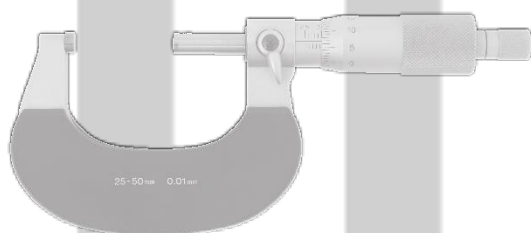


INTRODUKTION TIL FLOW- MÅLING

UNDERVISNINGSELEMENT

F1

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK

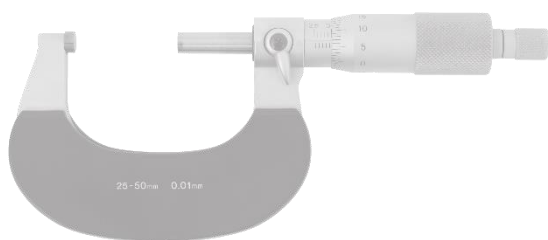


metrologi.dk

INTRODUKTION TIL FLOWMÅLING

Johan Bunde Kondrup og Erik Jensen, 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.

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

1 Indledning	1	5.1 Trykforskelle	12
Boks 1: "Flowmåling"	1	5.1.1 Relation differenstryk og flowrate	12
2 Måling af flow	3	5.1.2 Differenstryktransmitteren	13
2.1 Omregning imellem masse til volumen	3	5.1.3 Måleblænder	13
2.2 Omregning fra hastighed til volumen	3	5.1.4 Pitotrør	13
2.3 Hvad er væske og hvad er gas?	5	5.1.5 Rotameter / Variable areal måler	15
2.4 Viskositet	5	5.2 Lukket volumen	15
2.4.1 Fastlæggelse af viskositet	6	5.3 Skovlhjul (impuls)	15
2.4.2 Ikke Newtonske væsker	6	5.4 Lydbølger (ultralyd)	16
2.5 Flere-faset strømning	6	5.4.1 Måleprincip - ToF	16
2.6 Opsummering	7	5.4.2 Måleprincip - Doppler	17
3 Flowmåling i rør	7	5.5 Varmetransport	17
3.1 Laminart og turbulent flow	7	5.6 Tracing	17
3.2 Hastighedsprofiler	9	5.7 Coriolis	18
3.2.1 Flow forstyrrelse	9	5.8 Elektromagnetiske målere	19
3.2.2 Genetablering af fuldt udviklet flowprofil	10	5.9 Vortexmålere	19
4 Flowmåling udenfor rør	11	6 Opsummering	20
5 Måleprincipper	11	7 Bibliography	20

1 Indledning

Flowmåling med henblik på enten at fastlægge en hastighed eller et volumen er en af de centrale tekniske kompetencer, som mødes overalt i samfundet.

Flowmåling er at finde over alt og bruges blandt andet til at overvåge og styring af procesanlæg, udstyr til flyvemaskiner samt fastlæggelse af mængder til afregning imellem kunde og leverandør.



Figur 1: Tankanlæg til tankning af diesel eller benzin. Her kontrolleres om målingen er indenfor tolerancen.

Tankanlæg, Figur 1, indeholder en flowmåler for hver type af brændsel. Der er via lovgivningen fastlagt høje krav til nøjagtigheden, således at kunder ikke bliver snydt. Tankanlæg anvender blandt andet mekaniske målere baseret på lukket volumen.



Figur 2: Husinstallation til måling på varmt vand og koldt vand.

Det er ligeledes via lovgivningen fastlagt at den enkelte husstand afregnes afhængigt af eget forbrug af vand og varme. Figur 2 viser et eksempel på en forbrugsvandmåler. Historisk set er der anvendt mekaniske målere (f.eks. paddelhjul) men efterhånden er

Boks 1: "Flowmåling"

Udtrykket *flowmåling* er et almindeligt anvendt udtryk for måling på en bevægelse enten for at fastlægge en *massestrøm* eller *volumenstrøm* (eller tilsvarende *hastighed*). Flowmåling er et halvt-engelsk udtryk som tager udgangspunkt i det engelske "*flow measurement*".

Udenfor Danmark anvendes også udtrykket *strømningsmåler* (direkte oversat).

Der anvendes ofte udtrykket flowmåler og flowmeter om samme måler. I dette dokument anvendes udelukkende udtrykket flowmåler. Ifølge den danske ordbog [1] er et (flow)meter et instrument der måler noget bestemt og en måler [2] et apparat til at måle noget med. Går man i detaljer med ordvalget, så køber man en flowmåler hos en producent og installerer denne som et flowmeter.

elektroniske målere (ultral lyd) ofte anvendt. Disse er både mere nøjagtige og ikke påvirket af mekanisk slitage, samt de kan have flere funktionaliteter.

Hjemme hos naturgasforbrugeren findes der også en måler – se Figur 3.

Gasmåleren er (ofte) en bælgmåler, som er en ældre mekanisk konstruktion som fungerer uden elektrisk energi. Som for ved bl.a. vand og brændstof er der via lovgivningen fastlagt krav til nøjagtigheden, således at en regning til en forbruger ikke afviger for meget i forhold til det faktiske forbrug.



Figur 3: Måler til gas. Billedet af måleren til venstre er udlånt fra Flonidan. Installationen til højre indeholder også trykreguleringen.

Tappeanlæg til øl, vin, mælk eller andre væske anvender flowmålere til måling på fyldningen og derigennem sikrer, at der ikke kommer for lidt eller for meget i beholderen. Den elektromagnetiske flowmåler ses typisk i denne applikation.

Måling på luftstrømme inde i kanaler forekommer på både stor og lille skala. Figur 4 illustrerer måling på ventilationskanaler samt skorstene.



Figur 4: Måling på luftstrømme

For begge steder anvendes pitotrør, som gør det muligt at måle luftens (eller røggassens) hastighed i en specifik position og derigennem via mange målinger kunne fastslå mængden af luft/røggas.

Hvor måling på ventilation mere er et spørgsmål imellem en bygherre og entreprenør, så er måling på røggassen omfattet af miljølovgivningen og derigennem også pålagt et vist niveau for måleusikkerhed.

Procesanlæg – det måtte være forskellige ting såsom f.eks. et raffinaderi, mejeri eller insulinproduktion – indeholder et utal af målinger på flow. Der vil kunne være tale om måling på gas, vand, olie og røggas. Som det ses på Figur 5 er der også opbevaringstanke. Disse illustrerer at flowmåling ikke blot kan være måling på et medie i bevægelse men også en ændring af en lagerbeholdning over tid.



Figur 5: Procesanlæg – her raffinaderi

Fælles for de nævnte procesanlæg er at fejl i målinger kan have katastrofale følger. Se blot på Figur 5. An-

lægget ligger tæt på en by, hvor der ved fejlagtige målinger kan forekomme fare for udslip og i værste fald eksplosioner. Fejl i måling på en insulin produktion vil kunne have fatale konsekvenser for både den enkelte men også virksomheden, hvis troværdigheden forsvinder.

En knap så fatal situation vil opstå hvis vindmåleren (anemometer) på en vindmølle ikke virker. Se Figur 6. Dennes funktion er at sikre at enheden stoppes ved for høje vindhastigheder samt at indgå i styringen. En fejlmåling vil kunne være meget dyrt for ejeren af vindturbinen men ikke nødvendigvis fatalt.



Figur 6: Vindhastighedsmåling på en nacelle.

Uanset om der er tale om et fly, et procesanlæg eller en vandmåler til afregning af vandværkssvand, så skal flowmålingen være troværdig, ellers er den ubrugelig.

Troværdighed er direkte forbundet til usikkerhedsbudgettet for målingen og dermed usikkerheden på måleresultatet. Der kan ikke angives nogle generelle niveauer for hvornår en måler er troværdig eller mindre troværdig. Det afhænger af hvad der måles på og hvad resultatet skal anvendes til.

Etablering af troværdighed for en måling kræver at måleren er tilpasset det medie, som der måles på, samt til de øvrige procesmæssige forhold.

Dette undervisningselement giver en introduktion til flowmåling generelt. Elementerne F2 og F3 er uddybende dokumenter som beskæftiger sig med henholdsvis væsker og gasser.

Dette dokument beskriver derfor først flowmåling overordnet og forskellen på gasser og væsker samt tilfælde hvor der er begge dele tilstede. Derforuden beskrives viskositet som for både gasser og væsker har

betydning for hastighedsprofilerne i rørene og dermed betydning for målenøjagtigheden for nogle måleprincipper.

Sidst i undervisningselementet gives et indblik i nogle af de mest anvendte måleteknologier. Undervisningselementerne F2 og F3 vil beskrive anvendelsen af teknologierne ud fra det målte medie.

F2 og F3 vil også vise eksempler på måleusikkerheder og hvorledes der opstilles en usikkerhedsbudget.

2 Måling af flow

Flowmåling betyder måling af stoffer i bevægelse. Det kan være gasser, væsker, faste stoffer (i pulverform, f.eks. korn) eller en blanding af flere faser og/eller stoffer.

Når der måles på et medie er det vigtigt både at have kendskab til hvilket medie man måler på, samt at have taget stilling til hvilke måleenheder og usikkerhed som er nødvendige for at kunne bruge målingen til det ønskede formål. Ingen af de kendte principper anvendt som basis for flowmåling vil være i stand til at måle på alle medier, med alle output enheder og med lav usikkerhed. Nogle flowmålere er designet til at måle stoffets hastighed, andre dets volumen mens andre igen måler massestrømmen.

2.1 Omregning imellem masse til volumen

I nogle situationer skal resultaterne fra f.eks. en masseflowmåler omregnes til volumenflow eller hastighed og omvendt. En sådan omregning vil altid være behæftet med en vis usikkerhed.

Man kan omregne et masseflow til et volumenflow ud fra kendskabet til mediets densitet ved at benytte Ligning 1:

Ligning 1:

$$\dot{q} \left[\frac{m^3}{time} \right] = \frac{\dot{m} \left[\frac{kg}{time} \right]}{\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

Densiteten er afhængig af temperatur og tryk. Usikkerheden på volumenstrømmen er således ikke kun usikkerheden på masseflowet men også de tilhørende målinger af temperatur og tryk som skal anvendes til fastlæggelse af densiteten. For at minimere den overordnede usikkerhed er det derfor vigtigt ikke blot at vælge den rette flowmåler men også designe hele målesystemet med henblik på den ønskede måleusikkerhed. Det samme er naturligvis gældende ved omregning fra volumenflow til masseflow.

Laves der for eksempel en omregning fra masseflow til volumenflow på en måling af vand ved en målt temperatur på 50 °C, skal der regnes med en densitet på 0,98805 kg/l hvorimod hvis den faktiske temperatur er 52 °C vil densiteten være 0,98713 kg/l. Dette vil resultere i en fejl på 0,92 g/l svarende til en fejl på 0,09 %. Denne usikkerhed vil være større hvis densiteten på mediet er mere temperaturafhængig.

2.2 Omregning fra hastighed til volumen

Mange flowmålere der indikerer et volumenflow i et rør benytter fysiske principper til at bestemme flowets hastighed. Ved at kende hastigheden og samtidigt kende målerens indre areal med høj præcision kan måleren udregne volumenflowet.

Ligning 2:

$$\dot{q} \left[\frac{m^3}{time} \right] = v \left[\frac{m}{s} \right] * A [m^2] * 3600 \left[\frac{s}{time} \right]$$

Ved udregning af volumenflow fra hastighed og indre dimensioner indføres der således igen usikkerheder i forbindelse med nøjagtigheden af de dimensionsmålinger der ligger til grund for det indre areal. Derudover er det vigtigt at huske at et rør er fremstillet af fleksible materialer og dermed udvider sig med temperaturen og trykket. Geometrisk måling foretages (næsten) aldrig ved væskens temperatur og tryk under drift.

Dertil kommer betydningen af belægninger og ændring af den indre dimension på grund af korrosion eller lignende forhold.

Har man for eksempel en måler med en indre diameter på 25 mm. og en flowhastighed på 2 m/s vil volumenflowet være:

$$\dot{q} = 2 \frac{m}{s} * \left(\frac{0,025 m}{2} \right)^2 * \pi$$

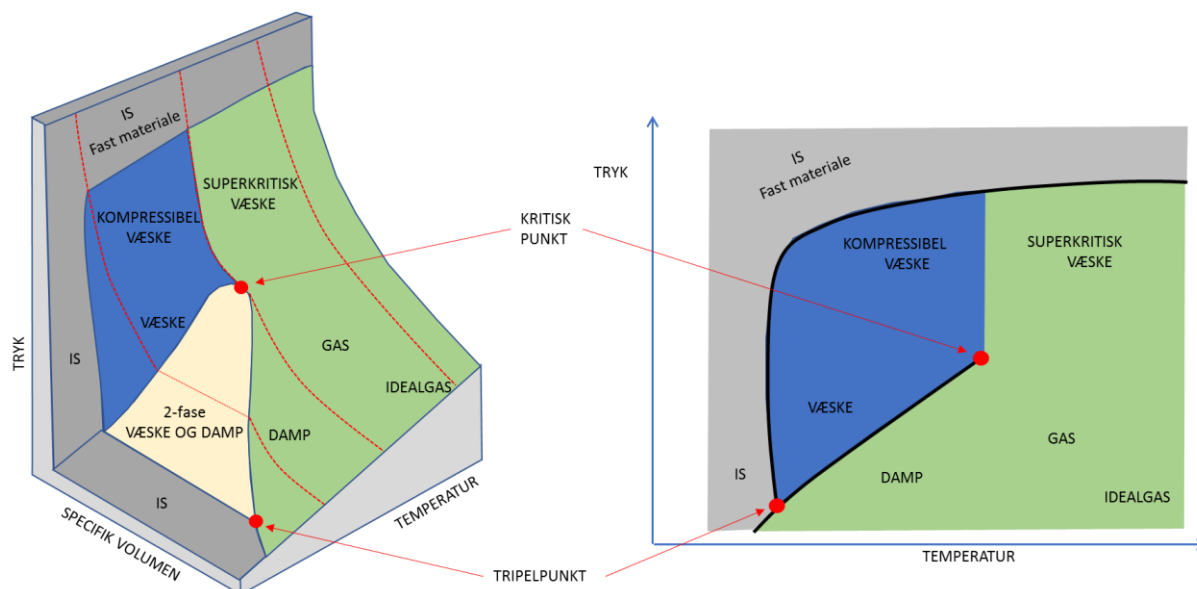
$$= 0,000982 m^3/s \text{ eller } 3534,29 l/time$$

Hvis diameteren i virkeligheden er 24,75 mm. vil flowet være 3463,96 l/time og det beregnede volumenflow vil derfor være ca. 2 % højere end det faktiske volumenflow.

Til sammenligning kan nævnes at tolerancen for en flowmåler i en husstandsinstallation er 6 % under de faktiske forhold men kun 3 % under typegodkendelsen.

Tabel 1 Symbol forklaring

Symbol	Målestørrelse	Enhed (kan være en faktor af denne enhed)
$\dot{q}$	Volumenflow	l/s
$\dot{m}$	Masseflow	kg/s
ρ	Densitet	kg/l
U	Strømningshastighed - middelværdi	m/s
A	Areal	m^2
D	Indre diameter	m
η	Dynamisk viskositet	$kg/(m * s)$
ν	Kinematisk viskositet	m^2/s
E	Spænding	V
B	Magnetfeltsdensiteten	Wb/m^2
L	Længde af leder	m
k eller K	Konstant	-
C	Lydens hastighed i mediet	m/s
T_{x-y}	Tid fra X til Y	s
θ	Vinkel	-
f_d	Doppler frekvens	Hz
f_t	Transmitter frekvens	Hz
K_u	Elastisk modulus	N/mm^2
I	Inertimoment (afhængig af udformning)	$kg * m^2$
ω	Vibrationsfrekvens	Hz
τ	Tidskonstant	s



Figur 7: PvT diagram - generaliseret version. Bemærk at omdannelse af superkritisk væske til fast stof lignende tilstand (is) sker ved ekstreme tryk, hvorfor dette ikke er medtaget i de fleste PvT diagrammer. Specifik volumen er volumenet af en masseenhed og dermed omvendt i forhold til densiteten.

2.3 Hvad er væske og hvad er gas?

For alle medier gælder at der uanset gas eller væskefase er en entydig sammenhæng mellem densitet, tryk og temperatur. Tegnes denne sammenhæng op i et P-v-T diagram, så opnås en visuel beskrivelse af tilstandene – fast stof, væske eller gas.

Figur 7 viser en tilfældig P-v-T overflade med tilhørende tryk-temperatur diagram (ikke skalerbart).

Ses der bort fra faststof fasen (is) så er forskellen imellem idealgasser og væsker udelukkende afstanden imellem molekylerne og hvorledes disse er indbyrdes forbundet. Væske og gas skal derfor ikke betragtes som nogle forskellige medier men derimod betragtes som et medie under forskellige tryk og temperaturer set i forhold til det kritiske punkt og tripelpunktet.

Det kritiske punkt er det højeste tryk og temperatur tilstand, hvor der kan findes en 2-fase tilstand bestående af både damp og væske. Ved tryk og temperaturer under det kritiske punkt er det muligt at etablere en tilstand med både væske og gas (damp).

Tripelpunktet er den temperatur og tryk, hvori det er muligt at have en stabil tilstand med både is, væske og damp. Vands tripelpunkt er ca. 0,01 °C og 0,006 atm. Ved lavere temperaturer kan is overgå direkte fra krystalformen til damp.

Selv om væske normalt betragtes som inkompressibelt, så kan væske komprimeres. Uden at gå i detaljer, så er udbredelsen af lyd i et medie trykbølger og dermed et udtryk for at et medie kan komprimeres.

Lærebøger om termodynamik tager ofte udgangspunkt i idealgasser, som er kendetegnet ved at der er en simpel sammenhæng imellem tryk, temperatur og molvægt. Idealgasser er gasser, hvor molekylerne har en stor indbyrdes afstand og findes derfor ved relativt lave tryk og høje temperaturer (relativt i forhold til det kritiske punkt). Luft kan ved lave overtryk og almindelige temperaturer betragtes som idealgas. Men komprimeres gassen i procesanlæg, så gælder den simple sammenhæng ikke nødvendigvis længere. Der henvises til undervisningselement *F3 Flowmåling – Gas*, som omhandler flowmåling på gasser.

2.4 Viskositet

Ud over tryk og temperatur (altså reelt fastlæggelse af densiteten) så er viskositeten en central parameter til beskrivelse af et flow og dermed af betydning for flowmåling. Dette beskrives nærmere i afsnit 3.

Der bruges både betegnelsen *dynamisk* viskositet, μ , og *kinematisk* viskositet, ν .

Dynamisk viskositet – også kaldet absolut viskositet – beskriver den indre friktion i et medie og dermed

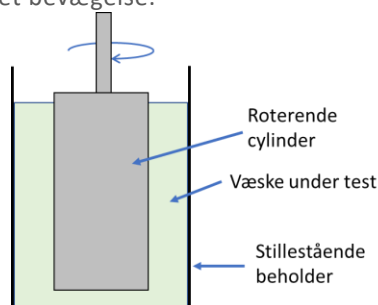
trægheden. Den dynamiske viskositet er tilnærmelsesvis uafhængig af trykket men afhængigt af temperaturen. For væske falder viskositeten ved stigende temperaturer og for (ideal)gasser modsat.

Den kinematiske viskositet beskriver forholdet imellem den dynamiske viskositet og densiteten af et medie. Den betegnes også som forholdet imellem masseinerti og indre friktion for et flow.

De forskellige typer viskositet kan i billedsprog beskrives således at den kinematiske viskositet beskriver mediet træghed mod at bevæge sig i et rør, hvorimod den dynamiske viskositet er trægheden imod at noget bevæger sig igennem mediet.

2.4.1 Fastlæggelse af viskositet

Der findes to grundlæggende metoder til måling af viskositeten – tvungen roterende bevægelse og tyngdekraft drevet bevægelse.



Figur 8: Koncentriske cylindre til måling af dynamisk viskositet

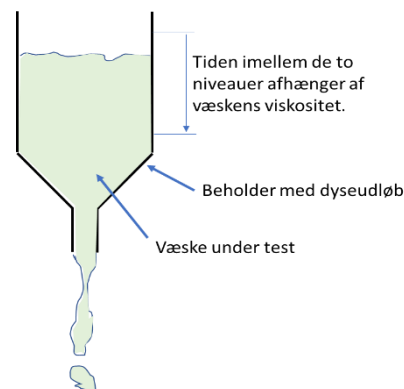
Direkte måling af den dynamiske viskositet kan ske ved at have mediet imellem to koncentriske cylindre, som har en indbyrdes hastighedsforskel som illustreret på Figur 8.

Momentet der er nødvendigt til at rotere den indre cylinder er proportionalt med den dynamiske viskositet.

Direkte måling af den kinematiske viskositet sker ved at lade mediet flyde igennem et tyndt rør eller dyse under påvirkning af en ydre volumenkraft, se Figur 9.

Tiden nødvendigt til at en kendt mængde af mediet passerer igennem det tynde rør er proportionalt med den kinematiske viskositet.

For gasser anvendes samme teknikker – dog er tyngdekraften anvendt til måling af den kinematiske viskositet erstattet af en trykforskel.



Figur 9: Måling af kinematisk viskositet

2.4.2 Ikke Newtonske væsker

Anvendes de to roterende cylindre til fastlæggelse af vands viskositet vil det opdages, at viskositeten er tilnærmelsesvis uafhængigt af hvor hurtigt cylinderen roterer og over tid, dog ved samme temperatur. Dette gælder ikke for alle medier. Vand kaldes for en newtonsk væske hvorfor de andre væsker meget naturligt kaldes ikke-newtonske. Maling, honning og ketchup er eksempler på ikke-newtonske væsker.

Pseudoplastiske væsker – f.eks. ketchup – er kendetegnet ved at væsken bliver mindre trægt, jo hurtigere der røres rundt. Ryst derfor ketchupflasken kraftigt, hvis du vil have noget ud hurtigt. For *dilatante* væsker sker det modsatte. Jo hurtigere der røres, jo mere trægt bliver væsken. Et eksempel er en blanding af majsstivelse og vand.

Tixotropiske og *reopektiske* væsker er betegnelsen for væsker, hvor trægheden stiger eller falder over tid. Væsken kan samtidigt være en pseudoplastisk eller dilatant væske. Ketchup er et eksempel på et tixotropisk væske, som når flasken er rørt virker tyndtflydende men ved stilstand efter lidt tid igen bliver trægt.

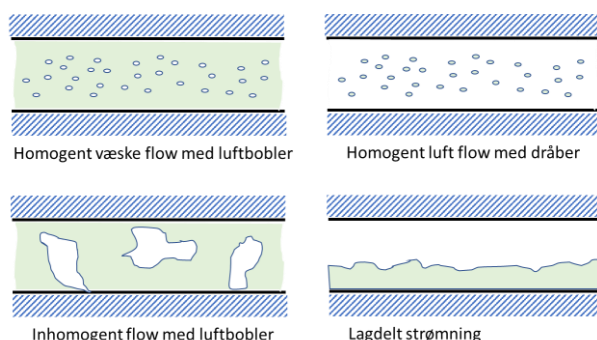
2.5 Flere-faset strømning

Medier kan som vist på Figur 10 have flere faser samtidigt. Er et medie en blanding af to eller flere medier, så kan der være flere faser samtidigt selv om det enkelte medie kun forefindes i én fase. Eksempler på

dette er en luft/vand blanding (regnvejr) eller luftholdigt vand med mere luft end der kan absorberes i vandet.

Et specialtilfælde indenfor olie og gasindustrien er multifase, hvor der er gas, olie og vand. Da disse tre medier ikke er indbyrdes opløselige under normale forhold, så vil der opstå et væskeflow hvor medierne enten er pænt lagdelte eller blandet sammen. Dette gælder også for før nævnte blanding af vand og luft.

Figur 10 illustrerer forskellige 2-fasede strømninger af en luft-vandblanding. Jo højere hastighed jo mindre tendens til lagdeling.



Figur 10: Eksempler på 2-faset strømning i rør. Mængden af de enkelte faser samt hastighederne er bestemmende for hvorledes strømningen ser ud i røret.

Den vigtigste læring er at ved flowmåling skal man vide hvorledes strømningen ser ud. Det er kun få måleteknikker, som vil være i stand til at kunne måle på fler-fasede strømninger. I praksis forsøges altid enten at lave en homogen blanding via en mixer eller at separere mediet i hver fase og derefter måle på hver fase individuelt.

Dette element vil fremadrettet kun fokusere på enkelt-fase flow.

2.6 Opsummering

Den gode flowmåling kræver at der er ved etablering af målepunktet og valg af måleudstyr er taget højde for ikke blot mediet temperatur og tryk men også hvorledes flowet opfører sig.

Tryk og temperatur er nøgleparametre i langt de fleste installationer. Ud fra disse parametre er det muligt at gætte ikke blot på en samlet densitet men også at forudsige antallet af faser og – kombineret med massestrømmen – også forudsige noget om hvorledes strømningen er inde i et rør.

Viskositeten er den 3. vigtige parameter og betydende for hvorledes flowet forløber

3 Flowmåling i rør

For at en måling af flow i et rør kan foretages korrekt skal flowmåleren være væskefyldt og for nogle måleprincipper skal hastighedsprofilen i væsken være så tæt på den fuldt udviklede hastighedsprofil som muligt. Med andre ord så skal fler-faset strømning undgås.

Enkelte producenter angiver at være i stand til at måle på delvist fyldte rør. Måleusikkerheden er derimod højere end ved fyldte rør.

Målenøjagtigheden er for nogle måleteknologier afhængige af fordelingen af hastigheden (hastighedsprofilen), hvorfor flowforstyrrelser inden flowmåleren bør undgås. En flowforstyrrelse kan være en bøjning, en ventil, en indsnævring eller andet der forstyrrer flowet. Nogle teknologier er mere overfølsomme over for flowforstyrrelser, så alt efter flowforstyrrelse skal der medtænkes lige rørstrækninger mellem forstyrrelsen og flowmåleren. Alt efter forstyrrelse kan denne lige rørstrækning være 10 diameter lang eller over 40 diameter langt før, at der er igen etableret det ideelle flowprofil.

3.1 Laminart og turbulent flow

Der er forskellige typer af ideelle hastighedsprofiler. Normalt inddeles profilerne i laminart og turbulent flow. Hvor laminart flow er entydigt, så vil der ved turbulent flow være tale om forskellige hastighedsprofiler alt efter hastigheden af volumenflowet.

Laminart flow betegner en strømning af væske, hvor flowet i røret foregår i lag uden udveksling i mellem lagene.

Væsken bevæger sig som en samlet, ensformig masse.

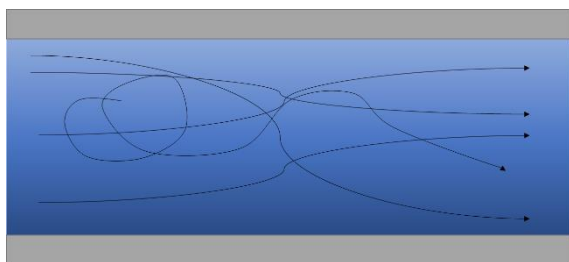


Figur 11: Laminart flow

Laminart flow forekommer ved lave hastigheder. Figur 11 viser et laminart flow, hvor hver pil repræsenterer væskens bevægelse og hastighed.

Bevægelsen i laminart flow er ensformig og konstant.

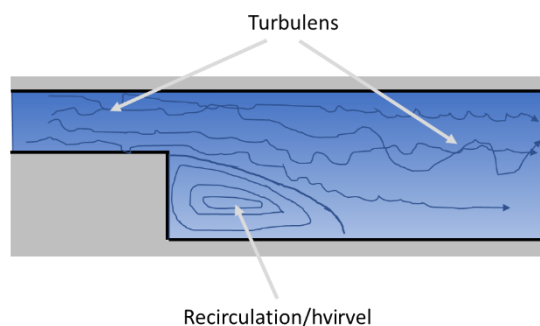
Den enkelte partikel bevæger sig i samme retning som alle andre partikler, og de lokale hastigheder i flowet er ensformige.



Figur 12: Turbulent flow

Turbulent flow betegner et flow, hvor den enkelte vandpartikels bevægelse bedst kan beskrives som en ustabil bevægelse overlejret på den aksiale hastighed, dette er illustreret på figur 12. Vandpartiklerne her altså et mere kaotisk bevægelsesmønster. Turbulent flow opstår ved høje flowhastigheder. Ved turbulent flow sker der således en udveksling på tværs af strømningslagene, hvilket betyder at det fuldt udviklede hastighedsprofil er mere ensformigt, eller fladt som det ses på Figur 14.

I både laminart og turbulent flow kan der forekomme recirkulation, hvor strømmingen separerer omkring flowforstyrrelser og danner hvirvler, se figur 13. Disse hvirvler eller roterende bevægelser må ikke forveksles med turbulens, da der er tale om to forskellige mekanismer. I modsætning til turbulens, så vil hastighedsprofilen overgå til det fuldt udviklede hastighedsprofil og recirkulationer vil være forsvundet, hvis det efterfølgende rørstykke er tilstrækkeligt langt. Turbulensen vil bestå.



Figur 13: Recirkulationer og turbulens

Reynoldstallet, Re , anvendes normalt til at indikere om strømmingen er turbulent eller laminart. Reynoldstallet udregnes som Ligning 3.

Ligning 3:

$$Re = \frac{\rho U D}{\eta} = \frac{U D}{\nu}$$

Reynolds tallet er en sammenhæng mellem hastighed, rørets dimension og væskens kinematiske viskositet.

Ligning 4:

$$Re = \frac{U D}{\nu} = \frac{D}{\nu} \cdot \frac{\dot{q}}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} = \frac{4 \dot{q}}{\nu \pi D}$$

Ligning 4 er en omskrivning af ligning 3 således at Reynolds tallet kan beregnes ud fra diameter og volumenstrømmen. Ligning 4 viser også at øget volumenstrøm i samme rør giver højere Reynolds tal hvorimod en øgning af diameteren ved samme volumenstrøm giver en reduceret Reynolds tal (som følge af at hastigheden ændres med kvadratet på diameteren).

Reynolds tallet er det mest anvendte dimensionsløse størrelse til beskrivelse af et flow. Uanset medie så vil det samme Reynolds tal medføre samme hastighedsprofil i et rør for newtonske væsker.

Som tommelfingerregel gælder at hvis Reynolds tal er under 2.300 vil flowet være laminart. Hvis tallet er over 3.000 betragtes flowet som turbulent (nogle kilder angiver 10.000). Hvis flowet er i mellem 2300 og 3000 [3] er det i et overgangsstadie, hvor det kan enten kan være laminart eller turbulent.

Eksempel med vand: En typisk vandstrømning i et ½" vandrør er 12 liter/minut. Da den indvendige diameter er ca. 22 mm. Den kinematiske viskositet for vandet er ca. $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Reynoldstallet kan derfor beregnes til:

$$Re = \frac{4 \dot{q}}{\nu \pi D} = \frac{4 \cdot 12 \frac{\text{liter}}{\text{minut}} \cdot \frac{1 \text{ minut}}{60 \text{ sekunder}} \cdot \frac{1000 \frac{\text{liter}}{\text{m}^3}}{1000}}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \pi \cdot 22 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} = 11575$$

For at opnå laminare strømningsforhold i et ½" rør skal man således ned omkring 3 liter/minut, hvilket er meget langsomt. Til sammenligning har man normalt ca. 10 liter/minut i en vandhane og ned til 4 liter/minut med vandsparer perlator.

Eksempel med luft: En typisk luftstrømning i en $\varnothing 100$ mm ventilationskanal kan være $75 \text{ m}^3/\text{time}$ (ventilators nominelle flow).

Den kinematiske viskositet for luft er ca. $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Reynoldstallet kan derfor beregnes til:

$$Re = \frac{4 \dot{q}}{\nu \pi D} = \frac{4 \cdot 75 \frac{\text{m}^3}{\text{time}} \cdot \frac{1 \text{ time}}{3600 \text{ sekunder}}}{15 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \pi \cdot 100 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} = 17685$$

For at opnå laminare strømningsforhold i dette $\varnothing 100$ mm rør, så skal volumenstrømmen således ned omkring $12,5 \text{ m}^3/\text{time}$.

Laminart flow er ikke altid ønskeligt. Den manglende turbulens betyder, at der er større risiko for aflejringer.

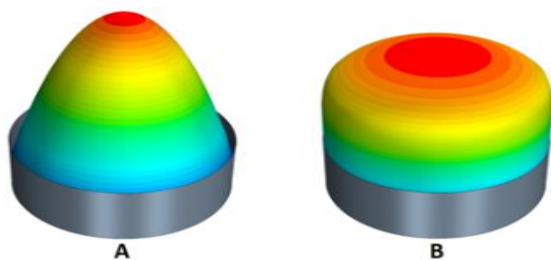
3.2 Hastighedsprofiler

Hastighedsprofilen i en væske der flyder i et rør viser en indikation af hvor hurtigt væsken flyder i relation til afstand til rørvæggen. Hastigheden stiger gradvist fra kanten af røret til centrum af røret.

Det eneste som bremser flowet er friktionen imod rørvæggen, hvor der er nul hastighed (Uden friktion imellem røret og væsken ville væsken flytte sig som en massiv stang).

I midten af røret vil væsken kun være bremset af de omgivende lag af væske, hvorfor viskositeten og turbulensniveauet bestemmer størrelsen af hastighedsvariationen.

Når der er opnået ligevægt – dvs. når hastighedsprofilen ikke udvikler sig mere – tales om et fuldt udviklet profil, se Figur 14.



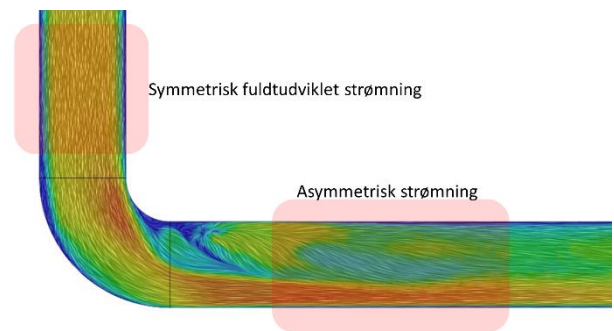
Figur 14: Fuldt udviklede hastighedsprofiler (rør) ved henholdsvis laminar (A) og turbulent (B)

Hastigheden er højest i centrum og symmetrisk i alle retninger. Hvis flowet er laminart er hastighedsprofilen mere spids end ved turbulent flow, der er altså

større variation fra rørets væg når der ikke er udveksling mellem lagene.

3.2.1 Flow forstyrrelse

Error! Reference source not found. viser en asymmetrisk aksial flowprofil, hvor hastigheden er højere i den øverste del af røret. Hastighedsprofilen svarer til hvor der findes ved udløbet af en glat rørbøjning.



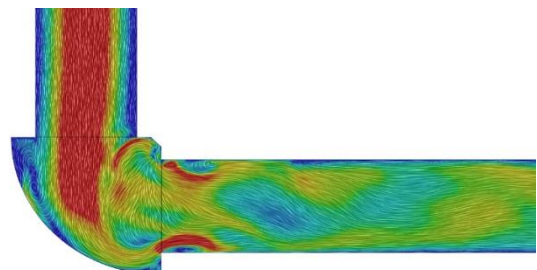
Figur 15 Symmetrisk profil inden bøjningen, asymmetrisk efter bøjning

Hastighedsprofilen kan også opstå efter en delvist lukket kuglehane eller et filter element. For rørbøjningen vil den asymmetriske aksiale hastighedsfordeling være akkompagneret af to spejlvendte roterende strømninger i tværsnittet.

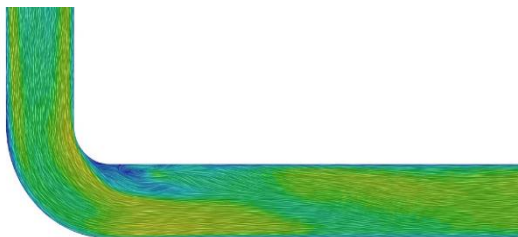
Asymmetriske flowprofiler i et homogent medie kan generelt forekomme som følge af forstyrrelser af flowet.

Figur 16 viser flowet igennem en rørbøjning etableret med gevind og ikke med glatte rør. Her ses at selv om hastighedsprofilen inden rørbøjningen er tilnærmelsesvis fuldt udviklet, så er der efter samlingen en mere kaotisk profil hvor hvirvelstrukturen er ustabil.

Dette skyldes at dimensionsovergange omkring vinkelfittingen skaber nogle recirkulationszoner og dermed grobund for en dynamisk hvirvelstruktur.



Figur 16: Flowforstyrrelse i rørbøjning med gevindsamling.



Figur 17: Flowforstyrrelse efter dobbelt rørbøjning.

Placeres to rørbøjninger efter hinanden vil der imellem de to være et flow svarende til Figur 17. Nedstrøms for den 2. rørbøjning vil det aksiale hastighedsprofil derimod være mere plant men der vil til gengæld være etableret en strømning svarende til en roterende cylinder. Dette er illustreret i Figur 17.

3.2.2 Genetablering af fuldt udviklet flowprofil

Tryktabet i en rørstrømning er udtryk for energitabet i strømmingen, som skyldes friktion imellem rørvæg og væsken samt den indre friktion i væsken som følge af turbulensen. For en uendelig lang rørstrækning vil flowprofilet altid opnå et stabilt niveau idet dette er udtryk for laveste energitab i strømmingen. Længden på den nødvendige rørstrækning til genetablering af det fuldtudviklede hastighedsprofil afhænger af forstyrrelsens type.

Forstyrrelsen fra en simpel rørbøjning vil normalt være væk efter 30-40D (1D = En gange rørets diameter omregnet til længde). Den roterende strømning såsom nedstrøms for en dobbelt rørbøjning i 2 planer antages ofte at være væk efter 40D men er observeret mere end 150D nedstrøms. Dette skyldes at den roterende bevægelse har mindre hastighedsgradienter inde i væskestrømningen og dermed lavere energitab.

I praksis vil 10D være nok for de fleste måleinstallationer og 15D for mere følsomme flowmålere. Dette skyldes at recirkulationer er energikrævende og dermed hurtigt dæmpes ud af en væskestrømning, hvorefter den helt lange rørstrækning bruges til at omforme det aksiale hastighedsprofil til det ideelle profil.

Etablering af en laminar strømning kræver ligeledes en længere strækning end turbulent strømning, da overførsel af energi imellem væsken i centret af røret og væsken ved vægen sker ved friktion imellem lag af strømmende væske og ikke turbulens.

Den nødvendige rørlængde for et fuldtudviklet flow startende med et helt fladt hastighedsprofil er for et laminart flow ca. $0,05 \cdot Re$, hvilket ved $Re=2300$ svarer til 115 D. For turbulent flow angives en længde på 50-150 D [4].

Som det fremgår af figur 14 er flowprofilen mere flad ved turbulent flow end ved et laminart flow. Dette skyldes den indre udveksling af energi i mediet, og er årsagen til at et laminart flow tager længere om at blive fuldt udviklet end et turbulent. Det flade flowprofil ved turbulent flow er mere ideelt for visse måleteknologier end den spidse profil ved laminart flow.

Der er en række redskaber man kan bruge til at korrigere for asymmetriske flowprofiler, samt flow rotation og recirkulation. Her kan blandt andet nævnes plade straighteners eller rør straighteners.

De ideelle forhold for måling på flow i et rør eksisterer ikke i virkeligheden. Det ideelle forhold omfatter foruden fuld kontrol af væskens homogenitet, tryk, temperatur og flowprofil også at der er kontrol på de omgivende forhold såsom lufttryk, temperatur og fugtighed. Hertil kommer tekniske forhold såsom at væsken skal være pulsationsfri og at nogle måleteknologier ydermere kræver fuld kontrol over indspændingsforhold og vibrationsniveau. I kalibreringslaboratorier tilstræbes det at komme så tæt på ideelle forhold som muligt, men da måleren sjældent skal fungere ved ideelle forhold kan det i visse tilfælde være nødvendigt at kalibrere måleren i den installation den skal bruges i.

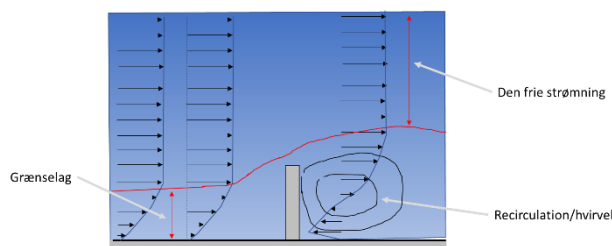
4 Flowmåling udenfor rør

Flowmåling udenfor rørsystemer (f.eks. måling af luftstrømninger eller flowmåling i kanaler eller floder) er meget lig flowmåling inde i rør. Det er ikke muligt som for rør at lave en volumetrisk måling men derimod kun punktmålinger af hastighederne i et antal punkter og derudfra omregne til en volumenstrøm hvis ønsket.

Fælles for strømning inde i et rør og udenfor et rør er fænomenet "grænselag".

Grænselaget er den del af væsken der varierer i hastighed grundet friktion mellem væske og beholder.

Grænselaget i et rør omkredser hele flowet, ser man igen på Figur 14 er den røde del af væsken fri strøm, mens den resterende del er grænselag. I praksis vil flowet i et rørsystem udelukkende bestå af grænse-

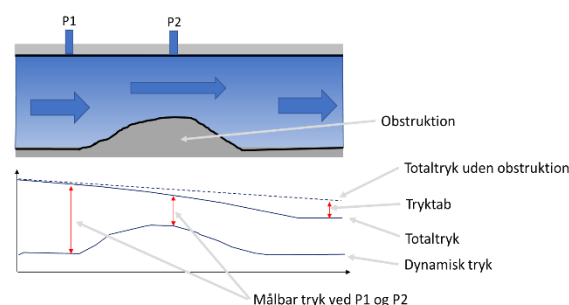


Figur 18: Grænselag, hvirvler og fristrøms hastighed.

lag, da der altid vil være intern friktion. I åbne kanaler, f.eks. en å eller bæk, vil grænselaget være nær bunden og bredden, se Figur 18, da det er her der dannes flowforstyrrelser og friktion.

I åbne områder er der ligeledes mulighed for hvirveldannelse. Det er derfor vigtigt at man ved måling i åbne område er opmærksom på om der måles på den sande flow eller om der er andre forhold, som har indflydelse. Et eksempel er måling af vindhastigheden i byområder. Alt efter vindretningen kan husene enten danne læ eller forstærke luftstrømmen.

Det samme gør sig gældende ved måling i åbne væskekanaler, f.eks. en bæk, å eller flod. Den generelle teknik er hér at foretage flere flowmåling (hastigheds-måling) på forskellige dybder og afstande til vægge/kanter hvorefter volumenstrømmen fastlægges ved at sammenkoble det geometriske tværsnit og de målte flow hastigheder. Som det kendes fra vandløb, så stiger vandstanden i en kanal når der strøm-



Figur 19: Principtegning for differensstryksbaseret måling. Bemærk at der er et blivende tryktab.

mer meget vand igennem sammen. Dette kan udnyttes til måling i åbne kanaler. Hvis der i kanalen er placeret en delvis blokering (fra bunden), så vil højden af vandet over denne blokering være en funktion af vandmængden. Højden kan måles via principper såsom radar eller trykmåling.

Der henvises til søgning på internettet for yderligere information om flowmåling i åbne kanaler.

5 Måleprincipper

Der findes et utal af forskellige målertyper der benytter forskellige måleprincipper. Grundlæggende kan disse opdeles i mekaniske målere og elektroniske målere.

Mekaniske målere drives af det flow, som løber igennem måleren og behøver derfor ikke en strømforsyning for at fungere.

Der er et større udbud af elektroniske målere. En elektronisk måler er opbygget af flere dele, hvoraf nogle af delene også kan udnytte mekaniske principper til at måle flowet. Den del der er i kontakt med væsken kaldes transduceren. Transduceren skaber et signal som afhænger af flowet gennem måleren. Det signal sendes videre til en transmitter. Transmitteren kan på

baggrund af signalet bestemme flowet via en flow-computer eller videresende det rå signal. Transmitteren kan også indeholde en displayenhed der kan vise operatøren det aktuelle flow, en optalt masse eller volumen samt andre beregnede værdier.

I dette afsnit gennemgås kun de mest anvendte principper og kun overfladisk. Der henvises til speciallitteratur og leverandør data for de enkelte teknikker.

5.1 Trykforskelle

Flowmåling baseret på trykforskel findes bl.a. som måleblænder, venturirør, V-cones, pitotrør og variabel areal metre (VA meter). Alle tager udgangspunkt i at der i et rør sker et målbart trykfald som følge af et flow. Trykfaldet kan kontrolleres lokalt ved at der etableres en obstruktion eller formindskelse af rørtværsnittet, hvorved det målbare (statiske) tryk ændres ved at øge det dynamiske tryk. En tryktransmitter måler det statiske tryk. Dette er illustreret på Figur 19.

Et langt lige rør kan i princippet også anvendes. Der er dog ikke tale om skift imellem statisk og dynamisk tryk men være tale om et tryktab, som vil være en funktion af væskestrømmen.

5.1.1 Relation differenstryk og flowrate

Ud fra Bernouillis energiligning kan totaltrykket beskrives som

Ligning 5:

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

P er det statiske (målbare) tryk, ρ er mediets densitet, v er mediets hastighed, g er tyngdekraften og h er den hydrostatisk højde.

Ledet $\frac{1}{2}\rho v^2$ er det dynamiske tryk og ρgh det hydrostatiske tryk.

Vand har en densitet på ca. 999,2 kg/m³ ved 15 °C. Med en tyngdeacceleration på 9,82 m/s² betyder dette således at en vandsøjle på 10 m med stillestående vand udviser et tryk på

Ligning 6:

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot g \cdot h \\ &= 999,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10,0 \text{ mVs} \\ &= 98.121,44 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} = 0,98 \text{ bar} \end{aligned}$$

Tommelfingerreglen om at 10 mVs svarer til 1 bar ved normale udendørstemperaturer er således indenfor en fejlmargen på 2-3 % alt efter temperaturen.

Af Ligning 5 fremgår at hvis hastigheden ændres uden at den hydrostatisk tryk ændres (og uden nævneværdigt trykfald), så må det statiske tryk også ændres.

Ligning 7:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2$$

En måleblænde eller venturirør ændrer rørtværsnittet, A , hvorfor hastigheden derfor må være højere i den lille tværsnit end det store, da det er samme mængde, som strømmer igennem. Dvs. volumenstrøm = $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$. Sammenhængen imellem et målt differenstryk og flowrate er derfor skrevet forenklet

Ligning 8:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{A_2 \cdot v_1}{A_1} \right)^2$$

eller skrevet som differenstryk som funktion af v_1

Ligning 9:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \cdot \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right)$$

Det dynamiske tryk genereret som følge af arealformindskelsen er således Δp .

Eksempel:

Antages at der strømmer 100 m³/h vand ved 10 °C igennem et ø200 mm rør, som via en venturi form indsnævres til ø50 mm i kværken midlertidigt inden den igen udvides til ø200 mm. Systemtrykket før måleren er 4 barg. Vandets densitet er 999,8 kg/m³.

Arealerne A_1 og A_2 og dermed hastighederne v_1 og v_2 beregnes til henholdsvis

Ligning 10:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\varnothing 200}{1000} \right)^2 = 0,0314159 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\varnothing 50}{1000} \right)^2 = 0,0078540 \text{ m}^2$$

$$v_1 = \frac{\dot{q}}{A_1 \cdot 3600} = 0,884 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 = \frac{\dot{q}}{A_2 \cdot 3600} = 3,537 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Det dynamiske tryk og differenstrøkket målt kan således beregnes til

Ligning 11:

$$p_{dyn,1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = 0,5 \cdot 999,8 \cdot 0,884^2 = 390,6 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{dyn} = 0,5 \cdot 999,8 \cdot 0,884^2 \cdot \left(1 - \frac{0,007854^2}{0,0314159^2}\right) \\ = 366,3 \text{ Pa} = 3,7 \text{ mbar}$$

Differenstransmitteren måler således 3,7 mbar, hvilket svarer til en vandsøjle på ca. 3.7 cm.

I forbindelse med fjernvarmeinstallationer anvendes ofte noget som kaldes en blandesløjfe. Her er det kulturen at installere en strengreguleringsventil med indbygget venturimåler. Er der tale om en fjernkøling, så kan der være tale om anvendelse af glykol tilsat vand og ikke rent postevand.

En 30% (polyethylen) glykol blanding har ved 10 °C en densitet på ca. 1,12 g/cm³ hvilket betyder at blandingen har en samlet densitet på 0,7*999,8+0,3*1120 = 1036 kg/m³.

Dette betyder et differenstryk på 3,83 mbar. Umiddelbart er det ikke den store forskel, men regnes tilbage til flowrate så svarer dette differenstryk til en vand-flowrate på ca. 102 m³/h eller 2 % mere.

Ønskes en høj præcision skal der derfor være kendskab til densiteten.

Ligning 6 kan ligeledes omskrives til

Ligning 12:

$$\text{flowrate (volumen)} = \text{konstant} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho}}$$

$$\text{flowrate (masse)} = \text{konstant} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot \Delta P}{\frac{1}{2}}}$$

konstant er en funktion af medie og diameterforhold.

Omsætning fra statisk til dynamisk tryk og tilbage igen er ikke tabsfrit. Der vil være et tryktab som følge af hastighedsændringerne. Dette tryktab kan typisk være op til 30 % af det ekstra dynamiske tryk grundet dimensionsændringen.

5.1.2 Differensstrykstransmitteren

Det er vigtigt at huske på at der er tale om ikke lineær konvertering imellem flow, højde og tryk. Dette giver

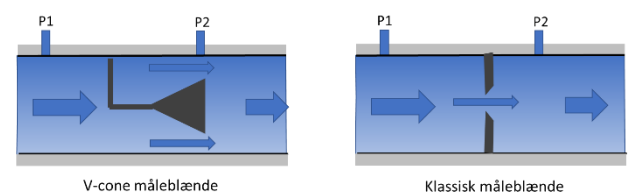
yderligere en usikkerhed i målingerne. Differensstrykstransmittere kan generelt sættes op til at lave en kvadratsudregning således at et mA signal vil være lineær i forhold til flowraten. Det er derfor uhyre vigtigt at man ved installation af målere og kvalitetskontroller er opmærksom på konfigureringen af transmitteren og om denne leverer et differenstryk eller kvadratroden af samme.

Differensstrykmålere anvendes hvor der er brug for en simpel måling og hvor der kan tillades større måleusikkerheder. Fordelen er en lav pris og driftssikker konstruktion. Ulempen er en høj usikkerhed og et lavt dynamisk område, da flow er proportionalt med tryk². Mindste troværdige differenstryk bør være 10 mbar og højeste for eksempel 200-300 mbar ved maksimalt flow. Dette giver et dynamisk område på 1:4.5.

Differensstrykmålere bør derfor kun installeres, hvor der er en lav variation af flowraten, dog er de gode til at indikere små ændringer i flowet.

5.1.3 Måleblænder

For V-cones, venturirør og måleblænder er den måletekniske udfordring at undgå fejlkilder til differensstryk og sikre at der måles en tilstrækkelig højt differenstryk (> 10 mbar) i forhold til måleusikkerheden på differensstrykstransmitteren.



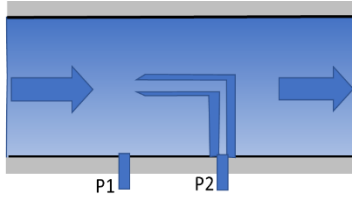
Figur 20 Principtegning for differensstrykbaseret måling.

Figur 20 viser nogle eksempler på måleblænder. Disse kan fås både som kompakte eller som simple blænder hvorefter man selv skal etablere impulsrør til transmitteren fra måleområdet.

5.1.4 Pitotrør

Indenfor differensstrykmålinger findes også pitotrør som måler både det dynamiske og det statiske tryk og, ud fra forskellen mellem dem, beregner hastigheden. En pitotmåling er en lokal måling af hastigheden i et

punkt modsat målinger med blænder/venturi som resulterer i en middelhastighed over hele rørets tværsnit- se Figur 21.



Pitot rørs princip. P1 måler dynamisk tryk. P2 måler totaltrykket

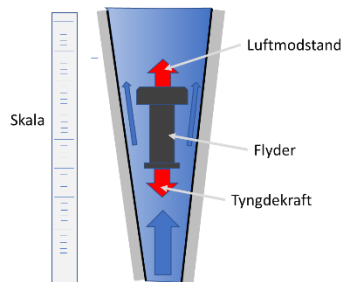
Figur 21 Principtegning for pitotrørs måling

Pitotrøret anvender ikke en blænde men måler derimod hhv. det dynamiske tryk ved at have 2 målepunkter – en for totaltryk ved nul flow og trykket ved flowhastigheden, hvilket svarer til at $v_1 = 0$ m/s i ligning 12. Da pitotrøret måler lokalt, så er det vigtigt at denne er orienteret korrekt i forhold til mediestrømmen og at kanalerne ikke er tilstoppede.

Pitotrør er specielt gode ved høje hastigheder, da det dynamiske tryk er signifikant del af totaltrykket. Teknikken anvendes fx på fly til måling af hastigheden.

5.1.5 Rotameter / Variable areal måler

En billig teknisk anvendelse af princippet findes i VA-meter, hvor differenstrøkket over et fritsvævende stempel/en kugle betyder at denne flyder frit. Jo mere flow, jo højere placeres kuglen da dette er en ren kraftbalance – se Figur 22.

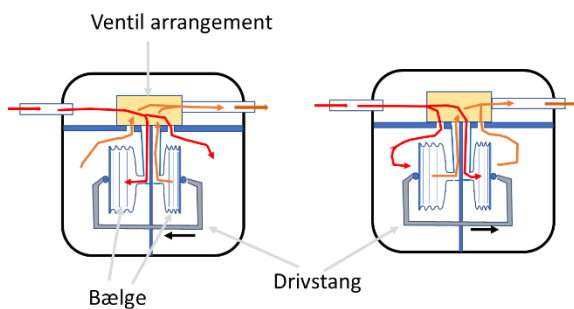


Figur 22 Principtegning for VA meter/rotameter

Måleproblemer med denne type er at visningen udelukkende gælder for den densitet, som skalaen er indstillet med.

5.2 Lukket volumen

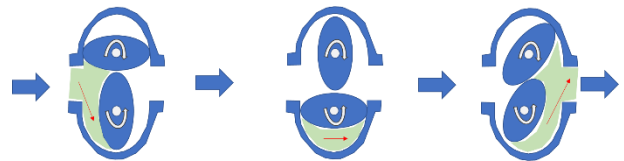
Teknologier baseret på lukket volumen omfatter flowmålere, hvor mængden afmåles via fysisk defineret volumen. Teknikken ses oftest i forbindelse med husstandsmålere til forbrug af naturgas, se Figur 23, eller målere til diesel som dem på Figur 24.



Figur 23 Gasmåler og princip. De 2 bælge driver via tandstang en aksel som både er forbundet til den mekaniske tæller samt til ventilerne, som åbner/lukker for gassens tilgang til bælgerne. Hermed haves en mekanisk drevet måler.

Nøjagtigheden af denne teknologi afhænger primært af de mekaniske forhold som tætninger og mekanisk stabilitet. Teknikken er relativ nøjagtigt (gasmåler er typegodkendt til bedre end 2 % ved fastlagt gastype og forsyningsstryk. Sidstnævnte er synonyme for gasdensitet).

En ovalhjulsmåler til diesel angives til at være bedre en 0,5 %.

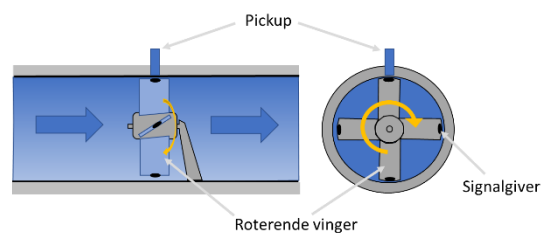


Figur 24 Ovalhjulsmålerprincip. Det er trykforskel imellem indløb og udløb, som driver tandhjulene rundt.

5.3 Skovlhjul (impuls)

Anemometre, pædelhjulsmålere og turbinemålere er alle teknologier, hvor mediets strømnng driver en roterende bevægelse men hvor der er plads udenom det drevne. Denne roterende bevægelse er som udgangspunkt proportional med mediets hastighed.

Turbinemålere er så præcise at de anvendes som referencemålere ved akkrediteret kalibrering.



Figur 25 Skovlhjuls baserede principper. Anemometere og turbinemålere.

Turbinemåleres svaghed er hvis det målte medie roterer i indløbet til måleren. Hvis rotationen er samme retning som turbine målerens rotation, så vises der et for højt flow. Og omvendt.

Da der er tale om en mekanisk konstruktion, så er ting som inertimoment for den roterende del og friktionstab kilder til usikkerheder under måling.

Rotationen aftastes af en sensor som tæller på antallet af passager af vingerne. Det er derfor nødvendigt at en turbinemåler har en vis hastighed for at kunne give en tilstrækkeligt høj frekvens.



Måler under test

Turbinemålere som reference

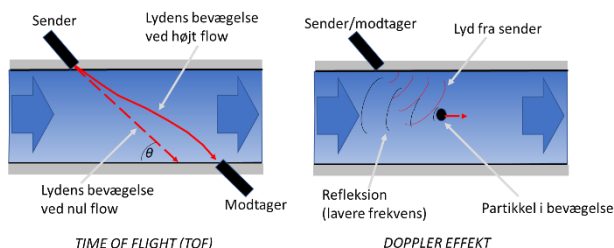
Figur 26 Højtryksanlæg til kalibrering af målere til naturgas. Reference er turbinemålere (markeret).

5.4 Lydbølger (ultralyd)

Der findes to principper til at måle volumenflow ved brug af ultralyd – Time of Flight (ToF) samt Doppler. Begge er illustrerede på Figur 27.

ToF udnytter at lydbølger er trykbølger, som udbredes i et medie. Dette betyder at bevæger mediet sig, så bevæger lyden sig også hurtigere i mediets bevægelsesretning end lydens hastighed end ved et stillestående medie (i forhold til rørvæggen).

Dette udnyttes med ultralydsmålere, hvor to signalgivere på skift udsender og modtager ultralyd igennem et medie. Tidsforskellen imellem opstrøms og nedstrøms tid imellem afsendelse og modtagelse af et signal er proportionalt med den gennemsnitlige hastighed langs lydsporet. Ultralydsmåleren er således



Figur 27 Principtegning af TOF og Doppler.

en lokal måling langs en linje, hvorfor volumenstrøm kendes ved multiplikation med et tværsnitsareal.

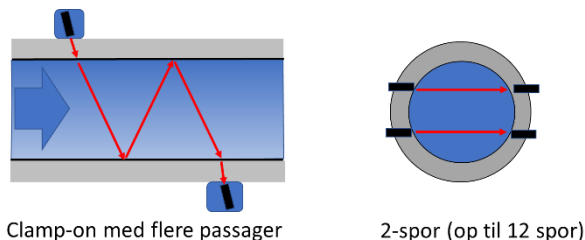
Doppler princippet udnytter at frekvensen af en reflekteret lydstråle ændres alt efter om den reflekterende del enten fjerner sig eller kommer nærmere. Dette er traditionelt illustreret ved at lyden ændrer sig på en ambulance imellem den kommer imod en eller kører væk.

Doppler princippet kræver partikler i mediet, hvilket bør være naturligt, da det er partiklernes refleksion af lyden, som anvendes til fastlæggelse af hastigheden.

ToF princippet kræver omvendt at mediet er rent og uden partikler, da lydsporet så vil blive forstyrret. Der findes således ikke den perfekte måler, som kan alt.

Ultralydsmålere kan laves med et eller flere spor. Kendetegnen er at jo mere enkelt en ultralydsmåler er opbygget, jo mere følsomt er den overfor forstyrrelser i flowprofilet. Anvendelse af mange spor vil kunne bringe måleusikkerheden ned men vil derimod være en større omkostning.

Clamp-on målere er flytbare ultralydsmålere, som måler bevægelsen af mediet igennem rørvæggen. Montageforhold og rørets indvendige overflade er to parametre, som har særlig betydning for målenøjagtigheden. Da rørvæggen både kan dæmpe og transmittere lyd udenom mediestrømningen, så har densiteten og homogeniteten af mediet også en betydning. Clamp-on måling på gas kræver således et højt tryk, hvorimod måling på vand er noget nemmere.



Figur 28 Ultralydsmåler – clamp-on og indbygget.

Ultralydsmålere anvendes hvor der er behov for et stort dynamikområde. Som følge af at teknologien anvender ultralydssignaler og stor opløsning (meget lille tidsforskel imellem opstrøms og nedstrøms passage-tid), så er ultralydsmåler følsom overfor elektriske forstyrrelser og snavs.

5.4.1 Måleprincip - ToF

ToF udnytter lydens hastighed gennem vandet og kaldes på 'Time of Flight' (ToF) metoden eller transittids-metoden. Ved ToF sendes en lydimpuls gennem gennemstrømningsarealet.

Der er 2 transducere (piezokrystaller) som kan bruges til henholdsvis afsendelse og modtagelser af lydimpulser. Disse sidder ikke på en ret linje men lidt forskudt, da en høj flowhastighed så at sige skubber til lydsporet. Nogle producenter anvender et dobbelt sæt af transducere for at kunne håndtere denne flytning af lydsporet på grund af mediets hastighed.

Pulsen sendes fra en transducer og registreres af en anden transducer. Tiden fra afsendelse til modtagelse kan derefter bruges til at beregne flowhastigheden.

Hvis der anvendes flere spor, så er den tekniske udfordring at undgå at misfortolke modtagne signaler fra en transducer.

Ligning 13 beskriver den matematiske sammenhæng imellem målte tider og hastigheden.

Ligning 13

$$v = \frac{C^2 * (T_{1-2} - T_{2-1}) * \tan\theta}{2 * D}$$

Når flowets hastighed er kendt kan volumenflowet udregnes.

Lydhastigheden i vand er ca. 1480 m/s. Hvis vi betragter den tidligere beskrevne Ø200 mm rør og antager en vinkel på 30 °, så er lydens vej igennem centerplanet af røret $200/\sin^{-1}(30^\circ) = \text{ca. } 363 \text{ mm}$.

Ved de 0,884 m/s hastighed i mediet vil lydens passagetid i den ene retning være $0,363/(1480+0,884) = 245,077 \mu\text{s}$ og i den anden retning være $0,363/(1480-0,884) = 245,3699 \mu\text{s}$. Altså en forskel på ca. 0,29 μs .

Det er således unødvendigt at nævne at udstyret er meget følsomt overfor støjkilder.

5.4.2 Måleprincip - Doppler

Den anden metode til at måle flow med ultralyd kaldes Doppler metoden og udnytter Doppler effekten. Ved Doppler metoden udsendes der også en ultralydsstråle i en vinkel til flowretningen. Ultralydsstrålen reflekteres via partikler, bobler eller hvirvler i flowet og returneres til en sensor. Den afgivne ultralydsstråle har en anden frekvens end den returnerede ultralydsstråle. Dette skyldes Doppler effekten og den returnerede frekvens kaldes derfor Dopplerfrekvensen. Ved at måle den transmitterede frekvens og den returnerede Dopplerfrekvens kan flowhastigheden udregnes.

Ligning 14

$$c = \frac{f_d * C}{2 * f_t * \cos\theta}$$

Igen kan volumenflowet beregnes når hastigheden og tværsnitsarealet af måleren er kendt.

5.5 Varmetransport

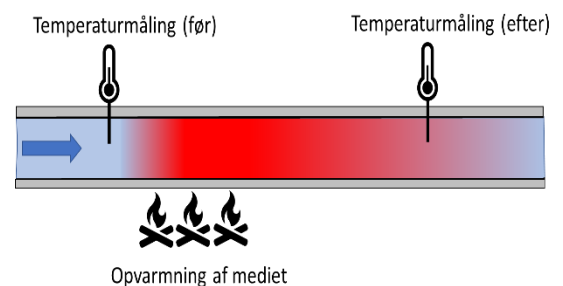
Luft kan varmes op relativt nemt i forhold til væsker, da densiteten er lav.

Hotwire er forenklet beskrevet en varmetråd med en høj temperatur, som afkøles mere jo større lufthastighed der er omkring varmetråden.

Elektronikken sikrer at varmetrådets temperatur fastholdes. Et varierende luftflow vil derefter kunne ses som en variation på strømforbruget.

Tilsvarende findes termiske masseålere, hvor der er et varmelegeme og kort nedstrøms en temperatursensor. Ved at sammenholde den målte og den fastholdte temperatur, så kan der beregnes en massestrøm baseret på varmetransport. Se Figur 29.

En variant er hvor der er 2 ben i mediet og hvor den ene varmer mediet op og den anden måler temperaturen. Dette princip er industrielt anvendeligt hvor der i dag findes flere varianter over denne konstruktion.



Figur 29 Princip for termisk masse flowmeter. Sammenhængende værdier af temperaturstigning og varmeeffekt giver en massestrøm, når man kender varmekapaciteten.

5.6 Tracing

Tracing minder om den termiske metode, hvor strømmingen påvirkes lokalt og en nedstrøms effekt registreres.

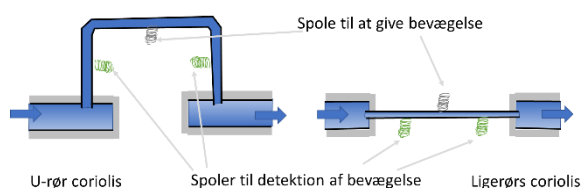
Tracing går ud på at der injiceres radioaktive stoffer på et punkt opstrøms som nedstrøms detekteres med følsomt måleudstyr.

Tracing anvendes kun til få typer af kontroller, da målingen ikke er med høj gentagelighed.

5.7 Coriolis

Der findes to typer af coriolisflowmålere. Begge typer består af en konstruktion med to parallelle rør inde i flowmåler huset. I den ene type er rørene lige mens de i den anden type er u-formede. Den lige coriolis flowmåler bruges sjældent, og er derfor undladt i denne beskrivelse.

De to parallelle rør har samme udformning, og i bunden af bøjning sættes de i svingning af en aktuator. Frekvensen af svingningen afhænger af producent, model og størrelse, men ligger som udgangspunkt i området mellem 80 og 1000 Hz. Amplituden af svingningerne er ikke visuelt observerbare, men ville kunne føles med hænderne.



Figur 30 Coriolismåler

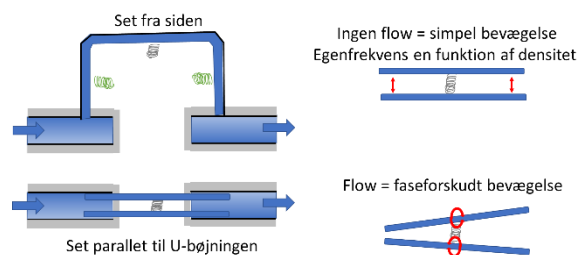
Hvis der ikke er flow igennem måleren vil svingningerne i rørene være symmetriske, men når flow strømmer igennem måleren vil der være en faseforskydning i svingningen.

Det er denne faseforskydning der kan registreres og benyttes til at beregne masseflowet. Ved at kende materialeegenskaber for måleren, indre dimensioner, inertimoment for måleren samt vibrationsfrekvensen kan masseflowet udregnes via ligning 15.

Ligning 15:

$$\dot{m} = \frac{K_u - I_u * \omega^2}{2Kd^2} * \tau$$

Hvis en coriolis måler skal bruges til at lave volumenmåling skal man samtidigt måle eller beregne densiteten af mediet der måles.



Figur 31 Principtegning for en u-formet coriolisflowmåler. Venstre: Rørføring igennem måleren. Øverst/højre: Synkron svingninger når der ikke er masse flow igennem måleren. Nederst/højre: Faseforskydte svingninger når der er masseflow.

En coriolismåler er meget overfølsom overfor udefra kommende vibrationer, det er derfor vigtigt at sørge for den er isoleret fra vibrationer i installationen. Dette kan gøres ved brug af vibrationsdæmpende tilkoblinger og holdere. Det er ydermere vigtigt at eksterne komponenter eller personale ikke har berøringskontakt med målerhuset når der foretages en måling. Dette kan virke vibrationsdæmpende og medføre fejlvisninger.

Det er også vigtigt at sørge for at der ikke er vrid i måleren i installationen. Opspændingen af en coriolismåler skal derfor foretages særligt forsigtigt, da den mindste form for vrid vil medføre at målingerne vil være ubrugelige.

Det er aldrig muligt at undgå alle former for vibrationer og installationseffekter på måleren, derfor kan der udføres en nulpunktsjustering af måleren.

Dette gøres ved at sætte flow gennem måleren, for så at lukke en ventil efter måleren og dernæst en før måleren. Dette sikre at der er et let overtryk i måleren, samt at den er væske fyldt dog uden gennemstrømning. Når denne tilstand er opnået, kan en nulpunktsjustering foretages i målerens software og et nyt nulpunkts sættes. Derved frasorteres eventuel baggrundsstøj fra det omgivende miljø der har indflydelse på måleren. En nulpunktsjustering skal kun foretages ved første installation af måleren eller hvis måleren flyttes til en ny installation da al historik for målerens fejlkurve ikke længere er brugbare til sammenligning.

Hvis en coriolismåler er installeret og justeret korrekt er det en af de mest præcise måleprincipper til flowmåling. Coriolismålere bruges ofte når der måles på medier der varierer meget i densitet og når lav usikkerhed er ønsket. Ulemperne ved en coriolismåler er prisen samt tryktabet over måleren. Tryktabet skyldes dimensionsovergangen til de to små rør, hvilket gør at der er et samlet højere tab grundet friktion. Desuden er der flere bøjninger i de u-formede målere som også giver tryktab.

5.8 Elektromagnetiske målere

Elektromagnetiske målere, også kaldet MAG-målere (Magnetisk), er en volumenmåler der udnytter væskens elektroniske ledningsevne til at måle hastigheden den bevæger sig ved. MAG-målere har været kommercielt tilgængelige siden 1950'erne og udnytter principperne fra Faradays lov om elektromagnetisk induktion. Grundlæggende kan loven skrives som:

Ligning 16:

$$E = k * B * L * c$$

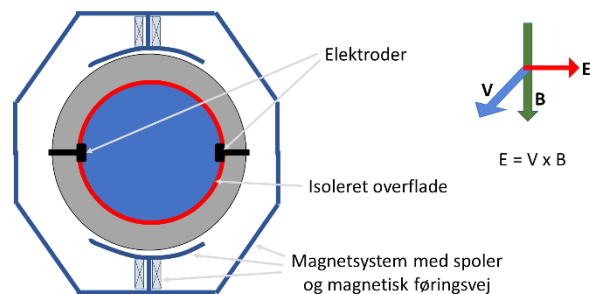
Ligning 16 påviser at der genereres en spænding når en leder passerer igennem et magnetfelt. Denne spænding afhænger af magnetfeltets densitet, længden af lederen samt hastigheden af lederen. Den elektromagnetiske spole danner et magnetfelt over gennemstrømningsarealet.

Når væsken strømmer igennem måleren virker den som leder og derved genereres der en spænding. Denne spænding kan måles med et elektrodepar der sidder på hver side af måleren. Indersiden af måleren skal beklædes med en ikke ledende liner så spændingen ikke ledes ud i resten af rørsystemet. Densiteten af magnetfeltet er specificeret for hver måler-type/størrelse. Længden af lederen er afstanden mellem elektroderne. Derved er hastigheden på væsken den eneste variable der refterer i Ligning 16.

MAG måleren er en volumetrisk måler, idet flowprofiler -4D/+4D fra centerplanet af måleren bidrager til etablering af det inducerede elektromagnetiske felt. Dette betyder også at en kort elektromagnetisk måler er følsom overfor om det tilsluttede rør har en elektrisk ledende eller isolerede overflade. Ligeledes vil

belægninger så som magnetit (elektrisk ledende) kunne påvirke nøjagtigheden.

Fordelene ved en MAG-måler er at der stort set ikke er tryktab over måleren, samt at den ikke er følsom over for hverken tryk, temperatur, viskositet eller densitet. Ulemperne er at det er et krav at væsken er elektrisk ledende og at overfladerne er uden elektrisk ledende belægninger samt at prisen for måleren er relativt høj.



Figur 32 Principtegning for en magnetisk induktiv flowmåler.

Der findes mange producenter af MAG-målere i forskellige prisklasser. Ens for MAG-målerne er deres usikkerhed inden for deres flowområde ofte ligge omkring $\pm 0,2-0,1\%$. De forskellige varianter kan have forskelligt dynamikområde (det flowområde som måleren er designet/godkendt til), have forskellige linere der er mere eller mindre hårdføre og have forskellige transmittere og strømforsyning. MAG-målere kan konfigureres i et utal af måder med forskellige kommunikationsprotokoller. Udefra kommende magnetfelter kan have indflydelse på målerens nøjagtighed. Desuden skal det sikres at måleren er ordentlig jordet, da dette ellers kan medføre store fejlvisninger.

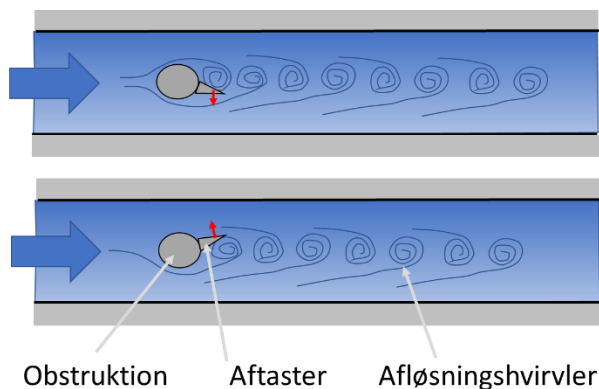
5.9 Vortexmålere

Vortexmålere er baseret på hvirvelafsløsningsfænomenet (*von Kármáns hvirvel allé*). Dette fænomen er årsagen til at et flag i en flagstang ved visse vindstyrker bølger.

Hvirvelafsløsningen er indenfor et interval af Reynoldstallet lineært proportional med flowhastigheden. Dette udnyttes i vortexmåleren ved at der på bagkant

af en forstyrrelse i væskestrømmen er placeret en af-
fastning af de genererede hvirvler. Figur 33 viser prin-
cippet bag en vortexmåler.

Fordele ved vortexmåleren er at der kan måles på alle
medier inklusive vanddamp. Ved vanddamp anvendes
kendskab til tryk og/eller temperatur samt vand-
damptabellen for vand til at omregne hvirvelfrekven-
sen til en dampstrøm.



Figur 33 Principtegning for en vortexmåler. 1: Flowforstyr-
relse. 2: Vortex (Hvirvler) 3: Sensor.

Ulempen ved vortexmåleren er at hvirvelaflysningen
sker i et afgrænset interval af Reynoldstallet og det
antages at måleren opererer i dette interval. Er man
uden for dette interval kan det opleves at en vortex-
måler viser nul flow ved f.eks. 25% af maksimal flow-
rate eller mindre. Dette er en ikke fejl ved den kon-
krete måler – det er en følge af det fysiske fænomen,
som anvendes.

6 Opsummering

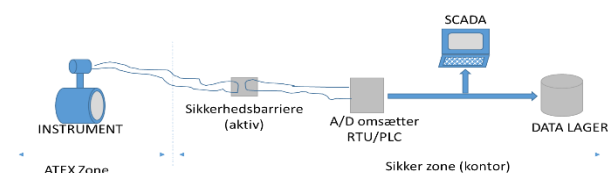
Flowmåling benyttes i mange processer og anlæg, til
et bredt område af formål. Når et anlæg, hvori der
indgår flowmåling, skal designes er der en række sce-
narier man skal overveje.

For det første er det vigtigt at overveje hvor i installa-
tionen man ønsker at placere målere. Er det muligt at
undgå flowforstyrrelser eller skal der korrigeres for
disse.

Dernæst er det vigtigt at sikre sig at man installerer
en måler der både kan håndtere mediet der måles på,
samt kan modstå det miljø den skal sidde installeret i.

Skal den f.eks. sidde i et miljø hvor der er meget vi-
brationsforurening fra omgivelserne vil en Corio-
lismåler være ufordelagtig, mens hvis installationen
skal måle på et medie der er lyd-dæmpende så bør ul-
tralydsmålere undgås.

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



Figur 34 Signalkæde (fra A6)

Som det går igen ved alle måleteknikker, er måletek-
nikerens bedste redskaber hans usikkerhedsbudget
og måleinstrument med tilhørende kalibreringscerti-
fikat.

7 Bibliography

- [1] »Den Danske Ordbog,« [Online]. Available:
[http://ordnet.dk/ddo/ordbog?select=-
meter&query=meter](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.
[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.