



UPPSALA
UNIVERSITET

TVE-F 17 014 juni

Examensarbete 15 hp
Juni 2017

Smart Termometer

Rutger Brattström
Karl Ekström



UPPSALA
UNIVERSITET

**Teknisk- naturvetenskaplig fakultet
UTH-enheten**

Besöksadress:
Ångströmlaboratoriet
Lägerhyddsvägen 1
Hus 4, Plan 0

Postadress:
Box 536
751 21 Uppsala

Telefon:
018 – 471 30 03

Telefax:
018 – 471 30 00

Hemsida:
<http://www.teknat.uu.se/student>

Abstract

Smart Thermometer

Rutger Brattström

When cooking in the oven, knowing the temperature is crucial. However, regular thermometers are not suited for extended usage in the oven, and repeatedly opening the oven to measure quickly gets tiring and unpractical. Today, some ovens have integrated thermometers for easy access to temperature, displaying the temperature on the oven. However, many ovens lack this feature, and all ovens still require the cook to be in the direct vicinity to check the temperature. The few solutions to this that exist are all expensive and have batteries in the oven. This paper will investigate alternate solutions to this issue, without involving expensive components or integrated batteries.

The results were that it is indeed possible to wirelessly measure temperature in an oven, without an integrated battery. The method used was to measure the impedance of an LC-circuit through magnetic coupling, and through the impedance find the resonance frequency. This frequency was then used to find the temperature of the C-component, which matches the temperature of the object being cooked.

Handledare: Jörgen Olsson
Ämnesgranskare: Martin Sjödin
Examinator: Maria Strömme
ISSN: 1401-5757, TVE-F 17 014 juni

Projekt: Smart Termometer

Rutger Brattström, Kalle Ekström

9 juni 2017

Populärvetenskaplig sammanfattning

Vid vissa typer av matlagning är det viktigt att veta temperaturen på det man tillagar, särskilt vid köträtter. På spisen eller grillen är detta enkelt skött med en vanlig termometer, som det bara är att sticka in och läsa av. Men i en ugn är en vanlig termometer otymplig; man bör inte lämna termometern i ugnen, och det är opraktiskt att öppna ugnen för att läsa av varje gång man vill veta temperaturen. Detta löser vissa ugnar genom att integrera en termometer i ugnen, men långtifrån alla ugnar har detta och värdet visas enbart på en display på ugnen. Det har nyligen kommit några trådlösa ugnstermometrar på marknaden, men de är dyra och har inbyggda batterier, två saker som borde kunna åtgärdas.

I det här projektet har det visats att en smart köttermometer kan byggas med enkla komponenter och en minidator. I projektet har flera metoder för att mäta temperaturen och skicka denna data testats. Den metod som valts att mäta temperaturen med använder resonansfrekvensen i en LC-krets, och skickar signalen genom magnetisk koppling mellan två spolar. Resonansfrekvensen beror på kapacitansen i en kondensator, som i sin tur är temperaturberoende. Den mäts genom att mäta impedansen och hitta impedanstoppet.

Den framtagna termometern kan klara av ugnsvärme, mäta temperaturen och skicka denna genom glasrutan till en minidator, som skickar vidare informationen till en mobilapp. Således kan man enkelt hålla koll på temperaturen i köttet från mobilen, och få en notis när det är dags att titta till det.

Innehåll

1	Inledning	5
1.1	Bakgrund	5
1.1.1	Matlagning	5
1.1.2	Smarta prylar	5
1.1.3	Liknande produkter på marknaden	5
1.1.4	Arduino	6
1.2	Målsättning	6
1.3	Frågeställningar	6
1.4	Transformatorlösningen	6
2	Teori	7
2.1	Impedans	7
2.1.1	LC-krets	8
2.2	Impedansmätning	8
2.3	Arduino som mätutrustning	9
2.4	Induktion	10
2.5	Magnetisk koppling	10
3	Metod	11
3.1	Byggande av impedansmeter	11
3.2	Programmerande av impedansmeter	12
3.3	Mätning	12
4	Resultat	13
5	Diskussion	19
5.1	Kort om lösningar vi undersökte men inte genomförde	20
5.2	Återkoppling till målsättning och frågeställningar	20
5.3	Fortsättning på projektet	21
6	Slutsats	21
7	Appendix	21

1 Inledning

1.1 Bakgrund

1.1.1 Matlagning

Vid matlagning är det viktigt att veta temperaturen på det man tillagar, särskilt för köttträtter. På spisen eller grillen är detta enkelt skött med en vanlig termometer, som det bara är att sticka in och läsa av. Men i en ugn är en vanlig termometer otymplig; man bör inte lämna termometern i ugnen, och det är opraktiskt att öppna ugnen för att mäta varje gång man vill veta temperaturen. Detta löser vissa ugnar genom att integrera en termometer i ugnen, men långtifrån alla ugnar har detta och värdet visas enbart på en display på ugnen. Det har nyligen kommit några trådlösa ugnstermometrar till marknaden, men de är dyra och har inbyggda batterier, två saker som borde kunna åtgärdas.

En bra ugnstermometer bör ha följande egenskaper:

- Mäter temperaturen med hög precision
- Kräver ingen sladd in i ugnen
- Har inget batteri i ugnen
- Kan visa temperaturen utanför ugnen
- Är billig

Ett stort plus är dessutom om termometern går att koppla upp till mobilen

1.1.2 Smarta prylar

Idag får allt fler prylar epitetet ”smart”, det vanligaste exemplet är så klart telefoner som idag klarar av mycket mer än bara att ringa och skicka sms. Även smarta klockor har de senaste åren lanserats på bred front.

Smart betyder i den här bemärkelsen att den tidigare ”dumma” prylen får en dator adderad till sig, och i de flesta fall kan datorn kommunicera med andra smartaprylar genom wifi eller bluetooth.

Det finns en del vardaglig hemelektronik som har fått smarta varianter, t.ex. taklampor och högtalare som kan styras från en smartphone eller brandvarnare som kommunicerar med varandra så att alla brandvarnare i huset varnar om en detekterar rök.

I det här projektet har vi som målsättning att bygga en kötttermometer med förmågan att kommunicera med en smartphone. Man ska kunna följa temperaturen i köttet från en mobilapp, och kunna ställa in en temperatur då köttet är färdigt och då bli meddelad.

1.1.3 Liknande produkter på marknaden

Som tidigare nämnt är smarta produkter på frammarsch och när vi påbörjade projektet gjorde vi en snabb översyn av marknaden. Det visade sig att det finns några liknande produkter redan. Dessa är dock, enligt våra uppskattningar, väldigt dyra¹²³ i förhållande till materialkostnaden.

¹<https://www.kickstarter.com/projects/1977846026/meater-the-first-truly-wireless-smart-meat-thermom>

²<https://www.indiegogo.com/projects/loki-the-smart-wifi-meat-thermometer-food-gadgets-2>

³<https://www.kjell.com/se/sortiment/hem-kontor-fritid/fritid/kokstillbehor/matlagningstermometrar/rubiconstradlos-stektermometer-for-mobilen-p48421>; Alla från 16 maj 2017

Priserna vi fann var från 300 kr och uppåt. Vårt mål blev därefter att visa att en fungerande produkt skulle kunna göras mycket billigare. Samtliga termometrar använder batterier i ugnen, vilket medför högre kostnader liksom begränsade tillämpningar.

1.1.4 Arduino

Arduino är en utvecklingsplattform baserad på öppen källkod. Det är en kombination av hårdvara och mjukvara. Med kunskaper inom både elektronik och programmering är det ett smidigt sätt att bygga sitt smarta projekt.

I början av projektet användas den vanligaste versionen av Arduino, som kallas Arduino Uno. Den har ganska stora begränsningar i hårdvaran som var hämmande för projektet, så senare införskaffade vi en mer komplicerad variant som kallas Arduino Due.

En Arduino Due består av en Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU enkapseldator placerad på ett förbyggt chip med några användbara funktioner. Den är också förprogrammerad att kunna styras med Arduinos egna programmeringsspråk och utvecklingsmiljö.

Problemet med en Arduino är dess inköpskostnad; om vår slutprodukt skulle vara byggd med en sådan skulle det sätta prismålet ej vara uppnåeligt. Dock kan Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU köpas separat till en billig penning och anpassas specifikt till vårt projekt, men eftersom projektgruppen inte har någon erfarenhet av enkapseldatorer sedan tidigare har vi valt att använda en Arduino för att visa att vårt koncept fungerar.

1.2 Målsättning

Målet är att bygga en trådlös och batterilös termometer som kan kommunicera med en smartphone och berätta sin uppmätta temperatur. En basstation som i detta projekt motsvaras av en Arduino ska vara mellanhanden som kan kommunicera trådlöst med både termometern i köttet och med telefonen.

1.3 Frågeställningar

1. Hur ska temperaturen mätas?
2. Hur ska en signal genereras från mätningen?
3. Hur ska termometern förses med energi trådlöst?
4. Hur ska signalen skickas ut ur ugnen trådlöst?
5. Hur ska komponenterna klara den extrema miljön?

1.4 Transformatorlösningen

Lösningen bygger på den enkla principen med en LC-resonanskrets. Detta är en kondensator parallellkopplad med en spole, och när en växelspanning läggs över kopplingen kommer en viss frekvens att ge en väldigt stor impedans (teoretiskt oändlig). Resonansfrekvensen beror på komponenternas kapacitans respektive induktans.

Idag byggs både spolar och kondensatorer med målet att deras värden ska ändras så lite som möjligt med temperaturen, och rent generellt blir de mindre temperaturkänsliga ju dyrare de är. Som tur är för det här projektet så finns det lågkvalitetskomponenter vars temperaturkänslighet är väldigt stor. Planen är att placera en sådan ”dålig” kondensator i spetsen på en termometersticka som sticks in i köttet, handtaget består sedan av en spole av högre kvalitet, som dessutom befinner sig i

en mer konstant temperatur i ugnen. Resonansfrekvensen kommer då helt bero på kondensatorns kapacitans, som ändras beroende på temperaturen.

En trådlös överföring till utsidan av ugnen kan sedan göras med hjälp av en slags transformator, det vill säga två stycken spolar med samma lindning och riktning. Dessa kommer då att elektromagnetiskt inducera strömmar i varandra. Mer om detta senare.

Temperaturen fås alltså genom att mäta impedansen över vår resonanskrets för olika frekvenser.

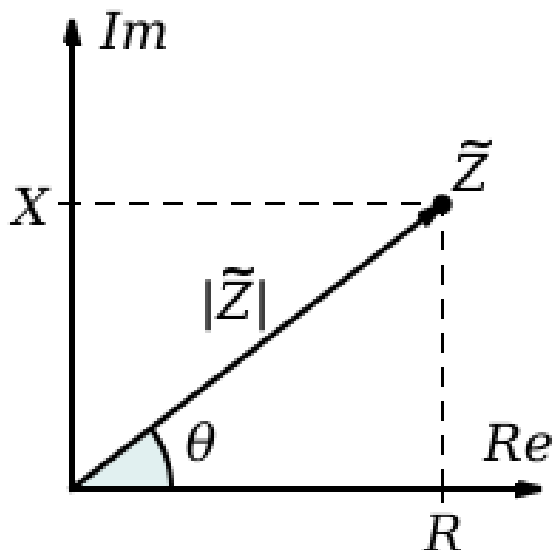
2 Teori

2.1 Impedans

Impedans är motståndet för en växelström, och representeras av ett komplext tal $Z = R + jX$ där Z står för impedans, R för resistans och X för reaktans. Ett idealt motstånd har enbart en resistiv impedans och ideala kapacitiva och induktiva komponenter har enbart reaktiva impedanser. Den betydande skillnaden mellan de kapacitiva och induktiva komponenterna är tecknet på reaktansen, där en kondensator alltid är negativ och en spole positiv. Detta innebär att en negativ reaktans motsvarar en kapacitans och en positiv en induktans.

Impedansen för en resistor är alltså bara resistiv och lika med resistansen för en likström, men för kondensatorer och spolar är Z frekvensberoende och varierar således beroende på signal. De tre impedanserna beror på frekvensen enligt följande: Impedansen för en resistor: $Z_R = R$. R är storleken på resistansen i Ohm. Impedansen för en kondensator: $Z_C = 1/j\omega C$. j är $\sqrt{-1}$ och C är kapacitansen i kondensatorn i Farad. Impedansen för en spole: $Z_L = j\omega L$. j är $\sqrt{-1}$ och L är induktansen i spolen i Henry.

Som formlerna ovan visar beror impedansen enbart på insignalens frekvens och de involverade komponenterna, men ej på insignalens amplitud. Det innebär att om komponenterna är kända så får man ett entydigt förhållande mellan frekvens och impedans. Det innebär även att om man mäter frekvensen och impedansen så kan man räkna ut kapacitansen, induktansen eller resistansen, förutsatt att man vet vilka komponenter som är involverade. Eftersom de tre komponenterna, liksom kombinationer av dem, har olika frekvensberoende kan man genom ett frekvenssvep utläsa vilka komponenter man har och värdena på dessa.



Figur 1: Impedans i den komplexa talplanet. Bilden är tagen från Wikipedia⁴

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance; 17e maj 2017

2.1.1 LC-krets

Den krets som kommer användas i projektet är en så kallad LC-krets; LC-kretsen består av en spole (L) parallellkopplad med en kondensator (C). Denna krets har egenskapen att impedansen vid en viss frekvens har en tydlig maximipunkt som beror på L och C. Uttrycket för en parallellkopplad spole och kondensator visas i ekvation 1, där ω_0 är resonansfrekvensen. Man ser i sista ledet av ekvationen att när $\omega = \omega_0$ så är Z_{LC} oändligt stor.

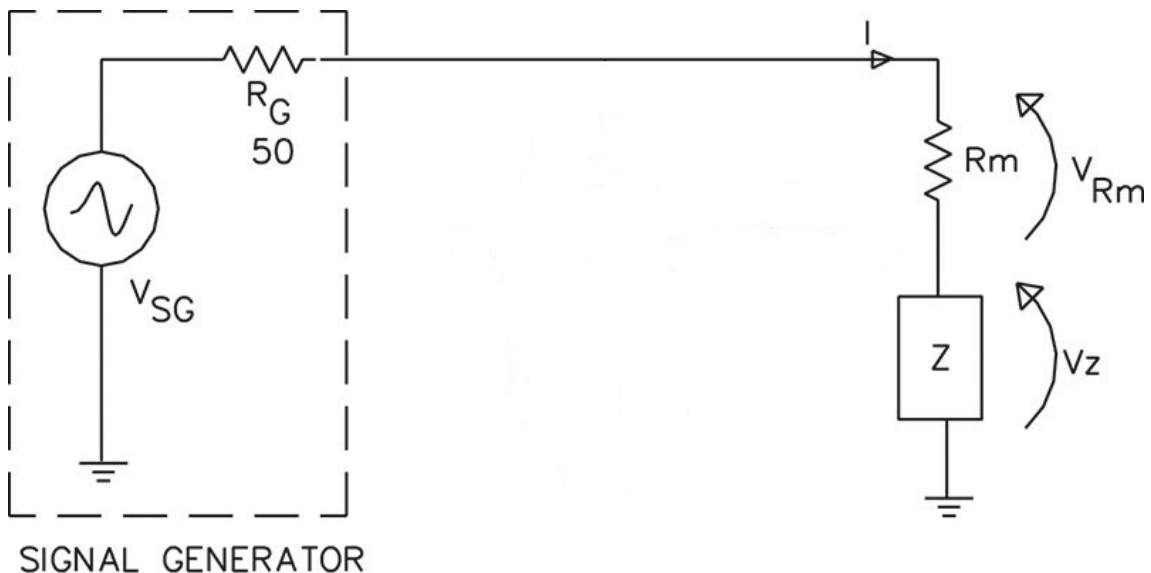
$$Z_{LC} = Z_L // Z_C = \frac{Z_L Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = -j \frac{\omega L}{\omega^2 LC - 1} = \left\{ \text{definiera } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right\} = -j \frac{1}{C} \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (1)$$

Definitionen av ω_0 ger att den enbart beror på L och C. Detta ger att en mätning av resonansfrekvensen med en känd induktans också ger kapacitansen för kretsen. Eftersom kapacitansen som en funktion av resonansfrekvensen är entydig så kan man göra en översättningstabell där en uppmätt resonansfrekvens svarar mot en och bara en kapacitans. Således kan man bestämma värdet på C i en LC-krets genom att mäta resonansfrekvensen med ett känt L.

Genom att mäta impedansen för ett helt frekvenssvop och hitta resonansfrekvensen, kan man alltså mäta temperaturen. Således behövs ett sätt att mäta impedansen.

2.2 Impedansmätning

Som tidigare nämnt är impedans motståndet som en växelspanning upplever. Ett enkelt sätt att mäta amplituden på impedansen är då att låta växelspanningen spänningsdelas mellan ett känt motstånd och det objekt som impedansen mäts för. Eftersom motståndets impedans är frekvensoberoende kommer spänningsfördelningen bero enbart på impedansen över det som mäts.⁵ Genom att mäta växelspanningarna före och efter motståndet seriekopplat med mätobjektet kan impedansamplituden för mätobjektet räknas ut.



Figur 2: Kopplingsschema för mätkretsen. Bild från magasinet Nuts and Volts[1]

I figur 2 ser vi att vi får en spänningsdelning över R_m och Z . Om vi mäter både V_{R_m} och V_Z så kan vi räkna ut hur spänningsdelningen blir och om vi vet R_m så är det lätt att räkna ut amplituden på Z . Vilket då blir:

$$|Z| = \frac{V_Z R_m}{V_{R_m}} \quad (2)$$

Alltså behövs ett instrument att mäta spänningen med och skicka denna vidare, eller själv hitta resonansfrekvensen.

2.3 Arduino som mätutrustning

För att mäta impedansen användes en Arduino. Arduino är en minidator som kan programmeras att lagra och exekvera kod i C++. Arduinon finns i olika modeller med olika specifikationer. Under projektets gång användes Arduino Uno⁶, men i slutskedet byttes den ut mot en Arduino Due⁷, med vilken all mätdata är insamlad.

För att kunna mäta impedans måste spänningen vid två noder mätas. En Arduino mäter spänning genom sin analog to digital converter (adc). Den analoga spänningen över den pinmed vilken man mäter konverteras till ett digitalt värde genom kommandet AnalogRead(). En Arduino Uno kan mäta en spänning på 0-5V med tio bitars noggrannhet. Värdet 0V motsvarar då 0, och 5V motsvara 1023 ($2^{10} - 1$). Mätprecisionen blir alltså $5V/1024 = 4,9mV$. En Arduino Due har betydligt högre precision och mäter 0-3,3V till ett 12-bitars-tal. 0V är då fortfarande 0, medan 3,3V blir 4095 ($2^{12} - 1$), och mätprecisionen blir $3,3V/4096 = 0,81mV$. Upplösningen är dock satt till 10 bitar som utgångsläge, men det går att ändra.

Avläsningsprocessen i adc:n tar tid, vilket påverkar hur många mätningar per sekund som Arduinon kan göra. Arduino Unos mikrokontroller ATmega328 har en clockfrekvens på 16MHz. Samplingen sker dock inte på 16MHz, ty det finns en prescaler, som sänker frekvensen för att säkerställa att mätnoggrannheten uppnås. Högsta noggrannhet fås vid en frekvens på 50-200kHz, och därför är prescalern inprogrammerad som 128, då $16MHz/128=125kHz$. Dessutom tar det 13 clockcykler att konvertera ett analogt värde till ett digitalt, så den slutgiltiga samplingsfrekvensen landar teoretiskt på 9,6kHz (detta stämde även vid mätning i labbet). Genom att ändra värdet på prescalern kan samplingsfrekvensen dock ökas, på bekostnad av de sista bitarna i konverteringen⁸.

Arduino Duen har en fyra gånger så snabb mikrokontroller, men vid test upptäcktes det att samplingsfrekvensen är blott 25kHz, inte 38,4kHz, alltså fyra gånger Unons samplingsfrekvens. Även detta går dock att ändra, upp till en samplingsfrekvens på 1Mhz⁹.

Nyquists samplingsteorem säger att samplingsfrekvensen måste vara dubbel frekvensen på signalen om signalen ska gå att återskapa. Med två spänningsmätningar per impedansmätning blir den högsta signalen som går att mäta och återskapa 2400kHz för Unon respektive 6250kHz för Duen med grundsamplingen. Om en Due med samplingsfrekvens 1MHz används kan i teorin en signal på 250 000kHz återskapas.

Vid användning av Duen upptäcktes att tidigare mätningar påverkar nästföljande, varför minst en tom mätning måste göras mellan varje sparad mätning för att få rätt värde på de två noderna¹⁰. Således sjunker samplingsfrekvensen, eller precisionen, ytterligare.

Ett sätt att kringgå komplikationerna med samplingsteomet och samplingsfrekvensen är att mäta värden utan att försöka återskapa signalen. Detta fungerar för oss då vi bara är intresserade av signalens amplitud. Genom att ta 1000 mätningar och spara den största, och sedan upprepa detta 1000 gånger och ta medelvärde, så kan ett bra värde på amplituden på signalen mätas.

⁶<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> 6e juni 2017

⁷<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue> 6e juni 2017

⁸<http://www.microsmart.co.za/technical/2014/03/01/advanced-arduino-adc/>

⁹<http://www.frenki.net/2013/10/fast-analogread-with-arduino-due/> 6e juni 2017

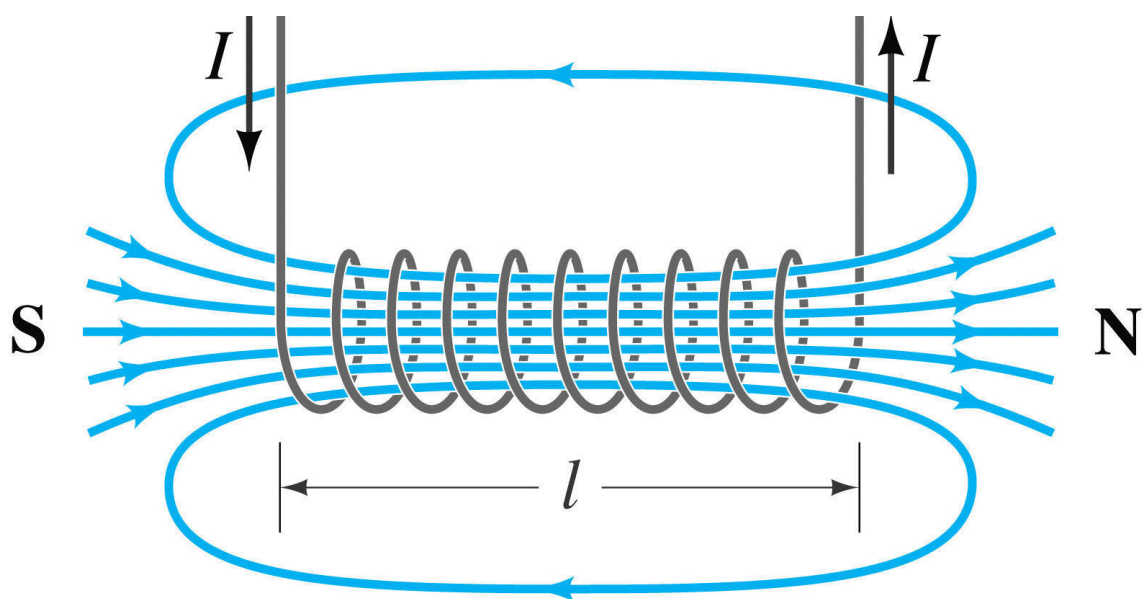
¹⁰<http://forum.arduino.cc/index.php?topic=260002.0> 6e juni 2017

En växelspanning kan uttryckas som $V(t) = A * \sin(2\pi f * t) + B$, där $V(t)$ är spänningen som en funktion av tiden, A är amplituden i Volt, f är frekvensen i Hz, t är tiden i sekunder och B är likspänningsförskjutningen i Volt (DC-offset). Ekvation 2 bygger på växelspanningen över en signal, så genom att mäta toppvärdet, amplituden, så kan impedansen beräknas. Det är dock viktigt att ta hänsyn till DC-offset, och antingen använda en signal utan detta, eller först mäta medelvärdet och subtrahera detta för att centrera signalen runt 0.

Således går det att mäta spänningen på en signal på över 100kHz utan att ha en samplingsfrekvens på över 200kHz.

2.4 Induktion

Biot-Savarts lag ¹¹ beskriver hur elektrisk ström genererar magnetfält. Ur detta kan man härleda hur magnetfältet runt en strömledande spole ser ut, vilket visas i figur 3.



Figur 3: Magnetfältet runt en strömledande spole. Pilarna visar riktning och piltäthet är magnitud.

När en laddning rör sig så bildas ett magnetfält runt laddningen. Ström är laddningar som rör sig. En ström ger upphov till ett cirkulärt magnetfält runt strömriktningen. I en spole rör sig strömmen i en cirkel. Detta ger upphov till en magnetfält genom spolens centrum, se figur 3.. Om man leder likström genom en spole kommer magnetfältet inte att påverka strömmen, reaktansen är noll. Men om man leder en växelström genom spolen kommer magnetfältet och laddningarna att interagera, vilket leder till en reaktans större än noll. Faradays lag ger att i en sluten elektrisk ledare är den inducerade spänningen lika med förändringen av magnetfältet med avseende på tiden, alltså tidsderivatan av magnetfältet. I och med att strömmen i spolen skapar ett magnetfält genom spolen, och strömmen ändras, så kommer magnetfältet ändras och en spänning induceras.¹²

2.5 Magnetisk koppling

I 2.4 beskrevs hur ett varierande magnetfält inducerar en spänning, samt hur en varierande ström skapar ett varierande magnetfält. Detta kan man använda för att via växelström genom en spole inducera spänning i en annan spole om samma magnetfält flödar genom denna. För att åstadkomma denna magnetiska koppling är det alltså viktigt att magnetfältet flödar precis genom den andra

¹¹https://en.wikipedia.org/wiki/Biot%E2%80%93Savart_law 6e juni 2017

¹²https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday%27s_law_of_induction 6e juni 2017

spolen; detta betyder att spolarna måste vara orienterade längs samma axel, och att kopplingen minskar när avståndet ökar.

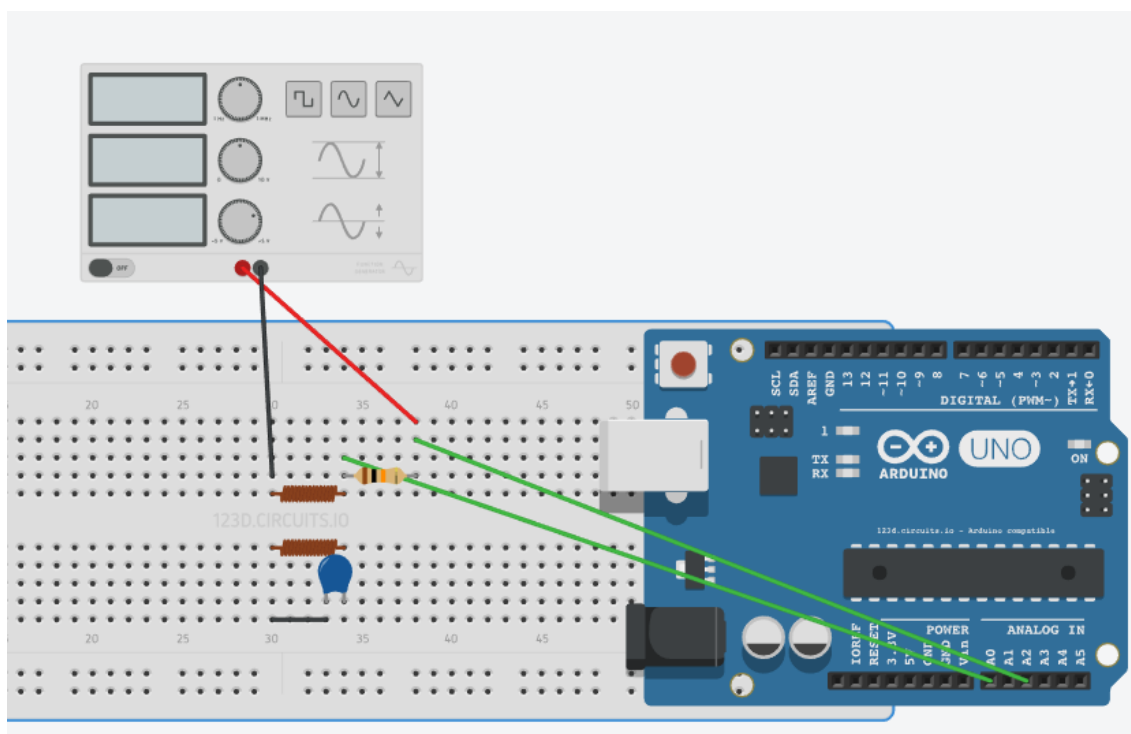
Eftersom magnetfältets styrka beror på laddningar som rör sig, så kommer fler varv på spolen leda till att laddningarna rör sig flera varv vilket ger ett starkare magnetfält. Ju starkare ström, desto fler laddningar per sekund, och desto starkare magnetfält. Till sist kommer kopplingen påverkas av permeabiliteten i mediet i vilket magnetfältet breder ut sig, så med en ferromagnetisk kärna ökar kopplingen. Dessa parametrar gäller även för den kopplade spolen, ty ju mer av magnetfältet som tas emot, desto mer spänning induceras. Dessa är alltså de metoder som kan användas för att öka kopplingen mellan två spolar:

- Att spolarna orienteras längs med samma axel
- Att spolarna är så nära varandra som möjligt
- Att spolarna har många varv
- Att en stor ström leds genom spolarna
- Att ett ferromagnetiskt material placeras i mitten av spolarna

Kombinationen av dessa betyder att det är bättre att packa spolarna tätt än att linda dem utspirt.¹³

3 Metod

3.1 Byggande av impedansmeter



Figur 4: Kopplingschema mätkrets. Bilden skapad med hjälp av Autodesk Circuits hemsida <https://circuits.io/lab>

¹³<http://www.electronics-tutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html> 6e juni 2017

Mätkretsen som diskuterades i 2.2.2 byggdes ihop enligt figur 3. I denna uppställning mäter Arduinos analogingångar A0 och A2 spänningarna V_Z och V_S

De två bruna spolarna som står bredvid varandra används för representera den magnetiska koppling som senare ska gå ut genom ugnen. För tester av kretsen användes både en spole i parallell med kondensatorn, samt en spole magnetiskt kopplad med en resonanskrets.

3.2 Programmerande av impedansmeter

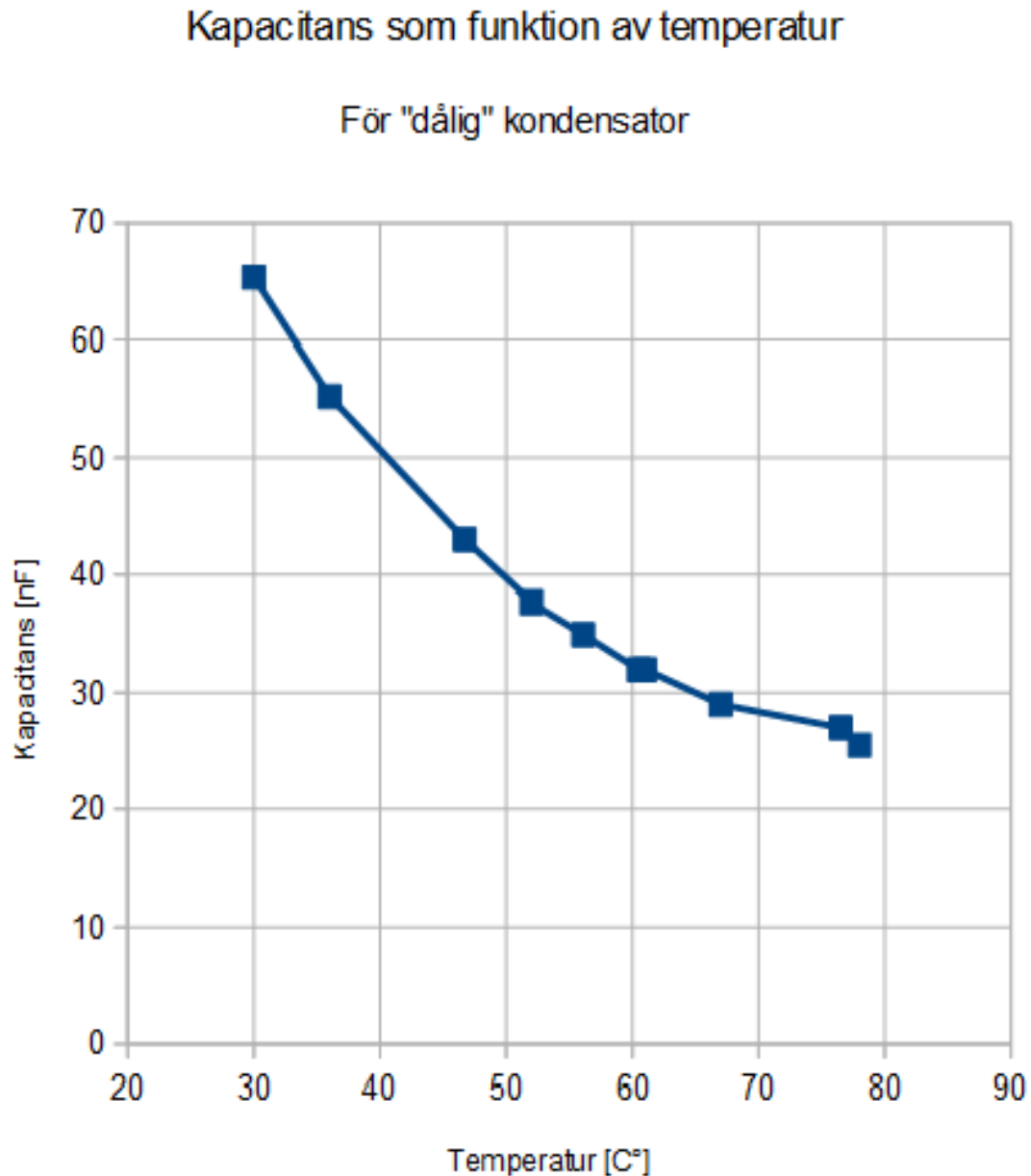
Det program som skrevs för att mäta impedansen byggde på teorin i 2.3. Spänningen V_z och V_{in} mättes 1000 gånger, det största värdet sparades och lagrades i en summeringsvariabel, detta upprepades 1000 gånger. Medelvärdet på de 1000 maxvärdena togs och användes för att beräkna impedansen genom formeln i ekvation 2. Detta värde visades på dataskärmen på datorn med vilken vi programmerade Arduinon, varpå looparna upprepades.

3.3 Mätning

Mätningen gick till genom att programmet kördes med en signalgenerator inkopplad över kretsen. Värdet på impedansen skrev ut på datorskärmen med kommandot `Serial.println` och antecknades i Excel tillsammans med frekvensen visad på signalgeneratoren. Frekvensen ökades (manuellt) på signalgeneratoren och mätningen upprepades. När ett helt frekvenssvop var genomfört plottades impedansen mot frekvensen. Fler mätningar gjordes nära impedanstoppet för att kunna se exakt var toppen befann sig.

4 Resultat

Resultaten som redovisas här är framtagna för att visa att metoden fungerar. De är inte framtagna med en slutprodukt utan i labbmiljö. En sinussignal har genererats externt men mätning av impedansen har gjorts med den utrustning vi byggt. En slutprodukt kommer givetvis att generera sina egna signaler och omvandla frekvens till temperatur.



Figur 5: Kondensator som enligt märkning ska ha värdet 100 nF. Här redovisas kondensatorns temperaturberoende.

Som ses i Figur 5 är de kondensatorer vi använder i projektet extremt temperaturkänsliga. Detta är en nödvändighet för projektets framgång. Vid rumstemperatur har kondensatorerna en felmarginal på omkring 30%. Detta gör att varje kondensator kommer behöva ha en egen översättningstabell för att temperaturen ska kunna avläsas.

10, 27uF	1,414mH
Teoretisk resonansfrekvens: 1,321	
Frekvens [kHz]	Impedans [Ohm]
0,898	11,10
1,011	14,76
1,096	18,02
1,145	19,79
1,202	21,29
1,251	22,21
1,277	22,47
1,289	22,26
1,304	22,68
1,316	22,63
1,326	22,57
1,364	22,50
1,399	22,13
1,455	21,24
1,511	20,09
1,602	17,95
1,712	15,52
1,815	13,56
1,912	12,11
2,005	11,03

Tabell 1: Mätning av impedans för olika frekvenser då resonanskretsen bestod av en kapacitans på 10,27 uF och induktans på 1,141 mH. 1,304 kHz fanns vara resonansfrekvensen, denna har fetmarkerats. Resonanskretsen kopplades direkt till mätkretsen utan transformatorkoppling.

11,06 uF	1,414mH
Teoretisk resonansfrekvens: 1,273	
Frekvens [kHz]	Impedans [Ohm]
0,915	12,10
1,006	15,24
1,083	18,12
1,132	19,68
1,183	20,84
1,205	21,20
1,226	21,50
1,243	21,65
1,265	21,68
1,284	21,80
1,306	21,69
1,337	21,42
1,439	20,06
1,499	18,51
1,551	17,28
1,599	16,15
1,698	13,60
1,783	12,87
1,899	11,20
2,019	9,97

Tabell 2: Mätning av impedans för olika frekvenser då resonanskretsen bestod av en kapacitans på 11,06uF och induktans på 1,141 mH. 1,284 kHz fanns vara resonansfrekvensen, denna har fetmarkerats. Resonanskretsen kopplades direkt till mätkretsen utan transformatorkoppling.

11,75 uF	1,414mH
Teoretisk resonansfrekvens: 1,235	
Frekvens [kHz]	Impedans [Ohm]
0,905	12,40
0,952	14,05
1,000	15,81
1,053	17,86
1,098	19,23
1,151	20,60
1,176	20,90
1,195	21,13
1,219	21,28
1,230	21,32
1,242	21,35
1,268	21,16
1,292	20,93
1,323	20,46
1,374	19,50
1,437	17,97
1,492	16,55
1,560	15,00
1,603	14,12
1,705	11,90
1,812	10,84
1,903	9,81
2,015	8,88

Tabell 3: Mätning av impedans för olika frekvenser då resonanskretsen bestod av en kapacitans på 11,75uF och induktans på 1,141 mH. 1,242 kHz fanns vara resonansfrekvensen, denna har fetmarkerats. Resonanskretsen kopplades direkt till mätkretsen utan transformatorkoppling.

Tabell 1, 2, och 3 visar den uppmätta impedansen i en LC-krets över ett frekvenssvep. Frekvenssvepet gjordes med hjälp av en signalgenerator. Impedansen mättes med en Arduino UNO, som mätte spänningsdelningen över ett motstånd R och en LC-krets och sedan beräknade impedansens amplitud enligt ekvation 2.

Värdet på kapacitansen ändras mellan varje tabell. Tabellerna visar en tydlig topp där resonansfrekvensen hittas. Den teoretiska resonansfrekvensen samt komponentvärdena visas högst upp i respektive tabell.

Som ses i tabellerna kan en tydlig topp ses och när kondensatorvärdet ändras, så ändras också för vilken frekvens som toppen ses.

C: 11,03 uF		L: 5,27mH	
Teoretisk resonansfrekvens 661 Hz			
Frekvens [kHz]		Impedans [Ohm]	
0,301	18,94		
0,401	22,60		
0,460	26,22		
0,513	32,34		
0,532	35,48		
0,551	39,49		
0,566	43,48		
0,587	43,03		
0,605	42,31		
0,625	41,01		
0,642	39,88		
0,714	34,10		
0,808	27,34		
0,930	21,32		

Tabell 4: Mätning av impedans för olika frekvenser då resonanskretsen bestod av en kapacitans på 11,03 uF och induktans på 5,27 mH. 0,566 kHz fanns vara resonansfrekvensen, denna har fetmarkerats. Resonanskretsen kopplades till mätkretsen via en transformatorkoppling.

C: 9,48uF		L: 5,27mH	
Teoretisk resonansfrekvens 712 Hz			
Frekvens [kHz]		Impedans [Ohm]	
0,299	19,18		
0,413	22,91		
0,509	28,85		
0,564	35,82		
0,580	38,87		
0,603	43,96		
0,614	46,03		
0,619	45,90		
0,633	45,43		
0,651	44,51		
0,670	43,30		
0,706	40,90		
0,804	33,62		
0,910	27,42		
1,015	22,59		

Tabell 5: Mätning av impedans för olika frekvenser då resonanskretsen bestod av en kapacitans på 9,48 uF och induktans på 5,27 mH. 0,614 kHz fanns vara resonansfrekvensen, denna har fetmarkerats. Resonanskretsen kopplades till mätkretsen via en transformatorkoppling.

Tabell 4 och 5 visar den uppmätta impedansen i en transformatorkopplad LC-krets över ett frekvenssvop. Värdet på kapacitansen är olika för tabellerna. Tabellerna visar ett impedansmaximum vid olika frekvenser, beroende på kapacitansen. Frekvenssvopet gjordes med hjälp av en signalgenerator. Impedansen mättes med en Arduino UNO, som mätte spänningsdelningen över ett motstånd R och en spole, magnetiskt kopplad till en annan spole parallellkopplad med en kondensator.

Dessa tabeller visar att vår metod fungerar även då den trådlösa transformatorkopplingen introduceras

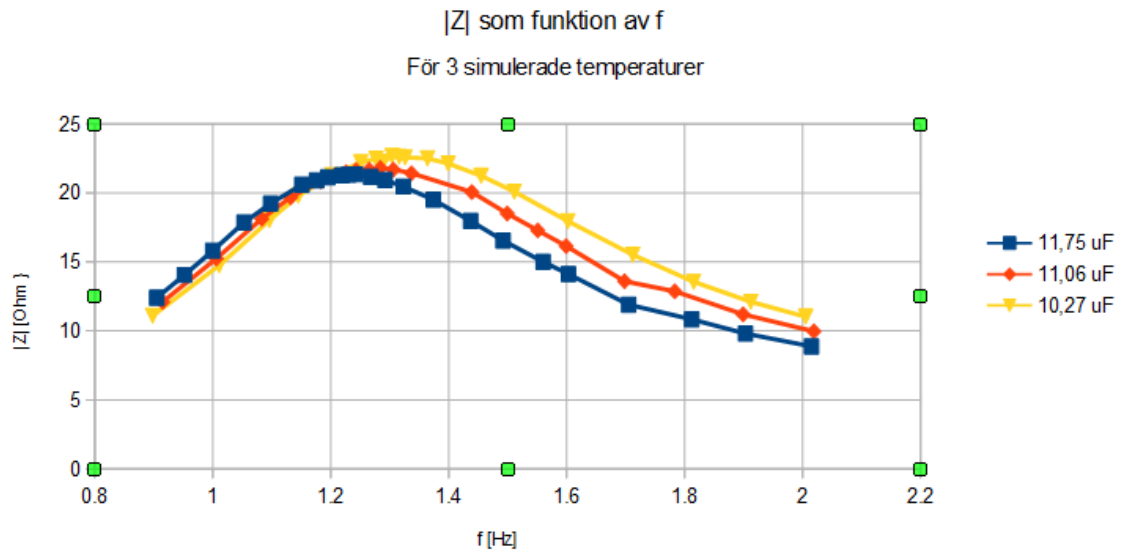
LC-krets utan transformatorkoppling			
Kapacitans för mätningen [uF]	Teoretisk resonansfrekvens [kHz]	Uppmätt resonansfrekvens [kHz]	Skillnad i procent (uppmätt/teo)
9,48	1,375	1,35	-1,8
10,27	1,321	1,304	-1,3
11,06	1,272	1,284	0,9
11,75	1,235	1,242	0,6

Tabell 6: Sammanställning av skillnaden mellan teoretiska och uppmätta resonansfrekvenser då resonanskretsen kopplats direkt till mätkretsen

LC-krets med transformatorkoppling			
Kapacitans för mätningen [uF]	Teoretisk resonansfrekvens [kHz]	Uppmätt resonansfrekvens [kHz]	Skillnad i procent (uppmätt/teo)
9,48	0,712	0,614	-13,8
11,003	0,661	0,566	-14,4

Tabell 7: Sammanställning av skillnaden mellan teoretiska och uppmätta resonansfrekvenser då resonanskretsen kopplats till mätkretsen via en transformatorkoppling

Tabell 6 och 7 visar på skillnaden i mätosäkerhet då transformatorkoppling använts eller inte använts. Då mätning sker direkt över resonanskrets så skiljer sig de teoretiska resonansfrekvenserna från de uppmätta bara med någon procent, men då transformatorn kopplas in blir skillnaden mycket större. Detta spelar dock ingen roll så länge som skillnaden är konstant då en översättningstabell utgår från tidigare uppmätta värden och inte från teoretiska värden.

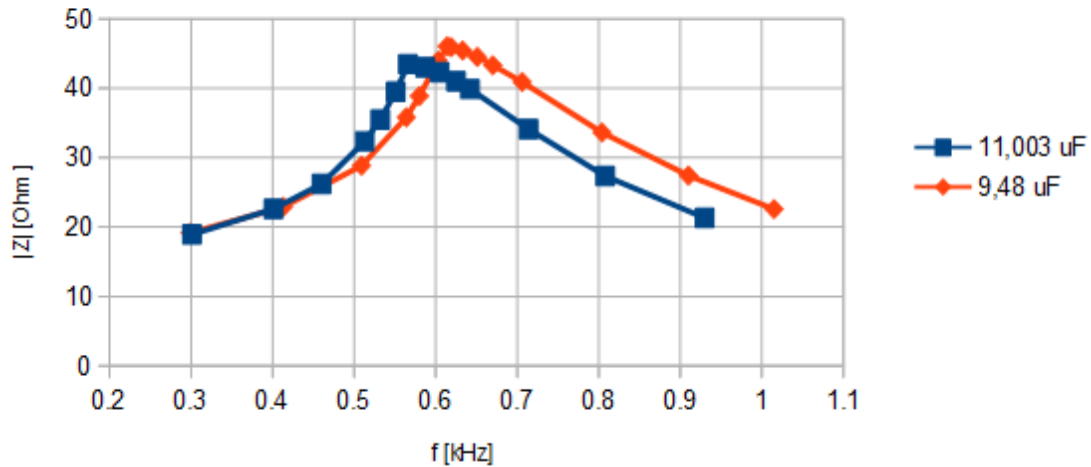


Figur 6: Z-mätning över en spole på 1,41 mH och en varierande kapacitans. Mätningen gjordes direkt över resonanskretsen, ingen magnetisk koppling användes. Frekvensen ändrades manuellt genom en frekvensgenerator. Signalen var en sinusvåg

Figur 6 visar värdena från tabell 1, 2, och 3 i en graf. Figuren visar att resonansfrekvensen stiger när kapacitansen sjunker, vilket överensstämmer med teorin. De uppmätta resonansfrekvenserna stämmer väl överens med de teoretiska för vår LC-krets.

|Z| som funktion av F med transformatorkoppling

För 2 simulerade temperaturer



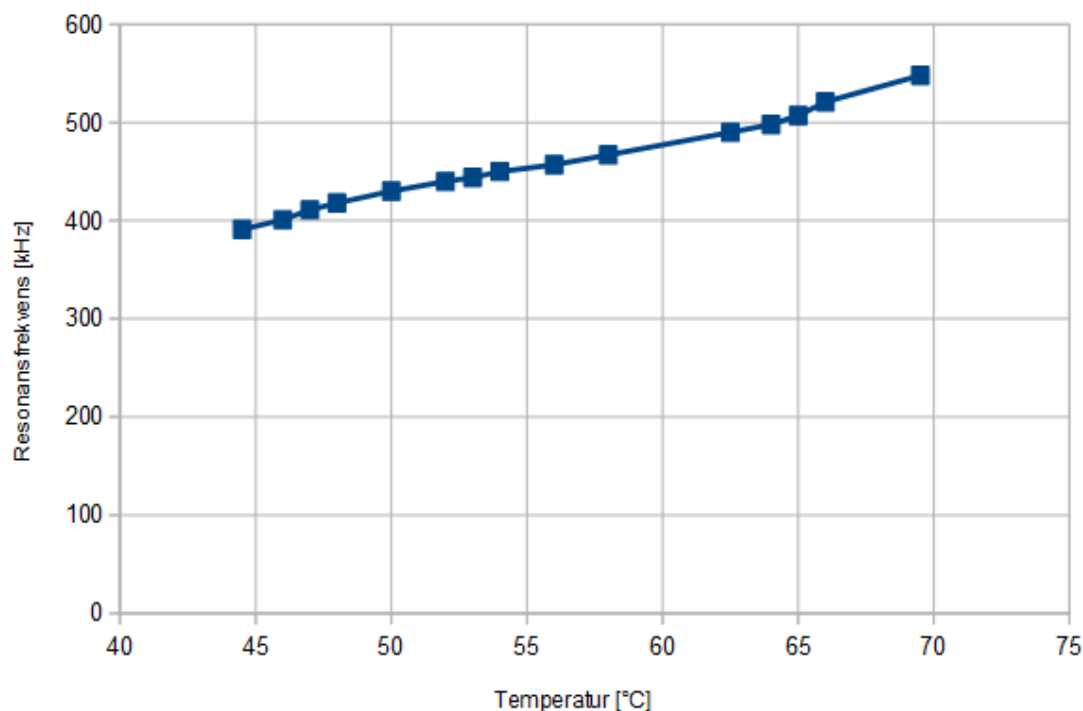
Figur 7: Z-mätning över en spole på 5,27 mH och en varierande kapacitans. Mätningen gjordes direkt över resonanskretsen, ingen magnetisk koppling användes. Frekvensen ändrades manuellt genom en frekvensgenerator. Signalen var en sinusvåg

Figur 7 visar värdena från tabell 5 och 6 i en graf. Figuren visar att resonansfrekvensen stiger när kapacitansen sjunker, vilket överensstämmer med teorin. Den frekvensen där ett impedansmaximum hittas för transformatorkretsen överensstämmer ej med de teoretiska värdena för LC-kretsen.

LC-krets med transformatorkoppling	
Temperatur [C]	Resonansfrekvens [kHz]
69.5	548
66	521
65	507
64	498
62.5	490
58	467
56	457
54	450
53	444
52	440
50	430
48	418
47	411
46	401
44.5	391

Tabell 8: Visar olika resonansfrekvenser som uppmäts med vår utrustning placerad i vattenbad med varierande temperatur. Transformation genom ugnslucka simulerades med en plastskiva.

Resonansfrekvens som funktion av temperatur



Figur 8: Mätning med vår utrustning doppad i vatten med känd temperatur. Samma data som i tabell 8. Här redovisas hur resonansfrekvensen relaterar till temperaturen. I detta experiment användes en Arduino Due, vilket gjorde att frekvensen kunde vara högre än tidigare

I tabell 8 och figur 8 ser vi de viktigaste resultaten, att utrustningen kan uppmäta resonansfrekvenser som beror på temperaturen i verkligheten. Detta även då en plastskiva placerades mellan spolarna i transformatorkopplingen. I tidigare experiment har temperaturen simulerats genom att använda olika storlekar på kondensatorer. I detta har en och samma kondensator använts, och värdet på denna har ändrats genom att den befunnit sig i vatten vars temperatur kunde ändras genom att hälla på varm/kallt vatten.

Resultatet som redovisas i tabell 8 visar att utrustningen kan användas till att bestämma temperaturer med en noggrannhet på en grad.

5 Diskussion

Projektet syftade till att visa att man på ett billigt och enkelt sätt kan trådlöst mäta temperatur i en ugn. De problem som behövde lösas var energiförsörjning, temperaturmätning och mätvärdestransportering. För att lösa dessa användes en transformatorkoppling för att transportera data och förse kretsen med energi, samt en temperaturkänslig kondensator i en LC-krets för att mäta temperaturen. Våra resultat, då främst figur 8 visar att det går att mäta resonansfrekvensens temperaturberoende i en LC-krets. Det är alltså möjligt att hitta ett impedansmaximum vid en frekvens som ändras när kapacitansen, som är temperaturberoende, ändras. Eftersom vi kan mäta impedansen kan vi mäta temperaturen.

Själva termometern har ännu ej kunnat byggas som färdig produkt, men beståndsdelarna är testade och bevisade var för sig. Det som försetat monteringen har varit att få Arduinon att kontrollera signalgenereringen samt att optimera transformatorn. Tanken var att inköpet av en Arduino-shield

skulle lösa problemet med signalgenereringen. Att få denna att fungera visade sig svårare än tänkt och vi har tvingats använda en extern signalgenerator för att få de resultat vi har.

Hade vi haft kunskap om enkapseldatorprogrammering hade vi kunnat slippa att använda Arduino och många av projektets stora problem hade då sluppits. Framför allt Arduinons tekniska begränsningar, däribland samplingsfrekvensen, upplösningen samt vilka värden som kan behandlas har varit problematiska och krävt flera omvägar för att lösa.

Vi undersökte två andra metoder för att förse kopplingen med energi: Energy Harvesting och RFID, som båda hade sina för- och nackdelar. Transformatormetoden valdes för att den ansågs enklast och mest genomförbar. Huruvida detta stämmer är svårt att säga, ty de två andra lösningar är ännu inte fullt utforskade och medför garanterat sina egna problem och begränsningar. Mer om det i 5.1.

5.1 Kort om lösningar vi undersökte men inte genomförde

Vi kan konstatera att vi begränsats mycket av våra bristande förkunskaper. Egentligen hade vi velat bygga en antenn till sensorn istället för att använda den magnetiska kopplingen, men vi har ingen erfarenhet av antenner och metallburen, som en ugn är, hade antagligen stört signalerna kraftigt. Denna antenn var då tänkt att drivas med ett energy harvesting-system byggt kring att det finns en naturlig temperaturkoefficient mellan köttet och resten av ugnen. Ett så kallat peltieraggregat kan nämligen utvinna elektrisk energi från temperaturskillnader, och den som finns i ugnen (generellt 60-80 grader i köttet mot 200 grader i ugnen) hade garanterat kunnat driva en krets som både mätt temperaturen och skickat signalen. Denna idé föll dock på att de flesta peltieraggregat inte klarar av temperaturer på över 150 grader, och de som gör det är riktigt dyra.

Vi ägnade också mycket tid åt att undersöka om RFID-chip hade kunnat fungera, även här hade dock störningarna varit problematiska och det verkade inte finnas några RFID på marknaden som skulle klara temperaturen i ugnen. Till detta kom också frågan om hur lätt det skulle vara att programmera ett RFID att ta ett sensorvärde och skicka det. Vanligtvis skickar RFIDs bara inprogrammerade koder, till exempel nyckeltaggar.

5.2 Återkoppling till målsättning och frågeställningar

Några av de mål som sattes vid projektets början har ännu inte uppnåtts. Dessa var: uppkoppling till internet från Arduinon, och skapandet av en app för att hämta mätvärdena från internet. Uppkoppling till internet går att lösa via t.ex en wifi-shield till Arduinon. Vi bör ha tillräcklig kunskap om javaprogrammering för att skapa en app i framtiden.

Däremot anser vi att vi besvarat projektets frågeställningar. De som vi vill diskutera lite närmare är 3 & 4 som handlar om den trådlösa överföringen och 5 hårdvarubegränsningarna i ugnsmiljön.

Frågeställning 3 & 4 Den trådlösa delen av termometern är än så länge tveksam; de avstånd vi mätt på hittills överstiger ej 2 cm, så spolarna skulle fästas på vardera sida ugnsluckan. Detta är visserligen trådlös signalöverföring, men nått och jämnt. För att uppnå en "sann" trådlös lösning behövs en antenn, vilket dock skulle vara ett helt projekt i sig att få att fungera inuti en ugn med tanke på alla de störningar som kan uppstå när signaler studsar runt inuti metallburen.

Frågeställning 5 Det är med lösningen på den här frågan som vi är mest nöjda. Vår konstruktion klarar temperaturen eftersom den enda komponenten som är i ugnsvärmen är koppartråd som smälter vid 1085 grader Celsius. Kondensatorn som sitter inne i köttet kommer inte att uppleva temperaturer över 90 grader (om inte matlagaren glömmer köttet inne väldigt väldigt länge...) vilket inte kommer vara några problem.

5.3 Fortsättning på projektet

Om projektet skulle fortsätta i senare kurser eller på fri hand finns fortfarande en del att göra. Det viktigaste skulle såklart vara att göra en mjukvara för att få Arduinon att kommunicera med en mobiltelefon, men också att lösa problematiken med signalgenerationen.

Efter att vi läst kurser i enkapseldatorprogrammering skulle även Arduinon kunna ersättas av en billigare och mer effektiv lösning.

Om det kommer billiga mer värmetåliga RFID-chip eller peltieraggregat på marknaden de närmaste åren skulle projektet kunna göras om från början med samma målsättning, men genom att gå en annan väg.

6 Slutsats

Det går att konstruera en enkel och billig termometer som mäter temperaturen i en ugn utan batterier i eller energiförsörjning från ugnen.

7 Appendix

Mätkod:

```
int analogPinZ = A0; int analogPinVin = A5; //Våra inputplatser
float Vz = 0; float Vzsum = 0; float Z = 0;
int iVz = 0; int iVzmax = 0;
float iVin = 0; float Vinsum = 0; float iVinmax = 0; float Vin = 0;
long int i = 0; int j = 0;
int R = 50;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReadResolution(12);
}

void loop() {
  while (j<1000) {
    while (i<1000) {
      analogRead(analogPinZ);
      iVz = analogRead(analogPinZ);
      analogRead(analogPinVin);
      iVin = analogRead(analogPinVin);

      if (iVz>iVzmax){ //Vzmax
        iVzmax = iVz;
      }
      if (iVin>iVinmax){ //Vzmax
        iVinmax = iVin;
      }
      i = i+1;
    }
    Vzsum = Vzsum + iVzmax * (3300 / 4096.0);
    Vinsum = Vinsum + iVinmax * (3300 / 4096.0);
    iVzmax = 0;
    iVinmax = 0;
    j = j+1;
  }
}
```

```
i = 0;
}
Vz = Vzsum/j;
Vzsum = 0;
Vin = Vinsum/j;
Vinsum = 0;
j = 0;
Z = Vz * R/(Vin-Vz);
// Serial.print("Vz: ");
// Serial.println(Vz);
Serial.print("Vin: ");
Serial.println(Vin);
Serial.print("Z: ");
Serial.println(Z);
Serial.println("");
}
```

Referenser

- [1] George R Steber. A low cost rf impedance analyzer. *Nuts and Volts Magazine*, 2:38–50, 2008.