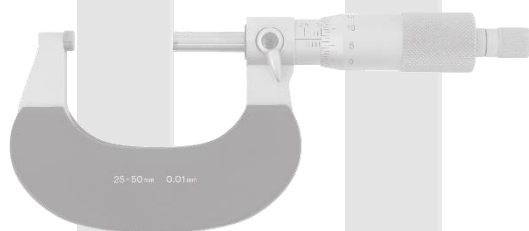


# TRYKMÅLING I VÆSKER OG GASSER

UNDERVISNINGSELEMENT

# P1

—  
UNDERVISNING  
I MÅLETEKNIK

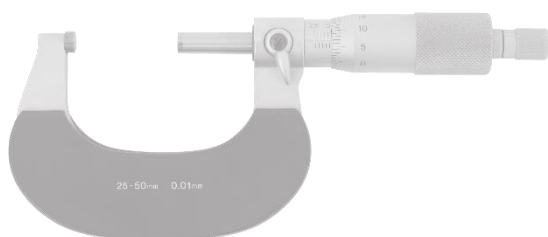




# TRYKMÅLING I VÆSKER OG GASSER

Renny S. Carlsen, Henrik Mathiasen, Erik Jensen & Johan B. 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

Boks 1: Enhedsforklaringer .....	1	4.1 Kontrol i felten .....	7
<b>1 Indledning .....</b>	<b>1</b>	4.2 Kalibrering i laboratoriet.....	8
1.1 Hvad er tryk .....	1	4.3 Fortolkning af certifikater .....	8
1.2 Enheder.....	1	<b>5 Standardisering .....</b>	<b>9</b>
1.3 Totaltryk, statiske tryk og dynamisk tryk.....	2	<b>6 Usikkerhedsbudgettet .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Tryk kategorier .....</b>	<b>3</b>	6.1 U-rørs manometer .....	10
2.1 Vakuum.....	3	6.2 Tryktransmitter .....	11
2.2 Atmosfæretryk.....	3	6.2.1 Usikkerhed på målt værdi .....	11
2.3 Trykluft.....	4	6.2.2 Usikkerhed på FS og NP.....	11
2.4 Hydraulik.....	4	6.2.3 Usikkerhed på mA .....	12
<b>3 Trykmåling.....</b>	<b>5</b>	6.2.4 Usikkerhed på aflæst værdi.....	12
3.1 Rør manometer .....	5	6.3 Opsummering på usikkerheder .....	13
3.2 Mekaniske manometer.....	6	<b>7 Opsummering.....</b>	<b>13</b>
3.3 Elektroniske tryktransmittere .....	7	<b>8 Læringsudbytte .....</b>	<b>13</b>
<b>4 Kalibrering .....</b>	<b>7</b>	<b>9 Bibliografi.....</b>	<b>14</b>

# 1 Indledning

Trykmåling anvendes i et utal af applikationer. Det kan blandt andet være tryk i rør, tankniveau, barometerstand eller for at måle flyvehastigheden for et fly. Vigtigheden af målingen kan være lige fra informativt til procesteknisk eller sikkerhedsmæssigt kritisk. Vigtigheden af målingen kan også tages som et udtryk for hvor nøjagtigt målingens skal være.

For tekniske anlæg vil der desuden være tale om overholdelse af lovgivningen for trykbeholdere, når trykket overstiger fastlagte niveauer.

Trykmåling er en vigtig kompetence, som kræver kendskab til sporbarhed og hvorledes trykmålingen kontrolleres.

I dette undervisningselement fokuseres på måling på tryk fra gasser og væsker ved typiske anvendelsesområder. Der beskrives i korte træk, hvorledes man kalibrerer i felten og i laboratoriet.

Målet med dette undervisningselement er at give en kort introduktion til tryk og trykmåling samt tilhørende usikkerhedsbudgetter. Teknikker til kalibrering af trykmålerne vil ikke blive beskrevet i detaljer, hvorfor der henvises til anden litteratur og informationskilder.

## 1.1 Hvad er tryk

Trykket,  $p$ , er defineret som en kraft per areal:

$$p = \frac{\text{kraft}}{\text{areal}}$$

Kraften på arealet kan være forårsaget af så forskellige ting som tyngdekraften (søjletryk) eller at en masse skal ændre hastighed (impuls).

Tryk bygger altså på de tre SI-enheder for masse [kg], længde [m] og tid [s].

Trykket kan både være over omgivelsestrykket (overtryk) eller under samme (undertryk). Ved tryk under omgivelsestrykket beskrives tilstanden også med udtrykket vakuum eller negativt overtryk.

Tryk fra et søjletryk opleves for eksempel i bunden af en beholder med væske eller som atmosfæretrykket, hvor denne svarer til den luftsøjle som står ovenpå jorden.

### Boks 1: Enhedsforklaringer

- Pascal [Pa]: den SI afledte enhed for tryk. Defineres som newton pr. kvadratmeter. Ses også ofte brugt i størrelserne hectopascal [hPa = 100 Pa] eller kilopascal [kPa = 1000 Pa].
- Bar [bar]: Trykenhed som er defineret som 100000 Pa, eller dekanewton pr. kvadratcentimeter. [daN = 10 N].
- Standard atmosfærisk tryk [atm]: Defineret som 101325 Pa.
- Kilopond [kp]: en ældre betegnelse for den kraft der virker på en masse på ét kilogram fra jordens gravitation.
- Millimeter kviksølv [mmHg]: Oprindeligt defineret som det tryk der genereres ved en søjle af kviksølv med en højde på 1 mm. Bruges stadig i bl.a. medicin og meteorologi. Et andet vandsøjletryk der også bruges er centimeter vandsøjle [cmVS]. 1 mmHg = 1,35951 cmVS.
- Torr: Oprindeligt defineret som en mmHg, men sidenhen redefineret som 1/760 atm eller 133,32 Pa.
- *Pounds per square inch* [PSI]: Den empiriske trykenhed. Én PSI svarer til ca. 6894 Pa.

Ændringer i en partikels impuls (bevægelsesmængde) kræver en fysiks påvirkning i form af en kraft. I en beholder med partikler vil partiklerne bevæge sig i vilkårlige retninger og med en hastighed afhængigt af temperaturen. Jo større temperatur jo højere hastighed. For at holde disse partikler inden for beholderen, så skal beholdervæggen således påvirke partiklerne med en modkraft for at partiklerne ændrer retning fra at støde ind i beholdervæggen til at bevæge sig væk fra beholdervæggen. Denne kraft måles som et tryk.

Fyldes der dobbelt så mange partikler i en beholder, så øges trykket derfor, da der er flere partikler, som støder ind i væggene.

## 1.2 Enheder

Gas- og væsketryk har SI enheden Pascal, som er N/m<sup>2</sup> (kraft i Newton per arealenhed).

SI enheden er opkaldt efter videnskabsmanden Blaise Pascal (1623-1662), som opstillede teorier for tryk,

hydraulik og statistik. Men som for andre måleparametre er der et utal af forskellige enheder – se boks 1 og tabel 1.

I daglig tale bruges der forskellige enheder efter hvor trykket måles. Ved tryk i bil og cykeldæk bruges mest enheden bar eller PSI. Ved trykket i luften bruges hPa eller mmHg. Og i gasflasker bruges tit bar. Alle trykenheder kan regnes om til SI-enheden Pa.

Tryk enheden kan angives i absolut eller overtryk. Ved enheden bar angives det som bar(a) ved absolut tryk og bar(g) ved overtryk (gauge pressure). Overtryk er almindeligt anvendt mens absolut tryk bruges til tekniske beregninger og lignende.

### 1.3 Totaltryk, statiske tryk og dynamisk tryk

Det er vigtigt at skelne imellem totaltryk, statisk tryk og dynamisk tryk, da der kan være store forskelle i måleresultatet.

Bernoullis energiligning beskriver sammenhængen imellem totaltrykket, statisk tryk og dynamisk tryk. Det statiske tryk indeholder også bidrag fra søjletrykket (potentiell energi).

Ligning 1:

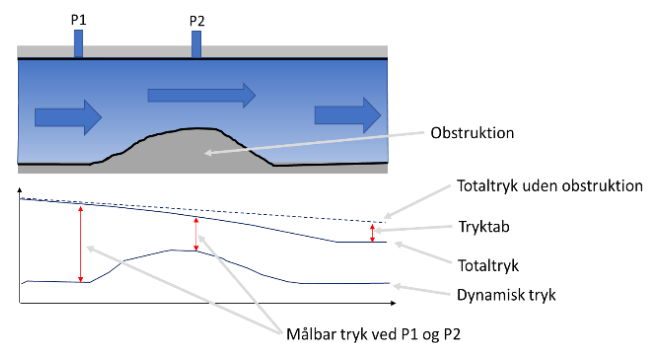
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = \text{totaltrykket}$$

$p$  er trykket,  $\rho$  er densitet,  $v$  er hastighed,  $g$  er tyngdeacceleration og  $h$  den geostatiske højde. Højre

side af ligning 1 er angivet til en konstant. Dette gælder dog kun, hvor der ikke er noget energitab hvilket er en idealiseret virkelighed, da der altid vil være et energitab.

Totaltrykket er det samlede tryk ved stilstand. Igennem et rørstrækning vil totaltrykket falde – det statiske og dynamiske kan variere. Pumpen i et rørsystem tilfører energi til mediet som omsættes til totaltryk (afhængigt af rørdiameter varierer fordelingen imellem statisk og dynamisk tryk).

Muligheden for at omsætte statisk tryk til dynamisk tryk kan vendes til mange formål. Pitotrør til flowmåling, centrifugalpumper, vinger på vindmøller/fly er blot nogle få eksempler på udnyttelsen af dette fænomen.



Figur 1: Principtegning for differensstryksbaseret måling. Bemærk at der er et blivende tryktab.

Figur 1 illustrere hvorledes omsætning kan ske i et rør. Ved en indsnævring af røret øges hastigheden af strømningen. Andet led i ligning 1 øges, hvorfor første

Tabel 1 Konvertering mellem forskellige trykenheder

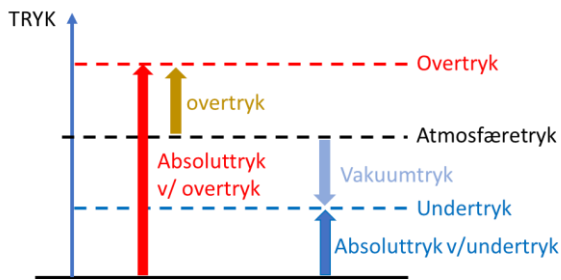
	Pascal	bar	N/mm <sup>2</sup>	kp/m <sup>2</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	atm	Torr	PSI
<b>1 Pa (N/m<sup>2</sup>)</b>	1	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	0,102	0,102×10 <sup>-4</sup>	0,987×10 <sup>-5</sup>	0,0075	1,450377×10 <sup>-4</sup>
<b>1 bar (daN/cm<sup>2</sup>)</b>	100 000	1	0,1	10200	1,02	0,987	750	14,50377
<b>1 N/mm<sup>2</sup></b>	10 <sup>5</sup>	10	1	1,02×10 <sup>5</sup>	10,2	9,87	7500	145,0377
<b>1 Ki- lopond (kp)/m<sup>2</sup></b>	9,81	9,81×10 <sup>-5</sup>	9,81×10 <sup>-6</sup>	1	10 <sup>-4</sup>	0,968×10 <sup>-4</sup>	0,0736	0,00142
<b>1 kp/cm<sup>2</sup></b>	98100	0,981	0,0981	10000	1	0,968	736	14,2
<b>1 atm</b>	101325	1,013	0,1013	10330	1,033	1	760	14,7
<b>1 torr</b>	133	0,00133	133×10 <sup>-4</sup>	13,6	0,00136	0,00132	1	0,019
<b>1 PSI lbs/in<sup>2</sup></b>	6894	0,06894	0,006894	704	0,0704	0,068	51,7	1

led – det statiske tryk – må falde for at overholde Bernoullis energiligning.

Der kan findes mere information om pitotrør i UE-F1 og F3.

## 2 Tryk kategorier

Tryk kan opdeles i kategorier afhængigt af niveauet og anvendelse.



Figur 2 Definitionen på overtryk, undertryk, absoluttryk og vakuumtryk.

### 2.1 Vakuum

Udtrykket vakuum betyder "tomrum". Det perfekte vakuum er et lufttomt rum, hvor trykket er 0 Pa. I denne tilstand vil der ikke være nogen partikler. Denne tilstand findes ikke teknisk set. I praksis kan man opnå tryk ned til under  $10^{-9}$  Pa, svarende til en partikeltæthed på ca.  $2,4 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Et tryk på  $10^{-9}$  Pa svarer til, at partiklerne i middel kan bevæge sig ca. 3 000 km uden at støde sammen. Til sammenligning kan her evt. angives partikeltætheden og trykket i det interstellare rum som henholdsvis  $0,25 \text{ m}^{-3}$  og  $10^{-17}$  Pa.

#### Boks 2: Vakuumbeskrivelser

- Lavt vakuum: 133,3 – 0,133 Pa
- Medium vakuum: 0,133 –  $1,33 \times 10^{-3}$  Pa.
- Højt Vakuum:  $1,33 \times 10^{-3}$  -  $1,33 \times 10^{-6}$  Pa
- Ultra højt vakuum:  $< 10^{-7}$  -  $10^{-8}$  Pa
- Ekstremt vakuum:  $< 10^{-10}$  Pa
- Interstellart rum:  $\approx 10^{-17}$  Pa

Ved et sådant lavt tryk kan partiklerne i middel bevæge sig ca. 1 000 gange frem og tilbage mellem solen og jorden uden at støde sammen.

Teknisk betragtet er vakuum udtryk for at der er et lavere tryk end atmosfæretrykket. Ved søgning på nettet vil der kunne findes en definition, som siger at der skal være et væsentligt lavere tryk.

Betegnelsen *vakuumtrykket* dækker således over forskellen i det absolutte tryk i forhold til atmosfæretrykket. Bemærk her at øget vakuumtryk betyder sænket absoluttryk.

Et vakuum karakteriseres ved dets tryk  $p$  eller dets partikeltæthed  $n$ . Atmosfærens tryk ved Jordens overflade er f.eks. ca.  $10^5$  Pa, svarende til en partikeltæthed på ca.  $2,4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Vakuum anvendes teknisk til at fjerne uønskede partikler fra et område. Eksempler er et elektronrør eller gammeldags billedrør, hvor formålet er at fjerne flest mulige partikler og dermed tillade elektronerne at passere uhindret. For forskningsanlæg til undersøgelse af "big bang" teorierne anvendes ligeledes vakuum til at fjerne de uønskede partikler.

Vakuum bruges bl.a. til at forhindre kemiske eller fysiske processer, der forårsages af luftens molekyler, for eksempel ved arbejde med reaktive metaller.

Hjemme i husholdningen fjernes de uønskede partikler ligeledes med en støvsuger selv om vakuumtrykket her er noget lavere (højere absoluttryk) end i førnævnte forskningsanlæg. Undertrykket i en støvsuger ligger på ca. 40 kPa.

Et vakuum kan fremstilles ved hjælp af en vakuumpumpe. Disse findes i mange udformninger og benyttes til forskellige formål. Den klassiske kapselpumpe så at sige skovler luft ud af et område (stempelpumpe kan også beskrives på denne måde).

Der findes mere avancerede pumper såsom en sublimationspumpe, hvor gasmolekylerne bindes kemisk.

Dette undervisningselement vil ikke gå mere i dybden med, hvorledes vakuum genereres.

### 2.2 Atmosfæretryk

Atmosfæretrykket er det tryk som atmosfæren udøver på jordoverfladen som følge af tyngden af den over jordoverfladen hvilende luftmasse.

Det atmosfæriske lufttryk måles med en trykmåler kaldet et barometer. Værdien angives ofte enten i hPa eller atmosfære (atm) svarende til 1013,25 hPa.

I forbindelse med vejrudsigter tales der ofte om højtryk og lavtryk. Disse fænomener skal ikke forveksles med overtryk og undertryk og kan skyldes termiske effekter såsom afkøling eller opvarmning af luften, hvorved luftens densitet ændres og dermed ændres massen af luft i søjletrykket.

En anden type lavtryk skyldes luftens bevægelse. Tænk blot på hvordan lufttrykket i centrum af en kraftig efterårsorkan kan være meget lavt.

Et barometer eller en elektronisk vejrstation findes i mange hjem. De ældre udgaver er ofte markeret med ord som storm, regn, omskiftelig og varme. Sømænd vil vide, at vejret kan forudsiges ud fra, hvor hurtigt barometerstanden ændres. De moderne elektroniske barometre med indbygget vejrudsigt udnytter disse gamle principper til at gætte på de kommende timers vejr.

## 2.3 Trykluft

Trykluft er komprimeret luft. Man taler først om trykluft, når trykket er 0,3 bar over det omgivende lufts tryk. Enheden Pa, bar eller psi anvendes oftest i forbindelse med trykluft, da instrumenter og udstyr sælges internationalt.

Normalt siger man ikke "overtryk" men kun "tryk". En tommelfingerregel er, at den angivne trykværdi er overtryk såfremt andet ikke er skrevet direkte.

Trykluft frembringes oftest i en kompressor, hvorefter det opbevares i en tank. I industrien anvendes ofte flere kompressorer til at danne tryklufften centralt. Tryklufften opbevares i store tanke og fremføres via et lukket system i rør eller slanger til lokale udtag. Her bruges tryklufften til blandt andet at drive tryklufft-værktøj, maskiner og stempler i pneumatik.

Arbejdstrykket på trykluft ligger normalt på 5-10 bar. En vigtig detalje er, at den komprimerede luft kan indeholde vanddråber. Trykluft kan ligeledes indeholde små oliepartikler fra kompressorens smøring, hvorfor man IKKE skal stå og blæse trykluft imod hånden, da disse små partikler kan skydes ind under huden.

Komprimeret luft er elastisk og egner sig ikke på samme måde som tryksat væske (hydraulik) til styrings- og reguleringsformål. Trykluft anvendes ofte til drift af værktøj eller ventiler, hvor luften efterfølgende slippes fri. Et højere tryk end nødvendigt vil derfor være en dårlig energiteknisk løsning.

Trykluft anvendes også til at etablere overtryk i rum med det formål at holde uønskede partikler ude. Et eksempel er i en ATEX zone, hvor en eksplosionssikker installation sikrer, at der altid opretholdes et overtryk omkring de ting, som kan skabe en eksplosion ved indtrængning af gas.

Gasser er elastiske og derfor skal man være varsom ved trykbærende beholdere. Et brud på en beholder med f.eks. 10 bar overtryk vil forårsage 10 gange volumenudvidelse. Det vil ske eksplosivt og derfor kan det være forbundet med stor fare. Ved tryktest af udstyr benyttes derfor ofte vand.

Måling af tryk på trykluft kræver således omhu med, at installationen af måleudstyret er sikker.

## 2.4 Hydraulik

Hydrauliske systemer udnytter, at væske ikke er kompressibel i samme grad som luft og dermed lettere at sætte under tryk. Væsken, som anvendes til hydrauliske systemer, skal både kunne håndtere at være trykbærende og smørende samt have en minimal friktionsmodstand ved strømning i rør.

Normalt anvendes olie som medie. Men der findes også hydrauliske systemer baseret på vand, som med fordel kan anvendes til fødevarereproduktion og i anlæg, hvor olie er uønsket.

Trykket i et hydraulisk system ligger fra 0 til 600 bar. Man skelner her imellem lavtryk (0-60 bar), mellemtryk (60-200 bar) og højtryk (200-600 bar).

Alle hydrauliksystemer er i hovedtrækkene ens, uanset hvor de anvendes. Dog skelner man mellem åbne og lukkede systemer.

I modsætning til trykluft vil et brud i et hydraulisk system hurtigt sænke trykket grundet inkompressibiliteten af væsken. Sikkerhedsmæssigt er det dog vigtigt at sikre sig, at udstyret til trykmålingen også kan håndtere de faktiske trykforhold. Valg af trykudstyr er dermed kritisk.



I modsætning til trykluft indeholder hydrauliske systemer ofte hurtiglukkende ventiler, hvilket besværliggør trykmålingen. Det gælder også for vandrør.

Da væsken ikke er kompressibel, kan bevægelsen af den hydrauliske væske kun stoppes ved at der opstår et højt tryk ved ventilen. Fænomenet, som på dansk kaldes væskeslag, skal ikke beskrives nærmere i dette undervisningselement, men illustreres med et par eksempler:

En væske bevæger sig igennem et 10 meter langt rør med 5 m/s. En ventil som lukker i løbet af 0,5 s, vil betyde et trykstød på cirka 2 bar.

Aktiveres ventilen med 0,2 s (meget hurtig ventil), er trykstødet cirka 5 bar.

Et andet eksempel er et 20 m langt ½" vandrør med et armatur åbent til en væskestrømning på 600 l/t, som lukkes hurtigt. 600 l/t svarer til en hastighed på cirka 1,3 m/s. En lukkehastighed på 0,2 s giver her et trykstød på 2,65 bar.

Længere rør, højere hastighed og hurtigere lukning vil alle betyde en høj trykpuls.

Der findes måleudstyr, som har indbygget væskeslagssikring. Men ellers skal udstyret sikres, så det kan overleve væskeslag, hvor der er risiko for trykstød.

### 3 Trykmåling

Fælles for eksemplerne beskrevet i afsnit 2 er, at der er tale om måling af et tryk enten identisk med, lavere eller højere end omgivelsestrykket.

Der findes et utal af målemetoder for tryk, lige fra simple manuelle opstillinger til avancerede målemetoder. I industrielle processer er tryk en af de vigtigste parametre. Den måles oftest, og den påvirker kvaliteten af produktet direkte. Derfor foretages valget af måleteknik ud fra tekniske muligheder, økonomi og ikke mindst ønsket nøjagtighed.

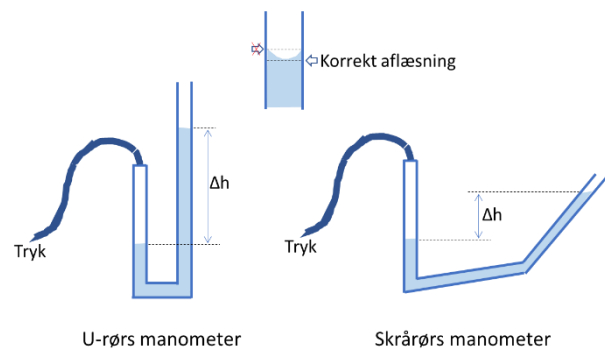
I dette afsnit vil der blive gennemgået nogle af de mest hyppigt anvendte målemetoder for tryk.

#### 3.1 Rør manometer

Den simpleste og oprindelige form for manometer er et rørmanometer, som baseres på, at tryk kan omsættes til en højde.

Ligning 1 kan omskrives til:

Ligning 2:



Figur 3 Princip bag U-rørs manometer og skrårørsmanometer

$$p - p_{atm} = \rho g \Delta h$$

hvor  $p$  er trykket som ønskes målt,  $p_{atm}$  er det omgivende atmosfæretryk,  $g$  er tyngdekraften og  $h$  er niveauforskellen mellem de 2 væskesøjler.

Forskellen mellem et U-rørsmanometer og skrårørsmanometer er orienteringen af målerøret – se figur 2. Fordelen ved skrårørsmanometret er, at skalaen strækkes for at give en bedre opløsning. Søges der på internettet efter skrårørsmanometre, så vil det opdaget, at dette ofte udnyttes til at give varierende skala-inddeling eller øget nøjagtighed i forhold til det U-formede manometer.

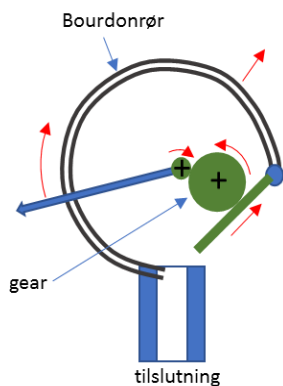
Rørmanometre bruges fortrinsvis til tryk i området 10 Pa (0,1mbar) til 100 000 Pa (1 bar). Måleenheden, der ofte benyttes med U-rør, er cmVS, mmHg eller Pa.

Bidrag til måleusikkerheder for denne metode skyldes udover aflæsningsusikkerhed, usikkerhed på densiteten (temperatur og type af medie) samt tyngdekraft og atmosfæretrykket.

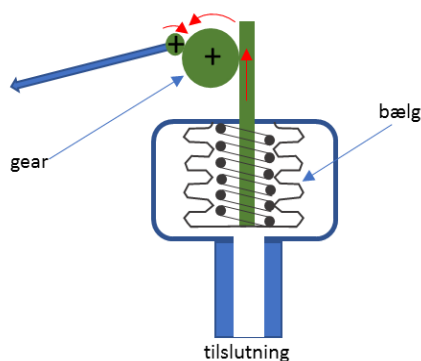
U-rørs manometre bruges ofte til hurtigt at få overblik over varierende tryk i processer. Idet de er relativt simpelt opbygget, er det ikke nødvendigt at eftervise deres måleevne så ofte som på mekaniske måletyper.

Med et skrårørs manometer af bedste kvalitet kan man opnå en målenøjagtighed på 1 Pa.

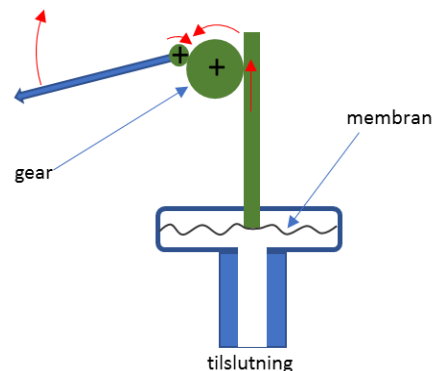
Bourdonrørs manometer



Bælg manometer



Membran manometer



Figur 4 Mekaniske trykmålere baseret på bourdonrør, bælg og membraner. Rød pil angiver bevægelse ved øget tryk.

Niveau måling med U rør blev før introduktionen af det globale GPS-system brugt til store byggeprojekter så som broer. I dag dækker det globale GPS-systemet hele jorden, og måledataene er så præcise, at det afløser U-røret.

### Boks 3: Gauge og absolut tryk

Oftest ses bar med notationen g eller a.

bar g står for bar gauge fortæller at her er der tale om overtryk. 0 bar g er derfor lig med omgivelsetrykket.

bara står for bar bar absolut og er lig med totaltrykket. 0 bara er lig med et absolut vakuum.

Når man f.eks. fik til opgave at bygge en bro blev projektet igangsat fra begge ender samtidig. Her var det altafgørende, at de udførte målinger var præcise nok til, at broen kunne samles på midten. I dag bruger landmålere GPS eller lasere til opmåling over store afstande. Lasere kompenserer dog ikke for Jordens krumning ligesom U-røret gør det.

## 3.2 Mekanisk manometer

Et mekanisk manometer er baseret på, at trykket påvirker et elastisk materiale, således at der opstår en mekanisk bevægelse.

Bourdonrør er oftest anvendt i mekaniske målere. Det er et fladtrykt rør formet som et C. Når trykket øges vil de mekaniske kræfter i røret forsøge at strække røret. Denne bevægelse omsættes via et mekanisk gear til en visning på et display.

Manometre kan også baseres på bælg, hvor trykket modvirkes af en fjeder og hvor ændringen i dens mekaniske bevægelse kan aflæses. Teknikken med omsætning af tryk til bevægelse findes anvendt i trykkontrolventiler og pressostater. En pressostat er en trykluftstyret kontakt, som man blandt andet kan finde i vaskemaskiner.

Membraner i manometre er som en bælg, hvor stivheden i membranen erstatter fjederen. Denne teknik anvendes i elektroniske trykmålere, hvor membranens udbøjning måles ved brug af halvlederteknologi. Manometre fås fra -1 barg til flere tusinde barg.

Nøjagtigheden angives i forskellige klasser, i forhold til værdien ved fuldt udslag. Klasserne i henhold til DS/EN 837 del 1-3 er inddelt fra klasse 0,1 til klasse 4. En klasse 1 måler har således en nøjagtighed på 1,0% af fuld skala. DS/EN 837 er standarden for manometre.

Mekaniske manometre af bourdonrørs typen skal være forspændte for at virke korrekt, hvorfor de første 10% af skalaen ikke anvendes. Det membranbaseret manometer vil ikke have dette problem.

Ved måling af et pulserende tryk benyttes et dæmpet manometer. Det er fyldt med en tyk silikone olie, der bevirker, at det mekaniske system i manometeret ikke overbelastes ved pludselige trykændringer. Ved en pludselig og voldsom trykændring kan det mekaniske målesystem så at sige springe en tand over i gearingen, hvorefter det ikke længere overholder klassificeringen. Det samme gør sig gældende hvis manometeret er blevet udsat for et mekanisk stød. Dette kan opstå

ved transport eller ved fejlhåndtering af manometret. Mekaniske manometre er derfor følsomme overfor påvirkninger såsom trykstød eller mekaniske påvirkninger. Omvendt er de meget billigere end f.eks. tryktransmittere.

### 3.3 Elektroniske tryktransmittere

De mekaniske manometre er i et moderne anlæg udelukkende et indikationsinstrument for de teknikere, som står ved anlægget og planlægger service. Styring og sikkerhedskontroller foregår ved hjælp af elektroniske trykmålere (transmittere).

Output fra disse transmittere er traditionelt 4 – 20 mA, men mere avancerede udgaver vil kunne købes med alle former for output – både trådløst og fortrådet.

Ulempen ved den elektroniske måler er, at der skal anvendes strøm. Ved strømudfald bortfalder signalet. Af samme årsag er pressostater og kritisk trykkontrol ofte baseret på en mekanisk måling, som beskrevet under de mekaniske målere.

Transmittere kan fås til ethvert trykbehov, fra 1 bar(g) til flere tusinde bar(g).

Transmitterens opbygning svarer til membran manometret vist på figur 3.

De mest forekommende typer, som er baseret på piezo-resistivitet, anvender at membranen på bagsiden har en væske, som overfører trykket til et siliciumkrystal. Påvirkningen af krystallen betyder at modstanden igennem denne ændres, hvorved et signal for trykket haves. Vær opmærksom på, at hvis det er en type med åben membran, må denne ikke berøres, da denne så ikke længere vil være pålidelig. Membranen har for eksempel en tykkelse på ca. 100µm, hvorfor dens karakteristik vil ændres ved den mindste direkte berøring.

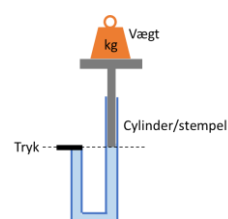
Andre målere anvender en kapacitiv membran. Membranen er tynd og udbøjes som følge af en trykforskel imellem siderne. Forskellen i forhold til de tidligere nævnte membraner er, at bag membranen er der et luftgab til en elektrode. Membranen anvendes også som elektrode. Ved en ændret udbøjning af membranen ændres afstanden imellem de to elektroder, hvorved kapacitansen ændres.

Denne type produceres til overtryk-, absoluttryk- og differenstryk måling.

## 4 Kalibrering

Kalibrering af tryktransmittere skal foretages for at vedligeholde pålideligheden af en måling. Dette kan enten gøres på stedet eller i et laboratorium.

Uanset om der foretages prøvning eller kalibrering, så skal dette ske op imod en reference, som har en væsentligt mindre usikkerhed end den testede måler.



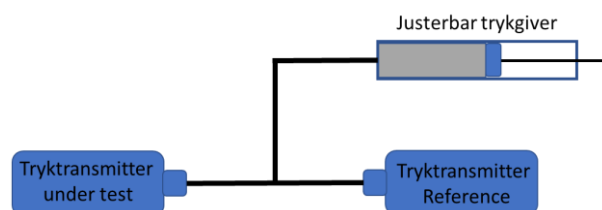
Figur 5 princip bag dødvægtstester

### 4.1 Kontrol i felten

Kontrollen af en trykmåler i felten kan være besværlig som følge af adgangsforhold, vind, rystelser og lignende. Det er derfor ikke praktisk muligt at medtage meget nøjagtigt udstyr.

Derimod anvendes en arbejdsnormal i form af en tryktransmitter, som er kontrolleret i et laboratorium.

Teknikken er at påføre et tryk til den kontrollerede trykmåler, som samtidigt måles med arbejdsnormalen. Dette kan gøres både med luft eller væske.



Figur 6 Et princip for kalibrering af tryktransmitter i felten

Måling i felten kræver ligeså stor omhu som ved kalibrering i et laboratorium; ikke mindst fordi der er mange ydre støjkilder til målingerne.

Der bør foretages kontrol i mindst 3 punkter, hvoraf det ene kontrolpunkt er ved det normale driftspunkt for transmitteren. En differenstrykmåler bruges til at

måle en trykdifference mellem to punkter. For en differenstrøks transmitter er det nemt at etablere et nul-punkt, da begge indgang i differenstrøks transmitteren åbnes ud imod omgivelserne.

## 4.2 Kalibrering i laboratoriet

I laboratoriet kan der foretages målinger under kontrollerede forhold, hvorved usikkerheder grundet temperatur, vibrationer, højdeforskelle (søjletryk) og lignende bidrag kan minimeres.

Ligesom målinger fra felten kan tryktransmitteren kontrolleres op imod en anden tryktransmitter, som er kontrolleret med en høj præcision og sporbarhed.

*Dødvægtstesteren* tager udgangspunkt i, at et tryk kan defineres som en kraft per arealenhed, hvilket kan realiseres som en vægtskold ovenpå en væske-søjle med kendt areal. Den kan kun anvendes under kontrollerede forhold og er skitseret på figur 5.

Realiseringen af princippet med høj nøjagtighed kræver stor omhu for at kunne anvende kraft per arealbetragtning (se figur 6). Detaljer som forskelle i væskesøjler, opdriften fra loddet der fortrænger luft, og nøjagtighed af cylinder/stempel pasningen er nøglen til en høj nøjagtighed. Herudover vil temperaturudvidelsen af stempel og cylinder grundet varierende temperaturer betyde, at arealet under stemplet vil variere og dermed ændre trykket.



Figur 8 Dødvægtstester til differenstrøks. Lodder opbevares under låg for at sikre højest mulig stabilitet af vægten.

Til større vakuumtryk (væsentlig lavere tryk end atmosfæretrykket) kan der anvendes mere avancerede teknikker.

En gruppe af disse teknikker baseres på ionisering af molekyler. Ved at opvarme en elektronkilde til en høj

temperatur udsendes elektroner. Når elektronerne rammer et molekyle, bliver det ioniseret og kan detekteres.

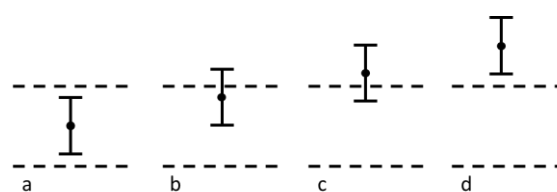
En anden teknik anvender rotering af en cylinder (magnetisk kontaktfri oplejring) og måling af modstanden. Viskositeten er et udtryk for mængden af molekyler og dermed trykket.

En tredje teknik anvender måling af varmetransmission fra en varmekilde. Jo mere varmetransmission, jo flere molekyler.

Endelig skal nævnes anvendelse af membranbaseret tryktransmitter til fastlæggelse af referencetrykket.

## 4.3 Fortolkning af certifikater

Et kalibreringscertifikat skal forstås korrekt. Data på kalibreringscertifikatet vil ikke sige noget om overholdelse af tolerance. Det er op til brugeren at konkludere.



a: Overensstemmelse. Måleresultat (Fejl  $\pm$  usikkerhed) er inden for tolerance.

b: Overensstemmelse kan ikke afgøres. Fejlen er inden for tolerancen, men tillagt den ekspanderede måleusikkerhed kan det ikke vurderes.

c: Overensstemmelse kan ikke afgøres. Fejlen er uden for tolerancen, men tillagt den ekspanderede måleusikkerhed kan det ikke vurderes.

d: Manglende overensstemmelse. Måleresultat (Fejl  $\pm$  usikkerhed) er uden for tolerance.

Figur 7: Certifikatside med resultater

Kalibreringscertifikatet angiver udelukkende måleafvigelsen på hvert af de ønskede kontrolpunkter og tilhørende usikkerhed. Sidstnævnte usikkerhed er en blanding af laboratoriets egen måleusikkerhed samt usikkerheden målingen 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 7 viser et uddrag fra et typisk certifikat, hvor det angives, hvorledes man kan fortolke et resultat. Selv om værdien er inden for en tolerance, så kan den sande værdi godt være udenfor. Dette er nærmere beskrevet i undervisningselement UE A5.

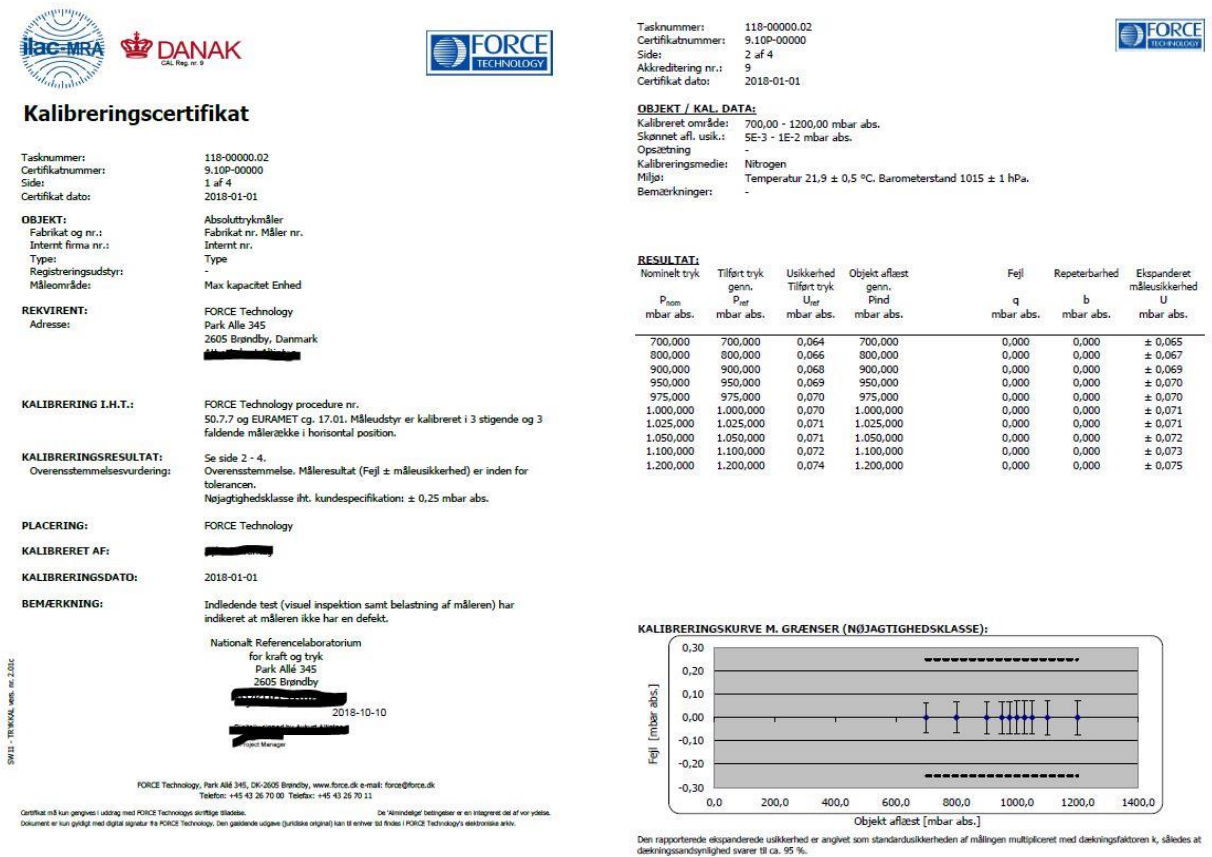
Figur 8 viser forsiden af et kalibreringscertifikat fra FORCE Technology fra kalibrering af en tryktransmitter.

Logoet fra DANAK sikrer at kalibreringen er foretaget på et akkrediteret laboratorium.

Figur 8 viser information om udstyret, som har været til kalibrering, samt proceduren for kalibreringen.

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

Ilac-MRA er et mærke som viser, at dette certifikat godtages i alle lande, som er medunderskriver af den indbyrdes acceptaftale.



Figur 9: Certifikatforside samt side med resultater

Kalibreringscertifikatet viser resultaterne og vil altid indeholde den aflæste værdi, den "sande værdi" samt måleusikkerheden på målepunktet.

## 6 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 to eksempler – en differenstrykstransmitter anvendes til måling af det absolutte tryk i et rør med lav strømningshastighed – samt et U-rørs manometer til måling af overtryk.

For begge gælder at der kan anvendes regnearket fra UE A4.

### 6.1 U-rørs manometer

Der tages udgangspunkt i U-rørs manometret vist på figur 2.

Væskesøjlen i et  $\varnothing 5$  mm rør bestående af vand aflæses på en skala med inddeling 0,5 mm. Der er cirka 20°C i rummet, hvorfor vandets densitet er 998,3 kg/m<sup>3</sup>.

Væskesøjlen aflæses til 120 mm.

Ligning 3:

$$\begin{aligned} p - p_{atm} &= \rho g \Delta h = 998,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,120 \text{ m} \\ &= 1176,4 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} = 1176,4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Da 101 325 Pa er 1 bar, kan differenstrykket beregnes til 11,6 mbar.

Usikkerheden på målingen stammer fra usikkerhed på densitet og aflæsning af væskesøjlen.

Usikkerheden på densiteten skyldes tvivl om den aktuelle temperatur af vandet, som kan være mellem 18 °C og 22 °C. Dette giver en variation på densiteten, som er vurderet til  $\pm 0,5$  kg/m<sup>3</sup> (absolutte grænser). Standardusikkerheden på densiteten kan derfor beregnes som:

$$s(\rho) = \frac{0,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\sqrt{3}} = 0,289 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Anvendelsen af kvadratroden af 3 skyldes at variationen på densiteten vurderes til at ligge mellem de to grænser, og der antages en rektangulær fordeling (se UE-A3, figur 8 og afsnit "5.6.1 Skalainterval").

Usikkerheden på aflæsningen skyldes, at vand har en overfladespænding, og at vandets overflade derfor ved glasvæggen er højere end i centrum af væskesøjlen. Skalaen til aflæsning af væskesøjlen er fra producenten kontrolleret i forhold til undersiden af væskebuen (se figur 2). Usikkerheden på aflæsningen er derfor personafhængig og vurderes til at være 1,0 mm med en normalfordeling og med 95 % konfidens. Heraf følger at standardusikkerheden på niveaumålingen bliver

Ligning 4:

$$s(\Delta h) = \frac{1,0 \text{ mm}}{2} = 0,5 \text{ mm}$$

Ved beregning af de to usikkerhedsbidrag, skal standardusikkerhederne på  $\rho$  og  $\Delta h$  omregnes til enhed for tryk.

Usikkerheden på  $\Delta h$  skal således multipliceres med  $\rho g$ . Tilsvarende skal usikkerheden på  $\rho$  multipliceres med  $g \Delta h$  for at få den korrekte enhed. Dette fremgår af ligning 3.

Den kombinerede måleusikkerhed er således

Ligning 5:

$$\begin{aligned} s(p - p_{atm}) &= \sqrt{(g \Delta h s(\rho))^2 + (\rho g (\Delta h))^2} = \\ &= \sqrt{(9,82 \cdot 0,12 \cdot 0,289)^2 + (998,3 \cdot 9,82 \cdot 0,0005)^2} = \\ &= 5,3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Ved et konfidensniveau på 95 % skal standardusikkerheden multipliceres med en faktor 2, hvilket betyder at den samlede måling bliver  $(1.176 \pm 11)$  Pa. Dette svarer til en relativ ekspanderet usikkerhed på 0,9 % af den viste værdi.

Anvendes UE-A4 regnearket til beregning af usikkerheden anvendes ligning 3 direkte.

## 6.2 Tryktransmitter

Der tages udgangspunkt i en tryktransmitter af typen JUMO type 4304 til måling af absolut tryk. Der anvendes et 4 – 20 mA strømstyrke signal, som kobles til en 12-bit A/D omsætter. Måleområdet er 0-400 mbar, hvilket forkortes til FS (fuld skala). Måleresultater er 56 mbar. Temperaturvariationen er mindre end 5 °C.

Fra databladet (dokument JUMO 03.08/00521558) findes følgende forhold angivet:

- i. Linearitet bedre end 1 % (tolerance).
- ii. Drift på maksimalt 0,5 % af FS per år (tolerance).
- iii. Temperaturfølsomhed
  - a. 0,02 %/K på nulpunkt (NP).
  - b. 0,02 %/K på FS.
- iv. Nulpunkt stabilitet 0,5 % af FS.
- v. Forsyningsspændings følsomhed 0,02 %
- vi. mA output stabilitet ved belastning på 0,2 % af værdi

Hertil kommer usikkerheden på A/D omsætteren (vii) samt atmosfæretrykket (viii).

Usikkerhedsbidragene kan opsummeres således at nogle bidrag påvirker FS og nulpunkt (NP). Andre bidrag påvirker mA output og endelig er der bidrag som påvirker lineariteten og præcisionen af selve målingen.

For at lave en overskuelig opsætning anvendes følgende antagelser:

- mA signalet beregnes ud fra det målte differenstryk divideret med intervallet FS-NP.
- Det målte differenstryk påvirkes af usikkerhedsbidraget i og ii
- Beregning af ønsket mA signal påvirkes af iii og iv
- Den observerede mA signal påvirkes af v, vi og vii
- Resultatet påvirkes af den kombinerede usikkerhed for differenstrykmålingen og viii.

Usikkerhedsberegningen foretages stepvis i afsnit 6.2.1 til 6.2.5 for at kunne sikre gennemskuelighed.

### 6.2.1 Usikkerhed på målt værdi

Den målte værdi er påvirket af lineariteten og driften. Da udstyret kun kalibreres én gang om året, er usikkerheden på drift 0,5 %.

Lineariteten er i forhold til aktuel værdi, hvorfor standardusikkerheden er  $\frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0,577\%$  af aflæst værdi eller svarende til 0,32 mbar.

Driften kan ligeledes omregnes til enheden mbar og bliver  $\frac{0,5\%}{\sqrt{3}} = 0,289\%$  af FS svarende til 1,16 mbar.

Den kombinerede usikkerhed på den målte værdi er herefter:

Ligning 6:

$$s(mv) = \sqrt{(0,32 \text{ mbar})^2 + (1,16 \text{ mbar})^2} = 1,2 \text{ mbar}$$

### 6.2.2 Usikkerhed på FS og NP

Signalstrømmen, I, (4 – 20 mA loop) beregnes som:

Ligning 7:

$$I [\text{mA}] = 4,0 [\text{mA}] + \frac{\text{målt værdi}}{\text{FS} - \text{NP}} \cdot 16 [\text{mA}]$$

Usikkerhederne på FS og NP vil således have betydning for måleområdet FS-NP og dermed værdien for beregnet mA.

FS værdien er påvirket af temperaturfølsomheden som er 0,02 %/K. Da dette er en tolerance, beregnes standardusikkerheden på FS som  $\frac{0,02 \frac{\%}{K} \cdot 5K}{\sqrt{3}} = 0,058\%$  af FS svarende til  $s(\text{FS}) = 0,023 \text{ mbar}$ .

Tilsvarende er nulpunktet påvirket af temperatur samt generel stabilitet. Begge er angivet som tolerancer.

NP temperaturfølsomhed beregnes til  $\frac{0,02 \frac{\%}{K} \cdot 5K}{\sqrt{3}} = 0,058\%$  af FS også svarende til 0,023 mbar.

Da nulpunktsstabiliteten på 0,5 % af FS også skal medtages (tolerance), hvorfor denne skal divideres med  $\sqrt{3}$ , så er den kombinerede usikkerhed på nulpunktet er:

Ligning 8:

$$s(NP) = \sqrt{(0,023 \text{ mbar})^2 + (1,154 \text{ mbar})^2} = 1,55 \text{ mbar}$$

### 6.2.3 Usikkerhed på strømstyrke

Strømstyrkesignalet beregnes som tidligere skrevet i ligning 6, hvor vi vælger at indføre en parameter X,

Ligning 9:

$$X = \frac{mv}{FS-NP}$$

hvor mv er målt værdi. Ligning 8 omskrives derfor til

$$I [mA] = 4,0 [mA] + X \cdot 16 [mA]$$

Den kombinerede standardusikkerhed på strømstyrken, s(X), skal beregnes ud fra standardusikkerhederne på de 3 parametre, som anvendes til beregning af X. Disse betegnes s(mv), s(FS) og s(NP).

Uden at introducere de dybereliggende mellemregninger kan det vises at variationen af  $I_B$  (følsomhed) som følge af meget små ændringer af mv, FS eller NP kan bestemmes som

- Følsomhed overfor s(mv) er  $\frac{1}{FS-NP}$
- Følsomhed overfor s(FS) er  $\frac{-mv}{(FS-NP)^2}$
- Følsomhed overfor s(NP) er  $\frac{mv}{(FS-NP)^2}$

Ved at indsætte værdierne for s(mv), s(FS) og s(NP) fra afsnittene 6.2.1 – 6.2.2, kan den kombinerede usikkerhed for X beregnes som

Ligning 10:

$$s(X) = \sqrt{\left(\frac{1}{FS-NP} s(mv)\right)^2 + \left(\frac{-mv}{(FS-NP)^2} s(FS)\right)^2 + \left(\frac{mv}{(FS-NP)^2} s(NP)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{400} 1,2\right)^2 + \left(\frac{-56}{(400)^2} 0,023\right)^2 + \left(\frac{56}{(400)^2} 1,55\right)^2} = 0,003$$

Ligning 11 kan også omskrives til relative standardusikkerheder (vises ikke i dette UE).

Ligning 11:

$$\frac{s(X)}{X} = \sqrt{\left(\frac{s(mv)}{mv}\right)^2 + \left(\frac{-s(FS)}{FS-NP}\right)^2 + \left(\frac{s(NP)}{FS-NP}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1,2}{56}\right)^2 + \left(\frac{-0,023}{400}\right)^2 + \left(\frac{1,55}{400}\right)^2} = 0,0218.$$

X er  $\frac{56 \text{ mbar}}{400 \text{ mbar}} = 0,14$ . s(X) er dermed  $0,0218 \cdot 0,14 = 0,003$  – det samme som beregnet med ligning 11.

Usikkerheden på strømmen i signalløpet er således  $0,003 \cdot 16 \text{ mA} = 0,048 \text{ mA}$  (se ligning 8).

Det antages, at spændingsforsyningen er særdeles stabil, hvorfor der ikke tages højde for dennes indflydelse på nulpunktet svarende til 4 mA.

Strømmen kan derefter skrives  $(6,24 \pm 0,05) \text{ mA}$ , da de 56 mbar på en range 0-400 mbar svarer til 6,24 mA (se ligning 8).

Signalet i forhold til nulpunktet på 4 mA kan omskrives til  $(2,24 \pm 0,05) \text{ mA}$  hvilket svarer til en relativ standardusikkerhed på  $0,05 \text{ mA} / 2,24 \text{ mA} \cdot 100 \% = 2,1 \%$ .

Usikkerheden på 0,048 mA kan også omregnes til mbar, da vi ved at 20 mA svarer til 400 mbar, og 4 mA svarer til 0 mbar. Ifølge ligning 8, svarer en strømstyrke usikkerhed på 0,048 mA således til en usikkerhed på den *målte værdi* af trykket på 1,2 mbar.

Det er ud fra disse beregninger muligt at fastslå at det er usikkerheden på den målte værdi, som udgør langt den største del af usikkerheden i denne situation. Jo tættere man kommer til 4,0 mA, jo større betydning vil mA loopet få for den samlede måleusikkerhed.

### 6.2.4 Usikkerhed på aflæst værdi

Strømstyrkesignalet konverteres via en 12-bit A/D konverter, hvor den maksimale opløsning er 4096. Et måleområde på 0-400 mbar kan således kun ses med en opløsning på  $400 \text{ mbar} / 4096 = 0,1 \text{ mbar}$ . Da vi ikke kender den sande værdi inden for dette måleområde, må den aflæste værdi skulle tilskrives en usikkerhed på  $\pm 1 \text{ bit} = \pm 0,1 \text{ mbar}$ .

Dette er en tolerance, hvorfor standardafvigelsen er  $\frac{0,1 \text{ mbar}}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ mbar}$ .



Usikkerheden på det samlede aflæste differenstræk er dermed

$$s(\Delta p) = \sqrt{(1,2 \text{ mbar})^2 + (0,058 \text{ mbar})^2} = 1,2 \text{ mbar}$$

Atmosfæretrykket svinger normal imellem 970 mbar og 1060 mbar med en normalfordeling (vi antager her 99 % konfidens). Lad os antage at atmosfæretrykket ikke måles, men er en fast parameter i SCADA systemet. I så fald vil der være en standardusikkerhed på atmosfæretrykket på  $(1060-970)/6 = 15$  mbar. (For mere info om SCADA systemer henvises til UE-A6)

Igen kan vi beregne standardusikkerheden på det målte/beregnete totaltryk,  $p$ , som

$$s(p) = \sqrt{(1,2 \text{ mbar})^2 + (15 \text{ mbar})^2} = 15 \text{ mbar}, \text{ og } 30 \text{ mbar ved } 95 \% \text{ konfidens.}$$

Det målte totaltryk er således  $((1013,25+56) \pm 30)$  mbar =  $(1069,25 \pm 30)$  mbar. Altså en relativ usikkerhed på 2,8 %. Bemærk at usikkerheden her primært er styret af målingen på atmosfæretrykket.

### 6.3 Opsummering på usikkerheder

Eksemplet med det simple manometer viser, at det med enkle midler kan lade sig gøre at opnå gode målinger, så længe vi arbejder med små trykforskelle. Det vil være urealistisk at tro på anvendelse af et urørs manometer til højtryksmålinger.

Eksemplet med måling af det absolutte tryk men med en differenstræk måler kan forekomme i virkelige anlæg. Det interessante i denne sammenhæng er at selv om målingen af differenstræk er god, så vil målingen af totaltrykket være dårlig som følge af det høje usikkerhedsniveau for atmosfæretrykket. Måling af totaltryk bør derfor altid foretages med totaltryksmåler og ikke differenstræksmålere.

I det viste eksempel havde ingen dele af signal loopet nogen betydende bidrag til den samlede usikkerhed. Ved helt lave målinger – det vil sige hvor strømmen i kredsen er tæt på 4 mA – vil usikkerhederne på signalløpet være betydende og dermed have en indflydelse på den samlede måleusikkerhed.

Afsnit 6.2 indeholder tung matematik. Læseren opfordres til at gennemgå eksemplet via UE-A6 regnearket.

## 7 Opsummering

Trykmåling er en af de mest anvendte måleteknikker i procesanlæg og systemer, hvor der skal køres efter energioptimal drift. Trykmåling er samtidig meget enkel, da man køber en trykmåler og monterer denne.

Dette enkle forløb kræver en periodisk kalibrering, hvilket i dag også er en enkelt aktivitet. Mange firmaer har deres egne instrumenter til kalibrering af trykmålere i feltet. Disse instrumenter sendes så periodevis ind til kontrol hos et firma, som har væsentligt bedre måleudstyr – for eksempel FORCE Technology, som i Danmark har ansvaret for at opretholde den nationale reference til det internationale samarbejde.

De færreste trykmålere 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.

Som det går igen ved alle måleteknikker, er måleteknikerens vigtigste redskaber hans usikkerhedsbudget og måleinstrument med tilhørende kalibreringscertifikat.

## 8 Læringsudbytte

Forudsætninger:

- Kendskab til UE-A1 introduktion til måleteknik og UE-A3 introduktion til usikkerhedsbudgetter.
- Anbefales at have kendskab UE-A6 signalkæder og aflæsning af måledata og UE-A5 usikkerheder og overholdelse af tolerancer.

Udbytte:

- Kritisk stillingtagen måling med trykmålere.
- Kendskab til fejlkilder ved trykmåling.
- Viden om forskellige måleprincipper til trykmåling.
- Kendskab til kalibrering trykmålere og fortolkning til kalibreringscertifikatet.

## 9 Bibliografi

- [1] J. J, »Arbejdstilsynet,« Marts 2017. [Online]. Available:  
<https://arbejdstilsynet.dk/da/regler/at-vejledninger/b/b-4-9-bestem-kontrolklasser-trykbaerende>. [Senest hentet eller vist den 13 November 2018].
- [2] M. J og L. V, Kvalitetsstyring og Måleteknik, Odense: PRAXIS - Nyt Teknisk Forlag, 2018.