

OPTIMERING AV FUKTLARM
MED ELEKTROKEMISK
IMPEDANSSPEKTROKOPI – EIS



Rapport | 2007:3

OPTIMERING AV FUKTLARM

MED ELEKTROKEMISK IMPEDANSSPEKTROKOPI – EIS

FÖRORD

Drivkrafterna för att forska inom fjärrvärmeområdet är ökad teknikkompetens, effektivisering, kundbehov och minskad klimatpåverkan. Den teknikinriktade delen av forskningen är inriktad på standardisering, ett ökat värmeunderlag, sänkta returtemperaturer, förbättrad kundkommunikation, ökad kundnytta, systemoptimering och ökad livslängd.

Optimering av fuktlarm redovisar resultaten från en studie inom forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Svensk Fjärrvärme och Energimyndigheten. Fjärrsyn ska stärka konkurrenskraften för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för det hållbara samhället till exempel genom att bana väg för affärsmässiga lösningar och framtidens teknik.

Studien har genomförts av Anders Thorén på Corromat AB under hösten 2006 och våren 2007.

Eva-Katrin Lindman

Ordförande i Teknikrådet

SAMMANFATTNING

Elektrokemisk impedansspektroskopi, EIS, är en teknik som används för undersökning av processer och karaktäristika hos ytor i kontakt med vätskor. Exempel på användnings-områden är undersökning av korrosion, målade ytor samt elektrodprocesser i batterier och bränsleceller. EIS-teknik kan ge tämligen detaljerad information om det undersökta metall - vätskesystemet.

I denna rapport beskrivs en inledande studie, som har syftat till att undersöka om EIS-teknik kan användas för att utvinna mer information från larmtrådsystem i fjärrvärme-ledningar i förhållande till vad som är möjligt med den teknik, som används idag. Önskvärd information som inte är tillgänglig idag är bl a:

- Bestämning av resistanser i fjärrvärmeledningarnas isolering som är generella och standardiserbara och som medger att meningsfulla gränsvärden kan anges.
- Bestämning av om det förekommer korrosion eller ej i en fjärrvärmeledning med konstaterad fukt.

Mätningar med EIS-teknik har utförts i ett antal fjärrvärmeledningsavsnitt tillhörande Göteborg Energi. De studerade ledningsavsnitten har uppvisat stor inbördes spridning vad gäller fukttinhåll, från ledning med helt torr isolering till ledning med mycket fukt.

Mätningarna har visat att EIS-tekniken är användbar och att meningsfulla resultat kan erhållas. Det har på samtliga ledningsavsnitt varit möjligt att åtminstone i grova drag bestämma såväl omfattning av fukt som omfattning av pågående korrosion. Resultaten har vidare illustrerat att det behöver inte vara den ledning som har mest fukt som har den högsta korrosionshastigheten

För undersökningarna har använts kommersiellt tillgänglig utrustning och programvara för EIS-mätning och -utvärdering. Det har framgått att framförallt programvaran för EIS-utvärdering behöver utvecklas och anpassas om tekniken skall kunna användas rutinässigt på larmsystem.

SUMMARY

Optimizing Moisture Surveillance Systems with Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS

Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS, is a technique used for electrochemical characterization of surfaces in contact with liquids. Corrosion, painted surface, battery and fuel cell research are some areas where EIS is normally used.

The aim of this study has been to evaluate if EIS can give more detailed characterization of moisture and corrosion in District Heating piping, than what can be obtained with the techniques that are normally used today.

Useful information that can't be obtained with the techniques used today is:

- Determination of true resistance and capacity values between copper wire and steel piping in the moisture surveillance system. If true values can be obtained it is possible to define and standardize recommended values and limits for alarm.

- Detection of corrosion and estimation of the corrosion rate on District Heating piping where moisture has been observed.

In this project EIS measurements have been carried out on a number of piping sections at the Göteborg Energi District Heating system. These piping sections have different amounts of moisture, from completely dry to very wet.

The study has shown that EIS can be used for measurements on moisture surveillance systems and that moisture and corrosion can be detected and quantified. The measurements have also shown that the most intense corrosion does not necessarily have to occur at the point with the most moisture.

A commercially available EIS-instrument with software has been used in the project. In order to develop EIS-measurements as a method for moisture surveillance in District Heating systems on a regular basis, the EIS-software must be developed to allow faster and easier analysis of the obtained impedance raw data.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Bakgrund	8
2. Syfte och mål	9
3. Vad är eis-teknik?	10
3.1 Hur går EIS-mätningar till?	10
3.2 Om ekvivalenta kretsar	11
4. Mätningar	15
5. Resultat	17
6. Diskussion	22
6.1 Bedömning av mätresultat	22
6.2 Bedömning av möjligheterna för rutinmässig användning av EIS-tekniken	22
6.3 Förutsättningar för standardisering av fuktlarm	23
7. Slutsatser	24
Bilaga 1	25

1. BAKGRUND

Fuktdetektering i fjärrvärmerör bygger på mätning av de elektriska förändringar som uppstår då vatten tränger in i isoleringen. Mätobjektet som utgörs av larmtråd, mediarör och mer eller mindre fuktig isolering uppträder ur elektrisk synpunkt som en impedans. Denna impedans kan i sin enklaste form beskrivas som en resistans parallellkopplad med en kapacitans.

Trots att denna impedansmodell är allmänt vedertagen synes den praktiska tillämpningen, bl a illustrerad av de typer av kommersiella instrument som används, innebära att man ofta tolkar mätobjektet som en rent resistiv krets. Denna förenkling innebär att man inför en mycket stor osäkerhet i mätningarna där endast mycket höga fukthalter kan detekteras med säkerhet och där uppenbar risk finns för falska larm, dvs larm erhålles trots att isoleringen är torr.

Man kan nog påstå att denna förenkling gör mer skada än nytta. Exempelvis innebär det faktum att kommersiella instrument för kontinuerlig larmövervakning arbetar vid inbördes olika frekvenser, att mätvärden presenterade som resistanser inte är jämförbara inbördes. Således kan inga generella riktvärden anges eftersom ett mätvärde endast har mening vid jämförelse med andra mätvärden från samma typ av instrument och från en och samma larmtrådkrets. De ansatser som gjorts för att ange gränsvärden för larmnivåer, t ex 120, 60, 30 kohm osv., kan därför aldrig bli annat än mer eller mindre lyckade approximationer av en mer komplicerad verklighet.

Genom att i stället behandla larmtrådkretsen som den impedans den verkligen är och bestämma både resistans och kapacitans kan mätvärdena behandlas generellt och det är fritt fram att ange generella gränsvärden och larmgränser.

I en bilaga ”Beträffande impedansmätning i system för fuktlarm” diskuteras mer i detalj vilken information som bör kunna erhållas från larmtrådkretsar med impedansmätningar och vilka begränsningar som dagens mättekniker innebär.

Av bilagan framgår att EIS-tekniken bör kunna användas för noggrann karakterisering av larmtrådkretsar och erbjuda följande fördelar i jämförelse med dagens teknik:

- Känsligheten för att detektera fukt kan höjas 100 – 1000 gånger räknat som resistansförändring i isoleringen. Genom att kunna detektera mycket lägre fukthalter än idag kan läckor upptäckas mycket tidigare. Känsligheten är oberoende av om larmtråden ligger på normalt avstånd från stålroret eller ej.
- Det kan bestämmas om konstaterad fukt är i kontakt med stålroret eller ej.
- Risken för falsklarm pga att larmtråden ligger för nära stålroret kan helt elimineras.
- Om larmtråden ligger i kontakt med stålroret antingen direkt eller via metallspån, svetsloppor eller dyliskt kan detta detekteras som kortslutning och inte feltolkas som fukt.

Det vore värdefullt om man kan ta fram generella och standardiserbara gränsvärden på resistansen i isoleringen i fjärrvärmeledningar. Det vore vidare värdefullt om man förutom att bestämma omfattningen av fukt även kan avgöra i vilken utsträckning korrosion på fjärrvärmeröret sker. Härigenom skulle man kunna dela upp fukten i ”fukt” och ”farlig fukt”. Den ”farliga fukten” skulle därvid vara den där korrosion förekommer och där följaktligen reparationsinsatser bör sättas in i första hand. I ledningar med bara ”fukt” skulle det å andra sidan inte vara lika bråttom med åtgärder.

2. SYFTE OCH MÅL

Projektet har syftat till att genom mätningar i fält bestämma om man med EIS-teknik (elektrokemisk impedansspektroskopi) som grund kan utveckla rutiner och teknik för kontinuerlig larmtrådsövervakning, som till rimlig kostnad medger:

- detektering av inträngande fukt redan vid 100 – 1000 gånger lägre nivåer än idag.
- åtminstone grov kvantifiering av detekterad fukthalt
- eliminering av risken för falsklarm.
- information om detekterad fukt är i kontakt med fjv-ledningens stålyta eller ej.

3. VAD ÄR EIS-TEKNIK?

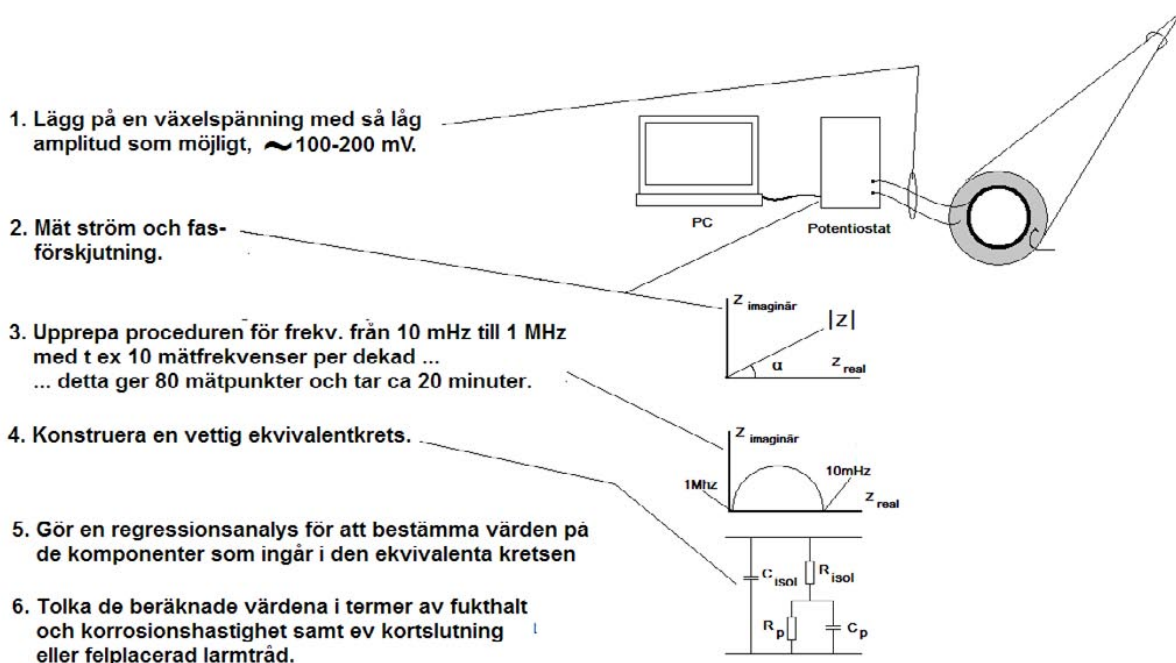
EIS-mätningar innebär att man genom att utsätta ett elektrod-elektrolytsystem för växelspanningar av varierande frekvens får underlag för att bestämma en ekvivalent krets (bestående av resistanser, kapacitanser, induktanser och även vissa andra komponenter) som beskriver detta elektrod-elektrolytsystem. Från den ekvivalenta kretsen kan därefter beräknas konduktivitet, kemisk reaktionshastighet såsom korrosionshastighet, diffusionshastigheter mm. EIS-tekniken har således förutsättningar att ge en mycket detaljerad bild av ett elektrolyt-elektrodsystem.

EIS används framförallt vid forskning inom områdena korrosion, bränsleceller, batterier, rostskyddande färger och lacker samt på senare år även i en del medicinska applikationer, t ex implantatmaterial. Gemensamt för dessa applikationer är att man vill studera samverkan mellan en elektrolyt (dvs en vätska med mer eller mindre god ledningsförmåga) och en elektrod (dvs ett elektriskt ledande material, oftast en metall).

I detta projekt har EIS-tekniken tagits ut från laboratoriet för mätningar på fuktalarm-system ute i fält. Teoretiskt sett har EIS-tekniken förutsättningar att beskriva larmtrådssystem i detalj, sannolikt långt mer detaljerat än vad som behövs. Projektet syftar till att undersöka om detta löfte håller i praktiken.

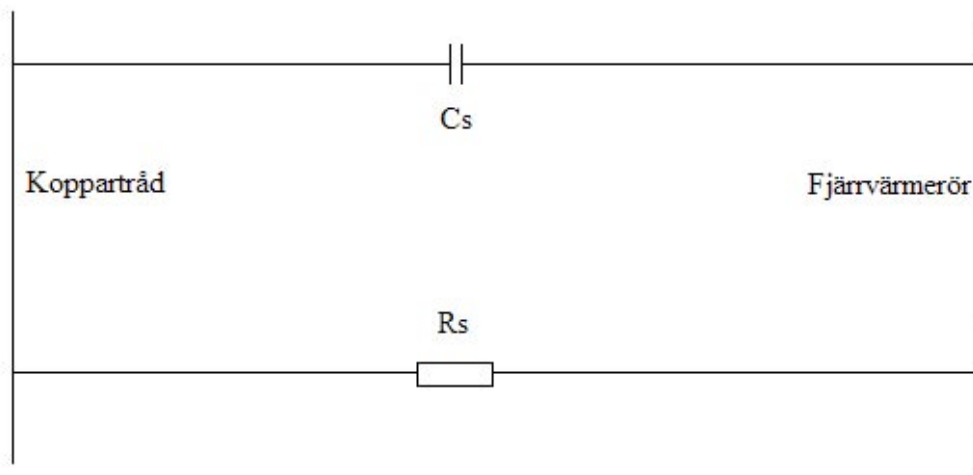
3.1 Hur går EIS-mätningar till?

I nedanstående figur visas vilka moment som ingår i en EIS-mätning. Mätutrustningen består av en potentiostat, en PC och programvara för att genomföra och analysera mätningen.

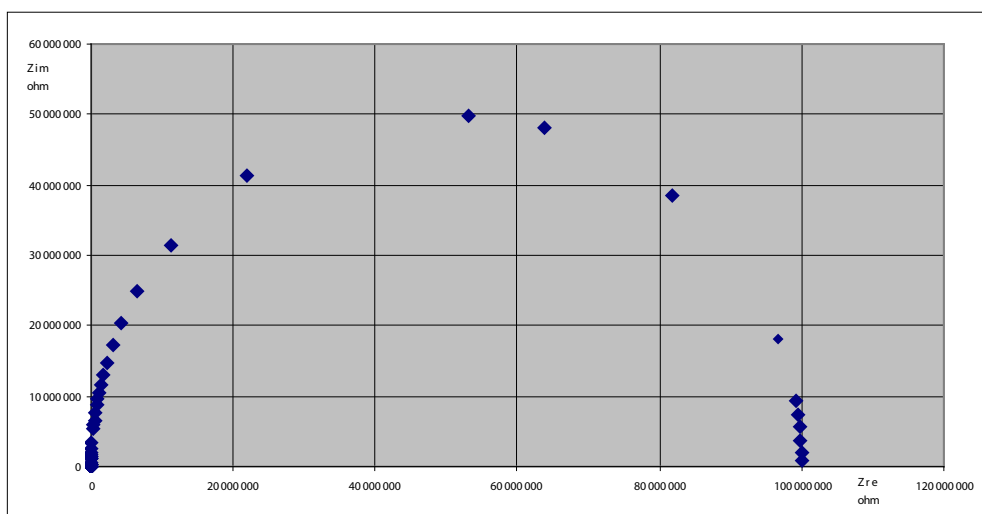


3.2 Om ekvivalenta kretsar

Larmtråden i en torr fjärrvärmeledning kan beskrivas med nedanstående ekvivalenta krets. Mellan koppartråden och fjärrvärmeröret föreligger dels en kapacitans som beskrivs med C_s , dels en resistans i isoleringen som beskrivs med R_s . C_s är normalt ~ 10 pF/m och $R_s > 1$ Gohm.

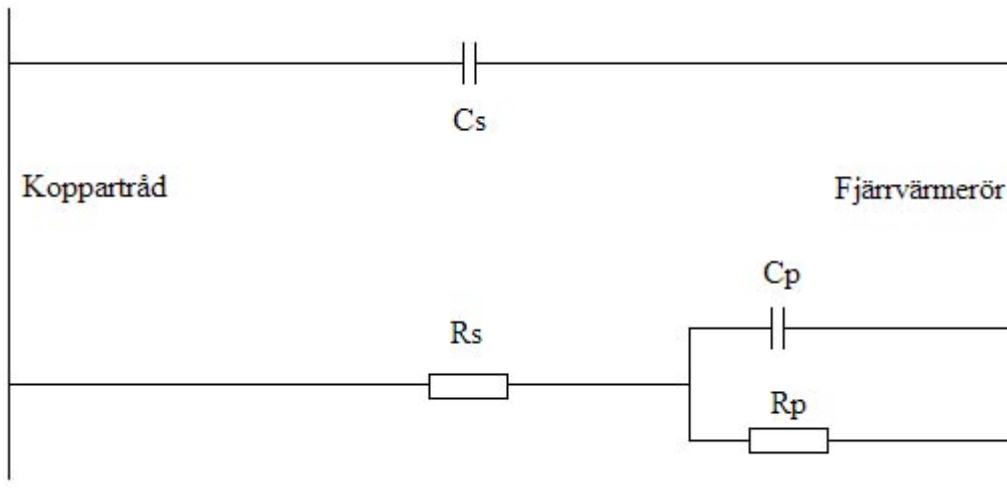


Om man gör en EIS-mätning på ovanstående krets får man en halvcirkel i ett impedans-diagram, vilket framgår av figuren nedan. x-axeln, den sk realdelen, representerar resistansen. y-axeln, den sk imaginärdelen, representerar kapacitansen. Varje punkt i diagrammet representerar en mätfrekvens. Längst ner till höger är frekvensen som lägst och längst ner till vänster är frekvensen om högst.

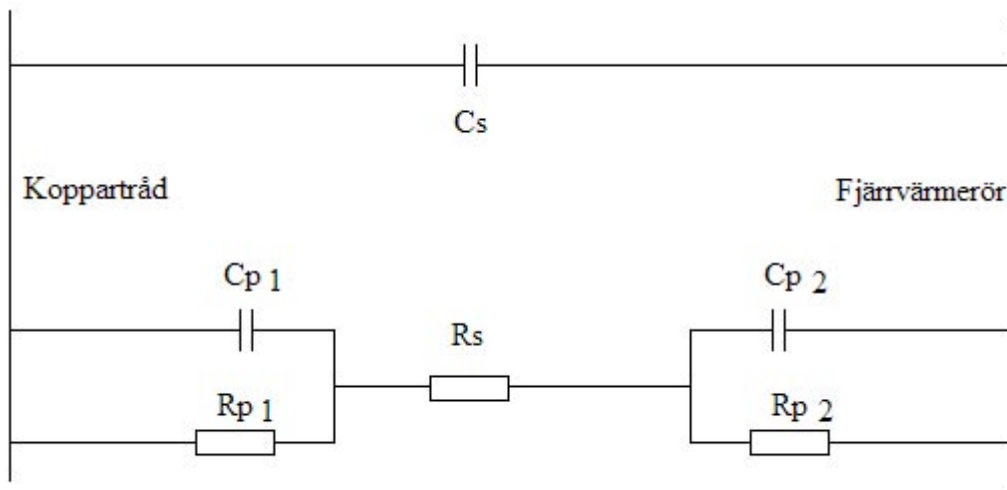


Om det finns fukt i isoleringen blir R_s betydligt lägre, medan C_s kan antas vara oförändrad. Som framgår av nedanstående figur tillkommer dessutom ett par komponenter, C_p och R_p , som beskriver gränsskiktet mellan fukt och metallyta. I detta gränsskikt förekommer korrosion, som kan vara mer eller mindre omfattande.

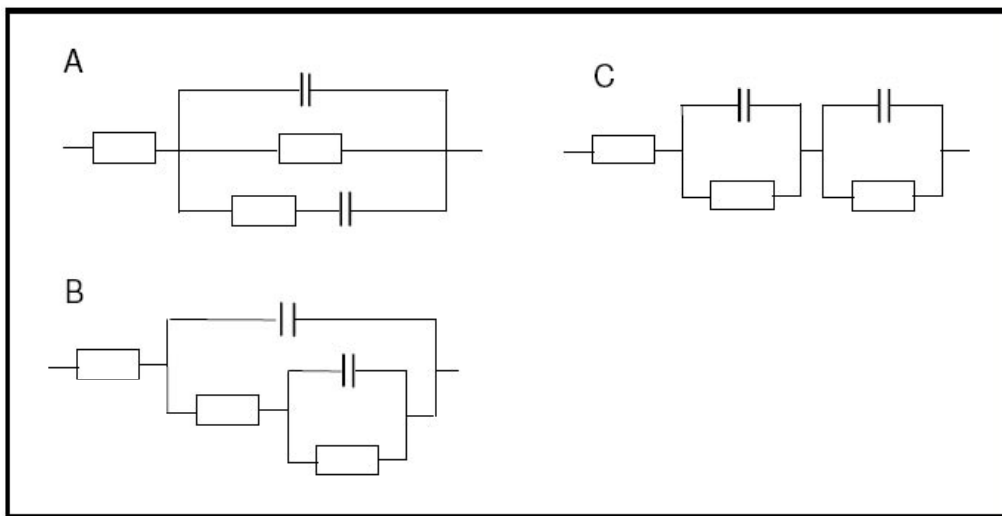
Denna figur är den man normalt utgår ifrån när EIS-teknik används för elektrokemiska mätningar. Denna krets ger i princip två halvcirklar i ett impedansdiagram. Det är dock endast i undantagsfall man ser två separata halvcirklar, i normala fall är de överlagrade varandra så att det mer ser ut som en deformerad halvcirkel.



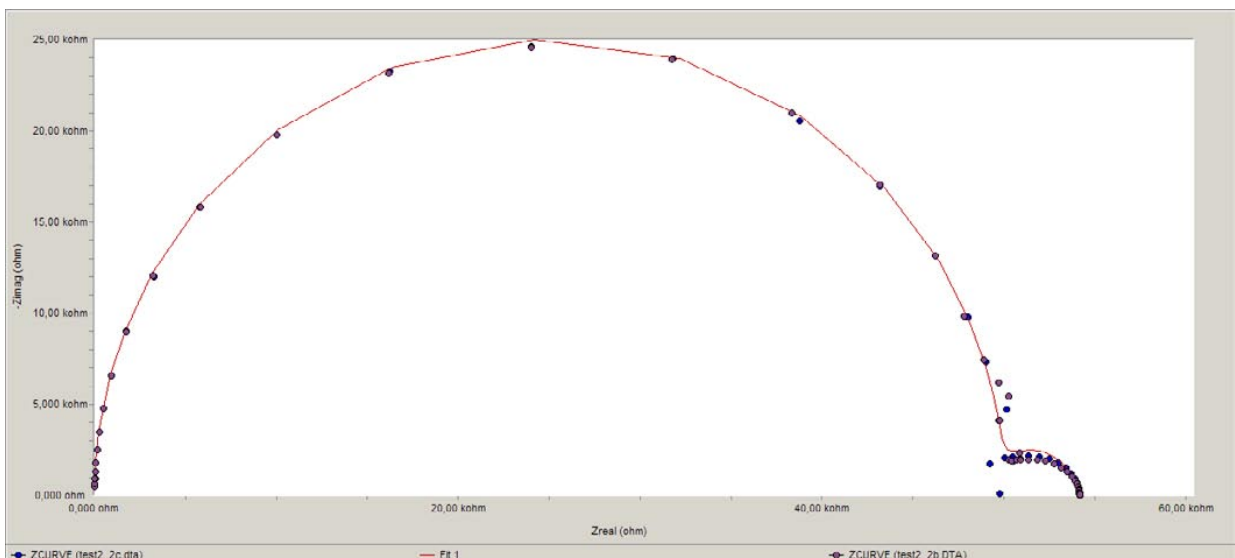
När vi mäter på larmtrådsystem måste vi dock ta hänsyn till två metallytor, koppartråd respektive stålrör och den ekvivalenta kretsen får det utseende som framgår av nedanstående figur. Denna krets ger i princip tre halvcirklar, vilka precis som i ovanstående exempel normalt är överlagrade. Att från en impedansmätning bestämma alla komponenter i denna krets kräver att mätningen är mycket exakt. Det har därför i projektet bedömts att den ekvivalenta kretsen enligt ovan är tillräcklig med avseende på projektets målsättning.



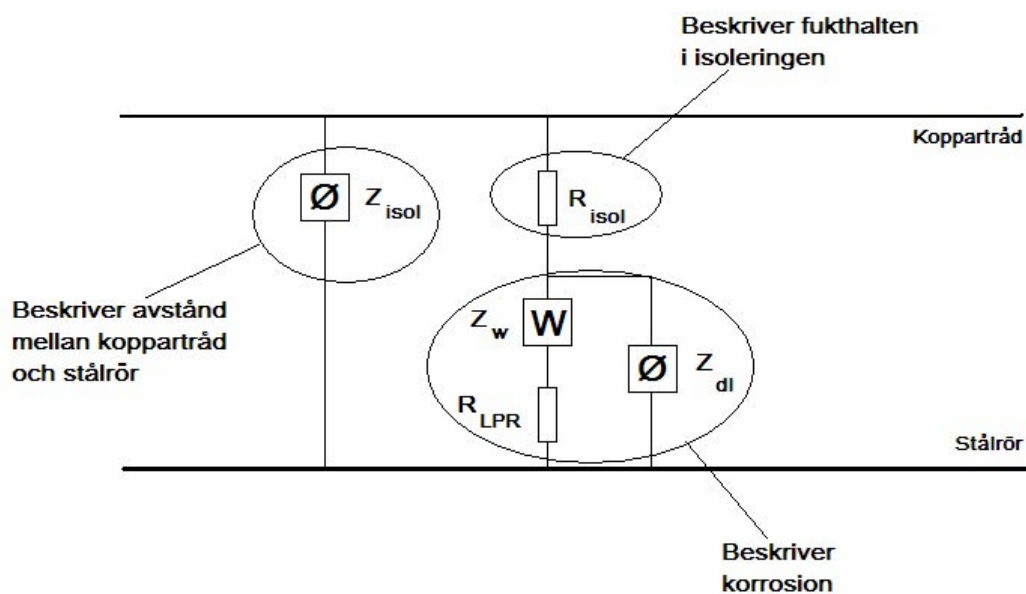
Detta är inte enbart en ”rå” förenkling utan kan oftast motiveras. Ett visst resultat av en impedansmätning kan ofta representeras av flera olika ekvivalenta kretsar. Av nedanstående figur framgår exempel på tre kretsar som är ekvivalenta, dvs de ger samma resultat vid en impedansmätning.



Larmtrådsystemet med sina två metalltytor kan således under vissa förutsättningar beskrivas med den enklare kretsen som enbart representerar en metalltyta. Nedanstående figur visar två impedanskurvor i samma diagram. Den ena kurvan är uppmätt på en krets med komponenter anordnade enligt den enklare ekvivalenta krets som representerar fallet med en metalltyta. Den andra kurvan är uppmätt på en krets enligt det mer komplicerade fallet med två metalltytor. Som framgår överensstämmer de båda kurvorna mycket väl.



Av nedanstående figur framgår den ekvivalenta krets som använts vid utvärderingen av impedansmätningarna i projektet. Kapacitanserna har ersatts med impedanserna Z_{isol} och Z_{dl} , som kan ses som mer generella kapacitanser och som tar hänsyn till att kapacitansen varierar över en yta och att olika korrosionsreaktioner kan försiggå på olika delar av ytan. Z_w är den så kallade Warburgimpedansen, som beskriver hämningen av korrosions-processen pga att transporten av t ex syre till en korroderande yta är hämmad. R_{LPR} beskriver hastigheten hos själva korrosionsreaktionen



Om man gör en EIS-mätning på denna krets kan impedansdiagrammet bokstavligt talat se ut hur som helst och sannolikheten att man får en ideal halvcirkel torde vara försumbar. Enbart genom att betrakta de uppmätta impedanskurvorna kan man således dra vissa slutsatser om det finns mycket eller lite fukt och om det förekommer korrosion. För att kvantifiera fukt och korrosion måste dock en analys av kurvorna göras.

Analysen innebär att de komponenter som ingår i dessa modeller bestäms med regressionsanalys. Man ansätter startvärden på komponenterna och dataprogrammet räknar därefter fram nya värden på dessa komponenter så att den beräknade kurvan överensstämmer så bra som möjligt med den uppmätta kurvan. Ju mer komplicerad den ekvivalenta kretsen är (som i ovanstående figur) desto närmare måste startvärdena ligga de slutliga värdena för att programmet skall klara uppgiften.

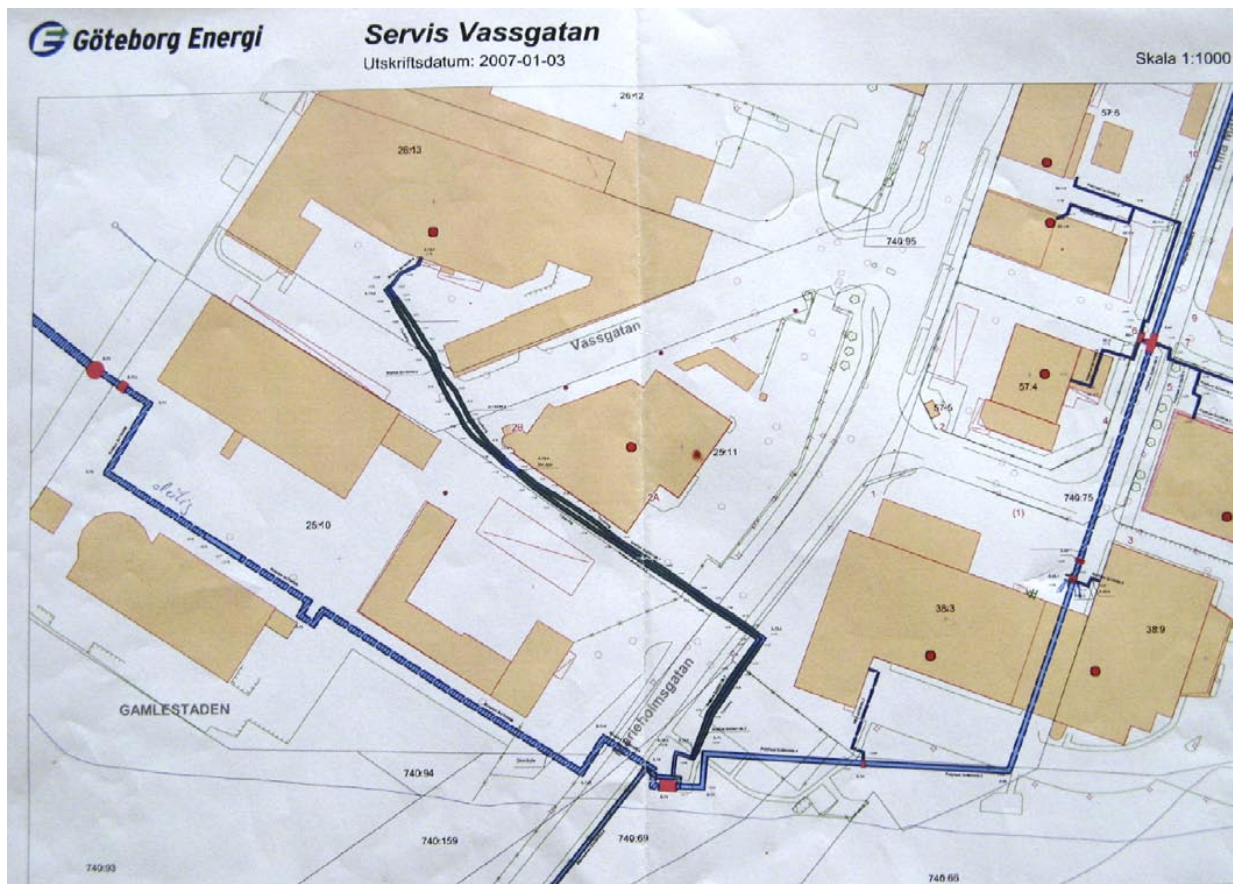
Som framgår av ovanstående figur är beskrivningen av korrosionen tämligen komplicerad. Två komponenter är särskilt intressanta: R_{LPR} som beskriver korrosionshastigheten och Z_w , som beskriver diffusionsprocesser.

4. MÄTNINGAR

Mätningar har gjorts på ledningsavsnitt i Göteborgs Energis fjärrvärmenät enligt nedanstående bild.

Utrustningen för EIS-mätningar har anslutits till larmtrådarna i kammaren Ä73, som är "knutpunkten" i underkant av kartbilden. Mätningar har gjorts på ledningarna åt vänster, uppåt och åt höger. Med fram- och returledning innebär det att mätningar gjorts på sammanlagt 6 ledningar.

Mätningar har också gjorts på den testrigg som finns hos SP i Göteborg. Denna testrigg har beskrivits i Svensk Fjärrvärme Rapport 2005:124 Fuktmätning med pulskometer.



I undersökningarna har använts en potentiostat av modell "Reference 600" samt programvara "EIS 300" installerad på en bärbar dator. Både potentiostat och programvara är tillverkade av Gamry Inc i USA. Utrustningen framgår av nedanstående figur.



Potentiostaten har anslutits till larmtrådsystemet i sk. två-elektrodsförfarande. Detta innebär att stålroret har anslutits som arbetelektrod medan koppartråden anslutits både som referenselektrod och motelektrod.

Impedansmätningen har utförts som sk potentiostatisk mätning varvid en växelspanning med amplituder från 100 mV till 1 V har lagts på larmtråd-stålrörssystemet. Potentiostaten mäter amplitud och fasförskjutning hos den växelström som därvid flyter. Vid varje försök har mätningar gjorts i ett frekvensområde från 0,02 Hz till 100 kHz med ett tiotal mätfrekvenser i varje frekvensdekad. Denna mätning tar ca 20 minuter och styrs automatiskt av programvaram.

Efter avslutad mätning analyseras den erhållna impedanskurvan med syfte att bestäma värden på de komponenter som ingår i den valda ekvivalenta kretsen. Därefter tolkas dessa komponenter i termer av fukt och ev korrosion.

5. RESULTAT

I nedanstående figurer återges de uppmätta impedanskurvorna för de 6 fjärrvärmeledningarna. Som synes varierar utseendet en hel del mellan kurvorna och inslaget av halvcirkelform är mer eller mindre tydligt.

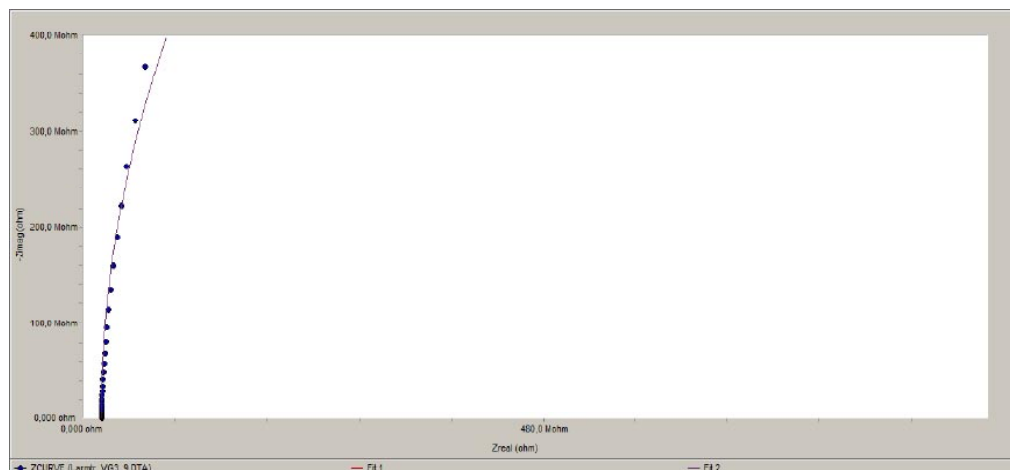
Punkterna i diagrammen är de uppmätta värdena, medan den heldragna kurvan är resultatet av analysen och bestämningen av den ekvivalenta kretsen.

I en tabellen nedan har de beräknade värdena på komponenterna som ingår i den ekvivalenta kretsen för respektive ledningsavsnitt angivits.

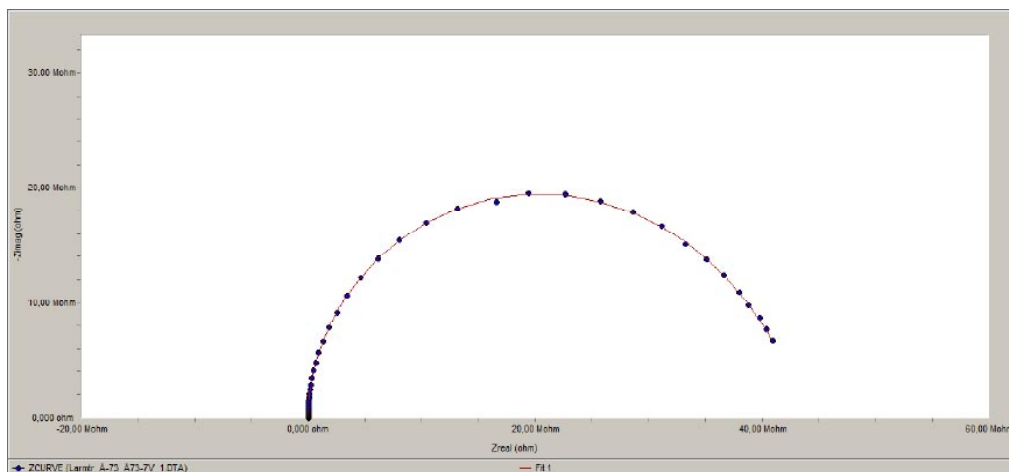
Nedanstående kurva, Ledningsavsnitt 2, representerar en torr ledning, resistansen i isoleringen har här beräknats till 2 200 Mohm (2,2 Gohm). Som jämförelse kan man med en "normal" multimeter mäta resistanser upp till storleksordningen 10 Mohm.

Som framgår får man med det valda frekvensområdet endast med början av den förväntade halvcirkeln. För att få med en komplett halvcirkel skulle det krävas att mätning görs vid extremt låga frekvenser. Eftersom det krävs minst en periods varaktighet av växelspännigen vid den aktuella frekvensen skulle det vara mycket tidskrävande, sannolikt flera dygn, att mäta upp hela denna halvcirkel.

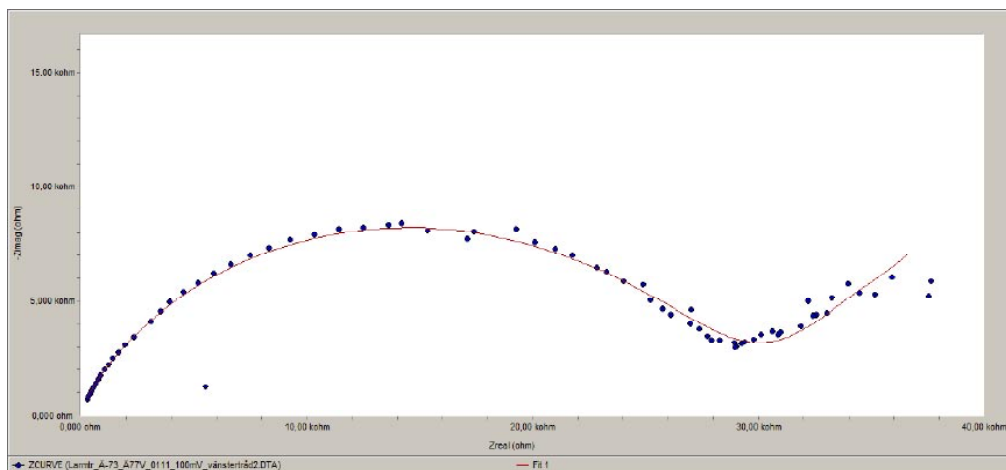
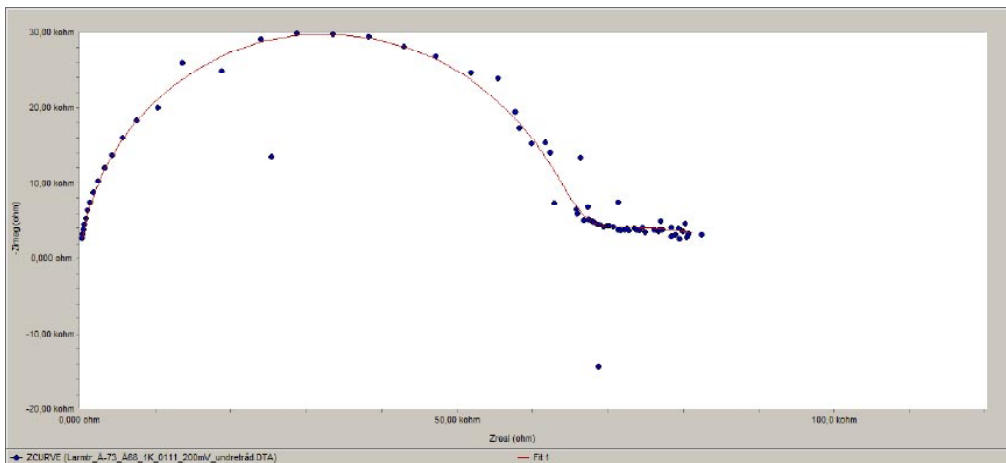
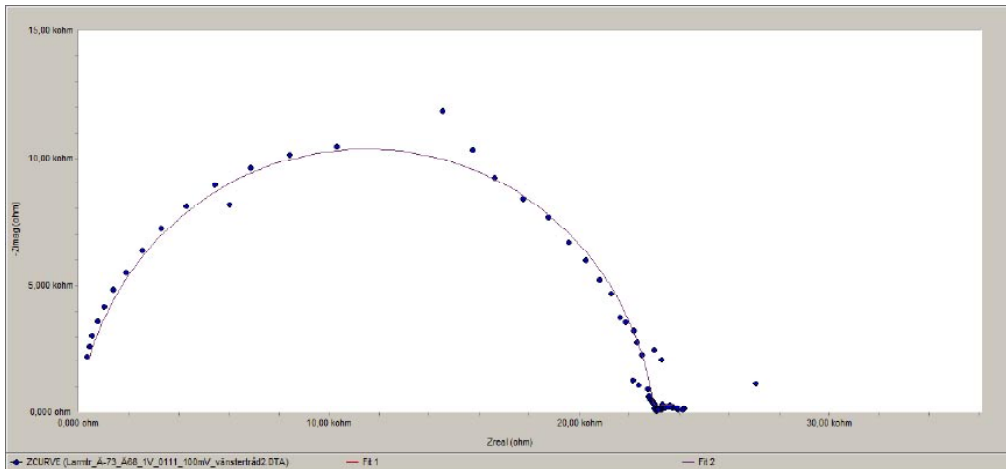
Även om erhållna mätdata således endast täcker en del av den förväntade halvcirkeln kan man beräkna den ekvivalenta kretsen och därmed extrapolera fram hela kurvan. Resistansen i isoleringen har således inte uppmätts direkt utan beräknats.



Om ovanstående figur representerar en torr ledning så representerar nedanstående figur, Ledningsavsnitt 1, en ledning med "nästan torr" isolering. Resistansen är här uppmätt till ca 33 Mohm. Ur kurvan har också kunnat beräknas värden på de komponenter som representerar korrosionsfölopp. Dessa värden indikerar att korrosionen är försumbar, vilket är förväntat med tanke på den låga fukthalten. Att det överhuvud taget finns ett inslag av korrosion framgår dock direkt av kurvan. Om man studerar den i detalj ser man att den inte beskriver en perfekt halvcirkel, utan är något "utdragen" vid de lägre frekvenserna i högra änden av kurvan.



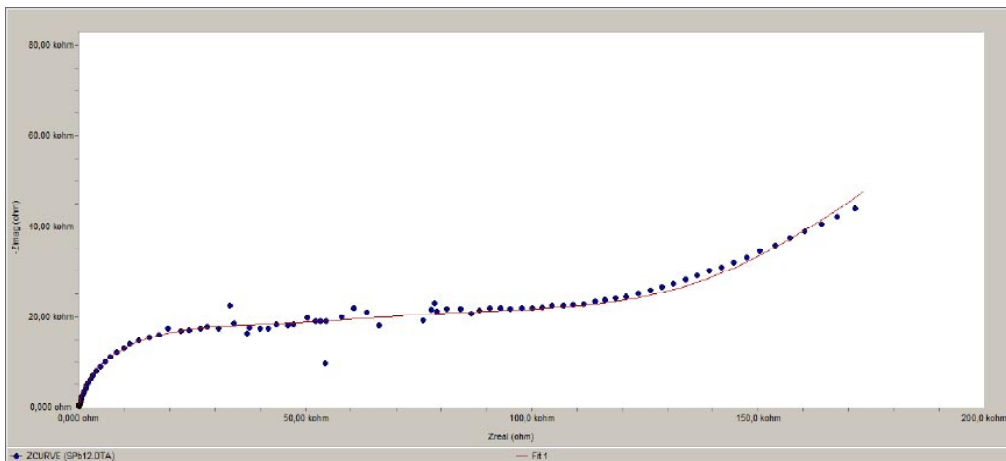
Nedanstående tre figurer, Ledningsavsnitt 3, 4 och 5 representerar ledningar som alla har en hel del fukt i isoleringen och med inslag av varierande, men icke försumbar, korrosion. Kurvorna innehåller dels en mer eller mindre deformerad halvcirkel samt en mer eller mindre framträdande "svans" vid lägre frekvenser. Halvcirkeln representerar kapacitansen mellan larmtråd och stålror samt resistansen i isoleringen. "Svansen" representerar korrosionsprocessen och den utdragna formen är en tydlig indikation på att det är diffusionsprocesser som styr korrosionshastigheten. Detta innebär att det är inte korrosionsreaktionen i sig som betämmer hastigheten, utan det är transporten av ämnen som skall eller har deltagit i denna reaktion. Det är rimligt att anta att det i detta fall är transporten (diffusionen) av syre till den korroderande ytan som bestämmer korrosionshastigheten.



Nedanstående figur, Ledningsavsnitt 6, visar ett larmtrådssystem med kortslutning mellan larmtråd och stålrör. Resistansen är här endast ca 3 ohm.



Nedanstående figur visar den kurva som uppmätts på testriggen vid SP. I detta fall fanns en fuktad filt i kontakt med larmtråd och stålrör. Korrosionen är i detta fall måttlig och det är diffusionsprocesser som styr korrosionshastigheten.



I nedanstående tabell har resultaten från analysen av impedansmätningarna sammanställts i form av värden för de komponenter som ingår i den ekvivalenta kretsen. Förutom resistansen i isoleringen har komponenterna angivits som konduktanser. Genom att ange parametrarna som konduktanser kan de direkt tolkas i termer, som är proportionella mot korrosionshastigheten.

R_{isol} är resistansen i isoleringen.

$1/Z_{\text{isol}}$ är värdet av kapacitansen mellan larmtråd och fjärrvärmerör.

$1/R_{\text{LPR}}$ är det inverterade värdet av polarisationsresistansen och är ett mått på korrosionshastigheten.

$1/Z_{\text{dl}}$ är värdet av den sk dubbelskiktscapacitansen. Denna kan ge ett en viss uppfattning om hur stor den fukt-/vätskeberörda ytan är, dvs vilken utbredning fukten har över metallytan.

$1/Z_{\text{w}}$ är ett mått på diffusionshastigheten för ämnen, t ex syre, som deltar i och påverkar hastigheten hos korrosionsionen.

Av tabellen framgår att i ledningsavsnitt 1 och 2 med torr resp. nästan torr isolering är korrosionshastigheten mycket låg eller så har korrosion inte kunnat detekteras. I ledningsavsnitt 3, 4 och 5 med fuktig isolering är korrosionshastigheten avsevärt högre. Det framgår att korrosionshastigheten är högst i ledningsavsnitt 3, medan det finns mest fukt i ledningsavsnitt 5. Resultaten antyder således att den högsta korrosionshastigheten inte nödvändigtvis föreligger där det finns mest fukt. Det är snarare så att bara det finns fukt så är det andra faktorer som avgör hur kraftig korrosionen är. Det handlar rimligen i stället om att där syretillförseln är snabbast där är också korrosionshastigheten högst.

Utgående från värdet på $1/Z_{\text{dl}}$ från försöket i riggen vid SP, ledningsavsnitt 7, där den vätskeberörda stålytan var ca 2 dm², så ger motsvarande värden för ledningsavsnitt 3, 4 och 5 en indikation på att det här handlar om vätskeberörda ytor av storleksordningen från knappt en till något tiotal kvadratmeter.

Ledningsavsnitt	R_{isol} M ₋	$1/Z_{\text{isol}}$ nS	$1/R_{\text{LPR}}$ _S	$1/Z_{\text{dl}}$ _S	$1/Z_{\text{w}}$ mS	fit
1 Servis Vassgatan fram	33,7	8,0	0,09	0,06	-	0,00016
2 Servis Vassgatan retur	2200,0	7,9	-	-	-	0,003
3 Mot Sävenäs fram	0,022	14,8	833,0	880,0	28,0	0,006
4 Mot Sävenäs retur	0,062	9,6	43,7	24,7	1,3	0,007
5 Mot Göta Älv fram	0,0002	15,7	33,6	990,0	0,21	0,007
6 Mot Göta Älv retur	kortslutning	-	-	-	-	
7 SP rigg, fuktig filt	0,001	0,78	5,65	1,8	0,025	0,008

6. DISKUSSION

6.1 Bedömning av mätresultat

EIS-mätningarna på larmtrådsystemen visar att den antagna ekvivalentkretsen i princip är tillämplig och att meningsfulla värden kan erhållas på de komponenter som ingår i ekvivalentkretsen. Dessa komponenter kan också tolkas i termer av förekomst av fukt och korrosion.

EIS-tekniken medger bestämning av mycket höga resistanser i torr isolering och kan därför vara ett mer skonsamt alternativ till användningen av isolationsprovare som använder höga mätspänningar med risk för överslag och skador.

I de fall där resistansen är relativt låg i isoleringen ($< 1 \text{ Mohm}$) och där isoleringen således torde vara tämligen fuktig uppvisar impedanskurvorna inslag av ”diffusionsprocesser” och således indikation på pågående korrosion. Diffusionsprocesser ger ett tydligt och tämligen lätt identifierbart mönster i impedansdiagrammen. Om diffusionsprocesser som styr korrosionshastigheten förekommer, så innebär det att korrosion kan detekteras även om resistansen är hög i isoleringen.

6.2 Bedömning av möjligheterna för rutinmässig användning av EIS-tekniken

Mätningarna har visat att EIS-tekniken har potential för detaljerad karakterisering av larmtrådsystem:

Eftersom mycket höga resistanser i torr isolering kan bestämmas, så bör tekniken vara användbar för kvalitetskontroll vid leverans/överlämnande av nya fjärrvärmeledningar. Till skillnad från konventionella isolationsprovare med mätspänningar av storleksordningen 1000 V, så har mätningarna visat att det vid EIS-mätningar endast behövs mätspänningar upp till ca 1 V. Risken för ev skador pga av överslag mellan larmtråd och fjärrvärmerör är därmed eliminerad.

Det har varit möjligt att få en uppfattning om ev förekomst och omfattning av korrosion i de fjärrvärmeledningar där fukt har konstaterats. Detta beror i hög grad på att de observerade korrosionsprocesserna styrs av diffusionsprocesser, vilka framträder tydligt i uppmätta impedansspektra. Eftersom den vätska/fukt i isoleringen, som är i kontakt med fjärrvärmeröret och som orsakar korrosion torde vara stillastående är det rimligt att anta att diffusionsprocesser är hastighetsbestämmande för korrosionshastigheten. Om detta gäller generellt så bör korrosion kunna detekteras tämligen tydligt från EIS-mätningarna. Det återstår dock att visa att dessa diffusionsprocesser är generellt förekommande vid korrosionsangrepp på fjärrvärmerör.

Eftersom impedansen i isoleringen och ”korrosionsimpedansen” ligger i serie påverkas möjligheterna att detektera korrosion av isoleringens resistans. Om isoleringen är relativt torr och har hög resistans, t ex tiotals Mohm, medan det trots detta lokalt finns fukt/vätska i kontakt med fjärrvärmeröret som orsakar korrosion så kan denna korrosion vara svår att detektera. Ur EIS-mätningen skall i detta fall ett litet impedansbidrag från korrosionsprocessen på kanske några kohm kunna detekteras i en total impedans på tiotals Mohm. Noggrannheten i mätningen avgör om detta är möjligt. Det torde dock vara ett specialfall som är sällsynt eller ev aldrig förekommer. Det är mer troligt att om det finns så mycket fukt/vätska i kontakt med fjärrvärmeröret att det orsakar någorlunda kraftig korrosion, så är också isoleringen mellan larmtråd och fjärrvärmerör

så fuktig att isoleringens resistans också är låg, t ex $< 1 \text{ Mohm}$. Det återstår dock också att visa att detta gäller generellt.

Under förutsättning att man kan visa eller åtminstone göra sannolikt att de två specialfall som beskrivits ovan i princip aldrig inträffar så torde EIS-tekniken kunna utvecklas till en rutinmetod med hög känslighet för karakterisering av larmsystem och detektering av korrosion, både vid leverans/överlämnande av nya system och i system där fukt förekommer.

Programmet för analys av EIS-mätningar behöver förbättras om tekniken skall kunna utvecklas till en rutinmetod. För närvarande krävs tidskrävande manuellt förarbete (för att hitta tillräckligt goda startvärden) för att den datoriserade regressionsanalysen skall fungera.

En kombination av EIS-mätningar och Pulsekomätningar bör kunna utgöra en mycket effektiv metodik för att detektera, karakterisera och lokalisera fukt. Punkter med hög korrosionshastighet kan identifieras och reparationsarbeten kan ges en lämplig prioritetsordning.

Det torde vara viktigare att snabbt reparera en punkt med måttlig fukthalt, men med hög korrosionshastighet än en punkt med hög fukthalt, men med måttlig korrosionshastighet.

6.3 Förutsättningar för standardisering av fuktlarm

EIS-tekniken medger att larmnivåer och andra parametrar kan göras generella och standardiseras. EIS-tekniken medger att sanna värden på kapacitansen mellan larmtråd och fjärrvärmerör samt resistansen i isoleringen kan bestämmas i fjärrvärmeledning med såväl torr som fuktig isolering. Om man kan hitta sanna värden på dessa parametrar så är de också användbara generellt och kan standardiseras. Detta medger också att gränsvärden och larmnivåer kan anges.

Detta torde vara en klar fördel i förhållande till de system för larmövervakning som är kommersiellt tillgängliga idag. De isolationsresistanser som uppmäts med dessa instrument har egentligen bara mening vid jämförelse av mätningar på en och samma fjärrvärmeledning med en och samma typ av instrument.

7. SLUTSATSER

Undersökningarna ha visat att:

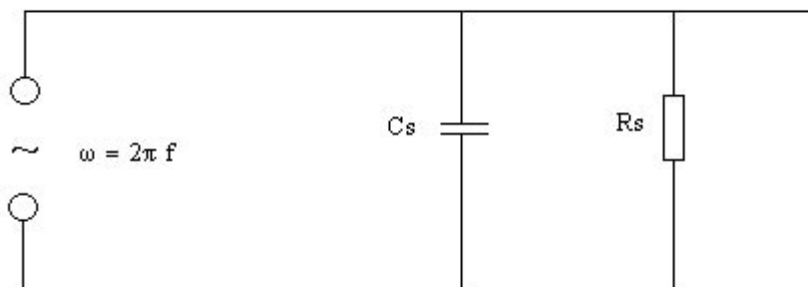
- Det finns inga hinder rent tekniskt att utföra EIS-mätningar med kommersiellt tillgänglig utrustning på larmtråds-kretsar i fjärrvärmeledningar.
- EIS-mätningar medger bestämning av både resistans i isoleringen i fjärrvärmerör och kapacitans mellan larmtråd och fjärrvärmerör. Tekniken torde därför vara användbar för t ex leveranskontroll av nya fjärrvärmeledningar.
- Resistanser i isoleringen i fjärrvärmerör kan bestämmas med EIS-teknik upp till över 2000 Mohm. Detta antyder att meningsfulla resistansvärden torde kunna uppmätas för fukthalter ända ner till ”i praktiken” torr isolering. EIS-tekniken erbjuder dämed till skillnad från konventionella isolationsmätare en metod för oförstörande bestämning av isolationsresistans i fjärrvärmeisolering.
- EIS-tekniken medger under vissa förutsättningar att pågående korrosion på fjärrvärmerör kan detekteras och även kvantifieras åtminstone i grova drag.
- En EIS-mätning på en fjärrvärmeledning tar ca 20 min för att ge tillräckligt meningsfull information. Denna tidsåtgång torde inte kunna underskridas.
- Den kommersiella programvaran för utvärdering av EIS-mätningar, som har använts vid mätningarna kräver i vissa fall tämligen tidskrävande arbete för bestämning av relevanta resistanser och kapacitanser. Om EIS-tekniken skall kunna användas rutinmässigt för mätning på larmsystem torde det vara nödvändigt att förbättra och anpassa denna programvara.

BILAGA 1

Beträffande impedansmätning i system för fuktlarm

Den teknik för larmövervakning som används idag och som beskrivs i ”Fukt i fjärrvärmerör, larmsystem och detektering”, Svensk Fjärrvärme FOU 2003:98 (1) bygger på en relativt enkel modell där man beskriver koppar-stålrörskretsen med en elektrisk ekvivalentkrets med en resistans i parallell med en kapacitans:

Figur 1.



C_s är kapacitansen mellan koppartråd och stålrör. Denna kapacitans anges i ”Larmsystem – Kompatibilitet” Värmeforsk, Hetvattenteknik rapport nr 286, 1987 till max 15 pF/m.

R_s är resistansen i isoleringen mellan koppartråd och stålrör och anges till $> 100 \text{ M}\Omega$ i torr isolering. I fuktig isolering sjunker värdet på R_s betydligt pga den elektrolytiska kontakten mellan koppar och stål.

Impedansen i denna krets beskrivs med komplexa tal:

$$Z_{\omega} = \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R_s}}$$

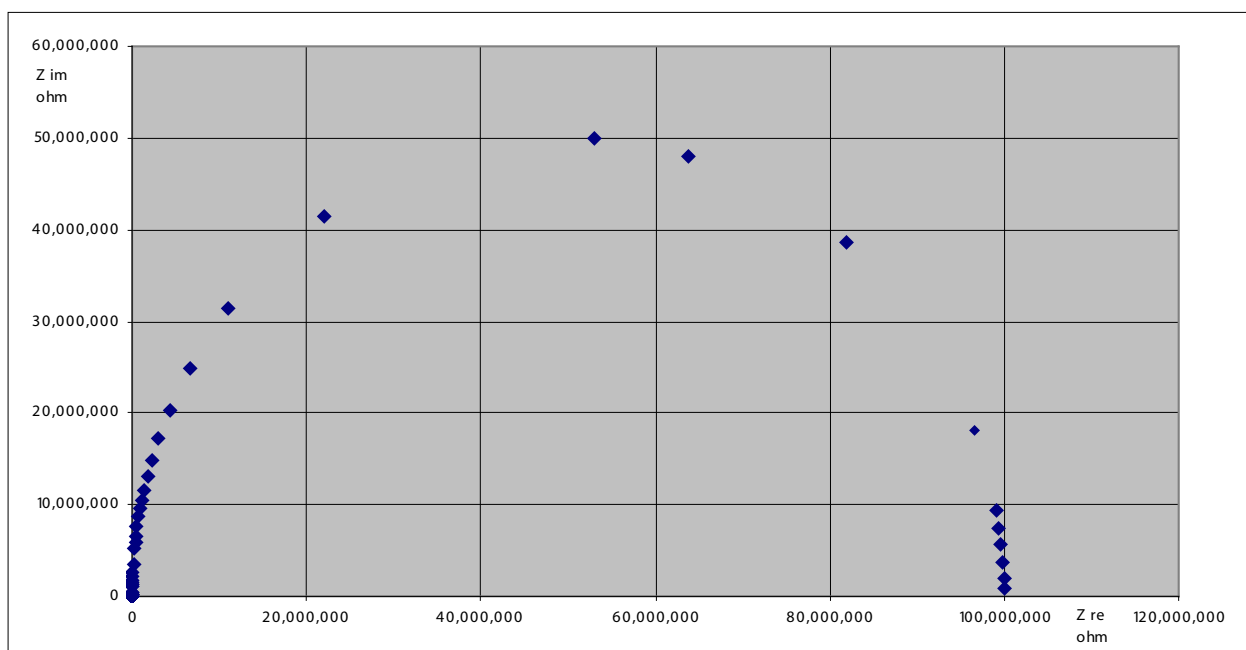
där ω är vinkelfrekvensen i rad/s och $j = \sqrt{-1}$

Eftersom impedansen är frekvensberoende brukar man plotta impedansen i sk Nyquist-diagram där impedansens realdel (resistiv del) anges på x-axeln och impedansens imaginärdel (kapacitiv andel) på y-axeln. Genom att mäta impedansen vid en rad olika frekvenser erhåller man ett antal punkter i diagrammet.

I följande 5 exempel simuleras impedansen för larmtråds-kretsar i torr, lite fuktig och mycket fuktig isolering. Effekten av en larmtråd som ligger närmare stålröret än normalt har också simulerats.

Exempel 1

I nedanstående impedansdiagram har en krets med $C_s = 1,5 \text{ nF}$ och $R_s = 100 \text{ M}\Omega$ simulerats. Detta kan antas motsvara en 1000 m lång fjärrvärmeledning med torr isolering och med en larmtråd som ligger på normalt avstånd från stålroret. Kurvan har beräknats för frekvenser från 0,01 Hz till 100 kHz i en logaritmisk fördelning med sex frekvenser per dekad.



Som framgår beskriver parallellkretsen i detta diagram en halvcirkel, där diametern motsvarar R_s och där frekvensen ökar ”motsols”. Vid 0 Hz är kretsen rent resistiv och representaras av skärningen med x-axeln vid 100 M Ω . Vid höga frekvenser blir kretsen alltmer kapacitiv och impedansen går mot noll.

I tabell 10 i rapport (1) anges mätfrekvenser för ett antal kommersiella instrument. I nedanstående tabell visas den impedans, Z , som skulle uppmätas med de olika instrumenten (i den mån de är utrustade med presentation av aktuellt mätvärde) vid deras respektive mätfrekvenser på den ovan angivna kretsen.

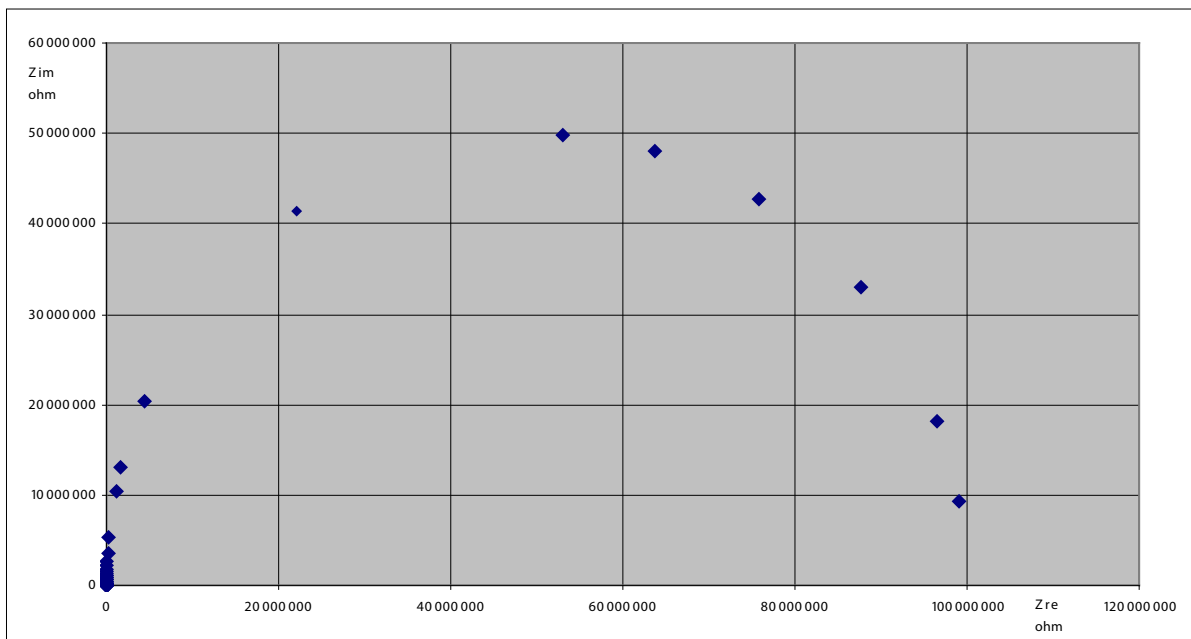
Mätfrekvens Hz	Impedans Mohm
2	46,9
5	20,8
11	9,6
50	2,1
88	1,2

Beroende på vilket instrument som används skulle således mätresultatet variera från 1,2 till 46,9 Mohm, medan den verkliga resistansen (R_s) är 100 Mohm. Vi ser således att mätresultatet varierar mycket kraftigt mellan de olika instrumenten. För att få ett någorlunda korrekt värde på R_s skulle mätfrekvensen i stället ha varit 0,1 Hz eller lägre.

Larmnivåerna i de kommersiella instrumenten brukar vara av storleksordningen 200 kohm och inget instrument skulle således larma.

Exempel 2

För att illustrera inflytandet av värdet på C_s har i nedanstående figur de frekvensberoende impedanserna plottats för ett tio gånger högre värde på C_s 15 nF medan R_s är oförändrat 100 Mohm. Detta motsvaras i praktiken av en 1000 m lång fjärrvärmeledning med torr isolering där någon del av larmtråden ligger närmare stålröret än normalt. Ju kortare avståndet är mellan larmtråd och stålrör, desto större blir C_s .



I detta fall blir mätvärdena från de kommersiella instrumenten avsevärt lägre, vilket framgår av nedanstående tabell:

Mätfrekvens Hz	Impedans Mohm
2	5,3
5	2,1
11	1,0
50	0,21
88	0,12

Mätvärdena från instrumenten varierar i detta fall mellan 120 kohm och 5,3 Mohm medan R_s fortfarande är 100 Mohm. Trots att isoleringen är torr skulle larm erhållas från instrumenten som arbetar vid 88 och sannolikt också vid 50 Hz. Detta är uppenbara falsklarm som orsakas av att tråden ligger för nära stålroret.

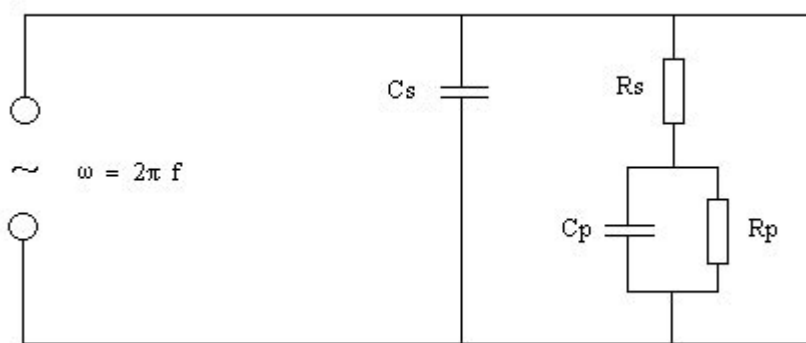
Fuktig isolering

Om vi nu antar att det finns fukt i isoleringen i fjärrvärmeledningen så kommer R_s att minska betydligt. Det är dock inte hela sanningen.

Om fukt kommer i kontakt med stålroret, koppartråden eller båda bildas ett sk elektrokemiskt dubbelskikt vid övergången mellan metallyta och vätska (elektrolyt). Dubbelskiktet sträcker sig endast något något eller några tiotal jonradier ut från metallytan och skiktets tjocklek är således av storleksordningen nm (10^{-9} m). Det elektrokemiska dubbelskiktet har sin ringa tjocklek till trots, påtagliga elektriska egenskaper i form av den sk dubbelskiktscapacitansen, C_p och den sk polarisationsresistansen, R_p .

I det tänkta fjärrvärmeröret enligt exempel 1 och 2 skulle närvaron av fukt medföra att den elektriska ekvivalentkretsen får följande utseende.

Figur 2.



C_s och R_s är desamma som förut, om än med nya värden. C_p och R_p har tillkommit och dessa finns i serie med R_s .

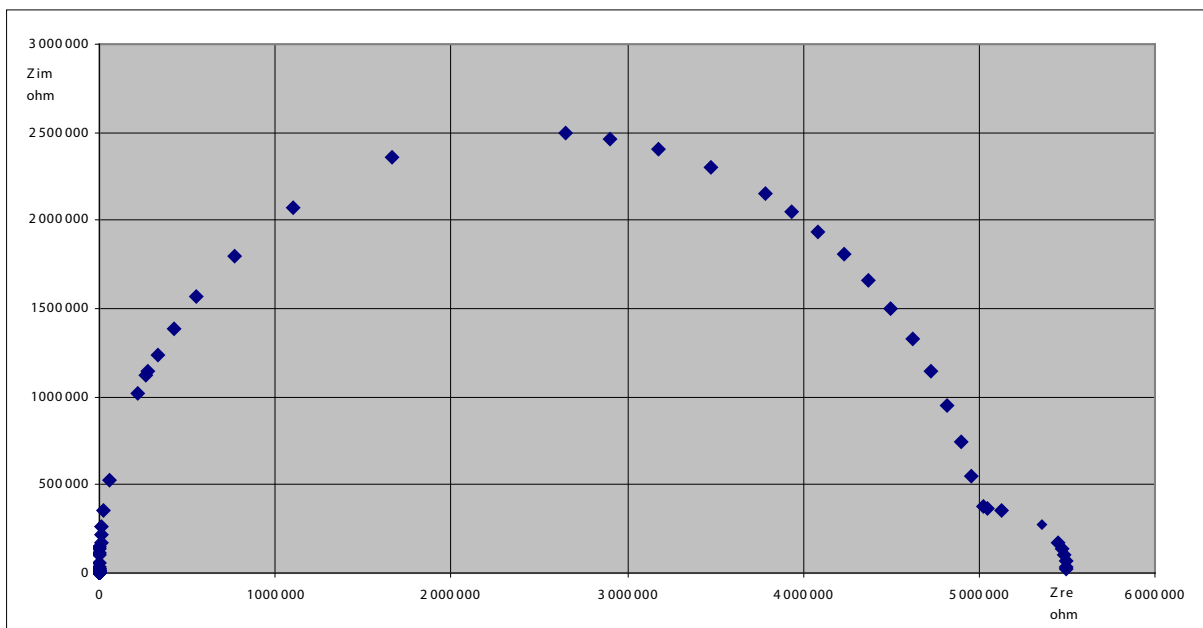
Impedansen för denna krets är:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p}}}$$

Inverkan av fukt i isoleringen beskrivs i följande 3 exempel.

Exempel 3

Om isoleringen i den fjärrvärmeledning som simulerades i **exempel 1** innehåller en mindre mängd fukt, som är i kontakt med stålröret kan vi anta följande värden på komponenterna i kretsen: $R_s = 5 \text{ Mohm}$; $C_s = 1,5 \text{ nF}$; $C_p = 1 \text{ }\mu\text{F}$ och $R_p = 0,5 \text{ Mohm}$. Med dessa värden får vi följande diagram.



Som synes har halvcirkeln nu fått en ”knorr” vid de lägre frekvenserna. Vid frekvensen 0 Hz ser vi att Z_{re} är 5,5 Mohm, vilket är summan av R_s och R_p . Den stora halvcirkeln synes ha diametern 5 Mohm och representerar kretsen med C_s och R_s . ”Knorren” representerar C_p och R_p och är egentligen en del av en mindre halvcirkel med diametern R_p , dvs 0,5 Mohm.

De kommersiella instrumenten skulle ge följande resultat:

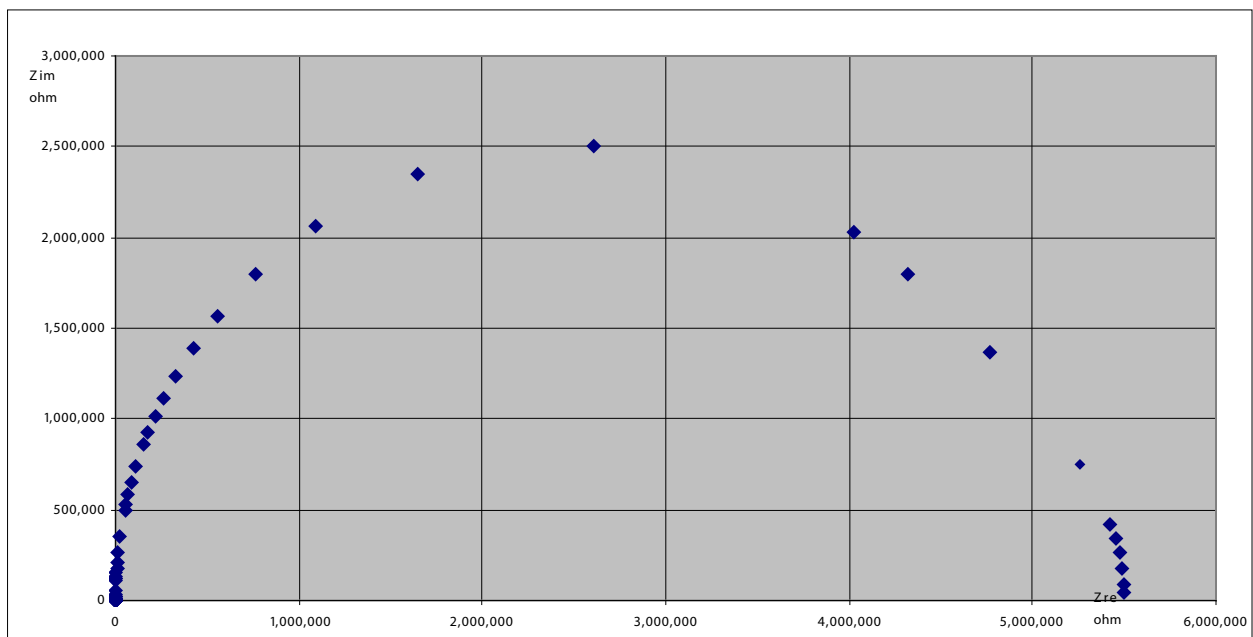
Mätfrekvens Hz	Impedans Mohm
2	5,0
5	4,7
11	4,4
50	2,0
88	1,2

Vid 2, 5 och 11 Hz får vi ett hyfsat korrekt värde på R_s medan vi får för låga värden vid 50 och 88 Hz.

Man kan notera att värdena för 50 och 88 Hz är i stort sett desamma som i exempel 1 trots att R_s ändrats från 100 Mohm till 5 Mohm. Om man mäter vid dessa frekvenser ser man således uppenbarligen ingen skillnad på en torr ledning och en ledning med lite fukt. Inget av instrumenten skulle larma, trots närvaron av fukt..

Exempel 4

Om vi på motsvarande sätt antar att det finns lite fukt i isoleringen på den fjärrvärmeledning som simulerades i **exempel 2** kan vi anta följande värden på komponenterna $R_s = 5$ Mohm; $C_s = 15$ nF; $C_p = 1$ μ F; $R_p = 0,5$ Mohm, vilket ger nedanstående diagram.



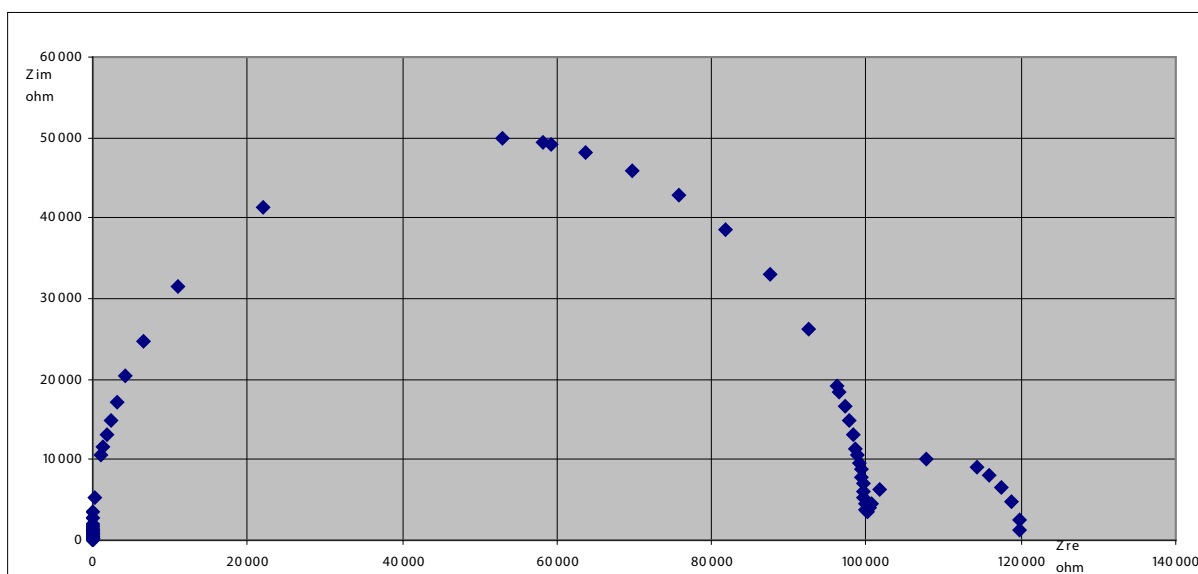
Som synes flyter de båda halvcirkklarna ihop och det krävs uppenbarligen god noggrannhet i mätpunkterna för att ur diagrammet kunna analysera fram en krets enligt figur 2 istället för en krets enligt figur 1.

Mätfrekvens Hz	Impedans Mohm
2	3,6
5	1,9
11	0,95
50	0,21
88	0,12

Vid 2 Hz får vi ett någorlunda korrekt värde, medan de övriga kommersiella instrumenten skulle visa för låga värden. Instrument som arbetar vid 50 och 88 Hz. skulle larma, medan de övriga instrumenten inte skulle larma trots närvaron av fukt.

Exempel 5

Om vi antar att det finns betydligt mer fukt i isoleringen och sätter $R_s = 100 \text{ kohm}$, $C_s = 15 \text{ nF}$; $R_p = 20 \text{ kohm}$ och $C_p = 50 \text{ }\mu\text{F}$ får vi följande diagram.



Mätfrekvens Hz	Impedans kohm
2	100,1
5	99,9
11	99,4
50	90,4
88	77,0

I detta fall skulle samtliga instrument larma. Vid hög fukthalt i isoleringen är det uppenbarligen inga problem att få larm. Detta gäller även om C_s vore 10 gånger lägre, motsvarande exempel 1 och 3.

Sammanfattning av de studerade exemplen

I nedanstående tabell sammanfattas i vilka av ovanstående exempel de olika kommersiella instrumenten larmar:

	Torr isolering	Torr isolering	Lite fukt	Lite fukt	Mycket fukt
Hz	Låg Cs 1	Hög Cs 2	Låg Cs 1	Hög Cs 2	Låg/hög Cs
2	-	-	-	-	Larm
5	-	-	-	-	Larm
11	-	-	-	-	Larm
50	-	Larm	-	Larm	Larm
88	-	Larm	-	Larm	Larm

¹ Låg C_s = normalt avstånd mellan larmtråd och stålrör.

² Hög C_s = litet avstånd mellan larmtråd och stålrör.

Det framgår att de kommersiella instrumenten endast lämnar entydiga larm vid hög fukthalt i isoleringen. I torr isolering kan de instrument som arbetar vid högre frekvenser lämna falska larm och i isolering med låg fukthalt finns å andra sidan risk att inget instrument larmar. Vilket som sker beror på storleken hos C_s , dvs hur långt larmtråden ligger från stålröret.

Det är uppenbarligen så att larmtrådkretsarna kan variera så mycket inbördes att ingen mätfrekvens garanterar att man får en pålitlig larmfunktion annat än vid höga fukthalter.

Det faktum att tillverkarna av de kommersiella instrumenten har valt helt olika mätfrekvenser torde vara en tydlig indikation på att det inte finns någon optimal frekvens utan alla har valt sin egen kompromisslösning.

EIS-mätningar

De impedansmätningar som simulerats i ovanstående exempel används bl a inom elektrokemisk impedansspektroskopi (EIS). Denna teknik används sedan länge bl a för att studera och karaktärisera korrosionsförlopp och korrosionsskyddande beläggningar såsom passivfilmer, målning och andra organiska beläggningar.

Som framgår av exemplen ovan bör EIS-tekniken kunna användas för noggrann karakterisering av larmtrådkretsar och erbjuda följande fördelar i jämförelse med dagens teknik:

- Känsligheten för att detektera fukt kan höjas 100 – 1000 gånger räknat som resistansförändring i isoleringen. Genom att kunna detektera mycket lägre fukthalter än idag kan läckor upptäckas mycket tidigare.
- Känsligheten är oberoende av om larmtråden ligger på normalt avstånd från stålröret eller ej.
- Det kan bestämmas om konstaterad fukt är i kontakt med stålröret eller ej.
- Risker för falsklarm pga att larmtråden ligger för nära stålröret kan helt elimineras.
- Om larmtråden ligger i kontakt med stålröret antingen direkt eller via metallspån, svetslappar eller dylikt kan detta detekteras som kortslutning och inte feltolkas som fukt.

Utrustning för EIS-mätning är tämligen dyrbar och det är orealistiskt att kontinuerligt övervaka larmtråds-kretsar med sådan utrustning. Däremot torde det vara realistiskt att med bärbar EIS-utrustning utföra engångsmätningar. Exempelvis bör man vid t ex slutbesiktning eller i drifttagande av en ny fjärrvärmeledning kunna göra en detaljerad karakterisering av larmtråds-kretsen.

I förlängningen skulle exempelvis följande mätsystem och mätförfarande kunna användas. I detta mätsystem ingår dels bärbar utrustning för EIS-mätningar, dels ett enkelt instrument (som sannolikt behöver nyutvecklas) för kontinuerlig larmtrådsövervakning där såväl mätfrekvens som larmgräns kan ställas in individuellt:

1. EIS-mätningar utförs som engångsmätning på en larmtråds-krets för att karakterisera denna. Bestämning görs av R_s och C_s samt även R_p och C_p i den mån fukt finns i isoleringen.
2. Utgående från EIS-mätningen väljs mätfrekvens och larmgräns på instrumentet för kontinuerlig övervakning *individuellt för denna larmtråds-krets*.

Eftersom R_s och C_s kan antas vara oförändrade så länge ingen fukt tränger in i isoleringen, kan mätning vid en *väl vald frekvens* användas för att detektera små förändringar i fukthalt. Om man t ex i det ”torra” Exempel 1 ovan väljer mätfrekvensen 11 Hz och larmgränsen 9 Mohm borde man rimligen få en mycket känslig mätning. (T ex ger en sänkning av R_s från 100 till 20 Mohm vid 11 Hz en sänkning av impedansen från 9,6 till 8,6 Mohm).

3. Först när fukt konstaterats och det framgår att denna fukt är i kontakt med stålröret behöver mätning med pulsekometer göras för lokalisering.

Om C_p och R_p .

Dubbelskiktscapacitansen C_p kan ses som en kondensator där den ena plattan utgörs av metallytan och den andra plattan av ett lager av joner i elektrolyten som är adsorberade på metallytan. Värdet på C_p beror i första hand på storleken på den fuktiga metallytan och C_p anges därför som $\mu\text{F}/\text{cm}^2$. Vidare påverkas värdet bl a av vilka joner som ingår. Exempelvis ger kloridjoner höga värden, medan sulfatjoner ger lägre värden. Förekomsten av isolerande beläggningar, exempelvis en målade yta, sänker värdet på C_p med många tiopotenser, eftersom avståndet mellan metallytan och jonskiktet ökar radikalt. På en fuktig, korroderande stålyta är C_p av storleksordningen $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Polarisationsresistansen R_p har ovan behandlats som en resistans som är parallellkopplad med dubbelskiktscapacitansen. R_p motsvaras i den korrosionskemiska verkligheten av motståndet mot överföring av laddningar mellan metall och elektrolyt.

När fukt kommer i kontakt med en stålyta startar en korrosionsreaktion som innebär att järn oxideras och vandrar ut i lösningen som järnjoner där de fälls ut som oxid. För att driva denna oxidation sker normalt en reduktion av syre som diffunderar in till metallytan. Det finns en hel del faktorer som kan hämma denna process och som bidrar till storleken på R_p . I första hand är R_p beroende av hur stor den fuktiga ytan är, ju större yta desto mindre R_p . R_p anges därför i ohm/cm^2 .

Ytterligare faktorer som påverkar R_p är t ex: syrehalten i närheten av den fuktiga stålytan, dvs i isoleringen (är syrehalten låg blir R_p högt); diffusionshastigheten för syre in till metallytan (är diffusionen hämmad blir R_p högt); förekomst av beläggningar på stålytan som hämmar oxidationen av järn (ju tätare beläggning desto högre R_p).

R_p är därför i verkligheten en synnerligen komplicerad komponent, som endast i undantagsfall kan liknas vid en ren resistans. I praktiken innebär vanligtvis det faktum att man mäter, dvs att man lägger på en yttre spänning över det elektrokemiska dubbelskiktet, att det bildas koncentrationsgradienter som motverkar den pålagda spänningen. R_p uppträder därför ofta som något så märkligt, som en frekvensberoende resistans; ju lägre mätfrekvens desto högre R_p .

Det faktum att R_p ofta kan vara avsevärt större än vad som skulle vara fallet om R_p uppträdde som en enkel resistans gör den lättare att detektera. Som framgår av figur 2 är det svårt att upptäcka låga fukthalter eftersom R_s då är stort och ”döljer” R_p och C_p . Ju större R_p är i förhållande till R_s desto lättare kan därför fukt detekteras.



Fjärrsyn – forskning som stärker konkurrenskraften för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för ett hållbart samhälle, till exempel genom att bana väg för affärsmässiga lösningar och framtida teknik. Programmet drivs av Svensk Fjärrvärme med stöd av Energimyndigheten. Mer information finns på www.svenskfjarrvarme.se/fjarrsyn

OPTIMERING AV FUKTLARM MED ELEKTROKEMISK IMPEDANSSPEKTROKOPI – EIS

Elektrokemisk impedansspektroskopi, EIS är en teknik som används för att undersöka processer och händelseförlopp hos ytor som kommer i kontakt med vätskor. Här redovisas en inledande studie som har gjorts för att undersöka om den här tekniken är användbar för att få bättre information från larmtrådssystem i fjärrvärmeledningar.

Undersökningarna visar att tekniken kan användas och att man i grova drag både kan bestämma omfattningen av fukt och omfattningen av pågående korrosion. Dessutom medger EIS-tekniken att generella och standardiserbara riktvärden och larmgränser bland annat för resistans i isoleringen kan anges.

Den kommersiella programvara som har använts för att utvärdera EIS-mätningarna behöver dock förbättras och anpassas för att rutinmässigt kunna användas för mätning på larmsystem. Ett samarbete mellan branschen och tillverkare av mätutrustning bör kunna utveckla en kommersiellt gångbar teknik.

