

Demonstrativ Watt balansvåg i Lego Demonstrative Watt balance scale in Lego

*Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom
Maskiningjörsprogrammet*

Fabian Weibull
Filip Persson

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för Avancerad oförstörande provning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sweden, 2015
Examinator: Håkan Wirdelius Examensarbete No. 146/2015

FÖRORD

Examensarbetet som behandlas i rapporten är utfört som en avslutande del av studierna på maskiningenjörsprogrammet på Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och har genomförts i samarbete med SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Borås.

Vi önskar rikta ett stort tack till våra tre handledare på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Martin Zelan, Martin Bjerling och Jonas Olsson för den utomordentliga hjälp vi fått under arbetets gång och det fantastiska engagemang för projektet som de har uppvisat.

Vi vill även tacka vår handledare Håkan Wirdelius, Docent och forskningsledare i avancerad oförstörande provning vid institutionen för material och tillverkningsteknik, för god vägledning under arbetets gång.

Göteborg, augusti 2015

Filip Persson | Fabian Weibull

SAMMANFATTNING

Enheten kilogram definieras med hjälp av en artefakt bestående av platina och iridium. Denna artefakt finns enbart som ett skarpt exemplar och utöver denna finns det ett fyrtiotal kilogramprototyper på ett antal länders metrologiinstitut, vars syfte är att användas till kalibreringar. Det har under en längre tid visat sig att vissa av dessa prototyper driver i vikt vid jämförelse med original artefakten och av denna anledning pågår för närvarande en process att etablera en ny definition av kilogrammet, som skall definieras med hjälp av en så kallad watt balansvåg efter att Plancks konstant har fått ett fast värde.

Syftet med arbetet har varit att bygga en demonstrativ variant av en watt balansvåg i Lego där funktioner för vägning av massa samt beräkning av Plancks konstant innefattas. Denna våg skall användas i utbildningssyfte för att öka kunskapen om hur en Watt balansvåg fungerar.

Arbetet har utförts på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, vilket är nationellt metrologiinstitut i Sverige. Ett metrologiinstitut är den organisation som ansvarar för de fundamentala SI-enheterna i landet.

Det utförda examensarbetet är just en uppbyggnad av en watt balansvåg i Lego som fått den funktionalitet som önskats, om än med ett visst systematiskt fel som resulterar i en felaktigt uppmätt vikt. Vågen visar på principen för en mätning med en watt balansvåg, både med avseende på massa samt en beräkning av Plancks konstant.

Som ett resultat av denna studie har det visat sig att det krävs ett noggrant arbete om en hög noggrannhet skall uppnås. Bra kunskap om den verkliga funktionen samt bra komponenter är av yttersta vikt för att kunna bygga en våg med hög precision.

Resultaten får anses vara betydelsefulla då funktionaliteten är tillräckligt god för att användas i pedagogiskt syfte. Dock är mätresultaten som fås vid vägning inte av tillräckligt hög precision. Detta på grund av tidigare nämnt systematiskt fel.

Mjukvaran för att styra vågen behövde inte skapas från grunden. Istället har filer för styrning via LabView tillhandahållits av författarna till rapporten "A LEGO Watt Balance: An apparatus to demonstrate the definition of mass based on the new SI" [1].

SUMMARY

The unit kilogram is defined by an artifact, consisting of platinum and iridium. This artifact does only exist in one copy and in addition to this there are forty kilogram prototypes in a number of countries metrology institutes. It has, during a longer time, shown that a few of these prototypes are drifting in weight compared to the original artifact and of this reason there are now a process of establishing a new definition of the kilogram going on which is going to be defined with the help of a so called watt balance after the fact that the Planck constant has been given a fixed value.

The purpose of this work has been to build a demonstratively version of a watt balance in Lego, where functions for weighing mass and calculations of Planck's constant are included. This scale will be used in purpose of education to raise the knowledge of how watt balances works.

All work has been conducted at SP Technical Research Institute of Sweden, which is the national metrology institute in Sweden. A metrology institute is the organization responsible for the fundamental SI units in the country.

The completed thesis is the build-up of a watt balance in Lego that has gotten the functionality that has been wanted, although with a small systematic fault resulting in a wrongly measured weight. The scale shows the principle of how a measurement with a watt balance is made, with regards to both mass and a calculation of Planck's constant.

As a result of this study, it has shown that it is necessary with thorough work if a high level of accuracy is to be achieved. Good knowledge of the real function in addition to good components is of utmost importance to be able to build a scale with high precision.

The results are to be seen as valuable since the functionality is good enough to use in educational purpose. However, the measurement results obtained when weighing is not of high enough precision, this because of the aforementioned systematic fault.

The software to control the scale did not need to be created from scratch. Instead, the files for control via LabView are provided by the authors of the report "A LEGO Watt balance: An apparatus to demonstrate the definition of mass based on the new SI".

Innehållsförteckning

1 INLEDNING.....	6
1.1 Bakgrund.....	6
1.1.1 Avogadroprojektet.....	6
1.1.2 Watt balance.....	7
1.2 Syfte med arbetet.....	7
1.3 Avgränsningar I projektet.....	8
1.4 Precisering av frågeställningen.....	8
2 ALLMÄN TEORI.....	9
2.1 Tillämpad teori.....	12
3 EXPERIMENTUPPSTÄLLNING.....	13
3.1 Balansvågens konstruktion.....	13
3.2 Elektronik.....	14
4 METOD.....	18
4.1 Kalibrering.....	18
4.2 Mätningar.....	19
4.3 Beräkna mätosäkerhet.....	20
5 RESULTAT.....	21
5.1 Mätningar med varierande vikter.....	21
5.2 Serievägningar 2 gram.....	24
5.3 Seriemätningar med olika Pivot eggars.....	25
5.4 Analyserad mätosäkerhet.....	26
5.4.1 Teoretisk beräknad mätosäkerhet.....	26
5.4.2 Osäkerhet vid kalibrering.....	27
6 DISKUSSION.....	28
6.1 Analysering av mätdata.....	28
6.1.1 Varierande vikter.....	28
6.1.2 Varierande serier.....	29
6.1.3 Olika pivot eggars.....	29
6.2 Mätosäkerhet.....	30
6.3 Problem och förbättringar.....	30
7 SLUTSATS.....	32
REFERENSER.....	34
BILAGA I.....	35
BILAGA II.....	36

1 INLEDNING

I dag definieras nästan alla SI-enheter med hjälp av naturkonstanter. Exempelvis är sekunden definierad utifrån en frekvens hos atomen cesium och metern är definierad utifrån ljusets hastighet i vakuum. Kilogrammet är dock fortfarande definierad av en artefakt. Då härledda storheter som volt, newton, joule och watt med flera, härleds från kilogrammet, kommer även dessa påverkas av kilogrammets definition [2].

1.1 Bakgrund

Enheten kilogram har tidigare definierats som massan av en liter vatten vid temperaturen 4 grader Celsius, men det ansågs vara en för instabil definition. Därför definieras kilot sedan 1889 av en artefakt, vilket är ett föremål skapat av människan. Kilogramartefakten är en cylinder av iridium och platina, som är två ädla metaller som ogärna reagerar med omgivande atmosfär.

En artefakt är ingen stabil definition, då enda sättet att återskapa en artefakt är att jämföra den nya med en äldre artefakt. I dag ligger referensartefakten av kilot i Paris och utöver denna finns ett 40-tal kilogram prototyper utplacerade på olika metrologiinstitut runt om i världen. Vad som nu sker är att artefaktkopiorna sinsemellan driver från varandra i vikt. Varför artefaktkopiorna driver från varandra är det ingen som vet. Viktförändringarna kan bero på föroreningar som bryter ner materialet eller beläggningar som adderas på grund av hantering. Detta är ytterligare ett argument till varför en artefakt inte är en säker definition. Därför pågår för närvarande olika projekt i syfte att omdefiniera kilogrammet, så att definitionen inte behöva jämföras med tidigare experiment. Det finns två stycken konkurrerande projekt som båda arbetar med denna omdefinition, Watt balansvågen och Avogadroprojektet. Vidare information om de två projekten följer nedan.

1.1.1 Avogadroprojektet

Avogadros sfär är en geometriskt mycket exakt kiselsfär av isotopen ^{28}Si . Målet med sfären är att den ska bli så perfekt sfärisk som möjligt och ha en perfekt kristallstruktur. Då storleken på sfären, antalet mol och molvolymen på ^{28}Si är kända kan man med Avogadros tal N_A och Plancks konstant beräkna massan [3].

Detta projekt skapar en definition som är experimentellt reproducerbar med naturkonstanter. Dock knyts åter definitionen till ett föremål även om det i detta fall går att kontrollera föremålets kvalitet rent mättekniskt i motsats till artefakten som bara kunde jämföras med andra artefakter.

1.1.2 Watt balance

Watt balansvågen är en elektromagnetisk balansvåg. Ett känt magnetfält tillsammans med ett vinkelrätt elektromagnetiskt fält skapar en kraft som kan kompensera tyngdkraften från en massa. Den stora skillnaden mot artefakten är att en definition med en watt balansvåg blir helt reproducerbar utan att behövas jämföras mot något fysiskt objekt, samt att definitionen inte knyts till något fysiskt föremål mer än mätutrustningen.

Watt balansvågen kan med en enkel formel beräkna massa, men en omdefinition med hjälp av en watt balansvåg blir försvårad då de elektriska enheterna är härledda. I definitionen av spänning och resistans innefattas Kilogrammet.

Det finns två stycken kvantfysiska fenomen som gör det möjligt att uttrycka de elektriska enheterna i andra termer. Bland dessa termer innefattas Plancks konstant, som i dagsläget saknar ett fast värde inom SI-enhetssystemet.

Om Plancks konstant fixeras så kan massan entydigt definieras med en god noggrannhet, vilket är syftet till omdefinitionen.

Frågetecken som finns är bland annat de elektriska förlusterna i spolarna. Hur mycket av den elektriska kraften övergår till värme, och vilka mätfel det bidrar till? Det är även osäkert om magneternas magnetfält ger ut samma magnetfält under dynamiska och statiska förhållanden.

Balansarmens pivotpunkt måste vara helt friktionsfri [4]. Det har visat sig att kniveggarna som de flesta balansvågar använder sig av som ledpunkt, kan ge systematiska fel vilket oftast orsakas av kvarvarande spänningar som finns i systemet.

1.2 Syfte med arbetet

I en forskarrapport från december 2014 [1] beskrivs hur en demonstrationsvåg i Lego kan byggas. Vågen kan beräkna Plancks konstant och väga en massa med en noggrannhet på 1 %. Syftet med projekt är att rekonstruera denna våg i syfte att öka förståelsen och kunskapen för hur omdefinitionen av kilogrammet ska ta hjälp av en watt balansvåg. Det ska även utredas vilka möjligheter till förbättring som finns för att få demonstrationsvågen noggrannare.

Uppdraget sker i samarbete SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Borås, vilket är Sveriges nationella metrologiinstitut. Institutionen ansvarar för de fundamentala SI-enheterna i Sverige och därmed bland annat den nationella prototypen av kilogrammet. Vågen kommer efter projektet användas i utbildningssyfte för att visa hur Watt balansvågen spelar in i omdefinitionen av kilot.

1.3 Avgränsningar I projektet

Programvaran för vågen är tillgänglig genom NIST [1] och har anpassats för den aktuella konstruktionen.

Bygget görs i LEGO, någon direkt hänsyn till hållfasthet görs inte då tidigare vågar [1] med samma konstruktion klarat de påfrestningar som uppkommer.

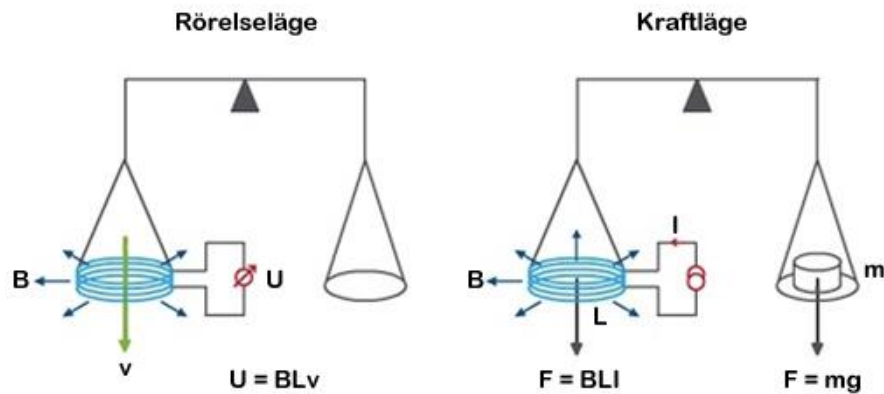
De kvantfysiska delar i beräkningarna som ingår när vikt ska definieras med hjälp av Plancks konstant kommer bara definieras och accepteras. Detta då projektiden är begränsad och frågeställningen får anses ligga utanför ett examensarbete på högskolenivå.

1.4 Precisering av frågeställningen

Kan en noggrannhet på 1 % uppnås med en watt balansvåg i Lego och dess elektronik? Hur relateras Plancks konstant till Watt balansvågen samt vad är Plancks konstant? Hur utförs vägningar och mätningar så att slutsatser kan dras från dem? Vad är mätosäkerhet och hur beräknas den? Hur kan kunskap om mätosäkerhet användas för att analysera vågens funktion?

2 ALLMÄN TEORI

En watt balansvåg är till utseendet lik en vanlig balansarmsvåg, men istället för att jämföra en kalibrerad vikt med en okänd vikt, korrelerar istället en watt balansvåg en okänd tyngdkraft med en känd elektromagnetisk kraft.



Figur 1. Figuren illustrerar hur de två vitala delarna i en Watt balans våg, Lorentz kraft till höger i figuren, och Faradays induktionslag till vänster i bilden.

Det finns två lägen hos watt balansvågen, visade i figur 1. Ett rörelseläge och ett kraftläge där rörelseläget är baserat på Faradays induktionslag [5]. En spole, med trådlängd L , förflyttas med en vertikal hastighet v genom ett magnetiskt fält, med den magnetiska flödestätheten B , så att en spänning U induceras. Den inducerade spänningen relaterar hastigheten till produkten BL , (fluxintegralen), genom formeln

$$U = BLv. \quad (1)$$

Kraftläget baseras på Lorentzkrafter [6] där tyngdkraften från en massa m är motverkad av en motriktad elektromagnetisk kraft F genererad av en strömmatad spole i ett magnetiskt fält

$$F = BLI = mg \quad (2)$$

där g är den lokala tyngdacceleration och I är strömmen i spolen.

Genom att eliminera den gemensamma faktorn i form av BL i ekvation (1) och (2), fås följande uttryck som ger ett samband mellan mätbara elektrisk storheter och kroppens massa

$$UI = mgv \Rightarrow m = \frac{UI}{gv}. \quad (3)$$

Med ekvation (3) kan den demonstrativa watt balansvågen beräkna massa. Denna ekvation räcker dock inte för en avancerad watt balansvåg vars syfte är att vara med under en omdefinition eftersom ström och spänning är härledda enheter

definierade utifrån kilogrammet. Det finns två kvantfysiska effekter som tar oss vidare då de kan uttrycka elektriska storheter med andra termer, Josephson-effekten [7] och kvant-Halleffekten [8]. De här två fenomenen möjliggör mätningar av elektriska storheter i termer av Plancks konstant och elektriska frekvenser med den höga precision som krävs för en omdefinition av kilogrammet med hjälp av en watt balansvåg.

Mycket kortfattat kan dessa två kvantfysiska effekter förklaras såhär: Josephson-effekten kan observeras i en så kallad Josephson-kontaktpunkt vilken består av två supraledande material separerade av en tunn barriär av icke supraledande material. Vid supraledande temperaturer tvingas en förspänningsström genom kontaktpunkten, samtidigt som kontaktpunkten utsätts för ett elektriskt fält vid mikrovågsfrekvenser f , kommer en spänning uppstå över kontaktpunkten.

$$U = \frac{h}{2e} f \equiv K_J^{-1} f \quad (4)$$

kommer uppstå över kontaktpunkten. Kvoten $K_J = 2e/h$ kallas för Josephsonkonstanten. Ett kontaktställe levererar endast en liten spänning. För att bygga upp en praktisk mätbar spänning kopplas därför tiotusentals kontaktställen samman i en serie, vilket i vanliga fall ryms på ett chip.

Kvant-Halleffekten är ett specialfall av Halleffekten som uppstår när en strömbärande ledare sänks ner i ett magnetiskt fält och en Hallspänning, U_H , uppstår vinkelrätt mot det magnetiska flödet och strömmen. I klassiska Halleffekten är ledaren som sänks ner ett tredimensionellt objekt, medan i kvant-Halleffekten är den elektriska ledaren begränsad till två dimensioner. I ett sådant system och vid tillräckligt starkt magnetfält, blir förhållandet mellan Hallspänningen och strömmen, eller Hall-resistansen R_H , storleksbestämt ur:

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{1}{i} \frac{h}{e^2} \equiv \frac{1}{i} R_K \quad (5)$$

där i är ett heltal. Kvoten $R_K = h/e^2$ kallas von Klitzingkonstanten. Kvant-Halleffekten används för att med en strömkomparator kunna mäta ett precisionsmotstånd med en osäkerhet på några miljarddelar.

Dessa två kvanteffekter används för att mäta elektrisk effekt, men istället för att direkt mäta $P = UI$ drivs strömmen, I , genom en noggrant kalibrerad resistor, R , vilket ger ett spänningsfall, U_R , som leder till $P = UU_R/R$. Båda spänningarna mäts genom att jämföra dem med en Josephsonspänning, så att värdena kan uttryckas i termer av en frekvens och Josephsonkonstanten. Resistorn mäts genom jämförelse med en kvant-Hallresistor så att värdet kan uttryckas i termer av R_K . Detta kan skrivas som

$$P = \frac{UU_R}{R} = C f_1 f_2 \frac{h}{2e} \frac{h}{2e} \frac{e^2}{h} = \frac{C f_1 f_2}{4} h \quad (6)$$

där C är det antal kontaktpunkter som används. Och förhållandet mellan R och h/e^2 . Kombineras ovanstående ekvation med effekten i ekvation (3) fås

$$h = \frac{4}{C f_1 f_2} m g v \Rightarrow m = \frac{C f_1 f_2}{4} \frac{h}{g v}. \quad (7)$$

Plancks konstant h saknar ett fast värde inom SI systemet och därför kommer den vänstra ekvationen användas för att mäta h från ett fast värde på massan före omdefinitionen av kilogrammet. Efter omdefinitionen kommer istället ekvationen till höger att användas för att beräkna en massa, då ett fast värde på h har införts.

Då de flesta personer ej har tillgång till kvantelektriska mätmetoder kan högprecisionsmätningar ej utföras av vem som helst. En demonstrationsvåg i Lego kan däremot fortfarande mäta Plancks konstant med tillräckligt god noggrannhet, tack vare hur det nuvarande SI enhetssystemet är uppbyggt. SI systemet används för de flesta mätningarna, men det finns ett annat system för enheter som används vid elektriska mätningar sedan 1990. Inom dessa enheter, kända som konventionella enheter [9], är Josephson- och von Klitzingkonstanterna fixerade till de bästa värden som fanns 1989. Dessa fixerade värden kallas för ”konventionella Josephson”- och ”konventionella von Klitzing”-konstanterna och förkortas till K_{J-90} respektive R_{K-90} . Genom att jämföra elektrisk effekt i konventionella enheter med mekanisk effekt i SI enheter kan h bestämmas.

Med start i ekvation 3 fås

$$UI = m g v \Rightarrow \{UI\}_{90} W_{90} = \{m g v\}_{SI} W_{SI} \quad (8)$$

där $\{x\}_{90/SI}$ anger det numeriska värdet av kvantiteten x i konventionella respektive SI-enheter. W_{90} och W_{SI} är enheterna för effekt (watt) i det konventionella och SI-systemet. Ovanstående ekvation kan skrivas som

$$\frac{\{m g v\}_{SI}}{\{UI\}_{90}} = \frac{W_{90}}{W_{SI}} = \frac{h}{h_{90}} \Rightarrow h = h_{90} \frac{\{m g v\}_{SI}}{\{UI\}_{90}} \quad (9)$$

där h_{90} är konventionella Plancks konstant som definieras som

$$h_{90} \equiv \frac{4}{K_{J-90}^2 R_{K-90}} = 6,626068854 \dots \times 10^{-34} \text{Js}. \quad (10)$$

Därför kan Plancks konstant bestämmas genom att multiplicera konventionella Plancks konstant med förhållandet mellan mekanisk effekt i SI-enheter och elektrisk effekt i konventionella enheter.

I praktiken är det enklaste sättet att jämföra kvoten av SI effekten och konventionella effekten att tilldela olika fluxintegraler BL till vardera läge, som sedan kommer döpas till $(BL)_R$ för fluxintegralen i rörelseläge och $(BL)_K$ för kraftläge enligt

$$(BL)_R = \frac{U}{v} \quad (11)$$

$$(BL)_K = \frac{mg}{I}. \quad (12)$$

Genom att använda dessa värden ges förhållandet av h/h_{90} genom

$$\frac{h}{h_{90}} = \frac{(BL)_K}{(BL)_R} = \frac{\{mgv\}_{SI}}{\{UI\}_{90}}. \quad (13)$$

Efter omdefinitionen kommer elektrisk effekt och mekanisk effekt mätas i samma enhetssystem och uppdelningen mellan enheterna kommer försvinna. Efter det kan massan realiseras genom att använda en watt balansvåg genom

$$m = \frac{UI}{gv} \quad (3)$$

där alla storheter uttrycks i SI-enheter.

Detta kapitelavsnitt är till stor del citerat och upplagt efter [1].

2.1 Tillämpad teori

Efter realisering av demonstrations watt balansvågen kommer den vara kapabel att utföra vägning av massa och mäta Plancks konstant. Massa kommer förenklat beräknas med ekvationerna (1), (2) och (3). För att beräkna Plancks konstant kommer ekvationerna (11), (12) och (13) tillsammans med kända referensvikter användas.

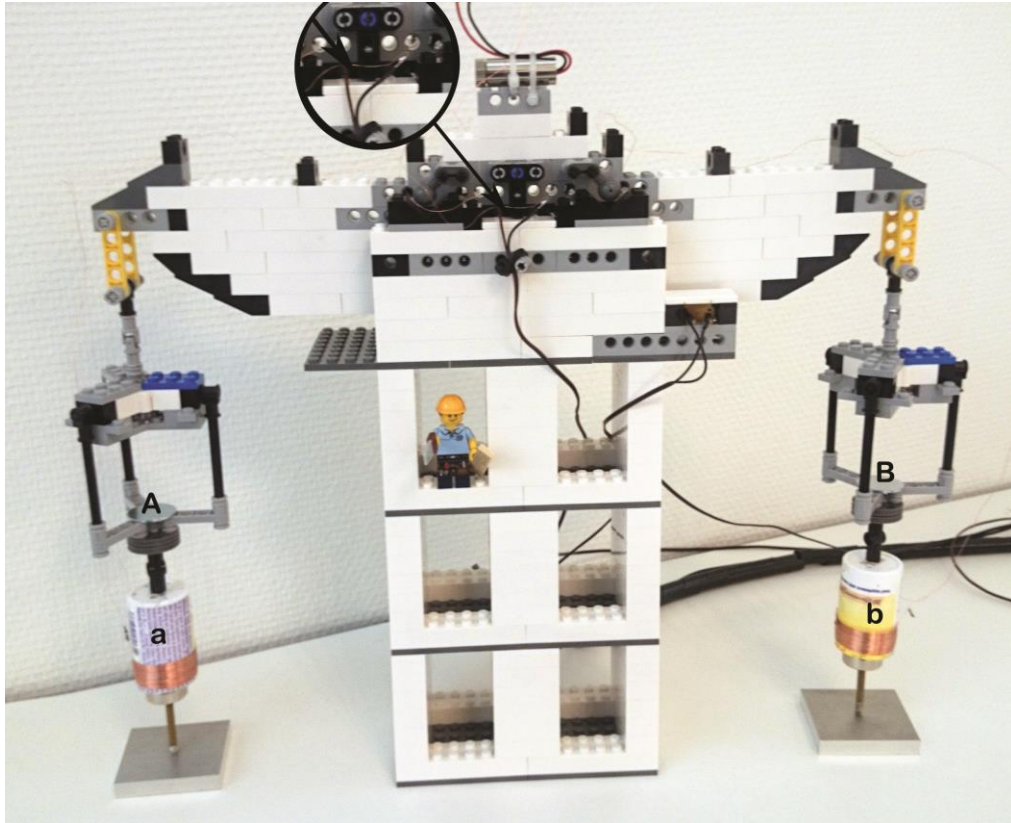
I ekvation (3) som ger oss massan, är U den inducerade spänningen som uppmäts i spolen vid $(BL)_R$ -mätning. v är den uppmätta hastigheten som spolen rör sig med vid $(BL)_R$ -mätningen. v fås från V_{ss}/s som mjukvaran läser ur positionsgrafan vid spänningsmatning i form av sinus-vågrörelse, multiplicerat med k-värdet av m/V_{ss} som genereras vid ss kalibreringen [se kapitel 4.1].

I är den beräknade strömmen i kretsen under viktmätningen. Denna beräknas enligt $I=U_r/R_r$ där U_r är spänningsfallet över en seriekopplad resistor i kretsen och R_r är resistorns motstånd, U_r läses ut av data insamlingsenheten "Labjack u6" och R_r mäts upp med multimeter och skrivs in i mjukvaran manuellt. Samt g är den lokala gravitationen som matas in manuellt i mjukvaran.

Vid massvägning, som utförs under den så kallade $(BL)_K$ mätningen, kommer endast termen I variera. U och v kommer vara satta som fasta värden hämtade från $(BL)_R$ mätningen, vars värden påverkas av fotodiodens kalibrerade rörelseutslag [se kap 4.1]. Jordaccelerationen g kommer skrivas in manuellt i mjukvaran med det värde som råder lokalt på platsen där vågen är uppställd, Detta innebär att det endast är I som kommer bidra till en spridning, medan U , v och g endast kommer påverka pålitligheten av resultaten.

3 EXPERIMENTUPPSTÄLLNING

I det här kapitlet kommer projektets olika moment behandlas. Underkapitlet behandlas i kronologisk ordning. Watt Balansvågens ingående delar är: Ställning, balansarm och vågskålar enligt figur (3) samt magnethållare enligt figur (4), mjukvara och elektronik.



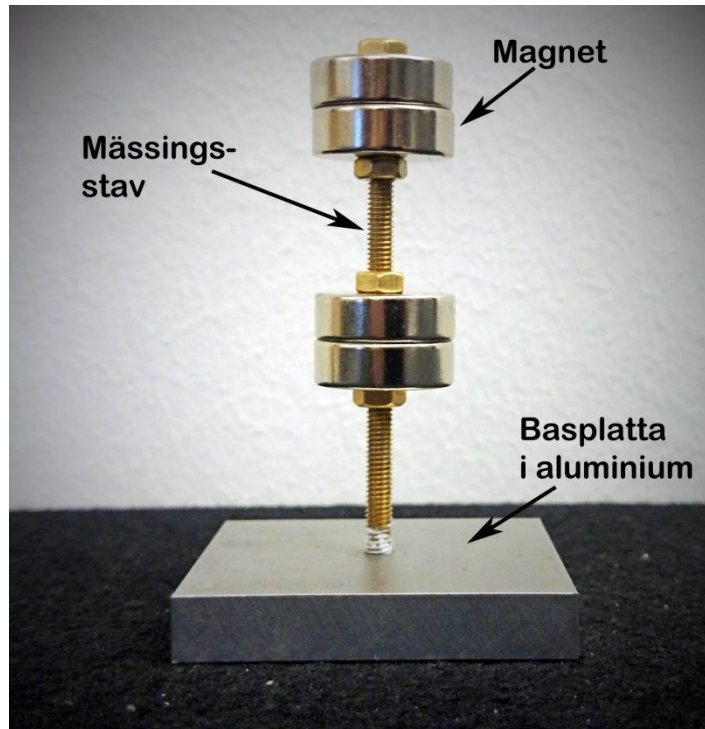
Figur 2. Ställningen håller upp balansarmen som vilar på pivotpunkterna, som utgörs av två Lego T-brickor. Till vänster om punktlaser på balansarmens topp finns en inzoomning av pivotpunkten. Vågskålarna, a och b, hänger helt symmetriskt på varsin sida av vågen. Under vågskålarna hängs spolarna, A och B, och magnethållarna kommer därefter placeras under spolarna.

3.1 Balansvågens konstruktion

Med forskningsrapporten följde en CAD fil som visar hur originalet av Lego watt balansvågen var konstruerad, denna CAD ritning följdes i största möjliga utsträckning. Legot byggdes så att bitarna lades omlott för optimal styrka och styvhet i konstruktionen.

Legobyggnationen inleddes med att ställningen monteras ihop med fyra bärande väggar, med avlastningsvåningar för förbättrad styvhet. Överst på ställningen finns två plana ytor som agerar anläggningsyta för balansarmens pivotpunkt. Symmetriskt placerat finns stopp på båda sidor för att vågen inte ska kunna vagga för långt åt något håll. På höger sida, sett framifrån, finns även en hållare för en linjelaser och en fotodiod, (presenteras närmare under rubriken elektronik nedan.)

Balansarmen byggdes helt symmetriskt för att säkerställa balans i nolläget. Överst på balansarmen sitter även hållare för rödpunktlaser som används för manuell kalibrering av nolläget och fotodiodens förhållande till balansarmens position. Legobitarna med hål i fungerar som hållare för kablar som dras till spolarna. Båda vågskålarna är ledade i alla riktningar så att vågskålar och spolar hänger lodrätt och fritt.



Figur 3. Basplattan är gjord av aluminium. Gångstaven och muttrarna är gjord i mässing. Muttrarna låser magneterna på både över och under sidan, så att magnetfältet blir fixerat. Magneterna är neodymmagneter av klassning N36 som monteras så att den repellerar varandra.

De två magnethållarna består av varsin aluminiumplatta i botten. Vinkelrätt mot plattan monteras en M4 gängstav i mässing med fyra tillhörande mässingmuttrar som håller neodymmagneter, N36, som repellerar varandra. Detta i syfte att skapa ett starkt magnetfält riktat utåt. Materialvalen gjordes så att magnethållarna ej skulle magnetiseras.

3.2 Elektronik

Den grundläggande delen i elektroniken består av de två spolarna som är lindade runt var sitt plaströr och upphängda under vågskålarna. Inuti rören står magnethållarna uppställda helt fritt. När balansarmen rör sig och en relativrörelse mellan spole och magnetfältet runt magnethållarna induceras en spänning i spolarna [se kapitel 2]. För att läsa av spänningsförändringarna kopplades kablar parallellt med spolarna som sedan går in i styrsystemet som läser av inducerad spänning. Det går även att lägga en spänning över spolen så att spolen skapar ett magnetfält. Detta kommer kallas att driva på den spolen. Spolens magnetfält beror på vilken riktning spänningen matas (enkelt uttryckt). På så vis kan spolen skapa

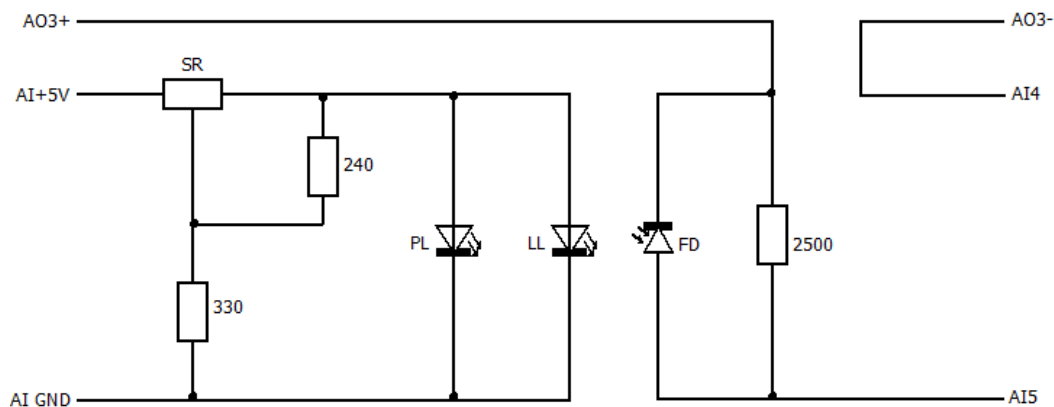
rörelse relativt de fasta magneterna, så att balansarmen sätts i rörelse [se kapitel 2].

Datorinsamlingsenheten och spänningskällorna till systemet består av två enheter: en Phidget som matar en variabel spänning ± 5 V, och en LabJack U6 som samlar mätdata samt matar lasrarna med spänning. Båda enheterna kopplas till datorn via USB.

De positionerande enheterna i elektroniken är en punktlaser, en linjelaser, samt en fotodiod.

I vänstra kretsen i figur (5) ingår en punktlaser som sitter centrerat uppe på balansarmen och projicerar en punkt på väggen. Denna laserpunkt följer balansarmens rörelse exakt och används till att manuellt ställa in balansarmens nollpunkt, samt kalibrera förhållandet mellan balansarmens position och fotodiodens spänning, [se kapitel 4.1]. Linjelasern sitter i ställningen och projicerar en linje så att balansarmen kan skymma lasern. Bakom balansarmen sitter en fotodiod som läser av linjelasern. Beroende på hur balansarmen ligger, kommer fotodioden belysas olika mycket av laserlinjen.

Fotodioden fungerar som en solcell och genererar en spänning beroende på intagen ljusmängd. Den avgivna spänningen från fotodioden anger balansarmens position. Denna spänning, multiplicerat med en faktor från kalibreringen, skapar positionsvärdet som avläses i positionsgrafan i mjukvaran. Fotodiodens krets kopplas via Phidgeten för att en spänning ska kunna läggas på, så att positionsgrafan kan förskjutas.

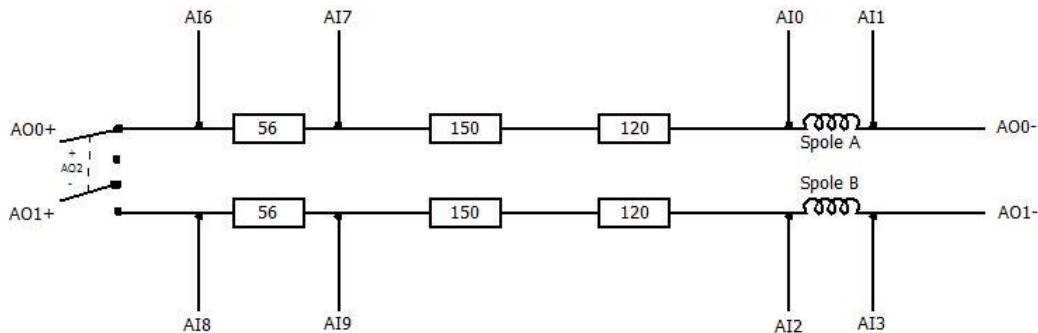


Figur 4. Kopplingsschemat består av två kretsar. Kretsen till vänster, med start i AI+5V och slut i AI GND, består av en spänningsregulator (SR), en punktlaser (PL) och en linjelaser (LL) samt två motstånd på 240 respektive 330 Ω . Den högra kretsen, med start i AO3+ och slut i AO3-, består av en fotodiod (FD) samt ett motstånd på 2500 Ω och går via LabJack U6s analoga ingångar AI5 till AI4.

Fotodioden sitter i den högra kretsen (se figur 5) och matas med spänning från Phidgeten.

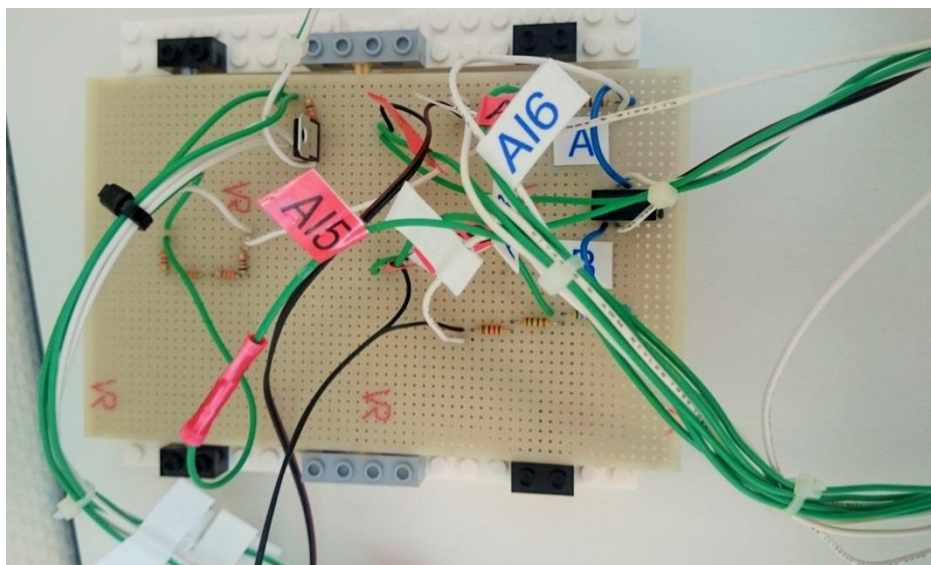
De två spolarna lindades 400 varv med isolerad koppartråd på varsitt plaströr. Det är viktigt att spolarna lindas jämnt så att fluxintegralen blir samma över båda

spolarna. Lindningen fixerades med spraylim för att inte lossa. Spolarna ingår i den tredje kretsen (se figur 5) där det även ingår uppmätta resistenser samt det "tvåpoliga dubbel switch" reläet. Reläet i sin tur styr vilken av spolarna som får matning. Över vardera spolen samt över de två resistorerna kopplas det in kablar så att Labjacken kan läsa av spänningen. Då spänningen över resistorerna kan mätas och resistenserna är givna kan strömmen beräknas genom $U=RI$. Då krets är seriekopplad antas strömmen vara konstant i hela kretsen.



Figur 5. Kopplingsschemat visar hur kretsen med spolarna är kopplade. Längst till vänster sitter reläet som styr vilken av spolarna som matas. Matningen av kretsen kommer från Phidgeten. Kablarna markerade med AI går till Labjack U6 som läser spänningen över spolarna respektive resistorerna.

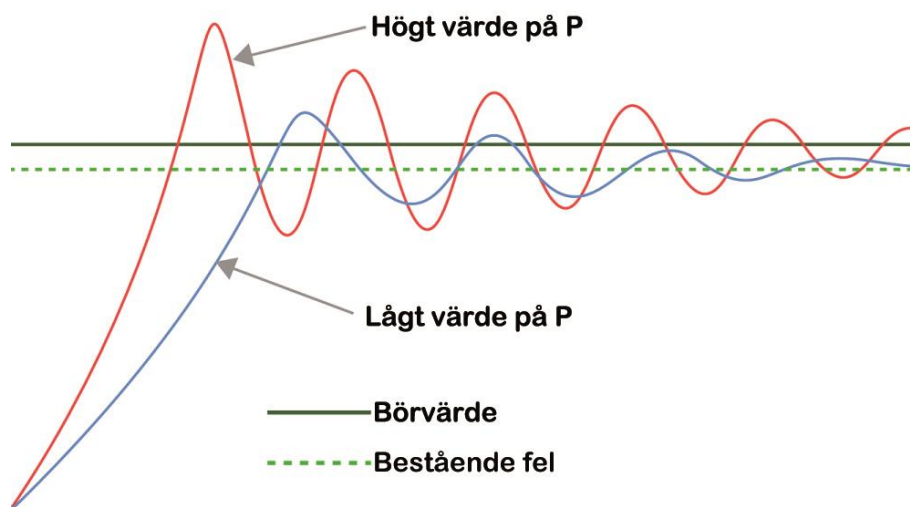
Kretsarna löddes på ett kretskort för att allt skulle bli så lättöverskådligt som möjligt. Vilket kan ses i figur 6.



Figur 6. Figuren visar hur de tre kretsarna löds på ett kretskort. Alla kablar som är fastlödda har en tagg på sig där det står vart kabeln kommer från eller vart den ska.

Vågen styrs genom en mjukvara programmerad i LabView, skapad av NIST [1]. Mjukvaran får data från Labjack U6 digitala utgång. Labjack's analoga ingångar, AI 0-9, läser av spänningsförändringar och skickar signaler till Phidgets analoga utgångar, AO 0-3, vilka styr reläet, samt matar spolarna med ström och fotodioden med spänning.

Vågens position regleras genom att variera strömmen i spolen. För att göra kontrollerade förändringar använder sig mjukvaran av en PID-regulator, där P står för proportionell, I för integrerande och D för deriverande. PID-regulatorer används för att minska risken för självsvängningar och samtidigt kunna justera positionen på ett så snabbt och stabilt sätt som möjligt. Den proportionella delen i regulatorn bestämmer med hur mycket spänningen ska justeras vid obalans. Ett högre värde på proportionella regulatorn ökar på så vis hastigheten på regleringen. Den integrerande delen i regulatorn används för att ta bort bestående fel i justeringen, men kan liksom proportionella regulatorn orsaka instabilitet om faktorn är för stor. Den deriverande återkopplingen kan användas för att förbättra stabiliteten. Dock kan derivering av en brusig signal vara svårt [10], och därför används ett lågt värde på den deriverande faktorn.



Figur 7. Grafen visar hur insvängningarna hos en PID-reglering kan bete sig då P varieras. Ett för stort P kan ge en lång insvängningstid på grund av stora översvängningar. Ett korrekt P kan ge en mer kontrollerad och på så vis snabbare insvängningstid.

4 METOD

I det här kapitlet behandlas hur projektet ska genomföras, dels hur grundläggande fakta skall inhämtas och därefter specifikt hur en LEGO watt balansvåg kalibreras innan användning. Därtill beskrivs hur allmän mätteknik kommer att tillämpas. Slutligen beskrivs hur mätosäkerhet skall behandlas.

Projektet baseras på artikeln "A LEGO Watt Balance: An apparatus to demonstrate the definition of mass based on the new SI" [1] vilken innehåller grunden till förståelsen av watt balansvågens funktion samt hur artikelförfattarna byggt originalvågen i LEGO.

Vågen som byggs i Lego har en tillhörande CAD-ritning, tillhandahållen av de tidigare nämnda artikelförfattarna, som visar hur grunden har byggts upp. Denna följs så långt som möjligt under tidiga byggnadsfasen. Elektroniken löds fast på kretskort och spolarna lindas på lämpliga plaströr. En utförlig förteckning och specificering av använda elektriska komponenter finns redovisade i Appendix.

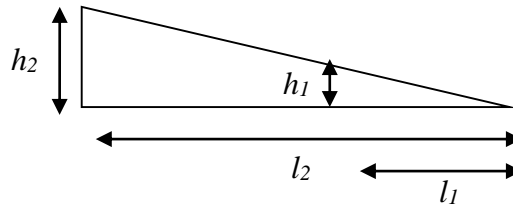
4.1 Kalibrering

Innan mätningarna startas måste fotodiodens spänningsutslag kalibreras med spolarnas vertikala position. Avsikten är att skapa ett K-värde som omvandlar positionsgivarens Spänningssignal i V till spolens Höjd i mm. Vilket är en viktig detalj i $(BL)_R$ mätningens hastighetavläsning, där V/s ska konverteras om till m/s .

För att kalibrera krävs underprogrammet "ss calibration" som finns i mjukvaran, tillsammans med punktlasern på toppen av balansarmen som projicerar en punkt på en vägg ett givet avstånd bort (3-5m). Vågen sätts i läget konstant spänning över valfri spole.

Först sätts balansarmen i sin nollpunkt så noll spänning matas över spolen, sedan mäts den projicerade punktens position från golvet, värdet matas in i "ss calibration" som då läser av fotodiodens spänningsutslag.

Spolen matas med en ny spänning och balansarmens position kommer ändras och därmed även laser punkten på väggen. När balansarmen ligger stabilt på sin nya position läses punktens position från golvet av och matas in i programvaran, som då återigen läser av fotodiodens spänning. Fem till nio olika punkter mäts beroende på vilken precision som vill uppnås.



Figur 8. Figuren illustrerar de längdmätningar som görs vid fotodiodes-kalibreringen. Där h_2 är laserpunktens höjd, uppmätt på väggen en bit bort, h_1 är spolens höjd l_1 är avståndet från pivotpunkten till spolen och l_2 är avståndet från pivotpunkten till väggen.

Höjduvslaget h_2 laserpunkten gör på väggen ett uppmätt avstånd l_2 bort, vid fotodiodes olika spänningar är nu känt. Det sökta är vad spolen gör för ändringar h_1 i höjddel vid fotodiodes olika spänningar. l_1 är avståndet mellan spolens centrum och pivotpunkten, med de trigonometriska förhållandet $h_1 = h_2(l_1/l_2)$ löser mjukvaran ut h_2 för alla punkter, se figur 8 för förklaring av l och h .

Sedan plottas spolens höjd mot spänningen från fotodioden i ett diagram. Detta anpassas till bästa möjliga linje till punkterna exempelvis med minsta kvadrat metoden. Sedan beräknas linjens K-värde som sedan används som omvandlingsfaktor när spolens hastighet beräknas i $(BL)_R$ mätningen.

4.2 Mätningar

Innan massa eller Plancks konstant kan mätas måste först fluxintegralen mätas på vardera sidan. Därefter kan viktmätningar göras med A-B-A mätningar. Det vill säga, nollmätning, viktmätning och återigen nollmätning. Genom att göra flera mätningar av samma typ i sekvens kan en uppfattning av vågens spridning och träffbild ges.

Till exempel driver A-spolen [se kapitel 3.2] och lägga vikten på b-vågskålen som här kallas A-b mätning, eller driva på B-spolen och lägga vikten på b-vågskålen som här kallas B-b mätning. Genom att sedan jämföra resultaten mellan de olika typerna av vägningar A-b, A-a, B-a och B-b fås en bild av hur vågen uppträder vid de olika belastningsfallen. Olika vikter kan vägas för att se om vågens fel följer ett linjärt mönster eller om det endast är ett adderat fel.

Eftersom ekvationen [se kapitel 2, ekvation 3] som ger massan varken innehåller exponenter eller rötter, kommer eventuella fel vara linjära eller adderade. Om vi utgår från räta linjens ekvation $y = kx + m$ så kan felet bero på k-faktorn eller ett adderat värde m .

För att kunna beräkna massa behöver magnetfältets täthet, B , och spolens trådlängd, L , beräknas, det vill säga fluxintegralen BL .

BL beräknas då balansarmen sätts i svängning genom att låta A-spolen mata en spänning i form av en sinuskurva. Samtidigt läses vilken spänning som induceras i B-spolen, och vice versa. Hastigheten v ges av förhållandet mellan spolens rörelse och fotodiodes utslag. Vilka kalibreras gentemot varandra [se kapitel 4.1].

4.3 Beräkna mätosäkerhet

Om den teoretiska mätosäkerhet är känd blir det enklare att urskilja vad som är acceptabla mätresultat mot orimliga felaktiga resultat. Om mätresultaten avviker mer än den teoretiska mätosäkerheten kan slutsatsen att utrustningen eller variabler är felaktiga dras. Mätosäkerheten kan i detta fall beräknas genom att följa ekvationen som beräknar massan. Därefter identifiera alla parametrar som innehåller mätosäkerheter i formeln och tillämpa "Gauss felfortplantningsmetod",

För att beräkna den teoretiska standardavvikelsen används Gauss felfortplantningekvation

$$u(f) = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 * u^2(x_i)} \quad (15)$$

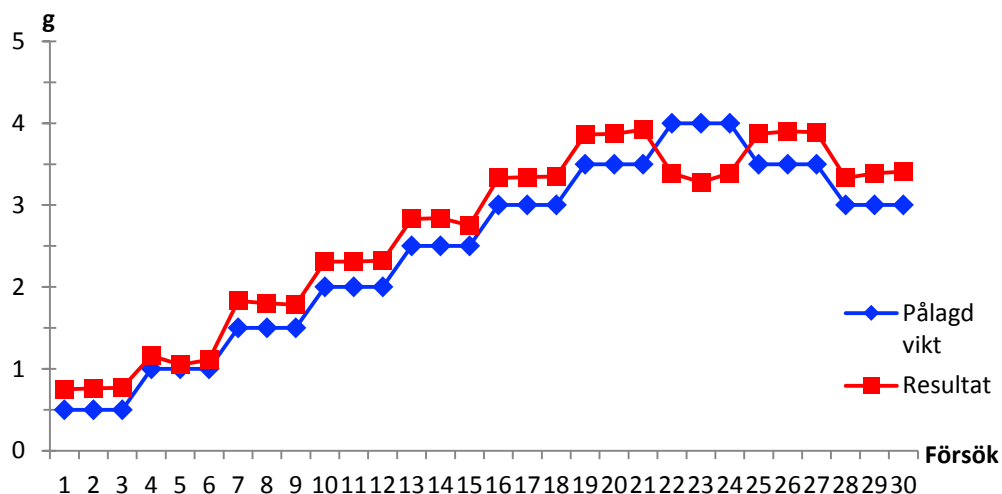
som ger summan av den totala teoretiska standardavvikelsen $u(f)$. Där u är standardavvikelsen och x är det uppmätta värdet. Innan värden kan matas in i formeln måste alla standardavvikelser och uppmätta värden vara kända för den specifika vikt, vars mätosäkerhet som skall utvärderas. För att få ut så mycket som möjligt, kan beräkningarna göras för ett flertal olika vikter för att se vart det teoretiskt är lägst osäkerhet. När den totala standardavvikelsen är beräknad delas detta värdet med det uppmätta värdet för att få ett enhetslöst tal, så att avvikelsen går att jämföra med olika stora vikter, detta enhetslösa tal brukar kallas variationskoefficient.

5 RESULTAT

I detta kapitel kommer olika typer av vägningar redovisas. Först redovisas resultat från vägningar under en serie med varierade vikter, sedan redovisas vägningar med fasta vikter men med varierande serier det vill säga A-a, A-b, B-b eller B-a [se kapitel 4.2], vilket kommer kallas serievägningar. Detta följs av redovisning av de teoretiskt beräknade standardavvikelseerna. Slutligen visas resultat från serievägningar med olika typer av pivot-eggare.

5.1 Mätningar med varierande vikter

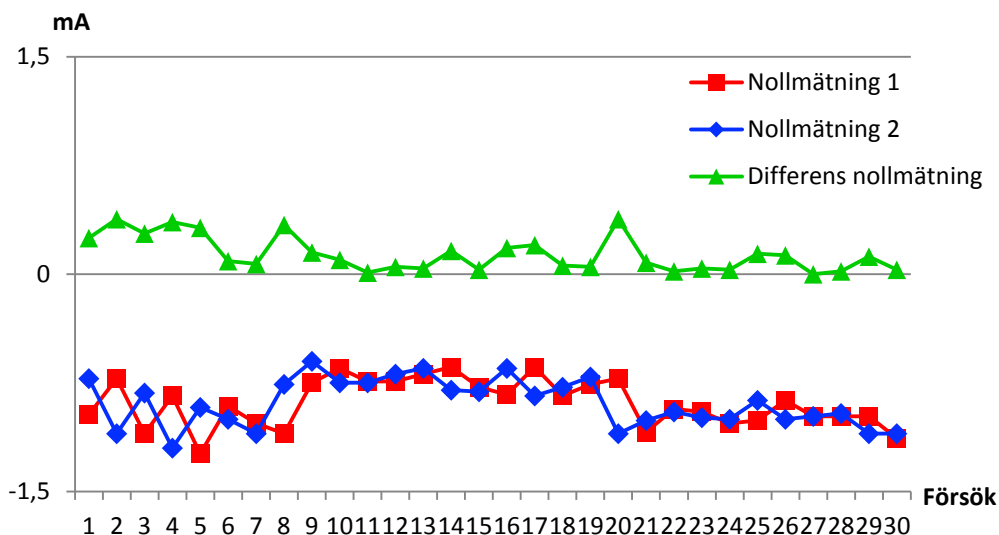
För att kunna urskilja om vågen har systematiskt växande eller avtagande fel utförs vägningar i samma serie, A-b, men med varierande vikter. Nedan kommer vikter i steg om 0,5g vägas från vad som uppskattas vara vågens lägsta mätbara vikt.



Figur 9. Grafen visar vägning av vikter mellan 0,5 g till 4 g, som vägs i sekvenser om tre gånger per vikt. Där de blå punkterna illustrera pålagd vikt och de röda punkterna anger uppmätt vikt.

Studeras den procentuella avvikelsen mellan pålagd vikt och uppmätt vikt, i figur 9, syns att avvikelsen är störst vid de lägsta vikterna, upp mot 50 %. Därefter ligger avvikelsen spridd mellan 10-15 % på de tyngre vikterna.

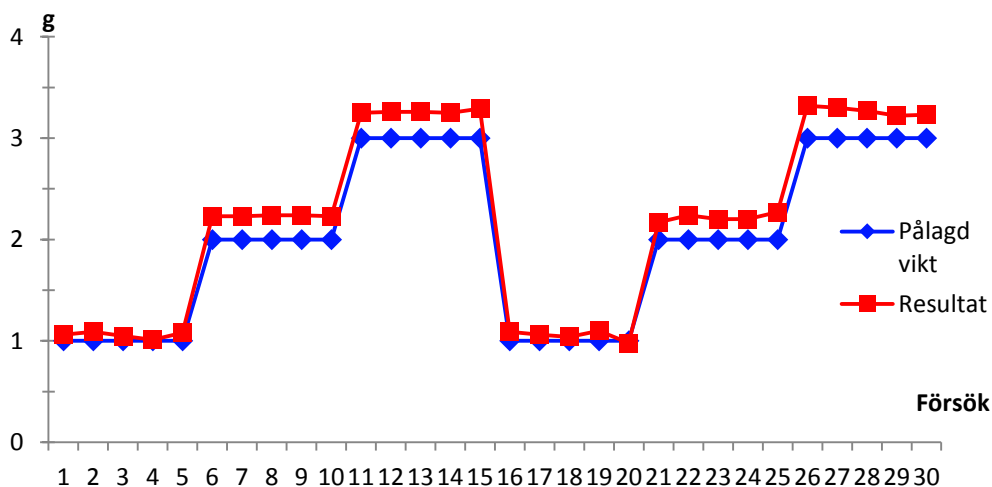
När de tyngre vikterna över 3,5g vägs i mätsekvensen framträdde en avvikelse. När vikten 3,5 g läggs på kommer den uppmätta spänningen vara runt 0,98 V vilket är strax under maximal spänning mjukvaran klara att läsa ($\pm 1V$). När 4 g läggs på kommer spänningen hamna utanför det mätbara området, så att det blir fel i avläsningen.



Figur 10. Grafen visar hur strömmen driver mellan nollmätningarna vid viktvägningen i figur 9. De blå punkterna anger första nollmätningen i ström och de röda punkterna visar andra nollmätningen i ström. De gröna punkterna anger absolutdifferensen mellan nollmätning ett och två.

Grafen i figur 10 illustrerar hur strömmen driver mellan nollmätningarna vid viktvägningen i figur 9, de blå punkterna anger första nollmätningen i mA och de röda punkterna visar andra nollmätningen i mA. De gröna punkterna anger absolutdifferensen mellan nollmätning ett och två. Här syns att vågen drev mycket i ström mellan nollmätningarna vid de låga vikterna, men låg sedan stabilare mellan mätningarna vid de högre vikterna. Från mätning nummer 8 - 19 syns att nollmätningarna håller sig runt $-0,7$ mA, för att sedan hoppa ner och lägga sig runt -1 mA mellan mätningarna 19-30.

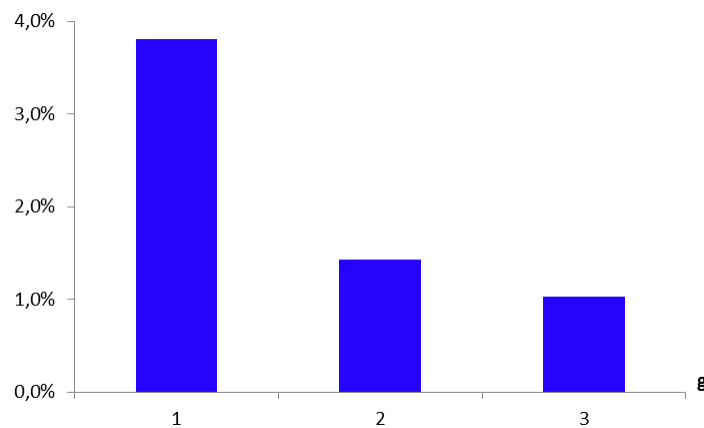
Då vågen verkar fungera mest stabilt mellan 1 och 3 gram, utfördes vägning med 1, 2 respektive 3 gram med fler punkter på vardera vikt för att kunna analysera vågen bättre.



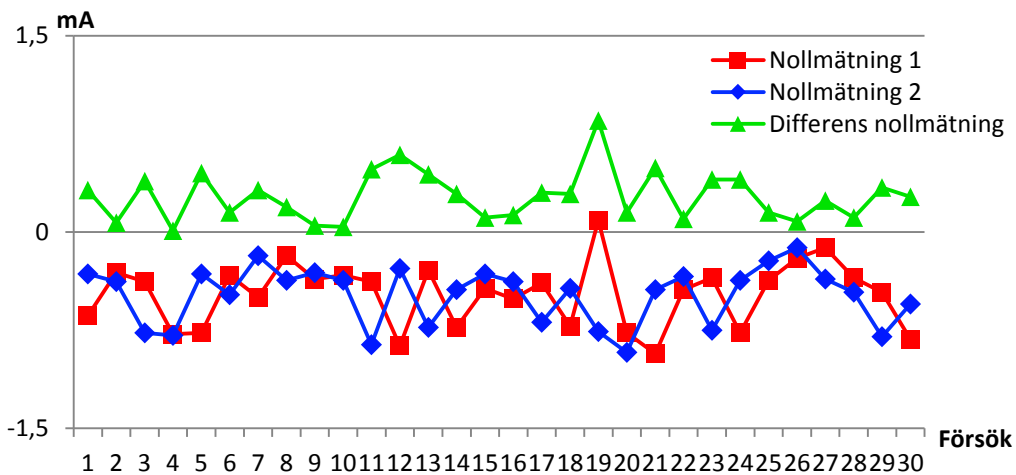
Figur 11. Grafen visar vägning av vikter mellan 1g till 3g, som vägs i sekvenser om fem gånger per vikt. De blå punkterna illustrerar pålagd vikt och de röda punkterna anger uppmätt vikt.

I Figur 11 syns skillnaden mellan pålagd och uppmätt vikt. Genom att beräkna standardavvikelsen på de 10 mätpunkterna från vardera vikt, fås ett värde på hur vågen avviker mellan vägningarna inom samma viktgrupp. Delas standardavvikelsen med den uppmätta vikten fås ett enhetslöst tal som beskriver spridningen per uppvägt gram det vill säga varianskoefficienten. Vad som nu går att se är att spridningen blir större vid de låga vikterna i jämförelse med de tyngre.

Det är alltså en lägre spridning vid vägning av de större vikterna än för de mindre, vilket illustreras i figur 12. Där syns en spridning på 1gram som närmar sig 4 %. 2 gram ligger på 1,4 % och 3 gram hamnar på 1 %.



Figur 12. Grafen illustrerar spridningen på uppmätt vikt per gram avtar vid vägning av större vikter.

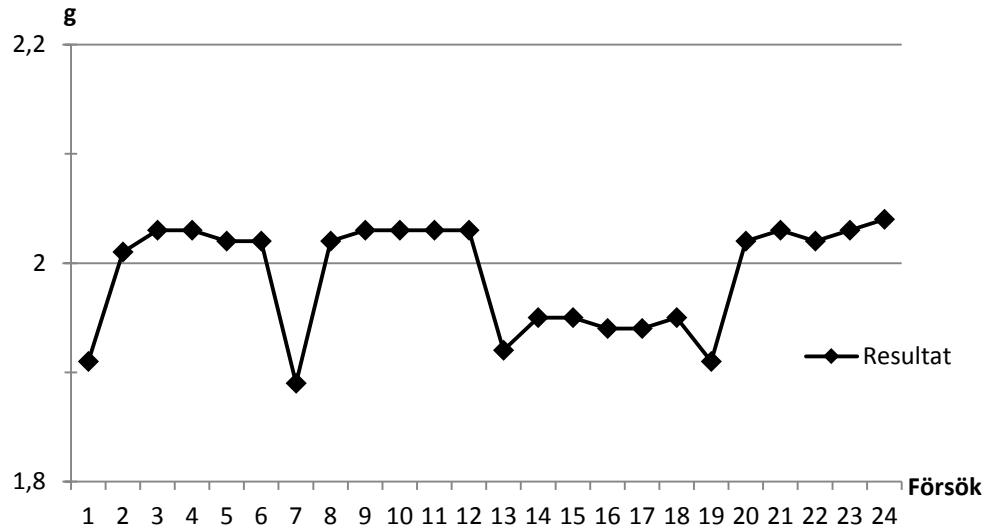


Figur 13. Grafen visar hur strömmen driver mellan nollmätningarna vid viktvägningen i figur 11. De blå punkterna anger första nollmätningen i mA och de röda punkterna visar andra nollmätningen i mA. De gröna punkterna anger absolutdifferensen mellan nollmätning ett och två.

Figur 13 visar hur strömmen driver mellan nollmätningarna vid viktvägningen i figur 11, de blå punkterna anger första nollmätningen i mA och de röda punkterna visar andra nollmätningen i mA. De gröna punkterna anger absolutdifferensen mellan nollmätning ett och två. Här syns att vågen har svårt att återgå till sitt nollvärde och ständigt driver omkring.

5.2 Serievägningar 2 gram

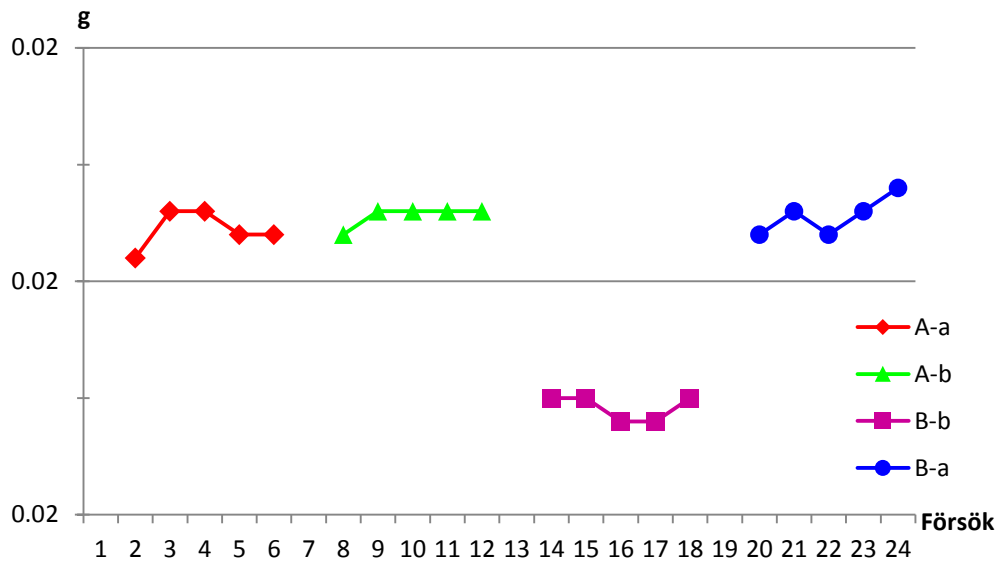
För att se hur vågen uppträder vid de olika serievägningarna, gjordes vägningar med samma vikt vid de olika serierna. Här kan eventuella hävarmsfel urskiljas, idealiskt hade varit om alla serier vägde upp lika stora vikter.



Figur 14. Grafen ovan visar vägning av 2 g inom de fyra olika serierna, vägningarna utfördes med standard "Lego T-brick"-eggjar.

Vid mätningar i olika mätmetoder med vikter av massan 2 gram kan ett tydligt samband ses då metod byts. Mätningarna görs i serie med ordningen A-a, A-b, B-b och B-a [se kapitel 4.2], vid första mätning i varje serie kan en tydlig avvikelse från övriga mätresultat uppstå, se figur 14.

Om första mätresultatet tas bort i varje serie, fås en övergripande mindre spridning på alla mätningarna. Dessa resultat delas upp efter serie för att ge en tydligare bild över hur resultaten mellan de olika serierna kan ge differenser sinsemellan, se figur 15.

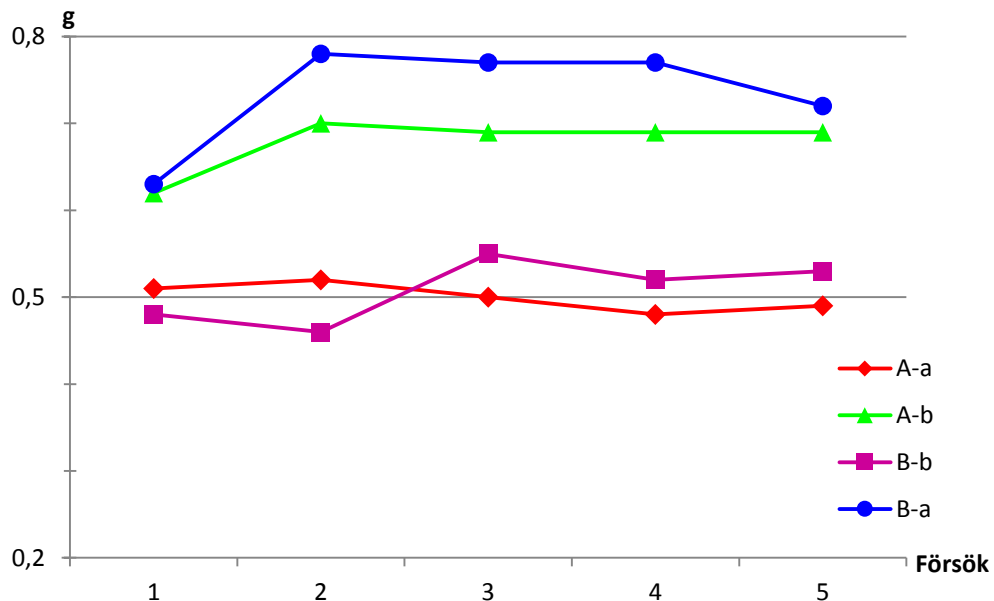


Figur 15. Grafen visar vägning av 2 g inom de fyra olika serierna. Grunden är den samma som figur 14, men nu är första mätresultatet i varje serie bortplockat.

I denna mätsekvens skiljer sig mätningarna i serie B-b från de andra med mätningar, i detta fall strax under den faktiska vikten, medan de övriga serierna ligger strax över.

5.3 Seriemätningar med olika Pivot eggjar

Balansarmens eggjar har testats i två utföranden. Först handslipade kniveggjar och sedan runda LEGO original T-Brick. I mätningen som redovisas i figur 16 användes de handslipade kniveggarna och en vikt på 0,5gram lades på.



Figur 16. Grafen visar vägning av 0,5 g inom de fyra olika serierna. Vägningarna utfördes med handslipade kniveggjar.

När vikten vägts med vågen vilandes på de handslipade kniveggarna har ett systematiskt fel framträtt. Om vågen matas på B-spolen och vikten läggs på b-vågskålen fås ett rimligt resultat. Om vikten istället placeras på vågskålen a fås ett värde som ligger cirka 20 % högre. Detta framträder på samma vis när A-b mätning görs. Oavsett vilken storlek på vikten som lades på framträdde samma fenomen.

5.4 Analyserad mätosäkerhet

I detta kapitel kommer först alla standardavvikelser identifieras för att sedan beräkna den teoretiska totala standardavvikelsen. Sedan kommer den teoretiska jämföras med den faktiska standardavvikelsen.

5.4.1 Teoretisk beräknad mätosäkerhet

Först kartlades de elektriska enheternas upplösning och noggrannhet.

LabJack U6 som mäter Spänningarna U och U_R , har en upplösning på 16 bitar. Det vill säga $2^{16} = 65536$ delar. Då mätningarna sker i intervallet $\pm 1V$ kommer en volt delas in i $2/65536$ delar, vilket leder till att vi har en teoretisk upplösning på $0,0000305$ V. Eftersom någon ordentlig kalibrering av utrustningen inte gjorts, är detta värde endast ett riktmärke. Därför måste värdet uppskattas, den verkliga upplösningen antas vara ungefär $0,0001$ V

Phidget 1002_0 som matar spänning till fotodioden och till spolarna. Har en 12 bitars arbetsgång det vill säga $2^{12} = 4096$ där intervallet är mellan ± 10 volt, vilket teoretiskt ger $20/4096 = 0,0049$ V upplösning. I verkligheten antas fotodioden ha upplösningen $0,007$ V.

Vidare utvecklas formeln för massan, där alla parametrars ursprung identifieras. Detta leder till formeln

$$m = \frac{UU_R U_{SS1} t l_2}{g h_2 l_1 R_R U_{SS2}} \quad (16)$$

där de uppmätta och uppskattade värdena och dess standardavvikelser presenteras i tabeller i Tabell 1.

U	0,007	±	0,0001	V
U _R	1,000	±	0,0001	V
U _{ss1}	0,100	±	0,0001	V
t	0,909	±	0,0000	s
l ₂	4,750	±	0,0100	m
g	9,817	±	0,0001	m/s ²
h ₂	0,080	±	0,0010	m
l ₁	0,175	±	0,0010	m
R _R	56,800	±	0,0500	Ω
U _{ss2}	0,100	±	0,0001	V

Tabell 1. Tabellen visar alla uppmätta parametrars värde och deras uppskattade standardavvikelse. Noterbart är att g är den lokala gravitationen, som i vårt fall var 9,817 m/s².

Den totala mätosäkerheten beräknades med hjälp av Gauss felfortplantningsformel för att få en uppfattning om vilken standardavvikelse vågen förväntas ha. Mätosäkerheten, $u(m)$, är beräknad till $\pm 0,0775$ g enligt ekvation (15), fullständig beräkning redovisas i bilaga I. Denna standardavvikelse är baserad på en 4 grams vikt vilket renderar en spridning per gram på $0,0775/4 = 0,0193 \Rightarrow 1,9 \%$

5.4.2 Osäkerhet vid kalibrering

Fotodiodskalibrering som går ut på att skapa ett k-värde som omvandlar $(BL)_R$ mätningens hastighet från V/s till m/s, är en betydande del för att vågen ska få en bra pålitlighet. Vid upprepade kalibreringar av fotodioden uppstår varians i omvandlingsfaktorn k , i uttrycket $h_l = kU_{ss}$, där h är spolens höjd i förhållande till nollpunkten och U_{ss} är fotodiodens spänningsutslag. Denna varians har, via jämförelse av två uppmätta värden, givit en standardavvikelse på 3,99 mm/V_{ss}. När variationskoefficienten sedan beräknas med avseende på medelvärdet som är 70,1 mm/V_{ss}, bidrar till en mätosäkerhet på 5,69 %.

Teoretiskt ska detta kunna landa på en standardavvikelse på 0,41 mm/V_{ss} vilket i förhållande till medelvärdet ger en mätosäkerhet på 0,59 %, vilket räknats fram med Gauss felfortplantningsformel likt tidigare steg med grundformeln

$$k = \frac{h_2 l_1}{l_2 U_{ss1}}$$

Det går att förbättra den verkliga avvikelsen genom att göra ett stort antal kalibreringar för att få ner standardavvikelsen, och sedan manuellt beräkna k-värdet.

6 DISKUSSION

I detta kapitel redovisas analyser av mätdata som diskuteras. Därefter tas mätosäkerheten upp och jämförelse mellan uppmätt och beräknad mätosäkerhet. Till sist ges ett antal förslag på förbättringsåtgärder som bedöms vara intressanta att göra vid ett eventuellt fortsatt arbete med demonstrationsvågen.

6.1 Analysering av mätdata

I detta kapitel kommer all mätdata diskuteras i samma ordning som i föregående kapitel.

6.1.1 Varierande vikter

Vid vägning av vikter i stegrande vikt från 0,5 g till 4 g, med 0,5 g intervaller, samt avtagande tillbaka till 3 g (figur 9) ses vad som främst verkar vara ett systematiskt fel där vikten hamnar en bit över vad den faktiska vikten på den pålagda massan är. Viktmätningarna är relativt konstanta när det gäller vikter från 1,5 g till 3,5 g och ligger samtliga ca 0,35 g för högt. Däremot tenderar vågen vid lägre vikter (0,5 och 1 g) behäftad med problem att reproducera resultaten jämt.

Vid 4 g uppstår ett märkligt fenomen där vikten helt plötsligt faller en bra bit under den faktiska vikten. Vad som bidrar till detta problem tros vara LabJack U6s begränsade mätomfång som ligger mellan -1 V och +1 V och redan vid 3,5 g är spänningen ungefär 0,98 V. Rekommendationen för vågen i nuvarande utförande är att undvika att väga vikter över 3,5 g eftersom det är oklart hur mjuk- och hårdvaran hanterar mätningarna då spänningen överstiger 1 V.

Rimliga vikter att väga med vågen verkar därför vara vikter som ligger mellan 1,0 och 3,0 g. Studeras strömdrivningen mellan de två nollmätningarna i figur 10 ligger de på en rimligt jämn nivå runt -0,7 mA mellan försök 9 och 20 utan att avvika från varandra något nämnvärt mer än vid något uddatillfälle. För att mellan försök 21 och 30 förskjutas till ett konstant ström på -1 mA.

Varför förskjutningen sker är oklart, men en eventuell anledning är förändrade ljusförhållanden då fotodioden är känslig för omgivande ljus. Exempelvis om belysningen släcks i rummet så förskjuts strömmen i nollläget och på samma sätt förskjuts även strömmen då solen går i moln. Betraktas vägningen av vikterna 0,5 g och 1 g så ses relativt stora drivningar mellan de två nollmätningar. Differensen kan bli upp till 0,4 mA mellan nollpunkterna. Om detta beror på den låga vikten eller någon annan källa har ej kunnat fastställas.

För att kunna väga större vikter krävs större magneter med högre klassning, vilket ger ett starkare magnetfält. Därmed Lorentz kraft, med samma ström och spole kommer skapa en starkare ortogonal kraft. Vilket medför att tyngre vikter kan vägas. Starkare magneter kan även bidra med ett jämnare magnetfält vilket skulle kunna ge minskad avvikelse mellan den faktiska vikten och den uppmätta.

I figur 11 syns inga större procentuella förändringar av avvikelserna mellan de olika uppvägda vikterna och pålagda vikterna.

Studeras den faktiska spridningen mellan de uppmätta vikterna vid vägning av olika tunga vikter syns att spridningen avtar vid de högre vikterna vilket illustreras i figur 12. Om den trenden fortsätter med ökade vikter, visar det att vågen sprider mindre och mindre ju högre vikter som läggs på. I rapporten "A LEGO Watt Balance" [1] redovisas vägningar med vikter upp mot 10 gram. Detta är så höga vikter att spridningen skulle bli betydligt mindre om det följer trenden. De stora vikterna möjliggörs av att de använder sig av kraftigare magneter. I figur 13 syns också att nollmätningarna driver omkring mycket i hela mätsekvensen. Orsaken till detta går inte att fastställa, men är något som bör jobba vidare med för att högre precision ska nås.

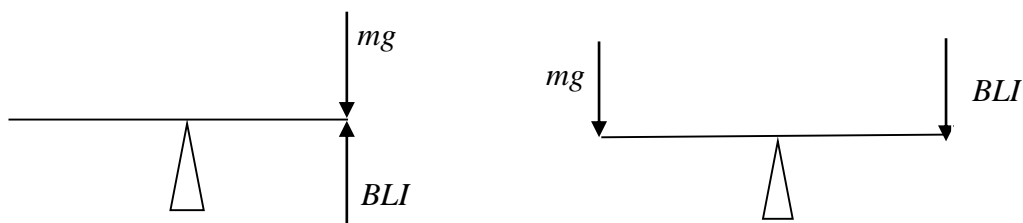
6.1.2 Varierande serier

I figurerna 14 och 15, visas att första mätresultatet i serien kan hamna långt ifrån övriga mätresultat i serien. Dessa mätresultat måste identifieras för att kunna exkluderas, då efterföljande mätningar kan skilja sig markant i serien. Det kan bero på många olika saker och behöver inte ha något samband med övriga mätserien.

Att någon serie förskjuts i förhållande till de andra serierna är ett fenomen som uppträder slumpvis vid seriemätningar. I detta fall är det serie B-b. Någon systematik i vilken serie som avviker från de andra har inte kunnat identifieras och orsaken till vad det beror på har inte heller lokaliserats.

6.1.3 Olika pivot eggjar

I figur 16 syntes ett systematiskt fel, eftersom det i båda fallen A-b och B-a blir en ökning på 20 % kan det inte vara någon form av hävarmsfel eftersom det då hade uppträtt som ett plus minus fenomen. Betraktas de två olika lastfall som uppträder i vågen, kan en faktor som kan förstärka dåligt slipade kniveggjar ses.



Figur 17. Figuren illustrerar de två olika lastfallen som uppkommer i vågen beroende på vilken spole och vilken vågskål som vikten läggs på.

Det första lastfallet illustreras i den vänstra bilden i figur 17. Där ses att den elektromagnetiska kraften tar ut den mekaniska kraften i samma punkt så att armen ej belastas och pivotpunktens last är oförändrad under A-B-A vägningens tre sekvenser, det vill säga vid nollvägningarna kontra viktvägningen.

Det andra lastfallet illustreras i den högra bilden i figur 17. Där ses att de två krafterna tar ut varandra med hjälp av hävarmen. Här är balansarmen tvungen att ta upp krafter, vilket resulterar i att pivotpunkten kommer ha olika tryck i kontaktpunkterna vid A-B-A vägningens olika sekvenser.

Om felet beror på de dåligt slipade kniveggarna i kombination med de olika lastfallen eller om det beror på någon annan faktor, kan inte fastställas. Om detta fel skall kunna utredas måste ytterligare mätdata inhämtas.

Vid vägning med original ”LEGO T-brick” med runda eggar. Uppträder inte detta problem. En viss avvikelse uppstår när vikten placeras på en ny vågskål. Om detta beror på hysteres, det vill säga historiska spänningar, som ligger kvar i systemet, eller om andra faktorer spelar in är svårt att avgöra.

6.2 Mätosäkerhet

Den beräknade standardavvikelsen för 4 g hamnade på 0,0775 g vilket motsvarar en spridning per gram på 1.9 %. Den uppmätta standardavvikelsen för 3 g vikter landade på 0,031 g vilket motsvarar en spridning på 1 %. Dock måste man ha i åtanke att detta utgör ett snapshot från en vägningsomgång som kan pågå 30 minuter. Vid en ny vägningsomgång kan dessa resultat inte jämföras med tidigare uppmätta värden eftersom vägningsomgångarna har en tendens att förskjutas i uppmätt vikt sinsemellan. Att spridningen sjunker med ökad vikt, se figur 12, tyder på någon form av tröghet i vågen, som är så pass stor att den begränsar rörelse vid de lägre vikterna. Enklaste sättet att kringgå det problemet är att inte väga de mindre vikterna.

Avståndet mellan uppmätt och pålagd vikt ligger mellan 10 % och 20 % för högt spritt stokastiskt. Mellan de olika vikt vägningarna skiljer sig beteendet. Ibland avtar felet med ökad vikt och ibland minskar det. Fler vägningar krävs för att en möjlig slutsats ska kunna dras.

6.3 Problem och förbättringar

Magnetfälten har inneburit vissa problem, då det är starkt beroende av magnetens klassning. De första magneterna som användes hade en okänd klassning och gav en fluxintegral på under 1 Vs/m. En ny uppsättning magneter med känd klassning N36 gav beroende på konfiguration, enkla eller dubbla magneter, fluxintegraler på ungefär 1,6 Vs/m respektive 5 Vs/m. Detta är fortfarande lågt i jämförelse med artikelförfattarnas [1] fluxintegraler på ungefär 36 Vs/m med magneter klassade som N48.

Vid mätningar har vissa störningar uppträtt, som visat sig i positionsgrafnen. Den största felkällan till störningarna har varit när laddaren varit inkopplad, vilket gör att datorn endast får sin strömförsörjning via elnätet. Störningarna uppkommer då omvandlingen från växelspanning till likspänning i datorns transformator ger en

ojämn spänning till USB-portarna. Att köra datorn på batteri har eliminerat detta problem, då batteriet matar med en jämn likspänning.

Magnetfält från transformatorer som legat i närheten av vågen och dess kablar har även de bidragit till störningar. Lättast är att se till att inte ha något sådant i närheten, alternativt att bättre avskärmade kablar används.

Det har även utöver detta uppkommit störningar sporadiskt där ingen förklaring har hittats. Ibland har det gått att jorda datorns chassi så att störningarna lagt sig. En möjlig förklaring är statisk elektricitet.

I artikeln [1] angavs att resistorerna i spole kretsarna var på 330ohm. Kopplat efter deras specifikationer blev spänningen över resistorerna upp mot tre volt. Då datainsamlingsenheten (Labjack U6) har en begränsad avläsnings intervall på ± 1 volt. Stannade voltmätaren i mjukvaran på en volt, medan spänningsmataren (Phidget) matade vidare. Detta resulterade i att den beräknade strömmen stannade på ett inkorrekt lågt värde. Lösningen på problemet var att seriekoppla ett av vardera 56, 120 och 150ohms resistorer, så att summan av motstånden i kretsen blev nästan den samma. Sedan mäts spänningen över motståndet på 56 ohm där spänningsfallet inte blir så stort. På så vis kunde hela hårdvarans spännings kapacitet utnyttjas varvid större vikter kunde vägas.

Fotodioden som belyses av linjelasern läser i princip av alla typer av ljus, det inkluderar omgivande ljus från lampor och solen. Om ljusförhållanden förändras, exempelvis att solen går i moln eller om vågen skuggas, kommer fotodiodens utgående spänning förändras så att mjukvaran kompenserar ljusförändringen, Detta resulterar i drivningar i ström mellan nollpunktsmätningarna varvid opålitliga mätresultat erhålls. Detta går att förbättra genom att utföra mätningarna i ett rum utan fönster och med en jämn ljuskälla riktad uppåt mot taket så att skuggor ej uppstår.

Vid A-B-A mätningar har vågen stundtals haft svårt att hitta tillbaka till sin nollpunkts ström i spolarna. Detta förbättrades när vågen placerades på ett avskilt bord så att vibrationer från användarna inte fördes vidare in i vågen.

7 SLUTSATS

Vågens förmåga att repeterbart väga upp samma vikter är under en vägningsomgång god, ner mot 1 %, inom ett kortare tidsintervall. Om vågen stängs av mellan två vägningsomgångar kan en förskjutning av de uppmätta värdena inträffa, vilket ökar standardavvikelsen mellan omgångarna markant.

Vågens förmåga att väga korrekt pålagd vikt är inte imponerande. Vågen väger mellan 10-20 % för högt i snitt mellan de olika vikterna, stokastiskt fördelat över vågens uppvägningsbara viktområde. Det vill säga en serie med 1 g vikter kan vägas till ett värde 20 % högre och en serie med 3 g vikt 10 % högre. För att i en ny omgång väga tvärt emot.

En bidragande orsak till fel ligger i kalibreringen i det så kallade k-värdet, alltså omvandlingsfaktorn mellan V och mm. I den uppmätta osäkerheten, efter ett antal kalibreringar ses en mätosäkerhet på 5,69 %. Att jämföra med den teoretiska mätosäkerheten på 0,59 %. Detta är en hög faktisk osäkerhet och orsaken till detta bör utredas.

Vad gäller spridningen av de uppmätta vikterna sprider vågen med 1-1,5 % vid vikter på 2-3 g, vilket ligger inom den teoretiska spridningen på 1,9 %.

Det som bidrar med störst osäkerhet i dagens utförande är vågens hastighetsavläsning, vid $(BL)_R$ mätningen, som i dag fås via fotodioden i form av V_{ss}/s , som sedan multipliceras med "ss kalibreringens" K-värde (m/V_{ss}).

För att tillsammans ge spolarnas vertikala hastighet v i m/s.

Problemet skulle kunna elimineras om någon effektivare hastighets uppmättningsmetod tillämpades.

Magneterna som vågen har i dagens utförande är för svaga. Kraftigare magneter skulle möjliggöra vägning av större vikter som förväntas ge förbättrade mätresultat, då upplösningen är begränsad. Förhoppningsvis blir även magnetfältet jämnare med kraftigare magneter, så att vågen blir mindre känslig för var nollpunkten läggs.

En positionsgivare som inte påverkas av faktorer i rummet hade varit en bra uppgradering. Ett första steg kunde vara att montera ett optiskfilter som endast släpper igenom linjelaserns ljusfrekvens, alternativt att fotodioden byts ut mot en med ett mindre och specifikare ljusspektra.

För vidare utredning bör vågen flytas till ett rum utan fönster med jämn ljuskälla, där vågen kalibreras in ett flertal gånger tills standardavvikelsen av K-värdet gått ned. Därefter utföra nya vägningar för att se om ljusförhållandena har den stora negativa inverkan som den antas ha.

Vågen väger i dagsläget inte helt korrekt, men visar ändå principerna hur en elektrisk kraft kan kompensera en mekanisk kraft. LEGO watt balansvågen mäter alla data med enkel utrustning som inte kostar många kronor. Därför kommer dess noggrannhet inte bli så mycket högre än de som uppnås i dag, med den utrustning som är tillämpad i dagsläget. Med de avancerade mättekniker som finns idag kan en riktig watt balansvåg byggas och mäta med mycket hög noggrannhet. Nyckeln till detta är bland annat det sätt resistans och volt kan mätas med hjälp av kvant-Halleffekten respektive Josephsonseffekten.

Det är från dessa kvantfysiska fenomen som möjliggör beräkningar av volt och resistans, som ger kopplingen mellan watt balansvågen och Plancks konstant.

Plancks konstant är en fundamental naturkonstant och kan ses som en omvandlingsfaktor mellan frekvens och energi. Vilket tillämpas av kvant-Halleffekten och Josephsonseffekten, för att beräkna resistans respektive spänning med hög noggrannhet.

För att kunna dra slutsatser från LEGO watt balansvågens mätningar krävs förutom att all mätdata dokumenteras också att ett statistiskt underlag i form av mycket data erhålls. Eftersom drivningar i ström alltid sker är A-B-A mätning att föredra. Företrädevis större mätsekvenser, i form av A-B-A-B-A mätning för att få noggrannare mätningar.

Någon total noggrannhet på en procent har inte uppnåtts, däremot har spridningen kommit ner på 1 %, vilken är baserad på 10 uppmätta 3grams vikter (se figur 11). Om de tidigare benämnda förbättringarna utförs, finns möjlighet till att förfinas vågens träffbild. Hur stor skillnad dessa åtgärder ger är svåra att prediktera i nuläget.

REFERENSER

- [1] L. Chao, et al, "arXiv," 2015. [Online]. Available:
<http://arxiv.org/pdf/1412.1699v3.pdf>.
- [2] D. Williams, "ScienceDirect," 2014. [Online]. Available:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1472029914001167>.
- [3] P. Becker, et al, "IOPscience," 2003. [Online]. Available:
http://iopscience.iop.org/0026-1394/40/5/010/pdf/0026-1394_40_5_010.pdf.
- [4] I. Robinson, "IOPscience," 2014. [Online]. Available:
http://iopscience.iop.org/0026-1394/51/2/S1/pdf/0026-1394_51_2_S1.pdf.
- [5] M. Sadiku, Elements of Electromagnetics, Oxford University Press, 2001.
- [6] G. Elert, "Physics.info," 2015. [Online]. Available:
<http://physics.info/lorentz/>.
- [7] S. Levy, et al, "Nature," 2007. [Online]. Available:
<http://www.nature.com/nature/journal/v449/n7162/abs/nature06186.html>.
- [8] R. Prange och S. Girvin, The Quantum Hall Effect, Springer-Verlag, 1990.
- [9] P. Mohr, et al, "arXiv," 2012. [Online]. Available:
<http://arxiv.org/pdf/0801.0028v1.pdf>.
- [10] T. Glad och L. Ljung, Reglerteknik: Grundläggande teori, Studentlitteratur, 2006.

<https://vimeo.com/128598681>

BILAGA I

$$\begin{aligned} u^2(m) = & \left(\frac{U_p \cdot U_{ss1} \cdot t \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(U) + \left(\frac{U \cdot U_{ss1} \cdot t \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(U_p) + \\ & + \left(\frac{U \cdot U_p \cdot t \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(U_{ss1}) + \left(\frac{U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(t) + \\ & + \left(\frac{U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot t}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(L_2) + \left(\frac{-U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot t \cdot L_2}{g^2 \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(g) + \\ & + \left(\frac{-U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot L_2 \cdot t}{g \cdot h_2^2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(h_2) + \left(\frac{-U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot t \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1^2 \cdot R_R \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(L_1) + \\ & + \left(\frac{-U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot L_2 \cdot t}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R^2 \cdot U_{ss2}} \right)^2 \cdot u^2(R_R) + \left(\frac{-U \cdot U_p \cdot U_{ss1} \cdot t \cdot L_2}{g \cdot h_2 \cdot L_1 \cdot R_R \cdot U_{ss2}^2} \right)^2 \cdot u^2(U_{ss2}) \end{aligned}$$

BILAGA II

Artikelnamn	Artikelnummer	Antal
Custom LEGO Watt Balance Software		1
Brick 2x4	300101	75
Brick 2x8	6033776	75
Brick 1x2 with cross hole	4233487	6
T-Beam 3x3 w/hole	4552347	2
Technic Brick 1x2	370026	18
Technic Brick 1x4	4211441	66
Technic Brick 1x5 Thin	32017	4
Plate 8x8	4210802	9
Plate 1x2	4211398	14
Plate 1x4	4211445	3
Plate 2x3	4211396	6
Cross Axle 2M w/ Groove	4109810	8
Cross Axle 3M	4211815	2
Cross Axle 5M	4211639	6
Cross Axle 8M	370726	8
Bush for Cross Axle	4211622	14
1/2 Bush for Cross Axle	4211573	32
Double Bush 3M	4560175	4
Roof Tile 2x2/45 deg Inv.	366026	2
Roof Tile 2x3/25 deg	4211106	6
Roof Tile 2X3/25 deg Inv.	374726	4
Connector Peg W. Friction 3M	4514553	8
Connector Peg/Cross Axle	4666579	6
Catch w. Cross Hole	4107081	8
Flat Tile 2x4	4560178	2
Hinge 1x2 Lower Part	383101	6
Hinge 1x2 Upper Part	6011456	6
Double Conical Wheel Z12 1M	4177431	4
Angle Element, 180 Degrees [2]	4107783	2
Technic Beam 1 x 4 x 0.5 with Boss	2825 / 32006	6
Technic Beam 2 Beam w/ Angled Ball Joint	50923 / 59141	2
Wedge Belt Wheel	2786 / 4185	4
Gear with 8 Teeth (Narrow)	3647	2
Universal Joint	61903	2
Multifunction DAQ with USB - 16 Bit	U6	1
PhidgetAnalog 4 Output	1002_0	1
Focus Line Red Laser Module <1mW	YCHG-650	1
Line Laser Module (650nm) <1mW	LN60-650	1
Photodiode 7.98mm Dia Area	718-PC50-7-TO8	1
Low signal Relay	769-TXS2-4.5V	1
Resistors 240 Ohms	291-240-RC	1
Resistors 330 Ohms	291-330-RC	4
Resistors 1500 Ohms	291-1.5k-RC	1
Resistors 56 Ohms		2
Resistors 120 Ohms		2
Resistors 150 Ohms		2
Linear Voltage Regulator	511-LM317T	1
≥N36 grade - ring magnet		4
Brass Threaded Rods - M4		2
Brass Nuts - M4		8
PVC Pipe Fitting		2
PVC Unthreaded Pipe		2