at gas har lavere densitet end vand så kan turbinemålere være svære at følge med hastighedsændringer i gassen som følgen af inertimomentet af skovlhjulet.

## 5.4 Lydbølger

Lydbølgers bevægelse igennem en gas afhænger af lydhastigheden men anvendeligheden afhænger også af dæmpningen. Dæmpning skyldes energitab (lyd = energi) og kan groft skrevet sammenlignes med tryktab i rør. En tung gas vil dæmpe lyden mere end en let gas. Dette betyder at der på måling af en tung gas skal anvendes et kraftigere signal for kunne foretage målingen.

[9] beskriver test med en ultralydsmåler, hvor der er testet med forskellige niveauer af CO<sub>2</sub> koncentrationer.

Udkondensering af væske vil også kunne give problemer da væsken vil forstyrre signalet – enten ved at reflektere signaler eller virke som bypass for lyden (lydhastighed i væske er hurtigere end i gas).

Anvendelse af clamp-on målere på gasrør har derudover den udfordring at lydvejen igennem rørvæggen og igennem mediet er svagt i forhold til lydvejen igennem rørvæggen alene. Dette vil betyde at lydsignalet igennem mediet bliver svagt i forhold til støjkloderne. Måling med clamp-on målere på gas i rør kræver således at der er et minimum tryk som er højere end atmosfæretrykket (se producenterens egne angivelser for specifikke tal).

## 5.5 Varmetransport

Som tidligere nævnt er luft nemt at varme op. Dette udnyttes i termiske flowmålere uanset om det er en rørmåling eller lokal måling med varmetråd (hot wire).

Ulempen ved teknikken er at densiteten af luften ændres ved opvarmning og dermed kan medføre en falsk luftstrøm pga. densitetsforskelle. Risikoen for dette fænomen er størst ved måling i åbne områder og mindst ved måling i et horisontalt rør. I et lodret rør

vil opvarmningen af luften virke som en luftpumpe på grund af opdriften skabt via densitetsforskelle.

## 5.6 Tracing

Tracing til måling af gasstrømme kan kun anvendes til vurdering af om en flowrate er rimeligt – ikke til måling direkte. Tracing består af kortvarig injektion af fremmede gasser hvorefter dennes tilstedeværelse detekteres nedstrøms. Der vil ske en opblanding men den injicerede gas vil fortsat være i gasstrømmen.

## 5.7 Coriolis

Anvendelse af Coriolis målere til måling af gasstrømme i rør er relativt enkelt. Der er tre kommentarer til brugen af Coriolis målere:

Gassen skal være under tryk for at densiteten er stor nok til at vibrationerne er detekterbare indenfor de tolerancer, som forventes.

Eventuelle væskepartikler skal kunne løbe ud af målerørene – det vil sige at buen skal vende opad.

Densitetsmåling på gasser med Coriolis målere er meget usikker. Hvis der ønskes en volumenstrøm, så skal man via eksterne tryk og temperaturtransmittere beregne en densitet (muligvis referencetilstand), hvorefter der kan beregnes en volumenstrøm på basis af den målte massestrøm.

## 5.8 Vortex målere

Vortex målere anvendes til gasmåling og ikke mindst dampmåling. Dette skyldes at hvirvelafsløsningsfænomenet er hastighedsbestemt og ikke væsentligt påvirket af eventuelle dråber. Herudover kan vortex måleren laves uden bevægelige dele og dermed brugbar i positioner, hvor der ikke ønskes nogen risiko for udslip af de målte gasser.

Den negative side af vortex målere er at hvirvelafsløsningsfænomenet kun optræder indenfor et relativt snævert hastighedsinterval. Stort dynamikområde er derfor ikke en mulighed.

## 6 Kalibrering af gasmålere

Uanset den anvendte måleteknologi skal der foretages en fastlæggelse af målerens nøjagtighed. Dette kan foretages via prøvning eller kalibrering – enten i

et laboratorie eller nogle gange direkte på brugsstedet. Prøvning er et udtryk for at målerens nøjagtighed holdes op imod valgte tolerancer eller specifikationer. Kalibrering er et udtryk for at der fastlægges nogle faktorer, som skal ganges på output fra måleren for at de rigtige flowmængder vises.

Sporbarheden til en fælles accepteret standard er derfor vigtigt ligesom referencen for kalibreringen må have en noget bedre målenøjagtighed end den måler, som skal prøves eller kalibreres.

Kalibrering af gasmålere er sammenlignet med vand mere besværligt da gas kan komprimeres.

## 6.1 Kalibrering i laboratorie

Kalibrering i et laboratorie har den fordel at den foretages under kontrollerede forhold. Ulempen er at måleren tages ud af den installation, hvor den normalt anvendes, hvorfor kalibreringsresultatet etableret i et laboratorie udelukkende er et udtryk for hvor godt den måler under laboratorieforhold på den specifikke dag. Da der ikke findes bedre opstilling, så betragtes dette som accepteret også i forbindelse med uoverensstemmelser i forbindelse med afregning mellem to parter grundet at parterne ikke begge kan acceptere en målers resultat.



Figur 7 Anlæg til højtrykskalibrering af målere med naturgas imod reference (FORCE Technology, Vejen), rør diameteren på højtryksanlægget er 24 tommer,

Figur 7 viser et anlæg som kan kalibrere gasmålere imod referencer. Her anvendes turbinemålere som reference. Turbinemåleren kontrolleres ligeledes op imod en endnu bedre måler.

Anlægget sammenholder således volumenstrømme og kan ved hjælp af kendskab til temperatur, tryk og gassammensætningen ligeledes anvendes til at fastlægge massestrømme eller normaliserede gasmængder. I dette tilfælde er der monteret en gaskromatograf, som anvendes til løbende at fastlægge sammensætningen af gassen.

Endnu højere nøjagtighed kan opnås ved at teste direkte op imod en piston prover, se figur 8.



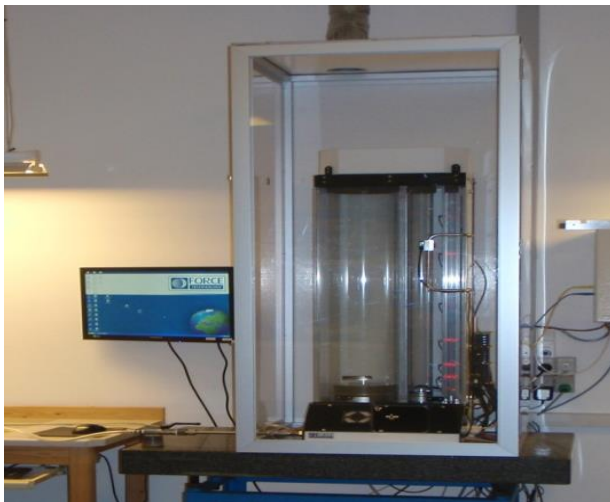
Figur 8 Piston prover til højtryksgas (FORCE Technology, Vejen)

Denne er i bund opbygget som en cykelpumpe men med kontrollerede dimensioner. Ved flytning af stemplet kendes derfor den flyttede volumen hvilket dermed kan sammenlignes med den kontrollerede målers visning.

Kalibrering af målere til luft kan foretages på samme måde. Her er det en fordel at i modsætning til naturgas er luften ikke farlig. Der skal dog fortsat kendes kompositionen inklusive luftfugtigheden for at få den rigtig densitet.

Figur 9 viser et anlæg til kalibrering af flowmålere med lavtryksluft som ligeledes er en piston prover.

Direkte kontrol af masseflow foretages normalt ikke, da densiteten af luften – selv under moderat tryk – ikke er væsentlig forskelligt fra den omgivende luft.



*Figur 9 Kalibreringsanlæg til luft (FORCE Technology).*

Der findes også en variant som hedder en Bell-prover. Dette er oversat til dansk en osteklokke neddyppet i vand og hvor væskestanden inden i klokken afhænger af mængden af gas.

Dertil kommer et yderligere antal teknikker – alle baseret på at opsamle en mængde gas og fastlægge mængden enten volumetrisk eller ved vejning.

## 6.2 Kalibrering på stedet (tracing)

Kalibrering af en måler på stedet er besværligt, da man ikke bare åbner for en hane og tager noget gas ud i en spand. Man kan udtage gas til ballon/bell-prover men det kræver at gassen kan sendes ind i processen igen eller at den kan slippes ud til atmosfæren efter endt måling.

Der anvendes derfor i denne sammenhæng teknikker såsom clamp-on måling, tracing, pitotrør eller anemometer. Disse teknikker har en relativ stor usikkerhed, hvorfor kalibreringen er med stor usikkerhed. Normalt udtages målere derfor og indsendes til kontrol i et laboratorium, hvis der er behov for en kalibrering.

## Boks 1: Legal metrologi og MID

For at sikre den nødvendige tillid til måleresultater hos forbrugerne, værende private eller virksomheder, er der opstillet krav til kontrol og verifikation af måleudstyr. I Danmark er disse krav fastsat og administreret af Sikkerhedsstyrelsen.

Det drejer sig som målinger der benyttes til forbrugsafregning mellem en leverandør og en kunde, samt målinger der danner baggrund for skatter og afgifter.

I EU er der et samlet direktiv kaldet Måleinstrument Direktivet eller MID (eng. Measuring Instruments Directive), som danner baggrund for standardisering af måleinstrumenter i EU. Dette medfører også at hvis et instrument er godkendt i et EU-land, kan det benyttes i alle EU lande.

Det er organisationen WELMEC der står for at harmoniserer standarderne i EU.

## 6.3 Fortolkning af certifikater

Et kalibreringscertifikat skal forstås korrekt. Kalibreringscertifikatet vil ikke sige noget om en tolerance overholdes. Kalibreringscertifikatet angiver udelukkende måleafvigelsen på hvert af de ønskede kontrolpunkter og tilhørende usikkerhed. Sidstnævnte usikkerhed er en blanding af laboratoriets egen måleusikkerhed samt usikkerheden på afvigelsen i kontrolpunktet. Jo flere gentagelser jo bedre bestemmelse af målepunktets afvigelse. Der henvises til UE A1 og A3 for mere information om måleusikkerhed og gentagelser.

Figur 10 viser et kalibreringscertifikat fra FORCE Technologies testanlæg for gasmålere, hvor der har været testet en flowmåler.

Logoet fra DANAK viser at kalibreringen er foretaget på et akkrediteret laboratorium og er underlagt strenge krav til kvalitetskontrol.

 CAL Reg. No. 9

**Calibration Certificate**

Certificate date: 27-07-2018 Task no.: 118-ERJE  
Certificate no.: 9.8-ERJE  
Page: 1 of 3  
Enclosure: 1 (original data)

**CUSTOMER EQUIPMENT DATA:**  
Meter type: Ultrasonic meter USM  
Size: 16INCH/ANSI900/DN400  
Model: Gas meter  
No. / Year: ERJE-1 / 2018  
TAG. no.: FT-ERJE-001  
Manufacturer: Gas meter manufacturing

**CUSTOMER:** Gas meter manufacturing A/S PO: PO-ERJE-18-0001  
Lille Snorevej 312  
0000 Udenbys  
Denmark  
att: Erik Jensen

**TEST CONDITIONS:**  
Test method/medium: Volume flow with natural gas at a static pressure of 50 bar g.

**SCOPE OF TEST:** 7 point calibration with 3 runs. Adjustment.  
2 verification points with 3 runs.

**FOUNDATION:** FORCE No. 60.10.4.02 Calibration with 24 INCH HPCL no. C03-002

**REMARKS:** Technical evaluation: No Remarks.  
The meter has been hardware protected and sealed after adjustment.

**Date of calibration:** 08-08-2018

**Results:** Final results are given on page 2.  
Detailed results are given in enclosure 1.  
Gas mixture are given on page 3.

**TRACEABILITY:** The laboratory is traceable to the harmonized European cubic meter for natural gas; EuRega.  
Used working standards, and calibration setup are given on page 3.

Version 2.1.4

Someone TASK responsible Another Signatory



FORCE Technology, Navervej 1, 6000 Vejen, phone: +4576961600, Danish, Designated Institute (DI) for gas measurement.  
The CIPM MRA agreement is valid for a best uncertainty of 0,15%.

The "General Conditions" on the reverse/last page are an integrated part of our services. Extracts from the certificate may only be reproduced with a written permission from FORCE Technology. The test results only include the tested objects.

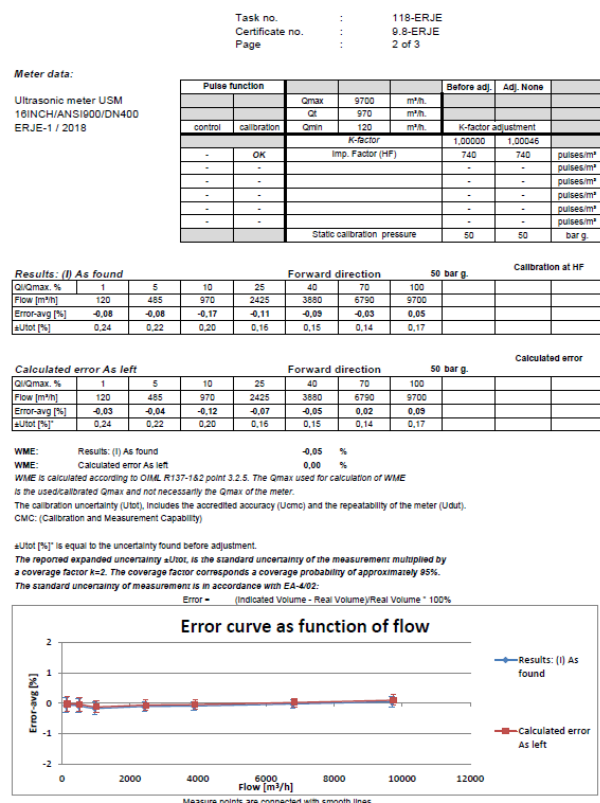
ilac-MRA mærket angiver at akkrediteringen fra DANAK er internationalt anerkendt, hvilket omfatter at man er enige om hvad en Nm<sup>3</sup> gas fylder.

Figur 10 (til højre) viser information om måleren der har været til kalibrering, samt det kalibrerede udgangssignal og kalibreringspunkter.

Ydermere er der information om kunden samt det personale der har udført opgaven.

Figur 11 viser information omkring laboratoriet bl.a. under hvilke forhold kalibreringen har fundet sted, laboratoriets sporbarhed og hvilket udstyr der har været brugt til kalibreringen og hvilke procedurer der har været fulgt.

Resultaterne vil altid indeholde flowpunkt, antal gentagelser, standardafvigelse (hvis der er foretaget mere end en gentagelse), fejlen samt usikkerheden. I nogle tilfælde, hvis det er ønsket fra kundens side kan



Figur 10 Eksempel på de første 2 ud af 4 sider af et kalibreringscertifikat – til venstre en forside og til højre et resultat. Figur 12 viser side 3 og 4.

Forsiden angiver kunde og sporbarhed til den fysiske måler. Herudover angives formålet med testen. Resultaterne indeholder i dette tilfælde både en As Found og As Left data, da der er foretaget en justering af måleren efter de første målinger. Fejlkurven er kun for at give en grafisk illustration af data.

Task no. : 118-ERJE  
Certificate no. : 9.8-ERJE  
Page : 3 of 3

#### Laboratory control equipment:

Facilities: FORCE no. C03-002

Working standards: Turbine meters

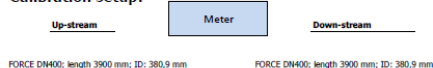
Traceability: The European Harmonized cubic meter: - EuReGa

| Used working standards during the calibration: |                 |           |           |           |           |           |           |
|------------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Flow                                           | Flow range      | WS1       | WS2       | WS3       | WS4       | WS5       | WS6       |
| Flow                                           | Flow range      | WS1       | WS2       | WS3       | WS4       | WS5       | WS6       |
| WS1                                            | Certificate no. | 9.8-17256 | 9.8-17257 | 9.8-17258 | 9.8-17259 | 9.8-17260 | 9.8-17261 |
| WS2                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS3                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS4                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS5                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS6                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS7                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS8                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS9                                            |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS10                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS11                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS12                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS13                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS14                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS15                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS16                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS17                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS18                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS19                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS20                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS21                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS22                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS23                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS24                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS25                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS26                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS27                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS28                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS29                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS30                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS31                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS32                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS33                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS34                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS35                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS36                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS37                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS38                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS39                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS40                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS41                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS42                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS43                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS44                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS45                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS46                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS47                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS48                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS49                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS50                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS51                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS52                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS53                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS54                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS55                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS56                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS57                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS58                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS59                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS60                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS61                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS62                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS63                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS64                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS65                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS66                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS67                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS68                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS69                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS70                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS71                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS72                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS73                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS74                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS75                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS76                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS77                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS78                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS79                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS80                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS81                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS82                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS83                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS84                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS85                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS86                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS87                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS88                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS89                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS90                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS91                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS92                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS93                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS94                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS95                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS96                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS97                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS98                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS99                                           |                 |           |           |           |           |           |           |
| WS100                                          |                 |           |           |           |           |           |           |

#### Gas mixture during the calibration:

| Analysis by: FORCE Technology |                |      |         |
|-------------------------------|----------------|------|---------|
| Description                   | Name           | Unit | Results |
| CH4                           | Methane        | mol% | 0.68    |
| C2H6                          | Ethane         | mol% | 0.91    |
| C3H8                          | Propane        | mol% | 0.00    |
| n-C4H10                       | n-Butane       | mol% | 0.132   |
| i-C4H10                       | i-Butane       | mol% | 0.730   |
| n-C5H12                       | n-Pentane      | mol% | 0.056   |
| i-C5H12                       | i-Pentane      | mol% | 0.209   |
| n-C6H14                       | n-Hexane       | mol% | 0.039   |
| CO2                           | Carbon dioxide | mol% | 95.45   |
| N2                            | Nitrogen       | mol% | 2.00    |
|                               |                | mol% | 100.2   |

#### Calibration setup:



Temperature measurement: 2°D down-stream meter  
Pressure measurement: Pt, Point

Conditioning: At least 5 min. at Qmax.

Task No. : 118-ERJE  
Certificate no. : 9.8-ERJE  
Enclosure : 1 of 1

| Flow nominal                                   | Flow actual | Temp. avg. | RE Number | E1 %  | E2 %  | E3 %  | E4 % | E5 % | E6 % | E7 % | E8 % | E9 % | E10 % | Error avg. | Repeatability | Calibration |
|------------------------------------------------|-------------|------------|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------------|---------------|-------------|
| mmh                                            | mmh         | °C         |           |       |       |       |      |      |      |      |      |      |       | %          | ±Utot         | ±Ucmc       |
| Calibration results.                           |             |            |           |       |       |       |      |      |      |      |      |      |       |            |               |             |
| As found      Forward direction      50 bar g. |             |            |           |       |       |       |      |      |      |      |      |      |       |            |               |             |
| 120                                            | 120         | 22.3       | 3,51E+06  | -0,01 | -0,14 | -0,08 |      |      |      |      |      |      |       | -0,08      | 0,09          | 0,17        |
| 485                                            | 485         | 22,2       | 1,43E+06  | -0,11 | -0,12 | -0,02 |      |      |      |      |      |      |       | -0,08      | 0,07          | 0,22        |
| 970                                            | 979         | 22,2       | 2,89E+06  | -0,00 | -0,12 | -0,19 |      |      |      |      |      |      |       | -0,17      | 0,06          | 0,20        |
| 2425                                           | 2427        | 22,2       | 7,14E+06  | -0,12 | -0,12 | -0,10 |      |      |      |      |      |      |       | -0,11      | 0,02          | 0,16        |
| 3880                                           | 3866        | 22,1       | 1,14E+07  | -0,11 | -0,07 | -0,10 |      |      |      |      |      |      |       | -0,09      | 0,02          | 0,14        |
| 6790                                           | 6769        | 22,1       | 1,99E+07  | -0,04 | -0,03 | -0,02 |      |      |      |      |      |      |       | -0,03      | 0,01          | 0,14        |
| 9700                                           | 9708        | 21,9       | 2,84E+07  | 0,09  | 0,05  | 0,01  |      |      |      |      |      |      |       | 0,05       | 0,05          | 0,14        |

| Calibration results.                                      |      |      |          |       |       |       |  |  |  |  |  |  |  |       |      |      |
|-----------------------------------------------------------|------|------|----------|-------|-------|-------|--|--|--|--|--|--|--|-------|------|------|
| Verification points      Forward direction      50 bar g. |      |      |          |       |       |       |  |  |  |  |  |  |  |       |      |      |
| 2425                                                      | 2417 | 22,1 | 7,11E+06 | 0,01  | 0,04  | 0,00  |  |  |  |  |  |  |  | 0,02  | 0,03 | 0,16 |
| 6790                                                      | 6790 | 22,0 | 1,99E+07 | -0,08 | -0,02 | -0,10 |  |  |  |  |  |  |  | -0,07 | 0,05 | 0,14 |

Repeatability (±Udut) and calibration uncertainty (±Utot)  
The reported repeatability is calculated in accordance with "GUM" guidelines for UNC Uncertainty and Calibration Report Uncertainty" by using 95% confidence level t-value for n-1 (number of runs - 1) degrees of freedom, divided by 2 and assuming k<sub>cal</sub>=2:

$$u_{\text{dur}} = \left( \frac{r_{95} \cdot r_{\text{repeatability}}}{2 \cdot \sqrt{n}} \right) \quad U_{\text{tot}} = 2 \cdot \sqrt{\left( \frac{U_{\text{dur}}}{2} \right)^2 + u_{\text{dur}}^2}$$

Figur 11: Eksempel på de første 3 og 4 af et kalibreringscertifikat – til venstre en side med måleudstyr og gassammensætning. Til højre de underliggende resultater. Figur 11 viser side 1 og 2.

Side 3 viser sporbarheden af målingen for laboratoriet. Sporbarheden for målingen omfatter både angivelse af referencemålerne, gaskompositionen og installationsforhold.

Side 4 viser øverst resultatet fra de enkelte gentagelser samt beskriver nederst hvorledes måleusikkerheden er beregnet. Angivelsen u(CMC) er den måleusikkerhed, som DANAK har godkendt som værende retvisende for anlægget og dermed grundlag for akkrediteringen.

værdier som MPE, K-faktor, Hz, mA eller andet også fremgå af certifikatet. Man kan altid kontakte udstederen af certifikatet hvis man har spørgsmål til information på certifikatet.

## 7 Usikkerhedsbudgettet

Som også beskrevet i UE A6 om signalkæder, så er usikkerheden for en måling ikke lig med et datablads opgivelser af usikkerheder. Der indgår elementer fra hele signalkæden. I dette afsnit vil der blive gennemgået 2 eksempler – en vortex måler med opkobling via et mA signal til et dataopsamlingssystem samt en pitotrørs måling kombineret med håndholdt differenstryksmåler.

For begge gælder at der anvendes regnearket fra UE A4.

## 7.1 Gasvolumenmåling med vortex måler

Det første eksempel omfatter en konstruktion, hvor en vortex måler anvendes til at måle på mængden af methangas ved nominelt 20 barg og 25°C i form af et antal Nm<sup>3</sup>/time. Omsætning fra m<sup>3</sup>/time til Nm<sup>3</sup>/time sker via en flowcomputer, som også modtager signalet fra temperatur og tryk transmitterne.

Da der er tale om en brændbar gas, så skal loopet igennem en sikkerhedsbarriere, som i dette eksempel er af den type, som spejler signalet.

Formålet med usikkerhedsbudgettet er foruden at fastlægge den samlede måleusikkerhed at identificere de væsentligste kilder til usikkerheden. For forenklingens skyld er der kun taget højde for de mest

betydende bidrag, hvorfor der ses bort fra kalibreringsinterval, drift og påvirkning fra omgivelserne.

### 7.1.1 Systembeskrivelse

Vortex måleren er en ABB VortexMaster FSV430. Der anvendes en 4 - 20 mA udgang med en opsætning således at det nominelle driftspunkt er 40 % af den totale range (svarende til 10,4 mA). Nominelt flow er 100 m<sup>3</sup>/h. Udgang er sat til 0-250 m<sup>3</sup>/h.

Trykket måles med en Yokogawa EJX430A-DA med 4-20 mA output og med range sat til 0 – 50 barg.

Temperaturen måles med en PR 7501B transmitter. Output er 4- 20 mA output og med range sat til -20 – 50 °C.

Sikkerhedsbarrieren PEPPERL+FLUCHS KFD0-CS-Ex1.50P anvendes til at spejle strømmen og forsyne transmitterne med strøm.

Flowcomputer er af typen FloBoss 600+ som har 24 bit A/D indgange og mulighed for at måle på strømmen direkte.

### 7.1.2 Komponentusikkerhed

Komponentusikkerheden består af et utal af bidrag. Men for at gøre det nemmere at overskue er her kun medtaget de vigtigste bidragsydere.

#### Vortex måler:

Vortex måleren er angivet til at have en måleusikkerhed på 0,9 % af aktuelt flow. Strømodgangen angives til at have tilsvarende usikkerhed på 0,1 % (af aktuel værdi, formodes).

Begge *antages* at være givet ved 95 % konfidens, hvorfor de angivne værdier skal divideres med 2 for at få standardusikkerhederne.

Den kombinerede usikkerhed på vortex måleren er således

#### Ligning 18:

$$s(vortex) = \sqrt{(0,009/2 \cdot 200)^2 + (0,001/2 \cdot 200)^2} = 0,91 \text{ m}^3/\text{time}$$

Tryk:

Tryktransmitteren er angivet til at have en usikkerhed på 0,04 % af indstillet interval. Er angivet som 3σ usikkerhed. Da intervallet for differenstrymålingen er 50 bar, så bliver standardusikkerheden

#### Ligning 19:

$$s(tryk) = \frac{0,04 \%}{3} \cdot 50 \text{ bar} = 0,067 \text{ bar}$$

#### Temperatur:

Temperaturtransmitteren er angivet til at have en usikkerhed på 0,1 % af indstillet interval. *Antages* at være givet ved 95 % konfidens (ikke angivet).

Da intervallet for temperatursignalet er 70 °C, så bliver standardusikkerheden

#### Ligning 20:

$$s(temperatur) = \frac{0,1 \%}{2} \cdot 70 \text{ °C} = 0,035 \text{ °C}$$

#### Barriere data (mA forbindelsesusikkerhed):

Usikkerheden på spejlingen af loopet er angivet til at have en tolerance på 0,1 % af aktuel værdi (mA).

Overføringsfunktionen for et mA loop er

#### Ligning 21:

$$F(i) = \frac{F_{MAX} - F_{MIN}}{16 \text{ mA}} \cdot (i - 4 \text{ mA}) + F_{MIN}$$

Normal vil der være en usikkerhed på mA signalet, hvorefter usikkerheden vil være proportionalt med intervallet repræsenteret ved 16 mA.

I dette tilfælde er der angivet en tolerance på 0,1 % af aktuel værdi. Tolerance betragtes som en firkant fordeling, hvorfor standardusikkerheden kan beregnes som

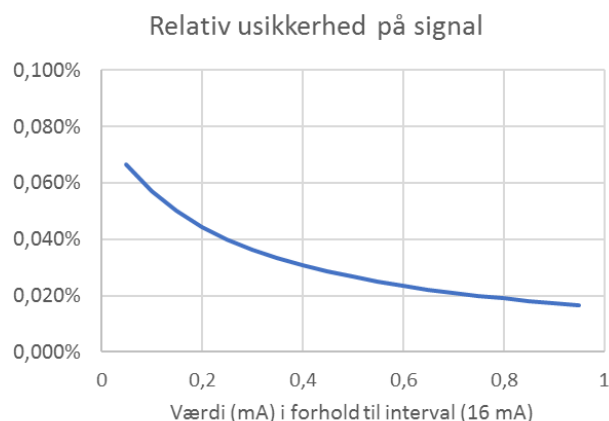
#### Ligning 22:

$$s(loop) = \frac{0,1 \%}{\sqrt{3}} = 0,058 \%$$

#### Regneenheden:

Usikkerhederne relateret til flow omregningen er angivet til 0,1 % eftersom den skulle være testet og godkendt i henhold til OIML 75 standarden.

Der anvendes 24 bit A/D indgange. Det angives at



Figur 12: Relativ usikkerhed på signal ved absolut usikkerhed på 0,02 % af range.

usikkerheden på mA input er 0,02 % af intervallet. I modsætning til barrieren er der her en fast værdi, hvorfor den relative usikkerhed varierer alt efter hvor driftspunktet i mA er i forhold til intervallet 4-20 mA. Dette er illustreret på figur 12.

I det aktuelle eksempel er driftspunktet 10,4 mA ud af 16 mA. Dette giver en relativ usikkerhed på 0,031 % af signalet.

Både tolerancen på omregningen og loop betragtes som tolerance og dermed begge som firkant fordelte usikkerheder.

Den kombinerede standardusikkerhed for regneenheden er derefter

Ligning 23

$$s(\text{regne enhed}) = \sqrt{\left(\frac{0,00031}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,06 \%$$

| Kilde                    | Målt tilstand                 | Standard usikkerhed                     | Flow ekvivalent             |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
| Vortex                   | 100 m <sup>3</sup> /h         | 0,91 m <sup>3</sup> /h                  | 19,64 Nm <sup>3</sup> /time |
| mA barriere (vortex)     | -                             | 0,1 % af 250 m <sup>3</sup> /h          | 5,39 Nm <sup>3</sup> /time  |
| Tryk                     | 20 barg                       | 0,067 bar                               | 6,88 Nm <sup>3</sup> /time  |
| mA barriere (tryk)       | -                             | 0,1 % af 20 barg                        | 2,05 Nm <sup>3</sup> /time  |
| Atmosfæretryk            | 1013 mbar                     | 10 mbar                                 | 1,03 Nm <sup>3</sup> /time  |
| Temperatur               | 25 °C                         | 0,035 °C                                | -0,25 Nm <sup>3</sup> /time |
| mA barriere (temperatur) | -                             | 0,1 % af 25 °C                          | -0,18 Nm <sup>3</sup> /time |
| Regneenhed               | 2.157,8 Nm <sup>3</sup> /time | 0,06 % af 2.157,8 Nm <sup>3</sup> /time | 2,16 Nm <sup>3</sup> /time  |
| TOTAL                    | 2.157,8 Nm <sup>3</sup> /time | 1,01 %                                  | 21,73 Nm <sup>3</sup> /time |

### 7.1.3 Systemusikkerhed

Systemusikkerheden er en kombination af de indgående usikkerheder og tager udgangspunkt i omregningen fra en aktuell hastighed (volumenflow) til den tilsvarende massestrøm ved referencetilstanden 0 °C og 1,01325 bara.

Ligning 24:

$$V_{ref} = V_m \cdot \frac{(P_m + P_{baro}) \cdot (273.15 K) \cdot z_{ref}}{1,01325 \text{ bara} \cdot (T_m + 273.15 K) \cdot z_m}$$

Bemærk anvendelsen af P<sub>baro</sub>, som er barometerstanden. Trykmålingen er en barg måling (reelt en differensstrykmåling) og derfor afhængig af barometerstanden på det aktuelle tidspunkt.

Det er vigtigt at anvende den samme enhed for usikkerhedspåvirkningen. Det vil give forkerte resultater, hvis man blander enheder. Teknikken til at undgå dette er at tage udgangspunkt i ligning 24 og for hver usikkerhedskilde siktftevis tilføje standardusikkerheden sammen med værdien og sammenligne med værdien uden den tilføjede usikkerhed.

Tabel 6 indeholder de enkelte kilders standardusikkerheder omregnet til enheden Nm<sup>3</sup>/time. (nærmere beskrivelse af metoden er udeladt i dette UE).

Den årlige variation i barometerstand er indenfor intervallet +/- 0,03 bara og med en normalfordeling (3 σ konfidens interval). Standardusikkerheden på P<sub>baro</sub> er således 0,01 bara.

z<sub>ref</sub> og z<sub>m</sub> er i tabel 5 fastlagt til henholdsvis 0,996 og 0,877. Usikkerheden på disse indgår i regneenhedens usikkerhed.

Tabel 6 viser den beregnede kombinerede usikkerhed som er baseret på simpel summation via kvadratrod på summen af kvadratet af hvert bidrag (21,73 Nm<sup>3</sup>/time). Det skal lige nævnes at denne teknik forudsætter at de enkelte bidrag er indbyrdes uafhængige. Hvis de var indbyrdes afhængige, så skal bidragene summeres (58,44 Nm<sup>3</sup>/time). Sidstnævnte teknik anvendes hvis man er i tvivl om nogle parametre er uafhængige.

Det kan ud fra tabel 6 ses nogle typiske forhold:

- Største bidragsydere er trykmålingen og flowmålingen.
- Temperaturmålingens usikkerhed er ikke af stor betydning – primært fordi der anvendes K i beregningen og ikke °C.
- Målerens usikkerhed er altid noget mindre end hele målingens usikkerhed.

*Tabel 6 Standardusikkerheder omregnet til fælles enhed*

#### 7.1.4 Anvendelse af UE A4

UE A4 er et regneark, som kan hjælpe med beregning af usikkerheden for et givet problem. Regnearket kan med lidt fingernemhed anvendes således at der laves et sheet for hver af transmitterne og et sheet for den endelige beregning.

En mulighed for implementering i et faneblad er ved at omskrive ligning 24 til:

*Ligning 25:*

$$V_{ref} = I_R \cdot (I_{mR} \cdot I_{mL} \cdot I_m \cdot V_m) \cdot \frac{(I_{PR} \cdot I_{PL} \cdot P_m + P_{baro}) \cdot T_{ref} \cdot z_{ref}}{P_{ref} \cdot (I_{TR} \cdot I_{TL} \cdot T_m + T_{ref}) \cdot z_m}$$

$I_R$  er konverteringen fra m<sup>3</sup>/h til Nm<sup>3</sup>/h regneenheden (=2157.8/100 = 21,578).

$I_m$  er vortex målerens D/A omsætning (=1).

$I_{mL}$  er barrieren for signalet fra vortex måleren (=1).

$I_{mR}$  er A/D omsætningen i regneenheden (=1).

Tilsvarende gælder for  $P_R$ ,  $I_{PL}$ ,  $I_{TR}$  og  $I_{TL}$  at disse er omsætninger (=1).

Usikkerheden på  $I_R$ ,  $I_{mR}$ ,  $I_{TR}$  og  $I_{PR}$  skal betragtes som variable, hvis der ønskes at lave en dynamisk model.

Værdien af  $I_R$  vil ligeledes være variabel.

Læseren opfordres til at eftervise beregningerne i dette eksempel via regnearket.

## 7.2 Gashastighedsmåling med pitotrør.

Det andet eksempel omfatter en opstilling, hvor der anvendes et fastmonteret pitotrør til måling af luftstrømme i en ventilationskanal.

Der måles en hastighed på 4 m/s ved 18 °C og atmosfæretilstand inklusiv normalt forekommende luftfugtighed. Kanalens diameter er angivet til at være ca. ø300 mm.

Pitotrørets differensterik måles med et instrument, SwemaMan 7, som angives at have en usikkerhed på 1 % af visning – minimum 1,5 Pa. Display er med en opløsning på 0,1 Pa. Alle dele vurderet til at være tolerancer.

Trykket i kanalen vurderes til at være ca. 50 mbar men med en usikkerhed på 50 mbar (95 % konfidens og normalfordelt).

Temperaturen måles med PT100 med en usikkerhed på 2 °C (normalfordelt og 95 % konfidens).

Den samlede måleusikkerhed skal anvendes til at vurdere om mængden af luft igennem kanalen kan måles med en tilstrækkelig nøjagtighed da specifikationen er angivet i m<sup>3</sup>/time (tør luft, reference tilstand).

### 7.2.1 Regnemodellen

For at kunne omsætte et differensterik til Nm<sup>3</sup>/time, så skal der foretages flere beregningstrin med hver deres usikkerhed på den beregnede værdi.

*Densitet:*

Densiteten af luften afhænger af tryk, temperatur og luftfugtighed. Da luften betragtes som idealgas og med en kompressibilitetsfaktor tilsvarende samme ved referencetilstanden, så kan densiteten af tør luft beregnes ud fra ligning 5 – det vil sige:

*Ligning 26:*

$$\rho_{tør} = \frac{(P + 1,01325 \text{ bara})}{287,1 \cdot (T + 273,15K)}$$

P er overtrykket i kanalen og målt til 50 mbar. T er temperaturen samme sted målt i °C.

Densiteten af luften kan derfor beregnes

Ligning 27:

$$\rho_{tør} = \frac{(0,05 \text{ barG} + 1,01325 \text{ barA})}{287,1 \cdot (18 + 273,15 \text{ K})} = 1,272 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ud fra figur 5 ses at forskellen imellem tør og fugtig luft er ca. 2 % på densiteten. For at sikre 2-side usikkerhed, så fratrækkes densiteten 1 % således at luftfugtigheden afkobles fra beregningerne ved at anvende densiteten

Ligning 28:

$$\rho = 0,99 \cdot \rho_{tør} = 0,99 \cdot 1,272 = 1,259 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Usikkerheden på densiteten er dermed 1% ud over usikkerheden som en følge af usikkerheden på temperaturen og trykket.

**Pitorør – omregning fra mbar til m/s:**

Der tages udgangspunkt i Bernoullis energiligning (ligning 17) og forudsat negligibelt tab og konstant densitet kan denne i en forenklet udgave for pitotrørret skrives

Ligning 29:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = P_{\text{pitot}} - P_{\text{statisk}}$$

og dermed

Ligning 30:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{pitot}} - P_{\text{statisk}})}$$

Forskellen ( $P_{\text{pitot}} - P_{\text{statisk}}$ ) er differensterykket målt med instrumentet og forskellen imellem trykket i røret og trykket målt imod luftstrømmen (ombremning af luftens hastighed giver en trykstigning).

Differensterykket ved 4 m/s er for eksemplets skyld beregnet til 12,1 Pa.

Usikkerhederne er således relateret til densiteten, differensterykket (målt) og displayet nøjagtighed (visning).

Usikkerheden på differensterykket kan således beregnes som (1% af visning er mindre end 1,5 Pa)

Ligning 31:

$$s(dP) = \sqrt{\frac{1,5^2}{\sqrt{3}}} + 0,1^2 = 0,94 \text{ Pa}$$

**Omregning fra m/s til Nm<sup>3</sup>/time.**

Tilsvarende ligning 24 skal der foretages en normalisering af volumenstrømmen. Heri indgår at der skal tages højde for variationen i tværsnitsarealet, placering af pitot i bunden i ventilationsrøret samt at der vil være en form for overtryk i kanalen.

Der kan laves en ligning tilsvarende ligning 24 som omskrevet til dette formål er.

Ligning 32:

$$\begin{aligned} V_{\text{ref}} &= a \cdot v \cdot A \cdot 3600 \\ &= \frac{(P_{\text{rør}} + P_{\text{baro}}) \cdot (273,15 \text{ K}) \cdot z_{\text{ref}}}{1,01325 \text{ bara} \cdot (T_{\text{rør}} + 273,15 \text{ K}) \cdot z_{\text{rør}}} \end{aligned}$$

eller yderligere forenklet og sammenskrevet til

Ligning 33:

$$V_{\text{ref}} = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot dP}{b \cdot (P_{\text{rør}} + P_{\text{baro}})}} \cdot \frac{D^2}{4} \pi \cdot 3600 \cdot \frac{(P_{\text{rør}} + P_{\text{baro}}) \cdot 273,15}{P_{\text{ref}} \cdot (T_{\text{rør}} + 273,15)}$$

Konstanten "a" skyldes at hastighedsprofilen inde i røret ikke er "fladt" men at den derimod varierer (se UE F1).

I denne sammenhæng antages at pitotrørets målepunkt er placeret hvor flowhastigheden normalt er 1,1 gange middelhastigheden men at der er en usikkerhed på denne på 10% (95 % konfidens). Dette svarer til en standardusikkerhed på  $10\%/\sqrt{3} = 5,77\%$ .

Konstanten "b" er 1 men medtaget idet densitetsberegningen har en indbygget usikkerhed på 1 % som tidligere angivet. Dette er en tolerance, hvormed standardusikkerheden bliver 0,58 %.

Den årlige variation i barometerstand er indenfor intervallet  $\pm 0,03$  bara og med en normalfordeling (3  $\sigma$  konfidensinterval). Standardusikkerheden på  $P_{\text{baro}}$  er således 0,01 bara.

Trykniveauet på 50 mbar +/- 50 mbar betragtes som tolerance, hvormed standardusikkerheden er  $50/\sqrt{3} = 28,87$  mbar.

$P_{ref}$  er 1,01325 bar lig med  $1,01325 \cdot 10^5$  Pa.

Temperaturens standardusikkerhed er 1 °C.

Diameteren på røret er angivet til at være indenfor +/- 5 mm, hvilket fortolkes som en tolerance på 5 mm. Usikkerheden på diameteren,  $D$ , er således  $5/\sqrt{3} = 2,89$  mm.

Ud fra ligning 32 er vi nu i stand til at vurdere på måleusikkerheden og hvilke parametre, som er vigtige. Metoden er identisk med metoden anvendt til eksempel 1. Se tabel 7.

Ikke overraskende er den primære målreference – differenstrykmåleren – den største bidragsyder til måleusikkerheden.

Diameteren og flowprofilfaktoren  $a$  er ligeledes store bidragsydere.

Omvendt er usikkerheden på temperaturen, systemtrykket og luftfugtigheden ikke betydende for den samlede usikkerhed.

Havde man beregnet en luftmængde ud fra lufthastigheden på 4 m/s og tværsnittet ( $\varnothing 300$ ), så er luftmængden  $1014 \text{ m}^3/\text{time}$  hvilket er en fejl på ca. 19 %. Det er således vigtigt at medtage overvejelser af pitotrørets målepunkt og hvilken referencetilstand, som luftmængden skal opgives ved.

## 8 Opsummering

Flowmåling af gas er mere kompliceret end måling på væske.

Fastlæggelse af densiteten kræver kendskab til indholdet af gasarter samt temperatur- og trykforhold. Så længe man ikke er tæt på 2-faset området (se figur 1), så vil man med rimelig nøjagtighed kunne estimere en gasdensitet. Kommer man tættere på, så er der risiko for at en eller flere af de indgående gasarter vil udkondensere og dermed give et falsk billede af sammensætningen.

Ved analyse af gasprøver foretages derfor altid en opvarmning af gassen således at man ved der ikke forefindes kondensat. Dette fænomen er ikke beskrevet i dette UE men der henvises til anden litteratur for en mere detaljeret beskrivelse.

For måling på luft er der også luftfugtigheden som kan give en afvigelse i forhold til forventet densitet. Dette er dog primært ved de høje temperaturer.

Alternativet til beregning er måling. Men her er også usikkerheder alt efter anvendt teknologi.

Selve flowmålingen kan i princippet foretages med et utal af måleteknikker og instrumenter. Der findes ikke en teknologi som kan klare alle situationer. Det er derfor ofte om økonomi og behov for nøjagtighed der er afgørende for om der skal vælges den ene eller anden løsning.

| Kilde         | Målt tilstand                | Standard usikkerhed | Flow ekvivalent              |
|---------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| dP            | 12,1 Pa                      | 0,94 Pa             | 47,93 Nm <sup>3</sup> /time  |
| $P_{rør}$     | 5000 Pa                      | 2887 Pa             | 0,51 Nm <sup>3</sup> /time   |
| $T_{rør}$     | 18 °C                        | 1 °C                | -6,45 Nm <sup>3</sup> /time  |
| Atmosfæretryk | $1,01325 \cdot 10^5$ Pa      | 1000 Pa             | 0,05 Nm <sup>3</sup> /time   |
| Diameter      | 0,3 m                        | 0,00289 m           | 24,34 Nm <sup>3</sup> /time  |
| $a$           | 1,1                          | 0,0634              | -68,52 Nm <sup>3</sup> /time |
| $b$           | 1                            | 0,0058              | 7,37 Nm <sup>3</sup> /time   |
| TOTAL         | 1257,3 Nm <sup>3</sup> /time | 7,0 %               | 87,64 Nm <sup>3</sup> /time  |

De færreste flowmålere er installeret selvstændigt. De er ofte en del af en større installation, hvor signalet transporteres til eksterne beregningsenheder eller kommunikationsprotokoller. Det er derfor vigtigt at have øje for hele signalkæden. Læs mere om dette i UE A6.

Nøglen til det gode valg ligger i beherskelsen af usikkerhedsbudgetter og kendskab til selve måleforholdene.

- [9] W. Barros, "Analysis of the induce variability by CO<sub>2</sub> in reading of ultrasonic flow meters for flare gas", Proceedings of ENCIT 2016

## Bibliography

- [1] »Den Danske Ordbog,« [Online]. Available: <http://ordnet.dk/ddo/ordbog?select=-meter&query=meter>. [Senest hentet eller vist den 2017 12 14].
- [2] »Den Danske Ordbog,« [Online]. Available: <http://ordnet.dk/ddo/ordbog?query=m%C3%A5ler>. [Senest hentet eller vist den 2017 12 14].
- [3] A. B. Lauritsen, S. Gundtoft og A. B. Eriksen, Termodynamik, København: Nyt Teknisk Forlag, 2007.
- [4] "Wikipedia," 23 September 2017. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Entrance\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/Entrance_length). [Accessed 1 November 2017].
- [5] D. W. I. Spitzer, Flow Measurement, Practical Guides for Measurement and Control, D. W. Spitzer, Red., Raleigh, USA: Instrument Society Of America, 1991.
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Compressibility\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Compressibility_factor)
- [7] <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/05/variation-of-ideal-gas-heat-capacity-ratio-with-temperature-and-relative-density/>
- [8] [https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-various-pressures-d\\_1535.htm](https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-various-pressures-d_1535.htm)