



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R13:1992**

# **Värmemätning i vätskesystem**

**Per Fahlén**

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400129214

**Bygghforskningsrådet**

Plac: BFR-  
Rapporter

R13:1992

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA  
VÄG- OCH VATTENBYGGNAD  
BIBLIOTEKET

## Värmemätning i vätskesystem

Per Fahlén

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850952-0  
från Byggforskningsrådet till Statens provningsanstalt,  
Enheten för energiteknik, Borås.

## Referat

Värmemätning i vätskesystem utgör ett viktigt område i samband med utvärdering av experimentbyggnadsprojekt. Mättekniken har också stor ekonomisk betydelse vid kommersiella värmemätningar, t ex i samband med garantiförhållanden för stora värmecentraler eller debiteringsmätning av värme. Denna rapport sammanfattar några av de viktigaste aspekterna på värmemätning i vätskesystem. Rapporten bygger på erfarenheter från utvärderingsverksamhet som bedrivits av t.ex. Byggeforskningsrådet, Vattenfall och SP. Vidare har SP bedrivit en omfattande laboratorieverksamhet i samband med t ex provning av värmemätare och värmepumpar vilket även innefattar löpande kalibreringsverksamhet för temperaturgivare och flödesmätare. Rapporten utgör en sammanfattning av SP-rapport 1991:13 "Värmemätning i vätskesystem".

I rapporten diskuteras bedömning av mätosäkerhet allmänt tillsammans med ett exempel applicerat på värmemätning. Speciellt behandlas sammanvägning av olika mätosäkerhetskomponenter till en total mätosäkerhet för storheten värme. Därefter behandlas de specifika osäkerheterna för bestämning av temperatur och flöde. Vidare ges rekommendationer för installation av temperaturgivare och flödesmätare i form av enkla tumregler.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R13:1992

ISBN 91-540-5424-9  
Byggeforskningsrådet, Stockholm

**gotab** 95472, Stockholm 1992

# Innehåll

		Sida
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	15
1.1	Bakgrund	15
1.2	Projektbeskrivning	16
1.3	Rapportens utformning	17
<b>2</b>	<b>Mätosäkerhet vid värmemätning</b>	18
2.1	Beräkning av värmeeffekt	19
2.2	Mätosäkerhet	22
2.3	Mätosäkerhetskomponenter vid värmemätning	33
2.4	Total osäkerhet vid värmemätning	41
2.5	Presentation av mätresultat	45
2.6	Normer	54
<b>3</b>	<b>Temperaturmätning</b>	56
3.1	Så bör man göra - tumregler	57
3.2	Mätning med dykrör	62
	Mätfel genom värmeledning	65
	Mätfel genom strålning	70
	Övriga orsaker till statistiska mätfel	72
	Dynamiska mätfel	78
3.4	Mätning med ytgivare	88
	Felaktig yttemperatur	89
	Felaktig givartemperatur	89
	Dynamiska fel vid yttemperaturmätning	93
3.5	Vanliga typer av givare	94
	Termoelement	95
	Resistansgivare	95
	Termistorer	95
3.6	Kalibrering	96
	Extern kalibrering	98
	Egen kalibrering	99
	Val av kalibreringspunkter	101
	Kalibreringsintervall	105
3.7	Total mätosäkerhet vid temperaturmätning	106
3.8	Normer för temperaturmätning	108

		Sida
<b>4</b>	<b>Flödesmätning</b>	110
4.1	Så bör man göra - tumregler	112
	Planera mätningen	112
	Välj rätt flödesmätare	113
	Gör rätt installation	114
4.2	Faktorer som påverkar resultatet av en flödesmätning	118
	Installation	122
	Flödesområde	124
	Tryck och temperatur	125
	Typ av vätska	128
	Typ av utsignal	129
	Dynamik	131
4.3	Några vanliga mätprinciper	135
4.4	Kalibrering	147
4.5	Total mätosäkerhet vid flödesmätning	156
4.6	Normer för flödesmätning	158
<b>5</b>	<b>Sammanfattning</b>	160
<b>6</b>	<b>Referenser</b>	161

## Beteckningar

a	halvvärdesbredd (likformig fördelning)
$c_p$	isobar specifik värmekapacitet
d	skaldel
e	systematiskt fel
F	fel
h	specifik entalpi (J/kg)
H	entalpi (J)
$\Delta H$	entalpiändring (J)
k	talfaktor
K	värmekoefficienten ( $= \rho \cdot c_p$ , J/m <sup>3</sup> /K)
K	egenuppvärmningskoefficienten (K/W)
L	längd (m)
M	egenuppvärmningsmotståndet (W/K)
n	antal mätningar
p	tryck (Pa)
P	effekt (W)
q	volymflöde (m <sup>3</sup> /s)
r	tillfälligt (random) fel
R	termisk resistans (K/W)
s	standardavvikelse (skattad)
s	skattad osäkerhetskomponent
$t_\beta$	Student's t-faktor med konfidensnivån $\beta (=1-\alpha)$ %
t	tid (s)
T	absolut temperatur (K)
u	sammanlagd mätosäkerhet
U	total mätosäkerhet ( $k \cdot u$ )
U	värmegenomgångskoefficient (W/m <sup>2</sup> /K)
v	hastighet (m/s)
w	förväntad osäkerhetskomponent
x	variabel storhet (oberoende)
y	variabel storhet (beroende)
$\alpha$	värmeövergångskoefficient (W/m <sup>2</sup> /K)
$\alpha$	sannolikhet att ett mätvärde ligger utanför ett visst intervall kring väntevärdet
$\theta$	temperatur enligt Celcius skala (°C), $\theta = T - 273,15$
$\lambda$	värmekonduktivitet (W/m/K)
$\rho$	densitet (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	standardavvikelse
$\tau$	tidskonstant (s)

Tidsmedelvärden markeras med fet, kursiv stil, t.ex. *X*

Rumsmedelvärden markeras med  $\langle \rangle$ , t.ex.  $\langle X \rangle$

## Index

0	begynnelsetillstånd
d	digital
F	framledning
G	givare
i	inre
i	isolering
K	konvektion
kb	köldbärare
l	luft
L	tillstånd efter sträckan L (m)
L	ledning
max	maximalt värde
min	minimalt värde
n	nominellt värde
nom	nominellt värde
p	tryck
r	rör
R	returledning
s	stigid
S	strålning
t	skiljegräns ("transitional value", "Trennwert")
T	temperatur
v	vatten
vb	värmebärare
y	yttre



# Definitioner

## Mättekniska termer

### Mätstorhet (SS 014150)

Storhet som är mål för mätning.

### Influensstorhet (SS 014150)

Storhet som ej är mål för mätning men som kan påverka mätresultat.

### Direkt mätmetod (SS 014150)

Mätmetod som ger det sökta storhetsvärdet direkt.

- Mätmetod förblir direkt även om ett mätdon används vars visning är i skaldelar och mätresultatet fås med hjälp av känt samband mellan visning och sökt storhetsvärde.
- Mätmetod förblir direkt även om mätning av influensstorhet ingår.

### Indirekt mätmetod (SS 014150)

Mätmetod varigenom det sökta storhetsvärdet bestäms genom mätning av andra storheter som har ett känt samband med den sökta storheten.

### Mätfel (SS 014150)

Ett mätvärdes avvikelse från ett jämförelsevärde.

- Jämförelsevärde kan vara sant värde ( i allmänhet okänt), konventionellt sant värde eller aritmetiskt medelvärde för en serie mätvärden.

### Onoggrannhet (SS 014150)

Uppgift om både tillfälliga och okorrigerade, systematiska fels storlek.

Onoggrannheten anges med gränser för systematiskt fel som inte har eliminerats och med gränser för tillfälligt fel.

### Mätosäkerhet

Skattning av bredden på det värdeområde inom vilket mätstorhetens sanna värde ligger.

### Skattad mätosäkerhetskomponent (MPR)

Mätosäkerhetskomponent vars storlek har skattats genom att man har applicerat statistiska metoder på resultatet av en mätserie.

### Förväntad mätosäkerhetskomponent (MPR)

Mätosäkerhetskomponent vars storlek har bestämts på annat sätt än med hjälp av statistiska metoder, t.ex. erfarenhetsmässigt.

### Sammanlagd mätosäkerhet (MPR)

Mätosäkerhet erhållen genom sammanläggning av alla mätosäkerhetskomponenter enligt reglerna för kombination av varianser.

### Total mätosäkerhet (MPR)

Sammanlagd mätosäkerhet multiplicerad med en angiven talfaktor k.

### Tillfälligt (mät)fel (SS 014150)

Mätfel som varierar slumpmässigt till värde och tecken under flera mätningar av samma storhetsvärde utförda under så identiska betingelser som möjligt.

- En på statistiska begrepp grundad definition av tillfälligt mätfel är: differens av mätvärde och mätvärdesfördelningens väntevärde.

### Systematiskt (mät)fel (SS 014150)

Mätfel, som under flera mätningar av samma storhetsvärde utförda under samma betingelser är konstant till värde och tecken, och som förblir konstant eller varierar regelbundet när betingelserna ändras.

- En på statistiska begrepp grundad definition av systematiskt mätfel är: differens av en mätvärdesfördelningens väntevärde och sant värde eller konventionellt sant värde.
- Mätvärdesfördelningens väntevärde och sant värde kan inte bestämmas genom experiment. Därmed kan inte heller systematiskt fel exakt bestämmas. Gränser för systematiskt fel kan dock skattas.

### Standardavvikelse för en mätserie (SS 020106)

För en serie av  $n$  mätningar av samma mätstorhet, det mått,  $s$ , på mätvärdenas spridning som ges av formeln

$$s = \left[ \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$$

där  $x_i$  är värdet på den  $i$ :te mätningen och  $\bar{x}$  är medelvärdet på de  $n$  mätvärdena.

### Medelvärdets standardfel (SS 020106)

Skattning,  $s_{\bar{x}}$ , av standardavvikelsen för det aritmetiska medelvärdet  $\bar{x}$  vilken ges av

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

### Gränser för systematiskt fel (SS 014150)

Gränser mellan vilka det systematiska felet bedöms ligga vid viss mätning. Gränserna kan ha lika eller olika tecken.

### Konfidensintervall (SS 014150)

Intervall som med en viss sannolikhet innesluter mätvärdesfördelningens väntevärde. Denna sannolikhet, som brukar betecknas  $1 - \alpha$ , benämns **konfidensnivå**.

### Gränser för tillfälligt fel (SS 014150)

Värden som, genom att adderas med sina tecken till det aritmetiska medelvärdet för en serie mätvärden, ger konfidensgränserna.

Gränserna för tillfälligt fel har samma belopp men olika tecken.

### **Repeterbarhet av mätningar (SS 020106)**

Grad av överensstämmelse mellan resultaten av successiva mätningar på samma mätstorhet, erhållna under följande betingelser:

- samma mätmetod
- samma observatör
- samma mätinstrument
- samma plats
- samma användningsbetingelser
- upprepning under kort tid

Anm. Repeterbarhet kan uttryckas kvantitativt som ett spridningsmått.

### **Reproducerbarhet av mätningar (SS 020106)**

Grad av överensstämmelse mellan resultaten av mätningar av samma mätstorhet, vilka utförts med ändring av betingelser som:

- mätmetod
- observatör
- mätinstrument
- plats
- användningsbetingelser
- tid

Anm.1. För att uppgift om reproducerbarhet skall ha något värde måste de ändrade betingelserna specificeras.

Anm.2. Reproducerbarhet kan anges kvantitativt som ett spridningsmått.

### **Kalibrering (SS 020106)**

Följd av åtgärder, som under specificerade betingelser fastställer sambandet mellan ett mätinstruments, en mätuppställnings- eller materialiserat måtts visning och motsvarande kända värden på en mätstorhet.

Anm.1. Kalibrering gör det möjligt att skatta visningsfel hos mätdon eller mätuppställning, eller att tilldela värden till skalmarkeringar på godtyckliga skalor.

Anm.2. En kalibrering kan också bestämma andra metrologiska egenskaper.

Anm.3. Kalibreringsresultaten kan anges i ett dokument, ibland benämnt kalibreringsbevis eller kalibreringsrapport.

Anm.4. Ett kalibreringsresultat anges ibland som en kalibreringsfaktor, eller som en följd av kalibreringsfaktorer i form av en kalibreringskurva.

**Spårbarhet (SS 014150)**

Möjlighet att härleda ett mätgons kalibrering fram till en normal med accepterad eller föreskriven noggrannhet.

Spårbarheten förutsätter tillgänglig dokumentation som bevis och anges i allmänhet med referens till nationell eller internationell normal.

**Skaldel,  $d$ ,  $d_d$** 

Skaldel uttryckt i relevant enhet (t ex 0,1 kW). Den minsta indelningen på skalan när angivelse eller registrering är analog (beteckning  $d$ ) eller skillnad av två på varandra följande indikeringar när angivelse är digital (beteckning  $d_d$ ).

**Upplösningsfel**

Uttryck för osäkerheten i avläsning av mätvärde.

Upplösningsfel kan anges som absolutfel eller som relativt fel uttryckt i procent av uppmätt värde.

## Definitioner för värmemätare (SPKB 1986:18)

### Värmemätare

Enligt Statens provningsanstalts kontrollbestämmelser SPKB 1986:18 består en värmemätare av:

- anordning för mätning i returledning av värmebärarens flöde och/eller volym.
- anordning för mätning av temperaturdifferens mellan fram- och returledning.
- anordning för beräkning av termisk energi (integreringsverk).

I de värmemätare, som här avses, beräknas termiska energin ur följande formel:

$$Q = \int_0^{t_0} q \cdot (\theta_F - \theta_R) \cdot K \cdot dt$$

I formeln betyder

Q	beräknad termisk energi
q	värmebärarens volymflöde
$\theta_F$	temperatur i framledning
$\theta_R$	temperatur i returledning
K	värmekoefficienten, som är produkten av vätskans densitet $\rho$ vid temperaturen $\theta_R$ och medelvärdet i temperaturintervallet $(\theta_F - \theta_R)$ av den specifika isobara värmekapaciteten $c_p$
$t_0$	tiden under vilken energin beräknas.

### Felgräns

Gräns för tillåtet fel, d.v.s största tillåten avvikelse från börvärde omfattande såväl samtliga systematiska fel som tillfälliga fel.

### Temperaturområdets övre gräns, $\theta_{\max}$

Högsta temperatur som kan förekomma vid den del av mätare som är i kontakt med vätskan i framledningen utan att felgränser överskrids.

### Temperaturområdets undre gräns, $\theta_{\min}$

Lägsta temperatur som kan förekomma vid den del av mätare som är i kontakt med vätskan i returledningen utan att felgränser överskrids.

### Nominell temperatur

Högsta temperatur som vattenmätare får utsättas för i kontinuerlig drift.

### Största temperaturdifferens, $\Delta\theta_{\max}$

Övre gräns för temperaturdifferens som kan förekomma mellan temperaturgivare i fram- respektive returledning utan att felgränser överskrids.

**Minsta temperaturdifferens,  $\Delta\theta_{\min}$** 

Undre gräns för temperaturdifferens som kan förekomma mellan temperaturgivare i fram- respektive returledning utan att felgränser överskrids.

**Nominell effekt,  $P_{\text{nom}}$** 

Värmeeffekt som erhålls vid största temperaturdifferens och vid flöde hos värmebäraren motsvarande vattenmätarens nominella flöde.

**Maximal effekt,  $P_{\text{max}}$** 

Värmeeffekt som erhålls vid största temperaturdifferens och vid flöde hos värmebäraren motsvarande vattenmätarens maximala flöde.

**Största flöde,  $q_{\text{max}}$** 

Största flöde för vilket vattenmätare skall ge resultat under begränsad tid utan att största tillåten onoggrannhet och största tillåtet tryckfall överskrids samt utan att mätaren skadas.

**Minsta flöde,  $q_{\text{min}}$** 

Minsta flöde för vilket vattenmätare skall ge resultat utan att största tillåten onoggrannhet överskrids.

**Flödesområde**

Område för flöden avgränsat av det största och minsta flöde ( $q_{\text{max}}$  respektive  $q_{\text{min}}$ ) för vilka vattenmätare ska prestera resultat utan att största tillåten onoggrannhet överskrids.

**Gränslöde,  $q_t$** 

Flöde som delar flödesområdet i två zoner, kallade övre och undre zon, var och en karakteriserad av konstant gränsvärde på största tillåten onoggrannhet.

**Nominellt flöde,  $q_n$** 

Värde på flöde definierat som  $0,5 \cdot q_{\text{max}}$ .

## Övriga termer

### **Driftpunkt (SS 2620)**

Driftförhållande som definieras av fastställda parametrar.

### **Garantipunkt (SS 2620)**

Driftpunkt som anges i garantiavtal eller motsvarande.

### **Värmebärare (SS 1897)**

Medium som transporterar värme från värmeavgivare till användningsställe.

### **Köldbärare (SS 1897)**

Medium som transporterar värme från värmekälla till värmepump eller från kylställe till kylanläggning.

### **Stabilt flöde (ISO/TR 3313)**

Flödesförhållanden i en mätsektion där flödet inte varierar med tiden.

### **Pulserande flöde (ISO/TR 3313)**

Flödesförhållanden i en mätsektion där flödet beror av tiden med ett medelvärde som bestämts över en tillräckligt lång period och vilket är konstant. Flödet är inte längre stabilt utan varierande men dock statistiskt stabilt. Stabilt flöde är gränsfallet för pulserande flöde när variationerna är noll. Pulserande flöde kan men behöver inte vara en summa av en konstant och en periodisk tidsfunktion. Därför måste två ytterligare definitioner införas.

### **Periodiskt pulserande flöde (ISO/TR 3313)**

Roterande eller fram-och återgående maskindelar ger upphov till periodiska flödesvariationer, vilka består av summan av både en konstant och en periodisk tidsfunktion och kan därför betraktas som statistiskt stabila. Detta flöde kallas periodiskt pulserande flöde.

### **Variérande (slumpmässigt) pulserande flöde (ISO/TR 3313)**

Vissa egenskaper hos en installation (t.ex. krökar, areaförändringar, ventiler etc.) ger upphov till dynamiska instabiliteter, t. ex. instabila diskontinuitetsytor för hastigheten. I detta fall, vilket är vanligast, är flödesvariationerna slumpmässiga och karaktäriseras av roten ur kvadratiske medelvärdet och ett bredbandigt frekvensspektrum). Flödet förblir statistiskt stabilt och kallas då variérande flöde. I praktiken är det inte alltid möjligt att göra en så klar åtskillnad, speciellt som båda typerna av flöde förekommer i samma installation.

### **Startflöde, $q_s$**

Minsta flöde för vilket flödesmätare överhuvudtaget ger något resultat oavsett krav på mätosäkerhet.





# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Värmemätning utgör en viktig del i utvärderingen av experimentbyggnadsprojekt och kommersiella värmeanläggningar eller i den löpande debiteringsmätningen av värmeleveranser. Värmemätningen är i dessa sammanhang grundläggande för det vetenskapliga värdet vid utvärderingen av ny teknik och har avgörande ekonomisk betydelse vid garantimätningar på kommersiella anläggningar. Det är därför av fundamental betydelse att mätningen utförs på ett korrekt sätt och att en realistisk bedömning av mätosäkerheten kan göras. Alltför ofta saknas en uppskattning av mätningens osäkerhet helt och hållet, vilket gör det svårt att bedöma signifikansen av ett mätresultat. Många gånger försummas också viktiga influensstorheter.

Eftersom värme i de flesta fall bestäms indirekt genom mätning av temperaturdifferens och flöde är den metod som väljs för att väga samman individuella osäkerhetskomponenter av betydelse. I synnerhet i samband med garantiprov på stora värmeanläggningar har detta stor ekonomisk betydelse. Ofta finns bonus- och vitesbelopp stipulerade i ett leveranskontrakt beroende på om anläggningen ger mer eller mindre än utlovat. Som regel räknas därvid den uppskattade mätosäkerheten bort innan avvikelser mellan uppmätt och garanterat värde bestäms. För att exemplifiera den ekonomiska betydelsen av mätosäkerheten ges följande exempel i tabell 1.1 från utvärderingen av en stor värmepumpanläggning.

Tabell 1.1. Prestanda för värmepumpanläggning.

Storhet	Garanterat värde		Uppmätt värde	
	Fullast	Dellast	Fullast	Dellast
Värmeeffekt ut, MW	28,6	14,5	25,7	14,5
Eleffekt in, MW	8,67	4,68	8,30	5,57
Värmefaktor	3,3	3,1	3,1	2,6

Om anläggningen har dimensionerats för att täcka ett visst värmebehov kommer de uppmätta värdena att medföra att utebliven levererad värme måste ersättas med dyrare alternativ under fullastdrift och en ökad elförbrukning måste betalas vid dellastdrift.

Med antagande om 5800 h drifttid med fullast och 2900 h drifttid med dellast kommer 16820 MWh att behöva ersättas med t.ex. olja i exemplet ovan. Dessutom kommer värmepumpen att förbruka 2581 MWh mer el än beräknat under dellast men 2146 MWh mindre under fullast. Antag vidare att oljepriset är 3500 kr/m<sup>3</sup>, att pannverkningsgraden är 80% samt att elpriset är 0,50 kr/kWh vid fullast (högtaxa) och 0,20 kr/kWh vid dellast (lågtaxa). Det totala värdet av den årliga merkostnaden för utebliven värmeleverans kan därmed uppskattas till 6,5 Mkr, den minskade elkostnaden under fullast till 1,1 Mkr och den ökade elkostnaden under dellast till 0,5 Mkr. Totalt blir merkostnaden ca 5,9 Mkr/år.

En avvikelse från garanterad värmefaktor med ca 6 % enligt exemplet ovan kan således innebära en merkostnad av 5-6 Mkr per år i en stor värmecentral. Detta betyder att varje procents mätosäkerhet kan värderas till ca 0,5-0,6 Mkr per år. Ovanstående exempel illustrerar betydelsen av noggranna värmemätningar i många sammanhang.

Stora ekonomiska resurser satsas varje år av statliga forskningsråd och företag på olika former av experimentbyggnadsprojekt. De flesta av dessa omfattar någon form av värmemätning. För att säkerställa det vetenskapliga värdet av dessa ofta mycket kostsamma projekt är det av största vikt att mätningarna genomförs på ett korrekt sätt och att realistiska bedömningar av mätosäkerheten kan utföras. Exempelvis i sammanhang där man gör jämförande mätningar typ "före och efter åtgärd" eller i "ekvivalenta hus" med olika värmesystem är det viktigt att mätosäkerheten sätts i relation till den hypotes man vill pröva (har åtgärden effekt eller inte).

## 1.2 Projektbeskrivning

Det projekt, som redovisas i denna rapport, syftar till att sammanställa riktlinjer för uppskattning av mätosäkerhet vid indirekt värmemätning i vätskesystem. Värmemätningen förutsätts vara grundad på separata mätningar av flöde och temperaturdifferens.

Rapporten vänder sig i första hand till konsulter, forskare m.fl. som arbetar med prestandaprov av värmeanläggningar eller med utvärdering av experimentbyggnadsprojekt. Resultaten kan naturligtvis användas även i mera vardagliga sammanhang, t.ex. vid debiteringsmätning i gruppcentraler och fjärrvärmånät.

I rapporten beaktas den rikhaltiga flora av standards, forskningsrapporter, tidskriftsartiklar m.m. som finns publicerade. Dessutom utnyttjas den kunskap som skapats genom t.ex. Byggeforskningsrådets och Vattenfalls utvärderingsprogram där bl.a. högskolornas mätcentraler och Statens provningsanstalt genomfört mycket omfattande mätningar. Även den kunskapsbank som byggts upp genom provningsanstaltens riksprövplatsfunktion för värmemätare har utnyttjats, även om enskilda provningsresultat i detta fall är konfidentiella.

Avsikten med rapporten är dels att ge tumregler för lämplig installation av temperaturgivare och några typer av flödesmätare och dels att ge viss detaljerad bakgrundsinformation för att klargöra varför mätfel uppstår i olika situationer. För temperaturgivare omfattar rapporten inverkan av dykrör, ytmontering, isolering, dynamiska förlopp, vanliga typer av givare m.m.

För flödesmätare omfattar projektet på motsvarande sätt inverkan av strömningsprofil, flöde (absolutnivå och pulsationer), temperatur, viskositet, smuts, ledningsförmåga, luftinblandning m.m. Beskrivningen avser några vanligt förekommande typer av flödesmätare samt några intressanta nyutvecklingar.

### 1.3 Rapportens utformning

För att underlätta läsningen av rapporten följer en kort beskrivning av hur innehållet disponerats. Först inleds diskussionen med ett allmänt kapitel om värmemätning som visar var i värmeberäkningen som fel och osäkerheter genereras och hur dessa fel fortplantas. Detta kapitel fortsätter med en diskussion kring olika typer av osäkerhetskomponenter, hur dessa vägs samman till en total mätosäkerhet och avslutas sedan med ett exempel på presentation av märesultat.

För att ge en någorlunda fyllig bild av utgångspunkterna för hur mätosäkerheter beräknas och presenteras är diskussionen i kapitel 2 något tung och den läsare som enbart intresserar sig för de olika problemen kring temperatur- och flödesmätning rekommenderas att läsa avsnitt 2.2 kursivt.

För att uppskatta de enskilda mätosäkerhetskomponenter som behövs för osäkerhetsuppskattningen i kapitel 2 får man hjälp av detaljerade anvisningar för temperaturmätning i kapitel 3 och för flödesmätning i kapitel 4. Båda kapitlen inleds först med ett avsnitt om hur man bör välja och installera givare för temperatur respektive flöde. Om de tumregler som uppställs i dessa avsnitt är uppfyllda bör mätningen kunna genomföras på ett godtagbart sätt. Därefter följer en diskussion av hur installationen påverkar mätningen i de fall man inte har möjlighet att uppfylla kriterierna för en korrekt utformad installation. Grundläggande fysikaliska samband, vilka behövs för förståelsen av problemens natur, diskuteras t.ex. i SP-rapport 1991:13.

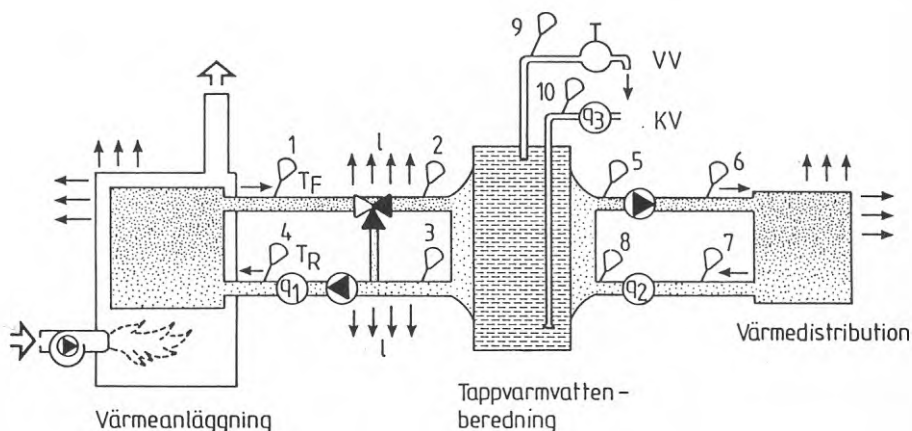
Eftersom temperaturgivare och flödesmätare har olika typer av installationsproblem har kapitel 3 och 4 strukturerats på något olika sätt. Vid temperaturmätning kan man separera installationsfel och fel som beror av givartyp. Därför redovisas först problem vid mätning med givare i dykrör och med givare på rörytor. Därefter presenteras kortfattat för- och nackdelar med olika givartyper. Fel, som är knutna till speciella givartyper (resistansgivare, termoelement och termistorer), diskuteras i SP-rapport 1991:13.

Beträffande flödesmätare måste installationsproblemen behandlas speciellt för varje mätartyp. Mätarens fysikaliska princip är helt avgörande för hur kraftigt märesultatet påverkas av olika typer av influensstorheter. Även i detta fall presenteras en kort sammanfattning medan SP-rapport 1991:13 rekommenderas för den detaljerade diskussionen.

Som avslutning på respektive kapitel följer några korta avsnitt om kalibrering och om hur respektive storhets totala mätosäkerhet kan skattas. Också några av de normer som behandlar temperatur- och flödesmätning berörs. I SP-rapport 1991:13 finns en detaljerad förteckning över de referenser, som använts i utarbetandet av rapporten.

## 2 Mätosäkerhet vid värmemätning

Vid den följande diskussionen kring mätosäkerhet i samband med värmemätning används beteckningar och förutsättningar enligt figur 2.1.



Figur 2.1. Förutsättningar för diskussionen kring problem vid värmemätning.

Ovanstående figur syftar till att illustrera några grundläggande frågeställningar som måste besvaras då en värmemätning planeras. Frågeställningarna är i och för sig triviala, men alltför ofta visar det sig att de är lätta att förbise i praktiken, speciellt i komplicerade anläggningar med många delsystem. Exempel på frågeställningar är:

- **Vilket värmeflöde ska mätas?**  
Placering av flödesmätare och temperaturgivare beror t.ex. av om man vill bestämma hur mycket som levereras av värmeproducenten (värmeanläggningen), hur mycket som levereras totalt till värmekonsumenten, hur mycket värme som t.ex. förbrukas i form av tappvarmvatten eller hur mycket som distribueras i värmesystemet. Vill man exempelvis bestämma värmeleveransen från pannan i figur 2.1 måste temperaturerna mätas vid position 1 och 4. Om position 2 och 3 används kommer fel flöde att kopplas till temperaturdifferensen. Dessutom kommer både rörförlusterna och pumparbetet att inkluderas i mätningen.
- **Var går systemgränserna?**  
Man måste t.ex. avgöra om förluster ingår i levererat värme, om energi som tillförs via pumpar ska räknas in eller om, i fallet tappvarmvatten, mätningen avser nyttiggjord värme (vid tappstället, 9 och 10) eller tillförd värme (till varmvattenberedaren, 2 och 3 minus 5 och 8).

- När och hur länge ska mätningen ske?

Vid val av mätutrustning är det viktigt att beakta att effekter och energimängder oftast beror av årstiden. Vid låga förbrukningar och korta mätperioder ökar kraven snabbt på mätutrustningens upplösning och noggrannhet. Samtidigt måste utrustning som används i säsongsvisa mätningar klara långa utesittningstider och ha mycket stora dynamikområden (förhållande mellan största och minsta mätbara värde).

Figur 2.1 visar ett antal alternativa positioner för temperaturgivare och flödesmätare. Det kan synas självklart att temperaturdifferens och flöde ska mätas i samma delkrets och helst så nära varandra som möjligt. I praktiska installationer kan det emellertid vara lätt att göra misstag om en flödesmätare eller temperaturgivare hamnar på fel sida om t.ex. en shuntventil. Den som ansvarar för en mätning bör därför alltid själv kontrollera givar-montaget i en anläggning, i synnerhet eftersom tillgängliga VVS-ritningar och den verkliga installationen ibland är dåligt korrelerade.

I fortsättningen kommer fel som beror av ovanstående orsaker ("grova fel") inte att behandlas ytterligare. Det förutsätts att rätt del av anläggningen undersöks och därför kommer endast själva värmemätningen att diskuteras, d.v.s. bestämningen av två temperaturer och ett flöde.

## 2.1 Beräkning av värmeeffekt

Att mäta värmemängd eller värmeeffekt är i princip samma mättekniska problem. Endast tidsfaktorn skiljer mätningarna åt och vad man egentligen mäter beror av den typ av mätutrustning som används. Ofta har man mekaniska flödesmätare, vilka i sig är integrerande, och då är det alltid fråga om en energimätning. Genom att dividera med tiden fås en medeleffekt under mätperioden.

Andra flödesmätare kan ge en flödesproportionell utsignal och då mäter man det momentana värdet på effekten. Värmemängden fås genom integration av effekten under en bestämd tid. Även i detta fall blir det mätta värdet någon form av medeleffekt under kortare eller längre tid beroende på givarnas tidskonstanter, mätsystemets avkänningsfrekvens m.m.

Värmetillförsel eller värmeavgivning beräknas genom systemets entalpiändring

$$Q = \Delta H = \Delta(U+pV) \quad (\text{ekv. 2.1})$$

där Q betecknar värmemängd,  $\Delta H$  entalpiändringen, U är systemets inre energi, p dess tryck och V systemets volym. För ett system med ett konstant, rörbundet flöde enligt figur 2.1 kan värmetransporten per tidsenhet, d.v.s värmeeffekten P, skrivas som

$$P = q_m \cdot \Delta h \quad (\text{ekv. 2.2})$$

där  $q_m$  är värmebärarens massflöde (kg/s) och  $\Delta h$  den specifika entalpiändringen (J/kg).

För värmemätning är  $\Delta h$  besvärlig att använda, eftersom den inte kan mätas direkt. För vätskeflöden kan emellertid 2.2 uttryckas på ett alternativt sätt eftersom  $h$  är en tillståndsvariabel, som beror av värmebärarens temperatur,  $T$ , och dess tryck,  $p$ . Därmed blir

$$\Delta h = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \Delta T + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \Delta p \quad (\text{ekv. 2.3})$$

där index  $p$  respektive  $T$  betecknar konstant tryck respektive konstant temperatur.

Vätskor kan normalt betraktas som inkompressibla och därmed kan tryck-volym arbetet försummas, d.v.s  $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \approx 0$ . Uttrycket  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$  kallas även mediets isobara specifika värmekapacitet,  $c_p$ , och dess värde beror i viss grad av temperaturen och i mindre grad av trycket. Därmed kan ekvation 2.2 skrivas på den välbekanta formen

$$P = q_m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{ekv. 2.4})$$

I denna ekvation används medelvärdet på  $c_p$  inom temperaturintervallet  $\Delta T$ , d v s

$$c_p = \frac{\int_T^{T+\Delta T} c_p(T) dT}{\Delta T} \approx \frac{c_p(T+\Delta T) + c_p(T)}{2} \quad (\text{ekv. 2.5})$$

Eftersom de flesta typer av flödesmätare inte direkt mäter massflödet ( $q_m$ ) utan volymflödet ( $q_v$ ) måste även värmebärarens densitet  $\rho$  vara känd. Genom att också introducera beteckningarna  $T_R$  för returtemperaturen (inkommande) och  $T_F$  för framledningstemperaturen (utgående) omformuleras ekvation 2.4 till följande uttryck, vilket i fortsättningen kommer att utgöra grundförutsättningen för diskussionen om värmemätning.

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_F - T_R) \quad (\text{ekv. 2.6})$$

I den fortsatta diskussionen avser  $q$  utan index alltid volymflöde och  $c_p$  alltid medelvärdet av värmebärarens isobara specifika värmekapacitet i temperaturintervallet  $T_F - T_R$ . Vidare betecknas tidsmedelvärden med fet kursiv stil. Observera att densiteten skall anges vid den temperatur som vätskan har vid flödesmätaren, d.v.s. vanligtvis vid returtemperaturen (således *inte* vid medelvärdet i temperaturintervallet).

En principiell skillnad finns i sättet att beräkna medeleffekten under en viss mätperiod. Om samtliga storheter  $q$ ,  $T_F$  och  $T_R$  mäts momentant och därmed ger en serie av  $n$  stycken kombinationer  $(q_i, T_{Fi}, T_{Ri})$  bör i första hand de motsvarande momentana värdena  $P_i$  på värmeeffekten beräknas. Medeleffekten,  $P$ , bildas genom

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n} \quad (\text{ekv. 2.7})$$

Det är inte alltid som medelvärdet av en produkt är lika med produkten av respektive variablers medelvärden. I de flesta fall blir dock skillnaden försumbar och då kan man lika gärna använda det enklare sättet att beräkna medeleffekten genom att använda de mätta storheternas medelvärden,

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_F - T_R) \quad (\text{ekv. 2.8})$$

Detta fall är normalt tillämpligt när man använder integrerande mätinstrument för någon av mätstorheterna. Ofta måste mätperioden för beräkning av ett medelvärde väljas ganska lång med integrerande instrument för att upplösningseffekten skall kunna hållas på en rimlig nivå. Därmed har man också filterat bort systemets fluktuationer och det är inte längre meningsfullt att bilda momentana effektvärden.

## 2.2 Mätosäkerhet

### 2.2.1 Diskussion kring begreppet mätosäkerhet

För att kunna jämföra olika mätresultat sinsemellan eller för att jämföra ett angivet värde med ett uppmätt värde måste någon form av mätosäkerhetsbedömning redovisas. Varje mätning eller beräkning utan detta kvalitetsmått förlorar till stor del sin relevans. Mätosäkerheten, ofta kallad onoggrannhet eller felgräns, avser gränserna för det värdeområde inom vilket resultatets väntevärde anses ligga. I första hand bör begreppet mätosäkerhet användas eftersom det är just en osäkerhet om mätvärdets kvalitet det handlar om. Begreppet mätfel förutsätter att man känner det korrekta värdet, vilket man i praktiken aldrig gör.

Under rubriken "mättekniska termer" i avsnittet "Beteckningar och definitioner" finns de viktigaste mättekniska termerna beskrivna. Dessa termer ansluter sig till svensk standard, i de fall sådan finns.

Varje uppskattning av mätosäkerhet syftar till att fastställa gränser för den totala mätosäkerheten. Detta syfte kompliceras av den ständigt återkommande problemställningen beträffande sammanlagring av olika typer av osäkerhetskomponenter. Traditionellt har man av princip differentierat mellan de så kallade systematiska och de så kallade tillfälliga felen (SS 014150, 1981).

#### 2.2.1.1 SS 014150

Osäkerheten anges enligt SS 014150 med:

- gränser för **tillfälligt** fel ("random error")
- gränser för **systematiskt** fel som inte har eliminerats.

För att kunna ange gränser för de **tillfälliga** felen måste mätvärdena härröra från en mätning som befinner sig under statistisk kontroll. Detta innebär att insvängningsförlopp, t.ex. i samband med start av en värmepanna, har eliminerats. Det innebär också att man måste korrigera för systematisk gång i mätvärdena. Systematisk gång förekommer t.ex. ofta i form av en glidande framledningstemperatur i samband med värmemätning.

Gränser ( $\pm r$ ) för **tillfälliga** fel anges normalt med hjälp av en skattning av standardavvikelsen för mätseriens medelvärde (se 2.2.2) under förutsättning att antalet ( $n$ ) mätvärden är tillräckligt stort (vanligtvis  $n \geq 5$ ). Vid färre antal mätningar används variationsvidden som spridningsmått. Sannolikheten att det angivna väntevärdet (medelvärdet för mätresultatet) ligger inom vissa gränser uttrycks i form av konfidensnivån. För att få en viss konfidensnivå måste standardavvikelsen multipliceras med en faktor  $t_\beta$ , vilken ges av Students t-fördelning,  $r = t_\beta \cdot s_x$  (se SS 014150; konfidensnivån  $\beta$  % anges i denna rapport med index på  $t$ ).



I första hand förordas konfidensnivån 95%, vilket vid ett stort antal mätvärden ger  $t_{95} = 1,96 \approx 2$ , den så kallade 2- $\sigma$  nivån ( $\sigma$  är sannolikhetsfördelningens standardavvikelse och  $s$  är den skattning man gör av  $\sigma$  med hjälp av sina mätresultat. Ju fler mätvärden desto mer lika varandra bör  $s$  och  $\sigma$  bli).

Gränser för **systematiska** fel anges genom bedömning av deras maximala gränser ( $\pm e$ ) efter korrigerig av alla kända systematiska fel. Bedömningen kan i vissa fall vara grundad på beräkningar om en någorlunda bra fysikalisk modell existerar. Ofta blir det i praktiken fråga om mer eller mindre kvalificerade gissningar, vilka grundas på tidigare erfarenheter. Exempelvis är strömningsförloppet genom en flödesmätare alltför komplicerat för att inverkan från störningar i strömningen skall kunna beräknas med rimliga medel. Oavsett vilken matematisk polityr mätresultaten utsätts för kan man aldrig komma ifrån att det är bedömningen av de okända systematiska felen som är den stora osäkerheten i de flesta mätsituationer. Många gånger är man inte ens klar över vilka influensstorheter som påverkar en mätning utan viktiga systematiska fel glöms helt och hållet. I detta skede finns ingen ersättning för långvarig praktisk erfarenhet. Saknar man egen erfarenhet finns oftast hjälp att tillgå i omgivningen (t.ex. på högskolor, SP, auktoriserade mätplatser m.m.).

### 2.2.1.2 BIPM

I internationella sammanhang har man sedan många år förordat ett annat betraktelsesätt än det som kännetecknar SS 014150. Detta har resulterat i att internationella byrån i Paris (BIPM) givit ut en rekommendation (BIPM, 1981). Denna rekommendation förordas även i Sverige inom den svenska mätplatsorganisationen (SMO), vilket kommer till uttryck i de rekommendationer som Statens Mät- och Provråd (MPR, numera SWEDAC) ger till de organiserade mätplatserna (Mathiesen, 1986).

Utgångspunkten för BIPM's rekommendation är att när ett mätresultat väl har korrigerats för alla kända avvikelser, är de återstående osäkerhetskomponenter, som bidrar till resultatets oskärlpa, sinsemellan inte artskilda. De skiljs åt enbart genom sättet på vilket deras storlek bestäms. Ur praktisk synvinkel kan man därför särskilja en mätosäkerhetskomponent som bestäms med statistiska metoder, **skattad mätosäkerhet**, och en mätosäkerhetskomponent som bestäms med mer eller mindre subjektiva metoder, **förväntad mätosäkerhet**.

Man bör observera att skattade och förväntade mätosäkerhetskomponenter inte är de samma som tillfälliga och systematiska fel. Eftersom en osäkerhet, som hänför sig till kategorin tillfälliga fel i ett led, i många fall kan betraktas som ett systematiskt fel i nästa led, är det inte alltid meningsfullt att göra den typen av distinktion i den praktiska mättekniken.

Resultatet av ovanstående resonemang är att alla osäkerhetskomponenter kan betraktas som stokastiska (slump) variabler, d.v.s att de skulle anta olika värden enligt någon sannolikhetsfördelning om mätningen upprepades. Denna sannolikhetsfördelning är normalt inte känd men genom att karaktärisera fördelningen med dess varians blir skillnaden oftast inte så stor mellan olika typer av fördelningar. Observera att sannolikhetsfördelningen normalt inte heller är känd för de skattade mätosäkerhetskomponenterna (normalfördelning antas emellertid oftast). En principiell skillnad är att för en mätprocess, som befinner sig i ett tillstånd av statistisk kontroll, finns en möjlighet att genom tillräckligt många upprepade mätningar bestämma den aktuella statistiska fördelningen för en skattad osäkerhetskomponent. Detta är inte möjligt för en förväntad osäkerhetskomponent, varför man oftast antar en fördelning med stort moment kring väntevärdet för sannolikhetsmassan, t.ex. en likformig fördelning. Resultatet är ofta en överskattning av "variansen" för den förväntade osäkerhetskomponenten.

För de skattade mätosäkerheterna bestäms den totala osäkerheten genom sammanlagring av varianserna. Eftersom variansen för en förväntad mätosäkerhetskomponent normalt inte kan bestämmas genom upprepning av mätningen kan man inte i statistisk mening bestämma en sådan varians. Konfidensnivån blir därmed i strikt mening noll. Detta innebär samtidigt en allvarlig teoretisk invändning mot att förväntade mätosäkerheter (alternativt systematiska fel) behandlas med statistiska metoder.

Likväl kan man i många fall jämföra antagandet om en given fördelning med en given varians för både skattade och förväntade mätosäkerheter. För en process, som befinner sig under statistisk kontroll, kan man känna både fördelning och varians med hjälp av tidigare mätningar. Vid en enstaka mätning kan man då ange en standardavvikelse trots att bara ett mätresultat föreligger i den aktuella mätningen (standardavvikelsen för ett enskilt mätvärde). På samma sätt kan förväntade osäkerhetskomponenters fördelning och varians anses kända genom omfattande tidigare undersökningar med varierande metoder och mättekniska förhållanden. Förväntade och skattade komponenter från enstaka mätningar blir under dessa förhållanden jämförbara (i båda fallen har avvikelsen ett bestämt tecken som inte "suddats ut" genom statistiskt underlag).

Det räcker emellertid att konstatera att begreppet varians i viss mening kan definieras även för dessa komponenter och att man kan skatta deras väntevärden med hjälp av mer eller mindre kvalificerade gissningar. Ofta framhålls i detta sammanhang att dessa gissningar är väldigt osäkra. Det bör då beaktas att även den med statistiska metoder bestämda standardavvikelsen ( $s$ ) har ett stort mått av osäkerhet. För en normalfördelning blir osäkerheten på "1- $\sigma$  nivå" (jämför figur 2.2) baserad på 5 mätningar ca 35 % av  $s$  och med 10 mätningar ca 24 % av  $s$ .

## 2.2.2 Spridningsmått

### 2.2.2.1 SS 014150

Ett tillfälligt fel (SS 014150) karakteriseras genom sin standardavvikelse ( $s$ ), vilken bestäms ur  $n$  mätresultat  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) enligt

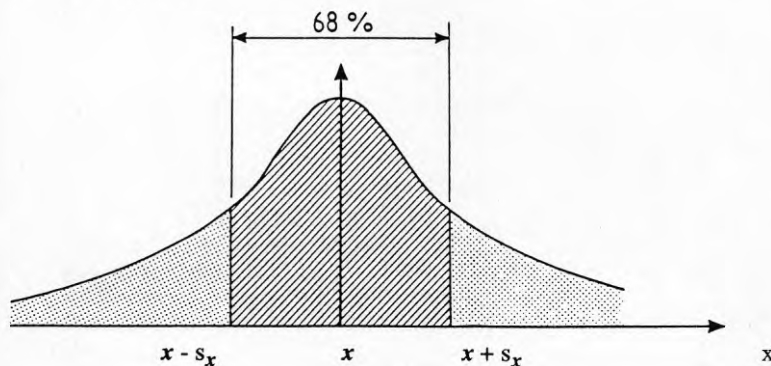
$$s = \left[ \frac{1}{(n-1)} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.9})$$

där medelvärdet  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i$  (ekv. 2.10)

Osäkerheten i medelvärdet  $\bar{x}$  uttrycks genom medelvärdets standardfel ( $s_{\bar{x}}$ ),

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{ekv. 2.9})$$

Slutligen ges osäkerheten p.g.a. tillfälliga fel med en viss konfidensgrad (i första hand 95%) enligt  $r = t_p \cdot s_{\bar{x}}$ .



Figur 2.2. Normalfördelning med skattningen av "1- $\sigma$  intervaller" inritad.

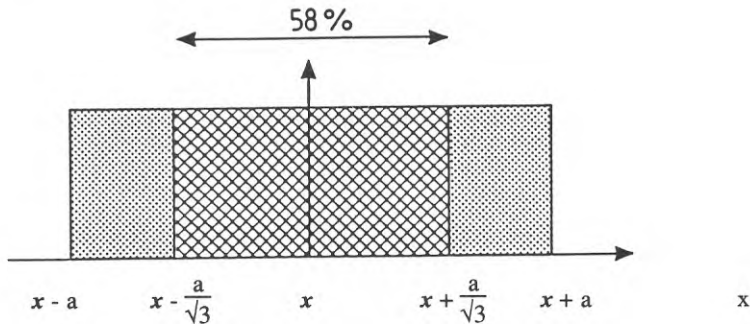
Ett systematiskt fel anges enligt SS 014150 med gränser för dess maximala värde. Detta innebär att systematiska fel i princip överskattas i förhållande till de tillfälliga felen ("100% konfidens" relativt 95% konfidens). På grund av att de systematiska felen (åtminstone i teorin) är artschilda från de tillfälliga felen redovisas dessa separat och med detta betraktelsesätt kan man aldrig jämföra storleken på ett tillfälligt fel med storleken på ett systematiskt fel.

### 2.2.2.2 BIPM

En **skattad** osäkerhetskomponent karakteriseras genom sin standardavvikelse på samma sätt som för det slumpmässiga felet enligt ekv. 2.9 - 2.11.

För att på motsvarande sätt karakterisera en **förväntad** osäkerhetskomponent behövs ett spridningsmått som efterliknar standardavvikelsen för den skattade komponenten. Eftersom detta mått inte är en standardavvikelse i statistisk mening betecknas den med  $w$  istället för  $s$ . Trots att den antagna sannolikhetsfördelningen inte är känd blir skillnaderna mellan olika rimliga fördelningar inte så stor. För en normalfördelning omfattar intervallet  $\pm 1\sigma$  ca 68 % av mätresultaten (se figur 2.2). För en triangelfördelning är motsvarande värde ca 65 % och för en likformig (rektangulär) fördelning är värdet ca 58 % (se figur 2.3).

Beroende på kategorin av fel som skall skattas kan olika antaganden om fördelningens typ vara mer eller mindre rimliga. I fortsättningen kommer en normalfördelning att antas för de skattade komponenterna (antagandet behövs endast vid diskussion av konfidensnivåer) och en likformig fördelning att antas för de förväntade komponenterna. Det senare antagandet svarar mot att man känner gränserna för de största möjliga avvikelserna från det antagna värdet. Inom dessa gränser befinner sig det förväntade värdet med lika stor sannolikhet.



Figur 2.3. Likformig fördelning med gränserna  $\pm a$ .

I figurerna 2.2 och 2.3 jämförs spridningsmått för normalfördelningen och den likformiga fördelningen. Oftast ger antagandet om likformig fördelning en överskattning av standardavvikelsen för den förväntade komponenten (sannolikhetsmassan sprids ut maximalt kring medelvärdet). Det är också ett rimligt antagande i de fall instrumentosäkerhet anges genom klassgränser, när kalibreringsbevis anger största osäkerhet med hög konfidensnivå (95 eller 99 %) eller installationsförhållanden kan medföra ett okänt systematiskt fel av viss maximal storlek.

Endast i specialfall kan antagandet om likformig fördelning ge större avvikelser. Detta kan exempelvis ske när givare klassas genom sortering och klassmitten därmed försvinner till en högre noggrannhetsklass eller om man har ett förlopp som varierar sinusformigt i tiden med en periodtid som är mycket kortare än mätperioden. I dessa fall blir fördelningen approximativt U-formad med standardavvikelsen  $a/\sqrt{2}$  istället för  $a/\sqrt{3}$ .

I vissa fall känner man den förväntade osäkerhetskomponentens tecken men inte dess värde. Man vet t.ex. att en viss flödesmätare kommer att visa mellan 0-2 % för lite vid en viss temperatur, som skiljer sig från kalibreringstemperaturen. För att undvika osymmetriska osäkerhetsintervall, vilket komplicerar bedömningen av mätosäkerheten, kan man istället korrigera mätvärdet så att det hamnar mitt i intervallet enligt figur 2.4. Redovisning av mätresultatet görs därvid med  $(q_k, \Delta T_k)$  istället för med  $(q, \Delta T)$  och osäkerheterna  $(a_q, a_{\Delta T})$ . Alternativt anges resultaten med  $(q + e_{\min(q)} < q < q + e_{\max(q)}, \Delta T + e_{\min(\Delta T)} < \Delta T < \Delta T + e_{\max(\Delta T)})$ .

### 2.2.3 Sammanlagring av mätosäkerhetskomponenter

Sammanlagring av mätosäkerhetskomponenter är ett outtömligt diskussionsämne bland mättekniker. Beträffande tillfälliga osäkerhetskomponenter finns vetenskapligt etablerade metoder inom den matematiska statistiken. Begreppet varians för en sannolikhetsfördelning är i detta sammanhang centralt. För en grundläggande diskussion av olika typer av fördelningar, matematiska hjälpmedel m.m. hänvisas till grundläggande litteratur inom den matematiska statistiken.

Behandlingen av systematiska (förväntade) osäkerhetskomponenter utgör däremot ett område som i viss mån saknar vetenskapligt etablerade metoder. Det enda allmänt accepterade synsättet är det som beskrivs i SS 014150 avseende sammanlagring av maximala osäkerheter och strikt åtskillnad mellan systematiska och tillfälliga komponenter. Med detta synsätt är man intellektuellt relativt klar över vad man egentligen gör. Som tidigare nämnts i 2.2.1.2 är dock tillämpningen i praktiska sammanhang inte lika renodlat enkel som i teorin.

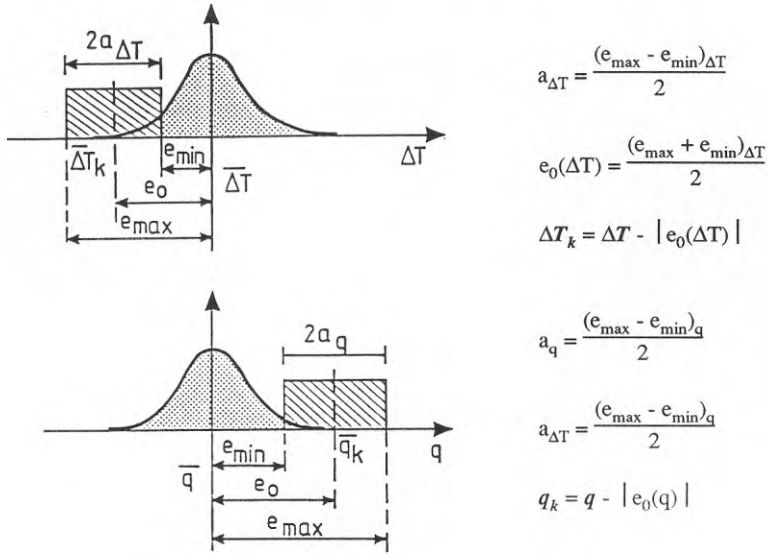
Den stora stötestenen utgör det synsätt som BIPM företräder med s.k. "randomisering av systematiska fel". Exempel på frågeställningar är

- Hur kan man vetenskapligt motivera tillämpningen av teorier från matematisk statistik på problemställningar där statistiskt underlag saknas?
- Hur osäker får en osäkerhetsbedömning vara?
- Kan man överhuvudtaget tala om "konfidens" för en bedömning som i statistisk mening har konfidensnivån noll?

Utan att försöka besvara frågeställningarna kan dock konstateras att BIPM's synsätt har många praktiska fördelar, t.ex. att användaren av ett resultat kan få samtliga osäkerhetskomponenter i form av ett enda värde. De flesta provningsstandarder, föreskrifter, kontrakt m.m. stipulerar också en maximalt tillåten osäkerhet i form av ett enda värde.

Oavsett vilken filosofi som tillämpas uppstår speciella problem vid behandlingen av flera förväntade mätsäkerhetskomponenter, när dessa har osymmetriska osäkerhetsintervall. Vid värmemätning är antalet oberoende variabler i princip bara två, flöde och temperatur. Därmed kan man inte förvänta sig att positiva och negativa fel slumpmässigt tar ut varandra. Installationsproblem för temperaturgivare ger t.ex. oftast negativa mätfel vid bestämning av temperaturer som är högre än omgivningens. Även för temperaturdifferensen kommer därmed det resulterande installationsfelet principiellt alltid att vara negativt. På samma sätt kan installationsfelet för flödesmätaren, t.ex. på grund av strömningsförhållanden i en given mätsituation, alltid vara positivt eller negativt. Därmed kan båda de oberoende variablerna bidra med fel av samma eller motsatt tecken.

Att behöva väga samman osäkerhetsfördelningar, som inte är centrerade runt samma väntevärde, komplicerar tillvaron. En möjlighet är naturligtvis att göra en maximalfelsuppskattning för felet och sedan korrigera mätvärdet med medelvärdet av det största och minsta maximalfelet enligt figur 2.4 och därmed centrera osäkerhetsintervallet. En annan och enklare möjlighet, vilken föredras av författaren, är att helt enkelt uppskatta det maximala felet men låtsas som att tecknet är okänt (mer av bekvämlighetsskäl än av någon vetenskaplig anledning). Detta ger en överskattning av osäkerheten.



Figur 2.4. Osymmetriska osäkerhetsintervall.

### 2.2.3.1 SS 014150

Systematiska och tillfälliga komponenter skall enligt denna standard hållas åtskilda. SS 014150 diskuterar inte förekomsten av osymmetriska intervall. Den internationella standarden ISO 5168 för flödesmätare rekommenderar korrigerig av medelvärden enligt figur 2.4 så att symmetriska osäkerhetsintervall kan erhållas. I denna standard finns även en sammanlagring av systematiska och tillfälliga fel beskriven.

### 2.2.3.2 BIPM

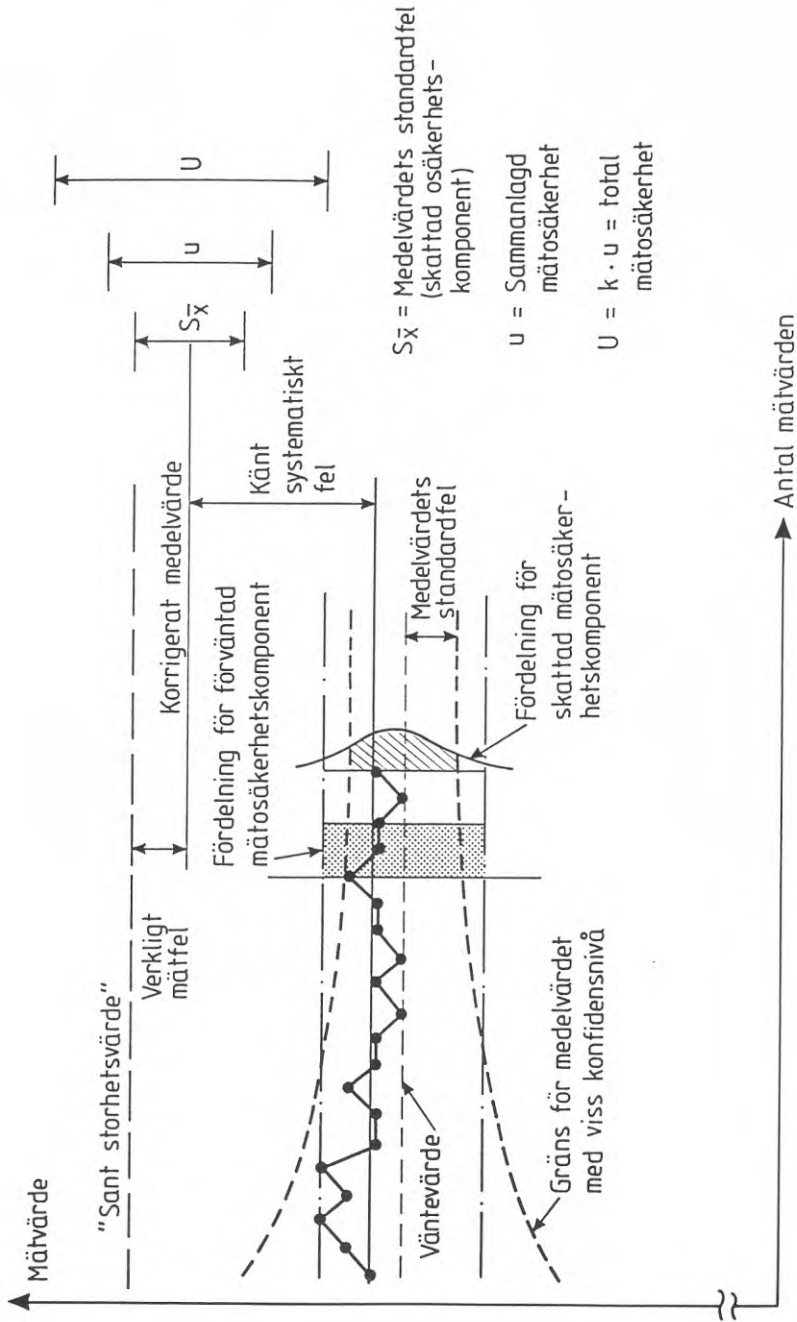
Före en eventuell sammanlagring bör förväntade komponenters osäkerhetsintervall göras symmetriska enligt figur 2.4. Ofta kan de skattade och förväntade osäkerhetskomponenterna betraktas som oberoende och då ges den sammanlagda mätosäkerheten  $u_{xi}$  av följande samband,

$$u_{xi} = (s_{xi}^2 + w_{xi}^2)^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.12})$$

Uttrycket 2.12 ger en sammanlagd mätosäkerhet på "1- $\sigma$  nivå". Många gånger nöjer man sig inte med den osäkerhet detta intervall ger utan vanligtvis eftersträvar man en konfidensnivå som motsvarar 95 % nivå för en normalfördelning. Eftersom man inte kan göra något uttalande om konfidensnivån utan att närmare känna den aktuella fördelningen nöjer man sig med att introducera en talfaktor  $k$  som på något sätt motsvarar Students t-faktor för normalfördelningen. Den totala mätosäkerheten  $U_x$  ges då av

$$U_x = k \cdot u_x \quad (\text{ekv. 2.13})$$

där  $k$  är en talfaktor som normalt anges mellan 2 och 3 (t.ex.  $k = 2,5$  enligt SS 2620).



Figur 2.5. Illustration av några termer som beskriver mätosäkerhet.



## 2.2.4 Osäkerhet vid indirekt mätning

Ofta kan man i praktiska tillämpningar inte direkt mäta den storhet man vill bestämma. Detta gäller t.ex. i samband med värmemätning. Genom något fysikaliskt samband bestämmer man den önskade storheten  $y$  med hjälp av ett antal andra storheter  $x_1 \dots x_n$ , d.v.s

$$y = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (\text{ekv. 2.14})$$

Om man antar små avvikelser kring väntevärdet för  $y$  kan osäkerheten i  $y$  beroende på osäkerheterna i de olika variablerna  $x_i$  bestämmas genom differentiering,

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \quad (\text{ekv. 2.15})$$

När avvikelserna är små kan de partiella derivatorna anses vara konstanta.

### 2.2.4.1 Tillfälliga eller skattade osäkerheter

Oberoende av om mätosäkerheten behandlas enligt svensk standard eller enligt BIPM's modell är proceduren den samma för de tillfälliga respektive skattade osäkerhetskomponenterna. Då derivatorna betraktas som konstanter kan  $\Delta y$  och  $y$  behandlas som stokastiska variabler (slumpvariabler), vilka är linjärkombinationer av de stokastiska variablerna  $x_i$  och  $\Delta x_i$ . Väntevärdet för standardavvikelsen för en sådan linjärkombination ges av

$$s_y = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot s_{x_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot \text{cov}(x_i, x_j) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.16})$$

där kovariansen  $\text{cov}(x_i, x_j)$  uttrycker graden av beroende mellan två variabler  $x_i$  och  $x_j$ . Ofta är sambandet mellan de olika mätstorheterna svagt och med antagandet att samtliga  $x_i$  är oberoende variabler reduceras ekvation 2.16 till följande uttryck,

$$s_y = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot s_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.17})$$

där  $\Delta y$  och  $\Delta x_i$  ersatts med standardavvikelserna för den beräknade storheten respektive de i beräkningen ingående uppmätta variablerna.

### 2.2.4.2 Systematiska eller förväntade osäkerheter

Enligt svensk standard SS 014150 beräknas det systematiska felet för en sammansatt storhet ur felfortplantningslagen för maximalfel,

$$|e_y| = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot e_i \right| \quad (\text{ekv. 2.18})$$

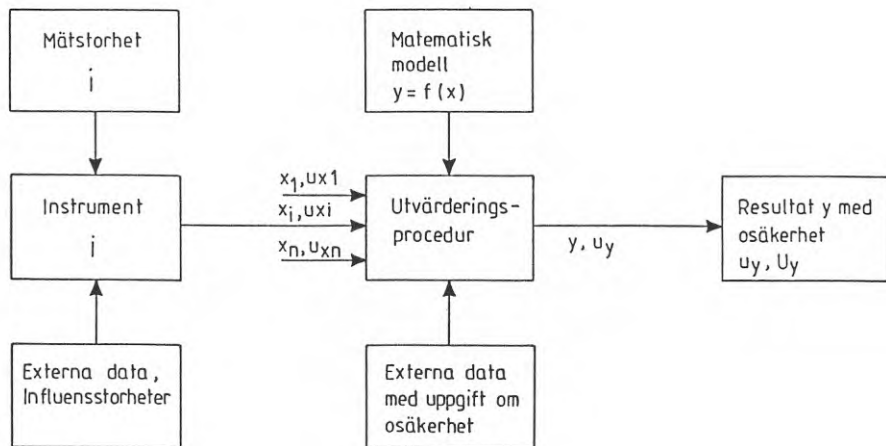
Med BIPM's metod betraktas även de förväntade osäkerhetskomponenterna som stokastiska variabler och osäkerheten för den härledda storheten beräknas genom kombination av varianser på samma sätt som i ekv.2.17, d.v.s

$$w_y = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot w_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.19})$$

I ekv. 2.19 har standardavvikelsen ersatts av respektive förväntad osäkerhetskomponent  $w_i$ .

### 2.2.4.3 Tillvägagångssätt vid indirekt mätning

Tillvägagångssättet vid en indirekt mätning illustreras i figur 2.6.



Figur 2.5. Bedömning av mätosäkerhet vid indirekt mätning.

I samband med värmemätning utgörs den härledda storheten  $y$  av värmeeffekten  $P$  och de enskilda uppmätta storheterna av temperaturdifferensen  $(T_F - T_R)$  och flödet  $(q)$ . Externa data från tabellverk behövs för densiteten  $(\rho)$  och specifika värmekapaciteten  $(c_p)$ .

## 2.3 Mätosäkerhetskomponenter vid värmemätning

Enligt diskussionen i avsnitt 2.1 ges värmeeffekten av ekv 2.6,

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_F - T_R)$$

Genom att bilda naturliga logaritmen av ovanstående ekvation och derivera överförs uttrycket till en linjär kombination av stokastiska variabler,

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta c_p}{c_p} + \frac{\Delta(T_F - T_R)}{(T_F - T_R)} \quad (\text{ekv. 2.20})$$

*Sammanlagd tillfällig (skattad) osäkerhet*

Om variablerna i ekv. 2.20 betraktas som oberoende ges den sammanlagrade mätosäkerheten för de tillfälliga respektive skattade komponenterna enligt ekvation 2.17 av

$$s_P = P \cdot \left[ \left( \frac{\Delta q}{q} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c_p}{c_p} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(T_F - T_R)}{(T_F - T_R)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.21})$$

I ekvation 2.20 blir  $\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{P}{q}$ ,  $\frac{P}{\rho}$  etc. och i ekvation 2.21 anger de enskilda osäkerheterna

$\Delta q$  etc standardavvikelsen  $s_{x_i}$  för respektive komponent.

*Sammanlagd systematisk (förväntad) osäkerhet*

Systematiska fel, enligt SS 014150, behandlas med hjälp av ekvation 2.18, d.v.s

$$|e_y| = |\Delta P| = P \cdot \left[ \frac{|\Delta q|}{|q|} + \frac{|\Delta \rho|}{|\rho|} + \frac{|\Delta c_p|}{|c_p|} + \frac{|\Delta(T_F - T_R)|}{|(T_F - T_R)|} \right] \quad (\text{ekv. 2.22})$$

Förväntade osäkerheter behandlas enligt BIPM genom sammanlagring av varianser (ekv. 2.19), d.v.s

$$w_P = P \cdot \left[ \left( \frac{\Delta q}{q} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c_p}{c_p} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(T_F - T_R)}{(T_F - T_R)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.23})$$

Förutsättningen är att alla mätstorheter kan betraktas som oberoende. Detta är dock ofta tveksamt eftersom osäkerheten i bestämningen av influensstorheter som tryck och temperatur t.ex. fortplantar sig till osäkerheter i både densitet och flöde enligt bestämda samband. Emellertid kan dessa osäkerheter normalt försummas och de huvudsakliga osäkerheterna, vilka beror av installationsförhållanden, kalibreringsosäkerhet, instabila driftförhållanden etc, kan normalt anses vara oberoende. Detta förenklar den följande diskussionen avsevärt, eftersom eventuella kovarianser kan vara svåra att bestämma med det blygsamma antal mätningar som normalt är ekonomiskt försvarbara. Se även 2.2.3.

I ekvation 2.19 är  $q$ ,  $T_F$  och  $T_R$  mätstorheter medan  $\rho$  och  $c_p$  utgör externa data från tabellverk (jämför figur 2.6). Nedan följer en diskussion kring de vanligaste typerna av mätosäkerhet för varje storhet i ekvation 2.6 respektive 2.20. Denna illustreras med ett exempel på bedömning av mätosäkerhet i avsnitt 2.5. Detaljerad information om storleksordningen på olika osäkerhetskomponenter presenteras i SP-rapport 1991:13 för temperaturgivare och flödesmätare.

### 2.3.1 Temperaturmätning

Temperaturdifferensen bestäms normalt genom två separata temperaturmätningar  $T_F$  och  $T_R$ . Givarplacering och avläsning ger upphov till osäkerheter som är oberoende av varandra medan kalibreringsosäkerhet och instrumentfel oftast är beroende av varandra. Genom att ändock betrakta samliga influensstorheter som oberoende sker normalt en över-skattning av osäkerheten i bestämningen av temperaturdifferens. De viktigaste osäkerhetskomponenterna utgörs av:

#### 1. Variationer i driftförhållanden.

Tillfälliga variationer i flöde, temperatur, spänning etc under mätperioden resulterar i en tillfällig (alternativt skattad) osäkerhetskomponent enligt

$$s_T = \left[ \frac{1}{n(n-1)} \sum_1^n (T_i - T)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.24})$$

#### 2. Installationsförhållanden.

Användning av dykrör, temperaturskiktning, termospänningar m.m. ger upphov till systematiska, alternativt förväntade, osäkerhetskomponenter, vilka skattas med hjälp av deras respektive uppskattade maximala påverkan  $a_j$  (jämför figur 2.3).

$$|e_{T_j}| = |a_{T_j}| \quad \text{alt.} \quad w_{T_j} = |a_{T_j} \sqrt{3}| \quad (\text{ekv. 2.25})$$

### 3. Arbetspunkt.

För temperaturgivare med olinjär karaktäristik (gäller de flesta typer i större eller mindre grad) kan varierande driftsförhållanden orsaka en osäkerhet på grund av osäkerheten i driftspunkten enligt punkt 1 och osäkerheten på grund av installationsförhållanden enligt punkt 2,

$$s_{TF} = \left| \frac{\partial F}{\partial T} \right| \cdot s_T \quad \text{respektive}$$

$$|e_{TF}| = \left| \frac{\partial F}{\partial T} \right| \cdot a_T \quad \text{alt.} \quad w_{TF} = \left| \frac{\partial F}{\partial T} \right| \cdot \left( \sum_{i=1}^n w_{Tj}^2 \right)^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.26})$$

där  $F(T)$  är givarens temperaturberoende felvisning.

### 4. Kalibreringsosäkerhet.

Kalibreringsosäkerheten från kalibrering utförd vid riksmätplatsen eller vid de flesta auktoriserade mätplatser kan normalt försummas i förhållande till övriga osäkerhetskomponenter. Det bör emellertid observeras att beträffande långa givare eller givare med stora kopplingshuvuden kan "installationsfelet" vid kalibrering vara större än "installationsfelet" i den faktiska mätsituationen. Speciellt kan detta vara fallet om noggrann isolering utförs vid den praktiska installationen men inte vid kalibreringstillfället. Kalibreringsosäkerheten ger huvudsakligen upphov till en systematisk, alternativt en förväntad mätosäkerhetskomponent, enligt

$$|e_{Tk}| = |a_{Tk}| \quad \text{alt.} \quad w_{Tk} = |a_{Tk}| \sqrt{3} \quad (\text{ekv. 2.27})$$

### Slutresultat

Slutresultatet för den tillfälliga (alternativt skattade) mätosäkerheten för temperaturmätningen ges direkt av ekvation 2.17. För temperaturdifferensen görs en sammanlagring av varianserna för de enskilda mätningarna  $T_F$  och  $T_R$  i de fall temperaturskillnaden inte utförs som en direkt differensmätning,

$$s_{\Delta T} = [s_{T(F)}^2 + s_{T(R)}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.28})$$

Med avseende på slutresultatet för den systematiska (alternativt förväntade) mätosäkerheten, finns två principiellt olika tillvägagångssätt,

$$1. \text{ SS 014150: } |e_T| = \sum |e_{Tj}| + |e_{TF}| + |e_{Tk}| \quad (\text{ekv. 2.29})$$

$$2. \text{ BIPM: } w_T = [w_{TF}^2 + \sum_{j=1}^n w_{Tj}^2 + w_{Tk}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.30})$$

Den sammanlagda mätosäkerheten för medelvärdet av den enskilda temperaturmätningen ges av

1. SS 014150: Tillfälliga och systematiska fel skall inte sammanlagras. Enligt ISO 5168 kan dock sammanlagring göras under vissa betingelser (se 2.2.3.1).

2. BIPM: Sammanlagring enligt principen för sammanlagring av varianser,

$$u_T = [s_T^2 + w_T^2]^{1/2} = [s_T^2 + w_{TF}^2 + \Sigma(a_{Tj})^2/3 + a_{Tk}^2/3]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.31})$$

För temperaturdifferensen  $\Delta T$  ges osäkerheten med avseende på tillfälliga fel enligt SS 014150 av ekv. 2.24. Det systematiska felet fås genom addition av absolutvärden enligt

$$|e_{\Delta T}| = |e_{T(F)}| + |e_{T(R)}| \quad (\text{ekv. 2.32})$$

Med antagande om fullständigt oberoende mellan  $T_F$  och  $T_R$  (vilket ofta ger en överskattning av osäkerheten) blir på motsvarande sätt osäkerheten för  $\Delta T$  ( $= T_F - T_R$ ) enligt BIPM's betraktelsesätt

$$u_{\Delta T} = [(u_{T(F)})^2 + (u_{T(R)})^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.33})$$

## 2.3.2 Flödesmätning

En detaljerad diskussion av osäkerhetsbedömning i samband med flödesmätning med mätare av tryckdifferenstyp finns i ISO 5168 (1978). För vanliga typer av vätskeflödesmätare sammansätts de viktigaste osäkerheterna av följande komponenter:

1. *Variationer i driftsförhållanden.*

Flödesvariationer, temperaturvariationer, spänningsvariationer etc under mätperioden ger upphov till en tillfällig (alternativt skattad) osäkerhetskomponent som bestäms enligt

$$s_q = \left[ \frac{1}{n(n-1)} \sum_1^n (q_i - \bar{q})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.34})$$

I de fall motoriska mätare eller andra typer av integrerande mätare används är ofta mätarens upplösning för dålig för att man skall kunna bestämma  $s_q$ . Osäkerheten finns dock fortfarande men istället för att vara en skattad osäkerhetskomponent blir det en förväntad komponent.

## 2. Installationsförhållanden.

Alla flödesmätare påverkas på något sätt av sina installationsförhållanden. Volumetriska mätare påverkas mindre än andra men kan vara känsliga för tryck, temperatur, viskositet och var i mätområdet mätaren arbetar. Andra typer av mätare är känsliga för rörinstallationen, olika typer av störningar, Reynolds tal etc. Dessa osäkerheter kan endast bedömas efter ingående studier av varje enskild influensstorhet. Sammantaget fås en systematisk (alternativt förväntad) osäkerhetskomponent för varje enskild påverkan nr. j, vilken anges med hjälp av uppskattningen av dess maximala inverkan  $a_{qj}$ .

$$|e_{qj}| = |a_{qj}| \quad \text{alt.} \quad w_{qj} = |a_{qj}/\sqrt{3}| \quad (\text{ekv. 2.35})$$

## 3. Arbetspunkt.

Inom det normala mätområdet är de flesta flödesmätares kalibreringskurva så flack att osäkerheten på grund av arbetspunkten kan försummas. Speciellt vid låga flöden kan emellertid kalibreringskurvan luta kraftigt och genom osäkerheten i arbetspunkt på grund av den tillfälliga (alternativt skattade) osäkerheten enligt punkt 1 samt den systematiska (alternativt förväntade) osäkerheten på grund av förhållandena enligt punkt 2 fås ytterligare en osäkerhetskomponent enligt

$$s_{qF} = \left| \frac{\partial F}{\partial q} \right| \cdot s_q \quad \text{respektive}$$

$$|e_{qF}| = \left| \frac{\partial F}{\partial q} \right| \cdot a_q \quad \text{alt.} \quad w_{qF} = \left| \frac{\partial F}{\partial q} \right| \cdot [\sum w_{qj}^2 + s_q^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.36})$$

där  $F(q)$  är mätarens felvisning som funktion av flödet.

## 4. Kalibreringsosäkerhet

Flödesmätare är dyrbara och besvärliga att kalibrera. De flesta mätare sitter därför ute längre än de borde. I sådana situationer är det nästan omöjligt att göra en bedömning av kalibreringsosäkerheten. Mätare som kalibreras i laboratorium, arbetar ofta under andra betingelser (t.ex. beträffande typ av vätska, temperatur, raksträcker m.m.) och även detta kan vara svårt att bedöma. Den sammantagna kalibreringsosäkerheten, inklusive kalibreringslaboratoriets mätosäkerhet, ger huvudsakligen upphov till en systematisk (alternativt förväntad) mätosäkerhetskomponent, vilken sammansätts av ett antal komponenter enligt

$$|e_{qk}| = |a_{qk}| \quad \text{alt.} \quad w_{qk} = |a_{qk}/\sqrt{3}| \quad (\text{ekv. 2.36})$$

## Slutresultat

Slutresultatet för den tillfälliga (alternativt skattade) mätosäkerheten för flödesmätningen ges direkt av ekvation 2.17.

Med avseende på slutresultatet för den systematiska (alternativt förväntade) mätosäkerheten, finns två principiellt olika tillvägagångssätt,

$$1. \text{ SS 014150: } |e_T| = \Sigma |e_{qj}| + |e_{qF}| + |e_{qk}| \quad (\text{ekv. 2.38})$$

$$2. \text{ BIPM: } w_q = [w_{qF}^2 + \Sigma w_{qj}^2 + w_{qk}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.39})$$

Den sammanlagda mätosäkerheten för medelvärdet av flödet ges av

1. SS 014105: Tillfälliga och systematiska fel skall inte sammanlagras. Enligt ISO 5168 kan dock dock sammanlagring göras under vissa betingelser (se 2.2.3.1).

2. BIPM: Sammanlagring enligt principen för sammanlagring av varianser,

$$u_q = [s_q^2 + w_q^2]^{1/2} = [s_q^2 + w_{qF}^2 + \Sigma(a_{qj})^2/3 + a_{qk}^2/3]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.40})$$

### 2.3.3 Densitet

Densiteten bestäms normalt via tabellverk med kännedom om tryck, temperatur och sammansättning

$$\rho = \rho(\rho, T, x) \quad (\text{ekv. 2.41})$$

där  $x$  är viktskoncentrationen om vätskan är en lösning.

Enligt ekvation 2.17 erhålls för den tillfälliga (skattade) osäkerheten

$$s_\rho = [(\frac{\partial \rho}{\partial T} \bullet s_T)^2 + (\frac{\partial \rho}{\partial p} \bullet s_p)^2 + (\frac{\partial \rho}{\partial x} \bullet s_x)^2]^{1/2} \quad (\text{ekv.2.42})$$

På samma sätt erhålls enligt ekvation 2.18 det systematiska felet

$$|e_\rho| = |\frac{\partial \rho}{\partial T} \bullet e_T| + |\frac{\partial \rho}{\partial p} \bullet e_p| + |\frac{\partial \rho}{\partial x} \bullet e_x| + |a_\rho| \quad (\text{ekv. 2.43})$$

där  $a_\rho$  är tabellverkets angivna maximalfel.

Med BIPM's metod betraktas även de förväntade osäkerhetskomponenterna som stokastiska variabler och osäkerheten för den härledda storheten beräknas genom kombination av varianser på samma sätt som i ekv.2.17, d.v.s

$$w_\rho = [(\frac{\partial \rho}{\partial T} \bullet w_T)^2 + (\frac{\partial \rho}{\partial p} \bullet w_p)^2 + (\frac{\partial \rho}{\partial x} \bullet w_x)^2 + (\frac{a_\rho}{\sqrt{3}})^2]^{1/2} \quad (\text{ekv.2.44})$$



Om vätskan är vatten dominerar termen  $\frac{\partial \rho}{\partial T}$  men i samband med glykol-vattenblandningar blir termen  $\frac{\partial \rho}{\partial x}$  betydelsefull. Den sistnämnda termen inkluderar även inverkan av olika tillsatser. Ofta kan man försumma osäkerheten i densitetsvärdet men vid stora temperaturdifferenser och krav på hög noggrannhet kan den bli betydelsefull. Observera att både avseende densitet och specifik värmekapacitet förekommer skillnader i angivna värden även mellan välkända tabellverk. VDI Wärmeatlas verkar dock ge tillförlitliga data.

### 2.3.4 Specifik värmekapacitet

På samma sätt som för densiteten i 2.3.3 ger osäkerheten i temperatur, tryck och sammansättning upphov till en osäkerhet i tabellvärdet för den specifika värmekapaciteten. Enligt ekvation 2.17 erhålls för den tillfälliga (skattade) osäkerheten

$$s_{cp} = \left[ \left( \frac{\partial c_p}{\partial T} \cdot s_T \right)^2 + \left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \cdot s_p \right)^2 + \left( \frac{\partial c_p}{\partial x} \cdot s_x \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.45})$$

På samma sätt erhålls enligt ekvation 2.16 det systematiska felet

$$|e_{cp}| = \left| \frac{\partial c_p}{\partial T} \cdot e_T \right| + \left| \frac{\partial c_p}{\partial p} \cdot e_p \right| + \left| \frac{\partial c_p}{\partial x} \cdot e_x \right| + |a_{cp}| \quad (\text{ekv. 2.46})$$

där  $a_{cp}$  är tabellverkets angivna maximalfel.

Med BIPM's metod betraktas även de förväntade osäkerhetskomponenterna som stokastiska variabler och osäkerheten för den härledda storheten beräknas genom kombination av varianser på samma sätt som i ekv.2.17, d.v.s

$$w_{cp} = \left[ \left( \frac{\partial c_p}{\partial T} \cdot w_T \right)^2 + \left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \cdot w_p \right)^2 + \left( \frac{\partial c_p}{\partial x} \cdot w_x \right)^2 + \left( \frac{a_{cp}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.47})$$

För vatten dominerar termen  $\frac{\partial c_p}{\partial T}$  men för blandningar blir termen  $\frac{\partial c_p}{\partial x}$  betydelsefull. I de flesta fall är dock osäkerheten för  $c_p$  liten i jämförelse med osäkerheten i mätstorheterna  $q$  och  $(T_F - T_R)$ .

### 2.3.5 Total mätosäkerhet

Vid presentation enligt SS 014150 görs separat redovisning enligt

$$s_{P(\text{mät})} = [s_{\Delta T}^2 + s_q^2 + s_p^2 + s_{cp}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.48})$$

$$|e_{P(\text{mät})}| = |e_{\Delta T}| + |e_q| + |e_p| + |e_{cp}| \quad (\text{ekv. 2.49})$$

Total mätosäkerhet är enligt den tidigare diskussionen enbart aktuell vid presentation av osäkerhet enligt BIPM's modell. Den ges enligt ekvation 2.13 av  $U = k \cdot u$ . Enligt ekvation 2.12 ges den sammanlagda mätosäkerheten  $u_p$  för effekten av

$$u_{P(\text{mät})} = (s_{P(\text{mät})}^2 + w_{P(\text{mät})}^2)^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.50})$$

där  $s_{P(\text{mät})}$  ges av ekvation 2.48 medan  $w_{P(\text{mät})}$  ges av

$$w_{P(\text{mät})} = [w_{\Delta T}^2 + w_q^2 + w_p^2 + w_{cp}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.51})$$

Uttrycken för  $s_p$  och  $w_p$  härrör från ekvationerna 2.21 och 2.23. Eftersom varianserna adderas kan man direkt kombinera ihop delposterna för  $s_p^2$  och  $w_p^2$  till

$$u_p = P \cdot \left[ \left( \frac{u_q}{q} \right)^2 + \left( \frac{u_p}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{u_{cp}}{c_p} \right)^2 + \left( \frac{u_{\Delta T}}{T_F - T_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.52})$$

där  $\Delta P$  etc ersatts med de sammanlagda osäkerheterna  $u_p$  etc och därmed kan den totala mätosäkerheten anges för effektmätningen,

$$U_{P(\text{mät})} = k \cdot u_{P(\text{mät})} \quad (\text{ekv. 2.53})$$

Värdet på talfaktorn  $k$  ska alltid anges i samband med redovisning av mätresultat. Normalt bör värdet 2,0 eller 2,5 användas. Detta ger en konfidensnivå som på något sätt motsvarar 90-95 % för den skattade komponenten i fallet med en normalfördelning.

## 2.4 Total osäkerhet vid värmemätning

I många praktiska tillämpningar av värmemätning söker man jämföra uppmätta värden med fabrikantuppgifter eller jämföra nyutvecklade produkter med konventionella. Vid sådana jämförelser är inte endast mätosäkerheten av intresse utan även hur produktens prestanda beror av driftspunkten. Vid utvärdering av t.ex. värmepumpar, solfångare, kondenserande pannor och liknande apparater är verkningsgraden känslig för de aktuella driftsbetingelserna.

Vid jämförelsen tillkommer utöver osäkerheten i den direkta bestämningen av värmeeffekt en osäkerhet som beror av hur värmeeffekten för produkten varierar med temperatur, flöde m.m.

Detta kan uttryckas som

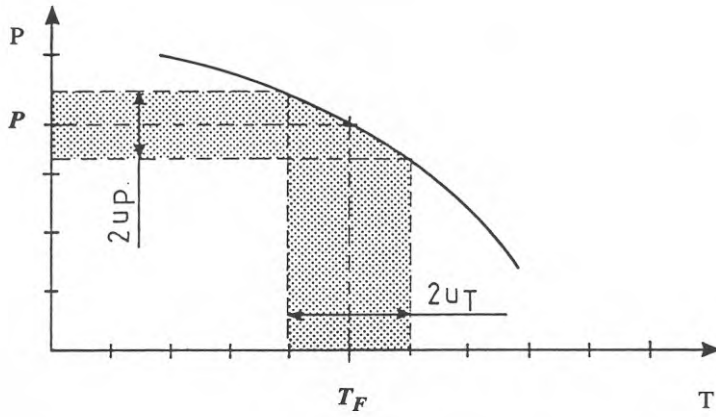
$$P(\text{drift}) = P(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{ekv. 2.54})$$

Analogt med sambandet i ekvation 2.18 kan en osäkerhet avseende vilket värde på  $P$  som ska jämföras med det uppmätta värdet uttryckas genom

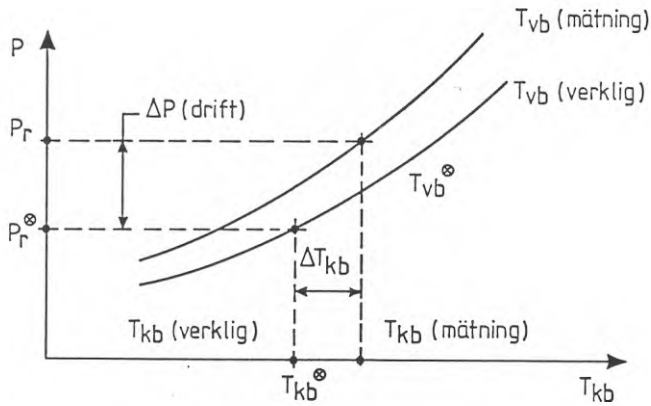
$$\Delta P(\text{drift}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P}{\partial x_i} \bullet \Delta x_i \quad (\text{ekv. 2.55})$$

I ekvation 2.55 anger  $\Delta x_i$  osäkerheten i bestämningen av de parametrar som påverkar  $P$  (t.ex. temperatur, flöde, tryck m.m.). Beroende på om man arbetar med en osäkerhetsbedömning enligt SS 01 41 50 eller enligt BIPM anges dessa osäkerheter som tillfälliga och systematiska respektive skattade och förväntade mätosäkerhetskomponenter för respektive parameter.

Som illustration på ovanstående resonemang visas i figur 2.7 ett exempel där värmeeffekten beror av absolutnivån för framledningstemperaturen (t.ex. för en värmepump). Effekten beror framförallt av köld- och värmebärartemperaturerna. Genom osäkerheten i bestämningen av framledningstemperaturen  $T_F$  vet man inte om det uppmätta värdet ska jämföras med  $P(T_F)$ ,  $P(T_F + u_T)$  eller  $P(T_F - u_T)$ . Detta resulterar därför i en osäkerhet i effektjämförelsen på grund av driftspunktens bestämning. Samma problemställning illustreras i figur 2.8 för en kombination av osäkerheter i köld- och värmebärartemperaturerna.



Figur 2.7. Exempel på hur en osäkerhet i temperaturbestämningen kan ge en osäkerhet i referensvärdet för en jämförelsemätning.



Figur 2.8. Exempel på osäkerhet vid jämförelse mellan uppmätt värde och referensvärde.  $T_{kb}^*$  och  $T_{vb}^*$  anger den sanna, okända driftpunkten,  $P_r$  det använda referensvärdet och  $P_r^*$  det värde som skulle använts om driftpunktsbestämningen varit felfri.

### 2.4.1 Total osäkerhet, SS 01 41 50

Vid tillämpning av de metoder som anges i SS 01 41 50 delas osäkerheten i bestämningen av driftspunkt i en tillfällig och en systematisk komponent. Osäkerheterna  $\Delta x_i$  ges därvid av  $s_{x_i}$  respektive  $e_{x_i}$ .

$$s_{P(\text{drift})} = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} \bullet u_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.56})$$

$$e_{P(\text{drift})} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial P}{\partial x_i} \bullet e_{x_i} \right| \quad (\text{ekv. 2.57})$$

Den totala osäkerheten på grund av drifts- och mätosäkerheterna ges då av

$$s_{PTOT} = (s_{P(\text{mät})}^2 + s_{P(\text{drift})}^2)^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.58})$$

$$|e_{PTOT}| = |e_{P(\text{mät})}| + |e_{P(\text{drift})}| \quad (\text{ekv. 2.59})$$

### 2.4.2 Total osäkerhet, BIPM

Vid tillämpning av BIPM's metoder delas osäkerheten i bestämningen av driftspunkt i en skattad och en förväntad komponent. Osäkerheterna  $\Delta x_i$  ges därvid av  $s_{x_i}$  respektive  $w_{x_i}$ .

$$s_p(\text{drift}) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} \bullet u_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.60})$$

$$w_p(\text{drift}) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial P}{\partial x_i} \bullet w_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.61})$$

Den sammanlagda osäkerheten på grund av driftspunktsbestämningen ges av

$$u_{P(\text{drift})} = [s_p(\text{drift})^2 + w_p(\text{drift})^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.62})$$

Den totala skattade osäkerheten blir nu

$$s_{PTOT} = [s_{P(\text{mät})}^2 + s_{P(\text{drift})}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.63})$$

medan den förväntade osäkerheten blir

$$w_{PTOT} = [w_{P(\text{mät})}^2 + w_{P(\text{drift})}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.64})$$

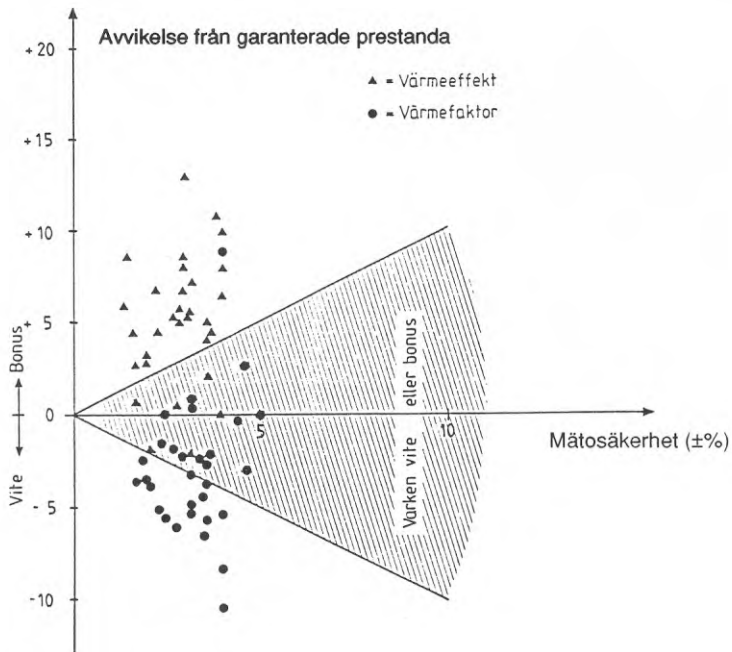
Därmed kan också den totala osäkerheten, vilken orsakas både av osäkerheten i driftspunktsbestämningen och effektmätningen, bestämmas vid en jämförelsemätning,

$$U_{PTOT} = k \cdot [u_{P(mät)}^2 + u_{P(drift)}^2]^{1/2} \quad (\text{ekv. 2.65})$$

Ekvation 2.65 används vid jämförelsemätning och ekvation 2.53 då endast effektvärdet i sig är intressant.

### 2.4.3 Exempel på total osäkerhet från prestandaprov

I figur 2.9 visas resultaten från ett antal mätningar på stora värmepumpanläggningar i samband med garantiprov. Kontrakten stipulerar ofta höga vites- eller bonusbelopp beroende på om värmeeffekten eller värmefaktorn är lägre eller högre än garanterat. På riktigt stora anläggningar är dessa belopp i storleksordningen milliontals kronor och man har därför möjlighet att kosta på en högklassig värmemätning. Figur 2.9 visar därmed vilken minsta osäkerhet man kan räkna med vid värmemätning under goda förhållanden och den bästa utrustning som finns tillgänglig. Som framgår av figuren ligger totala osäkerheten i intervallet 1-5 %. Det högre värdet orsakas oftast av förväntad mätosäkerhet beroende på svårigheter med installationen av flödesmätare.



Figur 2.9. Mätosäkerhetens inverkan på bonus- och vitesbelopp vid garantiprovningar av stora värmepumpar (Fahlén, Lagerkvist, 1987).

## 2.5 Presentation av mätresultat

Generellt anges mätresultat med mätvärde och mätosäkerhet. Resultatet skall alltid presenteras tillsammans med förklarande text, som beskriver den metodik som använts. I detta sammanhang skall man endast använda etablerade metoder och hänvisa till dessa. Hänvisningen kan emellertid inte ersätta behovet av förklarande text.

Oberoende av om SS 014150 eller BIPM's modell används för skattningen av mätosäkerhet skall de systematiska (förväntade) och tillfälliga (skattade) osäkerhetskomponenterna hållas isär till slutredovisningen. I den mån det krävs av en standard eller av någon annan anledning kan en sammanvägning av osäkerhetskomponenterna göras i detta skede. Det måste alltid tydligt framgå hur denna sammanvägning görs.

Nedanstående exempel avser att illustrera hur resultatet av en mätosäkerhetsbedömning enligt den tidigare diskussionen kan presenteras. Exemplet avser provning av en stor värmepumpanläggning och beräkningarna förutsätter att korrigeringar utförts för samtliga kända systematiska avvikelser. Beträffande en detaljerad härledning av de enskilda osäkerhetskomponenterna hänvisas till Fahlén (1991).

### 2.5.1 Mätresultat

I nedanstående tabell betecknar  $\theta_F$  framledningstemperaturen i värmebärarkretsen i Celsiusgrader,  $\theta_R$  motsvarande returtemperatur,  $\theta_{kb}$  inkommande köldbärartemperatur till värmepumpen samt  $q_{vb}$  och  $q_{kb}$  flödena i värmebärar- respektive köldbärarkretsarna.

Tabell 2.1. Resultat från prestandaprov på en stor värmepumpanläggning.

Kl.	$\theta_F$ (°C)	$T_F - T_R =$ $\theta_F - \theta_R$ (K)	$\theta_{kb}$ (°C)	$q_{vb}$ (dm <sup>3</sup> /s)	$q_{kb}$ (dm <sup>3</sup> /s)	P (MW)
14.00	51,39	7,31	11,24	455,5	524,8	13,79
14.06	51,30	7,49	11,25	452,1	524,9	14,02
14.12	51,17	7,43	11,29	457,9	525,4	14,09
14.18	51,26	7,43	11,25	455,9	525,2	14,03
14.24	51,23	7,39	11,28	458,1	523,8	14,02
14.30	51,47	7,43	11,25	453,3	524,0	13,95
14.36	51,43	7,41	11,25	448,2	523,9	13,75
14.42	51,53	7,40	11,25	449,3	525,0	13,77
14.48	51,52	7,41	11,26	448,7	524,8	13,77
14.54	51,57	7,40	11,24	448,7	524,9	13,75
15.00	51,83	7,47	11,19	445,4	525,0	13,78
Medel- värde	51,43	7,42	11,25	452,1	524,7	13,88
Standard- avvikelse	0,19	0,05	0,03	4,3	0,5	0,14

Observera att standardavvikelsen enligt tabell 2.1 avser det enskilda mätvärdet. För att få medelvärdets standardfel måste man dividera med  $\sqrt{n}$ , d.v.s.  $\sqrt{11} = 3,32$ . Eftersom det är mätseriernas medelvärden som används är det osäkerheten i detta medelvärde som är intressant.

Enligt ekv 2.6 beräknas värmeeffekten genom

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_F - T_R) = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\theta_F - \theta_R)$$

Index "vb" har utelämnats eftersom samtliga storheter i detta fall avser värmebärarsidan. Flödesmätaren sitter i returledningen till värmepumpen och därför beräknas  $\rho$  vid  $\theta_R = 51,43 - 7,42 = 44,01^\circ\text{C}$ . Enligt tabellverk (VDI-Wärmeatlas) är  $\rho(44^\circ\text{C}, 5 \text{ bar}) = 990,8 \text{ kg/m}^3$ .

Specifika värmekapaciteten beräknas vid medeltemperaturen i intervallet  $44,01^\circ\text{C} - 51,43^\circ\text{C}$ . Enligt tabellverk (VDI) är  $c_p(47,7^\circ\text{C}, 5 \text{ bar}) = 4,180 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

Med ovanstående tabellvärden och mätresultat blir de uppmätta värmeeffekterna enligt den högra kolumnen i tabellen ovan.



## 2.5.2 Driftpunktsberoende

Enligt tillverkarens uppgifter gäller följande värden för hur avgiven effekt förändras med driftsvillkoren. Eftersom dessa värden endast används för att bestämma viktsfaktorerna  $\frac{\partial P}{\partial x_i}$  framför respektive osäkerhetskomponent är deras noggrannhet inte särskilt kritisk.

Tabell 2.2. värmeeffektens beroende av driftpunkten.

$\theta_{kb}$ (°C)	$q_{kb}$ (dm <sup>3</sup> /s)	$\theta_F$ (°C)	$q$ (dm <sup>3</sup> /s)	$P$ (MW)
10	500	50	450	13,35
12	500	50	450	14,63
10	550	50	450	13,58
10	500	55	450	13,00
10	500	50	500	13,35

Enligt ekvation 2.55 beräknas osäkerheten på grund av driftpunktens bestämning enligt

$$\Delta P(\text{drift}) = \frac{\partial P}{\partial \theta_F} \cdot \Delta \theta_F + \frac{\partial P}{\partial \theta_{kb}} \cdot \Delta \theta_{kb} + \frac{\partial P}{\partial q} \cdot \Delta q + \frac{\partial P}{\partial q_{kb}} \cdot \Delta q_{kb}$$

Inverkan av övriga parametrar försummas.

Med hjälp av tabellvärdena ovan erhålls

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_F} \sim \frac{13,00 - 13,35}{55 - 50} = -0,070 \text{ MW/K}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_{kb}} \sim \frac{14,63 - 13,35}{12 - 10} = 0,640 \text{ MW/K}$$

$$\frac{\partial P}{\partial q} \sim \frac{13,35 - 13,35}{500 - 450} = 0,0 \text{ MW/dm}^3/\text{s}$$

$$\frac{\partial P}{\partial q_{kb}} \sim \frac{13,58 - 13,35}{550 - 500} = 0,0046 \text{ MW/dm}^3/\text{s}$$

### 2.5.3 Slutresultat

Beroende på om bestämningen av värmeeffekt endast avser att redovisa en uppmätt effekt eller om bestämningen avser att jämföra det uppmätta värdet med ett garantivärde i en bestämd driftspunkt sker resultatredovisningen på två olika sätt (fall 1 och fall 2).

#### 2.5.3.1 Slutresultat enligt SS 01 41 50

##### Fall 1: Mätosäkerhet

I det första fallet görs följande redovisning:

- 
- Värmeeffekten har bestämts på värmepumpens värmebärarsida genom indirekt mätning via värmebärarens flöde och temperaturdifferens. De influensstorheter som påverkar värmeeffektens storlek har varierat inom följande gränser:

( $51,17^{\circ}\text{C} < \theta_F < 51,83^{\circ}\text{C}$ ), medelvärde  $\theta_F = 51,43^{\circ}\text{C}$

( $11,19^{\circ}\text{C} < \theta_{kb} < 11,29^{\circ}\text{C}$ ), medelvärde  $\theta_{kb} = 11,25^{\circ}\text{C}$

( $0,445 \text{ m}^3/\text{s} < q_{vb} < 0,458 \text{ m}^3/\text{s}$ ), medelvärde  $q_{vb} = 0,452 \text{ m}^3/\text{s}$

( $0,524 \text{ m}^3/\text{s} < q_{kb} < 0,525 \text{ m}^3/\text{s}$ ), medelvärde  $q_{kb} = 0,525 \text{ m}^3/\text{s}$

Individuella mätosäkerheter för köld- och värmebärarnas flöden, temperaturer, sammansättning, densitet och specifik värmekapacitet anges i den detaljerade osäkerhetsbedömningen i bilaga *nn*.

---

Medelvärdet på värmepumpens avgivna effekt bestämdes till 13,9 MW. Bestämningen baseras på samtidig mätning av temperaturdifferens och flöde vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. **Mätosäkerheten** anges av

- Gränser för den tillfälliga mätosäkerhetskomponenten:  $r_P = \pm 0,09 \text{ MW}$   
(Konfidensnivå 95 %, 11 mätvärden,  $t_{95} = 2,23$ ,  $r = t_{95} \cdot s_P$ )
  - Gränser för den systematiska mätosäkerhetskomponenten:  $e_P = \pm 0,46 \text{ MW}$   
(Beräknat som maximalt fel enligt SS 01 41 50)
-

*Fall 2: Osäkerhet vid jämförelse med garantipunkt*

I det andra fallet jämförs det uppmätta värdet med ett garantivärde, vilket kan beräknas till 13,09 MW med hjälp av uppgifterna i 2.5.2. Då görs lämpligen följande redovisning.

- Värmeeffekten har bestämts på värmepumpens värmebärsarsida genom indirekt mätning via värmebärsarens flöde och temperaturdifferens. De influensstorheter som påverkar värmeeffektens storlek har varierat inom följande gränser:

$(51,17^{\circ}\text{C} < \theta_F < 51,83^{\circ}\text{C})$ , medelvärde  $\theta_F = 51,43^{\circ}\text{C}$

$(11,19^{\circ}\text{C} < \theta_{kb} < 11,29^{\circ}\text{C})$ , medelvärde  $\theta_{kb} = 11,25^{\circ}\text{C}$

$(0,445 \text{ m}^3/\text{s} < q_{vb} < 0,458 \text{ m}^3/\text{s})$ , medelvärde  $q_{vb} = 0,452 \text{ m}^3/\text{s}$

$(0,524 \text{ m}^3/\text{s} < q_{kb} < 0,525 \text{ m}^3/\text{s})$ , medelvärde  $q_{kb} = 0,525 \text{ m}^3/\text{s}$

Individuella mätosäkerheter för köld- och värmebärsarnas flöden, temperaturer, sammansättning, densitet och specifik värmekapacitet anges i den detaljerade osäkerhetsbedömningen i bilaga *nn*. Samtliga mätvärden anges som medelvärden baserade på mätningar vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. **Mätosäkerheterna** anges enligt följande **mall**:

- Gränser för den tillfälliga mätosäkerhetskomponenten:  $r_x = \pm \Delta x$   
(Konfidensnivå 95 %, 11 mätvärden,  $t_{95} = 2,23$ ,  $r = t_{95} \cdot s_x$ )
- Gränser för den systematiska mätosäkerhetskomponenten:  $e_x = \pm \Delta x$   
(Beräknat som maximalt fel enligt SS 01 41 50)

**Driftpunkten** har bestämts enligt:

utgående värmebärsartemperatur  $\theta_{vb} = 51,4^{\circ}\text{C}$  ( $r_{\theta_F} = \pm 0,13 \text{ K}$ ,  $e_{\theta_F} = \pm 0,11 \text{ K}$ )

inkommande köldbärsartemperatur  $\theta_{kb} = 11,2^{\circ}\text{C}$  ( $r_{\theta_{kb}} = \pm 0,02 \text{ K}$ ,  $e_{\theta_{kb}} = \pm 0,06 \text{ K}$ )

värmebärsarflöde  $q_{vb} = 0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $r_{q_{vb}} = \pm 0,0029 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $e_{q_{vb}} = \pm 0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ )

köldbärsarflöde  $q_{kb} = 0,52 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $r_{q_{kb}} = \pm 0,00034 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $e_{q_{kb}} = \pm 0,038 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Vid denna driftpunkt redovisar leverantören värmeeffekten  $P_{1,r} = 14,14 \text{ MW}$ .

Osäkerheten i driftpunktsbestämningen leder till följande osäkerhet i referensvärdet  $P_{1,r}$

- Gränser för den tillfälliga osäkerhetskomponenten:  $r_{P(\text{drift})} = \pm 0,02 \text{ MW}$   
(Konfidensnivå 95 %, 11 mätvärden,  $t_{95} = 2,23$ ,  $r = t_{95} \cdot s_{P(\text{drift})}$ )
- Gränser för den systematiska osäkerhetskomponenten:  $e_{P(\text{drift})} = \pm 0,22 \text{ MW}$   
(Beräknat som maximalt fel enligt SS 01 41 50)

Medelvärdet på värmepumpens avgivna effekt bestämdes till  $P_1 = 13,9$  MW. Bestämningen baseras på samtidig mätning av temperaturdifferens och flöde vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. *Mätosäkerheten* anges av

- Gränser för den tillfälliga mätosäkerhetskomponenten:  $r_{P(\text{mät})} = \pm 0,09$  MW  
(Konfidensnivå 95 %, 11 mätvärden,  $t_{95} = 2,23$ ,  $r = t_{95} \cdot s_{P(\text{mät})}$ )
  - Gränser för den systematiska mätosäkerhetskomponenten:  $e_{P(\text{mät})} = \pm 0,46$  MW  
(Beräknat som maximalt fel enligt SS 01 41 50)
- 

Ingen avvikelse mellan redovisad och uppmätt värmeeffekt kan konstateras på grundval av mätresultaten (mätosäkerheten är större än avvikelsen mellan uppmätt värde och av leverantören redovisat värde). *Den totala osäkerheten* för jämförelsen mellan uppmätt och garanterad effekt ges av följande osäkerhetskomponenter:

- Gränser för den tillfälliga mätosäkerhetskomponenten:  $r_{PTOT} = \pm 0,09$  MW  
( $r_{PTOT} = (r_{P(\text{mät})}^2 + r_{P(\text{drift})}^2)^{1/2}$ )
  - Gränser för den systematiska mätosäkerhetskomponenten:  $e_{PTOT} = \pm 0,68$  MW  
( $|e_{PTOT}| = |e_{P(\text{mät})}| + |e_{P(\text{drift})}|$ )
-

### 2.5.3.2 Slutresultat enligt BIPM

#### Fall 1: Mätosäkerhet

I det första fallet görs följande redovisning:

- Värmeeffekten har bestämts på värmepumpens värmebärarsida genom indirekt mätning via värmebärarens flöde och temperaturdifferens. De influensstorheter som påverkar värmeeffektens storlek har varierat inom följande gränser:

(51,17°C <  $\theta_F$  < 51,83°C), medelvärde  $\theta_F=51,43^\circ\text{C}$

(11,19°C <  $\theta_{kb}$  < 11,29°C), medelvärde  $\theta_{kb}=11,25^\circ\text{C}$

(0,445 m<sup>3</sup>/s <  $q_{vb}$  < 0,458 m<sup>3</sup>/s), medelvärde  $q_{vb}=0,452$  m<sup>3</sup>/s

(0,524 m<sup>3</sup>/s <  $q_{kb}$  < 0,525 m<sup>3</sup>/s), medelvärde  $q_{kb}=0,525$  m<sup>3</sup>/s

Individuella mätosäkerheter för köld- och värmebärarnas flöden, temperaturer, sammansättning, densitet och specifik värmekapacitet anges i den detaljerade osäkerhetsbedömningen i bilaga nn.

Medelvärdet på värmepumpens avgivna effekt bestämdes till  $13,9 \pm 0,5$  MW. Bestämningen baseras på samtidig mätning av temperaturdifferens och flöde vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. Osäkerheten har redovisats som total mätosäkerhet med talfaktorn  $k = 2,5$ . **Den totala mätosäkerheten** beräknas enligt

$$U_{p(\text{mät})} = k \cdot u_{p(\text{mät})} = k \cdot (s_p^2 + w_p^2)^{1/2} = 2,5 \cdot 0,25 = 0,54 \text{ MW}$$

och sammansätts av följande komponenter:

- Skattad mätosäkerhetskomponent (medelvärdets standardfel):  $s_p = 0,04$  MW
- Förväntad mätosäkerhetskomponent:  $w_p = 0,21$  MW  
(Beräknad enligt BIPM's modell, MPR 1987)

*Fall 2: Osäkerhet vid jämförelse med garantipunkt*

I det andra fallet jämförs det uppmätta värdet med ett garantivärde, vilket kan beräknas till 13,09 MW med hjälp av uppgifterna i 2.5.2. Då görs lämpligen följande redovisning.

- Värmeeffekten har bestämts på värmepumpens värmebärarsida genom indirekt mätning via värmebärarens flöde och temperaturdifferens. De influensstorheter som påverkar värmeeffektens storlek har varierat inom följande gränser:

(51,17°C <  $\theta_F$  < 51,83°C), medelvärde  $\theta_F=51,43^\circ\text{C}$

(11,19°C <  $\theta_{kb}$  < 11,29°C), medelvärde  $\theta_{kb}=11,25^\circ\text{C}$

(0,445 m<sup>3</sup>/s <  $q_{vb}$  < 0,458 m<sup>3</sup>/s), medelvärde  $q_{vb}=0,452$  m<sup>3</sup>/s

(0,524 m<sup>3</sup>/s <  $q_{kb}$  < 0,525 m<sup>3</sup>/s), medelvärde  $q_{kb}=0,525$  m<sup>3</sup>/s

Individuella mätosäkerheter för köld- och värmebärarnas flöden, temperaturer, sammansättning, densitet och specifik värmekapacitet anges i den detaljerade osäkerhetsbedömningen i bilaga nn. Samtliga mätvärden anges som medelvärden baserade på mätningar vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. Mätosäkerheterna redovisas som total mätosäkerhet med talfaktorn  $k = 2,5$ . Den totala mätosäkerheten beräknas därvid enligt

$$U_x(\text{mät}) = k \cdot u_x(\text{mät}) = k \cdot (s_x^2 + w_x^2)^{1/2}$$

och sammansätts av följande komponenter:

- Skattad mätosäkerhetskomponent (medelvärdets standardfel):  $s_x$
- Förväntad mätosäkerhetskomponent:  $w_x$   
(Beräknad enligt BIPM's modell, MPR 1987)

*Driftpunkten* har bestämts enligt:

utgående värmebärartemperatur  $\theta_F = 51,4^\circ\text{C}$  ( $s_{\theta_F} = 0,06$  K,  $w_{\theta_F} = 0,06$  K)

inkommande köldbärartemperatur  $\theta_{kb} = 11,2^\circ\text{C}$  ( $s_{\theta_{kb}} = 0,01$  K,  $w_{\theta_{kb}} = 0,03$  K)

värmebärarflöde  $q_{vb} = 0,45$  m<sup>3</sup>/s ( $s_{q_{vb}} = 0,0013$  m<sup>3</sup>/s,  $w_{q_{vb}} = 0,0053$  m<sup>3</sup>/s)

köldbärarflöde  $q_{kb} = 0,52$  m<sup>3</sup>/s ( $s_{q_{kb}} = 0,0002$  m<sup>3</sup>/s,  $w_{q_{kb}} = 0,0163$  m<sup>3</sup>/s)

Vid denna driftpunkt redovisar leverantören värmeeffekten  $P_{1,r} = 14,14$  MW. Osäkerheten i driftpunktsbestämningen leder till en total osäkerhet i referensvärdet  $P_{1,r}$ :

$U_{P(\text{drift})} = 0,20$  MW. Den totala osäkerheten i referensvärdet beräknas enligt

$$U_{P(\text{drift})} = k \cdot u_{P(\text{drift})} = k \cdot (s_{P(\text{drift})}^2 + w_{P(\text{drift})}^2)^{1/2} = 2,5 \cdot 0,25 = 0,54 \text{ MW}$$

och sammansätts av följande komponenter:

- Skattad osäkerhetskomponent (medelvärdets standardfel):  $s_{P(\text{drift})} = 0,01$  MW
  - Förväntad osäkerhetskomponent:  $w_{P(\text{drift})} = 0,08$  MW
- (Beräknad enligt BIPM's modell, MPR 1987)

Medelvärdet på värmepumpens avgivna effekt bestämdes till  $13,9 \pm 0,5$  MW. Bestämningen baseras på samtidig mätning av temperaturdifferens och flöde vid 11 tillfällen med 6 minuters intervall. Osäkerheten har redovisats som total mätosäkerhet med talfaktorn  $k = 2,5$ . Den totala mätosäkerheten beräknas enligt

$$U_{P(\text{mät})} = k \cdot u_{P(\text{mät})} = k \cdot (s_p^2 + w_p^2)^{1/2} = 2,5 \cdot 0,25 = 0,54 \text{ MW}$$

och sammansätts av följande komponenter:

- Skattad mätosäkerhetskomponent (medelvärdets standardfel):  $s_p = 0,04$  MW
  - Förväntad mätosäkerhetskomponent:  $w_p = 0,21$  MW
- (Beräknad enligt BIPM's modell, MPR 1987)

Ingen avvikelse mellan redovisad och uppmätt värmeeffekt kan konstateras på grundval av mätresultaten (mätosäkerheten är större än avvikelsen mellan uppmätt värde och av leverantören redovisat värde). Den totala osäkerheten för jämförelsen mellan uppmätt och garanterad effekt ges av

$$U_{P(\text{TOT})} = (U_{P(\text{mät})}^2 + U_{P(\text{drift})}^2)^{1/2} = 0,6 \text{ MW}$$

### 2.5.3.3 Sammanfattning

Resultaten av ovanstående osäkerhetsbedömning visar på vikten av att beakta inte bara mätosäkerheten i effektbestämningen. Genom olämpligt val av flödesmätare på köldbärrarsidan har man introducerat en osäkerhet i jämförelseförutsättningarna som är betydligt större än osäkerheten i effektmätningen (vid redovisning enligt SS 01 41 50). I detta specifika exempel blir inte skillnaden i total mätosäkerhet särskilt stor mellan redovisningarna enligt SS 01 41 50 och BIPM (ca 0,5 MW i båda fallen). Däremot blir bedömningen av osäkerheten på grund av driftpunkten helt olika (0,68 respektive 0,20 MW)

## 2.6 Normer

Detta avsnitt ger kort en sammanfattning av de normer som behandlar värmemätning och som har relevans för svenska förhållanden. De normer som diskuteras i detta avsnitt berör endast värmemätning i allmänhet eller integreringsverk för beräkning av termisk energi med utgångspunkt från signaler från temperaturgivare och flödesmätare. Integreringsverk behandlas i övrigt inte alls i denna skrift och om värmeberäkningen inte görs direkt av observatören enligt den tidigare beskrivningen i kapitel 2 måste hänsyn tas även till osäkerheten i integreringsverkets beräkning. Hur stort detta fel kan vara illustreras i figur 2.10, där kraven för svenskt typgodkännande finns angivna som funktion av temperaturdifferensen. Standarder som behandlar temperatur- och flödesmätning specifikt tas upp i kapitel 3.6 respektive 4.6.

I Sverige finns sedan 1980 typgodkännanderegler för värmemätare vilka baseras på en lag om förbrukningsmätning från 1978 (SFS 1978:77). De tekniska krav som ställs på typgodkända värmemätare finns beskrivna i Statens provningsanstalts författningssamling i dokumenten SPKB 1986:18 (tidigare SPFS 1982:20) för integreringsverk och temperaturgivare och SPKB 1986:13 (tidigare SPFS 1980:3) för flödesmätare för varmvatten. Enligt dessa kontrollbestämmelser beskrivs en värmemätarens mätområde genom dess maximala och nominella effekt, dess största och minsta temperaturdifferens, dess största och minsta flöde samt det s.k. gränslödet (se avsnittet med definitioner).

För integreringsverk anges gränserna för den största tillåtna felvisningen enligt sambanden

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| < 0,005 \left( 0,8 + 0,2 \cdot \frac{\Delta\theta_{\max}}{\Delta\theta} \right) \text{ för klass 0,5, samt}$$

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| < 0,01 \left( 0,8 + 0,2 \cdot \frac{\Delta\theta_{\max}}{\Delta\theta} \right) \text{ för klass 1,}$$

där  $\Delta\theta_{\max}$  och  $\Delta\theta_{\min}$  är den största respektive minsta temperaturdifferensen (jämför figur 2.10 samt definitionerna). För att felgränserna enligt figur 2.10 skall innehållas måste temperaturdifferensen vid mätning ligga inom intervallet  $\Delta\theta_{\min} < \Delta\theta < \Delta\theta_{\max}$ .

Värdet för den minsta temperaturdifferensen bestäms av att  $\Delta\theta_{\max}/\Delta\theta_{\min} \geq 10$  (krav för typgodkännande) samtidigt som felgränserna skall innehållas ( $\pm 2,5\%$  för klass 0,5 och  $\pm 5\%$  för klass 1). Observera att enligt bestämmelserna i SPKB tillåts en total felvisning för en komplett värmemätare som motsvarar en summering av absolutvärdena för integreringsverk, temperaturgivare och flödesmätare. Vid lågt flöde och samtidig låg temperaturdifferens kan därmed felet i ogynnsamma fall uppgå till 14% (integreringsverk klass 1, temperaturgivare, flödesmätare klass 3).

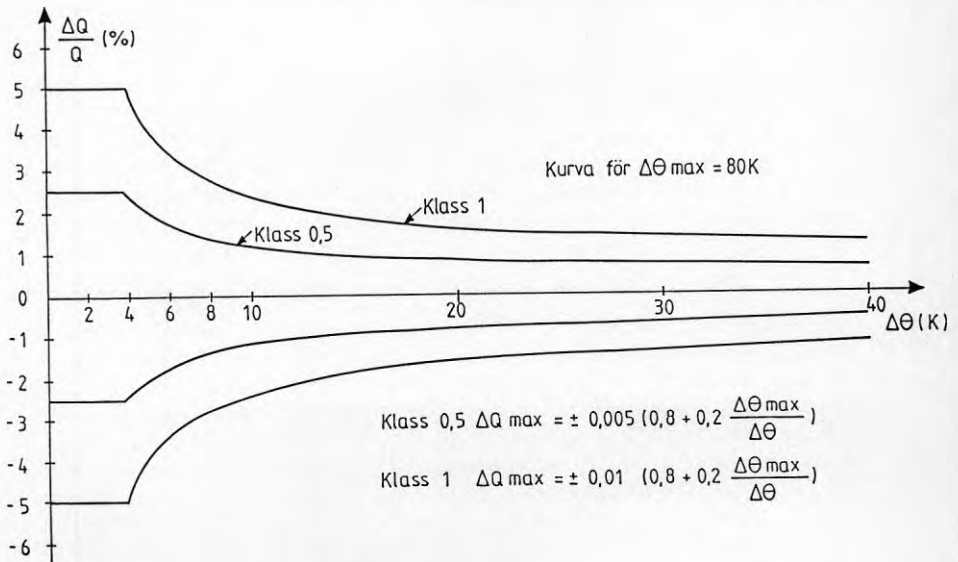


Provning av integreringsverk omfattar förutom mätnoggrannhet vid normal drift även prov med hög och låg omgivningstemperatur, fuktprov, variation av nätspänning, kortvariga spänningsbortfall, induktivt och kapacitivt kopplade elektriska störningar samt mekaniska stötar och vibrationer. Noggrannhetsklasserna ovan ska innehållas vid alla prov utom de som avser fukt, stötar och vibrationer. För dessa prov ska dock felgränserna innehållas efter en återhämtningsperiod.

Värmemätning i organiserad form är en relativt ny företeelse, vilken tagit fart efter den första oljekrisen på 1970-talet. Därför har det funnits relativt få nationella eller internationella standarder på området. Sverige och Västtyskland (PTB, 1982) har varit tidigast framme med nationella normer. Inom OIML har man länge arbetat med en rekommendation för värmemätare och under 1987 presenterades ett färdigt förslag (OIML IR-75, 1988).

Inom Nordtest finns provningsmetoder framtagna dels för provning av flödesmätardelen för delade mätare (NT VVS 020, 1983) och dels för provning av mätare som utgör en enhet (Nordtest 526-84, 1986). För debiteringsmätning i fjärrvärmesammanhang har värmeverksföreningen utarbetat vissa installationskriterier. Även internationellt har man visat stort intresse för de speciella värmemättningsproblem som man har i fjärrvärmesät, t ex inom branschorganet Unichal.

#### Relativ osäkerhet för integreringsverk (SPKB 1986:18)



Figur 2.10. Maximal relativ osäkerhet för integreringsverk enligt Statens provningsanstalts kontrollbestämmelser. Kurvorna anger gränser för två noggrannhetsklasser med förutsättningen att största temperaturdifferensen

$\Delta\Theta_{max} = 80 K$ .

### 3 Temperaturmätning

Temperaturnivån påverkar de flesta verksamheter och fysikaliska förlopp. Därför tillhör också temperatur en av de storheter som allra oftast behöver mätas. Vanligt förekommande mätproblem med anknytning till värmeteknisk mätning är

- indirekta mätningar (t.ex värmeeffekt)
- kontroll av processparametrar
- kontroll av termiska påkänningar
- omvandling av volymflöde till massflöde eller tvärtom
- korrigering av temperaturberoende instrument

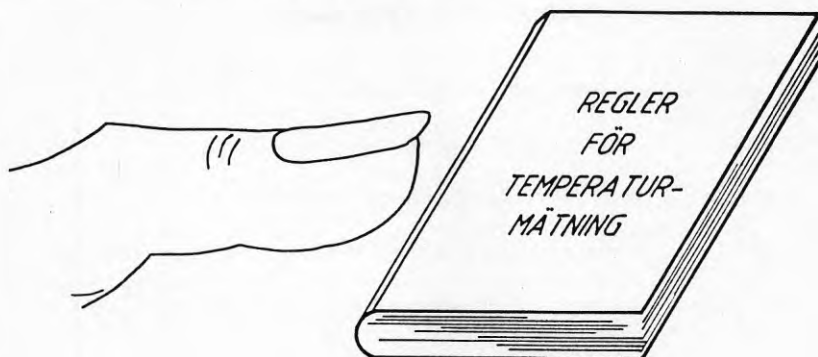
I detta kapitel kommer temperaturmätning i samband med värmetransport i rör att behandlas. Vanliga temperaturnivåer ligger mellan 20-80°C för värmesystem i bostäder och upp till 120°C i fjärrvärmenät. I dessa sammanhang är värmebäraren så gott som uteslutande vatten, eventuellt med olika tillsatser mot korrosion, alg tillväxt m.m.

Nya typer av värmeanläggningar kan även vara försedda med en köldbärarkrets, som transporterar värme från någon "gratis" källa till värmeanläggningen (t.ex. solfångare, markvärmelager, sjövärmelager m.m.). I dessa system är köldbäraren normalt en blandning av vatten och glykol, etanol, kalciumklorid eller dylikt. Temperaturnivån ligger här i regel mellan -10°C och +20°C för värmepumpänläggningar och ända upp mot 90°C i solfångarsystem. För värmepumpar med indirekta utelufts-system kan temperaturen gå ned mot -20°C.

I vissa sammanhang, t.ex vid driftpunktsbestämningar för värmepumpar, är absolutnivån i temperaturbestämningen av stor vikt. Ofta räcker det emellertid att göra en noggrann differensmätning. Enligt ekvation 2.4 är det endast temperaturdifferensen  $\Delta T$  som behövs för en värmemätning om man bortser från specifika värmekapacitetens och densitetens temperaturberoende. Så länge temperaturdifferensen är tillräckligt stor (större än ca 20 K) kommer mätosäkerheten i en värmemätning att domineras av osäkerheten i flödesbestämningen. Många moderna värmesystem utformas emellertid som lågtemperatursystem och då ligger temperaturdifferenserna nästan alltid under 10 K. I vissa fall, exempelvis för värmeanläggningar som bidrar med en liten andel av totaleffekten (t.ex mindre värmepumpar i fjärrvärmenät) eller vid bestämning av värmeuttag i mark och sjöar samt tillskott från solvärmeanläggningar eller andra "naturvärme"-system, kan temperaturdifferenser på mindre än 2-3 K förekomma. I dessa fall måste den tillgängliga teknologin utnyttjas till bristningsgränsen för att mätosäkerheten ska kunna hållas inom rimliga nivåer. En utvärdering av PTB-godkända värmemätare i Tyskland visade att vid temperaturdifferenser under 5 K visade merparten ca 10 % fel (en del plus, andra minus) medan den bästa mätaren visade mindre än 2 % fel.

Som första avsnitt kommer en sammanfattning av vad man bör tänka på vid noggranna temperaturmätningar att presenteras i kapitel 3.1. Dessa tumregler motiveras sedan genom den följande allmänna teoretiska diskussionen av installationsproblem i kapitel 3.2-3.4. Beträffande fel och funktionsprinciper för specifika typer av temperaturgivare hänvisas till SP-rapport 1991:13.

### 3.1 Så bör man göra - tumregler



Redan i inledningen av kapitel 2 nämndes några viktiga punkter att beakta i samband med värmemätning. Nedan följer ett antal tumregler (Fahlén, 1987), som är väsentliga för att en temperaturmätning ska ge ett lyckat resultat. Observera att dessa synpunkter är tumregler, inte regler som man kan tumma på.

#### 3.1.1 Planera mätningen

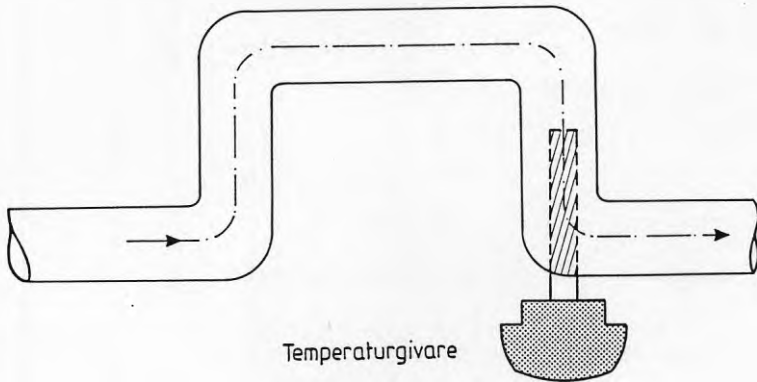
- Analysera den föreliggande mätuppgiften och tänk noga igenom vad mätningen egentligen syftar till.
- Gör en bedömning av vilka temperaturnivåer och vilka svängningar som rimligen kan förekomma i systemet.
- Bestäm med utgångspunkt från mätningens syfte och förväntade systemegenskaper vilka krav på noggrannhet som kan ställas.
- Kontrollera att eventuella VVS-ritningar, där givarplaceringen markerats, överensstämmer med verkliga förhållanden (kontrollera på platsen).
- Uppskatta vilken mätosäkerhet som orsakas av den tänkta givarplaceringen. Det kanske finns lämpligare ställen som alternativ (jämför 3.1.3).
- Gör en kravspecifikation för val av temperaturgivare (se 3.1.2).

### 3.1.2 Välj rätt givare

- Se till att eventuella krav på utsignal är uppfyllda.
- Välj så liten ledararea som möjligt mellan givarelementet och det yttre mätsystemet med beaktande av eventuella mekaniska påkänningar och spänningsfall.
- Använd 4-trådskoppling för resistiva temperaturgivare.
- Välj givare utan extra dykrör om mätsituationen tillåter detta.
- Kontrollera att givaren klarar den tilltänkta miljön. Detta kan avse elektriska störningar, smuts och korrosion, mekaniska påkänningar på grund av högt tryck och hög temperatur, hög strömningshastighet eller vibrationer.
- Om dykrör krävs ska dessa vara långa och smala (helst skall längden vara  $10 \cdot$  diametern) och med så liten massa som möjligt. Dykrörsmaterialet ska ha dålig värmeledningsförmåga (rostfritt stål rekommenderas) och gärna vara gjort med en avsmalnande spets där givarelementet sitter. Eventuellt kan själva dykrörsspetsen vara gjort i ett annat material än dykröret för att få god värmeöverföring till givarelementet.
- Vid yttemperaturmätning ska givaren vara tunn och ha stor anliggningsyta mot röret.
- Se till att givarna är kalibrerade och att de är parvis matchade (använd helst individuella korrekationer för varje givare när detta är möjligt).

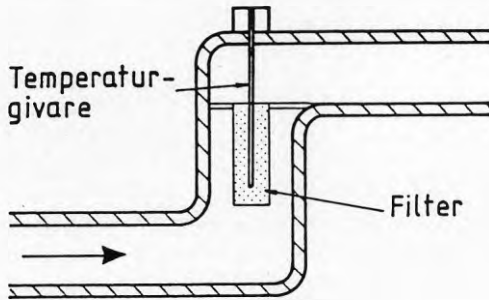
### 3.1.3 Gör rätt installation

- Välj mätpunkterså nära varandra och så nära mätobjektet som möjligt vid bestämning av differensstemperatur. Undantag bör dock göras vid mätning på varmvattenberedare eller dylikt, där långa stilleståndstider gör att givaren för kallvattentemperaturen kan bli för varm vid placering nära beredaren.
- Kontrollera att givarplaceringen är på rätt sida om eventuella ventiler eller dylikt och att de befinner sig i samma delkrets som tillhörande flödesmätare.
- Montera givaren där röret är smalt och därmed vätskehastigheten hög (gärna efter störningar som befrämjar turbulens och omblandning, se figur 3.1).



Figur 3.1. Exempel på montering efter en störning, som ger god omblandning och hög turbulens (hög värmeövergångskoefficient).

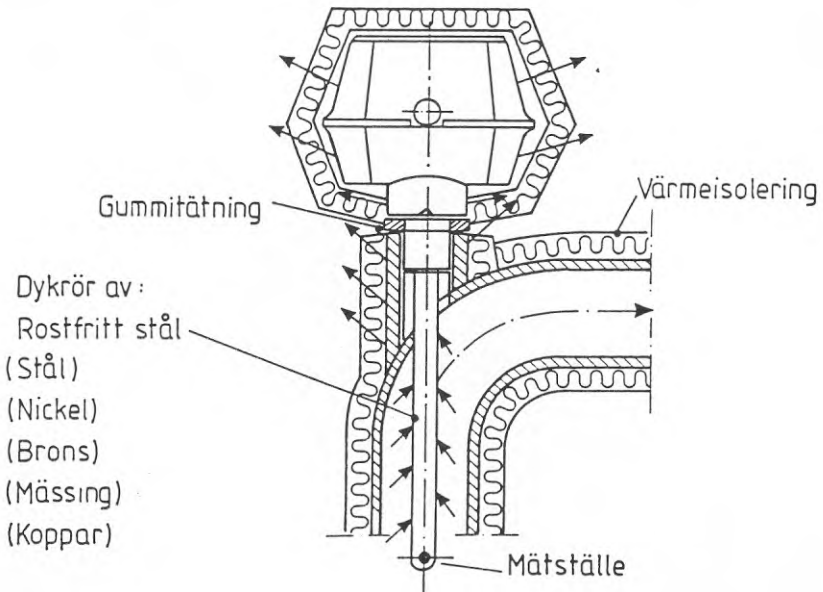
- Undvik placering efter punkter där flöden av olika temperaturer blandas. Om termisk skiktning misstänks kan olika knep användas för att få en omblandning, t.ex genom störningar enligt figur 3.1 eller figur 3.2.



Figur 3.2. Utjämning av temperaturskiktning med hjälp av t.ex filterinsats (ASHRAE standard 41.1-74).

- I mycket grova rör kan ett antal givare behövas, vilka mäter temperaturen i flera punkter i rörets tvärsnitt.
- Använd långa (>100 mm), smala givare direkt instuckna motströms i vätskeströmmen (se figur 3.2 och 3.3). Beakta hållfasthetsproblem med alltför långa och smala givare, speciellt vid tvärströmning.

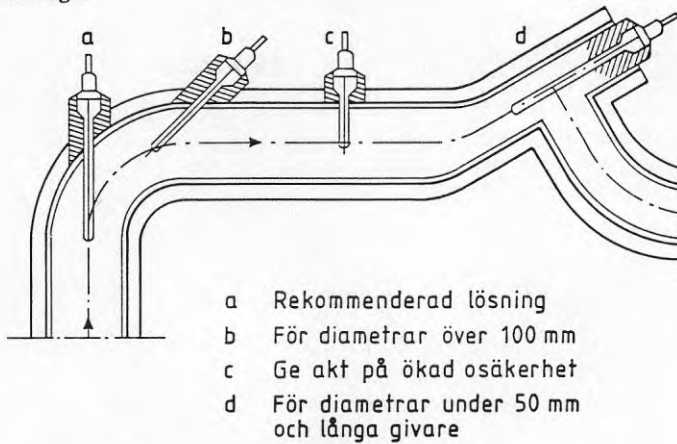
### Rekommenderad lösning



Figur 3.3. Rekommenderad installation av temperaturgivare.

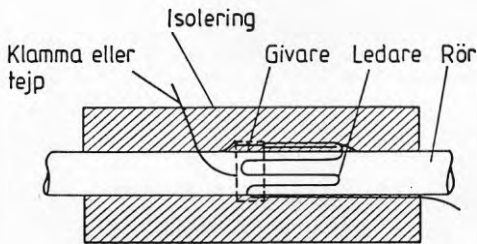
- Isolera röret och givarhuvudet ordentligt (minst 200 mm på båda sidor om mätstället, se figur 3.3). Isolering av kopplingshuvudet är speciellt viktigt om isolerbricka mellan dykrör och rörinfästning används enligt figur 3.3.
- Om dykrör används måste värmeledande pasta appliceras mellan givarelementet och dykröret (påförs endast i mätspetsen). Kontrollera att givaren verkligen bottnar i dykröret så att ordentlig kontakt erhålls.
- Ge akt på egenkonvektion i den luft som finns i dykröret ("kallras"). Vid mätning av höga temperaturer kan dykröret behöva fyllas med isolering.
- Kan inte givaren monteras enligt figur 3.2 väljs i första hand alternativet enligt figur 3.4.

### Alternativa lösningar



Figur 3.4. Alternativa lösningar för montering av temperaturgivare.

- Vid ytemperaturmätning måste rörytan noggrant skrapas ren från färg eller rost och beläggas med värmeledande pasta.
- Fäst en bit av ledarna till givaren (minst 100 mm) mot röret och isolera noggrant (se figur 3.5). Givarelementet fästs lämpligen med en metallklämma, spännband, ventilationstejp eller självhäftande isolering (typ armaflex). Observera att vid höga temperaturer (över 70-80 °C) måste speciell tejp, med värmefåligt klistre, användas. Givarelementet bör vara elektriskt isolerat mot röret för att undvika störningar från elektriska strömmar i röret (speciellt gäller detta vid användning av termoelement).

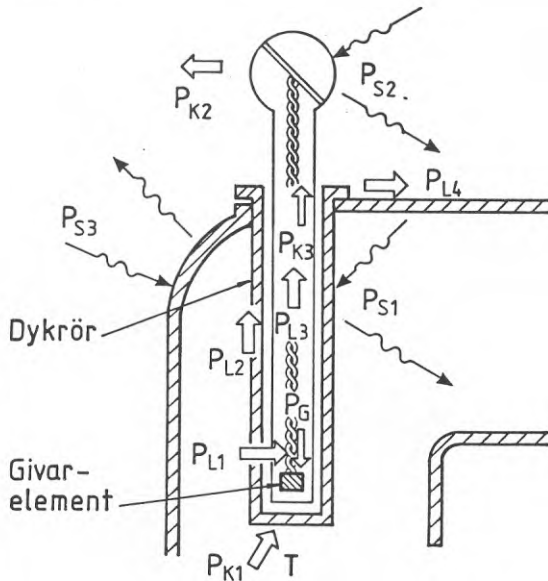


Figur 3.5. Montering av ytemperaturgivare.

- Om temperaturdifferensen mellan rörvägg och en dykrörsgivare är stor och den konvektiva värmeövergångskoefficienten är liten vid givaren (t.ex på grund av små strömnings-hastigheter) kan strålningsskydd behövas. Vid mätning i vätskesystem är detta sällan något problem eftersom vattenbaserade vätskor har försumbar transmission i det termiska våglängdsområdet samtidigt som värmeöverföringen är god.
- Se upp för mätfel på grund av ofrivillig elektrisk jordning vid givaren.

### 3.2 Mätning med dykrör

Det vanligast förekommande sättet att montera temperaturgivare i värmesystem är med hjälp av olika typer av dykrör. Antingen kan givarelementet vara kapslat i ett hölje som kan monteras direkt i vätskeströmmen eller också används ett extra dykrör, i vilket givaren kan monteras i och ur utan att vätskesystemet behöver tömmas. Oavsett vilken typ av montering som studeras gäller i princip samma resonemang, som kommer att föras i fortsättningen av detta kapitel.



Figur 3.6. Värmeutbyte mellan en temperaturgivare och omgivningen vid montering i dykrör.

I figur 3.6 visas schematiskt värmeutbytet mellan en temperaturgivare placerad i ett dykrör och dess omgivning. Det förutsätts i figuren att det strömmande mediet (vätskan) har högre temperatur än omgivningen, men den principiella diskussionen blir den samma även med omgivningen vid högre temperatur än vätskan.

Genom konvektion ( $P_{K1}$ ) överförs värme från vätskan till dykröret. Dessutom sker ett värmeutbyte mellan dykröret och den yttre rörväggen medelst strålning ( $P_{S1}$ ). Det värme som dykröret tar upp från vätskan transporteras genom ledning, dels till dykrörets innervägg ( $P_{L1}$ ) och dels till infästningspunkten ( $P_{L2}$ ). Den del av värmets som transporteras till dykrörets innervägg ( $P_{L1}$ ) kan överföras till temperaturgivarens skyddshölje. En viss del av detta värme ( $P_{L3}$ ) leds bort via givarens skyddshölje och elektriska kablar, en viss del förs bort genom konvektion ( $P_{K3}$ ) och resterande del kommer givaren till godo. Givar-elementet värms därmed till en temperatur som ska efterlikna vätskans temperatur så nära som möjligt.



Många typer av givare är försedda med en yttre elektrisk matning (t.ex resistiva temperaturgivare) vilket medför ytterligare en tillförd effekt ( $P_G$ ) till givaren. Den värmeeffekt ( $P_{L3}$ ) som leds bort från givaren överförs till omgivningen via konvektion ( $P_{K2}$ ) och strålning ( $P_{S2}$ ) medan den del av värmnet, som leds genom dyrkröret, överförs till rörsystemet via ledning ( $P_{L2}$ ) och vidare till omgivningen via ledning i röret ( $P_{L4}$ ), strålning ( $P_{S3}$ ) samt konvektion ( $P_{K4}$ ).

Vid termisk jämvikt är den upptagna värmeeffekten till dyrkröret lika med den avgivna, d.v.s.

$$P_{K1} = P_{L1} + P_{L2} + P_{S1} \quad (\text{ekv. 3.1})$$

På samma sätt blir upptagen och avgiven värmeeffekt för givarelementet lika,

$$P_{L1} + P_G = P_{L3} + P_{K3} \quad (\text{ekv. 3.2})$$

och givarens utsignal kommer att bero på balansen mellan elektrisk matningseffekt, värmeöverföringen från vätskan samt installationens totala förlustfaktor. Om termisk jämvikt inte har uppnåtts tillkommer en term som beskriver värmelagring, se avsnitt 3.2.4. Om givaren i sig är kapslad, vilket antyds i figur 3.6, måste man upprepa värmebalanserna enligt ekv. 3.1-3.2 även för denna kapsling ("dykrör i dykrör").

Vid helt stationära förhållanden blir det resulterande värmeutbytet mellan givarinstallation och vätska lika med noll om installationen är ideal och givarens temperatur därmed är identisk med vätskans. I praktiska installationer finns alltid förluster enligt figur 3.6. För att få en så korrekt mätning som möjligt måste termerna  $P_{L2}$  och  $P_{S1}$  i ekv. 3.1 vara små i förhållande till  $P_{K1}$  och värmetransporten  $P_{L1}$  till givarelementet. Samtidigt måste  $P_{L3}$ ,  $P_{K3}$  och  $P_G$  i ekv. 3.2 vara små för att slutmålet, som är att givarelementets temperatur ska vara lika med vätskans temperatur, ska kunna uppnås. I idealfallet blir därmed  $T_G = T$  och  $P_{K1} = P_{L1} = 0$ .

I ekvation 3.1 anger termerna i högra ledet hur mycket givarinstallationen för temperaturmätning belastar vätskans ostörda tillstånd och därmed hur mycket vätskan kommer att avkylas. Om vätskan kyls kommer även temperaturmätningen att påverkas och därför är det viktigt ur flera synpunkter (se även 3.2.1 och 3.2.4) att hålla förlusttermerna små.

Det konvektivt tillförda värmnet  $P_{K1}$  utgör den "drivande kraften" för att snabbt överföra ändringar i vätsketemperaturen till motsvarande ändringar i givarelementets temperatur.

Denna värmeeffekt kan tecknas som

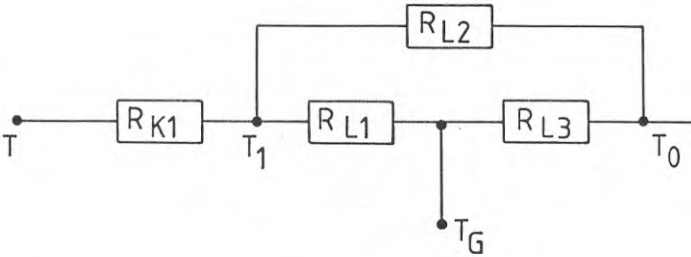
$$P_{K1} = \alpha \cdot A_M \cdot (T - T_D) \quad (\text{ekv. 3.3})$$

där  $\alpha$  är värmeövergångskoefficienten vid dykrörsväggen,  $A_M$  är dykrörets mantelyta (kontaktyta mot vätskan) och  $T - T_D$  är temperaturskillnaden mellan vätska och dykrör.

Egentligen varierar värdet på  $\alpha$  lokalt över ytan på dykröret, men för en given installation kan  $\alpha$  i ekvation 3.3 betraktas som ett medelvärde över ytan. Värdet på  $\alpha$  ökar med ökande strömningshastighet och minskande dykrörsdiameter. Som framgår av ekvation 3.3 ger höga värden på  $\alpha$  och  $A_D$  ett högt värde på  $P_{K1}$  vid en given temperaturdifferens. Alternativt innebär detta att en given värmeförlust, som orsakas av givarinstallationen, ger en mindre temperaturskillnad mellan vätskan och dykröret och därmed ett mindre mätfel.

Ett högt värde på  $\alpha \cdot A_M$  är önskvärt för att hålla nere temperaturdifferensen vid givna förluster och för att ge ett snabbt svar vid temperaturändringar. Däremot kan ett högt värde aldrig fullt ut kompensera fel beroende på förlusttermerna i ekvation 3.1 och 3.2. Därför kommer mätfel orsakade av värmeledning i dykrör ( $P_{L2}$ ) och ledare ( $P_{L3}$ ) att diskuteras särskilt i 3.2.1, mätfel orsakade av strålningsutbyte ( $P_{S1}$ ) i 3.2.2, övriga orsaker till statistiska mätfel i 3.2.3 och dynamiska mätfel i 3.2.4.

Många gånger kan det vara illustrativt att efterlikna de termiska resistanserna och värme-flödena med resistanser och elektriska strömmar. En elektrisk ekvivalent till en dykrörsinstallation visas i figur 3.7.



Figur 3.7. Elektrisk ekvivalent till en dykrörsinstallation för temperaturmätning.

I figur 3.7 betecknas de termiska resistanserna orsakade av begränsningar i den konvektiva värmeöverföringen med  $R_K$ , och resistanser på grund av ledningsmotstånd med  $R_L$  (jämför med även med figur 3.6).  $R_K$  och  $R_L$  ges av

$$R_K = \frac{1}{\alpha \cdot A_M} \quad \text{och} \quad R_L = \frac{L}{\lambda \cdot A_D} \quad (\text{ekv. 3.4})$$

Givarelementets temperatur kan därmed relateras till vätsketemperaturen och rörväggens temperatur enligt

$$\frac{T_G - T_0}{T - T_0} = f(R_i) = \frac{1}{1 + \frac{R_{L1}}{R_{L3}} + R_{K1} \left( \frac{R_{L1}}{R_{L2} \cdot R_{L3}} + \frac{1}{R_{L2}} + \frac{1}{R_{L3}} \right)} \quad (\text{ekv. 3.5})$$

Mätfelet på grund av dykrörsinstallationen kan därmed beräknas enligt

$$F_T = T_G - T_0 = (T - T_0) \cdot (f(R_i) - 1) \quad (\text{ekv. 3.6})$$

$f(R_i)$  är alltid mindre än 1 vilket gör att  $F_T < 0$  om  $T > T_0$ .

Sammanfattningsvis kan konstateras att om man på bästa sätt vill kompensera termiska förluster bör man eftersträva att uppfylla följande kriterier:

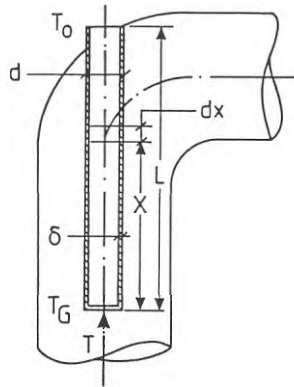
- Hög värmeövergångskoefficient, vilken ges av hög strömningshastighet, smal givare och turbulensbefrämjande strömningstekniska störningar.
- Stor mantelyta, vilket ges av ett långt dykrör samt olika former av ytförstörningar (flänsar eller dylikt), dock utan att onödigtvis öka dykrörets massa.

### 3.2.1 Mätfel genom värmeledning

Vid mätning av vätsketemperaturer i strömmande medier med insticksgivare (antingen helkapslade givare eller med separata dykrör) orsakas det mest betydande statistiska mätfelet av värmeledning i dykrörets mantel (termen  $P_{L2}$  i figur 3.6).

För att få en kvantitativ uppfattning av inverkan från termen  $P_{L2}$ , d.v.s. värmetransporten genom dykröret till omgivningen, görs följande antaganden (se figur 3.8):

- dykrörets längd =  $L$
- dykrörets diameter =  $d$
- dykrörets vägg tjocklek =  $\delta$
- dykrörets tvärsnittsarea =  $\pi/4 [d^2 - (d-\delta)^2] = A_D$
- dykrörets värmekonduktivitet =  $\lambda$
- vätskans kärnströmningstemperatur =  $T$
- givarställets temperatur =  $T_G$
- rörväggens temperatur =  $T_0$
- värmeövergångskoefficienten mellan vätska och dykrör =  $\alpha$
- givarelementet har samma temperatur som dykröret, d.v.s.  $P_{L1} = 0$



Figur 3.8. Förutsättningar för bedömning av dykrörslängdens inverkan på mätfel genom värmeledning.

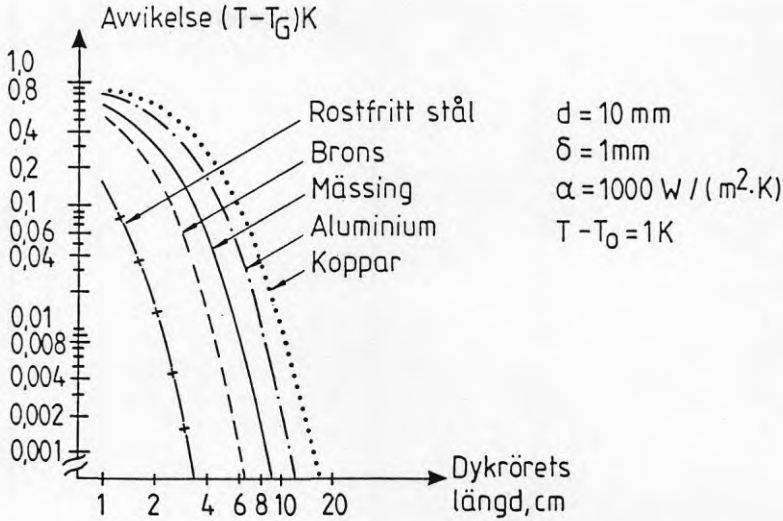
Värmebalans mellan vätska och dykrör innebär att konvektivt tillförd värme och genom värmeledning bortförd värme blir lika stora, d.v.s  $P_{K1} = P_{L2}$  enligt figur 3.8. Detta ger följande uttryck för temperaturmätfelet  $F_T$  på grund av värmeledning i dykröret,

$$F_T = T_G - T = \frac{T_0 - T}{\cosh(K \cdot L)} \quad (\text{ekv. 3.7})$$

$$\text{där } K = \left( \frac{\alpha \cdot d \cdot \pi}{\lambda \cdot A} \right)^{1/2}$$

Differensen  $T_G - T$ , d.v.s skillnaden mellan dykrörets temperatur vid givarpositionen och vätskans temperatur, ger ett uttryck för dykrörets inverkan på mätfelet. Kvalitativt kan man se att en liten temperaturdifferens mellan omgivning och vätska ( $T_0 - T$ ), ett långt dykrör ( $L$ ), en stor värmeövergångskoefficient ( $\alpha$ ), en liten diameter ( $d$ ) och en låg värmekonduktivitet ( $\lambda$ ) inverkar positivt på mätresultatet.

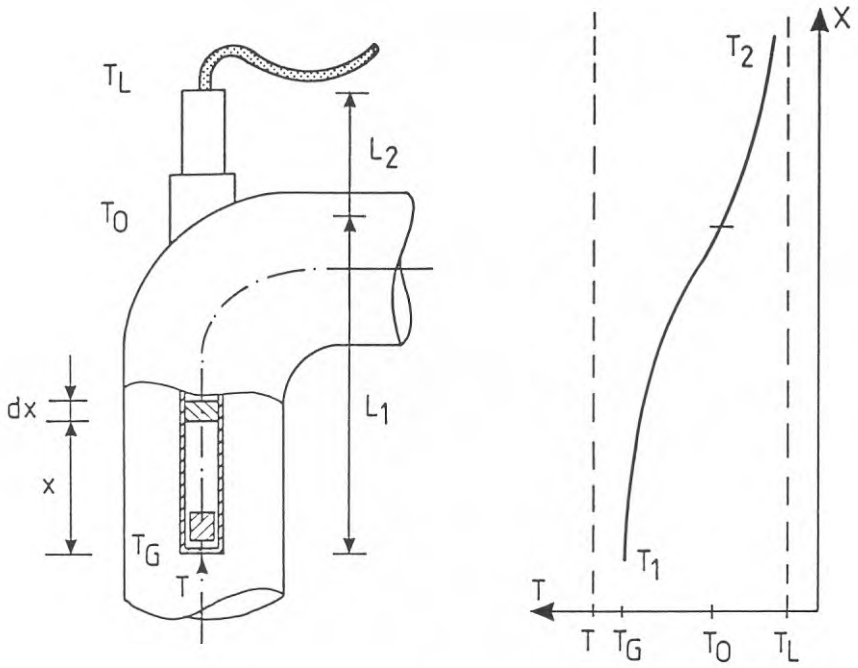
I referens 1 (Fahlén, 1991) ges några kvantitativa exempel på inverkan av flöde, dykrörs-material och dykrörslängd. Inverkan av material och längd kan illustreras med figur 3.9. I figuren finns temperaturavvikelsen skissad som funktion av dykrörets längd för några olika material. Figuren förutsätter att differensen mellan vätskans temperatur och rörväggens temperatur är 1 K. Eftersom felet är proportionellt mot denna differens behöver man bara multiplicera avvikelserna enligt figur 3.9 med den aktuella avvikelserna  $T - T_0$ .



Figur 3.9. Exempel på inverkan av dykrörets längd på mätfelet (Adunka, 1984). Avläst värde multipliceras med aktuell temperaturdifferens  $(T - T_0)$ .

I den föregående diskussionen kring inverkan av dykrörets längd har förutsättningen varit att temperaturen vid dykrörets infästning i röret haft ett bestämt värde,  $T_0$ . I verkliga installationer har man alltid någon del av givaren, som sticker ut en bit från dykröret (t.ex. kopplingshuvud, kablar etc).

Denna del utbyter värme med omgivningen genom konvektion och strålning ( $P_{K2}$  och  $P_{S2}$  i figur 3.6) och påverkar därmed värdet på  $T_0$ . Därmed kan i praktiken skillnaden mellan vätsketemperatur och dykrörets bastemperatur vara större än det värde som motsvarar temperaturskillnaden mellan vätskan och rörväggen. Speciellt bör man ge akt på förlusterna till omgivningen via utskjutande delar om dykrörets infästning är isolerad från röret med en tätningbricka av material med dålig värmekonduktivitet, t.ex. gummi. I de fall att givarens utskjutande delar är välisolerade kan en isolerbricka var lämplig, eftersom förlusterna till rörväggen minskar. Är de utskjutande delarna emellertid dåligt isolerade inverkar isolerbrickan negativt genom att förlusterna till omgivningen påverkar dykrörets bastemperatur  $T_0$  i större omfattning.



Figur 3.10. Förutsättningar för bedömning av hur förlusterna till omgivningen påverkar resonemanget kring dykrörets inverkan på mätfelet.

Samma resonemang kan föras kring värmeförlusterna till omgivningen från utskjutande delar som fördes kring förlusterna via dykröret och resulterade i ekvation 3.4 (Adunka, 1984, Lieneweg, 1976). Med förutsättningar enligt figur 3.10 och med index 1 för de delar som är i kontakt med vätskan och index 2 för de delar som är i kontakt med luften (temperatur  $T_1$ ) erhålls följande uttryck för temperaturmätfelet,

$$F_T = T_G - T = \frac{T_L - T}{\cosh(K_1 \cdot L_1)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{A_1 \tanh(K_1 \cdot L_1)}{A_2 \tanh(K_2 \cdot L_2)}\right)} \quad (\text{ekv. 3.8})$$

I ekvation 3.8 har värmeledning till infästningspunkten i rörväggen försumrats, d.v.s förutsättningen är att en isolerbricka monterats mellan dykrör och rörvägg. Av ekvation 3.8 framgår att mätfelet är direkt proportionellt mot avvikelserna mellan vätskans temperatur och omgivningstemperaturen samt att felet blir positivt när vätsketemperaturen är högre än lufttemperaturen och negativt i övriga fall. Vidare ser man att felet blir litet för stora värden på  $K_1$  och  $L_1$  (långt dykrör, liten värmekonduktivitet och god konvektiv värmeöverföring). Dessutom ska den utskjutande delen av givaren ha ännu mindre tvärsnittsarea än dykröret samt vara kort och ha liten värmeövergångskoefficient ( $A_1/A_2$  bör vara stort,  $L_2$  litet,  $K_2$  litet).

Som avslutning av kapitel 3.2.1 kan följande sammanfattning göras om vilka krav som bör ställas vid användning av dykrör:

- Använd långa och smala dykrör (längden skall vara minst 100 mm och dykrörets diameter skall vara mindre än  $0,1 \cdot$  längden)
- Använd dykrör av rostfritt stål
- Se till att skillnaden mellan vätsketemperatur och rörväggens temperatur är så liten som möjligt (isolera röret ordentligt, minst 200 mm på båda sidor om mätstället)
- Använd givare med små kopplingshuvuden och kort utstickande hals
- Isolera alla utstickande delar noggrant.

Om kriterierna ovan är uppfyllda, och givaren sitter placerad på ett ställe där strömningshastigheten är någorlunda hög, bör mätfelet på grund av värmebortledning i dykrör eller givarhölje med säkerhet vara mindre än vad följande uppskattning ger (baserat på de teoretiska överbägandena i detta kapitel och praktiska mätningar enligt Fahlén, 1987).

$$\text{Mätfel} = T_G - T < 0,001 \cdot (T_L - T) \quad (\text{ekv. 3.9})$$

där  $T_L - T$  är skillnaden mellan den omgivande luftens temperatur och vätskans temperatur. Mätfelet blir positivt om  $T_L > T$  och negativt om  $T_L < T$ . Vid omgivningstemperaturen  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  och vätsketemperaturen  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  bör därmed enligt ekvation 3.9 mätfelet bli mindre än  $-0,07 \text{ K}$ .

### 3.2.2 Mätfel genom strålning

Normalt är strålningsutbytet  $P_{S1}$  (ekv. 3.1) försumbart i förhållande till den konvektiva termen  $P_{K1}$  vid rörbundna vätskeflöden. Endast för speciella vätskor vid höga temperaturer, låg strömningshastighet och dåligt isolerade rör kan inverkan på mätningen bli märkbar. Vatten har t.ex. mycket kraftig absorption inom den termiska strålningens våglängdsområde och i vattensystem blir därmed strålningsutbytet mellan rörvägg och dykrör helt försumbart. I de fall strålningsutbyte förekommer sker det enligt Stefan-Bolzmanns lag,

$$P_S = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_M (T_G^4 - T_V^4) \quad (\text{ekv. 3.10})$$

där  $P_S$  är överförd effekt genom strålning,  $A_M$  är givarens (dykrörets) mantelyta,  $T_G$  är givarens temperatur,  $T_V$  är rörväggens temperatur på insidan,  $\sigma$  är Stefan-Bolzmanns konstant ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ) och  $\epsilon$  är en ekvivalent emittans. Den ekvivalenta emittansen beror av rör- och givarytornas emissionsegenskaper och ytornas storlek enligt

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_G} + \frac{A_M}{A_V} \left( \frac{1}{\epsilon_V} - 1 \right) \quad (\text{ekv. 3.11})$$

där  $\epsilon_G$  är givarens emittans,  $A_V$  är den del av väggytan på röret som utbyter värme med givaren och  $\epsilon_V$  är väggens emittans. Oftast är  $A_V \gg A_M$  vilket gör att  $\epsilon \approx \epsilon_G$ .

Samtidigt som givaren förlorar värme via strålning motsvarande  $P_S$ , upptar den värme genom konvektiv värmeöverföring från vätskan motsvarande

$$P_K = \alpha_G \cdot A_M (T - T_G) \quad (\text{ekv. 3.12})$$

Vid termisk jämvikt kan (ekv. 3.10) och (ekv. 3.12) sättas lika, vilket ger ett uttryck för mätfel  $F_T$  på grund av strålningsutbyte:

$$F_T = T_G - T = - \frac{\alpha}{\alpha_G} (T_G^4 - T_V^4) \quad (\text{ekv. 3.13})$$

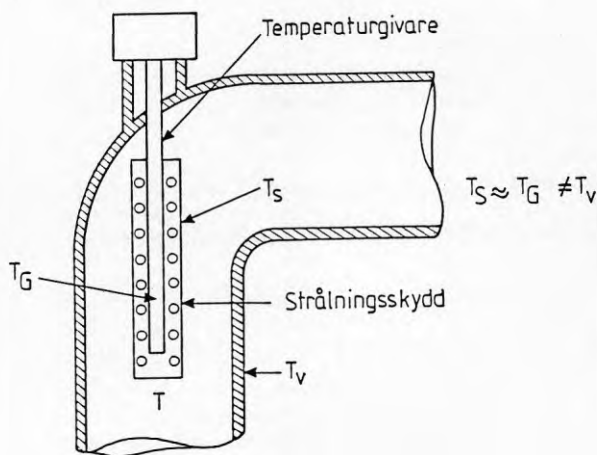
Med hjälp av lufttemperaturen  $T_1$  på rörets utsida, vätsketemperaturen  $T$ , värmeövergångskoefficienten på rörets luftsida  $\alpha_1$  och värmeövergångskoefficienten på rörväggens vätskesida  $\alpha_V$  kan (om värmemotståndet i rörväggen försummas, se Fahlén, 1991) temperaturen  $T_V$  beräknas enligt

$$T_V = \frac{\alpha_V \cdot T + \alpha_1 \cdot T_1}{\alpha_V + \alpha_1} \quad (\text{ekv. 3.14})$$



Av ekvation 3.13 framgår att mätfelet på grund av strålningsutbyte är kraftigt beroende av absolutnivån på temperaturerna  $T_G$  och  $T_V$  och därmed i första hand inträffar vid höga temperaturer. Det framgår också att mätfelet minskar snabbt vid höga värden på värmeövergångskoefficient  $\alpha_G$  vid givarens dykrör. Vidare kan man se av ekvation 3.14 att väggtemperaturen  $T_V$  (som måste hållas så nära  $T$  och  $T_G$  som möjligt enligt ekv. 3.13) avviker från vätsketemperaturen först när värmeövergångskoefficienten på luft- och vätskesidan av röret är av samma storleksordning. Strålningens inverkan illustreras med några exempel i referens 1 (Fahlén, 1991).

I de fall man bedömer att risken finns att mätresultatet kommer att påverkas av strålningsutbyte kan man använda sig av en eller flera koncentriska strålningskärmar enligt figur 3.11. Genom att introducera en skärm i form av en blank (låg emittans) cylinder runt temperaturgivaren, kommer temperaturgivaren att luras att se en omgivningstemperatur som ligger nära vätsketemperaturen. Därmed minskar också strålningsutbytet kraftigt. Observera att strålningskärmen bör vara öppen i båda ändar så att inte strömningen runt givaren hindras i onödan.



Figur 3.11. Användning av strålningskydd för att minska värmeutbytet mellan givaren och omgivningen via strålning.

Strålningsutbytet inverkan på mätfelet vid temperaturmätning kan sammanfattas enligt följande:

- För temperaturmätning i strömmande vätskor kan strålningsutbytet normalt försummas.
- Vid mätning i vätskor andra än vatten, vilka är stillastående eller har låg strömningshastighet, bör en bedömning av mätfelet göras.
- Vid behov används en särskild strålningskärm.

### 3.2.3 Övriga orsaker till statistiska mätfel

I avsnitt 3.2.1 och 3.2.2 har två viktiga orsaker till mätfel vid temperaturmätning behandlats. Båda dessa fel har direkta fysikaliska orsaker och ger entydigt negativa fel vid mätning av övertemperaturer. Dessa mätfel kan därmed uppskattas på ett sätt som går att beskriva med mer eller mindre noggranna matematiska samband.

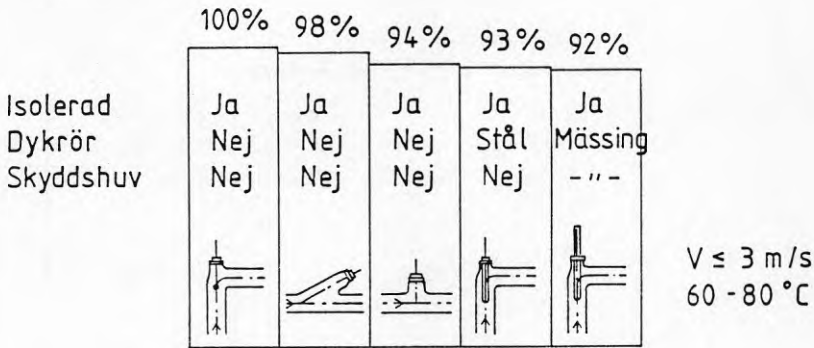
I detta avsnitt kommer några andra viktiga orsaker till mätfel att diskuteras, varav de flesta hör till kategorier som bara låter sig bedömas med hjälp av erfarenhet och mer eller mindre kvalificerade gissningar. Samtidigt kommer några enkla åtgärder för att undvika dessa fel att beskrivas.

#### 3.2.3.1 Temperaturfall längs dykrör

Enligt den tidigare diskussionen i avsnitt 3.2.1 kommer skillnader i temperatur mellan dykrörets eller givarens infästning i rörväggen att orsaka ett temperaturfall längs dykröret. Detta temperaturfall ger inte bara upphov till att dykröret får en temperatur som är skild från vätsketemperaturen. Dessutom kommer vätskan att kylas längs dykröret (eller värmas beroende på om vätskan har över- eller undertemperatur gentemot omgivningen).

Att vätskan kyls av dykröret innebär att inte heller den vätska som är i kontakt med dykröret kommer att ha den ostörda vätskans temperatur. Av denna anledning rekommenderas i första hand att installera temperaturgivare motströms enligt alternativen a) och b) i figur 3.3. Motströms montering medför att dykrörets spets, där givarelementet är monterat, kommer i kontakt med vätskan innan den hunnit kylas längs dykröret. Dessutom är gränsskiktet tunnast och värmeövergångskoefficienten störst vid den stagnationspunkt som bildas vid dykrörets spets i samband med motströmsmontering (vätskans lokala hastighet är noll). Den effekt som leds ut vid dykrörets infästning tas från vattnet, vilket därmed kyls längs dykröret.

Den totala avkylningen av vätskan blir liten när värmekonduktiviteten ( $\lambda$ ) för dykrörs-materialet är liten, dykrörets tvärsnittsarea ( $A_D$ ) är liten, temperaturdifferensen mellan vätska och rörvägg ( $T-T_0$ ) är liten, dykröret är långt ( $L$ ) och har liten diameter ( $K$  stort), gränsskiktets volymflöde ( $q$ ) är litet samt vätskans densitet och specifika värmekapacitet är stora. I figur 3.12 visas en jämförelse mellan de mätfel som erhållits vid några olika sätt att installera temperaturgivare. Jämförelsen avser en kvicksilvertermometer placerad direkt i vätskan rakt motströms, snett motströms och vinkelrätt mot strömmen samt i dykrör motströms utan skyddshuv respektive med skyddshuv. Resultatet anges i % av den verkliga temperaturskillnaden mellan vätskan och omgivningen.

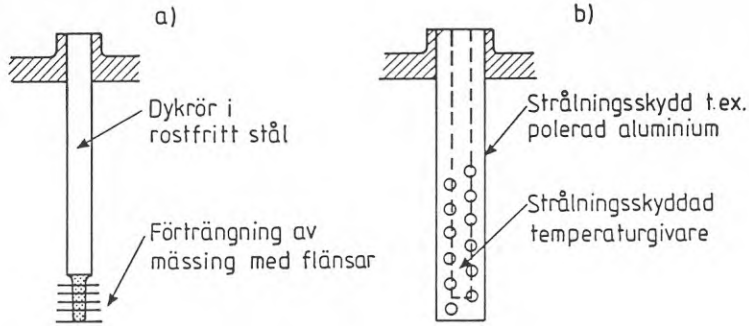


Figur 3.12. Jämförelse mellan olika installationers inverkan på det statiska mätfelet (Kopp, 1986).

### 3.2.3.2 Problem med låga värmeövergångskoefficienter

I normala fall är värmeövergångskoefficienten vid vätskeströmning i rör tillräckligt hög för att särskilda åtgärder inte skall behövas för att mätresultaten skall bli acceptabla. I vissa fall, t.ex. vid mycket höga temperaturer (när strålning eventuellt kan inverka) eller vid låga strömningshastigheter, kan åtgärder för att förbättra värmeövergångskoefficienten behövas. En möjlighet, som nämnts tidigare (se fig 3.2), är att montera givaren efter någon form av störning. Efter t.ex. krökar ger ökad turbulens en höjning av värmeövergångskoefficienten.

En annan möjlighet är att förse själva dykröret med flänsar, vilka dels ger en större värmeöverförande yta och dels kan förbättra värmeövergångskoefficienten. I figur 3.13 visas två exempel på specialutförande av givare avsedda för att (a) förbättra värmeövergångskoefficienten och ge en snabb mätspets samt (b) skydda mot strålning.



Figur 3.13. Exempel på speciella givare för att förbättra den konvektiva värmeövergångskoefficienten (a) respektive förbättra förhållandet mellan konvektiv- och strålningsoverföring (b).

### 3.2.3.3 Värmeöverföring inuti dykrör

I den föregående texten har i första hand värmeöverföring mellan vätska och dykrör behandlats. Resultatet av mätningen bestäms emellertid av den temperatur givarelementet känner. Enligt figur 3.6 och diskussionen i inledningen till kapitel 3.2 bestäms givarelementets temperatur av hur stor del av det konvektivt överförda värmets ( $P_{K1}$ ) som kan ledas till givarelementet ( $P_{L1}$ ) i förhållande till förlusten från dykröret ( $P_{L2}$ ,  $P_{S1}$ ) samt hur stor del av värmets som förloras från givarelementet genom värmeledning i elektriska ledningar ( $P_{L3}$ ) och genom egenkonvektion i dykröret ( $P_{K3}$ ). Dessutom får inte en eventuellt tillförd matningseffekt påverka givarelementets temperatur genom egenuppvärmning.

Av ovanstående anledningar är det viktigt att värmemotståndet mellan givarelement och vätska är litet. Detta kan åstadkommas genom att utforma själva mätspetsen i ett material med god värmeledningsförmåga, t.ex. mässing, medan resten av dykröret är gjort i rostfritt stål för att inte ledningsförlusterna till omgivningen skall bli för stora. Värmemotståndet mellan dykrör och givarelement görs litet genom att använda en givare med god passning i dykrörets spets och genom att använda någon form av värmeledningspasta.

Observera följande:

- använd ett kort givarelement (högst halva dykrörlängden) och applicera värmeledande pasta endast på elementet (annars ökar ledningsförlusterna till omgivningen)
- se till att givaren verkligen hamnar i botten av dykröret
- använd så tunna tilledare som möjligt
- se till att den öppna ändan av dykröret blir tätt försluten genom konvektion (speciellt vid höga temperaturer kan egenkonvektionen ge betydande fel).

Den sista punkten ovan kan illustreras med ett exempel (Lieneweg, 1976). Vid en mätning med termoelement i ett öppet dykrör och vätsketemperaturen 250°C blev mätfelet 30K. Om dykröret förslöts i den öppna änden minskade mätfelet till 15K och när dykröret både fylldes med värmeisolering och förslöts minskade felet till 5K.

Som tidigare nämnts kan även givarens matningseffekt orsaka ett fel. Felets storlek kan bedömas genom att betrakta värmebalansen för givarelementet,

$$P_G + P_{L1} = P_{L3} + P_{K3} \quad (\text{ekv. 3.15})$$

Vid en ideal givarinstallation utan förluster till omgivningen ( $P_{L3} = P_{K3} = 0$ ) blir  $P_{L1} = -P_G$ , dvs värme transporteras från givaren till vätskan. Detta innebär att matningseffekten ( $P_G$ ) ger givarelementet en övertemperatur. Storleken på detta fel brukar uttryckas med hjälp av egenuppvärmningsmotståndet

$$M = \frac{P_G}{\Delta T_e} \quad (\text{ekv. 3.16})$$

där  $\Delta T_e$  är temperaturhöjningen som orsakas av egenuppvärmning. Detta motstånd beror kraftigt av material och utformning av givarelementet samt av värmegenomgångskoefficienten mellan givarelementet och dess omgivning. Därför måste alltid omgivningsvillkoren beskrivas noggrant för att givare med olika värden på  $M$  skall kunna jämföras.

Enligt internationell standard IEC 751 för Pt-100 givare rekommenderas användning av det inverterade värdet av egenuppvärmningsmotståndet, den s.k. egenuppvärmningskoefficienten, enligt

$$K = \frac{\Delta T_e}{P_G} \quad (\text{uttryckt i K/mW}) \quad (\text{ekv. 3.17})$$

Vid mätning i vätskor och med normala mätströmmar (för Pt-100 givare några mA) kan detta fel oftast försummas, medan det kan få en viss betydelse vid mätning på gasflöden. Vid mätning av övertemperatur ger egenuppvärmningen normalt ett minskat mätfel medan mätfelet ökar vid mätning av undertemperaturer.

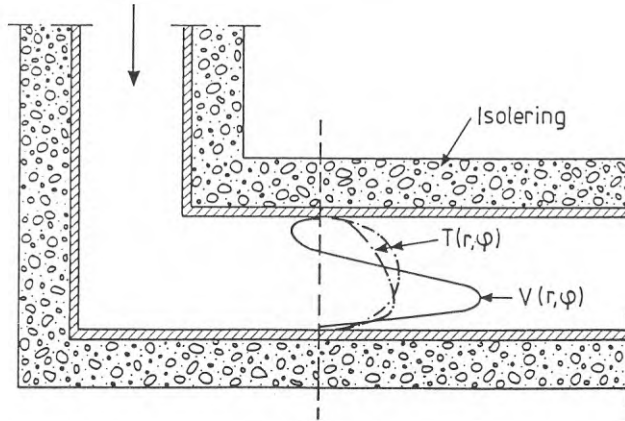
### 3.2.3.4 Att hitta den rätta temperaturen

I de flesta förekommande praktiska fall är man intresserad av att bestämma bulkflödets temperatur, d.v.s vätskans medeltemperatur viktad med hänsyn till lokal strömningshastighet. En möjlighet är naturligtvis att bestämma den lokala hastigheten och motsvarande temperatur i ett stort antal punkter och sedan väga ihop dessa mätresultat. Detta låter sig i de flesta fall inte göras i praktiken. För att få en korrekt vägd medelhastighet behövs t.ex. minst 12 mätpunkter i det enkla fallet med cirkulära rör och en hyfsat "snäll" strömningsbild (ISO 3354-1975).

Om densiteten och specifika värmekapaciteten varierar måttligt med temperaturen kan bulktemperaturen  $T_B$  för strömning i cirkulära rör uttryckas som

$$T_B = \langle T \rangle = \frac{1}{q} \int_0^{2\pi} \int_0^R T(r, \varphi) \cdot v_z(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi \quad (\text{ekv. 3.18})$$

där  $q$  är vätskans volymflöde,  $R$  är rørets diameter,  $\langle T \rangle$  är vätskans medeltemperatur över rørets tvärsnittsyta samt  $r$  och  $\varphi$  är de polära koordinaterna för ett vätskeelement i ett givet tvärsnitt av røret. Observera att punkter långt ifrån rørcentrum viktas kraftigare ( $r \cdot dr \cdot d\varphi$ ). Eftersom temperaturprofil ( $T(r, \varphi)$ ) och hastighetsprofil ( $v_z(r, \varphi)$ ) inte behöver ha något enkelt samband måste man mäta både hastighet och temperatur i samma punkt (se fig. 3.14).



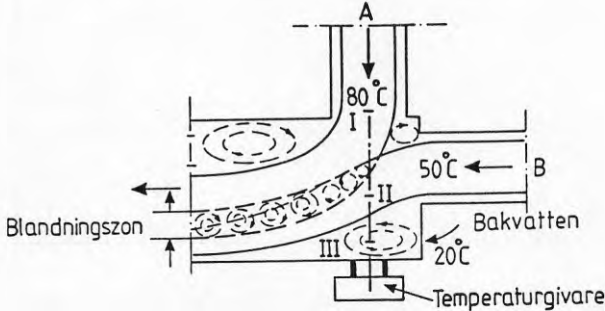
Figur 3.14. Exempel på asymmetriska temperatur- och hastighetsfördelningar i ett rørtvärsnitt.

I de flesta fall klarar man sig emellertid bra vid mätning av vätskeflöden i rör genom att mäta kärnströmningstemperaturen om följande förutsättningar är uppfyllda,

- Röret är välisolerat
- Strömningen är turbulent
- Ingen värmning, kylning eller blandning av delflöden med olika temperaturer sker inom  $400 \cdot D$  före mätstället ( $D$  är rörets innerdiameter).

Den sistnämnda punkten kan belysas med några exempel (jämför med figur 3.15). I värmesystem förekommer ofta blandning av flöden med olika temperaturer t.ex. vid behovsstyrning av framledningstemperatur. Likaså kan flöden med stora temperaturdifferenser blandas i fjärrvärmesystem och blockcentraler, där flera olika typer av värmeanläggningar ingår, t.ex. värmepumpar och oljepannor. Ett annat exempel är när tappvarmvatten (t.ex.  $80^\circ\text{C}$ ) och kallvatten (t.ex.  $10^\circ\text{C}$ ) blandas för att få tappvarmvatten med en lämplig utgående temperatur (t.ex.  $60^\circ\text{C}$ ). Ytterligare ett exempel utgör området efter en värmeväxlare, där skiktade stråk med olika temperaturer kan förekomma.

Vid ovanstående situationer kan det dröja ganska länge efter blandningsstället innan en homogen temperatur erhålls, i extremfall  $100\text{--}400 \cdot D$ . Speciellt vid låga flöden, när strömningen är laminär och när vätskan har en låg värmekonduktivitet, kan en utjämnning av skiktade temperaturer ta mycket lång tid.



Figur 3.15 Blandning av två delströmmar med olika temperatur

Om temperaturen skulle mätas vid blandningsstället i figur 3.15 kan mätresultatet bli mycket olika beroende på vilket instickdjup givaren har. Med en lång givare, som når till punkt I i figuren, mäter man endast temperaturen i delström A, dvs  $80^\circ\text{C}$ . Med en kortare givare mäter man någon form av blandad temperatur ända tills givaren är så kort att den bara når punkt II. Där mäts enbart temperaturen i delström B, dvs  $50^\circ\text{C}$ . Med en mycket kort givare mäter man temperaturen i "bakvattnet". Om röret är oisolerat kan denna temperatur ligga nära omgivningstemperaturen  $20^\circ\text{C}$ .

Speciellt i samband med låga strömningshastigheter kan temperaturskiktningar bli mycket långvariga. Är strömningen laminär sker temperaturutjämningen inom vätskan endast genom värmeledning och de flesta vätskor har mycket låg värmekonduktivitet.

Av föregående diskussion framgår att det enklaste sättet att skaffa sig ett representativt mått på bulktemperaturen är att mäta på ställen där vätskan med säkerhet är ordentligt omblandad och där eventuella temperaturskillnader är utjämnade.

Lämpliga ställen är:

- Efter olika former av störningar (se figur 3.1 och 3.2)
- Efter långa rörsträckor utan värmning, kylning eller blandning (100-400 • D kan behövas)
- Efter pumpar (observera dock att pumpen ger en temperaturhöjning av vätskan,

$$\Delta T = \frac{P_p}{q \cdot \rho \cdot c_p} \text{ där } P_p \text{ är den pumpeffekt som tillförs vätskan.}$$

Ett fenomen, som nästan alltid kan försummas vid vätskeströmning i rör, är den så kallade stagnationstemperaturförhöjningen. Genom att vätskans hastighet är noll vid stagnationspunkten på dykröret har rörelseenergin övergått till värme vid uppbromsningen. Detta ger en lokal temperaturhöjning av vätskan enligt

$$\Delta T = \frac{v^2}{2c_p} \quad (\text{ekv. 3.19})$$

Med vatten och med den för rörströmning mycket höga hastigheten 10 m/s blir temperaturhöjningen endast 0,01 K och för hastigheten 1 m/s blir höjningen 0,0001 K. Inverkan på givarelementets temperatur blir naturligtvis ännu mindre.

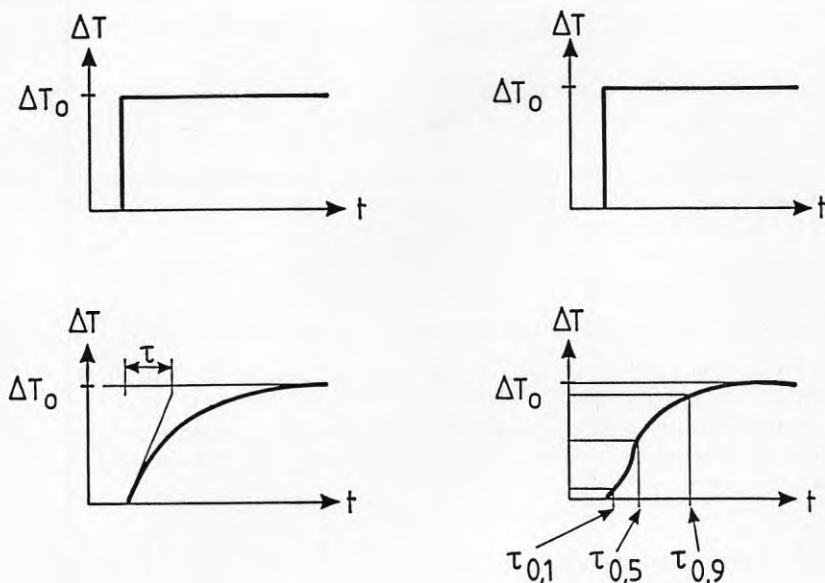
### 3.2.4 Dynamiska mätfel

I många mätsituationer förekommer mer eller mindre påtagliga svängningar hos den observabel man intresserar sig för. Vi temperaturmätningar sker t.ex. ofta kraftiga svängningar i samband med in- och urkoppling av värmare och kylare. Det är därvid väsentligt att det mätsystem man använder är tillräckligt snabbt för att följa variationerna. Vid tidsdiskreta mätsystem, vilket numera är vanligast förekommande, måste "samplings"-frekvensen vara hög i förhållande till frekvensinnehållet i signaländringen. Dessutom måste själva givaren vara tillräckligt följsam för att hinna med att registrera svängningarna. Tre typer av dynamiska egenskaper är viktiga vid mätningar i rörsystem,

- systemets (processens) frekvensinnehåll
- rörsystemets tidskonstanter
- givarnas tidskonstanter



De flesta temperaturgivare karakteriseras för enkelhetens skull med en enkel tidskonstant  $\tau$  enligt figur 3.16. Detta motsvarar det första stegsvaret i figuren medan det andra mer liknar verkliga förhållanden. Vid experimentiellt bestämda stegsvar anger man därför oftast en stigtid  $\tau_s$  ( $=\tau_{0,9}-\tau_{0,1}$ ) eller  $\tau_{0,5}$  i stället för tidskonstanten. Intervallet  $\tau_{0,9}-\tau_{0,1}$  motsvarar tiden för stegsvaret att öka från 10% till 90% av det stationära slutvärdet och  $\tau_{0,5}$  motsvarar tiden från 0% till 50%. IEC 751 rekommenderar att  $\tau_{0,5}$  används i första hand och  $\tau_{0,9}-\tau_{0,1}$  i andra hand. Däremot avråder man från att använda den enkla tidskonstanten  $\tau=\tau_{0,63}$  för att undvika implikationen att givaren verkligen är ett första ordningens system.



Figur 3.16. Definition av stigtid.

I denna rapport kommer, om inte något annat sagts, stigtiden att anges som  $\tau_s$  ( $=\tau_{0,9}-\tau_{0,1}$ ). Anledningen är främst att vid experimentella bestämmningar påverkas temperaturförloppet i initialskedet av hur snabbt omkoppling sker mellan varmt och kallt vatten, hur snabbt mätsträckan töms på befintligt vatten och hur snabbt mätörret ändrar sin temperatur. Dessutom ligger tiden  $\tau_s$  närmare den tid man behöver vänta för att få rimliga mätfel än vad  $\tau_{0,5}$  gör.

Med hjälp av tidskonstanten kan givarens stegsvar uttryckas som

$$\Delta T = \Delta T_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{ekv. 3.20})$$

där  $\Delta T_0$  är det pålagda temperatursprånget. Samtidigt ger ekv. 3.20 direkt det relativa mätfelet

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (\text{ekv. 3.21})$$

Efter tiden  $t = \tau$  är det relativa mätfelet fortfarande 37%. Efter tiden  $t = \tau_{0,9}$  är  $\Delta T/\Delta T_0 = 10\%$ . Med hjälp av ekvation 3.21 kan  $\tau_s$  relateras till den enkla tidskonstanten  $\tau$  enligt

$$\tau_s = (\tau_{0,9} - \tau_{0,1}) = 2,2 \tau \quad (\text{ekv. 3.22})$$

där  $\tau_s$  är den stigtid som i första hand används i denna rapport. Exempel på praktiskt uppmätta stigtider finns redovisade i referens 1 (Fahlén, 1991).

Den tid som krävs för att det relativa felet i mätningen av ett temperatursprång skall bli mindre än  $p$  % ges av

$$t_p = \tau \ln(100/p) \quad (\text{ekv. 3.23})$$

Detta innebär att om mätfelet skall bli mindre än 1% måste man vänta  $4,6 \cdot \tau$  sekunder (eller  $2,1 \cdot \tau_s$ ).

Om man antar att givarinstallationen har gjorts omsorgsfullt och förlusterna från givaren till omgivningen utanför vätskan därmed kan försummas, kan värmebalansen uttryckas som

$$\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT_G}{dt} = U \cdot A (T - T_G) \quad (\text{ekv. 3.24})$$

där  $\rho$  är dyrörrets densitet,  $c_p$  dess isobara specifika värmekapacitet,  $V$  dess volym,  $U$  den totala värmegenomgångskoefficienten för givaren,  $T_G$  givarens temperatur,  $A$  givarens area i kontakt med vätskan och  $T$  vätskans ostörda temperatur. Därmed blir tidskonstanten

$$\tau = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{U \cdot A} \quad (\text{ekv. 3.25})$$

Av detta följer att dynamiska mätfel, vilka i första hand orsakas av en stor tidskonstant, ökar med

- stor termisk massa ( $\rho \cdot V \cdot c_p$ )
- låg värmegenomgångskoefficient
- liten värmeöverförande yta

Förluster till omgivningen kan öka tidskonstanten vid uppvärmning genom att ytterligare termisk massa tillförs mätsystemet (t.ex. om en rörvägg måste värmas). Värmeövergångskoefficienten kan efter en rökrök växa till dubbla värdet jämfört med värdet före kröken. Denna förbättring (genom ökad turbulens) medför att tidskonstanten i vissa fall kan vara mindre vid medströmsmontering än vid motströmsmontering.

En vanligt förekommande situation, där flöde och temperatur mäts samtidigt, är olika typer av värmemätning. Ofta är ett värmesystems framledningstemperatur  $T_F$  och dess returtemperatur  $T_R$  kopplade till varandra enligt det övre diagrammet i figur 3.17. Om givarinstallationen för bestämning av  $T_F$  är identisk med den för  $T_R$  fås en utjämning av det dynamiska felet i bestämningen av temperaturdifferensen. I vissa applikationer av differensmätning varierar endast den ena temperaturen, t.ex.  $T_F$  enligt det undre diagrammet i figur 3.17. Detta motsvaras av felet i bestämningen av absolutnivån för temperaturen  $T_F$ . I en sådan mätsituation försvinner utjämningen av det dynamiska felet, vilket visas med följande exempel.

Antag att framledningstemperaturen höjs från  $T_{FO}$  till  $T_{F1}$  under tiden  $\Delta t_1$  och att den svalnar till grundnivån  $T_{FO}$  under tiden  $\Delta t_2$ . Normalt är  $\Delta t_1$  och  $\Delta t_2$  olika eftersom man ofta har större tillgänglig värmeeffekt än det aktuella effektbehovet för systemet. Det är ju denna skillnad som gör att värmaren går till och från och därmed åstadkommer svängningar i systemet. Systemet karaktäriseras därför av två tidskonstanter,  $\tau_1$  för uppvärmningsfasen och  $\tau_2$  för avsvältningsfasen, varvid

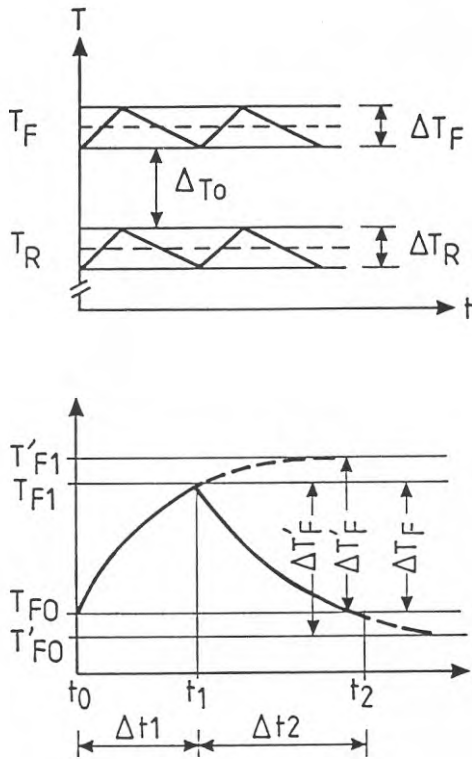
$$\frac{\Delta t_1}{\tau_1} = \frac{\Delta t_2}{\tau_2}$$

Det momentana mätfelet vid uppvärmning ges av

$$T_G - T = \Delta T_F \left[ \frac{\tau_G}{\tau_1 - \tau_G} \right] \cdot [e^{-t/\tau_G} - e^{-t/\tau_1}] \quad (\text{ekv. 3.26})$$

och mätfelet vid avsvälning genom

$$T_G - T = \Delta T_F \left[ \frac{\tau_G}{\tau_1 - \tau_G} \right] \cdot [e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_G}] \quad (\text{ekv. 3.27})$$

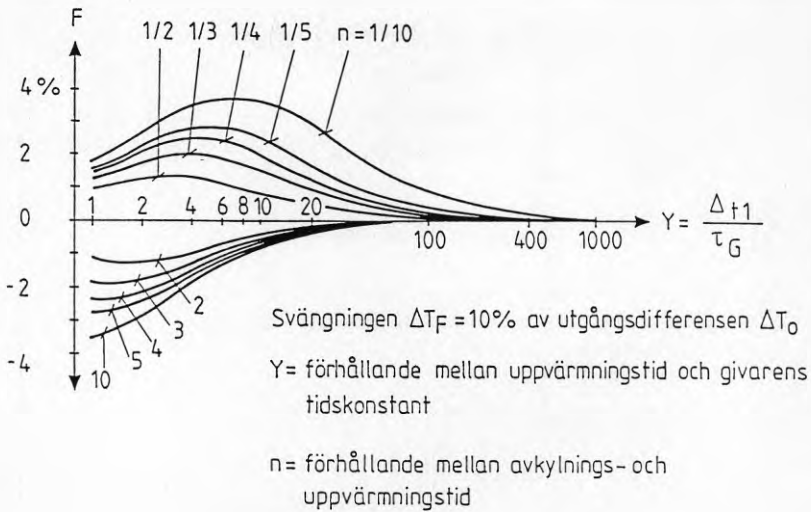


Figur 3.17. Exempel på ett dynamiskt temperaturmättningsproblem.

Oftast är medelvärdet av felet över ett antal cykler av större intresse än det momentana felet. Om följande parametrar introduceras kan medelfelet uppskattas med hjälp av figur 3.18.

$$Y_1 = \frac{\Delta t_1}{\tau_G}, \quad Y_2 = \frac{\Delta t_2}{\tau_G}, \quad n = \frac{Y_2}{Y_1} \quad \text{och} \quad X = \frac{\Delta T_0}{\Delta T_F}$$

$Y_1$  och  $Y_2$  uttrycker förhållandet mellan respektive uppvärmnings- och avsvältningsfas och givarens tidskonstant,  $n$  ger förhållandet mellan avsvältningsfasens och uppvärmningsfasens längd och  $X$  är förhållandet mellan grunddifferensen och svängningsamplituden för temperaturdifferensen. I figur 3.18 redovisas mätfelet för ett fall där svängningen utgör 10% av grunddifferensen ( $X = 10$ ).



Figur 3.18. Dynamiskt mätfel ( $F = 100 \cdot (T_G - T) / \Delta T'_F$ ) som funktion av processens relativa uppvärmningstid ( $Y = \Delta t_1 / \tau_G$ ) och förhållandet mellan avkylningstid och uppvärmningstid ( $n = \Delta t_2 / \Delta t_1$ ). (Adunka, 1984).

Av figuren framgår att när svängningsperioden är lång i förhållande till givarens tidskonstant blir det dynamiska felet litet, vilket var att vänta. Beroende på om uppvärmningsfasen är längre eller kortare ( $n$  mindre eller större än 1) blir felet positivt eller negativt. Vid en helt symmetrisk svängning ( $n=1$ ) går mätfelet mot noll. Ju större svängningsamplituden är i förhållande till grunddifferensen desto större blir det dynamiska felet. Detta exempel kan t.ex. appliceras på värmemätning i tappvarmvattensystem, där den inkommande kallvattentemperaturen varierar med olika tappningar. Tappvarmvattensystemets tidskonstant är kort vid uppvärmning (tappning) och mycket lång vid avsvälning.

Enligt ovanstående resonemang gäller därför, för att få så små dynamiska mätfel som möjligt, att

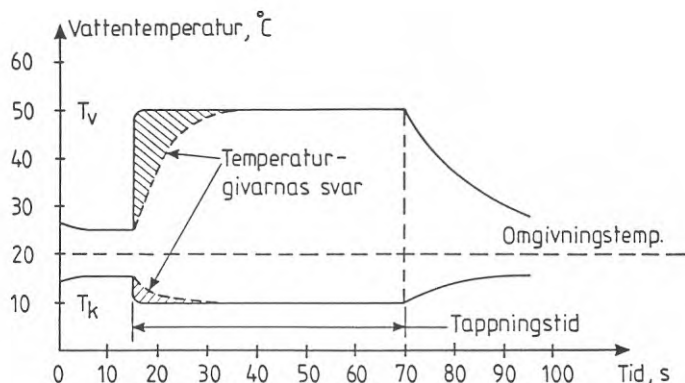
- isolera givare och rör
- använda långa smala givare, helst utan dyrkrör
- om dyrkrör används skall detta vara så klen som möjligt (liten termisk massa)
- mätstället skall väljas där röret är smalt, hastigheten hög och turbulensen stor (här kan medströmsinstallation i vissa fall ge kortare tidskonstant än motströmsinstallation).

Två huvudfall kan särskiljas vid bedömningen av dynamiska mätfel,

- enstaka små värmeleveranser med långa mellanrum ( $\Delta t_2 \gg \Delta t_1$ ), t.ex. vid tappvarmvattenvärmning
- regelbundet återkommande värmeleveranser med ungefär samma intervall ( $\Delta t_2 \approx \Delta t_1$ ), t.ex. vid lokaluppvärmning under höst- och vårperiod.

### 3.2.4.1 Mätning på tappvarmvattensystem

Eftersom varmvattentappningar ofta sker med långa tidsmellanrum hinner vattnet i rörledningarna och därmed även temperaturgivarna, anta temperaturer ganska nära omgivningstemperaturen (se figur 3.19).



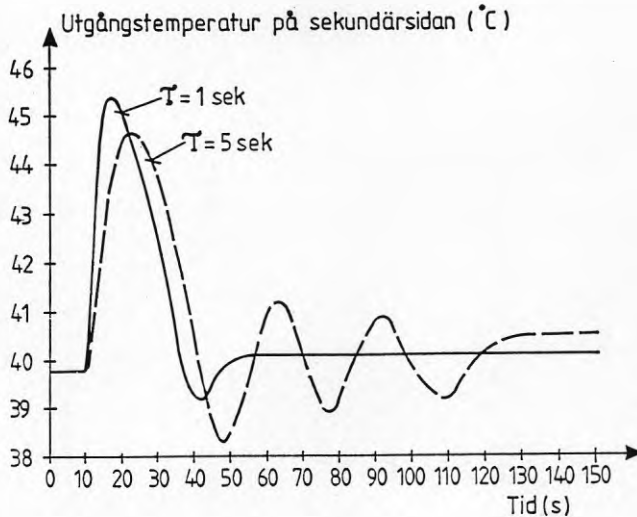
Figur 3.19. Temperaturgivarnas svar vid en plötslig varmvattentappning. Det streckade området anger mätfelet.

Om man antar att det tappas 15 l varmvatten med flödet 0,25 l/s kommer den totala tappningstiden att bli 60 sekunder. Vi antar att systemets tidskonstant vid uppvärmning är  $\tau_v = \tau_k = 1$  s, där index v och k betecknar varma respektive kalla sidan. Vidare antar vi att givarnas tidskonstanter  $\tau_{GV} = \tau_{GK} = 20$  s samt att varmvattengivaren startar från +25°C och kallvattengivaren från +15°C. Genom att använda ekvation 3.26 och integrera den över tappningsperioden erhålls mätfelet i uppvärmningsfasen. Med  $\Delta T'_v = 50 - 25 = 25$  K och  $\Delta T'_k = 10 - 15 = -5$  K erhålles medelfelet för hela mätperioden till  $F = -24\%$ .

Avsvlningsperiodens tidskonstant för systemet är oftast så stor att felet under denna period kan försummas (annars kan det beräknas på samma sätt som ovan enligt ekv. 3.27). Felet vid denna typ av mätsituation blir alltid negativt och minskar snabbt med minskande tidskonstant för givaren och ökande längd för mätperioden.

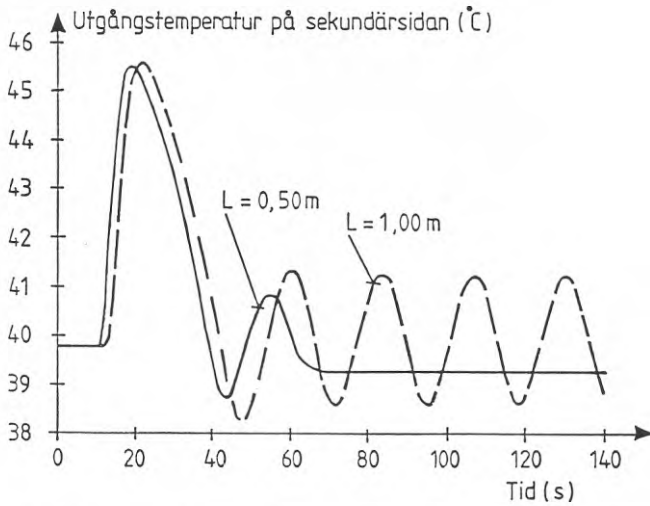
Ett beräkningsexempel, som både illustrerar problematiken med dynamisk temperaturmätning och problematiken att placera givaren på rätt ställe, redovisas av Poulsen, 1991. Exemplet avser temperaturreglering i en fjärrvärmväxlare för tappvattenvärmning. Beräkning har utförts för givare med två olika tidskonstanter, 1 s respektive 5 s, placerade direkt i värmväxlarens utloppsrör för tappvarmvatten. Värmväxlaren är en plattvärmväxlare vars tidskonstant rör sig om några sekunder.

Av figur 3.20 framgår att regleringen blir stabil med den snabba givaren. Det bör samtidigt påpekas att temperaturgivare, som används i fjärrvärmeapplikationer, oftast har betydligt större tidskonstanter än 5 s (se t.ex. Fahlén, 1987)



Figur 3.20. Simuleringsresultat för sekundärsidans utloppstemperatur vid en stegändring av primärtemperaturen från 50 till 60°C. Två givare med olika tidskonstant (1 s respektive 5 s) placerade direkt i växlarens utlopp.

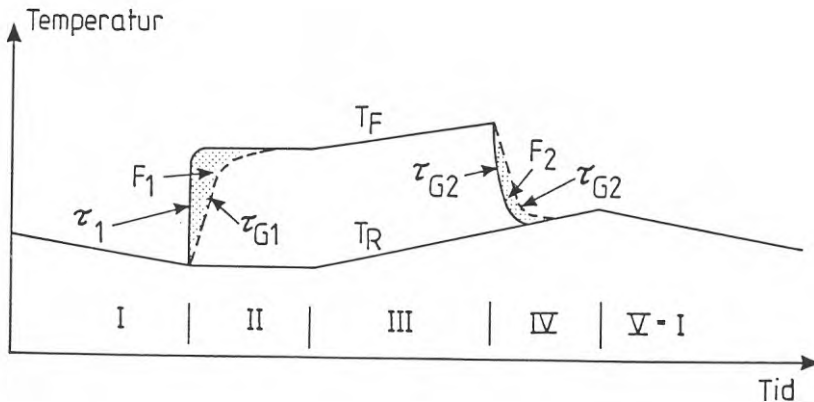
Ytterligare en beräkning har utförts för givaren med tidskonstanten 1 s men med placering på olika avstånd från växlarens utlopp. I detta fall blir den dödtid, som orsakas av vattnets transporttid mellan växlare och mätställe, ett större problem än givarens tidskonstant. Av figur 3.21 framgår att regleringen blir någorlunda stabil när givaren monteras 0,5 m från växlaren men att regleringen blir tydligt instabil om mätstället flyttas ytterligare 0,5 m bort.



Figur 3.21. Simuleringsresultat för sekundärsidans utloppstemperatur vid en stegändring av primärtemperaturen från 50 till 60°C. En givare med tidskonstanten 1 s har monterats dels 0,5 m efter växlaren, dels 1,0 m efter växlaren.

#### 3.2.4.2 Mätning på värmepumpsystem (radiatorkrets)

Vid mätning i värmesystem, där värmepumpen går till och från, kan man urskilja ett antal olika faser under uppvärmnings- och avsvältningscykeln (se figur 3.22).



Figur 3.22. Temperaturförlopp i radiatorkrets vid uppvärmning och avsvälning



Om man gör det förenklade antagandet att cirkulationspumpen hela tiden arbetar och stilleståndsperioden är så lång att framledningstemperaturen hinner sjunka till returtemperaturen  $T_F=T_R$ , erhålls följande stadier:

- I) Värmeanläggningen är ur drift,  $T_F=T_R$  och båda temperaturerna sjunker
- II) Värmeanläggningen startar och  $T_F$  stiger snabbt. Normalt är anläggningens tidskonstant vid uppvärmning,  $\tau_1$ , mycket mindre än temperaturgivarens tidskonstant ( $\tau_1 \ll \tau_{G1}$ ) och i så fall kan det förenklade beräkningssättet enligt ekvation 3.39 användas, annars måste ekvation 3.37 användas. Under denna fas är returtemperaturen konstant.
- III) När vattnet i systemet cirkulerat ett varv genom värmesystemet börjar returtemperaturen öka och därmed ökar även framledningstemperaturen ytterligare. När den önskade temperaturnivån uppnåtts stannar värmeanläggningen. Systemets dödtid kan många gånger vara ganska stor. I t.ex. en villa med 20 m<sup>1</sup> rör och radiatorflödet 1 m<sup>3</sup>/h tar det 35 s innan vattnet gått runt 1 varv. Så stora dödtider kan ibland orsaka både mät- och reglertekniska problem.
- IV) Vid avsvälning är systemets tidskonstant  $\tau_2$  mycket längre än vid uppvärmning och kan rentav vara större än givarens tidskonstant. Felet  $F_2$  vid avsvälning är normalt mindre än felet  $F_1$  under uppvärmning och kan vara noll (om  $\tau_2 > \tau_{G2}$ ). Returtemperaturen fortsätter att stiga en viss tid motsvarande systemets dödtid.
- V) Under denna fas sjunker temperaturen i systemet och fas I upprepas.

Felet  $F_1$  (den vänstra streckade rutan) är normalt alltid större än felet  $F_2$  (den högra streckade rutan). Detta beror enligt den tidigare diskussionen till en viss del på att temperaturdifferensen är något större vid uppvärmningens början än vid dess slut, men framförallt på grund av att systemets tidskonstant normalt alltid är större vid avsvälning än vid uppvärmning. Genom att det negativa felet  $F_1$  normalt är större än det positiva felet  $F_2$  blir totalfelet oftast negativt.

### 3.4 Mätning med ytgivare

I många praktiska tillämpningar försöker man bestämma vätsketemperaturen vid rörströmning indirekt genom att mäta rörets ytemperatur. Ibland måste man göra tillfälliga mätningar i efterhand och det blir då många gånger praktiskt ohanterligt att stänga systemet för att montera dykrör med allt som detta för med sig (utebliven värmeleverans, avluftning av rörsystemet m.m.) Även säkerhetsmässiga aspekter vid höga tryck och temperaturer, farliga vätskor etc. kan vara avgörande. Det är naturligt att möjligheten att istället mäta ytemperatur i dessa sammanhang ger en attraktiv lösning. Vid noggrant utförande och god kännedom om metodens begränsningar kan man också få mycket bra resultat.

I detta kapitel kommer de två viktigaste problemen vid ytemperaturmätning och deras resulterande mätfel att behandlas. Det första felet orsakas av att rörets ytemperatur, genom värmeutbyte med omgivningen, blir lägre än vätskans temperatur (vi förutsätter övertemperatur gentemot omgivningen). Det andra felet beror på att givarens temperatur blir lägre än rörets ytemperatur genom värmeförluster från givaren till omgivningen. Dessa förluster orsakas av strålning, konvektion och ledning genom givarens tilledare.

För att minimera felet vid ytemperaturmätning bör följande punkter beaktas:

- Placera givaren på en rak och slät rörsträcka, helst långt ifrån ventiler, pumpar och andra komponenter med stor termisk massa eller som ger ifrån sig värme eller kyla.
- Skrapa rent röret från färg eller oxid.
- Se till att röret är välisolerat på båda sidor om mätstället.
- Använd en tunn givare med stor anliggningsyta (t.ex. foliegivare eller givare lödd till ett tunnt bleck).
- Spänn fast givaren ordentligt mot röret (slangklämma, metalliserad tejp eller dylikt). Eventuellt kan givaren skruvas fast i röret.
- Linda ledarna till givaren ett antal varv runt eller fram och tillbaka på röret (se figur 3.5).
- Isolera hela givarinstallationen noggrant över en sträcka av minst 200 mm.

Ett problem, som inte behandlas i dessa sammanhang men som kan uppträda vid bestämning av ytemperaturer på tjocka eller isolerande material, är att värmetransport från mätstället, via temperaturgivaren, påverkar den ytemperatur, som man vill mäta. Eftersom man i fallet med mätning av ytemperatur på rör har ett mycket mindre värmemotstånd mellan vätskan och rörytan än mellan rörytan och via givaren till omgivningen, kan denna aspekt försummas vid mätning på metallrör om ovanstående tumregler iakttas.

### 3.4.1 Felaktig yttemperatur

En förutsättning för att metoden med yttemperaturmätning skall fungera är att ytans temperatur verkligen avspeglar vätskans temperatur. Enligt SP-rapport 1991:13 kan yttemperaturen på ett oisolerat rör uppskattas med kännedom om rörets dimensioner och material samt temperatur och värmeövergångskoefficient i vätskan respektive den omgivande luften (ytter- och innerdiameter  $D_{ry}$  och  $D_{ri}$ , vägg tjockleken försummas, värmekonduktivitet  $\lambda_r$ , temperatur och värmeövergångskoefficient i vätskan  $T$  och  $\alpha_v$  samt i luften  $T_l$  och  $\alpha_l$ ). På luftsidan måste den totala värmeövergångskoefficienten användas, där hänsyn tas både till konvektion och strålning ( $\alpha_t = \alpha_{tk} + \alpha_{ts}$ ).

$$T_{ry} = \frac{\alpha_v \cdot T + \alpha_l \cdot T_l}{\alpha_v + \alpha_l} \quad \text{alt. } \theta_{ry} = \frac{\alpha_v \cdot \theta + \alpha_l \cdot \theta_l}{\alpha_v + \alpha_l} \quad (\text{ekv. 3.28})$$

Vid höga temperaturer och oisolerade rör kan skillnaden i temperatur mellan rör och vätska bli betydande. Med normalt utförd isolering blir emellertid skillnaden inte så stor och framförallt blir felet någorlunda lika om man mäter en temperaturdifferens mellan fram- och returledning (absolutnivåerna på temperaturerna är ungefär lika om differensen är liten). Om man däremot försöker mäta stora temperaturdifferenser måste skillnaden mellan rör- och vätsketemperatur beaktas eller elimineras genom mycket bra isolering. Vid t.ex. mätning av tappvarmvattenenergi kommer varmvattenröret att ha för låg temperatur (kyls av omgivningen) medan röret på kallvattensidan får för hög temperatur (värms av omgivningen). Felet adderar sig därvid. Dessutom uppträder problem genom trögheter i systemet vid dynamiska förlopp, se kapitel 3.4.3.

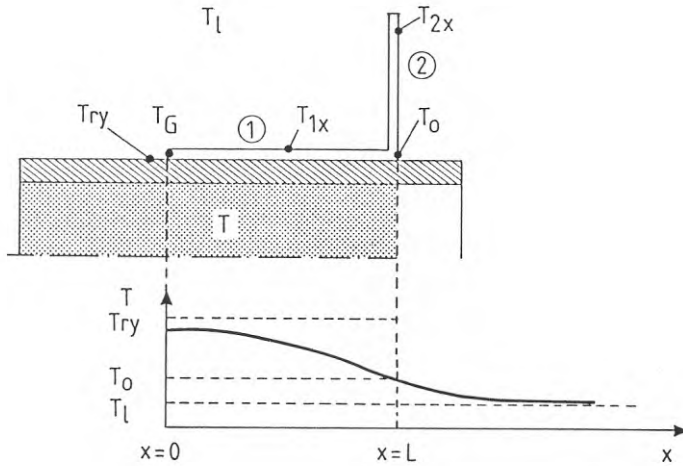
I de flesta tillämpningar av yttemperaturmätning, i de sammanhang som diskuteras i denna rapport, kommer det dominerande felet inte att orsakas av att rörets yttemperatur avviker från vätskans temperatur. Om röret för övrigt är välisolerat kommer temperaturmätfelet i första hand att orsakas av att givaren får en temperatur som avviker från rörets yttemperatur. Detta diskuteras i nästa avsnitt.

### 3.4.2 Felaktig givartemperatur

På samma sätt som diskuterades i kapitel 3.2, beträffande mätning med givare i dyrkrör, kommer värmeförluster genom ledning, konvektion och strålning att påverka en yttemperaturmätning. Om vi förutsätter att monteringen av temperaturgivaren gjorts på rekommenderat sätt, med god isolering över mätstället, kommer mätfelet att domineras av förlusterna genom värmetransport i ledarna till givaren.

För bestämning av förlusterna genom ledning från mätstället via givare och tilldelningar görs samma resonemang som i kapitel 3.2.1 för dyrkröret. Antag att givaren med tilldelningar har en anliggningslängd,  $L_1$ , med ett värmemotstånd,  $R_1$ , mot röret enligt figur 3.23.

Det räcker inte med att rörtans temperatur avspeglar vätskans temperatur korrekt. Nästa steg måste vara att också temperaturgivaren återger rörtans temperatur på ett riktigt sätt.



Figur 3.23. Temperaturfördelning längs en ytgivare.

Värmemotståndet ges av den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten  $U_1$ , och anliggningsytan  $A_{1L}$  för anliggningslängden  $L$  enligt:

$$R_1 = \frac{1}{U_1 \cdot A_{1L}} \quad (\text{ekv. 3.29})$$

Enligt ekv. 3.7 i kapitel 3.2.1 ges temperaturfelet av

$$\Delta T = T_G - T_{ry} = \frac{T_0 - T_{ry}}{\cosh(K \cdot L)} \quad (\text{ekv. 3.30})$$

$$\text{med } K = \left( \frac{L_1}{\lambda_1 \cdot A_1 \cdot R_1} \right)^{1/2}$$

Här har värmeöverföringen per m ( $\alpha \cdot \pi \cdot d$  i ekv. 3.7) ersatts med inverterade värmemotståndet per m ( $L_1/R_1$ ).  $\lambda_1$  är givarmaterialets värmekonduktivitet och  $A_1$  är givarens tvärsnittsarea.

Resultatet enligt ekv. 3.30 förutsätter att temperaturen  $T_0$  är bestämd (temperaturen vid dykrörets infästning i kapitel 3.2.1) Om man istället tillämpar samma resonemang kring temperaturfallet längs de elektriska tilledarna som för temperaturgivaren erhålls följande uttryck för mätfelet:

$$\Delta T = T_G - T_{ry} = \frac{(T_1 - T_{ry})}{[(R_2/R_1)^{1/2} \cdot \sinh(K_1 \cdot L) + \cosh(K_1 \cdot L)]} \quad (\text{ekv. 3.31})$$

Som exempel har termoelement typ T (kopparkonstantan) med en tråddiameter av 0,81 mm använts. Trådarnas tvärsnittsarea blir för varje tråd 0,52 mm<sup>2</sup>.  $\lambda_1 = \lambda_2 = 380 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  för koppar och  $21 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  för konstantan,  $L_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 10 \text{ m}$ . Antag att  $R_1 = 3,5 \text{ K/W}$  (ledningspasta saknas) och  $R_2 = 2 \text{ K/W}$  och försumma värmeledningen i konstantantråden. Med dessa värden insatta i ekv. 3.31 blir

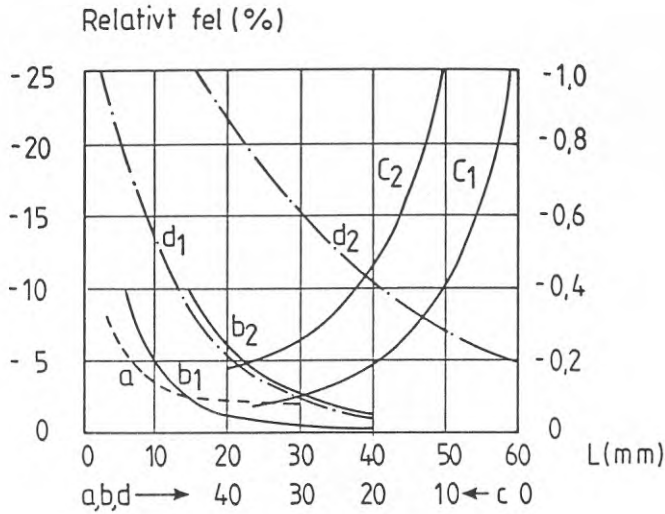
$$\Delta \theta = \Delta T = T - T_{ry} = \frac{(T_1 - T_{ry})}{[(1/3,5)^{1/2} \cdot \sinh(12,02 \cdot 0,1) + \cosh(12,02 \cdot 0,1)]} = \frac{(T_1 - T_{ry})}{2,62} = \frac{(\theta_1 - \theta_{ry})}{2,62}$$

Om rörets yttemperatur är 50°C och omgivningens lufttemperatur är 20°C skulle felet med ovanstående antaganden bli  $\Delta T = -11 \text{ K}$ .

Av ekv. 3.31 framgår att resultatet är oerhört känsligt för värdet på  $K_1$  och  $L$  (sinh och cosh innehåller exponentialfunktioner) och direkt beroende av  $R_2/R_1$ . Därav följer också att termisk ledningspasta, vilket ökar  $R_2/R_1$ , alltid skall användas.

I figur 3.24 visas mätfelen för några exempel på yttemperaturmätningar (Lieneweg, 1976). Relativa mätfelen anges som funktion av anliggningslängden.

Resultat från andra undersökningar (Fahlén, 1987) visar att monterings utförande har stor betydelse. Vid upprepad mätning av en yttemperatur av 50°C med termoelement på slätt kopparrör varierade mätosäkerheten mellan 0,6 K och 4,0 K beroende på om pasta och isolering användes eller inte. Mätosäkerheten uttrycks som standardavvikelsen för det enskilda mätvärdet. För en Pt-100 givare blev motsvarande resultat 1,7 respektive 3,5 K.



Figur 3.24. Relativa mätfelet  $(T_G - T_{ry}) / (T_{ry} - T_i)$  uttryckt i procent som funktion av anliggningslängden  $L$  mellan givaren och rörytan. Mätfelet är alltid negativt när rörytans temperatur är högre än omgivningens temperatur.

- a) Termoelement koppar-konstantan, ledarnas diameter  $\varnothing = 0,3$  mm, mätpunkt och ledare klistrade mot ytan (av koppar),  $\theta_{ry} = 90^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 25^\circ\text{C}$ .
- b) Termoelement koppar-konstantan, mätpunkten klistrad mot ytan (av koppar), ledarna infällda i ytan,  $\theta_{ry} = 70^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 25^\circ\text{C}$ .  
 $b_1$ : ledarnas diameter  $\varnothing = 0,3$  mm  
 $b_2$ : ledarnas diameter  $\varnothing = 1$  mm
- c) Mätpunkten pressad och ledarna klistrade mot ytan (av koppar),  $\theta_{ry} = 70^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 25^\circ\text{C}$ .  
 $c_1$ : Järn-konstantan, ledarnas diameter  $\varnothing = 0,2$  mm  
 $c_2$ : Koppar-konstantan, ledarnas diameter  $\varnothing = 0,3$  mm
- d) Termoelement koppar-konstantan, mätpunkten klistrad mot ytan (av hårdpapp) och ledarna infällda i ytan,  $\theta_{ry} = 70^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 25^\circ\text{C}$ .  
 $d_1$ : ledarnas diameter  $\varnothing = 0,3$  mm  
 $d_2$ : ledarnas diameter  $\varnothing = 1$  mm

### 3.4.3 Dynamiska fel vid ytemperaturmätning

Vid bestämning av ytemperatur är ofta tidskonstanten för själva givaren av underordnad betydelse. Hur väl givarens utsignal följer vätskans temperatur beror helt och hållet på hur installationen utförts. Enligt kapitel 3.2.4, ekvation 3.25, ges installationens tidskonstant av

$$\tau = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{U \cdot A}$$

Med dålig isolering kommer installationens totala förlustfaktor att öka. Därmed kan också snabbheten påverkas. Framförallt minskar emellertid den temperaturändring som givaren känner vid en viss temperaturändring på vätskan, d.v.s. det statiska mätfelet ökar.

Om man introducerar en förlustterm till omgivningen samt rörets termiska massa i värmebalans ekvationen 3.24 erhålles istället

$$\rho_r \cdot V_r \cdot c_{pr} \cdot \frac{dT_r}{dt} = U_r \cdot A_r (T - T_l) - U_1 \cdot A_1 (T_r - T_G) \quad (\text{ekv. 3.32}) \quad \text{och}$$

$$\rho_G \cdot V_G \cdot c_{pG} \cdot \frac{dT_G}{dt} = U_1 \cdot A_1 (T_r - T_G) - U_2 \cdot A_2 (T_G - T_l) \quad (\text{ekv. 3.33})$$

där index 1 avser givare-rör och index 2 givare-luft.

Givartemperaturens tidsberoende bestäms nu av två kopplade differentialekvationer och därmed av flera tidskonstanter. Tidskonstanterna för rör och givare består vardera av två delar och beroende på vilka delar som dominerar kan tidskonstanten för givaren till och med minska vid sämre isolering. en eventuell minskning av tidskonstanten på grund av dålig isolering sker på bekostnad av ett ökat statiskt fel. Vilket slutresultat man får beror i praktiken på relationen mellan rörets tidskonstant och givarens tidskonstant.

Ovanstående resonemang visar att begreppet tidskonstant för ytemperaturgivare inte är särskilt entydigt. Det är ofta ointressant om man kan få ett svar snabbt eller långsamt om det likafullt är felaktigt. Därför måste installationen i första hand göras på bästa sätt för att minimera de statiska felen.

Eftersom det är vätskans temperatur man vill bestämma och det normalt är rörets tidskonstant som dominerar, bör man koncentrera sig på att hitta ställen där röret är tunnt och smalt samt inga tunga komponenter (t.ex. ventiler och pumpar) förekommer. Dessutom bör man se till att installationsplatsen inte ligger nära komponenter med temperaturer som kraftigt avviker från vätskans temperatur (t.ex. värmare eller kylare).

### 3.5 Vanliga typer av givare

I de flesta moderna tillämpningar av temperaturmätning kräver man någon form av standardiserad elektrisk utsignal från sin temperaturgivare. Olika tillämpningar ställer olika krav på valet av givare. Detta kan avse den elektriska utsignalens typ (spänning, ström) och storlek, linjäritet och stabilitet, krav på extern signalbehandling, snabbhet m.m.

Olinjära givare orsakar numera sällan några problem under förutsättning att reproducerbarheten är god. Modern signalbehandlingsutrustning har inga svårigheter att via olika algoritmer beräkna temperaturer från olinjära samband. Krav på extern matning och förstärkning samt eventuella krav på stabila temperaturreferenser bör emellertid beaktas eftersom det kan påverka kostnaden för ett mätsystem kraftigt.

I SP-rapport 1991:13 finns de tre vanligaste givartyperna med elektrisk utsignal beskrivna. Dessa är termoelement, resistiva temperaturgivare av platina och termistorer. Givartyperna kan klassas i två huvudkategorier,

- Självgenererande, vilka tar sin matningseffekt från mätobjektet. Till dessa hör termoelement.
- Externt matade, vilka kräver en matningsström. Till dessa hör resistiva temperaturgivare (av rena metaller), termistorer (av dopade halvledarmaterial), aktiva halvledargivare m.fl.


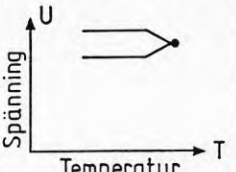
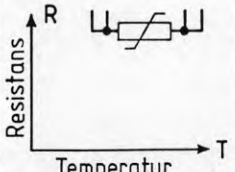
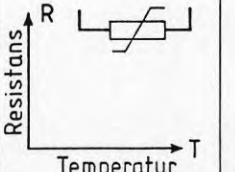


I praktiken kräver alla givare matning till någon yttre förstärkarutrustning för att ge acceptabla ut signaler (om man inte använder gamla tiders spegelgalvanometrar). Huvudskillnaden ligger i att den första kategorin kan ge ett visst mätfel genom att man tar effekt från mätobjektet (kyler det) medan den andra kategorin kan ge ett visst mätfel genom att man tillför extra effekt (värmer mätobjektet).

I tabell 3.1 finns de huvudsakliga för- och nackdelarna redovisade för termoelement, resistiva temperaturgivare och termistorer. Sammanfattningsvis kan följande rekommendation göras beträffande insatsområden för de olika givartyperna.

- Termoelement används vid kortare mätningar, yttemperaturmätningar, då man har många mätställen, besvärlig miljö (vibrationer etc.) och måttliga krav på noggrannhet.
- Resistiva temperaturgivare (platina) används vid noggranna mätningar och vid långa mätperioder utan återkommande kalibrering. Denna givartyp rekommenderas i första hand.
- Termistorer används när begränsade möjligheter till förstärkning av signalerna föreligger (batterimatning av instrument etc.) och vid mätning av små temperaturändringar.



Tabell 3.1. Sammanfattning av de viktigaste för- och nackdelarna för termoelement, resistiva temperaturgivare och termistorer.

			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Självgenererande</li> <li>• Enkel</li> <li>• Robust</li> <li>• Billig</li> <li>• Givare som meter-vara</li> <li>• Stort utbud av kapslingar</li> <li>• Stort temperatur-område</li> <li>• Låg belastning av mätobjekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mycket stabil</li> <li>• Mycket noggrann</li> <li>• Mindre olinjär än övriga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hög utsignal (3-6% K)</li> <li>• Snabb</li> <li>• 2 - tråds mätning</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olinjär</li> <li>• Låg utsignal (typiskt 40 <math>\mu</math>V/K)</li> <li>• Nollpunktsreferens krävs</li> <li>• Minst stabil</li> <li>• Känslig för "strö-temospanningar"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativt dyr</li> <li>• Kan vara långsam</li> <li>• Stabil matning krävs</li> <li>• Liten resistans-ändring (0,38 <math>\Omega</math> /K)</li> <li>• Känslig för kontakt-resistans</li> <li>• Egen uppvärmning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olinjär</li> <li>• Obegränsat temperaturområde</li> <li>• Ömtålig</li> <li>• Matning krävs</li> <li>• Egen uppvärmning</li> </ul>

En mer ingående diskussion om specifika för- och nackdelar för dessa tre typer av temperaturgivare ges t.ex. av Fahlén, 1991.

### 3.6 Kalibrering

Kalibrering av temperaturgivare innebär att man på något sätt relaterar sin givare till definitionen av temperaturskalan ITS -90 (se definition av kalibrering). Temperaturskalan definieras med hjälp av de primära fixpunkterna (Preston-Thomas, 1990) enligt tabell 3.2.

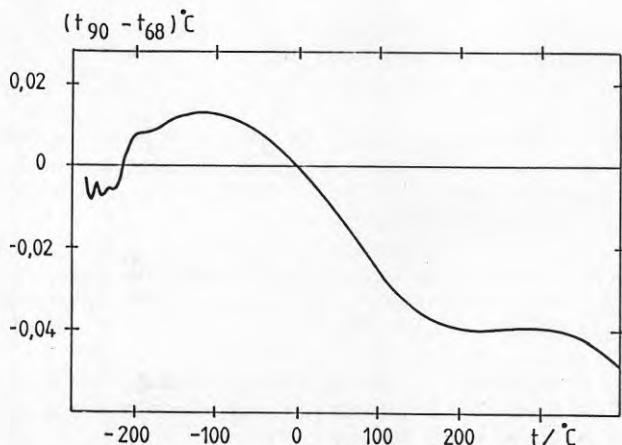
Tabell 3.2. Fixpunkter enligt ITS-90. kolumnen längst till höger ger kvoten mellan en temperaturgivares (platina) resistans vid aktuell temperatur och dess resistans vid vattnets trippelpunkt.

Definitions punkt	$\theta_{90}/^{\circ}\text{C}$	$T_{90}/\text{K}$	$W(T_{90})$
Ångtryck, He	-270,15 till -268,15	3 till 5	
Vätets trippelpunkt	-259,3467	13,8033	0,00119007
Ångtryck, H <sub>2</sub> (eller He)	-256,15	17	
Ångtryck, H <sub>2</sub> (eller He)	-252,85	20,3	
Neons trippelpunkt	-248,5939	24,5561	0,00844974
Syres trippelpunkt	-218,7916	54,3584	0,09171804
Argons trippelpunkt	-189,3442	83,8058	0,21585975
Kvicksilvers trippelpunkt	-38,8344	234,3156	0,84414211
Vattens trippelpunkt	0,01	273,16	1
Galliums smältpunkt	29,7646	302,9146	1,11813889
Indiums fryspunkt	156,5985	429,7485	1,60980185
Tenns fryspunkt	231,928	505,078	1,89279768
Zinks fryspunkt	419,527	692,677	2,5689173
Aluminiums fryspunkt	660,323	933,473	3,3760086
Silvers fryspunkt	961,78	1234,93	4,28642053
Gulds fryspunkt	1064,18	1337,33	
Koppars fryspunkt	1084,62	1357,77	

Mellan dessa fixpunkter realiseras temperaturskalan med hjälp av resistiva temperaturgivare av platina med mycket höga krav på materialets renhet. Interpolationen mellan fixpunkterna sker i första hand genom att anpassa ett polynom till resistansvärdena vid de olika fixpunkterna inom området -259°C till +962°C. För intervallet under 0°C används ett bestämt tolftegrads polynom med korrektioner som bestäms vid fixpunkterna. På motsvarande sätt används ett fixerat niondegradspolynom över 0°C.

Dessutom finns ytterligare några sekundära fixpunkter, t.ex. koldioxids sublimeringspunkt (-78,465°C), kvicksilvers fryspunkt (-38,828°C), vattnets ispunkt (0,000°C), benzoesyra trippelpunkt (122,34°C) och bly fryspunkt (327,462°C).

Den nuvarande temperaturskalan ITS-90, ersatte den tidigare skalan, IPTS-68, under 1990. Förändringarna är normalt små i förhållande till osäkerheterna vid praktisk temperaturmätning (t.ex. blir vattnets kokpunkt 99,974°C istället för 100°C). I figur 3.25 visas avvikelserna mellan ITS-90 ( $t_{90}$ ) och IPTS-68 ( $t_{68}$ ) inom temperaturområdet -273°C till +400°C.



Figur 3.25. Avvikelsen mellan ITS-90 och IPTS-68.

Osäkerheten vid kalibrering av temperaturgivare bestäms av följande huvudmoment:

- Osäkerhet i realiseringen av fixpunkterna.
- Osäkerhet i interpolationen mellan fixpunkterna.
- Osäkerhet i realiseringen av en kalibreringstemperatur.
- Växelverkan mellan kalibreringsobjekt och kalibreringsutrustning.
- Kalibreringsobjektets reproducerbarhet.

De flesta användare av temperaturgivare behöver inte bekymra sig om de två första osäkerheterna. Dessa behandlas i Sverige av riksmätplatsen för temperatur (Statens provningsanstalt) och kopplingen till ITS-90 säkras genom olika former av internationella samarbetsprojekt, t.ex. i form av ringkalibreringar.

Kalibrering av temperaturgivare är en grundläggande förutsättning för att kunna utföra temperaturmätningar överhuvudtaget. Utan ett känt samband mellan ett visat temperaturvärde och grunddefinitionen av temperaturskalan saknar mätresultatet relevans oberoende av vilken noggrannhet man eftersträvar. Tillåts en stor mätosäkerhet kan man nöja sig med en enkel kalibrering i egen regi, som indirekt via olika sekundärnormaler är spårbar till ITS-90. Vid höga krav på noggrannhet måste man normalt anlita expert hjälp från riksmätplatsen (RMP) för temperatur eller någon av de många ackrediterade mätplatser (AMP) som finns (se t.ex. Svensk Mätplatskalender, 1991).

### 3.6.1 Extern kalibrering

Såväl vid anlitanade av externa resurser som vid kalibrering i egen regi måste den presumtive användaren av kalibreringsresultaten först tänka igenom hur resultaten kommer att användas. Framför allt gäller detta med avseende på

- hur givaren skall installeras i kalibreringsutrustningen (se 3.6.2).
- hur man väljer kalibreringspunkter (se 3.6.3).
- hur man väljer kalibreringsintervall (se 3.6.4).

Vid alla former av kalibrering är det viktigt att kalibreringen omfattar hela mätkedjan. Detta skall inkludera givare, signalomvandling, eventuella beräkningsalgoritmer samt visningsenheter eller registreringsanordningar. I samband med externa kalibreringar skickas ofta endast själva givaren till kalibreringslaboratoriet. När så är fallet måste den övriga mätkedjan verifieras på annat sätt. Signalomvandlare kan t.ex. kalibreras vid kalibreringslaboratorier för elektriska storheter, beräkningsalgoritmer kan utvärderas genom olika beräkningstester etc. Vanligtvis ökar den totala mätosäkerheten när kalibreringen utförs i flera steg enligt ovan.

Inom Sverige sker de noggrannaste temperaturbestämningarna vid Statens provningsanstalt i Borås. Fixpunkterna, som är relevanta för det aktuella temperaturområdet, bestäms med en total osäkerhet som är mindre än värden enligt tabell 3.3.

Tabell 3.3. Osäkerhet vid realiseringen av fixpunkter vid RMP (Svensk Mätplatskalender, 1987).

Fixpunkt	Temperatur, °C	Osäkerhet, K ( $\pm$ )
Trippelpunkt, kvicksilver	-38,8344	0,002
Trippelpunkt, vatten	0,01	0,0005
Fryspunkt, tenn	231,928	0,002
Fryspunkt, zink	419,527	0,002

Vid kalibrering över 0°C anger man normalt en total osäkerhet av  $\pm 0,005$  K för själva kalibreringsförfarandet. Inom ett snävt intervall kan man komma under  $\pm 0,002$  K och vid de allra bästa laboratorerna i världen når man ca  $\pm 0,001$  K. Noggrannare än så kan man således aldrig ange en temperatur. Inte heller temperaturdifferenser kan normalt anges med högre noggrannhet. Problemet vid t.ex. parvis matchning är det samma som vid jämförelsekalibrering, nämligen att verkligen veta att givarna har samma temperatur.

Kalibrering inom temperaturintervallet -80 till +15°C utförs vid riksmätplatsen genom jämförelse mellan en resistiv temperaturnormal av platina (Pt-25) och kalibreringsobjektet i ett alkohol-vattenbad. Mellan +15 och +90°C görs motsvarande jämförelse i vattenbad och mellan +90 och +200°C i silikonoljebad.

### 3.6.2 Egenkalibrering

Egenkalibrering kan ske i många olika former och med mycket olika ambitionsnivå. I det enklaste fallet sätter man en kalibrerad referensgivare på samma ställe som kalibreringsobjektet och jämför visningen. Referensgivaren kan vara t.ex. en kvicksilvertermometer, men bör helst vara av samma typ som kalibreringsobjektet (jämför den tidigare diskussionen om statiska- och dynamiska fel). Visserligen får man ofta en förhållandevis stor osäkerhet vid en sådan kontroll beroende på temperaturvariationer både i tid och rum. Inverkan av tidsmässiga variationer kan minskas genom att välja referensgivare av samma typ som kalibreringsobjektet och sätta båda i samma dykrör. Detta minskar även osäkerheten beroende på gradienter i rummet. I de fall givarna inte sitter i dykrör kan det finnas möjligheter att på annat sätt montera givarna bredvid varandra. Den osäkerhet man får vid kalibreringen på grund av temperaturvariationer i rummet motsvaras även av den osäkerhet man har i att finna en representativ temperatur för sin mätning. Därmed försämras inte den totala mätnoggrannheten i någon stor omfattning.

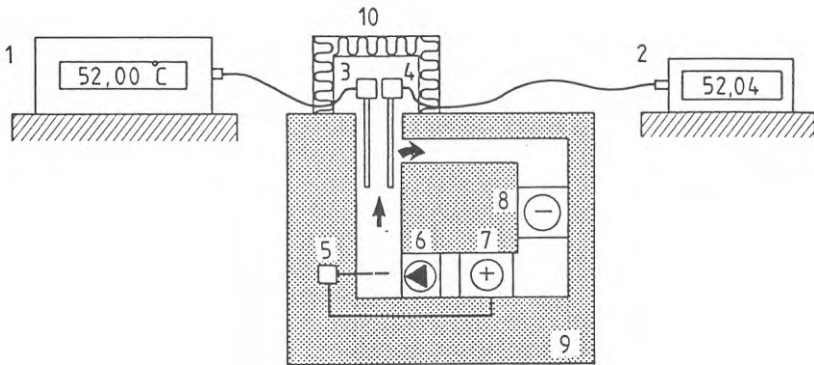
Isbad av samma typ, som används till nollpunkt för termoelement, ger en förhållandevis billig fixpunkt. Dess osäkerhet kan göras mindre än  $\pm 0,1$  K utan några stora insatser. En förutsättning är enligt ASTM STP 470 B att destillerat vatten används och att isen "hyvlas" av. Med den kvalitet svenskt tappvatten vanligtvis har räcker det oftast med avjoniserat vatten finkrossad is.

På samma sätt som isbadet ger en låg referenstemperatur ger kokande vatten möjlighet till en enkel kontroll vid en högre temperatur. I detta sammanhang bör man tänka på att vattnets kokpunkt är starkt beroende av det rådande atmosfärstrycket (en kokpunktsändring av 1 K orsakas av en tryckändring av 30-40 mbar).

För användare med högre krav finns ett stort utbud av termostatbad. Stabiliteten för bra bad ligger i området  $\pm 0,005$  till  $\pm 0,05$  K både beträffande gradienter i tiden och i rummet. Termostatbad bör pumpa kalibreringsvätskan med hög hastighet för att få en god omblandning och en bra värmeöverföring mellan vätskan och givaren. Precis samma principiella problem beträffande statiska och dynamiska mätfel gäller i kalibreringssituationen som tidigare beskrivits för mätsituationen (kapitel 3.2). Därför bör också vätskan pumpas underifrån och upp mot givaren ("motströmskoppling"), se även figur 3.26.

Kalibreringsobjektet och referensgivaren bör monteras med sina mätspetsar på ungefär samma ställe i badet och med tillräckligt insticksdjup (helst över 100 mm). Enligt IEC-751 bör insticksdjupet vara minst 15 gånger givarens diameter. Vid kalibrering av korta givare kan dessa föras tillräckligt djupt ner i vätskan genom att monteras tillsammans med normalgivaren i ett dykrör av glas eller rostfritt stål eller helt enkelt i en tät plastpåse.

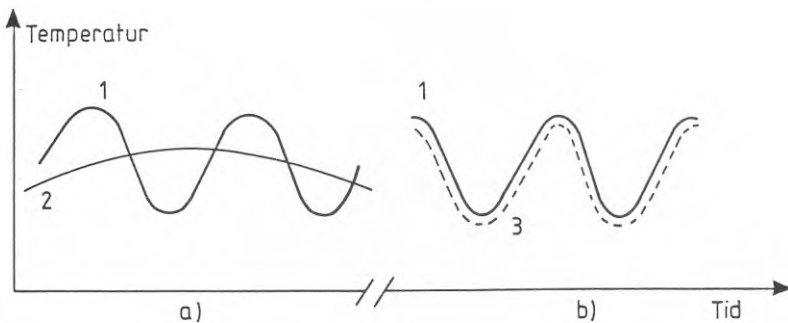
Om särskilda dykrör används gäller samma krav beträffande materialval, längd, användning av termiskt ledande pasta, tätning av överdel m.m., som beskrevs i kapitel 3.2. Dessutom bör man täcka överdelen av badet med en isolerande låda enligt figur 3.26. Speciellt gäller detta när givarna sticker ut olika mycket eller om man befärrar värmeförluster från stora kopplingshuvuden.



Figur 3.26. Kalibrering av temperaturgivare i termostatbad.

- |                             |                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 Normalinstrument          | 6 Cirkulationspump                    |
| 2 Instrument som kalibreras | 7 Värmare                             |
| 3 Normalgivare              | 8 Kylare                              |
| 4 Givare som kalibreras     | 9 Isolering av kalibreringskretsen    |
| 5 Givare för reglering      | 10 Isolering kring givarnas överdelar |

Som tidigare nämnts kan problem uppstå i samband med kalibrering av olika typer av temperaturgivare om kalibreringsbadets temperatur fluktuerar med tiden. I figur 3.27 illustreras inverkan av tidsmässiga svängningar vid kalibrering av en resistiv temperaturgivare, dels med en kvicksilvertermometer som normal och dels med en annan, med kalibreringsobjektet identisk resistiv temperaturgivare, som normal.



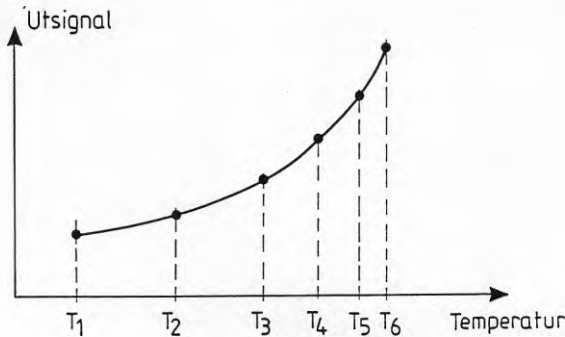
Figur 3.27. Inverkan av temperatursvängningar vid kalibrering av resistiva temperaturgivare (1) mot a) kvicksilvertermometer (2) och b) identisk resistiv temperaturgivare (3).

Kalibrering bör om möjligt utföras genom upprepning vid både ökande och minskande temperaturer. På detta sätt kan man få en uppfattning om kalibreringsprocedurens reproducerbarhet samt eventuell hysteres i mätobjektet.

### 3.6.3 Val av kalibreringspunkter

För att optimalt utnyttja det antal kalibreringspunkter man kan kosta på sig är det väsentligt att dessa punkter och deras antal väljs med omsorg. Enligt diskussionen i kapitel 3.5 kan både termoelementens och resistanstermometrarans karaktäristik beskrivas med andragradspolynom medan termistorerna, genom sitt exponentiella beroende, kräver ett högre grads polynom. Det minsta antal punkter, som entydigt bestämmer en andragradskurva, är tre. Slutsatser från den numeriska analysen (ASTM, 1981) gör att man rekommenderar en ökning av antalet kalibreringspunkter till  $2 \cdot (n+1)$  där  $n$  är polynomets gradtal. Detta medför att för termoelement och resistiva temperaturgivare, som används inom ett brett temperaturområde, bör antalet kalibreringspunkter vara minst sex. Med skilda kalibreringspunkter avses temperaturer som skiljer sig från varandra med minst 10 % av det aktuella kalibreringsintervallet (underförstått att man i praktiskt bruk sällan använder polynom av högre grad än fyra, vilket ger antalet kalibreringspunkter tio).

Kalibreringspunkterna bör av matematisk-statistiska skäl väljas så att de maximalt täcker användningsintervallet. Detta betyder att intervallets ändpunkter alltid ska ingå vid kalibreringen. Vet man på förhand ingenting om kalibreringskurvens utseende kan det vara lämpligt att låta resterande antal punkter dela intervallet i lika delar. För en monotont växande andragradsfunktion (t.ex. för ett termoelement inom ett bestämt temperaturintervall) kan man låta kalibreringspunkternas täthet öka vid ökande temperatur, eftersom temperaturderivatan där blir allt brantare (se figur 3.28).

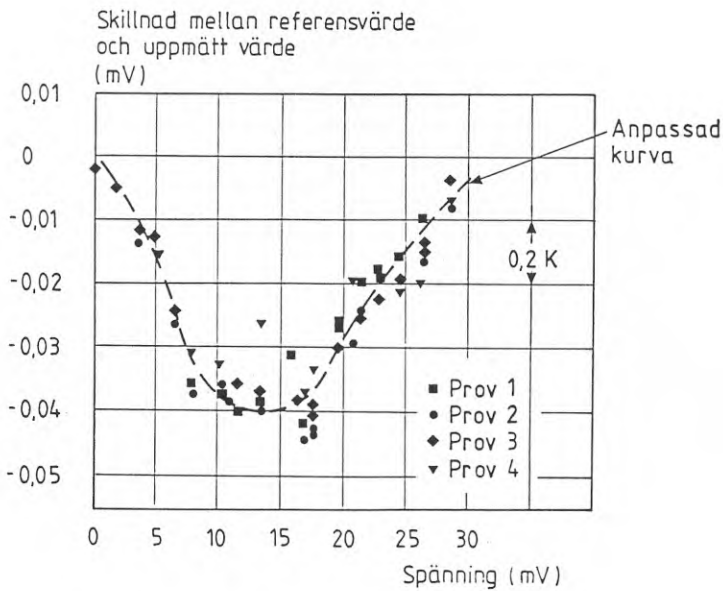


Figur 3.28. Exempel på val av kalibreringspunkter för temperaturgivare med olinjär karaktäristik.

I de fall man på förhand känner till att givarens karaktär ändras sig i vissa punkter bör man koncentrera några kalibreringspunkter kring dessa ställen. Samtidigt måste man ha kvar kalibreringspunkter inom de mera normala delarna av kalibreringskurvan för att olinjäriteterna inte ska få för stort inflytande (t.ex. vid polynom Anpassning).

En möjlighet att utnyttja kalibreringsdata är att t.ex. med minsta kvadratmetoden anpassa ett polynom till den uppmätta kalibreringskurvan. Av många skäl är det lämpligare att istället utgå från ett standard polynom (t.ex. enligt ASTM för termoelement eller DIN/IEC för Pt-100 givare) och istället bestämma avvikelserna från detta polynom i kalibreringspunkterna.

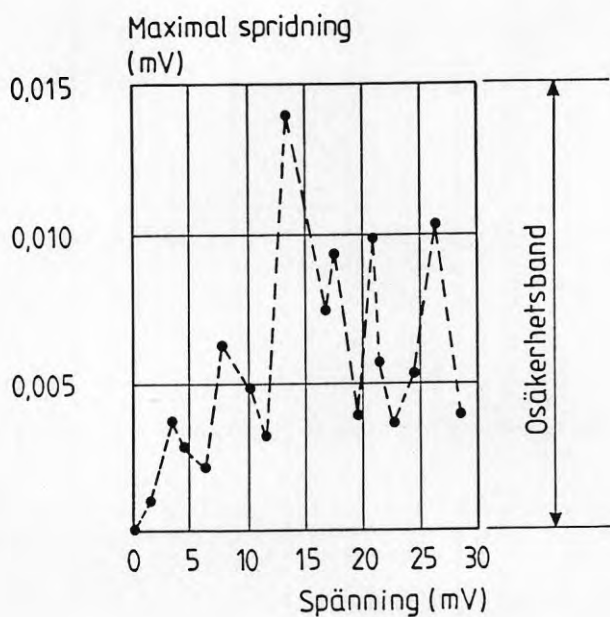
Avvikelsema ritas in i ett diagram enligt t.ex. figur 3.43.



Figur 3.29. Exempel på skillnaden mellan uppmätt spänning och spänningen enligt ett referenspolynom (ASTM, 1981) för termoelement av typ järn-konstantan.

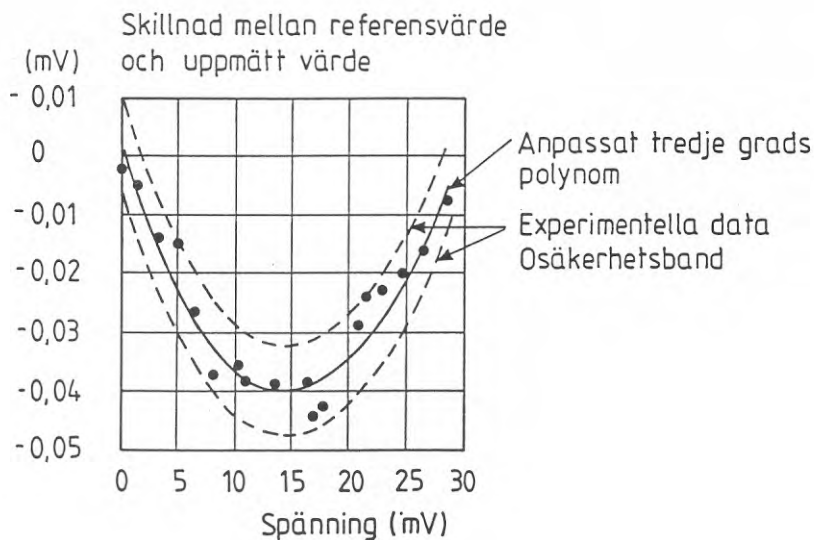
Om kalibrering har utförts ett antal gånger vid samma eller närliggande temperaturer kan den maximala spridningen ritas upp som funktion av kalibreringstemperaturen/mät-signalen enligt figur 3.30. Med hjälp av spridningskurvan, eller med kännedom om givarens och kalibreringssystemets reproducerbarhet på annat sätt, kan man lägga in ett osäkerhetsband i avvikelsekurvan enligt figur 3.31.





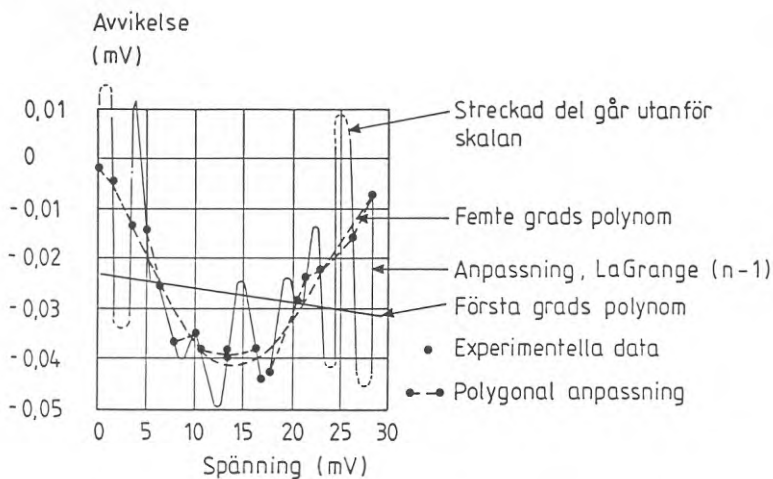
Figur 3.30. Exempel på maximal spridning vid kalibrering av termoelement i olika punkter (ASTM, 1981).

Vid anpassningen till polynom utnyttjas därvid att den kurva, som beräknas med approximationspolynomet, måste ligga innanför osäkerhetsbandet. Istället för att direkt anpassa ett polynom till de uppmätta värdena anpassas ett polynom till avvikelserna från standardpolynomet med beaktande av att resultatet ska ligga inom osäkerhetsbandet. Man börjar därvid med polynom av grad ett och ökar tills noggrannhetskriteriet är uppfyllt. Denna metod ger ett noggrannare resultat än den direkta anpassningen.



Figur 3.31. Exempel på osäkerhetsband inlagt på en avvikelsekurva vid kalibrering av ett termoelement (ASTM, 1981).

Vikten av att kontrollera avvikelserna mellan kalibreringsdata och det approximationspolynom som används framgår av figur 3.32, där några alternativa approximationer av givna data visas.



Figur 3.32. Exempel på olika approximationer anpassade till experimentella data vid kalibrering av termoelement (ASTM, 1981).

### 3.6.4 Kalibreringsintervall

Att generellt ansätta kalibreringsintervall för temperaturgivare är naturligtvis nästan omöjligt. Kalibreringsintervall måste anpassas efter individuella behov av noggrannhet, användningsområde, typ av givare m.m. Med hänsyn till de fakta, som refereras i kapitel 3.5 om olika typer av givare, kan ändå några allmänna rekommendationer lämnas. En återkommande kalibrering behöver vanligtvis bara omfatta ett par (lämpligtvis minst tre) kontrollpunkter om en fullständig kalibrering tidigare utförts.

Enligt de svenska bestämmelserna för debiteringsmätning av värme fät temperaturgivare och integreringsverk högst sitta ute i tio år utan kontroll (1990). Detta är en övre gräns och vid noggranna mätningar måste betydligt tätare kontroller utföras

#### 3.6.4.1 Termoelement

Termoelement bör alltid kalibreras efter tillverkning av lödställen (svetsning, lödning etc). Vid användning i måttliga temperaturer och med rimliga krav på noggrannhet (t.ex. inom trädens toleransområde enligt DIN eller ASTM) kan ett års kalibreringsintervall vara lämpligt (osäkerhet inom ca  $\pm 0,5$  K).

Långvarig användning vid höga temperaturer (över 200°C) gör att kalibrering måste utföras ganska frekvent, ju högre temperatur desto kortare kalibreringsintervall.

#### 3.6.4.2 Resistiva temperaturgivare

Resistiva temperaturgivare klarar sig normalt med en återkommande kalibrering med 1-5 års intervall beroende på noggrannhetskrav, användning m.m. Man bör dock ha möjlighet till en enkel kontroll, t.ex. i isbad, om man misstänker förändringar på grund av hanteringen ("tappat givaren i golvet" eller dylikt). Vid krav på mindre osäkerhet än 0,1 K kan kalibrering behövas med tätare intervall, speciellt för givare som hanteras mycket. Fast monterade givare är normalt mycket stabila i tiden vid måttliga temperaturområden.

#### 3.6.4.3 Termistorer

Om termistorer ska användas för noggranna mätningar (osäkerhet mindre än  $\pm 0,1$  K) bör kalibrering ske i direkt anslutning till mättillfället. Vid toleranser av  $\pm 0,5$  K räcker oftast en årlig kontroll.

### 3.7 Total mätosäkerhet vid temperaturmätning

Enligt avsnitt 2.3.1 ges den totala mätosäkerheten genom sammanvägningen av osäkerhetskomponenter från

- Variationer i driftsförhållanden,  $s_T$
- Installationsförhållanden,  $a_{Tj}$  (alternativt  $w_{Tj} = a_{Tj}/\sqrt{3}$ )
- Arbetspunkt,  $a_{TF} = \frac{\partial F}{\partial T} \cdot s_T$  (alternativt  $w_{TF}$ . Fel p.g.a. arbetspunkten kan normalt försummas för resistiva temperaturgivare)
- Kalibreringsosäkerhet,  $a_{TK}$  (alternativt  $w_{TK} = a_{TK}/\sqrt{3}$ )
- Dynamiska förhållanden,  $a_{Td}$  (alternativt  $w_{Td} = a_{Td}/\sqrt{3}$ )

Med värden på de olika delkomponenterna enligt diskussionerna i de enskilda avsnitten av kapitel 3 kan typiska värden vid väl genomförda noggranna mätningar i ett värme-system vara (observera att detta endast är ett exempel)

- $s_T = 0,1$  K
- $a_{T1} = 0,05$  K (värmeförluster genom ledning och strålning)
- $a_{T2} = 0,1$  K (osäkerhet på grund av skiktning)
- $a_{T3} = 0,05$  K (kontaktresistanser, termoemk)
- $a_{T4} = 0,02$  K (egenuppvärmning)
- $a_{TF} = 0$  K (arbetspunkt för resistiva temperaturgivare, liten linjäritetsavvikelse)
- $a_{TK} = 0,02$  K (kalibreringsosäkerhet)
- $a_{Td} = 0,01$  K (orsakas av givarens stigtid, kan bli mycket stor vid mätning på tappvarmvattensystem)

Med 95% konfidensnivå är det tillfälliga felet (medelvärdets standardfel) mindre än  $t_{95} \cdot s_T$ , där  $t_{95}$  är Students t-faktor för konfidensnivån 95%, d.v.s  $u_{95} \approx 2 \cdot 0,1 = 0,2$  K

Med sammanlagring av ovanstående osäkerhetskomponenter enligt SS 014150 kan det totala systematiska felet beräknas enligt

$$a_T = \sum |a_{Tj}| = 0,05 + 0,1 + 0,05 + 0,02 + 0 + 0,02 + 0,01 = 0,25 \text{ K}$$

Resultatet för temperaturmätningen kan alltså anges med följande osäkerhet enligt SS 014150:

- Det tillfälliga felet är med 95% konfidens mindre än 0,2 K
- Det systematiska felet är maximalt 0,25 K.

Alternativt kan osäkerheten anges med BIPM's metod. Den skattade mätosäkerheten ges på samma sätt som det tillfälliga felet enligt ovan. Den sammanlagda förväntade mätosäkerheten beräknas enligt ekv. 2.30 till:

$$w_T = [\sum w_{Tj}^2]^{1/2} = [1/3 \sum a_{Tj}^2]^{1/2} = \sqrt{1/3(0,05^2 + 0,1^2 + 0,05^2 + 0,02^2 + 0^2 + 0,02^2 + 0,01^2)} = \\ = \sqrt{\frac{0,0159}{3}} = 0,073 \text{ K}$$

Enligt ekvation 2.31 blir den sammanlagda mätosäkerheten

$$u_T = \sqrt{s_T^2 + w_T^2} = [0,1^2 + 0,073^2]^{1/2} = 0,12 \text{ K}$$

Resultatet för temperaturmätningen kan alltså anges med följande osäkerhet enligt BIPM:

- Den skattade mätosäkerhetskompontens standardavvikelse har skattats till 0,1 K
- Den förväntade mätosäkerhetskompontens standardavvikelse har beräknats till 0,07 K

Därvid blir den totala mätosäkerheten med användande av talfaktorn  $k = 2,0$

$$u_T = 0,25 \text{ K}$$

Detta exempel visar hur ett antal olika osäkerhetskompontener bidrar till en total mätosäkerhet. Som alltid vid kvadratisk sammanlagring av varianser kommer fel som är mindre än en tredjedel av den största komponenten knappast att bidra alls och kan ofta försummas.

Valet av talfaktorn  $k$  har ett avgörande inflytande på den totala mätosäkerheten och bör därför väljas med viss omsorg. I de fall en mätning grundar sig på 10 upprepade mätningar eller mer kan 2,0 vara ett rimligt värde. Vid få mätningar kan det vara rimligare att använda 2,5 eller 3,0.

Som tidigare nämnts i kapitel 2 ger den ovanstående sammanlagringen av mätosäkerhetskompontenerna normalt en överskattning av den sammanlagda mätosäkerheten, eftersom vissa komponenter har ensidiga intervall. Sålunda vet man att värmeförluster alltid ger ett negativt fel vid mätning av övertemperaturer medan egenuppvärmning och kontaktresistanser alltid ger ett positivt fel.

Sammanlagring av osäkerhetskompontener med osymmetriska sannolikhetsfördelningar komplicerar osäkerhetsbedömningen, samtidigt som bedömningen av de förväntade osäkerhetskompontenernas antal och storlek är svår i sig. Antingen väljer man att överskatta det systematiska felet genom att sätta osäkerheten till  $\pm$  den största osäkerheten åt endera hållet. Annars väljer man att förskjuta det uppmätta värdet inom osäkerhetsintervallet så att intervallet blir symmetriskt (enligt 2.2.3, figur 2.4). Vilken metod man använder bör förklaras i text i samband med presentationen av mätosäkerheten.

### 3.8 Normer för temperaturmätning

Internationellt finns ett stort antal olika normer och standarder för temperaturmätning (se referenslistan). Några av de viktigaste är ASTM STP 470 B, ASHRAE 41.1-74, ASME PTC 19.5-1972, BS 1041, DIN 43760, IEC-751 och VDE/VDI 3511 och 2640. Dessutom finns ett stort antal standarder för specifikation av toleranser för olika typer av givare, t.ex. DIN 43 710 och SS 485 30 15 för termoelement.

Av dessa ger ASTM 470 B en mycket detaljerad redovisning av mätning med termoelement. Eftersom den även behandlar installationsfel av olika typer, kalibrering etc. har den ett allmänt intresse även utanför termoelementapplikationer. Standarden är utformad som en komplett handbok i temperaturmätning med termoelement.

ASHRAE 41.1-74 och ASME PTC 19.5-1972 är något ålderdomliga till sin karaktär men är korta och koncisa samt ger en del nyttiga praktiska synpunkter.

BS 1041 har karaktär av handbok och innehåller detaljerade beskrivningar av olika typer av givare för temperaturmätning samtidigt som olika felkällor behandlas ganska ingående.

DIN 43760 ger standardiserade värden och toleransgränser för resistiva temperaturgivare och har blivit en etablerad industristandard även utanför Tyskland. Efter tillkomsten av IEC-751 för givare av platina omfattar DIN-standarderna numera endast givare av nickel.

IEC 751 behandlar resistiva temperaturgivare av typ Pt-100 och ger samma toleransgränser som tidigare gavs av DIN 43760. Dessutom innehåller IEC 751 rekommendationer om kalibreringsförfaranden, stigtidsbestämningar, isolationsresistans, märkning m.m.

Av de normer som beskriver hur installationer bör utföras tillhör VDE/VDI 3511 och 2640 de mest användbara.

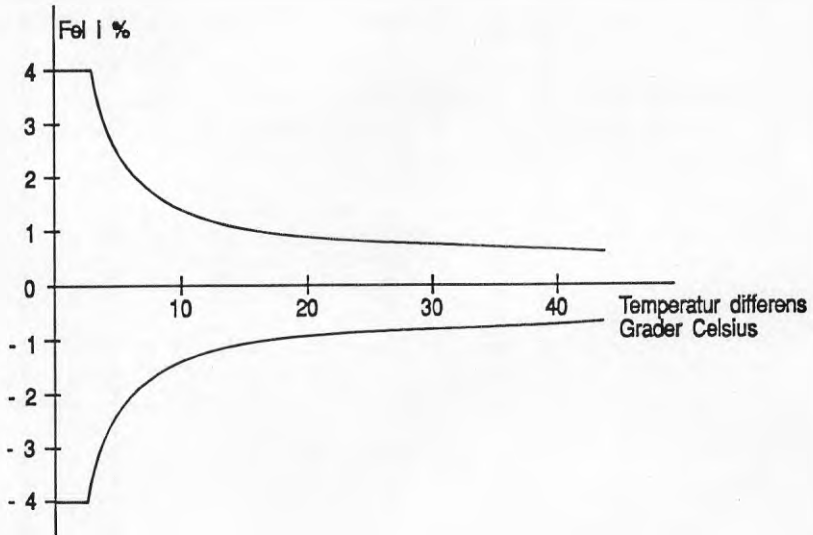
Det finns för närvarande ingen svensk standard som direkt behandlar installationstekniska problem i samband med temperaturmätning. Däremot finns krav på temperaturgivare och deras installation behandlade i ett stort antal andra standarder, t.ex. för provning av värmepumpar, pannor m.m. För värmemätning är kraven i Statens provningsanstalts kontrollbestämmelser SPKB 1986:18 av störst intresse. I dessa kontrollbestämmelser ställs krav på temperaturgivarnas noggrannhet och stabilitet i tiden vid olika typer av miljöprovningar (termiska cyklingar, stötar och vibrationer). Dessutom kontrolleras givarnas isolationsresistans.

Enligt Statens provningsanstalts kontrollbestämmelser ges de relativa felgränserna för den uppmätta termiska energin, vilka är orsakade av *temperaturgivarnas* mätfel, av följande uttryck:

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| < (0,004 + \frac{0,1}{\Delta\theta} )$$

Den nedre gränsen för  $\Delta\theta_{\min}$  för en viss typ av temperaturgivare bestäms därvid av de relativa felgränserna enligt figur 3.33 ("trumpetkurvan" slutar vid  $\Delta\theta_{\min}$  där det relativa felet är  $\pm 4\%$ ).

Relativ osäkerhet för temperaturgivare (SPKB 1992:02)



Figur 3.33. Maximal relativ osäkerhet för temperaturgivare enligt Statens provningsanstalts kontrollbestämmelser. Kurvorna ger även den nedre gränsen för den minsta temperaturdifferensen  $\Delta\theta_{min}$ .

## 4 Flödesmätning

Vid indirekt värmemätning i rörsystem måste alltid vätskeflödet bestämmas tillsammans med temperaturdifferensen. Av många anledningar ger flödesmätningen ofta det helt dominerande bidraget till mätosäkerheten samtidigt som flödesmätaren och dess installation utgör den absolut största delkostnaden i en värmemätning. Dessutom kräver flödesmätare en helt annan nivå på underhåll och frekventa omkalibreringar än t.ex. temperaturgivare och integreringsverk. Eftersom inget mätsystem är bättre än sin svagaste länk lönar det sig därför att lägga ner stor omsorg vid val av flödesmätare och installationens utförande.

Ett speciellt problem, som framför allt uppstår vid mätning av förbrukningen av värme och varmvatten i enskilda hushåll, är de utomordentligt stora krav som ställs på flödesmätarens mätområde. Mätaren måste dimensioneras för det maximala effektbehovet (vid fjärrvärme ofta sammanlagda behovet av värme och varmvatten) medan större delen av energimätningen sker vid effekter som är mindre än 10 % av det maximala behovet. Enligt vissa undersökningar resulterar detta i mätfel av storleksordningen 20-30 % under vår, sommar och höst på grund av att flödena ligger under mätarnas gränser för minsta flöde.

Under lång tid har flödesmätning utgjort en av de mest komplicerade mättekniska problemställningar en mättekniker ställs inför. Detta har gjort att en stor flora av mätprinciper har utvecklats för att lösa alla de olika problem som uppstår i olika typer av applikationer (se avsnitt 4.3). Jämför man med temperaturmätning, där 2-3 typer av givare är helt dominerande, finns det för flödesmätare oerhört många fler alternativ att välja mellan.

I denna rapport behandlas endast värmemätning i rör, som förutsätts fyllda med vätska. Denna begränsning, tillsammans med begränsningarna i temperaturområde och antalet förekommande värmebärare och köldbärare, gör att antalet aktuella mätprinciper kan begränsas. Därför kommer denna rapport endast att ytligt behandla det fåtal mätartyper som är någorlunda vanliga i samband med värmemätning. Dessutom nämns några intressanta mätartyper, som för närvarande knappast förekommer i praktiska installationer. Ytterligare detaljer om dessa mätares funktionsprinciper finns behandlade i SP-rapport 1991:13.

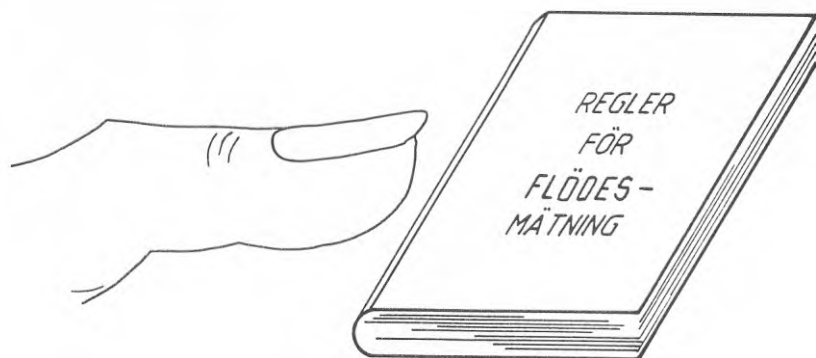
För att fungera bra ur värmetransportsynpunkt måste köld- och värmebärare ha så låg viskositet och så hög specifik värmekapacitet som möjligt. Därför används i första hand vatten och olika blandningar mellan vatten och glykol eller salter. Inom temperaturområdet  $-20^{\circ}\text{C}$  till  $+120^{\circ}\text{C}$ , som behandlas i denna rapport, kan man därför räkna med en dynamisk viskositet mellan 0,2-40 mPas och ungefär samma värden för den kinematiska viskositeten uttryckt i  $\text{mm}^2/\text{s}$ .



Kraven på en flödesmätning skiljer sig från kraven vid temperaturmätning så till vida att absolutnoggrannheten är av största vikt. Flödet ingår direkt i formeln för beräknad värmeeffekt medan temperaturen endast ingår som en differens. Samtidigt är det tyvärr också mycket svårare att kalibrera en flödesmätare än en temperaturgivare, vilket ofta gör det svårt att uppfylla de krav som ställs på flödesmätningens noggrannhet.

I fortsättningen av detta kapitel kommer först en sammanfattning av vad man bör beakta vid flödesmätning i rör att göras i kapitel 4.1 i form av tumregler. Resten av kapitlet ägnas åt att diskutera olika problemställningar mera i detalj, dels med avseende på generella aspekter om olika felkällors betydelse i kapitel 4.2 och dels beträffande aspekter som är specifika för olika typer av mätare i kapitel 4.4-4.12. Kapitel 4.3 är en allmän introduktion till flödesmätningens grunder med en översiktlig presentation av olika mätprinciper. Avslutningsvis behandlas kalibreringsmetoder (kapitel 4.4), bedömning av total mätosäkerhet (kapitel 4.5) och de viktigaste normer och standarder som berör området flödesmätning (4.6).

## 4.1 Så bör man göra - tumregler



Förutsatt att alla källor till grova fel sorterats ut (jämför diskussionen i kapitel 2) ger följande avsnitt en sammanfattning av viktiga hållpunkter vid genomförandet av en flödesmätning. Flödesmätningen är en sammansatt mätprocess vari flödesmätaren ingår som en av många detaljer. För att hela mätprocessen skall fungera på avsett vis krävs en noggrann planering av mätningen. En kalibrerad mätare ger visserligen bättre förutsättningar för en korrekt mätning än en okalibrerad mätare. Men inte ens den noggrannaste kalibrering hjälper om systemet tillåter luft att passera genom mätaren, delflöden att försvinna genom läckande ventiler eller distorderade hastighetsprofiler att påverka mätarens kalibrering. I många fall kan mätfel orsakade av dessa faktorer vara flera storleksordningar större än mätarens specificerade osäkerhet.

### 4.1.1 Planera mätningen

- Analysera mätuppgiften och välj lämpligaste plats för mätaren i det tänkta systemet.
- Gör en bedömning av de driftsförhållanden som mätningen kommer att omfatta (t.ex. temperatur, tryck, flödesområde, typ av vätska, dynamiska förhållanden etc).
- Bestäm med utgångspunkt från mätningens syfte och förväntade systemegenskaper vilka krav på noggrannhet som kan ställas.
- Utforma rörsystem så att onödiga krökar (och därmed distorderade flöden) undviks. För alla mätartyper utom displacement (volym) mätare ska raksträckor finnas. Dessa skall vara **minst** 10•D före mätaren och 5•D efter mätaren, oberoende av vad mätarleverantören hävdar. Beroende på rörgeometri och mätartyp kan längre raksträckor eller strömningsriktare krävas. Se även avsnitt 4.1.3.

- Beroende på typ av vätska och frammatning (t.ex. med pump eller självrinning från en högtank) kan filter, luftavskiljare, övertrycksventiler, snabbstängningsventiler m.m. vara nödvändiga.
- Kontrollera att eventuella VVS-ritningar, där placering av mätare, ventiler, filter, krökar etc finns inritade, överensstämmer med verkliga förhållanden (kontrollera på platsen).
- Uppskatta vilken mätosäkerhet som kan orsakas av den tänkta installationen. Undersök om det finns lämpligare ställen att montera mätaren (detta påverkar valet av mätare).
- Gör en kravspecifikation för valet av flödesmätare. Tänk på att inte i onödan ställa höga krav. Detta fördröjar både installationen och köpet av mätare.

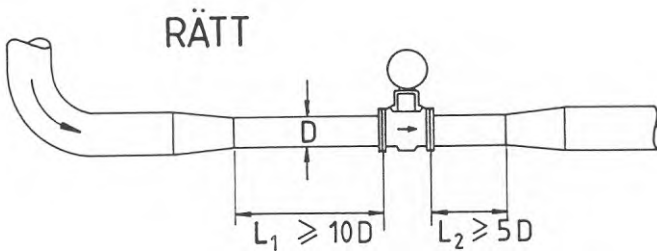
#### 4.1.2 Välj rätt flödesmätare

- Kontrollera att mätaren klarar den tilltänkta miljön. Detta kan avse vätskans kemiska sammansättning, renhet, ledningsförmåga och viskositet, temperatur, tryck, vibrationer etc.
- Kontrollera vilka krav på rörinstallationen som mätaren ställer (raksträckor, strömningsriktare, filter m.m.).
- Avser mätningen ett kontinuerligt eller ett intermittert flöde? Kontrollera att mätaren klarar eventuella krav på dynamiska förlopp samt krav på mätområdets omfång.
- Hur stort är mätarens tryckfall? I system med små tryckfall kan montering av en flödesmätare förändra det flöde man vill mäta. Vissa mätartyper kan också ge kraftigt pulserande tryckfall och därmed orsaka pulserande flöden.
- Se till att flödesmätaren kan levereras med spårbar kalibrering (endast "våt" kalibrering kan accepteras om mätresultatet ska anges med en specificerad noggrannhet).
- Klarar mätaren de uppställda kraven på noggrannhet? Titta inte enbart på mätarens prestanda i nyskick under ideala förhållanden. Väg in hur känslig mätartypen är för olika former av störningar, hur stabil den är över längre perioder m.m. Försök att hitta referenser till motsvarande applikationer.
- Välj anslutningsdimension så att vätskans hastighet blir tillräckligt stor för att hålla flödet inom mätarens övre mätområde. Hög hastighet kan också bidra till att hålla mätaren ren. Samtidigt får inte hastigheten vara så stor att onödigt tryckfall, risk för kavitation eller onödigt stort slitage uppstår.

- Vilka krav på utsignal ställer mätsystemet utanför flödesmätaren? Mätare av industri kvalitet kan normalt fås med alla typer av gångbara utsignaler (0-20 mA, 4-20 mA, 0-10 V, 0-10 kHz, skalad pulsutgång, potential fri kontakt m.m.). Däremot är mätare för debiteringsmätning oftast tänkta för en viss typ av integreringsverk och har därmed bara en typ av utgång. Speciellt vid mätning av små mängder eller intermittenta flöden kan utsignalens upplösning vara kritisk.
- Finns mätaren i lämplig bygglängd och med lämplig storlek och typ av anslutning?

#### 4.1.3 Gör rätt installation

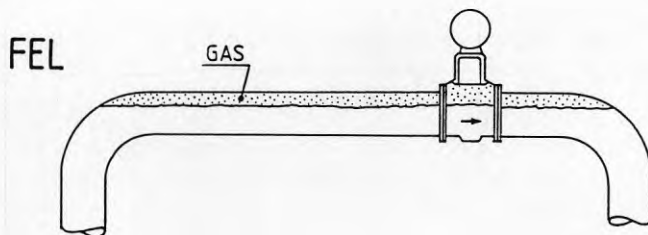
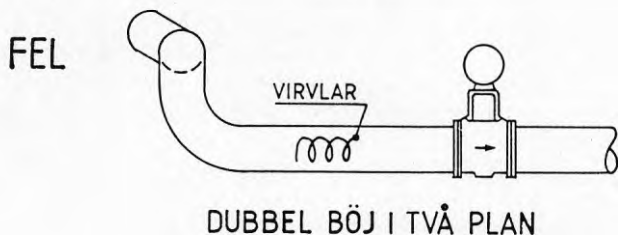
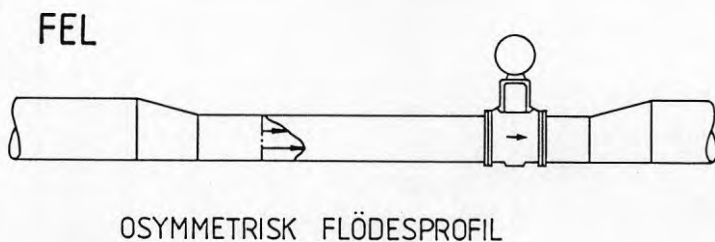
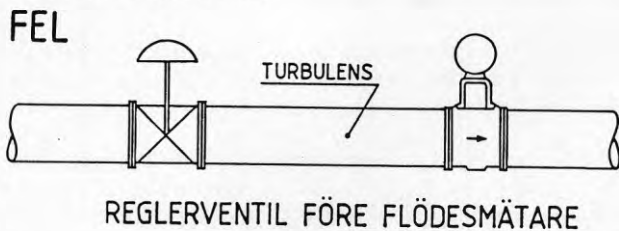
- Välj rätt del av systemet för mätarens inplacering. Kontrollera att flödet svarar mot den värmemängd man verkligen söker (jämför 2.1).
- Oftast mäter man flödet i en returledning, där den lägre temperaturen minskar kraven på mätarens temperaturlämplighet samtidigt som risken för kavitation är mindre.
- Se till att jordning av mät- och kraftkablar sker på korrekt sätt. Speciellt i samband med induktiva mätare bör man kontrollera att inte rörsystemet används som nätspänningsjord (kan ge upphov till stora strömmar i röret och därmed störningar).
- Bygg in avluftningsmöjligheter om dessa är dåliga från början. En förutsättning för korrekt flödesmätning är att vätskan är luft- och gasfri (gäller alla mätartyper i större eller mindre grad).
- Se till att kraven på raksträckor före och efter mätaren är uppfyllda. Fabrikantuppgifter tenderar att underskatta påverkan av strömningstekniska förhållanden. Oberoende av vad databladet säger skall därför raksträckorna alltid vara större än  $10 \cdot D$  ( $D$  = rörets innerdiameter) före mätaren och större än  $5 \cdot D$  efter mätaren (se figur 4.1).



Figur 4.1. Exempel på lämplig installation av flödesmätare.

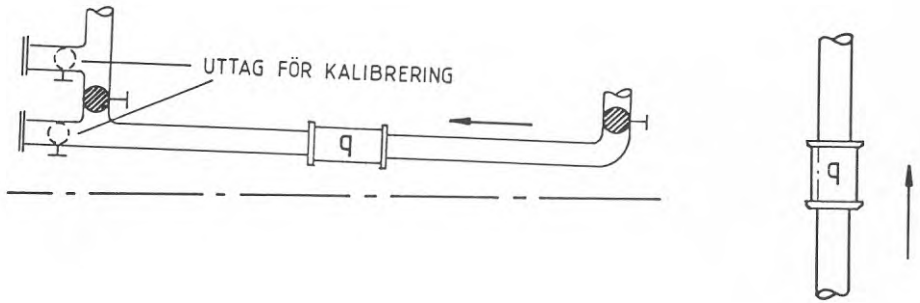
Observera att inom raksträckornas längd får **inga** störningar finnas. Uttag för t.ex. tryck eller temperatur måste placeras utanför flödesmätarens ostörda zon eller utformas så att de ligger i rörväggens plan (utan att sticka in eller bilda håligheter).

Undvik installation enligt figur 4.2.



Figur 4.2. Exempel på hur installation av flödesmätare *inte* skall utföras.

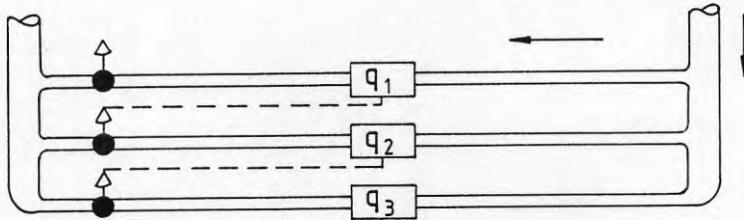
- Se till att packningar är centrerade och inte sticker in i vätskan (klistra t.ex. eventuella packningar på mätaren innan den monteras).
- Se till att mätaren sitter noggrant centrerad i röret och att rör och mätare verkligen har samma innerdiameter. Var noggrann med rekommenderade åtdragningsmoment så att inte inspänningen påverkar mätarens funktion.
- Undvik fickor, stosar och avstick där luft eller gas kan samlas. Likaså bör grenledningar med avstängningsventiler, där risk för läckage föreligger, i möjligaste mån undvikas.
- Placera mätaren i en låg punkt i systemet så att den alltid är fylld med vätska. Röret kan gärna luta svagt uppåt i flödesriktningen så att eventuellt frigjord luft eller gas lätt transporteras bort (se figur 4.2). För mätare som klarar vertikalt montage kan monteringen i ett vertikalt rör vara lämpligt.



Figur 4.3. Lämpligt montage av flödesmätare.

- Montera gärna avstängningsventiler på båda sidor av mätaren (se figur 4.3). Dessa kan behövas i samband med service, omkalibrering m.m. (räkna inte med längre utesittningstid än 1-5 år, beroende på mätartyp och vätske kvalitet).
- Montera kablage mellan flödesgivare och förstärkardel så att hela paketet kan monteras ned utan att kablagen behöver delas (t.ex. i samband med kalibrering). Speciellt induktiva mätare kräver mycket noggrant utförda kabelanslutningar på grund av låga signalnivåer och hög givarimpedans.
- Om mätaren skall kalibreras på plats kan påstick och avstängningsventiler vara nödvändiga så att en flödesnormal kan kopplas in i systemet (se figur 4.3).

- Vid krav på mycket stora mätområden kan det vara lämpligt att använda flera parallella mätare av mindre storlek med styrda avstängningsventiler (se figur 4.4). När flödet överstiger  $q_{\max}$  för den första mätaren kopplas nästa in etc. Även färdiga kombinationsmätare finns.



Figur 4.4. Uppdelning av ett stort mätområde på flera mindre mätare.

## 4.2 Faktorer som påverkar resultatet av en flödesmätning

Många olika faktorer kan påverka resultatet av en flödesmätning och därmed valet av mätare för en given applikation. I detta kapitel kommer endast faktorer att behandlas som har med själva flödesmätningen att göra. Eventuell efterföljande signalbehandling och elektriska störningsproblem berörs inte i detta sammanhang.

Med flödesmätning avser man oftast mätning av volymflödet, d.v.s hur stor volym som per tidsenhet passerar en viss tvärsnittsytta,

$$q_v = \int_A v_z(r, \varphi, z, t) dA \quad (\text{ekv. 4.1})$$

där  $q_v$  är volymflödet,  $v_z$  är hastighetskomponenten i rörets längdriktning i en punkt med de polära koordinaterna  $(r, \varphi, z)$ ,  $t$  är tiden och  $dA$  ett ytelement i rörets tvärsnitt.

Många gånger är det inte i första hand volymflödet utan massflödet man är intresserad av. Med massflöde avser man mängden massa som per tidsenhet passerar en viss tvärsnittsytta, d.v.s

$$q_m = \int_A \rho(r, \varphi, z, t) \cdot v_z(r, \varphi, z, t) dA \quad (\text{ekv. 4.2})$$

där  $\rho$  är vätskans densitet och  $q_m$  är massflödet. Vätskor kan vid normala strömningshastigheter betraktas som inkompressibla och därmed kan densiteten anses vara konstant. I detta fall gäller

$$q_m = \rho \int_A v_z(r, \varphi, z, t) dA = \rho \cdot q_v \quad (\text{ekv. 4.3})$$

och man kan då bestämma massflödet genom att mäta volymflödet, vilket ofta är det enklaste.



I vissa speciella fall kan vätskan inte betraktas som inkompressibel och därmed kommer densiteten att variera beroende på plats i röret och med tiden. Eftersom massflödet är konstant kan volymflödet därför variera. Exempel på detta utgör strömning av vatten vars temperatur ligger nära kokpunkten. Vid areaminskningar (ventiler, strypningar, pumpar etc) kan trycket sjunka under mättnadstrycket och vätskan kan lokalt råka i kokning varvid man erhåller ångblåsor vars volym ändras vid tryckförändringar. Detta fenomen kan inträffa även vid rumstemperatur och benämns då kavitation. I dessa fall kommer medelhastigheten och därmed volymflödet att variera längs röret även om arean är konstant. I fall med tvåfasströmning (blandning av gas och vätska) kan det vara lämpligt att införa fraktionsflödet, d.v.s hur mycket massa av den ena komponenten som per tidsenhet passerar ett visst tvärsnitt.

$$q_m = \int_A I(r, \varphi, z, t) \cdot \rho_i(r, \varphi, z, t) \cdot v_z(r, \varphi, z, t) dA \quad (\text{ekv. 4.4})$$

där  $I$  är en intermittensfunktion sådan att

$I(r, \varphi, z, t) = 1$  för alla punkter  $(r, \varphi, z, t)$  där den  $i$ :te komponenten finns

$I(r, \varphi, z, t) = 0$  i övrigt

I det stora flertalet av tekniska tillämpningar kan man dock anse densiteten vara konstant och följaktligen är då volymflödesmätning tillfyllest. I fortsättningen används därför beteckningen  $q$  generellt för att indikera volymflöde.

Av ovannämnda formler framgår att flöde är en sammansatt storhet, vilken ej kan mätas direkt. För att kunna bestämma flödets storlek måste vi alltså kunna relatera  $q$  till någon storhet vars värde kan observeras, t.ex. tryckdifferens, elektrisk spänning, flottörläge etc. Ett stort antal mätprinciper med olika typer av utsignal står till buds. De viktigaste av dessa redovisas översiktligt i kapitel 4.3.

Sambandet mellan flödet  $q$  och utsignalen  $U$  kan allmänt skrivas som

$$q = K \cdot U \quad (\text{ekv. 4.5})$$

Det gäller därmed att etablera ett samband mellan utsignal och flöde, d.v.s bestämma givarfaktorn  $K$  för olika typer av strömning. Som exempel kan givarfaktorn härledas för mätning med Prandtl-rör i rörets centrum. Man bestämmer därmed flödet indirekt genom att mäta maximala hastigheten i rörets längdriktning,  $v_{oz}$ , och därmed blir

$$q = K \cdot v_{oz} \quad (\text{ekv. 4.6})$$

där fet, kursiv stil betecknar tidsmedelvärdet.

Flödet kan enligt ekv 4.1 skrivas som

$$q(t) = \int_0^R \int_0^{2\pi} v_z(r, \varphi, z, t) r dr d\varphi = 2\pi R^2 v_{oz} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{v_z(r/R, \varphi, z, t)}{v_{oz}} \cdot \frac{r}{2\pi R} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) d\varphi \quad (\text{ekv. 4.7})$$

Här är  $r$  en radiell koordinat och  $\varphi$  en vinkelkoordinat i tvärsnittsplanet. Såväl hastigheten  $v$  som flödet  $q$  kan variera med tiden. Tidsvariationer kan t.ex. bero på att man just har ändrat en ventil eller att man åstadkommer pulsationer med en pump eller på grund av instabiliteter inom strömningsfältet självt, s.k. **turbulens**. Turbulensen tar sig uttryck i en kaotisk virvlande strömningsrörelse.

Om man inte har ett pågående transient förlopp, såsom ändring av ventilläge m.m., så kan man definiera ett medelflöde genom att ta tidsmedelvärdet. Medelflödet ges enligt ekv 4.6 och 4.7 av

$$q = K \cdot v_{oz} = v_{oz} \cdot \left[ A \cdot \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{v_z(r/R, \varphi, z, t)}{v_{oz}} \cdot \frac{r}{2\pi R} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) d\varphi \right] \quad (\text{ekv. 4.8})$$

Ekvation 4.8 illustrerar hur en mätares givarfaktor på ett komplicerat sätt beror av installationsförhållandena. I exemplet ovan beror  $K$  både av det uppmätta värdet  $v_{oz}$ , tvärsnittsarean och hastighetsfördelningen i tvärsnittet. Temperatur och tryck kan påverka både  $A$  och  $v_z$  men framför allt kan olika typer av störningar påverka  $v_z(r, \varphi, z, t)$  och därmed  $K$ .

Om man antar att hastighetsfördelningen i exemplet ovan är laminär blir givarfaktorn

$$K(\text{laminär}) = 0,25 \cdot A$$

Antar man däremot bulkflöde, d.v.s att hela vätskan rör sig med samma hastighet, blir givarfaktorn

$$K(\text{bulk}) = 1,0 \cdot A$$

Denna mätmetod kan alltså indikera ett flöde som är 4 gånger större än det verkliga beroende på fel antagande om hastighetsfördelningen.

Ovan har visats hur man i ett enkelt exempel kan relatera en flödesmätarens utsignal till motsvarande flöde. För andra typer av mätare föreligger andra samband. Generellt kan man skriva

$$q = f \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(r, \varphi, z) \cdot v(r, \varphi, z) r dr d\varphi dz \right\} \quad (\text{ekv. 4.9})$$

där fet, kursiv stil betyder tidsmedelvärde, pilar betecknar vektorer och  $\xi(r, \varphi, z)$  är en viktsfunktion som anger med vilken styrka hastigheten i en viss punkt viktas i utsignalen. Det är viktigt att ha klart för sig att olika mätare har olika viktsfunktion och följaktligen är olika känsliga för olika typer av avvikelser från ideal hastighetsprofil. Man bör naturligtvis välja en givare som så långt möjligt är okänslig för den störning som föreligger i varje enskilt fall. För att kunna göra detta måste man dels ha klart för sig hur  $\xi$  ser ut för olika flödesmätare, dels vilka avvikelser från ideal strömning som föreligger i det enskilda fallet. I SP-rapport 1991:13 diskuteras frågan om olika mätares känslighet för störningar i detalj, medan olika typer av störningar översiktligt beskrivs i kapitel 4.2.1. För sådana mätare, som är känsliga för variationer i hastighetsprofilen, brukar man föreskriva att de ska föregås av en raksträcka av viss längd.

Om en mätare kalibreras på en annan plats än det ställe den skall arbeta på, t.ex. vid ett kalibreringslaboratorium, måste man komma ihåg att likformighet skall råda beträffande strömningsförhållandena. I praktiken är det omöjligt att åstadkomma rördragningar så att exakt likformighet med kalibreringssituationen föreligger. Det finns då ett antal sätt att åstadkomma hastighetsprofiler som är någorlunda oberoende av vad som föregått dem. Endast deplacementmätare (volymetriska mätare), vilka arbetar med mätkammare som successivt fylls och töms, är helt okänsliga för olika strömningsförhållanden.

De viktigaste faktorerna som påverkar en flödesmätning är:

- installation (strömningstyp)
- flödesområde
- tryck och temperatur
- typ av vätska
- typ av utsignal
- dynamiska förhållanden

I detta kapitel behandlas fortsättningsvis ovanstående problemområden översiktligt. Mera detaljerade uppgifter beträffande problem, som är specifika för en viss typ av mätare, behandlas i SP-rapport 1991:13 för respektive mätartyp.

### 4.2.1 Installation

Installationens läge och utförande har avgörande betydelse för de flesta flödesmätarens funktion. Bestämningen av mätarens givarfaktor förutsätter oftast en viss typ av fullt utbildad strömning. I praktiska installationer avviker ofta strömningsförhållandena från de antagna, idealiserade förhållandena. De viktigaste typerna av störd (distorderad) strömning är:

- ej fullt utbildat flöde
- asymmetrisk hastighetsprofil
- sekundära flöden (olika typer av virvlar)
- skruvflöde

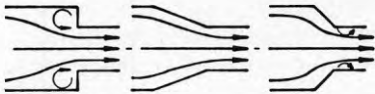
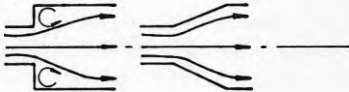
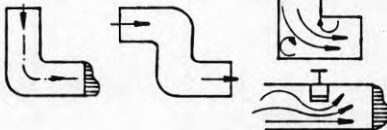
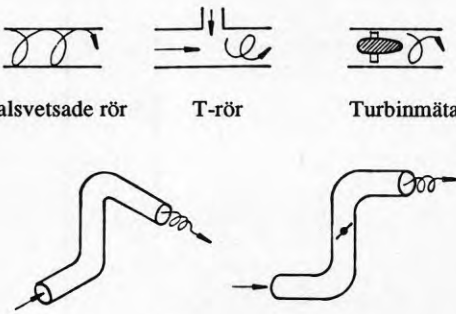
Många vanligt förekommande situationer i rörsystem ger upphov till dessa störningar, vilket belyses av figur 4.5. Den svåraste typen av störning är skruvflöde. Dels är skruvflöden mycket långlivade (50-100•D) och dels är många typer av flödesmätare extra känsliga för denna typ av distorderat flöde. Speciellt är olika typer av axialturbinmätare extremt känsliga för skruvflöden men även induktiva mätare och strypflänsar påverkas kraftigt. Trots att vissa typer teoretiskt inte ska påverkas av skruvflöden visar praktiska prov på stor känslighet (t.ex. upp emot 20 % för ultraljudsmätare).

Om man råkar ut för system med störd strömning finns det några alternativa lösningar som kan förbättra situationen, t.ex. med hjälp av

- långa raksträckor
- mjuka förträngningar
- strömningsriktare

Det bästa botemedlet är alltid att tillgripa tillräckligt långa raksträckor. Eventuellt måste mätaren kanske flyttas till ett annat ställe där detta är möjligt att uppnå. Finns inte raksträckorna tillgängliga kan man kanske klara sig genom att via en mjuk övergång (kona) gå ner i dimension och montera en mindre mätare. Detta kan ge flera fördelar, dels ger konan en viss utjämning, dels ger den mindre diametern en relativt sett längre raksträcka ( $L/D$ ) för samma inbyggnadslängd och dels får man en mätare som arbetar högt upp i sitt mätområde. Nackdelen är naturligtvis ökat tryckfall och extra kostnader för konor. Den ökade installationskostnaden kan ofta kompenseras av att en mindre mätare är billigare.

Som sista åtgärd tillgriper man olika former av strömningsriktare. Några typer finns beskrivna i SP-rapport 1991:13, men det är viktigt att komma ihåg att även strömningsriktare kräver raksträckor. De flesta strömningsriktare är mycket noggrant specificerade, t.ex. i ISO 5167.

Installationstyp	Typ av störning	Raksträcka
<p>Symmetrisk förträngning</p> 	<p>Konor och andra typer av övergångar från en större till en mindre rördimension. Ökar inkommande skruvflöde, ger sekundärflöden, utjämnar asymmetriska flöden, "plattar till" hastighetsprofilen</p>	5 - 10 D
<p>Symmetrisk utvidgning</p> 	<p>Konor och andra typer av övergångar från en mindre till en större rördimension. Minskar inkommande skruvflöde, ger sekundärflöden, ger "spetsig" hastighetsprofil</p>	5 - 10 D
<p>Asymmetrisk störning</p> 	<p>Krökar, ventiler, snedmonterade packningar. Ger asymmetrisk hastighetsprofil och sekundärflöden</p>	5 - 20 D
<p>Rotationsstörning</p>  <p>Spiralsvetsade rör      T-rör      Turbinmätare</p> <p>90° - krökar i olika plan      90° - krökar i samma plan med mellanliggande ventil</p>	<p>Dubbelkrökar, turbiner, spiralarör. Ger skruvflöde, asymmetrisk hastighetsprofil, sekundärflöden</p>	50 - 100 D

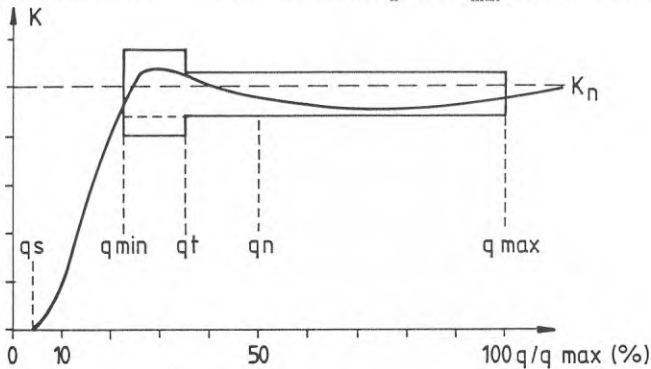
Figur 4.5. Olika typer av installationer som kan orsaka störda flöden. Ett ungefärligt krav på minsta raksträcka efter störningen anges också.

Det är oftast mycket svårt att uppskatta i vilken omfattning störda flöden påverkar en flödesmätares kalibrering. I de fall kraven på raksträckor inte är uppfyllda och mätaren inte kan kalibreras på plats i den färdiga installationen måste ändå någon form av bedömning göras. Man får då konsultera litteraturen på området och använda det maximala felet som redovisats för den typ av mätare och installation som är aktuell. Eftersom felet ofta kan ändra sig mycket snabbt med störningens exakta läge och utformning bör det maximala felet användas som finns redovisat för intervallet  $0-10 \cdot D$  ( $D$  = rörets innerdiameter) mellan störningen och flödesmätaren. Exempel på sådana maximalfel finns redovisade i SP-rapport 1991:13 för olika typer av flödesmätare. Detta maximalfel orsakar ett systematiskt fel (en förväntad mätosäkerhet), vilket anges i form av ett symmetriskt intervall.

#### 4.2.2 Flödesområde

Alla typer av flödesmätare har fysikaliska begränsningar som gör att deras mätområde blir begränsat. För motoriska mätare sätter lagerfriktionen en undre gräns för det minsta flöde som överhuvudtaget får mätaren att röra sig (s.k. "startvärde"). Det interna tryckfallet och livslängdsaspekter sätter i sin tur den övre gränsen. För andra typer av mätare ges gränserna av andra villkor. Enligt ekvation 4.9 påverkas en mätares givarfaktor av hastighetsprofilen i röret och därmed påverkar denna även mätområdet. Som visades med det enkla exemplet enligt ekvation 4.8 kan givarfaktorn ändras mycket kraftigt för vissa mätartyper när flödet blir så lågt att strömningen är laminär.

Dessa begränsningar gör att flödesmätare alltid karakteriseras med ett flödesområde, som avgränsas av ett största flöde,  $q_{max}$ , och ett minsta flöde,  $q_{min}$ . I vissa fall (kall- och varmvattenmätare) tillåter man att felet blir större vid låga flöden och anger gränsen mellan felområdena med gränsflödet,  $q_t$  (se figur 4.6). För vattenmätare anges också ett nominellt flöde, vilket är hälften av maxflödet ( $q_n = 0,5 q_{max}$ , SPFS 1980:3 och 4).



Figur 4.6. Givarfaktorns ( $K$ ) beroende av flödesområdet. Mätområdesgränserna  $q_s$  (startvärde),  $q_{min}$  (minsta tillåtna flöde),  $q_t$  (gränsflödet),  $q_n$  (nominella flödet =  $0,5 \cdot q_{max}$ ) och  $q_{max}$  (största tillåtna flödet) har markerats tillsammans med gränser för tillåtna fel.

I många fall vet man inte mer om flödesmätaren än att den vid kontroll befunnits ligga inom sina tillåtna felgränser (t.ex. vid debiteringsmätning). Osäkerheten anges i sådana fall med den tillåtna felgränsen som intervallbredd för en förväntad mätosäkerhetskomponent. I andra fall finns kalibreringsprotokoll för det flöde mätaren används vid (t.ex. vid prestandaprov på stora anläggningar). Korrektion görs då för kända avvikelser och endast kalibrerings- och installationsosäkerheterna återstår.

Ett speciellt problem uppstår vid användning av en mätare utanför dess linjära mätområde. Om flödet varierar under mätperioden får man ett tillfälligt fel (en skattad osäkerhetskomponent) i medelvärdet på flödesbestämningen orsakad av flödesvariationerna. Detta tillfälliga fel ger i sin tur upphov till ett systematiskt fel (en förväntad mätosäkerhetskomponent) genom att man inte vet exakt för vilket flöde man ska välja givarfaktor. Inom mätarens linjära område är givarfaktorn i stort sett oberoende av flödet, och då blir denna osäkerhet försumbar. Speciellt vid flöden under  $q_{\min}$  är emellertid givarfaktorn kraftigt flödesberoende och en osäkerhet i flödets medelvärde kan därmed ge ett stort fel i värdet på givarfaktorn.

Ännu större problem kan begränsningar i mätområdet orsaka i samband med exempelvis långtidsmätningar av värme och varmvatten för enskilda hushåll. Eftersom man normalt inte känner det aktuella förbrukningsmönstret är det svårt att uttala sig om hur stor andel av den värmemängd som under den aktuella perioden registrerats vid flöden understigande  $q_{\min}$  eller  $q_s$ . Med hjälp tillgängliga frekvensfördelningar över förbrukningsmönster för den aktuella typen av hushåll kan man emellertid få en uppfattning om hur stor andel av den totalt uppmätta volymen som mätts utanför mätarens mätområde. Därmed kan man även uppskatta den förväntade mätosäkerhet som detta leder till. Spridningen i förbrukningsmönster mellan olika typer av brukare är emellertid utomordentligt stor.

### 4.2.3 Tryck och temperatur

Tryck och temperatur är två influensstorheter som direkt påverkar alla typer av flödesmätare, eftersom de påverkar både mätaren, rörsystemet och vätskans egenskaper.

#### 4.2.3.1 Tryck

Trycket påverkar en flödesmätning huvudsakligen på tre olika sätt, nämligen

- risken för kavitation
- förändring av mätarens dimensioner
- förändring av vätskans volym

Vid praktisk flödesmätning, då man inte har laboratoriemässiga krav på noggrannhet, är den första aspekten i särklass viktigast. Om det statiska trycket i vätskan sjunker under mättnadstrycket för vätskans ångfas vid den aktuella temperaturen kan vätskan koka lokalt ("kavitera"). Därmed ändras flödet till ett tvåfas flöde, vilket kan ge utomordentligt stora mätfel. Samtidigt utsätts komponenter i kontakt med kollapsande ångblåsor för mycket stora mekaniska påkänningar, som i värsta fall kan fördärva en flödesmätare.

Eftersom gasers löslighet i en vätska ökar ungefär proportionellt med trycket kan luft eller andra gaser, som finns lösta i vätskan, frigöras vid en trycksänkning. Därmed kan man få problem med lokal tvåfas strömning utan att man underskridit ångans mättnadstryck. Särskilt i samband med viskösa vätskor (t.ex. glykolblandningar) kan stora mängder luft finnas lösta i vätskan, vilket kräver en långvarig och noggrann avluftning av systemet (försök alltid att placera avluftare i en hög punkt på sugsidan, där systemtrycket är lågt).

Vid kontroll av systemtrycket ur kavitationssynpunkt bör man mäta trycket nedströms flödesmätaren. Samtidigt måste man betänka att många mätare (speciellt motoriska mätare) har kraftiga förträngningar internt. Detta gör att det statiska trycket lokalt inuti mätaren kan vara mycket lägre än det återhämtade statiska trycket efter mätaren. Som grundregel bör man därför eftersträva att hålla det statiska trycket nedströms flödesmätaren 100 kPa (1 bar) över ångans mättnadstryck vid den aktuella temperaturen.

Den andra aspekten av tryckets inverkan yttrar sig i att ett förhöjt tryck ökar flödesmätarens volym. För displacementmätare, som innehåller mätkammare av en viss volym, betyder detta att varje varv på flödesmätaren innehåller en större volym än beräknat och mätaren kommer därför att visa för lite (negativt fel). Dessutom ökar läckaget mellan mätarhus och rotor, vilket ytterligare förstärker det negativa felet. På samma sätt ökar tvärsnittsarean för mätare som integrerar hastighet (alla typer utom displacementmätare). Därmed kommer en viss hastighet att ge ett större volymflöde vid ett högre tryck. Även för dessa mätare resulterar därmed ett förhöjt tryck i ett negativt fel.

Moderna flödesmätare har oftast mycket stabilt konstruerade mätarhus eller också lyckas man genom diverse konstruktiva knep klara tryckberoendet. T.ex. kan mätkammaren ligga inuti ett yttre hus och därmed vara omgiven av systemtrycket på alla sidor. Därför kan man nästan alltid försumma systemtryckets inverkan på mätarens dimensioner, men man bör kontrollera detta med mätarleverantören.

Även vätskor har en viss kompressibilitet, även om denna är mycket liten (för vatten ca  $5 \cdot 10^{-5}$  per bar). Om vätskan används vid ett annat tryck än det tryck som råder där mätningen sker kommer fel volymflöde att mätas. Vid rimliga trycknivåer kommer felet alltid att vara mindre än 0,1 % och kan därför försummas.



#### 4.2.3.2 Temperatur

Temperaturen påverkar flödesmätningen i huvudsak genom följande faktorer

- ändring av vätskans viskositet
- ändring av vätskans densitet
- ändring av övriga fysikaliska data för vätskan
- ändring av mätarens dimensioner
- inverkan på eventuell elektronik

Vid ökande temperatur minskar en vätskas viskositet exponentiellt ( $\mu = ae^{\frac{b}{T}}$ ). Detta innebär att Reynolds tal ökar med ökande temperatur vid konstant flöde, vilket i sin tur påverkar strömningsförhållandena i och kring flödesmätaren. Detta innebär omslag till turbulent flöde vid en lägre medelhastighet samt en flackare hastighetsprofil vid ett givet flöde. Samtidigt påverkas tryckfall och internt läckage i mätaren.

För displacementmätare innebär därför hög temperatur ett ökat internt läckage som resulterar i negativ felvisning. Även mätare av turbintyp tenderar att ge negativ felvisning men eftersom man konstruktivt ofta motverkar detta genom den strömningstekniska utformningen av mätaren är bilden komplicerad och kan variera inom flödesområdet. För Vortexmätare innebär en höjning av temperaturen att värdet på  $q_{min}$  sjunker och därmed ökar mätarens användbara flödesområde. Övriga mätartyper påverkas främst genom inverkan av viskositeten på hastighetsprofilen.

Ökande temperatur medför även minskande densitet. Vid bestämning av massflöde måste vätskans densitetsändring kompenseras för annars får man ett positivt fel vid ökande temperatur (för vatten ca 0,1 % för 10 K temperaturhöjning). Minskad densitet påverkar även visningen av volymflöde för vissa typer av mätare. Detta gäller i första hand motoriska mätare av turbintyp genom att rörelsemängden och därmed igångsättningsmomentet minskar vid en given strömningshastighet. Detta ger ökad negativ felvisning vid låga flöden. Den minskade densiteten motverkar i viss mån ökningen av Reynolds tal på grund av viskositetens minskning. Viskositetens temperaturberoende är emellertid mycket större än densitetens varför den tidigare slutsatsen fortfarande gäller.

Övriga fysikaliska data som påverkas av temperaturen och därmed kan påverka en flödesmätning är exempelvis ångtryck, konduktivitet, lubricitet och ljudhastighet. Ångtrycket ökar med temperaturen och ger därmed större risk för kavitation. Konduktiviteten ökar normalt med temperaturen, vilket ger säkrare mätförhållanden för induktiva flödesmätare. Lubriciteten är ett kvalitativt begrepp för att ange en vätskas smörjande förmåga. Den påverkar lagerfriktionen för motoriska mätare. Ljudhastigheten, slutligen, har betydelse för ultraljudsmätare av Dopplertyp. Ljudhastigheten  $c$  beror av bulkmodulen (kompressibiliteten)  $B$  och densiteten  $\rho$  enligt

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{ekv. 4.10})$$

Temperaturens inverkan på densiteten kommer därmed att påverka ljudhastigheten och således även flödesmätningen.

På samma sätt som ett ökat tryck ökar mätarhusets dimension, och därmed ger ett negativt fel, kommer även en förhöjd temperatur att ge ett negativt fel av denna anledning. Beträffande temperaturens inverkan kan denna oftast försummas utom vid mycket noggranna mätningar eller mycket stora temperaturändringar. Mätarhus av stål ändrar sin volym med ca  $33 \times 10^{-6}$  per K medan aluminium och plaster kan ge betydligt större ändringar.

Förstärkare och annan elektronik, som krävs av vissa typer av flödesmätare, är känsliga för temperatur. Mätare, som arbetar vid temperaturer som kraftigt avviker från rumstemperaturen, bör därför ha elektroniken separerad från själva flödesgivaren. För induktiva flödesmätare kan magnetfältets styrka och fördelning påverkas av temperaturen.

#### 4.2.4 Typ av vätska

Olika typer av vätskor påverkar olika typer av mätare på olika sätt genom sina fysikaliska egenskaper. De viktigaste faktorerna är

- viskositet
- densitet
- lubricitet
- elektrisk ledningsförmåga
- ljudhastighet

Inverkan av dessa olika parametrar har kort beskrivits redan under 4.2.3.2. För närmare detaljer hänvisas till beskrivningarna av de olika mätartyperna i SP-rapport 1991:13. Viskositet och densitet påverkar alla typer av flödesmätare mer eller mindre. Lubriciteten påverkar i första hand motoriska mätare, ledningsförmågan påverkar induktiva mätare och ljudhastigheten påverkar ultraljudsmätare av Dopplertyp. Framför allt vid användning av glykolblandningar vid låga temperaturer kan avsevärt högre viskositeter förekomma än vid användning av rent vatten (t.ex. är  $\mu = 0,55$  mPas för vatten vid 50°C och 40 mPas för 50 % propylenglykolblandning vid -20°C).

En speciell effekt, som utnyttjas i vissa värmesystem, är den så kallade Tom's effekt. Denna effekt innebär att friktionsmotståndet minskar kraftigt vid tillsats av vissa typer av högmolekylära additiver. Detta utnyttjas för att minska pumparbetet i värmedistributions-systemet. Enligt några undersökningar kan dessa tillsatser medföra stora mätfel för vissa typer av mätare (3-7 % för mätare av turbintyp, 30 % för fluidistormätare). Rimligtvis påverkas alla typer av tryckdifferensmätare av dessa tillsatser.

## 4.2.5 Typ av utsignal

Två huvudtyper av utsignaler kan särskiljas, analoga och digitala. Många flödesmätare med elektrisk utsignal har både analoga och digitala utgångar parallellt, men mätprincipen som sådan ger antingen en analog eller en digital signal. Detta ger upphov till två principiellt skilda sätt att beräkna flödet.

### 4.2.5.1 Analog utsignal

Den analoga utsignalens upplösning (se definitionerna) karaktäriseras av skaldelen  $d$ . Detta kan t.ex. avse graderingen mellan skalstrecken på en svävkroppsmätare eller skaldelen  $d_d$  på en digital multimeter, som används för att läsa en analog ström utgång. Flödet bestäms i princip som momentanvärdet

$$q = K \cdot U \quad (\text{ekv. 4.11})$$

där  $K$  är givarfaktorn och  $U$  är utsignalen. Sättet att bestämma utsignalen ger upphov till ett upplösningsfel

$$\frac{\Delta q}{q} = \pm \frac{d}{U} \quad (\text{ekv. 4.12})$$

Använder man t.ex. en ström utgång 4-20 mA måste strömmen läsas med ett instrument med en skaldel av högst  $12 \mu\text{A}$  för att upplösningsfelet skall vara mindre än 0,1 % vid  $q_n$  ( $q_{\text{max}}$  ger  $i=20$  mA,  $q=0$  ger  $i=4$  mA och  $q=0,5 q_{\text{max}}$  ger  $i=12$  mA).

Upplösningsfelet kan betraktas som ett systematiskt fel (en förväntad mätosäkerhetskomponent) vid en enstaka avläsning. Detta systematiska fel  $d/U$  kan minskas genom upprepade mätningar och samtidigt blir det istället ett tillfälligt fel (en skattad osäkerhetskomponent). Om sannolikheterna för positiva och negativa felavläsningar är lika stora blir upplösningsfelet binomialfördelat ( $n, 0.5$ ), där  $n$  är antalet upprepningar.

#### 4.2.5.2 Digital utsignal

Om flödesmätaren ger en digital utsignal (t.ex. på en frekvensutgång eller ett elektromekaniskt räkneverk) motsvarar varje puls en viss volym. Detta värde ger den digitala skaldelen. För att bestämma flödet måste man därför räkna tillräckligt många pulser  $N$  under en viss tidsperiod  $\tau$ ,

$$q = K \cdot U = K \cdot f = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} K \cdot f dt = K \cdot \frac{N}{\tau} \quad (\text{ekv. 4.13})$$

där utsignalen  $U$  motsvaras av en frekvens  $f$ . Med denna metod kan man endast få ett medelvärde på flödet under tidsperioden  $\tau$ . I vissa fall omvandlas frekvenssignalen till en analog ström- eller spänningsutgång. Denna analoga utgång visar ett medelvärde av flödet under integreringsperioden för frekvens-spänningsomvandlaren.

I speciella applikationer kan man snabba upp mätförloppet genom att istället för antalet pulser mäta tiden mellan pulserna. Fortfarande gäller emellertid att tidsavståndet mellan pulserna från den primära flödesgivaren bestämmer den minsta mätperiodens längd för att erhålla en given osäkerhet,

$$\frac{\Delta q}{q} = \pm \frac{2}{N} = \pm \frac{2}{f \cdot \tau} = \pm \frac{2K}{q \cdot \tau} \quad (\text{ekv. 4.14})$$

Detta ger det minsta antalet pulser  $N$  och motsvarande mätperiod  $\tau$  vid ett givet flöde  $q$ . Felet enligt ekv 4.14 härrör från 2 avläsningar, en i början och en i slutet av mätperioden. Därmed blir det sannolika felet  $\sqrt{2/N}$  om mätningen upprepas ett stort antal gånger.

Som ett exempel kan nämnas att små varmvattenmätare ofta har en volympuls av  $2,5 \text{ dm}^3$ . Vid ett värmebärande flöde av  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  måste mätperioden vara minst 5 h för att upplösning-felet skall understiga 0,1 %. Vid denna storlek av flöde (dellastförhållanden) har man normalt inte så långa kontinuerliga flödesperioder och vid noggrann mätning måste man därför skaffa flödesmätare med högre upplösning eller gå över till att mäta pulsernas tidsavstånd.

Ett annat fel, som kan uppstå vid montering av pulsgivare på vissa typer av displacementmätare, är s.k. cykliska fel. Många typer av displacementmätare (t.ex. ringkolv-mätare) har ett osymmetriskt arbetsförlopp med fyllning och tömning av mätkammare. Detta gör att om pulsgivaren ger fler än 1 puls per varv så kommer varje puls under ett visst varv inte att motsvara samma volym. Man bör för denna typ av mätare därför betrakta upplösningen som volymen per arbetsvarv för mätaren och inte volymen per puls.

## 4.2.6 Dynamik

Tre huvudtyper av dynamiska fel uppträder i samband med flödesmätning. Dessa beror på

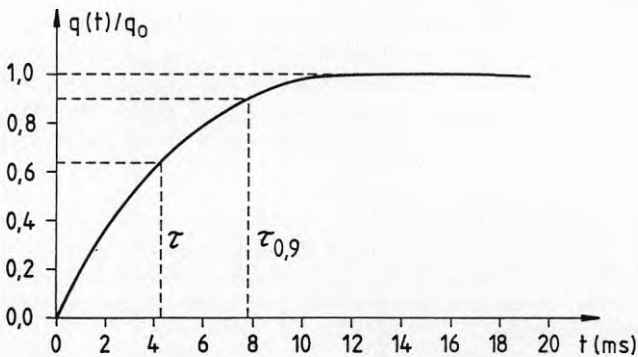
- flödesmätarens dynamiska egenskaper (fysikaliska begränsningar).
- signalbehandlings dynamiska egenskaper.
- hur stor del av mätperioden som flödet ligger utanför flödesmätarens normala mätområde ( $q_{\min} - q_{\max}$ ).

Det första felet beror av flödesmätarens dynamiska egenskaper i relation till hur flödet varierar i tiden medan det andra felet beror av flödesmätarens statiska egenskaper (dess mätområde) och flödets variationer. Enligt Fahlén, 1988, blir de dynamiska felen för de flesta mätartyper mycket små. Endast för vissa typer av turbinflödesmätare kan dynamiska fel bli stora på grund av olika egenskaper vid start och stopp.

### 4.2.6.1 Flödesmätarens dynamiska egenskaper

Många flödesmätare saknar specifikationer om de dynamiska egenskaperna. För mätare i industriellt utförande förekommer i vissa fall angivelser, men av varierande kvalitet. För turbinflödesmätare anges ofta den enkla tidskonstanten  $\tau$  (0-63 % av stegsvaret, se även figur 3.17) medan det i övrigt förekommer stigtider för 0-99 %, 10-90 % eller helt ospecificerade stigtider.

Motoriska flödesmätare kan normalt betraktas som första ordningens system och deras dynamiska egenskaper karakteriseras därför av en enkel tidskonstant (se exempel i figur 4.7).



Figur 4.7. Exempel på stegsvar för en turbinflödesmätare ( $q_0$  är jämviktsflödet).

För motoriska mätare av turbintyp måste man beakta att tidskonstanten vid en språngartad ökning av flödet normalt är betydligt kortare än vid en språngartad sänkning av flödet. Detta ger upphov till så kallad efterrotation, vilket kan ge stora mätfel vid mycket korta och häftiga flödespulser (exempelvis stora varmvattentappningar). Observera att i många fall kan skaldelen ("volypulsen") vara den begränsande dynamiska faktorn för motoriska mätare med pulsutgång (jämför med Shannons "samplingsteorem" nedan).

Övriga typer av flödesmätare har mer komplicerade dynamiska egenskaper. Många gånger är stegsvaret beroende av en specifik lösning av signalbehandlingen eller av någon avkänningsfrekvens ("samplingshastighet"). Sålunda arbetar moderna induktiva flödesmätare ofta med en ganska låg, fast matningsfrekvens ("pulsad likspänningsmatning") och även ultraljudsmätare arbetar med en bestämd frekvens som bestäms av ljudhastigheten och geometrin. Om avkänningsfrekvensen är  $f_0$  kan enligt Shannons "samplingsteorem" endast ändringar med frekvensen  $f < 0,5 \cdot f_0$  detekteras. Detta sätter en undre gräns för dessa mätares stigtid och mätaren fungerar i viss mån som ett lågpasfilter. Oftast finns dessutom någon form av extra lågpasfilter inbyggt i den efterföljande signalbehandlingen, vilket ytterligare begränsar de dynamiska egenskaperna. För induktiva mätare är emellertid egenskaperna oftast symmetriska vid stigande och fallande flöde. Man bör emellertid fråga efter praktiskt uppmätta tidskonstanter med specifikation av hur dessa är bestämda.

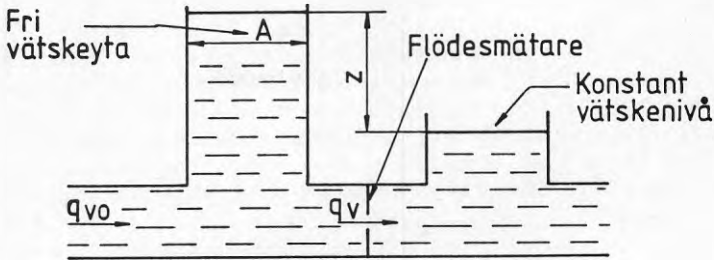
Ett specialfall av dynamiska problem får man vid pulserande flöden (se definitionerna) och användning av flödesmätare med olinjär karaktäristik, t.ex. strypflänsar. För dessa mätare är flödet proportionellt mot roten ur tryckdifferensen (jämför ISO 5167),

$$q = K\sqrt{\Delta p} \quad (\text{ekv. 4.15})$$

Flödets medelvärde ges av  $(K\sqrt{\Delta p})_{\text{medel}}$  medan man ofta mäter  $K\sqrt{(\Delta p)_{\text{medel}}}$ , vilket inte nödvändigtvis är samma sak.

Mycket stora relativa variationer i differenstrycket (d.v.s. höga värden på förhållandet mellan roten ur det kvadratiske medelvärdet på tryckvariationerna och tryckdifferensens tidsmedelvärde) behöver inte nödvändigtvis innebära stora relativa variationer i flödet (d.v.s. höga värden på förhållandet mellan roten ur det kvadratiske medelvärdet på flödesvariationerna och flödets medelvärde).

I specialfallet när differenstrycksmätning används för att mäta pulserande flöden finns anvisningar i ISO Standards Handbook 15, Technical Report 3313. Vid mätning på gasflöden kan flödesvariationer från kompressorer eller liknande dämpas ut genom att infoga ett utjämningskäril mellan störningen och mätstället. Om fluiden är en vätska, och därmed kan betraktas som inkompressibel, måste utjämningskärilet ha karaktären av expansionskäril med kontakt mot en gasvolym (se figur 4.8 och 4.9). Motsvarande resonemang kan föras för dämpning av variationer i överföringsledningen mellan mätuttag och tryckgivare.



Figur 4.8. Minskning av flödespulsationer genom användning av svallschakt.  $q_{vo}$  är det pulserande flödet och  $q_v$  är flödet vid flödesmätaren.

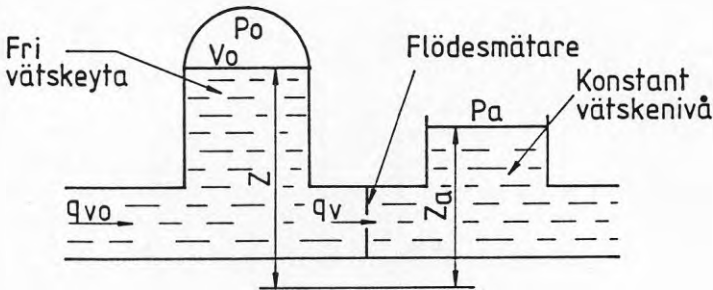
För att effektivt dämpa flödespulsationer med ett svallschakt enligt figur 4.8 bör förhållandet

$$(z \cdot A \cdot f) / q_v$$

vara så stort som möjligt.  $z$  är tidsmedelvärdet på nivåskillnaden mellan vätskeytorna och  $f$  är pulsationsfrekvensen. På samma sätt bör förhållandet

$$\frac{V_0 \cdot f}{q_v} \cdot \frac{\Delta p_g}{p_0 \left(1 + \frac{\rho_g V_0}{A p_0}\right)}$$

vara så stort som möjligt när ett trycksatt expansionskärl enligt figur 4.9 används för att dämpa ut flödespulsationer.  $\rho$  är luftens densitet,  $p_0$  trycket i luftvolymen  $V_0$  och  $\Delta p_g$  är tidsmedelvärdet av tryckdifferensen mellan tryckkärlet och den mest avlägsna delen av mätsystemet.



Figur 4.9. Minskning av flödespulsationer genom användning av ett trycksatt expansionskärl.

#### 4.2.6.2 Signalbehandlings dynamiska egenskaper

Ett speciellt problem, ur signalbehandlings synpunkt, utgör exempelvis fluidistor-  
mätare och vortexmätare, som har en flödesproportionell frekvensutgång. Dessa mätares  
dynamiska egenskaper kommer att variera med frekvensen och därmed även med flödet.  
Därmed kan ett stegsvar inte karakteriseras av en enkel tidskonstant på samma sätt som  
för t.ex. en turbinmätare med hög upplösning. Denna aspekt berör även andra mätartyper  
med frekvensutgång om denna ger en lägre gräns än den grundläggande fysikaliska  
principen medger.

#### 4.2.6.3 Flödesområdets begränsningar av dynamiken

Utänför flödesmätarens normala mätområde (under  $q_{\min}$ ) kommer mätfelet att öka mycket  
snabbt (för de flesta mätare blir felet negativt). Därmed kommer flödesmätaren att visa  
kraftigt fel under perioder när flödet ökar från noll eller minskar mot noll. I praktiska in-  
stallationer sker ökningen oftast under en viss tid och därför ger flödesmätarens svar på  
en momentan flödesökning inte hela det dynamiska mätfelet. Det totala dynamiska felet  
blir beroende både av flödespulsationernas amplitud och deras tidsförlopp. En övre gräns  
för felet kan uppskattas med antagande av att mätaren visar noll för flöden under startvär-  
det  $q_s$  och att visningen ökar linjärt till  $q_{\min}$ , där mätaren börjar visa helt korrekt. Enligt  
Fahlén, 1988, kan felet i de flesta fall försummas. Endast när flödet ökar och minskar  
under en stor del av mätperioden kan detta fel bli betydande.

Samma typ av resonemang kan föras för mätare som har en inbyggd "low flow cut off"  
d.v.s. en begränsning som förhindrar att en kvarstående nollpunktssignal ger fel, som in-  
tegreras med tiden även då flödet egentligen är noll. Detta blir en form av konstgjort  
startvärde,  $q_s$ .



### 4.3 Några vanliga mätprinciper

Eftersom flödesmätning tillhör en av de mera besvärliga uppgifter som en mättekniker kan träffa på har uppfinningsrikedomen, när det gäller att hitta på nya mätprinciper, varit stor. Medan det finns tre typer av temperaturgivare som totalt dominerar marknaden, och endast några få kommersiellt tillgängliga typer utöver dessa, finns det hundratals olika typer av flödesmätare. Av dessa förekommer ett tiotal typer i samband med flödesmätning i värmesystem.

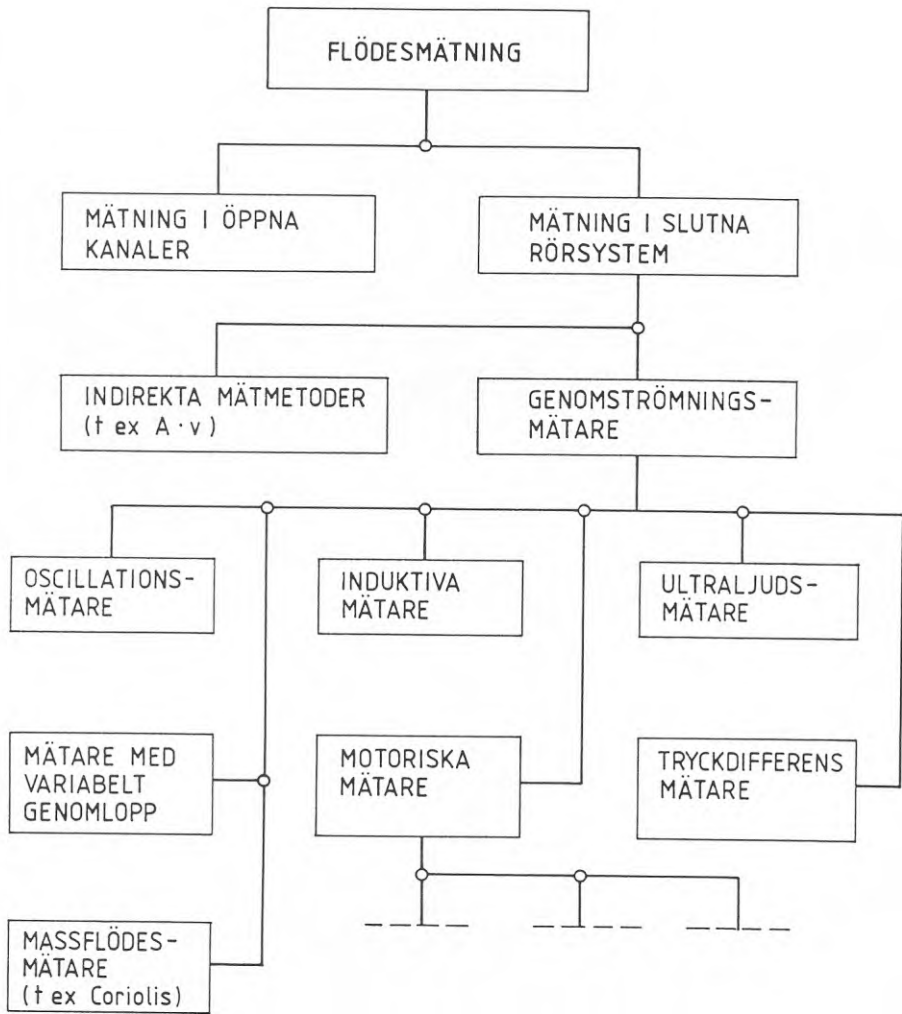
Allmänt sker flödesmätning både i rörsystem och öppna kanaler. Eftersom denna rapport endast behandlar värmemätning i rörbundna vätskesystem behandlas inte mätning i öppna kanaler över huvudtaget. Två huvudprinciper för mätning av rörbundna flöden används. En möjlighet är att mäta flödet indirekt, t.ex. genom att mäta den lokala hastigheten i en eller flera punkter och därefter med hjälp av rørets tvärsnittsytta beräkna volymflödet. En annan och i samband med värmemätning vanligare metod, är att använda någon form av genomströmningsmätare (d.v.s flödesmätare genom vilket hela flödet passerar). Endast kategorin genomströmningsmätare kommer att behandlas i denna rapport.

I figur 4.10 finns en schematisk uppsplättning av flödesmätare efter olika mätprinciper. De motoriska mätarna finns ytterligare uppdelade i undergrupper i figur 4.11. Av de mätare som redovisas i dessa figurer kommer några att beskrivas i denna rapport. Vissa av dessa mätare är idag vanligt förekommande vid värmemätning medan andra är nyare på marknaden och ännu väntar på sina genombrott. Samtliga typer av mätare, som finns typgodkända för värmemätning av Statens provningsanstalt, är representerade i nedanstående presentation.

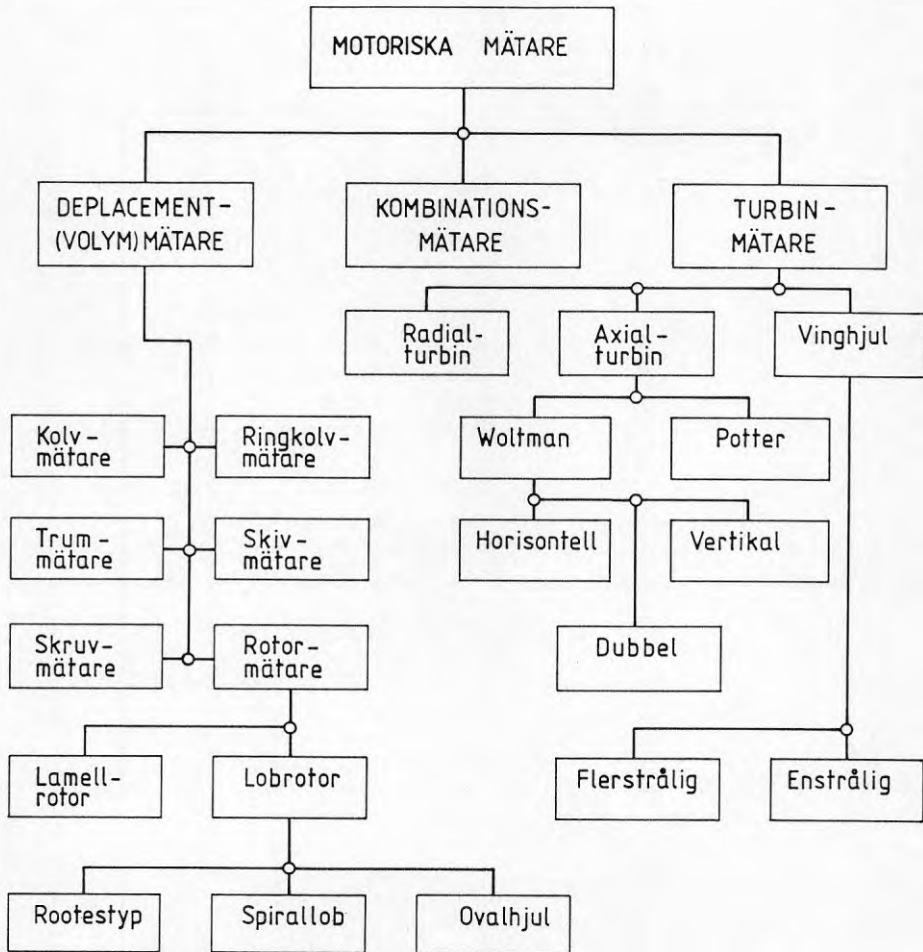
Varierande behov och mätsituationer ger utrymme för ett stort utbud av mätare. Följande typer kommer att ges en kort sammanfattning i detta kapitel och en mera ingående beskrivning i SP-rapport 1991:13,

- vinghjulsmätare
- woltmanmätare
- ringkolvmätare
- induktiva mätare
- ultraljudsmätare
- vortexmätare
- fluidistormätare
- coriolismätare
- tryckdifferensmätare

Observera att alla angivelser vid presentationen av olika mätartyper är ungefärliga värden för normalt förekommande mätare. Stora variationer kan förekomma beroende på fabrikat, installation m.m. I 4.3.1-4.3.9 presenteras en sammanställning av för- och nackdelar samt användningsområden för några vanliga flödesmätare.

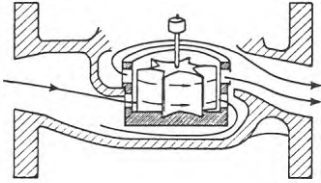


Figur 4.10. Klassificering av flödesmätare efter olika mätprinciper.



Figur 4.11. Klassificering av motoriska flödesmätare efter olika mätprinciper.

### 4.3.1 Vinghjulsmätare



Mätning av kall- och varmvattenflöden i vatten- och värmesystem. Vinghjulsmätare används i första hand för mindre flöden ( $q_n < 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $D_n < 80 \text{ mm}$ ).

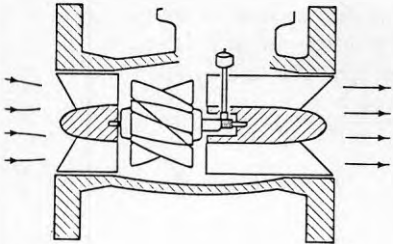




- Billiga
- Kräver endast korta raksträckor (minst  $3 \cdot 5 \cdot D_n$  före och  $1 \cdot 3 \cdot D_n$  efter mätaren, men enstråliga mätare kan kräva mer.
- Förhållandevis tåliga
- Mycket stort mätområde ( $q_{\max}/q_{\min}$  ca 100-200)
- Lågt startvärde
- Ofta finns både mekaniskt och elektriskt räkneverk (ger säkerhet mot strömbrott)
- Typgodkända mätare finns i stort utbud

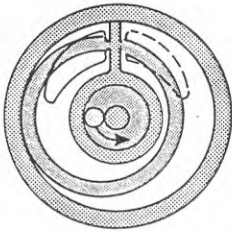




- Begränsad noggrannhet (1-5 %)
- Påverkas kraftigt av viskositetsändringar, framför allt vid låga flöden (olämplig för mätning i t.ex. köldbärarkretsar)
- Temperaturberoende, framför allt vid låga flöden (max 1-2 % för 10 K temperaturändring)
- Efterrotation kan i enstaka fall ge dynamiska mätfel
- Viss risk för lagerslitage och försmutsning
- Relativt stort tryckfall
- Pulsutgångar har ofta dålig upplösning (avsedda för årsdebitering)
- Kräver någorlunda stort systemtryck (för att undvika kavitation)




### 4.3.2 Woltmanmätare

	<p>Mätning av kall- och varmvattenflöden i renvatten- och värmesystem. Woltmanmätare används i första hand för medelstora flöden.  <math>(15 &lt; q_n &lt; 2000 \text{ m}^3/\text{h}, 50 &lt; D_n &lt; 500 \text{ mm})</math></p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Måttligt pris</li> <li>- Måttligt tryckfall</li> <li>- Ganska brett mätområde (<math>q_{\max}/q_{\min}</math> ca 50-100)</li> <li>- Relativt enkla</li> <li>- Ofta finns både mekaniskt och elektriskt räkneverk (ger säkerhet mot strömavbrott)</li> <li>- Typgodkända mätare finns</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begränsad noggrannhet (1-5 %)</li> <li>- Påverkas kraftigt av viskositetsändringar, framför allt vid låga flöden (olämplig för mätning i t.ex. köldbärarkretsar)</li> <li>- Temperaturberoende, framför allt vid låga flöden (max 1-2 % för 10 K temperaturändring)</li> <li>- Kräver ostörda raksträckor (minst <math>10 \cdot D_n</math> före och <math>5 \cdot D_n</math> efter mätaren, känsliga för skruvflöde)</li> <li>- Pulsutgångar har ofta dålig upplösning</li> <li>- Viss risk för lagerslitage och försmutsning</li> <li>- Kräver någorlunda stort systemtryck (för att undvika kavitation)</li> </ul>

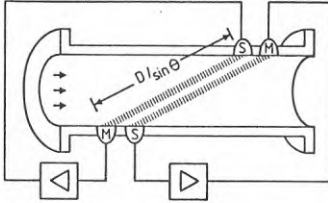
### 4.3.3 Ringkolvmätare

	<p>Mätning av de flesta typer av vätskor. Ringkolvmätare används i första hand för små flöden (<math>q_n &lt; 15 \text{ m}^3/\text{h}</math>, <math>D_n &lt; 50 \text{ mm}</math>).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stort mätområde (<math>q_{\text{max}}/q_{\text{min}}</math> ca ca 100-200)</li> <li>- Liten inverkan av viskositet (lämplig för mätning av de flesta vätskor)</li> <li>- Liten inverkan av temperatur</li> <li>- Hög noggrannhet (0,5-1 %)</li> <li>- God reproducerbarhet (0,1-0,2 %)</li> <li>- I stort sett okänslig för störda strömningsförhållanden</li> <li>- Ren volymmätning gör mätaren särskilt lämpad för intermittenta flöden och små mängder (t.ex. varmvattentappning)</li> <li>- Ofta både mekaniskt och elektriskt räkneverk (ger säkerhet vid strömavbrott)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stort tryckfall</li> <li>- Pulsar flödet (kan störa ett jämnt flöde)</li> <li>- Känslig mot föroreningar (viktigt med bra filter)</li> <li>- Mätare för stora flöden blir tunga och skrymmande</li> <li>- Kräver någorlunda stort systemtryck (för att undvika kavitation)</li> <li>- Typgodkända mätare saknas (typgodkända mätare finns dock för andra applikationer än värmemätning)</li> </ul>

#### 4.3.4 Induktiva mätare

	<p>Mätning av vätskor med ledningsförmåga <math>&gt;5</math> mS. Induktiva mätare finns för i stort sett alla förekommande flöden (<math>0,002 \leq q_n \leq 100.000 \text{ m}^3/\text{h}</math>, <math>3 \leq D_n \leq 2000 \text{ mm}</math>).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ofta försedda med inställbart mätområde (<math>q_{\max}/q_{\min}</math> ca 10-100)</li> <li>- Inget extra tryckfall</li> <li>- Inga rörliga delar i vätskan</li> <li>- Hög noggrannhet (0,5-1 %)</li> <li>- God reproducerbarhet (0,05-0,2 %)</li> <li>- Tål kraftigt försmutsade vätskor</li> <li>- Okänslig för viskositetsändringar (går bra att mäta köldbärandeblandningar om ledningsförmågan är tillräckligt hög)</li> <li>- Liten risk för kavitation i mätaren</li> <li>- Okänslig för temperaturändringar</li> <li>- Finns ofta med både analoga- och pulsutgångar, ofta med valbar upplösning</li> <li>- Måttligt känslig för störda strömningsförhållanden</li> <li>- Typgodkända mätare finns</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dyra (relativt billiga små mätare finns dock)</li> <li>- Kräver vätskor med konduktivitet <math>&gt;1</math> mS (specialmätare för konduktivitet <math>&lt;1</math> mS finns)</li> <li>- Restsignal vid nollflöde kräver ofta att mätaren förses med "lågflödesavbrott" ("low flow cut-off")</li> <li>- Typer med låg matningsfrekvens kan ge dynamiska fel</li> <li>- Kräver noggrannhet vid installation (mätarens läge, jordning av rörsystem etc)</li> <li>- Kräver raksträckor (<math>10 \cdot D_n</math> före och <math>5 \cdot D_n</math> efter mätaren. Små mätare har dock i viss mån inbyggda raksträckor. Okänslig för hastighetsprofilen om den är symmetrisk men känslig för skruvflöden)</li> <li>- Kan ge problem vid viss typ av försmutsning (speciellt magnetit och fettbeläggningar)</li> </ul>

### 4.3.5 Ultraljudsmätare



Mätning på de flesta typer av vätskor. I första hand avsedda för turbulenta flöden. Lämplig för stora dimensioner och "svåra" vätskor när alternativa mätare saknas eller blir för dyra. Finns för de flesta flöden ( $q_n > 1 \text{ m}^3/\text{h}$ ).



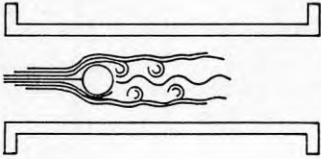


- Normalt inget extra tryckfall
- Alternativ för montering på befintliga rör finns
- Inga rörliga delar i vätskan
- Få begränsningar beträffande typ av vätska (kan användas för köldbärarflöden)
- Löptidsdifferensmätare kan ge mycket god noggrannhet vid små flöden
- Finns med stort urval av signalutgångar (analoga eller frekvenssignaler)
- Liten risk för kavitation i mätaren
- Prismässigt gynnsamma för stora dimensioner
- Finns i dimensioner för de flesta förekommande flöden
- Typgodkänd mätare finns



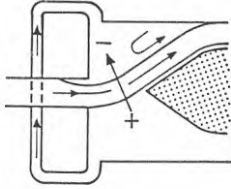


- Mycket känslig för störda strömningsförhållanden (undantag finns dock)
- Kräver raksträckor ( $10 \cdot 50 \cdot D_n$  före och  $5 \cdot 10 \cdot D_n$  efter mätaren (undantag finns bland små mätare).
- Känslig för viskositets- och temperaturändringar som påverkar Reynolds tal
- Kan vara känslig för rörvibrationer
- Vissa typer påverkas direkt av ljudhastigheten i den aktuella vätskan
- Begränsat mätområde ( $q_{\max}/q_{\min}$  ca 5-10).  
Undantag finns bland små mätare med  $q_{\max}/q_{\min}$  ca 100-200.
- Begränsad noggrannhet i normala installationer (kan dock ge mycket god noggrannhet och reproducerbarhet under ideala betingelser).



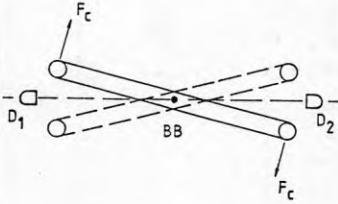


### 4.3.6 Vortexmätare

	<p>Mätning på någorlunda rena och lättflytande vätskor. I första hand för medelstora, turbulenta flöden (<math>Re &gt; 10000</math>, <math>30 &lt; q_n &lt; 600 \text{ m}^3/\text{h}</math>, <math>50 &lt; D_n &lt; 200 \text{ mm}</math>).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Måttligt tryckfall</li> <li>- Måttligt pris (bra alternativ till mätfläns)</li> <li>- Inga rörliga delar i vätskan</li> <li>- Ganska bra noggrannhet (1-2 %)</li> <li>- Ganska bra reproducerbarhet (0,1-0,5 %)</li> <li>- Finns med stort urval av signalutgångar (analoga eller frekvenssignaler)</li> <li>- Måttlig inverkan av viskositet och temperatur så länge <math>Re &gt; 10000</math></li> <li>- God nollpunkts- och långtidsstabilitet</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begränsat mätområde (<math>q_{\max}/q_{\min}</math> ca 10-15)</li> <li>- Visar noll vid låga flöden</li> <li>- Kräver raksträckor (<math>10 \cdot D_n</math> före och <math>5 \cdot D_n</math> efter mätaren)</li> <li>- Viss känslighet för temperatur och viskositet (Reynolds tal), ej lämplig för köldbärande flöden vid låga temperaturer</li> <li>- Beroende på typ av detektor kan mätaren vara känslig för försmutsning eller vibrationer</li> <li>- Tygodkända mätare saknas</li> <li>- Kräver någorlunda stort systemtryck (för att undvika kavitation)</li> </ul>

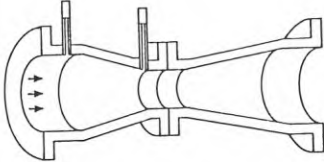


### 4.3.7 Fluidistormätare

	<p>Mätning på någorlunda rent varmvatten. I första hand för små och medelstora flöden (<math>2 &lt; q_n &lt; 250 \text{ m}^3/\text{h}</math>, <math>25 &lt; D_n &lt; 150 \text{ mm}</math>).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Måttligt pris</li> <li>- Ger pulssignal direkt (kan fås med omvandling till analog utsignal)</li> <li>- Ganska bra upplösning</li> <li>- God nollpunktsstabilitet</li> <li>- Typgodkända mätare finns</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begränsat mätområde (<math>q_{\text{max}}/q_{\text{min}}</math> ca 10-20)</li> <li>- Måttligt god reproducerbarhet (0,5-1 %)</li> <li>- Känslig för inverkan av viskositet och temperatur (olämplig för köldbärarflöden)</li> <li>- Känslig för försmutsning och vibrationer</li> <li>- Kräver långa raksträckor (<math>10-50 \cdot D_n</math> före och <math>5-10 \cdot D_n</math> efter mätaren)</li> <li>- Kräver visst systemtryck (för att undvika kavitation)</li> </ul>

## 4.3.8 Coriolismätare

	<p>Mätning på de flesta typer av vätskor, speciellt när massflöde ska mätas. I första hand för små och medelstora flöden (<math>0,5 &lt; q_n &lt; 40 \text{ m}^3/\text{h}</math>, <math>6 &lt; D_n &lt; 40 \text{ mm}</math>).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ganska stort mätområde (<math>q_{\max}/q_{\min}</math> ca 20-100)</li> <li>- God noggrannhet (0,3-1 %)</li> <li>- God reproducerbarhet (0,05-0,2 %)</li> <li>- Ganska okänslig för försmutsning</li> <li>- Ganska okänslig för systemtryck (tål en begränsad gasbildning)</li> <li>- Ganska okänslig för temperatur och viskositet</li> <li>- Ganska okänslig för strömningstyp (kräver i princip inga raksträckor)</li> <li>- Finns med stort urval av signalutgångar</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Högt pris</li> <li>- Kan vara känslig för vibrationer (kräver fast montering på solitt underlag)</li> <li>- Ganska stort tryckfall</li> <li>- Fortfarande ganska oprövad (endast ett fåtal fabrikat finns)</li> <li>- För närvarande saknas typgodkända mätare</li> </ul>

### 4.3.9 Tryckdifferensmätare (mätflänsar, dysor, munstycken)

	<p>Mätning på de flesta typer av rena, lättflytande vätskor. I första hand för medelstora och stora flöden i det turbulenta området (<math>D_n &gt; 50</math> mm).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mycket stor samlad erfarenhet finns av tryckdifferensmätare</li> <li>- Mycket väl standardiserad</li> <li>- Viss noggrannhet är garanterad genom tillverkningsspecifikation även utan våtkalibrering</li> <li>- Enkel och robust (inga rörliga delar)</li> <li>- Ganska bra noggrannhet (1-2 %)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dåligt mätområde (<math>q_{max}/q_{min}</math> ca 5)</li> <li>- Kräver extra differenstryckgivare om elektrisk utsignal önskas</li> <li>- Kräver långa raksträckor (<math>10-80 \cdot D_n</math> före och <math>4-8 \cdot D_n</math> efter mätaren)</li> <li>- Mycket olinjär</li> <li>- Känslig för nötning och avlagringar</li> <li>- Ganska stort tryckfall</li> <li>- Typgodkända mätsystem saknas</li> </ul>

## 4.4 Kalibrering

En flödesmätning kan aldrig bli noggrannare än den spårbarhet med vilken flödesmätarens kalibrering är säkrad. Eftersom kalibrering av flödesmätare är dyrare, mer tidsödande och osäkrare än kalibrering av temperaturgivare tenderar kalibreringsintervallen att bli alltför långa. Mätningens osäkerhet ökas därmed genom att man inte med säkerhet vet hur flödesmätarens karaktäristik påverkas av dess utsittningstid. Det är dessutom ofta mycket besvärligt att kontrollera flödesmätare som redan sitter monterade.

En temperaturgivare monterad i dykrör kan man ganska lätt ta ur dykröret och kontrollera i ett bad eller jämföra mot en annan givare, som stoppas ner i samma dykrör. För att en flödesmätare ska kunna kontrolleras måste ofta hela systemet stängas och vätskan tappas ur om man inte varit förutseende i samband med installationen (jämför kapitel 4.1).

Nedan ges några hållpunkter för vad som behöver beaktas i samband med kalibrering av flödesmätare, exempelvis

- val av kalibreringsmetod
- kalibreringens spårbarhet
- kalibreringsintervall
- antal kalibreringspunkter
- kalibreringsbetingelser

### 4.4.1 Val av kalibreringsmetod

Kalibreringsmetoden måste anpassas efter typen av flödesmätare. I många fall kan t.ex. räkneverkets upplösning vara en begränsande faktor, vilket gör att stora provvolymmer måste användas. Vissa flödesmätare har signalbehandling med lågpasfilter, vilket gör det olämpligt att prova med stående start och stopp etc.

Två principiellt olika filosofier finns för kalibrering av flödesmätare,

- kalibrering i laboratorium
- kalibrering på plats (in situ)

Oavsett vilken av dessa filosofier som tillämpas kan ett flertal av de metoder som beskrivs i 4.4.6-7 vara tillämpliga. Generellt kan man säga att kalibrering på plats är att föredra om den kan utföras med tillräcklig noggrannhet. Eftersom installationen av en flödesmätare ofta utgör den största enskilda osäkerheten (jämför diskussionen i 4.2.1) är det viktigt att i största mån eliminera denna. Enda möjligheten att helt förvissa sig om detta är med hjälp av in situ kalibrering. Detta har dessutom flera andra fördelar. Man slipper skaderisker i samband med in- och urmontering samt transport av flödesmätaren. Kalibreringen sker med den vätska, temperatur, tryck och rörsystem som tillhör installationen och inkluderar därmed dessa influenstorheter i den totala givarfaktorn. Med rätt förberedelser kan man dessutom undvika dyrbara eller på annat sätt besvärande stillestånd medan flödesmätaren är på kalibrering.

Vid kalibrering i laboratorium är det viktigt att göra klart för kalibreringslaboratoriet hur flödesmätaren kommer att användas i praktiken. Tillsammans med laboratoriet bör man diskutera sig fram till hur mätaren skall kalibreras och hur mycket av den yttre installationen kring mätaren som skall tas med i kalibreringen (raka rörsträckor, signalbehandling m.m.). Många flödesmätare har flera signalsnitt (t.ex. strömång, högfrequensutgång och skalad pulsutgång). Ofta är det enklast för kalibreringslaboratoriet att använda en pulsutgång medan brukaren kanske använder sig av en analog utsignal som ansluts till en dator. För att säkra spårbarheten måste därvid även den elektroniska signalbehandlingen och eventuella beräkningsrutiner kalibreras.

#### 4.4.2 Kalibreringens spårbarhet

Vare sig en kalibrering utförs på plats i en anläggning eller i ett laboratorium måste hela mätkedjan säkras. Om kalibreringen utförs i egen regi måste man vara medveten om att det inte räcker med att det volymkärl, den våg, referensmätare eller annan normal som används har en spårbar kalibrering. Den osäkerhet som förknippas med normalen är oftast försumbar i förhållande till metodfelet.

Detta problem slipper man om professionella kalibreringslaboratorier anlitas, t.ex. riksmätplatsen för volym/flöde (Statens provningsanstalt) eller någon av de auktoriserade mätplatser som finns runt om i landet. Genom sin medverkan i den svenska mätplatsorganisationen och genom internationellt utbyte säkras en kunskap hos dessa laboratorier om sina respektive metodfel. Några laboratorier (t.ex. Statens provningsanstalt) utför även in situ kalibreringar. Kalibreringens osäkerhet sammansätts att flera osäkerheter av vilka de viktigaste är

- normalens osäkerhet
- metodens reproducerbarhet
- flödesmätarens reproducerbarhet
- flödesindikeringens upplösning
- växelverkan mellan kalibreringsanläggningen och kalibreringsobjektet

Dessa osäkerheter omfattar både förväntade och skattade mätosäkerhetskomponenter (se kapitel 2). När sedan den totala mätosäkerheten från kalibreringsförfarandet sammanlagras med övriga mätosäkerheter från en flödesbestämning kan kalibreringens osäkerhet helt betraktas som en förväntad mätosäkerhet. Denna osäkerhet bestäms inte genom uppredning i denna mätsituationen. Detta exempel belyser också hur den traditionella indelningen av mätosäkerhet i tillfälliga och systematiska fel blir oegentlig i vissa praktiska mätsituationer. De tillfälliga felen från kalibreringen betraktas plötsligt som systematiska vid användningen av ett kalibreringsbevis. Ur användarens synpunkt kan osäkerheterna inte artbestämmas utan endast skiljas genom sättet att bestämma deras värden. Det är viktigt att kalibreringens osäkerhet är angiven på samma sätt och med samma talfaktor som övriga osäkerheter om man behöver ta hänsyn till denna. Många gånger kan emellertid kalibreringens osäkerhet försummas i förhållande till övriga osäkerheter i mätningen. De noggrannaste kalibreringar som idag kan utföras i laboratorium har en total mätosäkerhet av ca 0,05-0,1 %. Metodfelet är härvid den helt dominerande osäkerhetskällan.

### 4.4.3 Kalibreringsintervall

På samma sätt som i fallet med temperaturgivare (3.5.4) är det inte möjligt att generellt ange kalibreringsintervall för flödesmätare. Endast långvarig erfarenhet om olika typer av mätares egenskaper under olika driftförhållanden kan ge en uppfattning om hur ofta kalibrering behöver utföras. Enligt de svenska bestämmelserna för kall- och varmvattenmätare finns maximala utesittningstider för debiteringsmätare angivna. Maximala kontrollperioder enligt dessa bestämmelser ges av tabell 4.1.

Tabell 4.1. Maximal utesittningstid för vattenmätare.

Kallvatten		Varmvatten	
$q_n$ (m <sup>3</sup> /h)	Tid (år)	$q_n$ (m <sup>3</sup> /h)	Tid (år)
0-2,5	9	-	5
2,5-10	6	-	5
>10	3	-	5

I praktiken kräver så långa utesittningstider, som tabell 4.1 redovisar, att systemens vattenkvalitet är av mycket god klass. Vissa fjärrvärmenät kan ha problem med magnetit eller andra partiklar i vattnet, vilket gör att mätarna måste kontrolleras betydligt oftare, kanske upp till 1 gång per år. Avgörande är också förbrukningsmönster, toppbelastningar m.m. Överhuvudtaget förordas att en kalibrering aldrig skall vara äldre än 1 år i samband med noggranna värmemätningar (SS 2620).

### 4.4.4 Antal kalibreringspunkter

Beräffande val av kalibreringspunkter gäller samma principiella resonemang som för kalibrering av temperaturgivare i kapitel 3.5.3. Det tänkta flödesområdet bör täckas fullständigt och intervallens ändpunkter bör ingå som kalibreringspunkter. I vissa applikationer, t.ex. vid debiteringsmätning i lägenheter och småhus, kommer flödesmätaren att till största delen utnyttjas i den undre delen av sitt mätområde. Samtidigt är ofta mätarens karaktäristik i detta område kraftigt olinjär och det kan därför vara värt att koncentrera kalibreringspunkterna i detta område. Enligt Nordtestmetoden NT VVS 020 för varmvattenmätare föreslås punkterna  $q_{min}$ ,  $q_t$ ,  $0,5q_n$ ,  $q_n$  och  $q_{max}$  som obligatoriska kontrollpunkter vid typgodkännandeprovning av varmvattenmätare. Vid varje flöde bör kalibreringen upprepas minst 3 gånger för att ge en uppfattning om mätarens repeterbarhet.

Flödesmätare påverkas inte bara av flödesområdet utan även av flera influensstorheter av vilka den viktigaste är vätskans temperatur. Därför skall flödesmätare kalibreras med den vätska och den temperatur de avses användas med. Kommer systemets temperatur att variera vid mätarens användning måste kalibreringen göras med samma flöden och minst två olika temperaturer. De temperaturvariationer som förekommer i vanliga värmesystem kan påverka mätfelet med flera procent (naturligtvis beroende på typ av mätare). Detta ökar naturligtvis antalet kalibreringspunkter och därmed kostnaden för kalibreringen. Alternativet (vilket inte rekommenderas) är att utelämna kalibreringen vid olika temperaturer och istället ange en förhöjd mätosäkerhet.

#### 4.4.5 Kalibreringsbetingelser

Eftersom flödesmätare är ytterst känsliga för installationens utförande i mätsituationen (jämför 4.2.1) kommer de även att vara känsliga i kalibreringssituationen. Vid "in situ" kalibrering slipper man mycket av denna problematik, men i viss mån måste hänsyn tas även i detta fall, t.ex. vid anslutning av normalen till systemet. Måste mätaren monteras loss och transporteras till ett kalibreringslaboratorium bör man installera raksträckor, vilka aldrig avlägsnas från mätaren. Raksträckorna bör medfölja alla typer av mätare som är känsliga för strömningens utseende. Speciella krav för kalibreringsutrustning, förberedelser av mätare och installation finns i flera provningsmetoder och standarder (t.ex. NT VVS 020, ISO 8316, ISO 4185).

#### 4.4.6 Kalibrering i laboratorium

För kalibreringsändamål, d.v.s. för att bestämma en flödesmätarens felvisning som funktion av flödet, finns en lång rad beprövade metoder. En bedömning av kalibreringsmetodernas noggrannhet finns exempelvis i OIML Document No. 7, 1984.

Ett komplett kalibreringssystem består av följande delar:

- förrådsbassäng
- utrustning (pump e dyl) för att skapa ett flöde
- rörsystem med ventiler
- provbord för uppmontering av mätare
- utrustning för att bestämma den verkliga vätskemängd som passerat mätarna i provbordet.

Nedan följer en kort sammanfattning av de vanligaste metoderna för bestämning av den vätskemängd som passerat den provade flödesmätaren.



#### 4.4.6.1 Volymetrisk metod, stående start/stopp

Mätaren står vid provets början stilla. Efter avläsning öppnas en ventil bakom mätaren och den vätskemängd som passerar mätaren samlas i ett kärl med noggrant känd volym. När kärlet är fullt stängs ventilen bakom mätaren och mätaren avläses på nytt. Skillnaden mellan de båda mätaravläsningarna kan nu jämföras med volymnormalen (se t.ex. ISO 8316).

*Fördelar:*

En säker och kostnadseffektiv metod för exempelvis kallvattenmätare.

*Nackdelar:*

För att höja noggrannheten används ofta förträngda halsar på volymnormalerna, vilket medför att endast en volym nära normalens nominella volym kan bestämmas. Därför måste ofta ett större antal normaler finnas för att täcka ett brett flödesområde. Stående start/stopp kan ge transientfel om inte provvolymerna väljs tillräckligt stora. Volymetriska metoder är mindre lämpliga vid prov med vätskor som har varierande temperatur och viskositet p.g.a. normalens utvidgning, avdunstning vid hög temperatur och en avrinning vid tömning som varierar med temperatur och vätsketyp (en viss mängd vätska blir alltid kvar på ytan inuti tanken).

#### 4.4.6.2 Volymetrisk metod, flygande start/stopp

Flödet genom mätaren har hela tiden ett konstant värde och mängden vätska som skall samlas i volymnormalen dirigeras genom någon form av svängskovel eller omkastningsventil. Mätaren avläses samtidigt som flödet styrs ner i normalen och avläses igen samtidigt som flödet styrs bort från normalen (se ISO 8316).

*Fördelar:*

Metoden ger kortare provtider än 4.4.6.1 och minskar risken för transientfel vid start och stopp.

*Nackdelar:*

Metoden fordrar normalt att mätarna kan utrustas med pulsgivare eller att visningen kan registreras fotografiskt. Omkastningsventilerna gör metoden dyrbarare och något känsligare än 4.4.6.1. Övriga synpunkter från 4.4.6.1 gäller även i detta fall.

#### 4.4.6.3 Gravimetrisk metod, stående start/stopp

Metoden liknar 4.4.6.1, men normalens volym bestäms genom vägning och kännedom om vätskans densitet, istället för att direkt läsas på en volymskala (se ISO 4185).

##### *Fördelar:*

Metoden är mer flexibel än 4.4.6.1 genom att man kan avsluta provet var som helst inom vågens mätområde. Temperaturen behöver endast avläsas vid mätaren, i de fall temperaturkorrigeringar måste göras. Vidare saknar avrinningstiden betydelse, vilket gör metoden lämpligare för kontroll av varmvattenmätare och glykolvattenmätare. Mätare kan kalibreras direkt för massflöde, om så önskas.

##### *Nackdelar:*

Transientfel enligt 4.4.6.1. Mer omfattande beräkningar (kan automatiseras) gör metoden något omständigare än de volumetriska metoderna.

#### 4.4.6.4 Gravimetrisk metod, flygande start/stopp

Osäkerhetskomponenter vid kalibrering med gravimetriska metoder finns analyserade i t.ex. SP-arbetsrapport 1990:36 (jämför även ISO 4185).

##### 4.4.6.4.1 Statisk vägning

Metoden fungerar på samma sätt som 4.4.6.2, men vätskemängden bestäms gravimetriskt (dvs genom vägning). Beträffande för- och nackdelar, se 4.4.6.2 och 4.4.6.3.

##### 4.4.6.4.2 Dynamisk vägning

Mätarna avläses "i farten" precis som i 4.4.6.2 och 4.4.6.4.1, men istället för att styra flödet till eller från normalen avläses även vägen "i farten".

##### *Fördelar:*

Korta provtider kan erhållas utan komplicerade omkastningsventiler. Risken för fel orsakade av omkastningsventilens funktion elimineras.

##### *Nackdelar:*

Mätarna måste vanligtvis kunna utrustas med pulsgivare eller kunna avläsas fotografiskt. Vågutrustningen måste vara helelektronisk för att ändringen av vågens tröga massa under provets gång inte skall ge mätfel, samt för att avläsningen "i farten" skall vara lätt att åstadkomma.

#### 4.4.6.5 Mätlinga

I ett rör, med noggrant bearbetat genomlopp, bestäms volymen mellan två punkter. En boll eller kolv får följa med vätskeflödet genom röret och givare indikerar när punkterna som definierar volymen passeras. Metoden innebär kontroll med flygande start/stopp och kan utföras med helt slutet system.

##### *Fördelar:*

Metoden är snabb och enkel att hantera. Den är mycket lämplig för prov med t.ex. höga tryck och höga temperaturer.

##### *Nackdelar:*

Kräver den dyraste utrustningen av samtliga nämnda metoder. Mätarna måste kunna utrustas med pulsgivare eller registreras fotografiskt.

#### 4.4.6.6 Kontroll med mastermätare

Flödesmätaren jämförs mot en kalibrerad genomströmningsmätare, s.k. "mastermätare". Jämförelsen kan göras både med stående och flygande start/stopp.

##### *Fördelar:*

Den enklaste och snabbaste kontrollmetoden. Kontrollen kan göras med ett helt slutet system.

##### *Nackdelar:*

Mastermätaren måste i sin tur kalibreras med någon annan metod. Denna kalibrering måste göras ganska ofta för att säkerställa att mastermätaren behåller sin noggrannhet. Man kommer därför inte ifrån någon form av utrustning enligt beskrivningarna i 4.4.1 - 4.4.5 utöver själva mastermätaren.

#### 4.4.7 Kalibrering i anläggningar ("in situ")

Som tidigare nämnts finns några viktiga generella fördelar med "in situ" kalibrering. Framförallt slipper anläggningens innehavare arbete och kostnader förknippade med stängning av systemet samt upp- och nedmontering av flödesmätaren. Samtidigt är största risken att få problem i en anläggning just i samband med någon form av ingrepp, vilket kan minimeras med in situ kalibrering.

#### 4.4.7.1 Konventionella metoder

Allmänt kan samtliga metoder, som beskrivits i 4.4.6, användas även vid kalibrering på plats i anläggningar. De vanligast förekommande är

- volumetrisk metod, stående start/stopp (används t.ex. vid rutinmässig kontroll av petroleummätare)
- mastermätare (används t.ex. vid kontroll av mätare med dålig upplösning, vilka därför kräver stora provningsvolymmer)
- mätslinga (ger hög noggrannhet men kräver att den kalibrerade mätaren har hög upplösning)

Många gånger är det fördelaktigt att använda en kombination av de båda sistnämnda metoderna. Därvid låter man en mastermätare med hög upplösning och god repeterbarhet arbeta i serie med mätslingan. Mastermätaren kan därmed kalibreras upprepade gånger i direkt anslutning till att den jämförs med kalibreringsobjektet och fungerar då endast som en känslig indikator vid komparationen mellan mätslinga och den kalibrerade mätaren.

I Sverige utför Statens provningsanstalt kalibrering på plats av de flesta typer och storlekar av flödesmätare. Samtliga metoder beskrivna ovan kan tillämpas med anpassning efter den aktuella kalibreringsproblematiken.

#### 4.4.7.2 Spårämnesmetoder

Trots att de flesta mätare är möjliga att kalibrera på plats med konventionella metoder finns det situationer som av tekniska och/eller ekonomiska skäl fordrar en annan lösningsmetodik. I dessa sammanhang kan olika typer av spårämnesmetoder vara intressanta.

Spårämnesmetoder används ofta vid flödesmätningar i luftbehandlingssystem men har under senare år även börjat tillämpas för kalibrering av stora flödesmätare i fjärrvärmesät. Bland annat har Nordtestmetoder utarbetats i Finland för denna typ av kalibrering (NT VVS 082 och 087 för flödesmätare respektive kompletta värmemätare). I övrigt finns de flesta spårämnesmetoder beskrivna i ISO 2975/1-7. Den avgörande fördelen med spårämnesmetoderna är att de kan tillämpas på i stort sett vilka system som helst utan några påtagliga ingrepp (frånsett två små påstick för injicering och detektering av spårämnet).

Man delar vanligen in spårämnesmetoderna i två huvudgrupper.

- utspädningsmetoder ("dilution methods")
- löptidsmetoder ("transit time methods")

*Utspänningsmetoderna* ger ett mått på totalflödet genom att man injicerar ett spårämne med ett litet välkänt flöde via en kalibrerad mätare och sedan bestämmer koncentrationen av ämnet i huvudflödet. Om man styr injektionsflödet, så att koncentrationen i huvudflödet blir konstant, är det sökta flödet direkt proportionellt mot injektionsflödet. Ett annat alternativ är att injicera med ett konstant spårämnesflöde och då blir huvudflödet omvänt proportionellt mot den uppmätta koncentrationen.

*Fördelar:*

Vid utspädning behöver man inte känna till något om rörsystemets geometriska utformning.

*Nackdelar:*

Metoderna kräver kännedom om injektionsflödet (kalibrerad mätare). Vidare är fullständig inblandning av spårämnet i systemflödet ett absolut krav. Detta kan ge vissa begränsningar för placering av injektor och detektor.

*Löptidsmetoderna* fungerar genom att spårämnet injiceras i form av pulser. Löptiden från injektionsstället till detekteringsstället mäts och ger ett mått på huvudflödets medelhastighet. Med kännedom om hastighet och tvärsnittsarea kan sedan huvudflödet beräknas.

*Fördelar:*

Vid löptidsmätning behöver man endast känna till koncentrations-tidsförloppet på två punkter i rörsystemet. Man behöver inte känna till någonting om det injicerade flödets karaktär (fysikaliska egenskaper, flöde m.m.).

*Nackdelar:*

Löptidsmetoderna kräver kännedom om rörsystemets exakta geometri och huvudflödets hastighetsprofil (fullt utbildad strömning förutsätts). Ett visst minsta avstånd krävs mellan injektor och detektor för att tidmätningen skall bli tillräckligt noggrann men samtidigt kan avståndet inte vara för stort så att injektionspulsens bredd och amplitud försämras. Dessa krav ger vissa begränsningar för placering av injektor och detektor.

## 4.5 Total mätosäkerhet vid flödesmätning

Enligt avsnitt 2.3.2 ges den totala mätosäkerheten genom sammanvägningen av osäkerhetskomponenter från

- Variationer i driftsförhållanden,  $s_q$
- Installationsförhållanden,  $a_{qi}$  (alternativt  $w_{qi} = a_{qi}/\sqrt{3}$ )
- Arbetspunkt,  $a_{qF} = \frac{\partial F}{\partial T} \cdot s_q$  (alternativt  $w_{qF}$ . Fel p.g.a. arbetspunkten kan normalt försummas inom en flödesmätarens normala arbetsområde. Nära  $q_{max}$  och i området mellan  $q_t$  och  $q_{min}$  kan detta fel bli betydande).
- Kalibreringsosäkerhet,  $a_{qK}$  (alternativt  $w_{qK} = a_{qK}/\sqrt{3}$ )
- Dynamiska förhållanden,  $a_{qd}$  (alternativt  $w_{qd} = a_{qd}/\sqrt{3}$ )

Med värden på de olika delkomponenterna enligt diskussionerna i de enskilda avsnitten om flödesmätning ovan kan typiska värden vid väl genomförda noggranna mätningar i ett värmesystem vara (observera att detta endast är ett exempel)

- $s_q/q = 0,1-1\%$  (sluppmässiga variationer i tiden)
- $a_{q1}/q = 0,1-5\%$  (temperaturberoende givarkonstant)
- $a_{q2}/q = 0,1-2\%$  (viskositetsberoende internt läckage m.m.)
- $a_{q3}/q < 0,1\%$  (tryckberoende mätarkaraktäristik)
- $a_{q4}/q = 0-10\%$  (installationsförhållanden)
- $a_{q5}/q = 0-10\%$  (osäkerhet i vätskans egenskaper beroende på tillsatser, köldbärandeblandningar etc.)
- $a_{q6}/q = 0,1-10\%$  (upplösningsfel)
- $a_{qF}/q = 0-5\%$  (arbetspunktens beroende av mätområdet)
- $a_{qK}/q = 0,1-5\%$  (kalibreringsosäkerhet, beroende av metod, utesittningstid m.m.)
- $a_{qd}/q = 0-1\%$  (orsakas av mätarens stigtid, signalbehandling etc., förekommer i första hand vid mätning på tappvarmvattensystem)

Som exempel på en noggrann mätning väljs de lägsta osäkerheterna enligt ovanstående beskrivning. Med 95% konfidensnivå är det tillfälliga felet (medelvärdets standardfel) mindre än  $t_{95} \cdot s_q$ , där  $t_{95}$  är Students t-faktor för konfidensnivån 95%, d.v.s

$$r_{95} \approx 2 \cdot \frac{0,1}{100} \cdot q = \frac{0,2q}{100}$$

Med sammanlagring av ovanstående osäkerhetskomponenter enligt SS 014150 kan det totala systematiska felet beräknas enligt

$$e_q = \sum |a_{qi}| = (0,1+0,1+0,1+0,0+0,0+0,1+0,0+0,1+0,0) \frac{q}{100} = \frac{0,5q}{100}$$

Resultatet för flödesmätningen kan alltså anges med följande osäkerhet enligt SS 014150:

- Det tillfälliga felet (medelvärdets standardfel) är med 95% konfidens mindre än 0,2 %
- Det systematiska felet är maximalt 0,5 %.

Alternativt kan osäkerheten anges med BIPM's metod. Den skattade mätosäkerheten ges på samma sätt som det tillfälliga felet enligt ovan. Den sammanlagda förväntade mätosäkerheten beräknas enligt ekv. 2.39 till:

$$w_q = [\sum w_{qj}^2]^{1/2} = [1/3 \sum a_{qj}^2]^{1/2} = \\ = \sqrt{1/3(0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,1^2 + 0,0^2 + 0,1^2 + 0,0^2)} \frac{q}{100} = 0,13 \frac{q}{100}$$

Enligt ekvation 2.40 blir den sammanlagda mätosäkerheten

$$u_q = \sqrt{s_q^2 + w_q^2} \frac{q}{100} = [0,1^2 + 0,13^2]^{1/2} \frac{q}{100} = 0,13 \frac{q}{100}$$

Resultatet för flödesmätningen kan alltså anges med följande osäkerhet enligt BIPM:

- Den skattade mätosäkerhetskomponentens standardavvikelse har skattats till 0,1%
- Den förväntade mätosäkerhetskomponentens standardavvikelse har beräknats till 0,13%

Därvid blir den totala mätosäkerheten med användande av talfaktorn  $k = 2,0$

$$U_q = 0,26 \frac{q}{100}$$

Detta exempel visar hur ett antal olika osäkerhetskomponenter bidrar till en total mätosäkerhet vid flödesmätning. I "ISO Standards Handbook 15" (standard ISO 5158) finns detaljerade beskrivningar av osäkerhetskomponenter vid mätning med tryckdifferensmätare (mätflänsar, dysor, munstycken). Som alltid vid kvadratisk sammanlagring av varianser kommer fel som är mindre än en tredjedel av den största komponenten knappast att bidra alls och kan ofta försummas.

Valet av talfaktorn  $k$  har ett avgörande inflytande på den totala mätosäkerheten och bör därför väljas med viss omsorg. I de fall en mätning grundar sig på 10 upprepade mätningar eller mer kan 2,0 vara ett rimligt värde. Vid få mätningar kan det vara rimligare att använda 2,5 eller 3,0.

Som tidigare nämnts i kapitel 2 ger den ovanstående sammanlagringen av mätosäkerhetskomponenterna normalt en överskattning av den sammanlagda mätosäkerheten, eftersom vissa komponenter har ensidiga intervall. Sålunda vet man att installationsfel, temperaturpåverkan etc. alltid ger fel med bestämda tecken (positiva eller negativa). Jämför diskussionen i 2.2.3, figur 2.4.

## 4.6 Normer för flödesmätning

Internationellt finns ett stort antal olika normer och standarder för flödesmätning. De flesta finns utgivna av *ISO* och behandlar både principer för installation, mätning, kalibrering och bedömning av mätosäkerhet. Samtliga standarder, som utgivits av *ISO*, finns samlade i en handbok, "ISO Standards Handbook 15". Denna handbok är en veritabel guldgruva för den som sysslar med flödesmätning och kan varmt rekommenderas (kan beställas via *SIS* i Stockholm). Bland alla standarder kan nämnas

- ISO 2975/1-7 (mätning med spårämnen)
- ISO/TR 3313 (pulserande flöde)
- ISO 4006 (nomenklatur och beteckningar)
- ISO 4064/1-2 (krav på kallvattenmätare och deras installation, svensk standard SS 3471)
- ISO 4185 (gravimetrisk kalibrering)
- ISO 8316 (volyimetrisk kalibrering)
- ISO 5168 (osäkerhetsbedömning)
- ISO 5167 (tryckdifferensmätare)
- ISO/TR 6817 (induktiva mätare)

Inom den legala metrologi, d.v.s. mätningar som föreskrivs i lagar och författningar, har man en lång tradition av noggrant utarbetade krav och metoder för volym- och flödesmätning. Kraven formuleras i form av internationella rekommendationer utgivna av *OIML* (Organisation Internationale de Métrologie Légale). De flesta rekommendationer om volym- och flödesmätning behandlar vätskor med högt saluvärde (t.ex. petroleumprodukter, alkohol etc.). Rekommendationerna innehåller dock många allmängiltiga synpunkter på orsaker till mätfel, utformning av luft- och gasavskiljare m.m. De kan därför ha visst intresse i samband med värmemätning. Direkt tillämpning har dock följande rekommendationer

- IR 7 (utvärdering av kalibreringssystem för vattenmätare)
- IR 72 (varmvattenmätare)
- IR 75 (värmemätare)

Inom Europa sker för närvarande det viktigaste standardiseringsarbetet inom *CEN* (Europas motsvarighet till *ISO*). Som led i införandet av den öppna europeiska marknaden består EG ett stort antal tekniska standarder av *CEN*. Genom hänvisning till dessa standarder i form av olika *EG-direktiv* får *CEN*-dokumenten en mycket hög status inom det europeiska samarbetet. Exempel på standarder och direktiv som berör värmemätning är

- 75/33/EEC (kallvattenmätare)
- 79/830/EEC (varmvattenmätare)

Även om man eftersträvar en harmonisering mellan olika internationella standarder föreligger det tyvärr ofta skillnader mellan t.ex. *ISO*, *OIML* och *CEN/EG* och man arbetar ofta parallellt med standarder för samma tillämpningar.



*Nordtest* har utarbetat några metoder med anknytning till mätning av flöde och/eller värme. Dessa metoder tillämpas i viss grad av de nordiska länderna. Följande Nordtestmetoder är av intresse vid värmemätning,

- NT VVS 020 (provning av flödesmätare för värme- och varmvattenmätare)
- NT VVS 085 (provning av integrerade värmemätare)
- NT VVS 082 (in situ kalibrering med spårämnesmetoder)
- NT VVS 087 (in situ kalibrering av kompletta värmemätare)

Nationellt finns bra standarder utarbetade i Tyskland (DIN, VDI, PTB), England (BSI), Frankrike (AFNOR) m.fl. I Sverige utarbetar Statens provningsanstalt provningsmetoder för typgodkännande av varm- och kallvattenmätare. Man tar även fram riktlinjer för verksamheten vid auktoriserade kalibreringslaboratorier. Exempel på kontrollbestämmelser är

- SPKB 1986:13 (typkontroll av varmvattenmätare)
- SPKB 1986:14 (typkontroll av kallvattenmätare)
- SPKB 1985:07 (efterkontroll av kallvattenmätare)
- SPKB 1985:04 (efterkontroll av värmemätare)
- MPFS 1990:5 (auktorisering av kalibreringslaboratorier)

I övrigt finns olika former av branschstandarder för flödesmätning. Några av de viktigaste är ASHRAE 41.8-78 "Standard methods of measurement of flow of fluids - liquids", ASHRAE 41.9-82 "Standard method of measurement of fluid flow" och ASME 19.5 - 1971 "Application of fluid meters". Samtliga dessa branschstandarder behandlar huvudsakligen tryckdifferensmätare och ur svensk synvinkel är ISO 5167 mer intressant för dessa mätare. Nationellt utfärdar Värmeverksföreningen rekommendationer för installation och underhåll av värmemätare medan Vatten- och avloppsverksföreningen gör motsvarande för kallvattenmätare. Stiftelsen för Instrumentteknisk Provning utarbetar i vissa fall provningsprogram och låter testa olika typer av flödesmätare. Många gånger görs detta i internationellt samarbete med t.ex. SIREP.

## 5 Sammanfattning

Värmemätning i vätskesystem kan utföras med betydligt större noggrannhet än motsvarande värmemätning i gas- eller tvåfasssystem. Med någorlunda stora temperaturdifferenser ( $\Delta T > 10$  K) kan den totala osäkerheten ligga i området 1-2 % vid noggrant utförda mätningar. Laboratoriemässigt kan osäkerheten till och med understiga 0,5 %. Vid temperaturdifferenser över 10 K dominerar ofta osäkerheten i flödesbestämningen medan temperaturmätningens osäkerhet tar överhanden vid differenser under 5 K.

För att komma ner till osäkerheter i nivån 1-2 % krävs att hela mätuppgiften noggrant analyseras, t.ex. med avseende på

- grova fel (missuppfattning av mätningens syfte, felplacerade givare etc.)
- principen för bedömning och sammanvägning av osäkerhetskomponenter
- vätskans termofysikaliska data (densitet, specifik värmekapacitet, viskositet, etc.)
- analys av vilka temperaturer som behöver mätas, vilket värmeutbyte mellan givare och omgivning som kan påverka mätresultatet samt bedömning av övriga influensstorheter för temperaturmätningen
- analys av vilka flöden som behöver mätas och hur flödesmätaren påverkas av installationsförhållanden, tryck, temperatur etc.
- kalibreringsbehov

Ovanstående punkter har behandlats med olika detaljeringsgrad i denna rapport. I första hand har principerna för behandling av mätosäkerhetskomponenter berörts i kapitel 2 medan olika influensstorheter för temperatur- och flödesmätning diskuteras i kapitel 3 och 4. Ytterligare detaljer beträffande vissa avsnitt finns att tillgå i t.ex. SP-rapport 1991:13. SP-rapporten innehåller också en omfattande referenslista.

Ett särskilt problemområde utgör garantiprovnings av stora värmeanläggningar. Vid jämförelse mellan resultaten från en uppmätt driftpunkt och motsvarande garanterade värden är det viktigt att notera att osäkerheten i driftpunktens bestämning kan ge väl så stort bidrag till den totala osäkerheten som osäkerheten i själva värmemätningen. Därmed är det viktigt att i förväg bedöma dessa förhållanden så att tillräckligt bra mätutrustning väljs på alla relevanta punkter i utvärderingen.

Det bör poängteras att även om fel orsakade av rådande installationsförhållanden ofta dominerar vid praktiska mätningar kan man aldrig undvara behovet av kalibrering. Kalibreringen utgör förbindelselänken mellan mätresultatet och de storheter som resultatet anges i. Trots att framförallt flödeskalibrering är kostsam måste man beakta att ett mätresultat utan mätosäkerhetsangivelse saknar mening och att en fullständig bedömning av mätosäkerheten är omöjlig utan en relevant kalibrering.

## 6 Referenser

1. Adunka, F, 1984. Wärmemessung. (Vulkan-Verlag.) Essen.
2. Lieneweg, F, 1976. Handbuch der technischen Temperaturmessung. (Viehweg & Sohn.) Braunschweig.
3. Fahlén, P, 1991. Värmemätning - Bedömning av osäkerhet vid mätning i vätskesystem. (Statens provningsanstalt.) SP-rapport 1991:13. Borås.
4. Fahlén, P, 1987. Temperaturmätning i vätskeflöden - Inverkan av installationsförhållanden. (Statens provningsanstalt.) SP-arbetsrapport 1987:30. Borås.
5. Fahlén, P, 1988. Undersökning av små flödesmätarens känslighet för start och stopp av vätskeflödet. (Statens provningsanstalt.) SP-arbetsrapport 1990:45. Borås.
6. Mathiesen, O, 1986. Beräkning av ett mätresultats osäkerhet. (Statens Mät- och provråd.) MPR-M 1986:1. Borås.
7. Mathiesen, O, 1986. Handledning för beräkning av ett mätresultats osäkerhet. (Statens mät- och provråd.) MPR-M 1986:2. Borås.
8. SS 014150, 1981. Svensk standard - Metrologi - Angivande av mätresultat. (Standardiseringskommisionen i Sverige.) 1981-02-15. Stockholm.
9. SS 020106, 1981. Svensk standard - Legal metrologi - ordlista. (Standardiseringskommisionen i Sverige.) 1981-01-01. Stockholm.
10. SS 2620, 1988. Svensk standard - Värmeutrustning - Värmepumpar - Fältprovning och prestandaredovisning. (Sveriges Mekanstandardisering.) 1988-12-25. Stockholm.
11. SS 1897, 1984. Kyl- och värmeutrustning - Kylteknik och värmepumpsteknik - Terminologi. (Sveriges Mekanstandardisering.) 1984-06-25. Stockholm.







**R13:1992**

**ISBN 91-540-5424-9**

**Byggeforskningsrådet, Stockholm**

**Art.nr: 6812013**

**Abonnementsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna**

**Cirkapris: 90 kr exkl moms**