

Vesa Tomukorpi

Kaasuvirtauksen eri mittaussmenetelmiä

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikka
Insinöörityö
22.11.2011

Tekijä Otsikko	Vesa Tomukorpi Kaasuvirtauksen eri mittaussmenetelmiä
Sivumäärä Aika	42 sivua 22.11.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka ja Automaatio
Ohjaaja	Yliopettaja Kari Salmi
<p>Tämä insinööri työ keskittyy kaasuvirtauksen eri mittaussmenelmiin. Työssä on tutkittu virtausmittareiden eroja kaasuvirtauksen mittaukseen. Virtausmittarin valinta on riippuvainen käyttökohteesta sekä virtausmittarin ominaisuuksista. Työ perustuu eri tutkimuksien vertailuun koskien virtausmittausta ja sen eri menetelmiä. Tässä työssä on käsitelty seuraavia menetelmiä: palkkianturi, terminen massavirtamittari ja ultraääneen perustuva mittari.</p> <p>Työn alussa on esitetty eri virtausmittausmenetelmiä sekä käyty läpi MEMS-tekniologiaa. Työssä on tutkittu virtausmittareiden historiaa, toimintaperiaatteita ja kehityksen uusia suuntauksia. Palkkianturin osiossa on käyty läpi virtausta vastustavan voiman sekä turbulenssien vaikutusta anturiin. Pulssinleveysmodulaatio ja sensorit ilman lämmittäviä elementtejä olivat osana terminen massavirtamittarin energiatehokkuuden parantamista. Kapasitiivinen ultraäänianturi sekä mukautuva pulssintoistotaajuus takasivat ultraäänianturille toimintakyvyn kuumien ja sähkömagneettisia pulsseja sisältävien kaasujen virtausmittauksessa.</p> <p>Työn tuloksena voitiin huomata uusien kehitettyjen mallien yhtäläisyyksiä eri toimintaperiaatteisiin nojaavien virtausmittausten välillä. Mikrokokoiset rakenteet olivat tärkeänä tekijänä uusien menetelmien kehityksessä. Virtausmittausten kehityksen suuntana oli parempi tarkkuus, energiatehokkuus, nopeat vasteajat sekä laaja toiminta-alue.</p>	
Avainsanat	MEMS, virtausmittaus, kaasuvirtaus, palkkianturi, terminen massavirtamittari, kuormalanka-anemometri, ultraäänimittari, Doppler-ilmiö, transit-time, CUT, PRF

Author Title	Vesa Tomukorpi Different Measurement Methods for Gas Flow
Number of Pages Date	42 pages November 22, 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics and Automation
Instructor	Kari Salmi, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's thesis focuses on different measurement methods for gas flow. The aim of the thesis is to consider the differences of the flow meters. Selection of the meter is highly dependent on the application and features of the flow meter. This thesis is based on research papers of different measurement techniques. In this thesis the focus is on the following measurement methods: Cantilever beam, Thermal mass flow meter and Ultrasonic flow meter.</p> <p>In the beginning of the thesis different flow meters and MEMS technology are introduced. History, working principle and new innovations are presented for each method. In the chapter concerning Cantilever beam, the effects of fluid drag force and turbulences are studied and the advantage of the self resonance in the beam is presented. Pulse-width modulation and omitted heating elements are part of the better energy efficiency within the thermal mass flow meter compared to the conventional methods. Capacitance Ultrasonic Transducers and adaptive Pulse Repetition Frequency enable high temperature resistance for hot pulsating gases within the ultrasonic measurement.</p> <p>As an outcome it was possible to discover the similarities in the novel methods for flow measurement within the different working principles. Micro-scale structure is a key factor in many novel methods. Development in tomorrow's flow measurement aims for better accuracy, energy efficiency, response time and operating range.</p>	
Keywords	MEMS, flow measurement, gas flow, cantilever beam, thermal mass flow meter, hot-wire, ultrasonic flow meter, Doppler-effect, transit-time, <i>CUT</i> , <i>PRF</i>

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	Virtauksen mittaus	2
3	Kaasuvirtauksen eri mittausmenetelmiä	4
3.1	Mikrosysteemit (MEMS)	4
3.2	Itseresonoiva palkkianturi (A Self Resonant Cantilever Beam)	6
3.2.1	Pyörrevirtauksien vaikutus palkkianturiin	6
3.2.2	Virtausta vastustava voima sekä Reynoldsin luku	10
3.2.3	Palkkianturin rakenne ja kokeellinen tulos	13
3.3	Lämpötilaeroon perustuva anturi	18
3.3.1	Termisen massavirtamittauksen digitalisointi	24
3.3.2	Sensori ilman lämpöelementtiä	27
3.4	Ultraäänianturi	30
3.4.1	Toimintaperiaatteet Doppler-ilmiö ja Transit-time	31
3.4.2	CUT ja PRF-tekniikka korkeiden lämpötilojen kaasunmittauksessa	36
4	Yhteenveto	41
	Lähteet	43

Lyhenteet ja määritelmät

<i>BS 7405 -standardi</i>	British Standard. Virtausmittausten käsikirja.
<i>Clamp-on</i>	Tässä työssä kuvaa helposti asennettavaa ja huollettavaa asennusmenetelmää.
<i>Conventional method</i>	Perinteinen menetelmä, malli tai tapa.
<i>CUT</i>	Capacitance Ultrasonic Transducer. Kapasitiivinen ultraäänianturi.
<i>Dual-path</i>	Tässä työssä kuvaa kahden anturiparin mittausta.
<i>EES-ohjelma</i>	Engineering Equation Solver Programme. Kehittäjä F-Chart Software.
<i>fluidi</i>	Väliaine, yleisesti kaasu tai neste. Tässä työssä fluidia käytetään pääosin puhuttaessa kaasuista.
<i>MEMS</i>	Micro Electro Mechanical Systems. Mikrosysteemit.
<i>Novel method</i>	Uusi menetelmä, malli tai tapa.
<i>NTP</i>	Normal Temperature and Pressure. Normaaliolosuhteet.
<i>PRF</i>	Pulse Repetition Frequency. Pulssintoistotaajuus.
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation. Pulssinleveysmodulaatio.
<i>PZT</i>	Piezoelectricity. Pietsosähköinen ilmiö.
<i>RTD</i>	Resistance Temperature Detector, vastuslämpötila-anturi.
<i>SOI</i>	Silicon on insulator.
<i>Time-of-flight</i>	Synonyymi Transit-time-sanalle. Kulkuaika.
<i>TMF</i>	Thermal Mass Flow meter. Terminen massavirtamittari.
<i>Turndown ratio</i>	Toiminta-alue, jolla mittari pystyy toimimaan tarkasti. Voidaan ilmoittaa esimerkiksi muodossa 10:1.
<i>UMF</i>	Ultrasonic Mass Flow meter. Ultraäänimassavirtamittari.
<i>Wetted configuration</i>	Synonyymi sanalle <i>inertial</i> . Putken sisäinen asennustapa.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään kaasuvirtauksen eri mittausmenetelmiin. Virtauksen mittaus on yleisin prosessiteollisuudessa suoritettu mittaus. Markkinoilla on kymmeniä erilaisia ratkaisuja kaasun ja nesteen virtauksen mittaukseen. Markkinoille on kehitetty viime vuosikymmeninä uusia menetelmiä kaasun ja nesteen virtauksen mittaukseen, mutta myös vanhat hyväksi todetut mittaustekniikat ovat kuitenkin pitäneet sijansa virtausmittauksissa.

Työssä käsitellään anturin valintaan liittyviä tekijöitä. Työssä keskitytään seuraaviin virtausmittauksen toimintaperiaatteisiin: palkin mekaaniseen värähtelyyn perustuvaan palkkianturiin (*Cantilever Beam*), lämpötilaeroon perustuvaan termiseen massavirtaanturiin (*Thermal mass flow meter*) sekä ultraääneen perustuvaan anturiin (*Ultrasonic mass flow meter*). Jokaisesta eri toimintaperiaatteesta esitetään uusia kehityksen suuntauksia.

Nämä kolme eri tekniikkaa valittiin työhön niiden erilaisten toimintaperiaatteiden takia. Toimintaperiaatteissa voidaan kuitenkin huomata kehityksessä samoja suuntauksia eri menetelmien välillä. On myös mahdollista havaita, kuinka erilaisia toimintaperiaatteita hyödyntäviä tekniikoita käytetään yhdessä saavuttamaan tarkempia virtausmittauksia. Työssä käydään läpi näiden eri menetelmien historiaa, kehitystä, yhteensopivuutta eri ratkaisuiden kanssa sekä vertaillaan eri toimintaperiaatteisiin nojautuvia virtausmittareita.

2 Virtauksen mittaus

Kaasuvirtauksen mittaus, esimerkiksi teollisuudessa on hyvin tärkeä tekijä, joka vaikuttaa koko prosessin toimintaan. Kaasumittaukset voidaan toteuttaa useaan erilaiseen toimintaperiaatteeseen nojaavalla anturilla, joista pyritään löytää parhaiten sopiva anturi täyttämään käyttökohteen asettamat tarpeet.

Tärkeimpinä tekijöinä valittaessa oikeaa virtausmittausanturia on miettiä, mihin käyttökohteeseen mittausta tarvitaan. Virtausmittausanturia valittaessa on mietittävä fluidista ja käyttökohteesta riippuvaiset rajoitteet ja vaatimukset. Virtausta mittaavan anturin vaatimuksina voi olla esimerkiksi: suurien lämpötilavaihteluiden kesto, kestävyys, tarkkuus, nopeus ja yksinkertainen kunnossapito. Virtausmittarin oikeanlainen asennus on myös hyvin tärkeä tekijä, jotta saavutetaan todenmukaisia mittaustuloksia.

Markkinoilla on hyvin paljon erilaisia virtausmittaukseen suunnattuna antureita. Osa antureista soveltuu paremmin nesteen mittaukseen, osa kaasun mittaukseen. On kuitenkin huomioitava, että suuri osa antureista soveltuu nesteiden sekä kaasujen mittaukseen.

Taulukossa 1 (s. 3) esitetään virtausmittausten jaottelu eri luokkiin. Ryhmät 1 - 10 edustavat virtausmittausten perusrhymiä, jotka jakavat virtausmittaukset niiden toimintaperiaatteen perusteella eri ryhmiin. Ryhmien 1 - 10 lisäksi on ryhmät 11 ja 12, joita ei ole luokiteltu BS 7405 -standardissa. Ryhmä 11 on kiinteiden aineiden mittarit, esimerkiksi iskuvoimaan perustuvat tekniikat ja ryhmä 12 on nesteiden virtausmittarit (*Open channel meter*). Taulukosta voidaan huomata, että suurin osa ryhmien mittareista mahdollistaa kaasun sekä nesteen mittauksen. [1, s. 50.]

Taulukko 1. Virtausmittareiden luokitukset (BS 7405, British Standard) [1, s. 50]

	Ryhmä	Ryhmän mittarit	Käyttökohde
1	Paine-eromittarit	Venturi, Annubar-putki	Kaasu ja neste
2	Muut paine-eromittarit	Rotametri, Pitot	Kaasu ja neste
3	Mekaanisen voiman mittarit	Oskilloiva mäntä, hammasratas	Nesteet
4	Turbiinimittarit	Roottorit	Alhaisen viskositeetin fluidit
5	Vortex-mittarit	Vortex	Neste ja kaasu
6	Sähkömagneettiset mittarit	Sähkömagneettinen mittari	Korkean viskositeen fluidit
7	Ultraäänimittarit	Doppler, Transit-time	Nesteet ja kaasut
8	Coriolis-mittarit	Coriolis	Nesteet ja kaasut
9	Termiset mittarit	Termiset massavirtamittarit, kuumalanka	Kaasut
10	Muut mittarit	Laser, vaa'at, merkkiaineet	Kiinteät aineet ja nesteet

Antureiden soveltuvuus nesteen tai kaasun mittaukseen perustuu anturin toimintamenetelmään, esimerkiksi anturin mekaaniseen liikkeeseen fluidin virtauksesta. Anturilla voi olla myös vaatimuksena mitattavan suureen korkea sähkönjohtokyky (*konduktiivisuus*), jolloin anturiksi voidaan valita esimerkiksi sähkömagneettinen mittari. Jos ajatellaan valittavaa virtausmittaria fluidin ominaisuuksien kannalta, on mahdollista jakaa anturit kaasujen ja nesteiden mittauksiin tarkoitettuihin ryhmiin.

Yleisesti ottaen fluidien, jotka omaavat matalan konduktiivisuuden, mittaukseen käytetään kaasumittaukseen suunniteltua virtausmittaria. Kun taas esimerkiksi mitattavan fluidin viskositeettitaso nousee, voidaan puhua erityisesti nesteen mittaukseen tarkoitettuista antureista. Kuten taulukosta 1 voidaan nähdä, kaasujen ja nesteiden lisäksi on olemassa myös kiinteiden aineiden virtausmittareita.

Kiinteille aineille käytettävät virtausmittarit ovat mitattavan aineen ominaisuuksista johtuen toisessa ääripäässä verrattattuna kaasumittauksiin käytetyistä virtausmittareista. Tämän takia markkinoilla ei ole yhtä anturia, joka soveltuisi kaikkiin käyttökohteisiin mittaamaan kaasujen, nesteiden sekä kiinteiden aineiden virtausta tarkasti.

Tärkein ja yleisin anturien kahteen eri ryhmään jakavista tekijöistä on anturin toimintaperiaate. Kaksi eri ryhmää ovat: suoraan mittaukseen perustuva massavirtamittaus (*Mass flow sensor*), joka mittaa massavirran suuruuden sovitun alueen läpi aikayksikköä kohden sekä tilavuusvirtaan perustuva mittaus (*Volumetric flow meter*), joka mittaa fluidin tilavuutta sovitun alueen läpi aikayksikköä kohden. [1, s. 15 - 19, 50.]

3 Kaasuvirtauksen eri mittausmenetelmiä

3.1 Mikrosysteemit (MEMS)

MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems, mikrosysteemit*) on ala, joka käsittää fysiikan, kemian, elektronikaan, optiikan, mekaniikan sekä materiaalitieteen osa-alueet. Mikrosysteemit ovat rakenteeltansa hyvin pieniä, satojen mikrometrien kokoluokkaa. MEMS-tekniikalla kuvataan mikrokokoisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi mikrokokoisia paine-, kiihtyvyy-, värinä- sekä kaasuantureita.

MEMS-tekniikan virtausanturit voivat hyödyntää useita eri mitattavia suureita, kuten lämpötilaeroa, mekaanista taipumaa, kapasitanssia tai *coriolis*-ilmiötä. Anturi koostuu kahdesta eri osasta. Anturissa on viritys-osa (*excitation part*), kuten esimerkiksi lämpötilaeroon perustuvassa anturissa vakiona pidettävä vertailulämpötila sekä havaitseva osa (*detection part*), jonka avulla saadaan selville virtauksesta aiheutuva lämpötilan muutos.

MEMS-tekniikan avulla onkin saatu tehtyä uusia parempia ratkaisuja esimerkiksi autoteollisuuteen, elektroniikka-alalle, bioteknologiaan sekä logistisiin ratkaisuihin. Edellä mainittujen alojen lisäksi mikrosysteemit ovat osana kehitystä avaruusteknologiassa, vastaamaan tulevaisuuden koko ajan korkeammaksi tulevia vaatimuksia.

Kaasun eri mittausmenetelmissä (3.2, ks. seur. s.) käsitellään MEMS-teknologiaan pohjautuvaa itseresonoivaa palkkianturia (*A Self Resonant Cantilever Beam*). Itseresonoiva palkkianturi tuo perinteiseen malliin muutoksen, koska se tarvitsee virtauksen mittaukseen vain havaitsevan osan. Palkkianturin (*Cantilever Beam*) palkin koko voi olla vain satoja mikrometrejä (kuva 1).

MEMS-teknologian avulla on saatu pienemmän koon sekä painon lisäksi muitakin etuja, kuten parempi tarkkuus, korkea luotettavuus, nopeat vasteajat, pieni sähkönkulutus sekä alhaiset valmistuskustannukset. Näiden edellä mainittujen hyötyjen lisäksi MEMS-teknologia tarjoaa hyvän yhteensopivuuden muiden antureiden kanssa. [2, s. 1; 3; 4, s. 1; 5]



Kuva 1. MEMS-teknologiaa hyödyntävä 610 µm:n palkkianturi [2, s. 5]

3.2 Itseresonoiva palkkianturi (A Self Resonant Cantilever Beam)

Palkkianturi (*Cantilever Beam*) on laajalti käytetty virtausmittauksen tekniikka MEMS-teknologiassa. Palkkianturi perustuu anturin mekaaniseen värähtelyyn, jonka fluidin virtaus aiheuttaa. Palkki taipuu virtauksen voimasta ja virtauksesta syntyvät turbulenssit saavat palkkianturin värähtelemään. [2, s. 2].

3.2.1 Pyörrevirtauksien vaikutus palkkianturiin

Pyörrevirtauksen (*Vortex-induced vibration*) aiheuttamaa värähtelyä voidaan kuvata kaavalla 1:

$$f_s = St \frac{U}{D} \quad (1)$$

f_s on pyörrevirtauksen taajuus

St on Strouhalin luku

U on virtauksen nopeus

D on palkin pituus

Kuvissa 2 - 4 (s. 7 - 8) kuvataan Reynoldsin luvun (R_E) vaikutusta pyörreilmion syntyyn, virtauksen suunta vasemmalta oikealle. Virtaukseen vaikuttavana tekijänä Reynoldsin luku pystyy myös muuttamaan virtauksen laminaarisesta pyörteiseksi. Reynoldsin luvun pysyessä pienenä virtaus on laminaarinen, R_E :n kasvaessa virtaus muuttuu pyörteiseksi. Reynoldsin luku saadaan kaavasta 2:

$$R_E = \frac{\rho v^2 L}{\mu v} = \frac{vL}{\nu} \quad (2)$$

v on virtauksen nopeus

L on putken halkaisija

ν on kinemaattinen viskositeetti (μ / ρ)

μ on absoluuttinen viskositeetti

ρ on fluidin tiheys

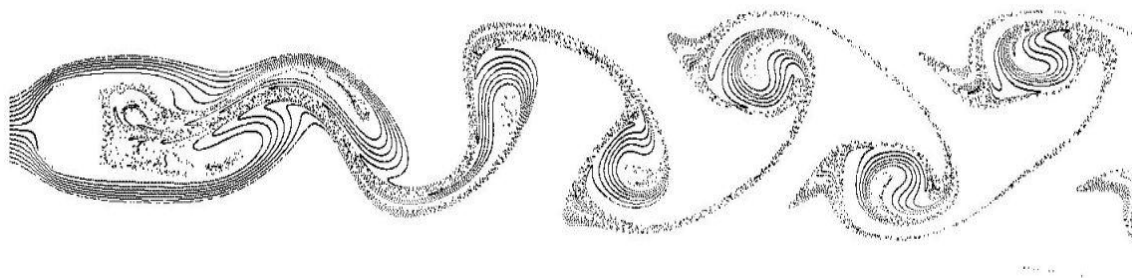
[1, s. 29.]

Pyörteet syntyvät, kun virtauksessa olevan rakenteen, esimerkiksi palkin, läpi kulkevan virtauksen rajapinnat hajoavat ja sekoittuvat keskenään (ks. kuvat 3 - 4, s. 7 - 8). Kuvissa tapahtuvaa ilmiötä kutsutaan unkarilaisen fyysikon mukaan Von Karmanin pyörteiksi tai Karmanin pyörreradaksi (*Von Kármán vortex street*) [6, s. 1].



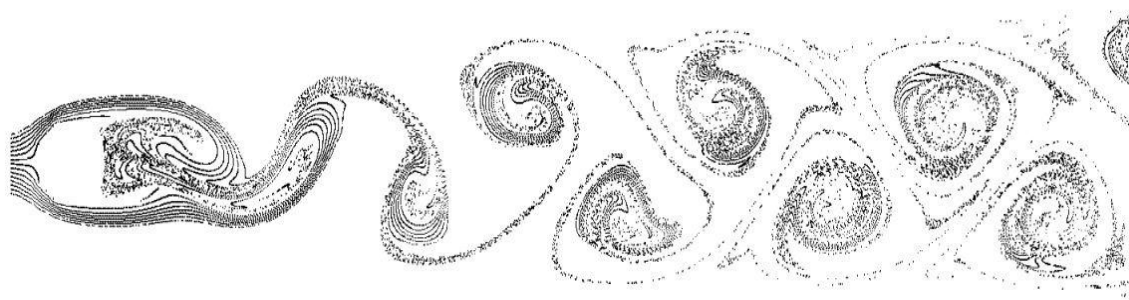
Kuva 2. R_E :n ollessa 50, virtaus pysyy laminaarisena ja pyörteitä ei synny [7]

Kuvasta 2 voidaan huomata, että virtauksessa ei synny pyörteitä. Viskositeetin ollessa korkea sekä virtausnopeuden pysyessä alhaisena virtauksessa ei synny pyöreilmiötä (*Vortex-induced vibration*), jolloin virtauksen kerrokset eivät sekoitu keskenään.



Kuva 3. R_E :n ollessa 75, virtaus muuttuu laminaarisesta pyörteiseksi [7]

Kuvasta 3 voidaan havaita pyörteiden synty, kun Reynoldsin luku R_E muuttuu arvoon 75. Pyörteet syntyvät, koska rajapintojen tasot sekoittuvat keskenään.



Kuva 4. R_E :n ollessa 120, pyörreilmiö virtauksessa voimistuu [7]

Kuvassa 4 voidaan huomata vahvistunut pyörreilmiö Reynoldsin luvun noustessa arvosta 75 arvoon 120. Kuvista 2 - 4 ilmeni Reynoldsin luvun vaikutus pyörreilmiöön. Reynoldsin luvun ollessa alhainen virtauksen muodonmuutosta vastustavat voimat ovat suuria. Reynoldsin luvun kasvaessa muodonmuutosta vastustavat voimat heikkenevät.

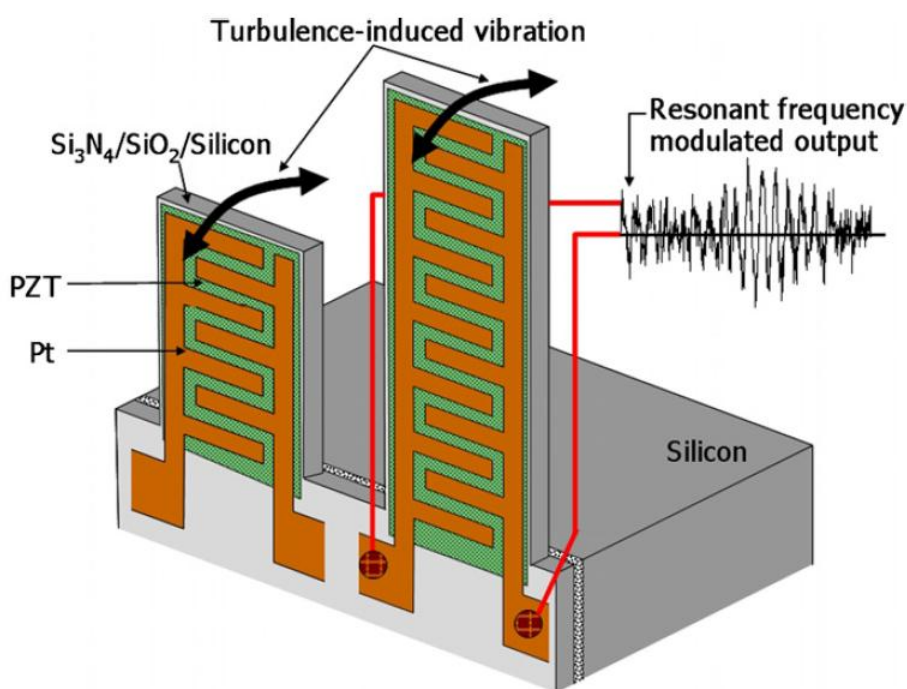
Pyörrevirtauksen kaavan 1 (ks. s. 6) avulla on mahdollista huomata, että pyörrevirtauksen taajuus f_s on verrannollinen virtauksen nopeuteen U . Strouhalin lukua, johon vaikuttavat palkin muoto sekä Reynoldsin luku, ei ole määritelty mikrorakenteille, koska pyörrevirtauksia ei synny Reynoldsin luvun ollessa alle neljäkymmentä. Tämä voitiin havaita kuvassa 1 olevasta mallinnuksesta, R_E :n ollessa jo viisikymmentä.

Blevinsin tutkimukseen perustuen MEMS-teknologiassa ei synny pyörrevirtauksia (*Vortex-induced vibration*) johtuen matalasta Reynoldsin luvusta ($Re < 40$). Kuitenkin edellä mainitusta Blevinsin tutkimuksesta ilmenee, että mikrorakenteet MEMS-teknologiassa voivat synnyttää turbulensseja palkkianturin palkin ollessa pienempi kuin virtauksen rajakerros.

Virtauksesta syntyvät turbulenssit saavat palkkianturin värähtelemään, jolloin palkissa olevan pietsosähköiseen ilmiöön perustuvan PZT-materiaalin (lead **Pb**, zirconate **Zr**, titanate **Ti**), avulla voidaan suoraan havaita turbulenssin aiheuttama taipuma palkissa. Signaali saadaan tiedonkeruujärjestelmän (*DAQ, Data Acquisition*) sekä LabView-ohjelman avulla. PZT-materiaalin avulla saadaan signaali-kohinasuhde (*Signal-to-Noise-ratio*) luetuksi FFT:n (*Fast Fourier Transform, Fourier'n muunnos*) spektristä.

Turbulenssien synty. Koska Blevinsin tutkimuksesta käy ilmi, että mikrorakenteet muodostovat turbulenssin alaisena moduloidun vasteen, turbulenssin aiheuttama värinä mikrorakenteessa on moduloituneena palkkianturin palkin resonanssitaajuuden. Itse-resonoivan palkkianturin ulostulosignaali, johon vaikuttaa turbulenssien aiheuttama värinä, on siis moduloitunut ominaistaajuuden kanssa. Palkin ominaistaajuus voidaan teoreettisesti arvioida kaavan 5 avulla (ks. s. 12).

Koska turbulenssin aiheuttaman värinä on moduloitunut palkkianturin ominaistaajuuden kanssa, virtauksen mittausta varten ei tarvita ollenkaan palkin taipumaa tekevää resonanssi-osaa, vain pelkkä pietsosähköinen PZT-materiaali riittää havainnointiin. Kuvassa 5 esitellään itseresonoiva palkkianturi, jossa on kaksi eri pituista palkkia, 610 μm ja 2 000 μm . PZT-materiaali on asetettu piipalkkeihin (*Silicon cantilever beam*), jotka värähtelevät turbulenssien vaikutuksesta sekä taipuvat virtauksen aiheuttamasta voimasta palkkianturiin. Virtauksen nopeus pystytään mittaamaan palkin resonanssitaajuuden muutoksesta. [2, s. 2 - 3; 5, s. 1; 8.]



Kuva 5. PZT-kalvo on sijoitettu piipalkkeihin; kuvan palkkien pituudet 610 μm ja 2 000 μm [2, s. 3]

3.2.2 Virtausta vastustava voima sekä Reynoldsin luku

Virtausta vastustava voima (*Flow Drag Force*, F_{drag}) saa aikaan palkin taipuman, joka riippuu virtauksen nopeudesta sekä Reynoldsin luvusta Re . Virtausta vastustava voima aiheuttaa palkkiin mekaanisen rasitteen.

Kaavasta 3 ilmenee, että voimaan F_{drag} voidaan käyttää Navier-Stokesin-lakia:

$$F_{drag} = CLv\eta \quad (3)$$

F_{drag} on ilmvirran liikettä vastustava voima

C on palkin muodosta riippuva vakio

L on palkin muoto

v on fluidin virtauksen nopeus

η on fluidin dynaaminen viskositeetti

[9, s. 2.]

Reynoldsin luvun ollessa alhainen, tässä tapauksessa alle yksi ($Re < 1$), voidaan soveltaa Stoken lakia ilmvirran liikettä vastustavaan voimaan (*Flow Drag Force*). Ilmvirran liikettä vastustava voima kaavassa 4:

$$F^s_{drag} = C_D \mu V_\infty l \quad (4)$$

C_D on virtausta vastustavan voiman kerroin

μ on fluidin viskositeetti

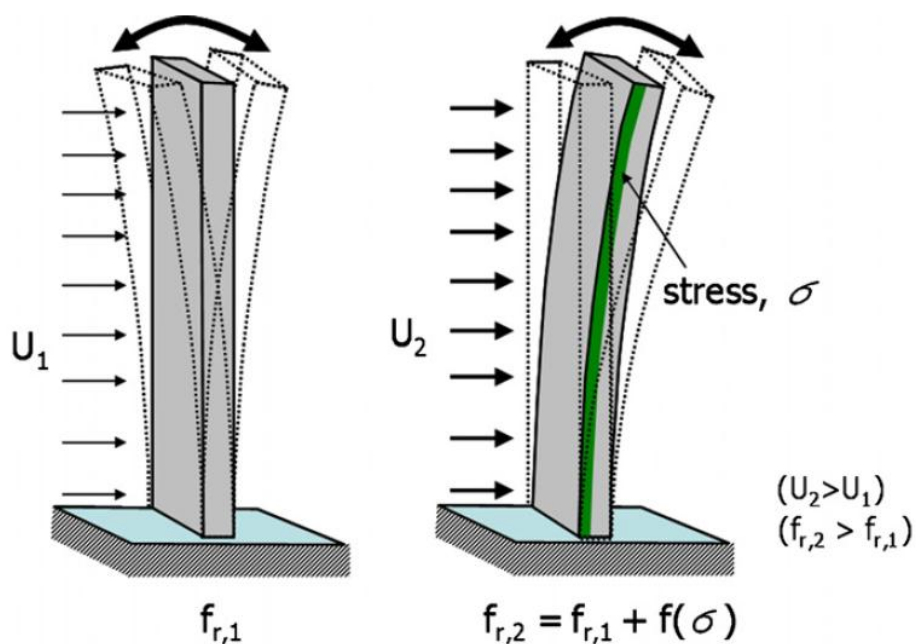
V_∞ on virtauksen nopeus

l on palkin pituus

[2, s. 3.]

Re:n ollessa alle yksi, ilmvirran liikettä vastustavan voiman kerroin C_D voi kasvaa arvoon kymmenen asti johtuen viskositeetin vaikutuksesta. Virtauksen aiheuttama voima (*Flow Drag Force*, F_{drag}) palkkiin kasvaa virtauksen nopeuden kasvaessa, mikä saa palkin taipumaan.

Resonanssitaajuuden muutoksesta aiheutuva värähtely. Resonanssitaajuuden muutoksen (*Resonant frequency shift*) palkkiin aiheuttaa turbulenssien vaikutus, joka saa palkin värähtelemään. Kun virtaus kasvaa nopeudesta U_1 nopeuteen U_2 , palkin resonanssitaajuus muuttuu arvosta f_{r1} arvoon f_{r2} . Kuvassa 6 esitetään sivusta vasemmalta oikealle liikkuvan virtauksen vaikutus palkkianturiin. Kuten kuvasta 6 nähdään, virtauksen kasvaessa arvoon U_2 ($U_2 > U_1$) palkkianturin palkki taipuu virtauksen voimasta, ja resonanssitaajuus muuttuu turbulenssien vaikutuksesta arvoon f_{r2} ($f_{r2} > f_{r1}$). [2, s. 2 - 3.]



Kuva 6. Virtauksen kasvu $U_1 \rightarrow U_2$ saa palkin taipumaan ja muuttaa resonanssitaajuuden arvoon f_{r2} [2, s. 4]

Resonanssitaajuuden muutoksen suhde virtauksen nopeuteen mahdollistaa virtauksen nopeuden mittauksen, ja palkkianturin avulla pystytään määrittämään mitattavan virtauksen massavirta (*mass flow*) sekä tilavuusvirta (*volumetric flow*).

Johtuen palkkianturin rakenteesta, joka on vain toisesta päästänsä kiinni piilevyssä, on palkkianturin resonanssitaajuuden kaava (ilman taipumaa) seuraava:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (5)$$

f_n on resonanssitaajuus

l on pituus

E on elastinen kerroin

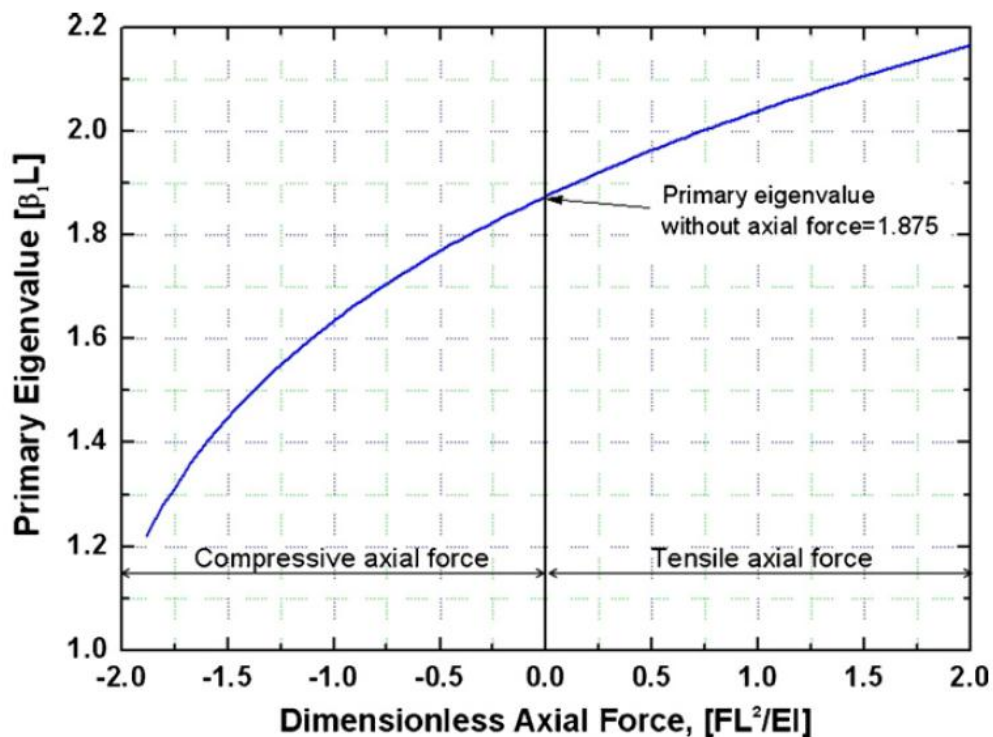
ρ on tiheys

A on poikkipinta-ala

I on palkin inertiaavoima

β_n on palkin ominaisarvo värähtelytilassa

Leonard Meirovitchin kirjasta *Principles and techniques of vibrations* käy ilmi, että ensisijaisessa värähtelytilassa palkin ominaisarvo $\beta_1 l$ on 1,875 (kuva 7) [10].



Kuva 7. Kuvaajassa osoitettu palkin ominaisarvo aksiaaliavoiman (taipuma) ollessa nolla [2, s. 4]

Kaavasta 5 (s. 12) voidaan havaita ominaisarvon vaikutuksen värähtelytilassa resonanssitaajuuteen. Palkin ensisijaisen värähtelyarvon sekä palkkiin vaikuttavan taipuma-voiman kaavan avulla saadaan laskettua ensisijaisen ominaisarvon muutos EES-ohjelmalla (F-Chart Software Inc.) [2, s. 3].

3.2.3 Palkkianturin rakenne ja kokeellinen tulos

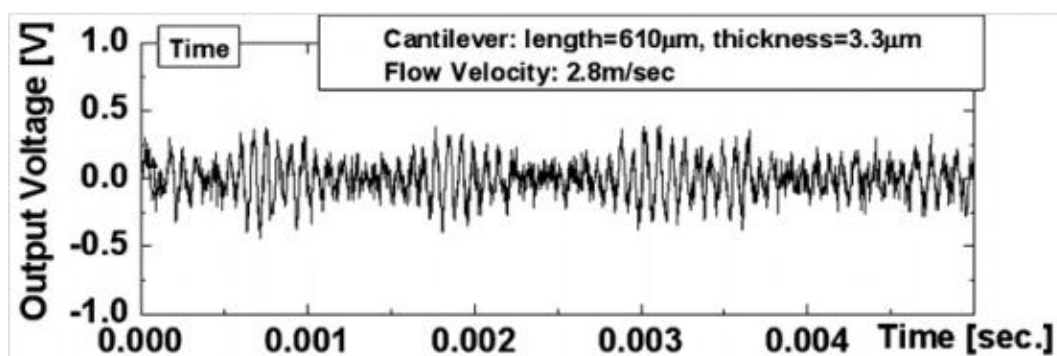
Sensorin suunnittelussa käytetään SOI-menetelmää (*Silicon on insulator*). SOI-tekniikassa hyödynnetään yksikiteistä piikerrosta erottamaan aktiivinen sensorin kerros ja piikiekon piidioksidikerros toisistaan. Tämä tekniikka mahdollistaa pienempien antureiden valmistuksen [11, s. 2; 3].

Palkkianturit asennettiin halkaisijaltaan 5 mm:n paksuiseen putkeen, ja mittauksessa käytettävän ilmavirran nopeus mitattiin ilmavirtamittarin avulla. Palkkianturin palkkien koot (kuva 5, ks. s. 9) ovat $2\,000\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 3,3\ \mu\text{m}$ ja $610\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 3,3\ \mu\text{m}$ (pituus, leveys, paksuus). Palkkien teoreettisten ominaisaajuuksien ollessa arvioituna kaavan 5 (s. 12) sekä ensisijaisessa värähtelytilassa olevan palkin ominaisarvon $\beta_1 l$ 1,875 mukaan, saadaan arvoiksi $1\,155\ \text{Hz}$ ja $12\,416\ \text{Hz}$. PZT-kalvon jäännösjännityksestä johtuva palkkianturin palkin alkutaipuma pystytään mittaamaan laserinterferometrin (*Zygo Co.*) avulla, lyhyemmän palkin ($610\ \mu\text{m}$) alkutaipuma on $37,1\ \mu\text{m}$. [2, s. 3; 4.]

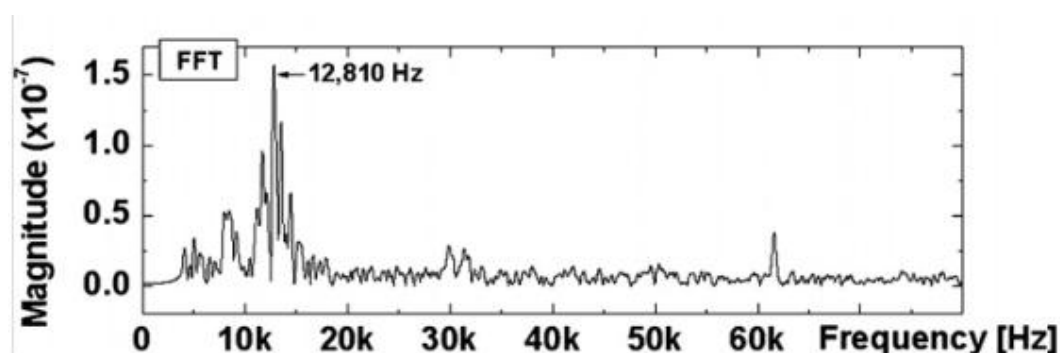
Sensorin värähtelysignaali pystytään mittaamaan suoraan PZT-kalvosta käyttämällä tiedonkeruu- (*DAQ board, National Instruments*) sekä LabView-ohjelmaa. Kuvan 8 a) (seur. s) kuvaajaan aikataason signaalin saadaan suoraan $610\ \mu\text{m}$:n palkista, aikataason signaalin suurtaajuuskomponentti on sama kuin palkin resonanssitaajuus.

Kuvan 8 b) (seur. s.) kuvaajassa on saatu analysoimalla aikataason signaalia FFT:n (*Fast Fourier Transform*) avulla $610\ \mu\text{m}$:n palkin taajuuden arvoksi $12\,810\ \text{Hz}$. Poikkeamaa tulee teoreettisesti määritellyn taajuuden ($12\,416\ \text{Hz}$) kanssa 394 hertsiä, tämä johtuu resonanssitaajuuden muutoksesta palkin ollessa $2,8\ \text{m/s}$ ilmavirrassa, joka tuottaa mekaanisen rasitteen. Kyseinen mekaaninen rasite on ilmavirtaa vastustavan voiman tuottama (ks. 3.2.2, s. 10). [2, s. 5.]

a)



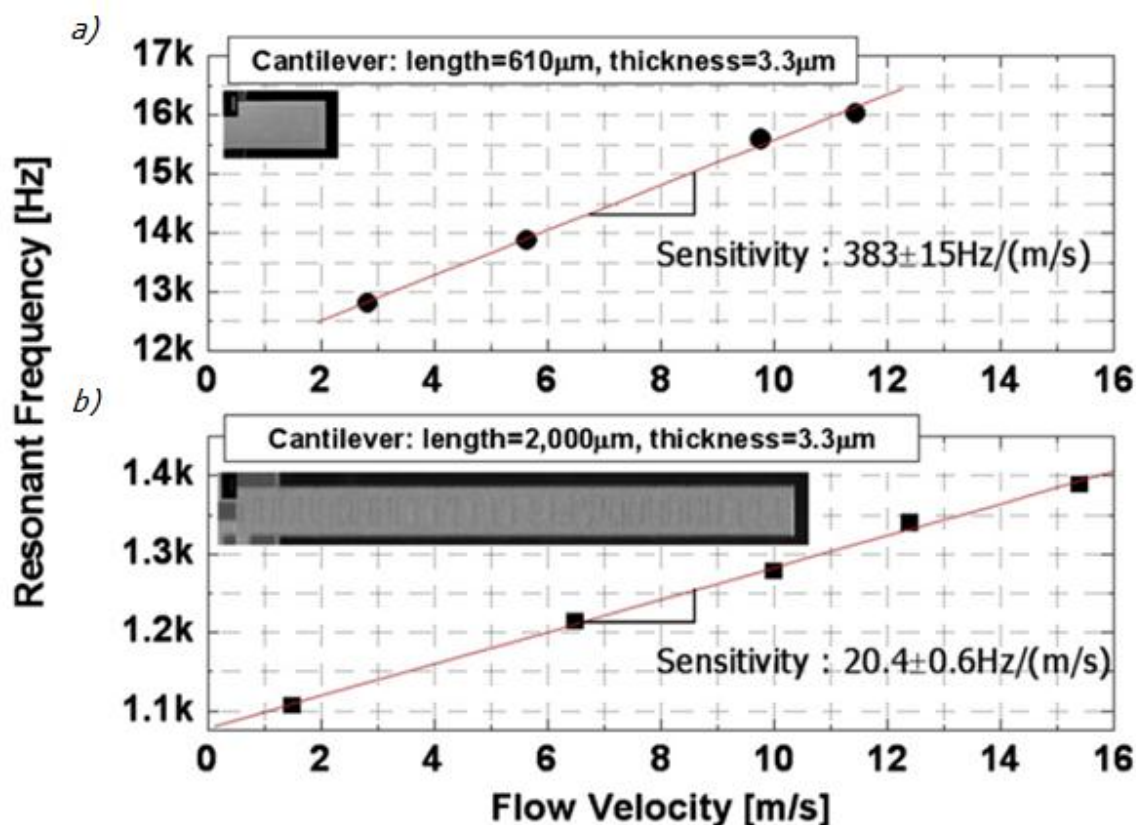
b)



Kuva 8. a) Kuvaajassa aikatasossa $610 \mu\text{m}$:n palkin värähtelyvaste $2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ olevan ilmavirran alaisena. b) Kuvaajassa aikataason signaali muunnettuna taajuudeksi FFT:n avulla [2, s. 6]

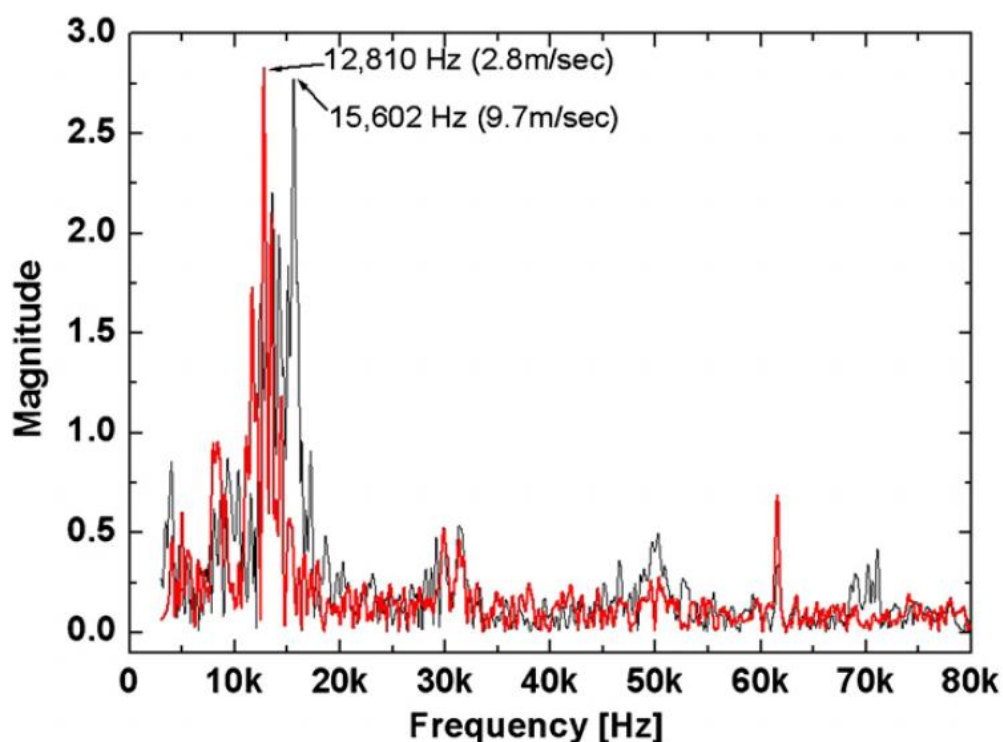
Esitettyä värähtelysignaalin mittaustekniikkaa hyödyntämällä käy ilmi, että PZT-kalvosta saatava palkin resonanssitaajuus muuttuu lähes lineaarisesti suhteessa ilmavirran aiheuttaman taipuman suhteen. Kuvasta 9 (ks. seur. s.) molempien palkkien, $610 \mu\text{m}$ ja $2\,000 \mu\text{m}$, herkkydet resonanssitaajuuden ja virtauksen nopeuden suhteen. Suuremman herkkyyden omaava $610 \mu\text{m}$:n palkki saavuttaa saturaation pienemmällä virtausnopeudella, rajana $12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ virtausnopeus, taajuuden ollessa $16\,100 \text{ Hz}$.

Vertailukohtana käytetty $2\,000 \mu\text{m}$:n palkki, joka omaa matalamman herkkyyden, saavuttaa saturaation $16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ virtausnopeudessa, taajuuden ollessa $1\,400 \text{ Hz}$. Kuvassa 10 (ks. s. 16) $610 \mu\text{m}$:n palkin huipputaajuudet $2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja $9,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ilmavirroissa, josta käy ilmi taajuuden nousu virtausnopeuden kasvaessa. [2, s. 5.]



Kuva 9. Palkkien herkkyydet. Virtausnopeuden vaikutus ulostulosignaaliin (resonanssitaajuus)
 a) 610 µm:n palkin herkkyydet b) 2 000 µm:n palkin herkkyydet [2, s. 6]

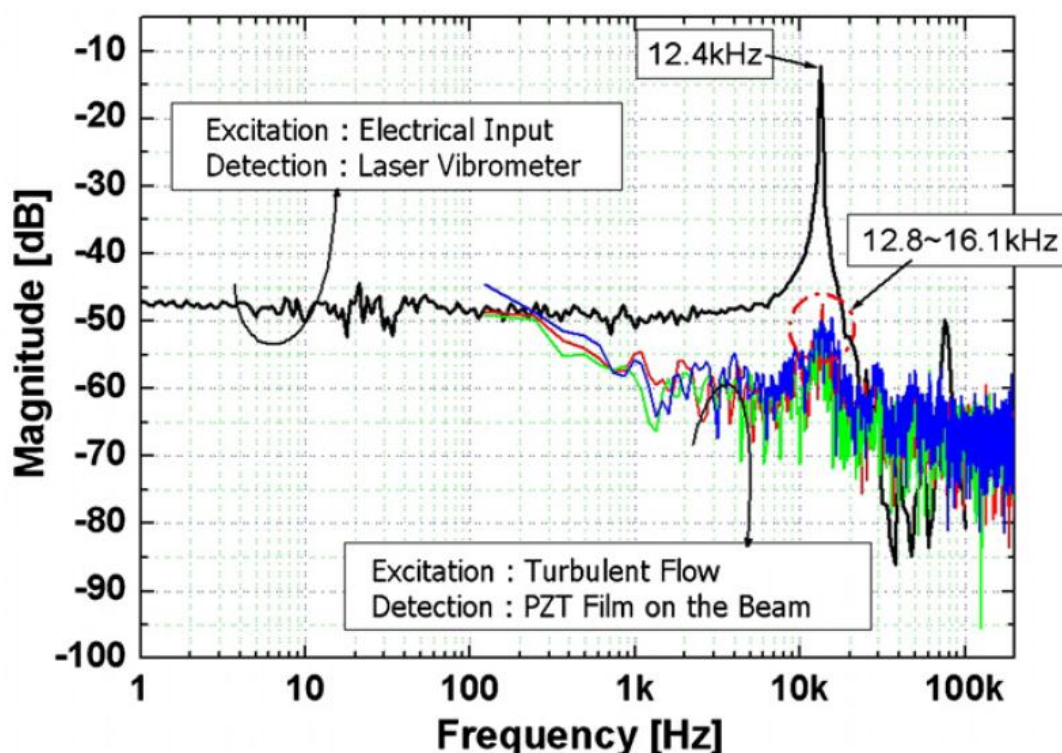
Kuvassa 9 vaaka-akselilla kuvaajassa on virtauksen nopeus $\frac{m}{s}$ ja pystyakselilla resonanssitaajuus hertseinä. Molempien palkkiantureiden paksuus on 3,3 µm. Kuten kuvasta 9 voidaan huomata, pienemmällä palkkianturilla (*Cantilever beam*) on suurempi herkkyys, aivan kuten Ulrich Göselen tutkimusryhmän tekemästä tutkimuksesta *Wafer Direct Bonding: From Advanced Substrate Engineering to Future Applications in Micro/Nanoelectronics* käy ilmi [11, s. 4].



Kuva 10. Esiteteltynä 610 μm :n palkin huipputaajuudet $2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja $9,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ilmavirtojen alaisena [2, s. 6]

Perinteistä tapaa (*Conventional method*), jossa palkkianturin värinä tuotetaan ulkoisen jännitesyötön avulla, käytettiin varmistuksessa. Perinteisen tavan avulla saatiin selvitettyä, onko moduloitunut taajuus sama kuin palkin resonanssitaajuus.

Kyseistä jännitesyötön tekemää vaikutusta (*Reverse piezoelectric effect*) palkkiin voidaan mitata laser-värähtelymittarilla (*Laser vibrometer, Polytec Inc.*) (ks. kuva 11, s. 17). Vertailukohtana ulkoisen jännitesyötön tekemällä värähtelylle käytettiin ilman jännitesyöttöä saatavaa turbulenssin alaista arvoa palkin PZT-kalvosta. Tästä tarkastuksesta selviää myös, että teoreettisesti arvioidun taajuuden 12 416 Hz, ja ulkoisen jännitteen avulla mitatun resonanssitaajuuden 12 400 Hz, ero on vain 16 hertsiä. [2, s. 4 - 6.]



Kuva 11. Ulkoisen jännitesyötön avulla saatu palkin ominaisresistanssiksi 12 400 Hz [2, s. 7]

Itseresonoivan palkkianturin avulla pystytään mittaamaan ilmavirran nopeus ilman ulkoista jännitesyöttöä hyödyntämällä ilmavirrasta palkkiin syntyvä moduloitunut resonanssitaajuus. Ilmavirran vaikutuksesta johtuvan palkin taipuman huomattiin olevan hyvin lineaarinen ilmavirran nopeuteen. Kun ilmavirran nopeus kasvaa, palkin taipuma kasvaa samassa suhteessa ja saa palkista mitattavan resonanssitaajuuden muuttumaan. Anturin ulostulosignaali pystytään lukemaan palkissa olevasta PZT-kalvosta.

Tekniikassa hyödynnetään siis palkin mekaanista taipumusta ilmavirran alaisena. MEMS-tekniikalla toteutetut palkkianturit (*Cantilever Beam*) ovat kooltansa hyvin pieniä, satojen mikrometrien luokkaa, joka mahdollistavat niiden käytön hyvinkin pieniä kokovaatimuksia tarvitsevilla käyttökohteilla, MEMS-palkkiantureita (*MEMS Cantilever beam*) käytetään muun muassa bioteknologian ja lääketieteen tutkimuksissa [11, s. 4].

3.3 Lämpötilaeroon perustuva anturi

Massavirran mittaukseen esitellään terminen virtausmittaus (*Thermal mass flow meter, Hot wire flowmeter*), joka on yleisin tapa mitata fluidin hetkellistä nopeutta. Teollisuudessa termisten virtausmittareiden suosion takana on niiden hyvä tarkkuus laajalla alueella, alhaiset valmistuskustannukset, luotettavuus sekä hyvä kestävyys. Hyvän luotettavuuden ja kestävyuden takana on anturin luotettava rakenne, joka ei sisällä ollenkaan liikkuvia osia.

Termiset massavirtamittarit ovat laajalti käytettyjä prosessiteollisuuden eri mittauksissa näiden etujen johdosta. Teollisuudessa käytettävät termiset massavirtamittarit pystyvät yleisesti ottaen mittaamaan virtauksen nopeutta $0,2 \frac{m}{s}$ - $50 \frac{m}{s}$. Virtauksen mittaus prosessiteollisuudessa on hyvin tärkeä mittaus, jolla on vaikutusta prosessin hyötysuhteeseen, turvallisuuteen sekä prosessin optimaaliseen toimintaan, unohtamatta ympäristöseikkoja. Tämän lisäksi termisille massavirtamittauksille löytyy käyttökohteita muun muassa myös sairaalateknologian ja meteorologian alan parista. [1, s. 153; 12; 13, s. 1; 14 s. 1; 15 s. 1.]

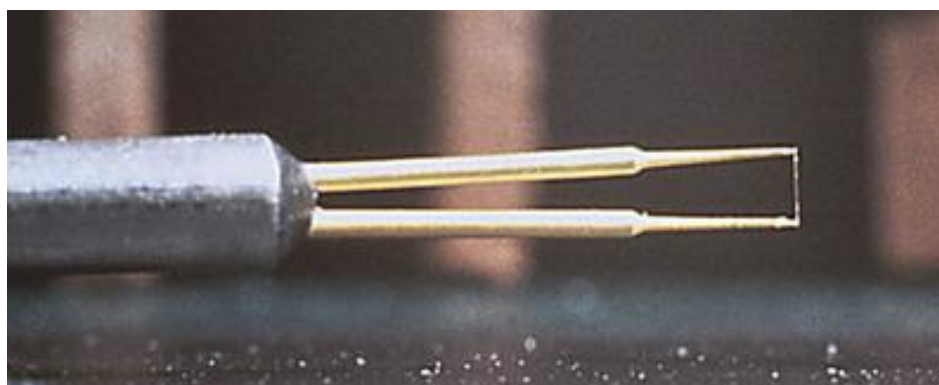
Termiset massavirtamittarit pystyvät toimimaan kahdessa eri tilassa, joiden avulla ne voidaan jakaa eri toimintamalliryhmiin. Nämä toimintaperiaatteet ovat vakiona pidettävään lämpötilaeroon perustuva malli (*Constant-temperature-difference, CTD*) sekä vakiotehon avulla toimiva malli (*Constant-power, CP*). CTD-mittarit pystyvät mittaamaan virtauksen nopeutta laajemmalla välillä. Mittausalue, jolla virtausmittari pystyy toimimaan, kutsutaan *turn down ratioksi*.

Jälkimmäisenä mainittu *vakiotehon*-mallissa käytetään kolmea eri osaa kaasuvirtauksen nopeuden mittaukseen. Lämmitetyn pään teho pidetään vakiona, ja virtauksesta aiheutuva lämmitetyn pään lämpötilan alenema mitataan siihen kytketyn sensorin avulla (*Vastuslämpötila-anturi, RTD*).

Kolmantena osana toimii lämpötilasensori, joka mittaa virtauksen lämpötilaa. Virtauksen nopeus saadaan selville lämmitetyn sensorin ja virtauksen lämpötilaa mittaavaan sensorin välisestä erosta.

Vakiotehon mallissa ei siis muuteta lämmitetyn anturin syöttötehoa virtauksen nopeuden suhteen, vaan virtauksen nopeus saadaan selville lämpötilan alenemisesta lämmitetyssä päässä.

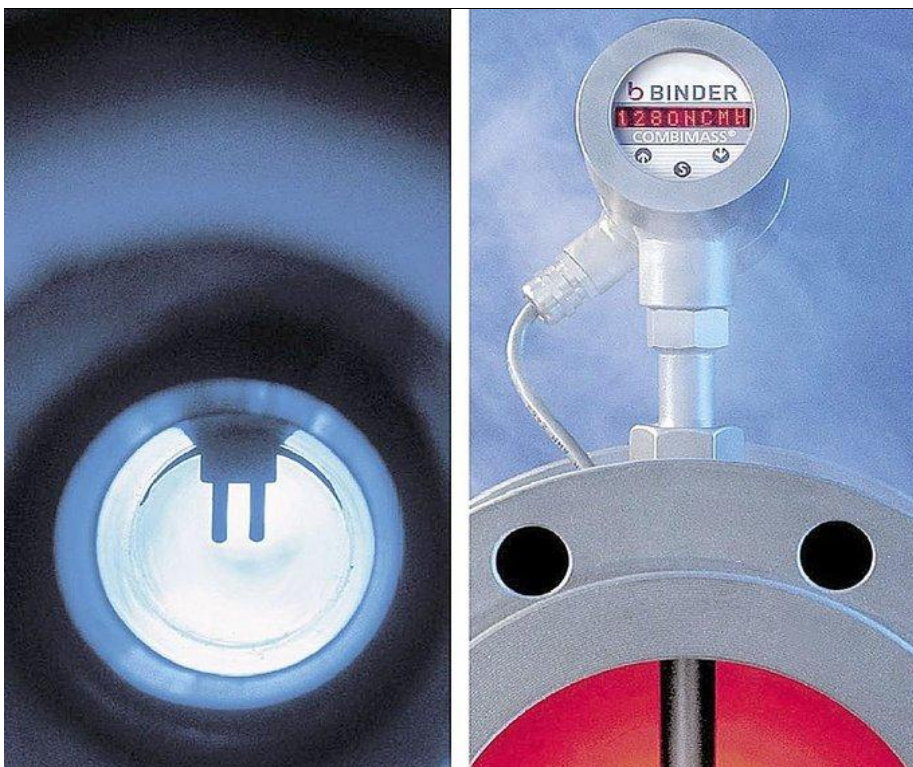
Kuumalanka-anemometri (*Hot wire anemometer*), on yksinkertainen tapa mitata virtauksen nopeutta. Kuvassa 12 on tavanomainen kuumalanka-anemometri, josta suurin osa toimii vakiotehon mallin avulla:



Kuva 12. Kuumalanka-anemometri. Ohut kuumalanka päiden välissä on yleisesti platinaa tai volframia [16]

Anturin päiden välissä oleva kuumalanka jäähtyy virtauksen nopeuden suhteen. Yleisimmät materiaalit kuumalankaksi ovat platina, volframi ja nikkeli. Kuumalanka-anemometri voi olla myös monimutkaisempi rakenteeltaan, jolloin voidaan käyttää kahden eri kuumalankaa samassa anturissa. Monimutkaisemmat kuumalanka-anemometrit ovat käytössä tutkimuksissa. [1, s. 148, 12.]

Vakiona pidettävään lämpötilaeroon perustuvan virtausmittauksen toimintaperiaatteena on kahden eri mittapisteen välinen lämpötilaero (ks. kuva 13, seur. s.), joka on riippuvainen virtauksen nopeudesta sekä virtaavan aineen konduktiivisuudesta. Kaasussa olevien molekyylien määrä riippuu kaasun lämpötilasta sekä paineesta, toisin sanoen kaasun tiheydestä. Paineen noustessa tai lämpötilan laskiessa kaasun tiheys kasvaa. Kaasuissa paineen vaikutus moolitulavuuteen on suuri, nesteissä moolitulavuus ei ole vahvasti riippuvainen paineesta. [17, s. 404.]



Kuva 13. Terminen massavirtamittari asennettuna putkeen; vasemmassa kuvassa anturin lämmitettävä osa sekä virtauksen lämpötilaa mittaava osa [18]

Teollisuudessa käytettävä massavirtamittari on asennettuna mitattavan virtauksen putkeen, ja mittapää on yhteydessä kaasun virtaukseen. Teollisuudessa käytettävistä termisten massavirtamittareiden ulostulosignaali on yleisesti virtaulostulona 4 - 20 mA tai jänniteulostulona 0 - 5 V.

Molekyylien määrä kasvaa paineen noustessa sekä lämpötilan laskiessa. Kaasun tiheyden kaava 6:

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad (6)$$

ρ on kaasun tiheys

M on moolimassa

V_m on moolitilavuus,

[19.]

jossa moolimassa on molekyylien tai atomien yhden moolin massa. Moolitilavuus on moolin tarvitseva tilavuus yhtä moolia kohti, joka on riippuvainen lämpötilasta ja paineesta. Standardimoolitilavuus on yhden moolin tilavuus, V_m 273,15 K -lämpötilassa on 22,41 l/mol, normaalipaineen ollessa 101,325 kPa (1 atm) [20, s. 230].

Esimerkkinä taulukossa 2 vety, happi ja hiilidioksidi, joiden moolimassojen erosta johdettu tiheyksien ero esiteltynä. Tiheys ρ laskettu kaavasta 6 moolitilavuuden V_m :n ollessa 22,41 l/mol.

Taulukko 2. Vedyn, hapen ja hiilidioksin tiheydet [21, s. 976]

alkuaine/yhdiste	moolimassa $M \frac{g}{mol}$	tiheys $\rho \frac{kg}{m^3}$
Vety H_2	2,016	0,08996
Happi O_2	31,999	1,42789
Hiilidioksidi CO_2	44,01	1,96385

Kuten taulukosta 2 voidaan havaita vedyn ja hiilidioksidin tiheydessä on huomattava ero, joka vaikuttaa virtauksen kykyyn kuljettaa lämpöä lämmitetyn sensorin pinnalta, joka aiheuttaa sensorin lämpötilan alenemisen. Tiheyden noustessa konduktiivisuus nousee.

Taulukosta 3 huomataan, että vaikutusta kaasun paineeseen P ei synny, jolloin kaasun paine pysyy samana kuin normaalipaine (NTP). Ideaalikaasun tilanyhtälö kaavassa 7:

$$pV = nRT \quad (7)$$

p on ideaalikaasun paine

V on tilavuus

n on moolimäärä

R on ideaalikaasuvakio

T on lämpötila

[22, s. 40.]

Ideaalikaasuyhtälö voidaan myös ilmoittaa kaasun paineen, kaasuvakion ja lämpötilan välisen suhteen mukaan:

$$P = \rho RT \quad (8)$$

P on kaasun paine

R on kaasusta riippuva vakio

T on lämpötilä

[19.]

Taulukko 3. Vedyn, hapen ja hiilidioksidin kaasunpaineet lämpötilan ollessa 273,15 K [21, s. 930]

alkuaine/yhdiste	tiheys $\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	kaasuvakio $R \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	kaasun paine P
Vety H_2	0,08996	4,1242	101,3 kPa
Happi O_2	1,42789	0,2598	101,3 kPa
Hiilidioksidi CO_2	1,96385	0,1889	101,3 kPa

Taulukon 3 kaasun paine laskettu kaavasta 8 lämpötilan T ollessa 273,15 K. Laskuesimerkkinä kaavassa 9 vedyn kaasun paine lämpötilan ollessa 273,15 K.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{vety}} &= \rho RT \quad (9) \\
 &= 0,08996 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1242 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 273,15 \text{ K} \\
 &= 101,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Taulukosta 3 selviää vety-, happi- ja hiilidioksidikaasujen kaasuvakioiden sekä kaasujen tiheyksien suhde. Hapen ja vedyn kaasun paineet laskettu laskuesimerkkikaavan 9 ta-
paan.

Taulukko 4. Vedyn, hapen ja hiilidioksidin kaasunpaineet lämpötilan ollessa 323,15 K (50 °C) [21, s. 930]

alkuaine/yhdiste	tiheys $\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	kaasuvakio $R \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	kaasun paine P
Vety H_2	0,08996	4,1242	119,9 kPa
Happi O_2	1,42789	0,2598	119,9 kPa
Hiilidioksidi CO_2	1,96385	0,1889	119,9 kPa

Taulukosta 4 huomataan kaasun paineen nousu, kun lämpötila nousee 323,15 Kelviniin (50 °C), jolloin kaasun paineen eroksi vertailtaessa 273,15 K ja 323,15 K välillä syntyy 18,6 kPa.

On huomioitava, että kaasujen tiheydellä on kuitenkin vaikutus kaasujen konvektiokykyyn (*lämmön johtavuuskyky*). Tiheämpi kaasu pystyy kuljettamaan nopeammin lämpöä lämmitetyn sensorin pinnalta, aiheuttaen nopeamman jäähtymisen (*cooling effect*). Esimerkiksi teollisuudessa kaasuvirtauksen mittaukseen käytettävät massavirtamittarit joudutaan kalibroimaan kutakin mitattavaa kaasua varten.

Toinen termisen virtausmittarin lämpötilasensoreista (*hot point*) pidetään jatkuvassa vakiolämpötilassa sähkövirran avulla ja lämpötilasensorin lämmitykseen kulunutta energian määrää verrataan lämmittämättömään lämpötilasensoriin (*cold point*), joka mittaa fluidin todellista lämpötilaa. Kaasun todellista lämpötilaa mittaava sensori toimii referenssinä mittauksessa lämmitetyille sensorille.

Sensoreiden välinen lämpötilaero asetetaan haluttuun arvoon säätämällä lämmitetyn sensorin lämpötilaa sähkövirran avulla virtauksen ollessa nolla. Virtauksen nopeus pysytään mittamaan suoraan virtauksesta kahden lämpötilasensorin vakiona pidettävään lämpötilaeroon kuluvan sähkövirran avulla. Lämmitetyn lämpötilasensorin läpi kulkeva ilmavirta jäädyttää sensoria. Kuten lämpöopissa on todettu, kappaleen rajapinnalla oleva lämpö kuljettuu fluidin virtauksen mukana [23].

Se, miten nopeasti virtaava kaasu jäähdyttää lämmitettyä sensoria, riippuu kaasun virtauksen nopeudesta sekä virtaavan aineen konvektiokyvystä. Lämpö kuljettuu lämpimästä kappaleesta viileään. Tätä lämmön siirtymistä virtauksen mukana kutsutaan konvektioksi (*Convection*) [12].

Luvun alussa (ks. s. 18) esiteltyjen termisten massamittareiden hyötyjen, kuten alhainen valmistuskustannus, luotettavuus, kestävyys sekä tarkkuus, lisäksi termisillä massavirtamittareilla on heikot osa-alueensa. Antureiden heikkouksina ovat olleet suuri tehonkulutus, hitaat vasteajat, riippuvuus mitattavan aineen tiheydestä, anturin manuaalinen kalibrointi sekä anturin suuri fyysinen koko.

Yhtenä suurena kehityksen askeleena antureiden pienemmän koon, alhaisemman virrankulutuksen sekä nopeampien vasteaikojen takana on ollut MEMS-teknologia. 1990-luvun lopussa alkoi MEMS-teknologian avulla kehitys pienempien, vähemmän tehoa kuluttavien ja nopeampien vasteaikojen omaavien termisten massavirtamittausten kehitys [13, s. 1; 24].

3.3.1 Termisen massavirtamittauksen digitalisointi

Eräänä ratkaisuna termisten massavirtamittausten suureen tehonkulutukseen (hukkaenergia 40 - 70 %), manuaalisen kalibroinnin poistamiseen sekä rajoitettuun vastenopeuteen on käytetty perinteisesti mittaussiirissä hyödynnettävän Wheatstonen sillan [25] korvaamista digitaalisella piirillä (mikrokontrollerilla). Perinteisesti käytetty Wheatstonen silta kuvassa 14 (ks. s. 26).

Virtauksen kuljettamaan lämpöä voidaan kuvata Kingin lain (*King's law*) avulla:

$$I^2 R = (T_w - T_0)(A + B)\sqrt{V} \quad (10)$$

I on kuumalangan läpi kulkeva virta

R on kuumalangan resistanssin arvo

T_w on kuumalangan pinnan lämpötilä

T_0 on ilmvirran lämpötilä

A on kokeellisesti määritelty arvo

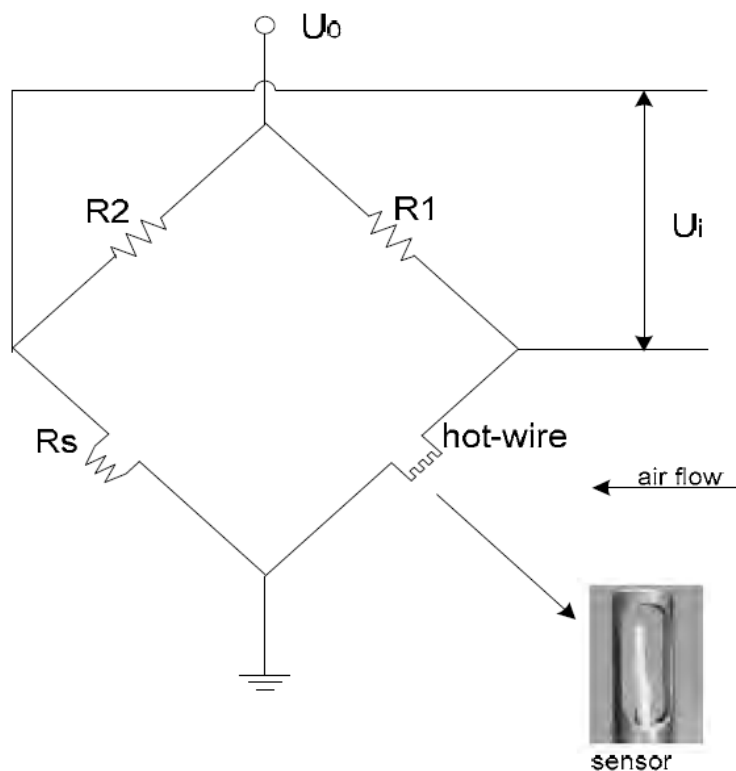
B on ympäröivä ominaisarvo,

josta saadaan

$$I^2 R = \Delta T(A + B)\sqrt{V} \quad (11)$$

ΔT on lämpötilaero

Kaava 11 kuvaa ilmvirran jäähdyttävää vaikutusta anturiin. Termisen massavirtamittarin toimiessa vakiona pidettävän lämpötilaeron -mallilla ilmvirran nopeus saadaan selville tarvittavan sähkövirran lisäyksestä lämmitettyyn päähän. Perinteisesti termisissä massavirtamittauksissa oleva Wheatstonen silta (kuva 14, seur. s.) korvataan pulssinleveysmodulaatiolla (*Pulse Width Modulation*). [26, s. 1 - 3.]

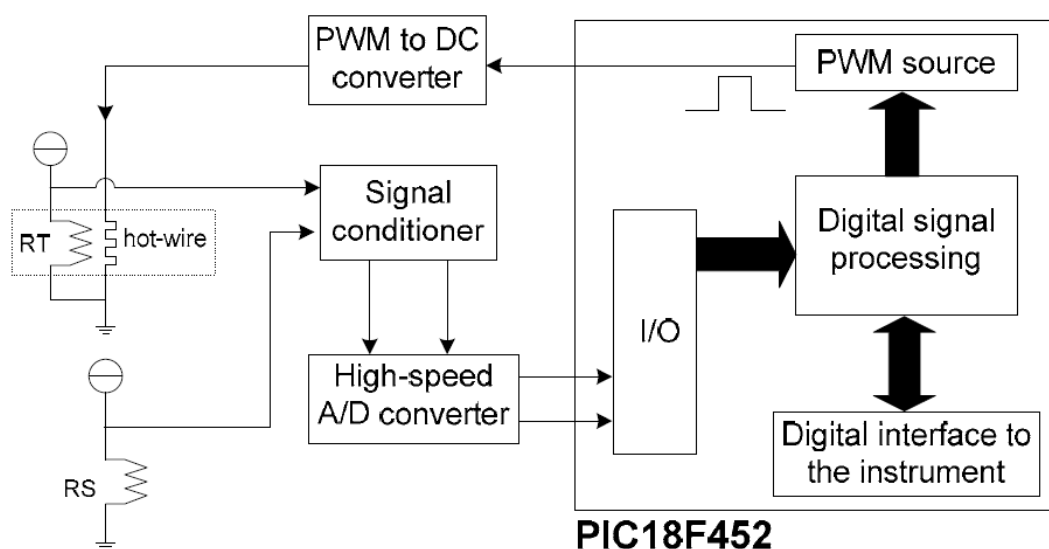


kuva 14. Perinteisesti termisissä virtausmittauksissa käytetty Wheatstonen silta [26, s. 2]

Kuvan 14 piirikaviossa resistanssi R_1 on osa häviötehoa. Kaavaan 12 Jännitteen U_0 arvo 12 V on määritetty virtauksen nopeuden ylittäessä $25 \frac{m}{s}$. Wheatstonen sillan vaatimusten takia $R_1:n$ arvo on 20Ω . R_s mittaa ympäröivää lämpötilaa ja kuumalanka (*hot-wire*) virtauksen nopeutta. $R_1:n$ tehohäviö voidaan laskea kaavan 12 avulla:

$$\begin{aligned}
 P &= I^2 R_1 = \left(\frac{U}{R_1 + R_H} \right)^2 R_1 \\
 &= \left(\frac{12V}{20\Omega + 20\Omega} \right)^2 * 20\Omega = 1,8 W
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Wheatstonen sillan korvaava digitaalisen pulssinleveysmodulaation (ks. kuva 15, seur. s.) avulla saadaan alennettua mittauksessa syntyvää häviötehoa. Digitaalisen piirin ohjelmisto sisältää lineaarisen ennustavan algoritmin ja pulssinleveysmodulaation, jotka mahdollistivat pienemmän tehohäviö mittauksessa [26, s. 4].



Kuva 15. Digitaalinen pulssinleveysmodulaatio [26, s. 2]

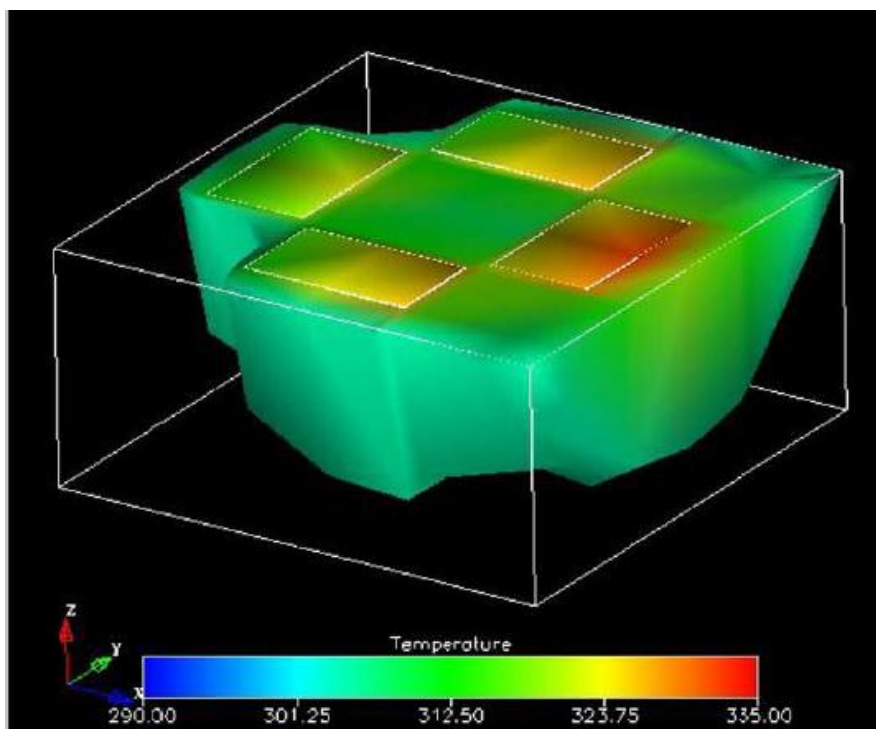
Kuvan 15 piirikaaviossa R_S mittaa ympäröivää lämpötilaa T_0 ja R_T mittaa kuumalangan lämpötilaa T_w (ks. kaava 10, s. 22). Kuten aikaisemmin on todettu, vakiona pidettävän lämpötilaeron mallissa virtauksen nopeus saadaan lämmitettävän kuumalangan virransyötön muutoksesta.

Digitaalisessa takaisinkytkennässä käytetään nopeaa A/D-muunninta saavuttamaan nopeammat ja tarkemmat vasteet. Digitaalinen versio termisen massavirtamittauksen piiristä tuo myös sivulla 22 esitettyihin heikkouksiin parannuksen koskien kalibrointia. Digitaalisen takaisinkytkennän avulla voidaan tallentaa kalibrointikäyrät muistiin. [26, s. 1 - 3.]

3.3.2 Sensori ilman lämpöelementtiä

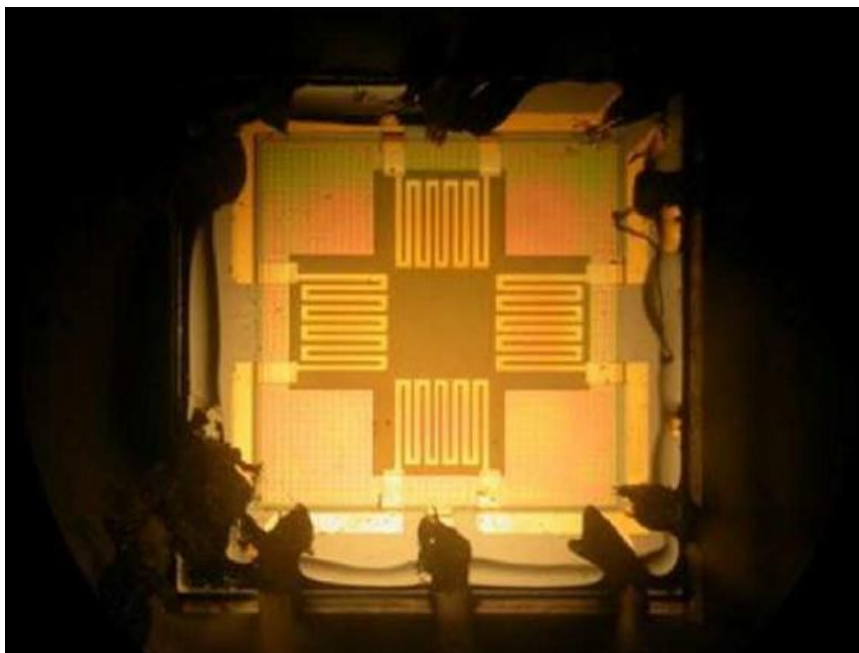
MEMS-teknologiaa on hyödynnetty myös lämpötilaeroon perustuvien virtausmittareiden kehityksessä. Vuonna 2010 esitellyssä tutkimuksessa *Self Heated Thermo-Resistive Element Hot Wire Anemometer* kaksisuuntaisen kuumalanka-anemometrin rakenne toteutettiin ilman lämpöelementtiä.

Kaksisuuntaisen (2D) tekniikan avulla voidaan määrittää ilmavirran nopeus sekä suunta. Tavanomaisesti käytettävä lämpöelementti korvataan sensoreina toimivien termistoreiden tuottaman lämpöenergian avulla. Termistoreiden tuottama lämpö pystyy tuottamaan tarvittavan lämpötilaeron anturin pinnalle. Tässä tekniikassa termistorit toimivat sekä lämpöä havaitsevina sensoreina, että lämpöä tuottavina sensoreina. [27; 28.]



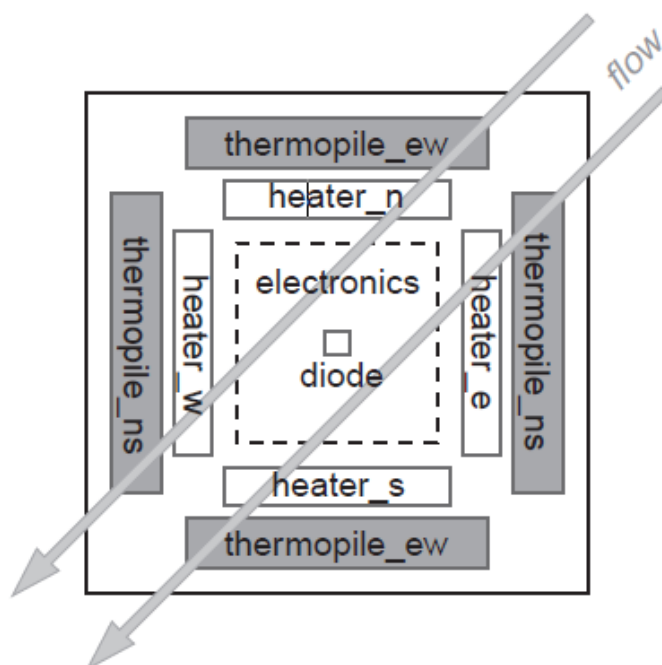
Kuva 16. Simulaatiokuva neljästä elementistä pii-kalvolla. Sensorielementtien lämpeneminen havaitaan kuvan Kelvin-asteikoilta [27, s. 1]

Ilman erillistä lämmittävää elementtiä toimivan anturin elementit ovat sijoitettu symmetrisesti piitriidikalvoon (Si_3N_4) (ks. kuvat 16 - 17). Perinteisissä malleissa sensorelementtien keskellä on yksi tai neljä lämmittävää elementtiä (ks. kuva 18, seur. s.).



Kuva 17. Mikroskooppikuva sensorista; nikkielementit ovat sijoitettuina piikalvolle [27, s. 1]

Ilman lämmittävää elementtiä toteutetun kuimalanka-anemometrin etuina ovat alhaisempi virrankulutus ja nopeampi vasteaika verrattuna perinteisiin lämpöelementin avulla toteutettuihin malleihin (kuva 18). Anturin kestävyys todettiin yli 12 kuukauden testijaksolla, jossa anturi altistettiin sateelle ja pölylle.



Kuva 18. Sensori toteutettuna neljällä erillisellä lämpöelementillä. Piikalvolla yhteensä kahdeksan elementtiä [29, s. 1]

Ilman lämpöelementtiä toimivan anturin avulla ilmavirtauksen nopeus saadaan neljän elementin käyttämästä sähkönkulutuksesta. Vastakkain olevien elementtien avulla saadaan selville ilmavirtauksen suunta. Nikkelistä valmistetuiden termistoreiden avulla saadaan laskettua ilmavirtauksen suunta kahden prosentin virhemarginaalilla ilmavirtauksen ollessa maksimissaan $20 \frac{m}{s}$.

Anturin tehonkulutus on 50 mW ilmavirran ollessa $0 \frac{m}{s}$, 25 °C lämpötilassa. 50 mW:n teholla saavutetaan elementtien lämpötilaksi 70 °C, jolloin vallitsevaan lämpötilaan syntyy 25 °C:een ero. Vastakkaisten elementtien lämpötilaeroksi saadaan testiolosuhteissa 15 °C -astetta. [27, s. 1 - 2.]

3.4 Ultraäänianturi

Ultraääneen perustuvia antureita on hyödynnetty erityisesti korkeiden kaasun lämpötilojen virtausmittauksissa. Ultraääniantureiden etuina ovat niiden laaja toiminta-alue (*turn down ratio*), alhainen hinta, käyttäjäystävällinen asennus ja kunnossapito sekä yksinkertainen rakenne. Ultraääneen perustuvan virtausmittarin toimintaperiaate esiteltiin jo vuonna 1928 *Rüttenin* patentissa. Markkinoille tuli kuitenkin vasta vuonna 1963 ensimmäinen kaupallinen ultraääneen perustuvuva virtausmittaus japanilaiselta Tokyo Keikiltä.

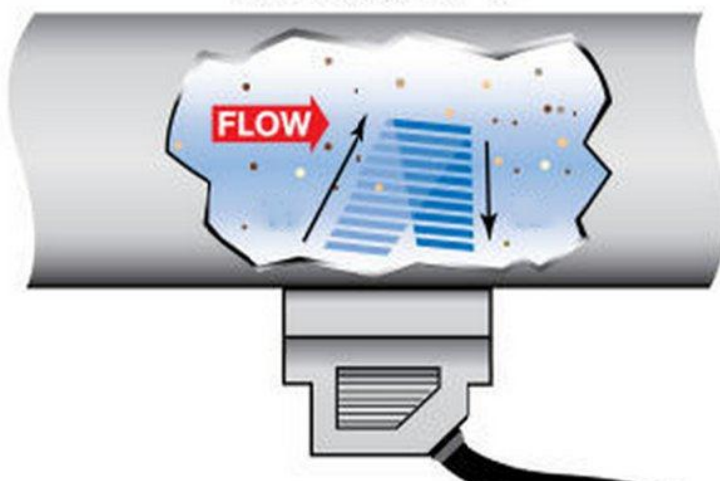
Ultraäänianturi ei saavuttanut yleisempää suosiota teollisuuden kaasun virtausmittauksissa kuin vasta 1970-luvulla. Syynä ultraäänianturin käyttämättömyyden teollisuuden virtausmittauksissa oli siinä ilmenneet ongelmat lyhyiden ajanjaksojen havaitsemisessa. Elektroniikan kehitys auttoi pääsemään eroon ongelmasta lyhyiden ajanjaksojen mittauksesta.

Epätarkkoja mittaustuloksia aiheuttanut lyhyiden ajanjaksojen mittaus johti ultraääniantureiden epäsuosioon markkinoilla, joka kesti 1990-luvulle asti. Tämän jälkeen ultraääneen perustuvat virtausmittaukset ovat olleet laajalti osana teollisuuden virtausmittauksia. [30; 31; 32, s. 1.]

3.4.1 Toimintaperiaatteet Doppler-ilmiö ja Transit-time

Ultraäänianturit voivat toimia kahdella eri toimintaperiaatteella, nämä ovat *Doppler-ilmiö* ja *Transit-time*. *Doppler-ilmiö* (*Doppler effect*, *Doppler shift*) perustuu liikkuvan partikkelin aiheuttamaan ultraäänisignaalin heijastukseen. Doppler-ilmiöön perustuva anturi koostuu siinä olevasta lähettimestä ja vastaanottimesta. Lähetin lähettää PZT-kiteen avulla signaalin kohti mitattavaa fluidia, jossa ovat partikkelit tai esimerkiksi nesteessä olevat kaasukuplat, heijastavat signaalin takaisin vastaanottimeen. Kun lähetetty signaali heijastuu partikkelista takaisin vastaanottimeen, sen taajuus muuttuu (*Doppler-shift*). Mitattavan fluidin virtausnopeus on verrannollinen taajuuden muutokseen.

Doppler-ilmiöön perustuva ultraäänimittari (kuva 19) soveltuu paremmin yksittäisten partikkeleiden mittaukseen kuin kaasuvirtauksen jatkuvaan nopeuden mittaukseen. *Doppler-ilmiöön* perustuva anturi on pääosin lietteiden ja ilmakuplia sisältävien nesteiden mittaukseen suunniteltu mittaus, anturin mittaustarkkuus on hyvin riippuvainen fluidin konduktiivisuudesta. [1, s. 123 - 124.]



Kuva 19. Doppler-ilmiöön perustuva ultraäänianturi, anturissa lähetin sekä vastaanotin [33]

Kaavasta 13 nähdään *Doppler-ilmiö*. Yhtälö on lähtevän ja tulevan taajuuden erotus:

$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (13)$$

Δf on taajuusero

Doppler-ultraäänianturilla massavirta saadaan mitattua kaavan 13 taajuuseron ja vakion K tulona:

$$Q = K \cdot \Delta f, \quad (14)$$

jossa K on partikkelin heijastuskulmasta, sijainnista ja poikkipinta-alasta riippuva vakio [1, s. 124.]

Transit-time-ultraäänimittari (*Time-of-flight*) perustuu signaalin kulku-aikaan lähettimestä vastaanottimeen (kaava 15), ei siis *Doppler*-ultraäänianturin tavoin taajuuden muutokseen. *Transit-time*-ultraäänimittaus koostuu kahdesta anturista, joissa on molemmissa lähetin sekä vastaanotin. Anturit voidaan sijoittaa putken päälle rinnakkain esimerkiksi 45 asteen kulmaan toisiansa kohti (kuva 20 a, seur. s.), jolloin lähtevä ultraäänisignaali heijastuu putken pohjasta kohti vastaanotinta. Ultraäänimittareiden avulla mitattavan fluidin lämpötila ei saa nousta yli 250 °C -asteen. Jotta mittaustulos pysyisi tarkkana, fluidin on oltava mahdollisimman homogeeninen. Fluidin ominaisuuksista riippuva vaimennus (*attenuation*) laskee myös mittauksen tarkkuutta, kuten esimerkiksi hiilidioksimittauksissa (CO_2). On myös huomioitava, että vaimennus kasvaa taajuuden noustessa.

Signaalin kulku-aika Δt :

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (15)$$

Virtauksen nopeuden kaava on

$$Q = K \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_1 \cdot t_2} \quad (16)$$

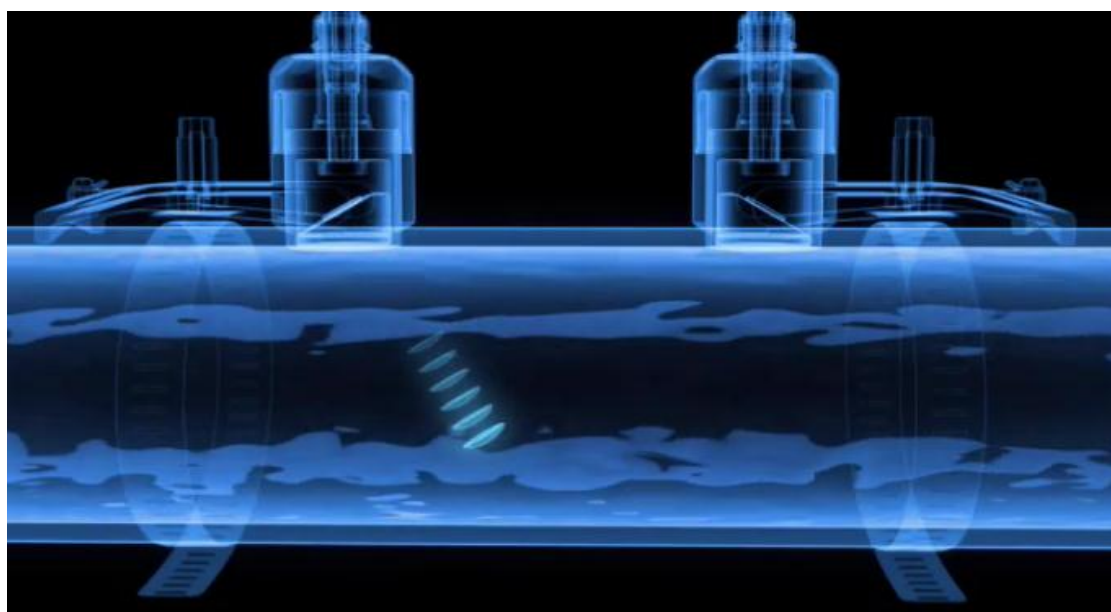
t_1 on signaalin kulku-aika myötävirtauksessa (*downstream*)

t_2 on signaalin kulku-aika vastavirtauksessa (*upstream*)

K on signaalin reitistä, sensoreiden välistä, virtauksen profiilista sekä putken poikkipinta-alasta riippuva vakio

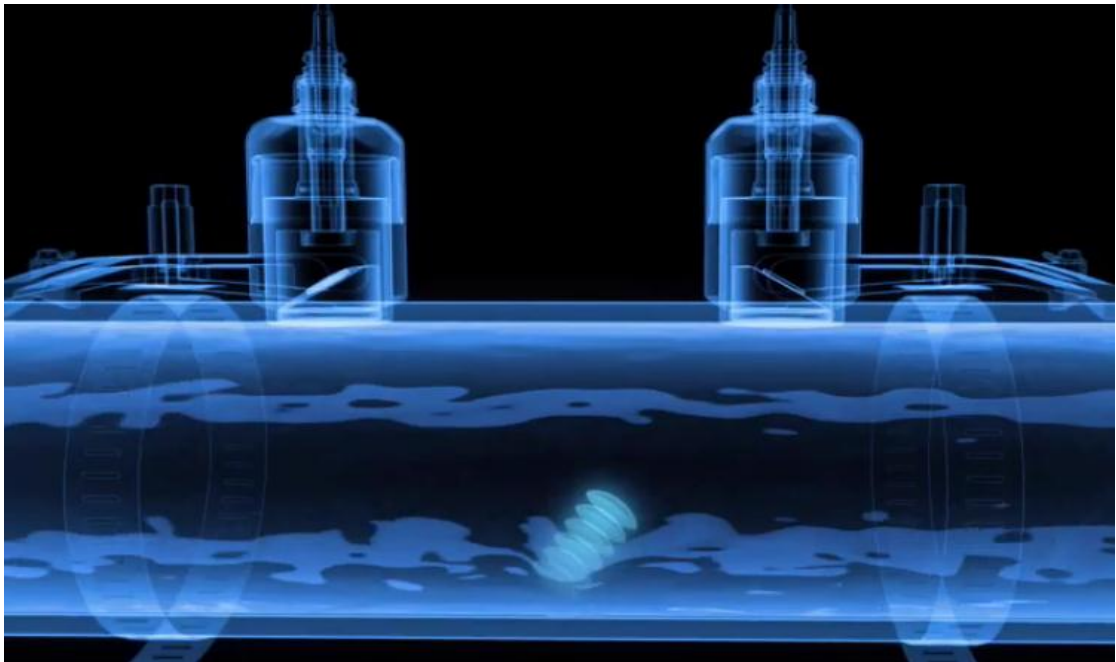
[1, s. 125.]

Kuvista 20 a) - c) voidaan nähdä signaalin kulkeutuminen lähettimestä vastaanottiin. Virtauksen ollessa nolla signaalin kulkuaika myötävirtauksessa (*downstream*) ja vastavirtauksessa (*upstream*) on sama. PZT-anturin (*Piezelectric transducer*) lähettämän ultraäänisignaalin kulkuaika myötävirrassa pienenee virtauksen nopeuden kasvaessa. Vastavirtaan kulkevan signaalin kulkuaika kasvaa virtauksen nopeuden noustessa. Signaalin kulkuaika on suoraan verrannollinen fluidin virtausnopeuteen, joka mahdollistaa virtauksen nopeuden laskemisen.



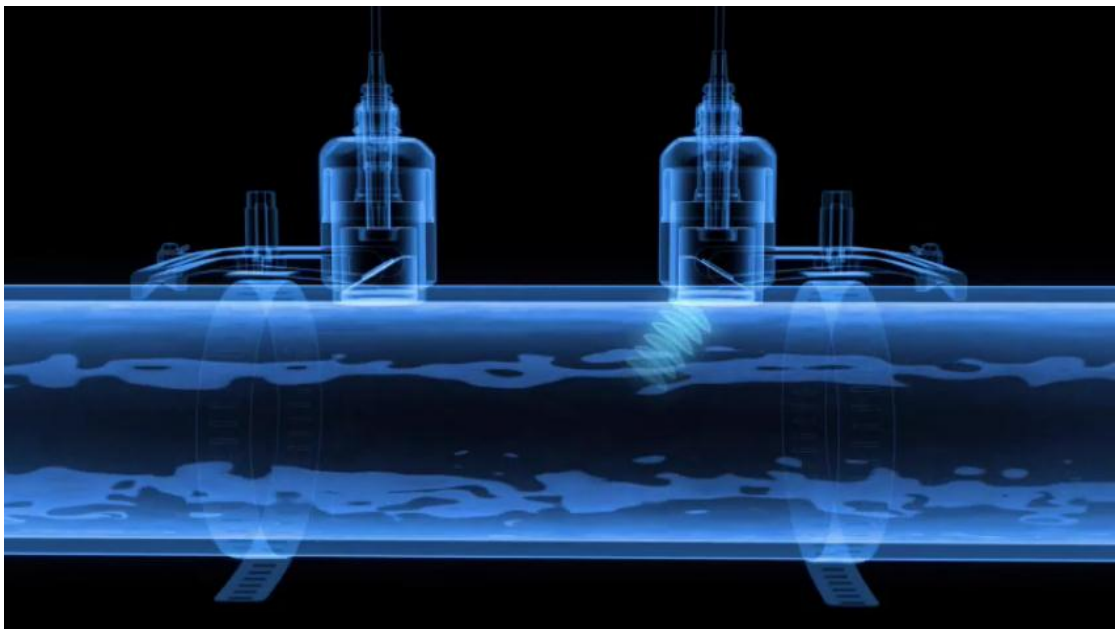
Kuva 20. a) Transit-time-ultraäänianturin signaali liikkuu vasemmalla olevasta lähettimestä oikean puolimmaiseen vastaanottiin [34]

Kuvassa 20 a) kaksi ulkoisesti asennettavaa anturia (*Clamp-on*) *transit-time*-ultraäänimittaukseen. Kuvassa virtauksen suunta vasemmalta oikealle. Molemmissa antureissa on lähetin ja vastaanotin, jotka lähettävät ja vastaanottavat signaalin. Teollisuuden massavirtamittauksissa ultraääniantureiden ulkoinen asennustapa mahdollistaa antureiden asentamisen ja huoltamisen keskeyttämättä mitattavaa prosessia.



Kuva 20. b) Transit-time-ultraäänianturin signaali heijastuu putken pohjasta kohti vastaanotinta [34]

Kuva 20 b) Lähetetty signaali heijastuu putken pohjasta kohti vastaanotinta. Kun signaali kulkee virtauksen suunnassa (*downstream*), sen kulkuaika on pienempi kuin vastavirtauksessa (*upstream*). Signaalin kulkuaika on verrannollinen virtauksen nopeuteen.



Kuva 20. c) Transit-time-ultraäänianturin signaali saapuu vastaanottimeen, josta se lähetetään takaisin signaalin lähettäneeseen anturiin [34]

Kuvassa 20 c) signaali saapuu vastaanottimeen. Kun ultraäänisignaali saapuu anturiin, anturissa oleva PZT-kide luo jännitteen. PZT-kiteen avulla myös luodaan lähetettävä ultraäänisignaali. Vastaanottimeen saapunut signaali lähetetään takaisin sen lähtöpisteeseen (lähettimeen). Signaalin kulku-aika on takaisin lähetettäessä suurempi, jos putkessa oleva fluidi on virtaavaa. Kun putken poikkipinta-ala on tiedossa, on ultraäänimittauksen avulla myös mahdollista laskea tilavuusvirta. [1, s. 125 - 129; 32, s. 1, 34; 35, s. 551; 36; 37]



Kuva 21. Ulkoisesti asennettavat anturit ultraäänimittaukseen (Clamp-on) [34]

Clamp-on-ultraääniantureiden asennustapa riippuu putken halkaisijasta sekä materiaalista. Halkaisijan ollessa alle luokan *DN 600* käytetään kuvan 21 asennustapaa, jos putken kokoluokka on yli *DN 600:n*, asennetaan anturit limittäin toisiaan kohti putken eri puolille. Käytettäessä jälkimmäistä tapaa, voidaan ultraäänivirtausmittauksia tehdä jopa halkaisijaltaan neljä metriä olevissa putkissa.

Clamp-on-antureiden lisäksi ultraäänianturit voidaan asentaa putken sisään. Putken sisään asennettavia, suorassa yhteydessä mitattavaan fluidiin olevia, antureita kutsutaan nimellä *Insertion sensors*. Putken sisään asennettavat sensorit asetetaan toisiaan vastakkain putkeen niin, että anturiparin toinen sensori lähettää signaalin myötävirtauksen suunnassa ja toinen vastavirtauksen suunnassa.

Ultraäänimittauksissa anturit asennetaan putkeen, jos putken putken materiaali on huonosti ultraäänisignaaleja johtavaa, esimerkiksi rakeista betonia (*granular concrete*). Tällä menetelmällä ultraäänisignaali kulkeutuu lähettimestä suoraan vastaanottimeen. Putken sisään asennettavat (*Insertion sensor*) anturit mahdollistavat myös monitiemittauksen (*Multipath*). Monitiemittauksessa voi olla kahdesta (*Dual-path*) viiteen sensori-paria.

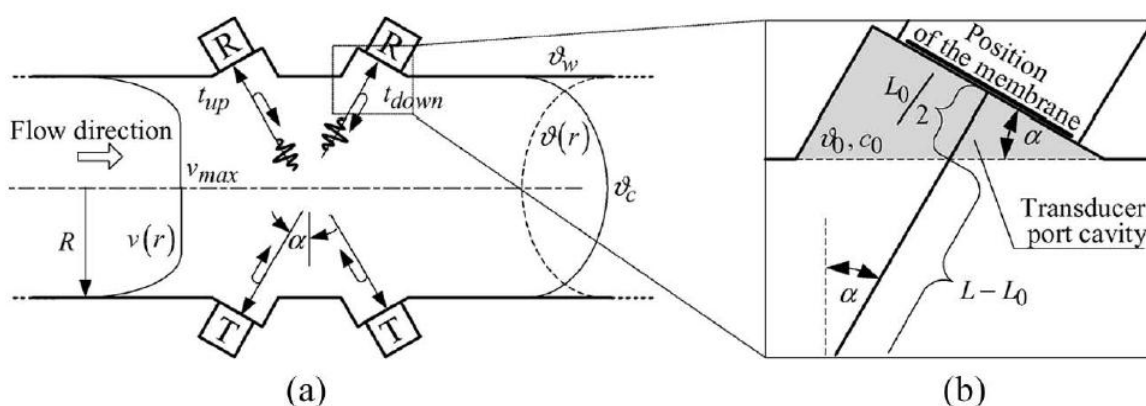
Sensoriparit lähettävät signaaleja samanaikaisesti, niin virtauksen suunnassa kuin vastavirtauksessa. Tätä ultraäänimittausta, jossa signaalit etenevät vastakkaisiin suuntiin samanaikaisesti, kutsutaan nimellä *Contrapropagation transit-time flow meter*. Verrattuna ulkoisesti asennettaviin *Clamp-on*-antureihin, suorassa yhteydessä mitattavaan fluidiin olevat sensorit eivät ole yhtä herkkiä altistumaan virtauksen profiilin muutoksista aiheutuviin häiriöihin. [1, s. 126 - 127; 34; 38 s. 1.]

3.4.2 CUT ja PRF-tekniikka korkeiden lämpötilojen kaasunmittauksessa

Kaasun mittaukseen kehitetty kapasitiivinen ultraäänianturi (*CUT*) mahdollistaa erityisesti kaasuvirtauksen mittauksen korkeissa lämpötiloissa. *CUT*-antureiden avulla pystytään mittaamaan virtausta jopa 600 °C -asteen kaasuissa, joka on huomattavasti korkeampi verrattaessa PZT-antureiden 250 °C:n lämpötilarajaan. Tämän lisäksi *CUT*-anturit pystyvät mittaamaan transienteja hyödyntämällä *PRF*-tekniikka. *PRF* (*Pulse Repetition Frequency*) kuvaa pulssien määrä ajan suhteen. *CUT*:lla on siis korkean lämpötilan keston lisäksi etuna laaja kaistanleveys (*wide signal bandwidth*).

Kapasitiivinen ultraäänianturi koostuu metallisesta ohutkalvosta (*Metallic membrane foil*), joka on eristetty piioksidikerroksella (SiO_2) piipohjamateriaalista. Valittaessa sopivia materiaaleja pitää ottaa huomioon suurien lämpötilaerojen kestävyys. Parhaan mahdollisen akustisen impedanssin saavuttamiseksi anturin ohutkalvon materiaaliksi voidaan valita esimerkiksi titaaniseos. Anturi lähettää signaalin jännitteestä syntyvän oskillaation avulla, ohutkalvossa syntyvä oskillaatio luo ultraäänisignaalin. Kun lähetetty ultraäänisignaali saapuu vastaanottimeen, signaali luo ohutkalvoon osuessaan varauksen tai jännitteen muutoksen. Kapasitiivista ultraäänianturia on hyödynnetty esimerkiksi auton moottorin transientti- ja massavirtausmittauksissa. [36; 39.]

Itävaltalaisen *Martin Gröschlin* tutkimusryhmä esitteli vuonna 2006 mukautuvan pulssintoistotaajuustekniikan kuumille, sähkömagneettisia pulsseja sisältäville kaasuille tutkimuksessa *Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases*. Mittaukset suoritettiin asentamalla *CUT* moottorin pakoputken päähän. Ultraäänianturiparit asennettiin putken sisään (*Wetted configuration*) mittaamaan kaasun massavirtaa (ks. kuva 22.)



Kuva 22. a) Putken asennetut anturiparit massavirran mittaukseen. b) Ultraäänianturin portin onkalo [38, s. 3]

Kuvassa 22:

- t_{up} on signaalin kulku-aika vastavirtauksessa
- t_{down} on signaalin kulku-aika myötävirtauksessa
- $v(r)$ on kaasuvirtaus
- $\vartheta(r)$ on kaasuvirtauksen lämpötilajakauma
- ϑ_w on seinämän lämpötila
- ϑ_c on putken sisimmän lämpötila
- ϑ_0 on portin onkalon lämpötila
- c_0 on äänen nopeus onkalossa
- L on sensorien kalvojen väli
- L_0 on onkaloiden keskiarvoinen syvyys

Kuvan 22 anturit ovat asennettu 30° kulmassa toisiinsa nähden putkeen ($R=25$ mm). Lähetin lähettää kolmijaksoisesti toistuvia signaaleja (*three-cycle burst mode*) vastaanottimeen taajuuksilla 350 - 500 kHz. Kolme lähetettyä signaalia jaksoa kohti takaa, että jokaiselta jaksolta saadaan huippuamplitudi.

Gröschlin tutkimusryhmän tutkimuksessa kaasun virtauksen nopeus v saatiin laskettua kaavasta

$$v = \frac{1}{2 \sin \alpha} \frac{(t_{up} - t_{down})(L - L_0)C_0^2}{(L_0 - C_0 t_{up})(L_0 - C_0 t_{down})} \quad (17)$$

Kaavoista 17 ja 18 voidaan nähdä, että virtauksen nopeuden ja äänen nopeuden kaavoissa on samat termit nimittäjässä: $(L_0 - C_0 t_{up})(L_0 - C_0 t_{down})$. Äänen nopeus c saatiin kaavasta

$$c = -\frac{1}{2} \frac{(2L_0 - C_0 t_{up} - C_0 t_{down})(L - L_0)C_0}{(L_0 - C_0 t_{up})(L_0 - C_0 t_{down})} \quad (18)$$

Virtauksen v ja äänen nopeuden c -kaavoista saatiin selville, että anturin onkaloissa ei synny lämpötilaeroja eikä kaasuvirtaus vaikuta ultraäänipulsseihin muualla kuin putken sisällä.

Moolimassan ja äänen nopeuden välinen suhde on

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R(273 + T)}{M}}, \quad (19)$$

jossa γ on adiabaattinen vakio [35, s. 117].

Kaavasta 19 saatiin johdettua äänen nopeus anturin portin onkalossa mittaamalla onkalon lämpötila seuraavasti:

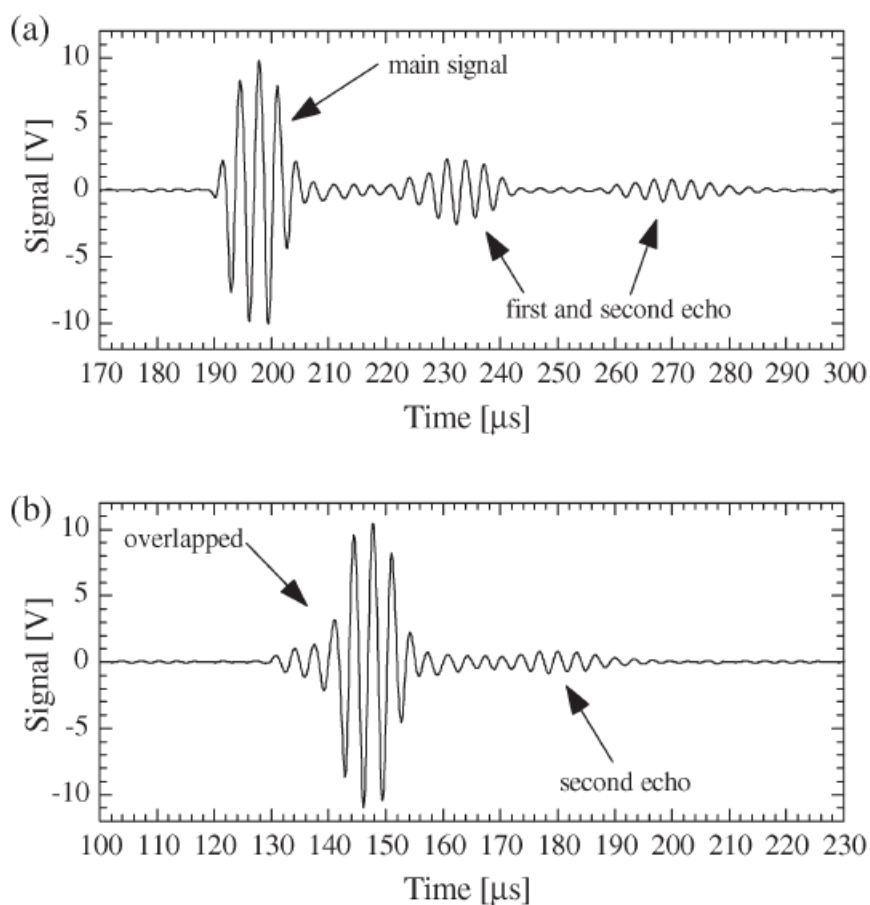
$$c_0 = \sqrt{\frac{\kappa(\vartheta_0)R(\vartheta_0 + 273,15)}{M}}, \quad (20)$$

jossa κ on lämpötilariippuvainen adiabaattinen vakio $c_p:n$ ja $c_v:n$ suhteesta. c_p on lämpökapasiteetti vakiopaineessa ja c_v lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa.

Putken kaasun massavirran Q_m kaava on

$$Q_m = 3600v_k k_v A \frac{P_K(\theta)}{c^2} \quad (21)$$

Kaavassa 21 virtauksen massavirta yksikössä $\frac{kg}{h}$, josta saadaan kertojaksi 3600. k_v on mittarin kompensoiva tekijä, joka mahdollistaa nopeuden v_A laskemisen. Mukautuvaa (*adaptive*) pulssintoistotaajuutta käytetään, koska vakiona pysyvä korkea *PRF* estäisi poikkeuksetta vastaanottimeen saapuvan pulssin saapumisajan havainnoinin. Kaasun ja anturin akustisen impedanssin yhteensopimattomuus aiheuttaa 180° vaihesiirron signaaliin, sen osuessa vastaanottimen kalvoon. Signaalin vaihesiirroista johtuen syntyy lähetetyn signaalin kanssa saman suuntaisia signaaleja, heijastuksia. Heijastukset voidaan nähdä kuvassa 23 a). Pulssien päällekkäistyminen (*overlapping*) on nähtävissä kuvassa 23 b). [38.]



Kuva 23. a) Vastaanottimeen saapunut signaali sekä ensimmäinen ja toinen heijastussignaali. b) Vastaanottimen signaalin ja ensimmäisen heijastussignaalin päällekkäistyminen [38, s. 4]

Moottorin pakoputkenpäästä suoritettuun massavirranmittaukseen saatiin optimaalinen pulssintoistotaajuus kaavasta

$$f_{rep} = \frac{cf}{f(2L+c\Delta t)-6c} \quad (22)$$

Kaavassa 22 on otettu huomioon vaihesiirrosta syntyvät heijastukset. Heijastukset saadaan erotettua alkuperäisestä signaalista asettamalla aikaväli Δt , joka poistaa mahdollisuuden signaalien sekoittumisesta keskenään. Tässä tutkimuksessa turvallisiksi aikaväliksi Δt saatiin 30 μs . Aikaväli pyritään asettamaan mahdollisimman pieneksi, prioriteettina kuitenkin se, että alkuperäinen lähetetty signaali ja heijastus eivät pääse menemään päällekkäin (*overlapping effect*).

Mukautuvaa pulssintoistotaajutta hyödyntävällä kapasitiivisella ultraäänimittarilla, jonka kalvoon käytettiin titaaniseosta, saavutettiin virhemarginaaliksi 0,66 % 20 °C - 450 °C lämpötiloissa. Ultraäänimassavirtamittareiden ominaisen virhemarginaalin ollessa 2 % sisällä. Kun anturi on pitkiä aikoja korkean lämpötilan alaisena sen käyttöikä laskee [40].

Anturin kestävyys korkeille lämpötiloille, esimerkiksi auton moottorin kaasuvirtausta mitattaessa, on hyvin tärkeä ominaisuus. *Gröschlin* tutkimusryhmä on saavuttanut laboratoriomittauksissa kapasitiiviselle ultraäänianturille kestävyuden 600 °C:n lämpötilalle. Ultraäänimittaus asennetaan auton katalysaattorin ja pakoputkenpään välille [39, s. 2].

Putken sisään asennettavat ultraäänimittarit (*Inertial sensor, Wetted configuration*) voivat vaikuttaa mittaukseen tekemällä paine-eron mitattavaan fluidiin. Paine-eron osuus saadaan minimoitua anturin mahdollisen pienen koon avulla. *Clamp-on*-ultraääniantureilla ei ole paine-eroa tekevää vaikutusta virtaukseen, koska anturi asennetaan putken ulkopuolelle suorittamaan mittausta. [38, s. 1 - 9.]

4 Yhteenveto

Virtauksen mittaukseen on erittäin laajalti eri toimintamenetelmiin perustuvia mittareita erilaisten fluidien mittaukseen. Tässä insinööriyössä keskityttiin kolmeen eri virtausmittausmenetelmään: palkkianturiin, termiseen massavirtamittariin ja ultraäänimittariin. Työstä selvisi, että virtausmittareiden keskinäisen vertailun pitäisi perustua mittauskohteen asettamien ehtojen mukaan. Kahden eri virtausmittarin vertailu keskenään, jotka ovat suunniteltu eri käyttökohteisiin, on hyvin vaikeaa. Virtausmittareiden mittaustarkkuudessa oikea asennustapa on myös tärkeä tekijä ottaessa huomioon mittauksen virhemarginaalia.

Työssä esitetyn palkkianturin etuna on MEMS-tekniikan tuoma mikrokokoluokka, joka mahdollistaa sen käytön esimerkiksi tutkimustyössä. Palkkiantureita on käytössä myös avarauustekniikan ratkaisuissa. Itseresonoivan palkkianturin avulla pystytään mittaamaan ilmapirran nopeus ilman ulkoista jännitesyöttöä hyödyntämällä ilmapirrasta palkkiin syntyvä moduloitunut resonanssitaajuus. Terminen massavirtamittari edusti vanhaa, yksinkertaisen rakenteen omaavaa mittausta, joka perustuu kahden mittapisteen väliseen lämpötilaeroon. Termisen massavirtamittarin uusien kehitysmallien tuomien etujen avulla mittareista saatiin energiatehokkaampia sekä nopeampia vasteaika- ja mittauksiin.

Ultraääneen perustuvan virtausmittarin pietsosähköisen anturin korvaaminen kapasitiivisella anturilla mahdollisti ultraäänimittarin käytön hyvin korkeiden lämpötilojen sekä sähkömagneettisten pulssien alaisena. Mukautuvan pulssintoistotaajuuden avulla päästiin eroon myös ultraääniantureissa ilmenevän signaalin ja heijasteiden sekoittumisesta.

Eri toimintaperiaatteisiin perustuvien mittareiden kesken oli huomattavissa yhtäläisyyksiä koskien mittareiden kehityksen suuntauksia. Samoja suuntauksia eri toimintaperiaatteiden kesken oli muun muassa: energiatehokkuus, tarkkuus, nopeat vasteajat, helppo asennus ja kunnossapito sekä yksinkertainen rakenne. Teollisuudessa käytetyistä kaasuvirtausmittauksista suosituimpia ovat paine-eroon perustuvat mittarit, *Vortex*-mittarit, turbiinimittarit sekä ultraäänimittarit.

Insinööriyöhön piti alkuperäisten suunnitelmien mukaan kuulua myös koelaitoksella suoritettavia kaasuvirtausmittauksia, mutta johtuen syksyllä 2011 tapahtuneista työehtosopimukseen liittyvistä seurauksista, mittausten suorittaminen ei ollut mahdollista sovittuna ajankohtana. Tästä syystä insinööriyö pohjautuu yksinomaan virtausmittauksia käsitteleviin tutkimuksiin.

Lähteet

- 1 Endress+Hauser Flowtec AG. 2006. Flow Handbook, 3rd Edition 2006. Reinach, Sveitsi.
- 2 Seo, Young Ho, Byeong, Hee Kim. 2010. A self resonant micro flow velocity sensor based on a resonant frequency shift by flow-induced vibration. Verkkodokumentti. <<http://iopscience.iop.org/0960-1317/20/7/075024>>. 11.6.2010. IOPscience. Luettu 13.10.2011.
- 3 Leclerc, Jacques. 2007. MEMs for Aerospace Navigation. Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 2, Issue 10, 2007. 19.11.2007. Luettu 13.10.2011.
- 4 Qingsong, Cao, Yuehai, He. 2010. Multi-rate Vibration Control of Smart Piezoelectric Cantilever Beam. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference 28.6.2010. 3.8.2010. Luettu 13.10.2011.
- 5 Messenger, R.K., Aten, Q.T., McLain, T.W., Howell, L.L. 2009. Piezoresistive Feedback Control of a MEMS Thermal Actuator. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 18, No. 6, joulukuu 2009. 1.12.2009. Luettu 16.10.2011.
- 6 Pankanin, Grzegorz L. 2007. Experimental and Theoretical Investigations Concerning the Influence of Stagnation Region on Karman Vortex Shedding. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, IEEE. 25.6.2007. Luettu 18.10.2011.
- 7 Matyka, Maciej. 2005. Simulation of incompressible fluid flow phenomena with SIMPLE-MAC method, University of Wroclaw, Poland. Verkkodokumentti. <<http://panoramix.ift.uni.wroc.pl/~maq/eng/cfdthesis.php>>. Luettu 18.10.2011.
- 8 Blevins, R.D. 1977. Flow-Induced Vibration. Princeton, NJ: Van Nostrand-Reinhold. 1977. Luettu 16.10.2011.
- 9 Nguyen, N.T., 1997. Micromachined flow sensors—a review. Flow Meas. Instrum., Vol. 8, No. 1, sivut 7 - 16. 23.5.1997. Verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598697000198>>. Luettu 16.10.2011.

- 10 Meirovitch, Leonard. 1997. Principles and techniques of vibrations. Verk-kodokumentti. <<http://elib.tu-darmstadt.de/tocs/195045661.pdf>>. Pren-tice Hall. Luettu 18.10.2011.
- 11 Christiansen, Silke H., Singh, Rajendra, Gösele, Ulrich. 2006. Wafer Direct Bonding: From Advanced Substrate Engineering to Future Applications in Micro/Nanoelectronics. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, Issue 12. 29.1.2007. Luettu 18.10.2011.
- 12 Hodson, Howard. Prof. University of Cambridge. Hot-Wire Anemometers. Verkkodokumentti. <<http://www-g.eng.cam.ac.uk/whittle/current-research/hph/hot-wire/hot-wire.html>>. Luettu 19.10.2011.
- 13 Bruschi, Paolo, Dei, Michele, Piotto, Massimo. 2010. A Method to Com-pensate the Pressure Sensitivity of Integrated Thermal Flow Sensors. IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 10, lokakuu 2010. Luettu 24.10.2011.
- 14 Domínguez , Manuel, Masana, Francesc N., Jiménez, Vicente, Bermejo, Sandra, Amirola, Jorge, Ballester, Javier, Fueyo, Norberto, Castañer Luis M. 2002. Low-Cost Thermal Δ - Σ Air Flow Sensor. IEEE Sensors Journal, Vol. 2, No. 5, elokuu 2002. Luettu 25.10.2011.
- 15 Çubukçu, A.Ş, Urban, G.A. 2009. Simulation And Fabrication of a 2D-Flow sensor for Thermal Characterization of Fluids and for Flow Speed Measurements . Transducers 2009, Denver, CO, Yhdysvallat, kesäkuu 21 - 25, 2009. IEEE. Luettu 25.10.2011.
- 16 Leighton Cochran. 1987. American Association for Wind Engineering. Verkkodokumentti. <<http://www.aawe.org/gallery>>. Luettu 3.11.2011.
- 17 Gilbert, T.R., Kirss, R.V., Davies, G. 2004. Chemistry: The Science in Con-text. W.W. Norton & Company. New York, Yhdysvallat.
- 18 Binder Engineering. Thermal mass flow-meter for gas. Verkkodokumentti. <<http://www.directindustry.com/prod/binder-engineering/thermal-mass-flow-meters-for-gas-38233-309516.html>>. Luettu 4.11.2011.
- 19 Brown, Constance. Indiana University. Gas Pressure. Verkkodokumentti. <http://www.indiana.edu/~geog109/topics/01_atmosphere/PRESSURE_w ebnotesF08.pdf>. Luettu 10.11.2011.

- 20 McMurry, J., Castellion, M., Ballantine, D.S., Hoeger, C.A., Peterson, V.E. 2010. Fundamentals of General, Organic, and Biological Chemistry 6th Edition. Pearson International Edition. NJ, Yhdysvallat.
- 21 Cengel, Yunus A., Turner, Robert H., 2001. Fundamentals of Thermal-Fluid-Sciences. International Edition 2001. McGraw-Hill. Luettu 19.10.2011.
- 22 Lampinen, Markku J., 1997. Termodynamiikan perusteet. Otatieto. Helsinki.
- 23 Rohsenow, Warren M., Hartnett, James P., Cho, Young I. 1998. Handbook of Heat Transfer, Third Edition. Chapter 1.4 - Convection. McGraw-Hill. New York, Yhdysvallat.
- 24 Chen, Jack, Fan, Zhifang, Zou, Jun, Engel, Jonathan, Liu, Chang. 2003. Two-Dimensional Micromachined Flow Sensor Array for Fluid Mechanics Studies. Journal of Aerospace Engineering ASCE, huhtikuu 2003. Luettu 25.10.2011.
- 25 Hoffman, Karl A. Temperature Compensation Circuit for Thermal Flow Sensors Operated in Constant-Temperature-Difference Mode. Verkkodokumentti. <<http://www.hbm.com.pl/pdf/w1569.pdf>>. Luettu 1.11.2011.
- 26 Cao, Yundong, Xie, Zhengchun, Hou, Chunguang. 2009. Flow Rate Measurement System Using Thermal Air Flow Sensor. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI 2009. Luettu 2.11.2011.
- 27 Adamec, Richard, Thiel, Jozef, Victor, David. 2010. Self Heated Thermo-Resistive Element Hot Wire Anemometer. IEEE Sensors Journal, Vol. 10. No. 4, huhtikuu 2010. Luettu 23.10.2011.
- 28 Baiyong, Liu, Lai, P.T., Xueren, Zheng, Zhaohui, Wu, Bin, Li. 1997. A two-dimensional flow sensor using integrated silicon spreading-resistance temperature detectors. Review of Scientific Instruments, Vol. 68, Issue 10, lokakuu 1997. Luettu 5.11.2011.
- 29 Makinwa, K.A.A., Huijsing, J.H. 2001. A Smart Wind Sensor using Time-Multiplexed Thermal SD Modulators. Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC 2001. 1.8.2005. Luettu 7.11.2011.

- 30 Rütten, O. 1928. Deutsches Patent No. 520484, 1928. Saksa.
- 31 Yoder, Jesse. 2008. Flow Research, technology spotlight. Ultrasonic Flowmeters for Custody Transfer Multipath Systems Offer Accuracy for Critical Measurement Applications. Verkkodokumentti. <http://www.flowresearch.com/articles/PDF_Files/FC-0108-FA.pdf >. Luettu 8.11.2011.
- 32 Mylvaganam, K.S. 1989. High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 36, No. 2, maaliskuu 1989. Luettu 7.11.2011.
- 33 Dynasonics. 2011. Doppler Ultrasonic Flow Meters. Verkkodokumentti. <<http://www.dynasonics.com/products/doppler2.php>>. Luettu 8.11.2011.
- 34 Endress+Hauser. Measuring Principle of Ultrasonic Flowmeters. Verkkodokumentti. <<http://www.products.endress.com/eh/home.nsf/#products/~flow-measurement-flowmeter-ultrasonic>>.
- 35 Atkins, P.W. 1994. Physical Chemistry 5th Edition. Oxford University Press. Iso-Britannia.
- 36 Kupnik, Mario, O'Leary, Paul, Schröder, Andreas, Rungger, Ivan. 2003. Numerical Simulation of Ultrasonic Transit-Time Flowmeter Performance in High Temperature Gas Flows. Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium. Issue Date 5 - 8, lokakuu 2003, Vol. 2. Luettu 13.11.2011.
- 37 Arakaki, C., Ghaderi, A., Datta, B. K., Lie, B. 2006. Non-Intrusive Mass Flow Measurements in Pneumatic Transport. Verkkodokumentti. <<http://www.biopowders.net/Papers/OpapP13%201.pdf> >. Luettu 14.11.2011.
- 38 Kupnik, Mario, Schröder, Andreas, O'Leary, Paul, Benes, Ewald, Gröschl, Martin. 2006. Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique foran Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases. IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No.4 August 2006. Luettu 14.11.2011.

- 39 Schröder, Andreas, Kupnik, Mario, O'Leary, Paul, Benes, Ewald, Gröschl, Martin. 2006. A Capacitance Ultrasonic Transducer With Micromachined Backplate for Fast Flow Measurements in Hot Pulsating Gases. IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 4, elokuu 2006. Luettu 15.11.2011.
- 40 Schuegraf, K.F., Chenming, Hu. 1994. Effects of temperature and defects on breakdown lifetime of thin SiO₂ at very low voltages. Reliability Physics Symposium, 1994. 32nd Annual Proceedings, IEEE International. 11 - 14 huhtikuu 1994. Luettu 19.11.2011.