



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE:
B021E-29 NOVO
SIGNALPROSESSERING OG REVERSE
ENGINEERING

*Kay Siver Bø
Sebastian Borgen Danielsen
Akkharadet Lee*

1. jun. 2021

Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> BO21E-29 NOVO signalprosessering og reverse engineering	<i>Dato/Versjon</i> 1. jun. 2021/4.5
	<i>Rapportnummer:</i> B021E-29
<i>Forfatter(e):</i> Kay Siver Bø Sebastian Borgen Danielsen Akkharadet Lee	<i>Studieretning:</i> HEEL18
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 66
<i>Høgskolens veileder:</i> Ilker Meric, Kyrre Skjerdal	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> HVL	<i>Oppdragsgivers referanse:</i>
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontakinformasjon):</i>	

Revisjon	Dato	Status	Utført av
0.1	11.05.21	Utfyllt mal.	Kay Siver Bø, Akkharadet Lee
1.0	21.05.21	Tilpassing av dokumentstruktur	Kay Siver Bø
2.0	22.05.21	90% fullføring av kap.4 og appendiks F, G, H, I	Sebastian Danielsen
3.2	23.05.21	Utkast 1	Kay Siver Bø, Sebastian Danielsen, Akkharadet Lee
4.3	30.05.21	Utkast 2	Kay Siver Bø, Sebastian Danielsen, Akkharadet Lee
4.4	30.05.21	Korrektur, nye figurer.	Kay Siver Bø, Sebastian Danielsen
4.5	01.06.21	Endelig rapport	Kay Siver Bø

Forord

Vi, forfatterne av denne oppgaven, vil takke alle som har bidratt til at denne oppgaven har blitt det den er i dag.

Spesielt må vi takke Ilker Meric og Kyrre Skjerdal som har bidratt med veiledning, datasett og laboratorietilgang, for å nevne noe. Denne oppgaven hadde ikke blitt den samme uten dere.

Hilsen

«Forfatterne»

Sammendrag

Oppgavens hovedmål er å observere om invertering av signal fra fotomultiplikator-rør påvirker målenøyaktigheten til et eksperimentelt målesystem som bruker et DRS4-kort som analog-til-digital-omformer (ADC).

Arbeidet har gått ut på å utvikle programvareverktøy for dataanalyse og utføre forsøk på laboratorium med målesystem, og modifisert målesystem. Forsøk med attenuator har ikke blitt utført grunnet begrenset tid

Over oppgavens periode har det blitt tatt opp data av bølgeformer, med og uten inverter, med formål å observere endringer, eller forvrengning, i bølgeformene som konsekvens av bruk av inverter, og koincidensmålinger med hensikt å oppdage endringer i målenøyaktigheten i forskjellige posisjoner på scintillatorstavene til målesystemet.

Hypotetisk modell for puls-inverter har blitt utarbeida og testa eksperimentelt, med gode resultat. Ytelsen til opprinnelig puls-inverter ble ikke oppnådd under test.

Etter analyse av visualiserte data og statistiske utregninger, kan vi konkludere med at inversjon av signal ikke påvirker målenøyaktigheten i betydelig grad og er en tilstrekkelig løsning på problemet.

Innhold

Dokumentkontroll	2
Forord	3
Sammendrag	4
1	Innledning..... 7
1.1	Organisering av rapporten 7
1.2	Oppdragsgiver 7
1.3	Problemstilling..... 7
2	Kravspesifikasjon 8
3	Analyse av problemet..... 9
3.1	Mulige utfall/løsninger 9
3.1.1	Invertermoell..... 9
3.1.2	Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter..... 10
4	Målinger 11
4.1	Metode 11
4.1.1	Generelt målesystem 11
4.1.2	Pulsinverter 12
4.2	Resultater 12
4.2.2	Pulsinverter 14
5	Analyse av målinger..... 18
5.1	Påvirkning av inverter..... 18
5.2	Påvirkning på målesystem..... 19
5.3	Hypotetisk invertermodell..... 20
6	Konklusjon 24
Referanser	25
Appendiks A	Forkortelser og ordforklaringer..... 26
Appendiks B	Om arbeidsfordeling..... 27
B.1	Kort om prosjektfaser og generelt om arbeidsfordeling..... 27
B.2	Programvare 27
B.3	Praktisk arbeid..... 28
B.4	Teoretisk arbeid..... 28
B.5	Håndtering av innkjøp og budsjett..... 29
Appendiks C	NovoParser 30
C.1	Om programmet..... 30

C.2	Flytskjema.....	30
Appendiks D	NovoInspector	31
D.1	Om programmet.....	31
D.2	Om algoritmer	31
D.3	Flytskjema.....	33
Appendiks E	Fotografi av oppsett og komponenter	34
E.1	Demontert inverter	34
E.2	Destruert inverter.....	35
E.3	Oppsett Måling 1: Med/uten inverter.....	36
E.4	Oppsett Måling 2: Koinsidens.....	37
E.5	Prototyp invertere:.....	38
Appendiks F	Testresultater: Måling 1 – med/uten inverter	39
F.1	Uten inverter	39
F.2	Med inverter.....	41
Appendiks G	Testresultater: Måling 2 – Koinsidensmåling	43
G.1	Uten inverter	43
G.2	Med inverter.....	44
Appendiks H	Figurer: Konsidensmåling	45
H.1	Med inverter.....	45
H.2	Uten inverter	56

1 Innledning

1.1 Organisering av rapporten

Rapporten vil være delt opp slik at mest mulig av figurer og tabeller dukker opp som del av et appendiks. Forklarende tekst og forenklete, eller uavhengige, figurer og tabeller vil forbli i rapporten.

1.2 Oppdragsgiver

HVL:

Høgskulen på Vestlandet (HVL) er en av de største utdanningsinstitusjonene i Norge, og er resultatet av sammenslåingen av Høgskolen i Bergen (HiB), Høgskulen i Sogn og Fjordane (HiSF), og Høgskulen Stord/Haugesund (HSH) i 2017 [1]. I 2020 var det 16 240 studenter som studerte ved HVL [2].

NOVO-prosjektet:

NOVO (Neutron and gamma-ray imaging for real-time range verification and image guidance in particle therapy) [3], ved HVL, utforsker bruk av sekundære partikler som oppstår i kjernekkollisjoner til bruk i utstyr for verifikasjon av partikkelterapi. Prosjektet tar for seg å utvikle et avbildningssystem for overvåking av partikkelterapi i nær sanntid. Systemet skal i sammenheng med denne oppgaven detektere gamma-fotoner via en scintillasjonsstav og fotomultiplikator-rør. Signalpulsene generert av målesystemet skal bli digitalisert av en DRS4 integrert krets [4].

1.3 Problemstilling

NOVO-prosjektet skal vurdere om bruk av pulsinvertorer har negativ påvirkning på et eksperimentelt målesystem. Målesystemet består, per dags dato, av scintillasjonsstaver med ett fotomultiplikatorrør (PMT) på hver side, og et DRS4-kort som ADC.

Hovedproblemet med det nåværende systemet er at fotomultiplikator-rør genererer negative pulser med amplitude ned til -1V eller mer, og DRS4-kortet ikke kan observere elektriske pulser som går under -500 mV. Derfor ønsker oppdragsgiver å studere hvordan bruk av invertorer vil påvirke nøyaktigheten til målesystemet.

Da invertorerne er kommersielle enheter hvor virkemåten ikke er spesifisert av produsent, ønsker oppdragsgiver undersøkelse av inverterens virkemåte.

2 Kravspesifikasjon

Oppgavens hovedfunksjon er å teste systemet med en passiv pulsiverter fra Marki Microwave, og til sist rekonstruere en pulsiverter mer tilpasset til prosjektet.

Grunnet begrenset tid vil ikke forsøk med attenuator bli utført. Oppgaven blir dermed til disse punktene:

- Designe en pulsiverterkrets basert på passive komponenter med utgangspunkt i INV0065¹ [5] inverteren.
- Programmere programvarebaserte verktøy for å analysere måleresultater.
- Levere en rapport med resultatene fra laboratorieforsøk og en konklusjon basert på resultatene:
 - Amplitude
 - Stigetid
 - Pulsbredde (tid)
 - Tidsdifferanse mellom registrerte pulser.

¹ INV0065 er en inverter fra Marki Microwave. Bruk av INV0065 er eksplisitt oppgitt i spesifikasjonen/oppgaveteksten til bachelorprosjektet.

3 Analyse av problemet

Oppgavens hovedproblem er å teste målesystemet med en passiv pulsiverter fra Marki Microwave, og rapportere resultatene.

Sekundærproblemet til oppgaven er at invertere er kostbare², som gjør at bachelorprosjektet også skal utforske om det er mulig å (re)konstruere en pulsiverter til bruk i NOVO-prosjektet, samt undersøke andre mulige løsninger.

Som en del av analysen av problemene vil behovet for spesialiserte analyseverktøy høyst sannsynlig oppstå. Verktøyene går en da ut ifra vil være programvare-baserte.

3.1 Mulige utfall/løsninger

Resultatet av oppgaven kan deles inn i to utfall:

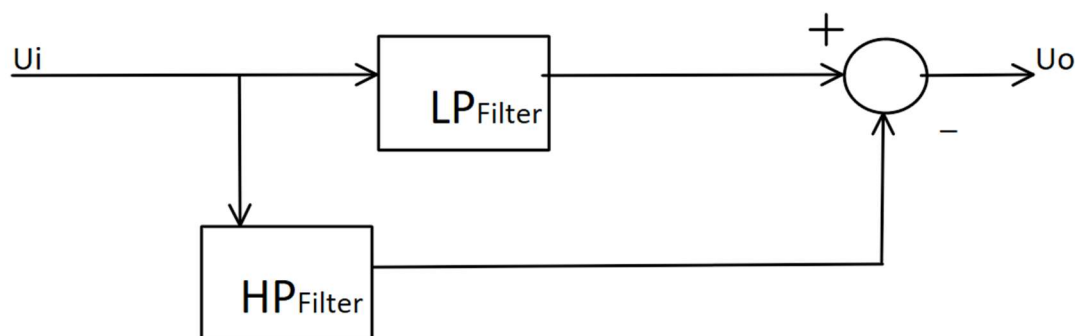
- Inverter endrer ikke målesystemet sin nøyaktighet betydelig
- Inverter endrer målesystemet sin nøyaktighet betydelig

For å utføre målinger må bachelorgruppa først gå til innkjøp av «like» pulsinvertere. Per oppgavens startdato har NOVO-prosjektet, og bachelorprosjektet, kun tilgang på ett eksemplar av pulsinvertieren INV0065 fra Marki Microwave. Man måtte dermed gå til innkjøp av pulsiverter(e) for testing.

3.1.1 Invertermodell

3.1.1.1 Primæridé for invertermodell

Oppdragsgivers postulat er at systemet ikke vil være betydelig påvirket av inverterene, og at inverterene vil slippe gjennom DC i tillegg til å invertere høyfrekvente signalkomponenter.

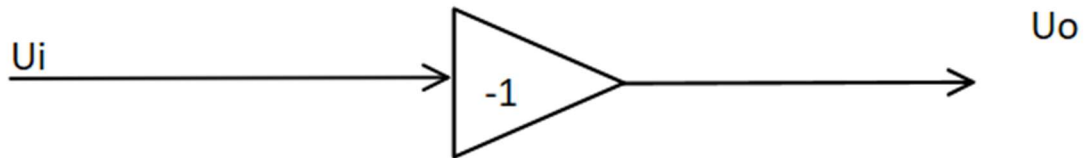


Figur 1: Prinsippskisse for inverterfunksjon. Primæridé.

3.1.1.2 Sekundæridé for invertermodell

Et sekundært postulat er at inverterene ikke inneholder en DC-vei, men består av en invers-koblet transformator som kun har i oppgave å invertere signalet.

² Pris på en inverter fra Marki Microwave kan variere mellom 6000 – 9000 NOK, om en regner om fra USD.



Figur 2: Prinsippskisse for inverterfunksjon (AC-vei). Sekundæridé.

3.1.2 Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter

3.1.2.1 SW verktøy

Grunnet at det er generelt få programverktøy som utfører arbeidet bachelorprosjektet trenger å gjøre, må bachelorgruppa lage disse verktøyene selv.

Som implementeringspråk ser Python lovende ut, grunnet lett tilgang til godt dokumenterte bibliotek brukt til vitenskapelige formål. Oppdragsgiver har også anbefalt bruk av Python grunnet programvedlikehold og multiplattformkompatibilitet.

Bachelorgruppa har videre tatt valget å bruke C# til utvikling av parserprogram for binære datafiler. Det statiske typesystemet i C# ble vurdert som et bedre alternativ enn Python sitt dynamiske typesystem til denne jobben, i tillegg til at C# program generelt er raskere å kjøre.

Foruten parseren er alle videre programverktøy utviklet i Python. Gruppen kom til konklusjonen at å ha parseren separat ikke ville hindre framgangen i arbeid, da parsing vil være en engangsoppgave per datasett, mens videre analyse vil bli en lengre prosess.

4 Målinger

4.1 Metode

4.1.1 Generelt målesystem

Det har blitt gjort repeterte målinger med samme oppsett og et smalt avvik i metode. De avvikende punktene vil bli forklart i nærmere detalj i eget avsnitt.

Som tidligere beskrevet består målesystemet primært av scintillasjonsstaver med en fotomultiplikator-rør på hver ende, markert PMT00 og PMT01, som videre er koblet til et DRS4-kort. DRS4-kortet digitaliserer signalet, som blir lagret som binær data via DRS4 spesifikk programvare på en tilkoblet datamaskin. I de målingene hvor inverter er benyttet, blir inverter koblet mellom fotomultiplikator-rør og DRS4-kortet.

Når målinger utføres, plasseres en ukollimert betastrålingskilde³ i en forhåndsbestemt posisjon langs scintillatoren som er markert med en målestokk fra -8 cm til 8 cm som markerer avstand fra senter av scintillatoren. Deretter lagres et bestemt antall bølgeformer som binærdata (normalt sett 10 000 bølgeformer for alle våre tester) før betakilden flyttes til en ny posisjon langs scintillatoren og prosessen starter på nytt.

4.1.1.1 Måling nr. 1: med/uten inverter

Første måling bestod av ett datasett med inverter og ett uten. Under opptak av begge datasettene var scintillatoren beskyttet mot bakgrunnsstråling med blyblokker. Kilden ble plassert på senterlinjen av scintillatoren og 10 000 bølgeformer ble samlet. Deretter ble en INV0065 inverter introdusert mellom fotomultiplikator-rør og DRS4-kortet, og nytt datasett ble samlet.

Videre ble samlet data konvertert til CSV-format ved hjelp av NovoParser-programmet (Appendiks C) og videre behandlet med NovoInspector-programmet (Appendiks D), som gruppen har produsert for å generere grafisk og numerisk visualisering av statistiske data. De overnevnte datasettene ble tatt opp i hovedsak for å analysere amplitude, stigetid og pulsbredde til registrerte pulser (Appendiks D , D.2 Om algoritmer) for å sammenligne datasett med inverter mot datasett uten inverter.

Sekundært ble datasettene brukt til å utvikle, teste og validere funksjoner for grafisk visualisering av statistiske data i NovoInspector.

Se Oppsett Måling 1: Med/uten inverter, side 36, for måleoppsett.

4.1.1.2 Måling nr. 2: koinsidens

I denne målingen ble det koblet opp to parallelle INV0026⁴ [6], en til hver fotomultiplikator-rør. Strontium-90 kilden ble plassert langs scintillatoren med aktiv side posisjonert på senterlinjen av røret, og et datasett ble samlet (Se Appendiks G). Deretter ble kilden flyttet 2 cm i retning mot PMT00 og nytt datasett ble samlet inn.

³ Strontium-90 ($t_{1/2} = 28,79$ a) \rightarrow Yttrium-90 ($t_{1/2} = 64$ h) \rightarrow Zirconium-90 [11]

⁴ INV0026 ble brukt som en erstatning for INV0065. Båndbredden til INV0026 er mindre enn den for INV0065, men frekvenskomponentene til de registrerte bølgeformene ligger innenfor båndbredden til begge inverterene. Dette er grunnlaget for bruk av INV0026.

Etter innsamling ble datasett, i likhet med måling nr.1 (4.1.1.1), behandlet med NovoParser og NovoInspector for grafisk og numerisk representasjon. Data samlet inn for posisjonene, 0 cm (senter på scintillatoren), +2 cm, +4 cm, +6 cm og +8 cm, der avstanden til en «posisjon» refererer til relativ distanse fra senter på scintillatoren. Hensikten med målingen var koinsidensanalyse med og uten inverter. Når kilden har forskjellig avstand fra PMT00 og PMT01 vil det være en tidsdifferanse mellom bølgeformene, og analysen vil da avdekke om inversjon av bølgeformen påvirker denne tidsdifferansen.

I tillegg er det en forskjell i kabellengde i datasettet med invertere kontra settet uten. Da kobling av inverter krever et ekstra sett med kabler mellom inverter og ADC, og de eneste tilgjengelige kablene hadde en lengde på 2 meter, er det mulig at dette kan påvirke målinger av absolutt tid, men forsøket er ment å måle tidsdifferanser. Kortere kabelsett ble forsøkt anskaffet, men var dessverre ikke mulig innen gitte tidsrammer. Denne målingen ble ikke beskyttet mot bakgrunnsstråling, noe som kan påvirke målingen.

4.1.1.3 Sekundærmålinger

Foruten de overnevnte målingene ble det tatt opp flere målinger i forkant av oppgavens start. Disse datasettene ble brukt til å utvikle programvaren.

4.1.2 Pulsinverter

For å kunne utelukke en av idéene for hypotetisk puls inverter, ble INV0065 inverteren utsatt for enkle motstandsmålinger mellom inngang og «jord», mellom utgang og «jord» og mellom inngang og utgang, med multimeter⁵. Forsøk på å gjøre tilsvarende målinger for kapasitans og induktans ble gjort, men ingen resultat ble oppnådd.

4.2 Resultater

4.2.1.1 Målesystem

For de følgende måleresultatene vil de mest essensielle figurene og statistikkutskriftene bli inkludert i selve teksten. Resterende visualiseringer og utskrifter vil legges ved i Appendiks F, Appendiks G og Appendiks H.

4.2.1.2 Måling 1: med/uten inverter

Etter behandling gjennom NovoInspector blir det fastslått at det er en lesbar forskjell mellom gjennomsnitt av alle data. Datasettet uten inverter viser i gjennomsnitt en stigetid på 3,5 ns, amplitude på 243 mV og pulsbredde på 21,3 ns. Datasettet med inverter viser en gjennomsnittlig stigetid på 3,2 ns, amplitude på 221 mV og 20,6 ns pulsbredde. Se Appendiks F for fullstendige tabeller slik de ble rapportert av NovoInspector.

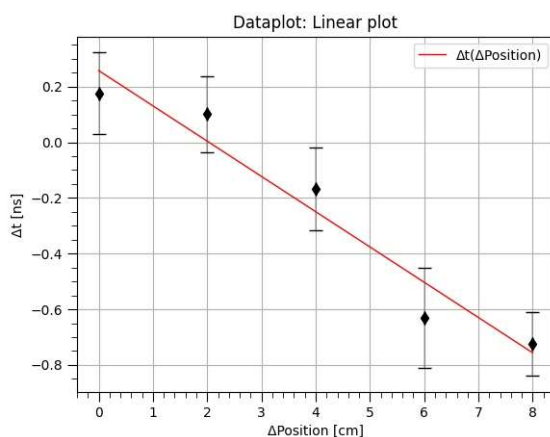
Tabell 1

	Stigetid (1σ)	Amplitude (1σ)	Pulsbredde (1σ)
Uten inverter	$3,5 \pm 0,2$ ns	243 ± 1 mV	$21,3 \pm 0,3$ ns
Med inverter	$3,2 \pm 0,2$ ns	221 ± 1 mV	$20,6 \pm 0,2$ ns

⁵ Multimeterne brukt til målingene hadde egen innebygd modus for kapasitans- og induktansmåling. Et problem som oppstod under måling av kapasitans og induktans, var at testsignalet til multimeterne var i området av 100 Hz. Denne verdien ligger langt under oppgitt funksjonelt område for inverteren.

4.2.1.3 Måling 2: koincidens

Vist i Figur 3 er et grafisk plot som illustrerer tidsdifferansen mellom bølgetoppene i 2 parallelle inverterte kanaler. Ved måling med og uten inverter er kanalene koblet likt: ergo begge kanalene er enten koblet med eller uten inverter. Vi kan se i plottet at differansen følger nesten et lineært mønster

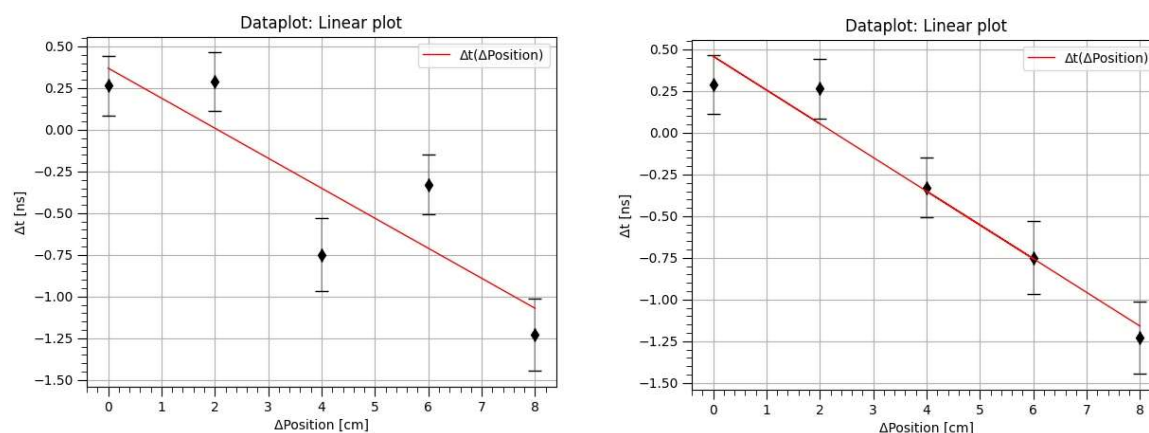


Figur 3: Koincidensplot. Målesystem med inverter

ved at tidsdifferansen øker forutsigbart med avstand fra senter, men det er små avvik fra senterlinjen som trolig skyldes menneskelig feil ved posisjonering av kilden langs målestokken på scintillatoren.

Videre i Figur 4 vises et plot av identisk natur for datasett uten inverter. Her ser vi et mønster som avviker fra det forventede, ved at tidsstempel i bølgeformene for "senter" har større differanse en målingene for +2 cm mot PMT00. Det samme gjelder +4 cm og +6 cm. NovolInspector ble startet på nytt med posisjoner for datasettene for senter og +2 cm, og +4 cm og +6 cm, byttet om.

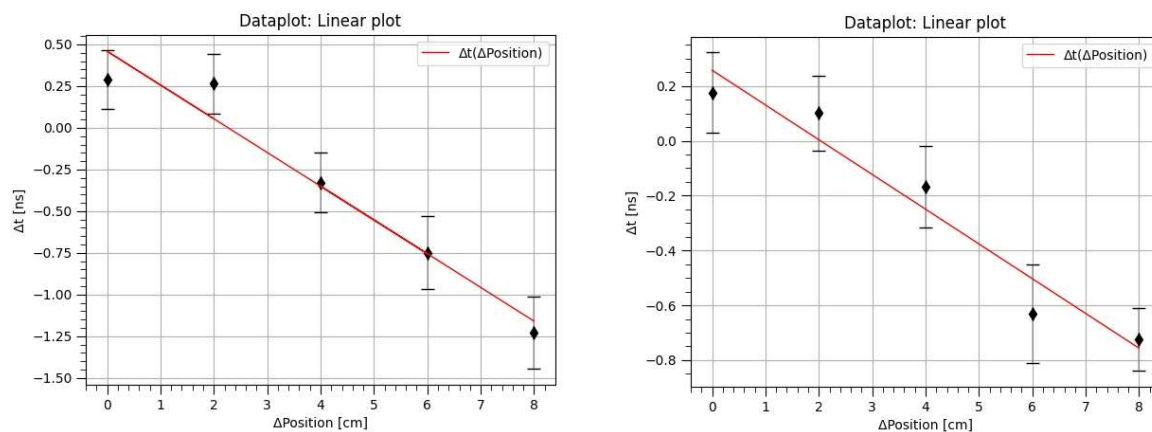
Vist i Figur 4 er det nye resultatet ved siden av det originale som er tilnærmet identisk til Figur 3. Dette leder til en hypotese at det irregulære resultatet skyldes en feil i navngiving/håndtering av datasett, men begge resultatene blir tatt med i utforming av konklusjon, da årsaken for det uventede resultatet kan skyldes støy fra kosmisk bakgrunnsstråling og lys⁶.



Figur 4: Sammenligning av datasett uten korreksjon (venstre) og datasett med korreksjon (høyre)

⁶ Feil i håndteringen av datasett under innsamling er tilsynelatende mer sannsynlig. «Forfatterne» ønsker ikke å ta stilling til dette.

Når en setter koincidensplottene til datasettene med inverter ved siden av datasettene uten inverter Figur 5, ser en at om det konkluderes med at det irregulære resultatet sett i Figur 4 kun er en feil i rekkefølgen av datasett, er de to grafene vist i Figur 5 tilsvarende hverandre. De forskjellene som kan observeres (Figur 5)⁷, er at tidsdifferansen øker mer i det inverterte datasettet enn i det ikke inverterte



Figur 5: Sammenligning av koincidensdata for målesystem med invertere (høyre) og målesystem uten invertere (venstre)

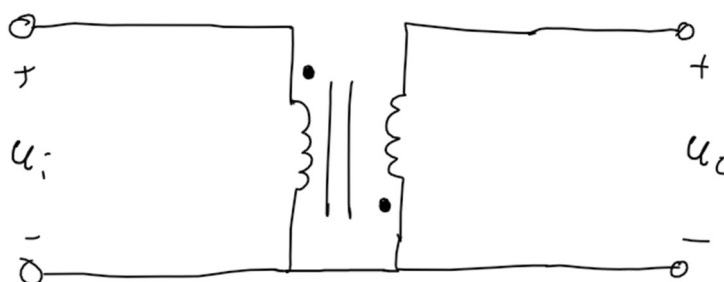
ettersom avstanden fra senter øker. Se Appendiks G for data slik det ble rapportert av NovoInspector.

4.2.2 Pulsinverter

4.2.2.1 Hypotetisk modell

Kortslutninger ble målt mellom terminalene, som gjør at vi kan konkludere med at ingen DC-vei eksisterer i inverteren og «Primæridé for invertermodell» kan forkastes til fordel for en hypotetisk modell med høyfrekvent transformator med inverskoblet sekundærvikling. Grunnlaget for inverskoblet sekundærvikling, er at da strømmretningen i sekundærviklingen er vinkelrett på magnetfeltet fra primærspolen og følger 'høyrehånds-regelen', vil en snudd spole føre til en negativ strømmretning.

På bakgrunn av dette funnet ble hypotetisk modell i Figur 6 utformet.

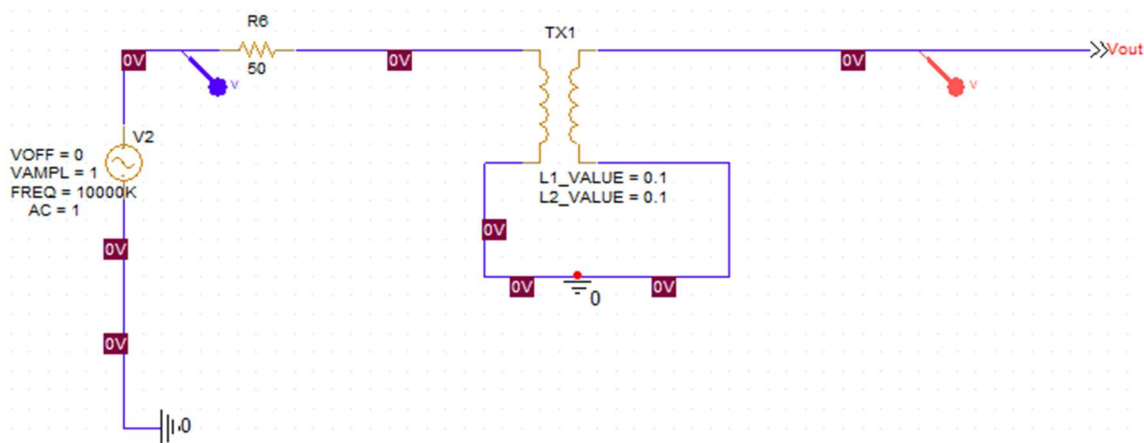


Figur 6: Grunnleggende hypotetisk modell for inverter

4.2.2.2 Eksperimentell verifikasjon av modell

⁷ Se Figur 15 for å se sammenhengene i Figur 5 i samme diagram

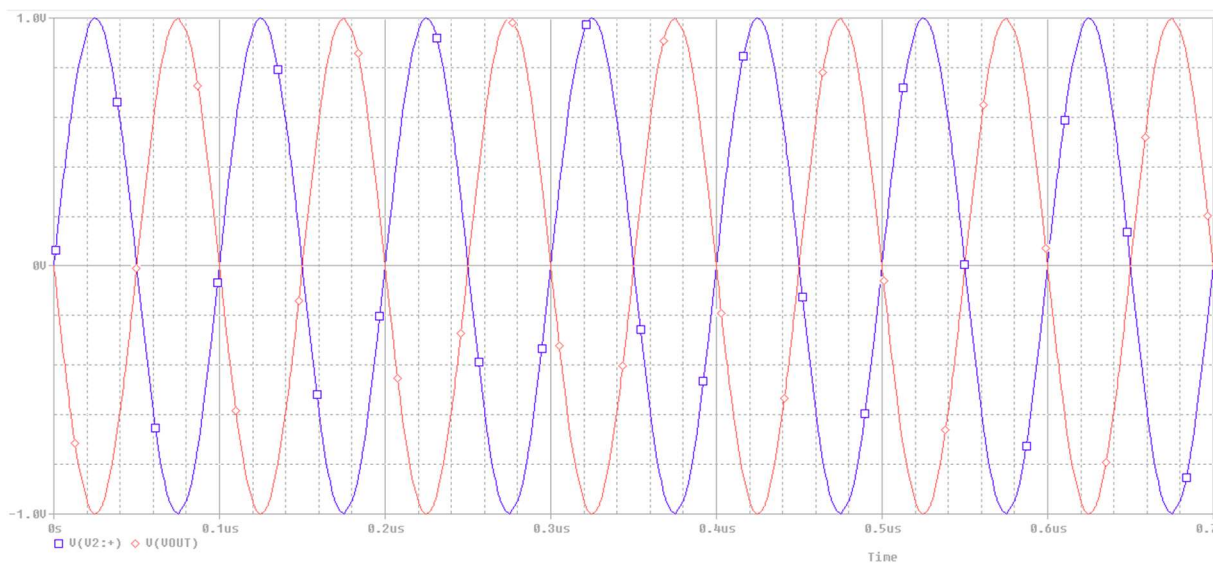
For å verifisere den hypotetiske modellen beskrevet i 4.2.2.1, ble en modell konstruert i OrCAD [7] som vist i Figur 7. Her er det satt opp en sinusbølgegenerator (V2) med en spenning på ± 1 V og frekvens på 10 MHz i serie med en 50Ω resistans (R6) for å simulere resistans i ledere. Videre i kretsen er det koblet en transformator (TX1) med -1 i forsterkning og induktans på 0.1 H for begge viklingene/spolene, som deretter er koblet til utgang V_{out} . To prober er koblet på hver side av kretsen, en mellom resistans og V2 og en på sekundærside av TX1.



Figur 7: Kretsmodell i simulasjonsprogram

Videre ble det kjørt en simulering for å observere om systemet gir forvrengning i signal eller nevneverdig demping. Denne simuleringen viste ett utgangssignal lik -1 av inngangssignal, og den hypotetiske modellen går dermed videre til prototype stadiet.

Det ble etterpå konstruert en eksperimentell prototype-inverter. Grunnet mangel på maskineri til konstruksjon av spolevikling, ble spolene viklet manuelt. Det blir dokumentert senere (5.3 Hypotetisk invertermodell) at denne metoden var tilstrekkelig for pulsinvasjon i 10 MHz området, men gitt at frekvensrespons til transformator avhenger av transformatorens geometri [8], og at spolene var

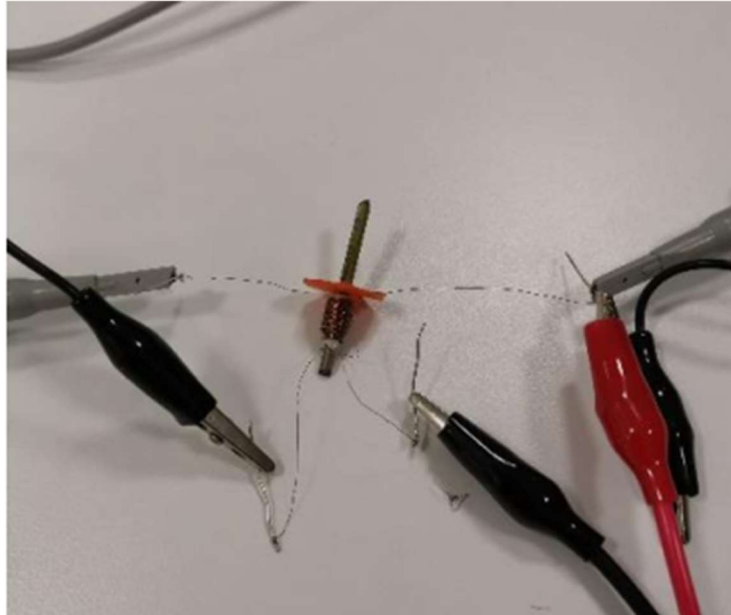


Figur 8: Simulasjonsresultat

viklet manuelt, manglet prototypen presisjonen nødvendig for tilfredsstillende frekvensrespons.

Konstruksjon:

Prototypen ble konstruert etter hypotetisk kretsmodell vist i Figur 6 med materialene en hadde tilgjengelig. Innkjøp av komponenter til prototypen ble diskutert, men grunnet tidspress og tilgangsmangel gikk en ikke videre med dette.



Figur 9: Foto av eksperimentelt måleoppsett og en av de første prototype-inverterene

Inverterprototypen er bygget opp av en Ø3 mm kjerne av lakkert jern, mid-grad polymer støtte, og papirskille mellom spolene. Isolert kobbertråd med Ø0.05 mm benyttet til spolevikling er resirkulert fra elektromagneten i et bilrelé.

Det ble beregnet en induktans på ca. 108 µH basert på antall viklinger samt spolens og trådens diameter. Formel og verdier er vist i Formel 1. Noe usikkerhet må antas grunnet menneskelig feil.

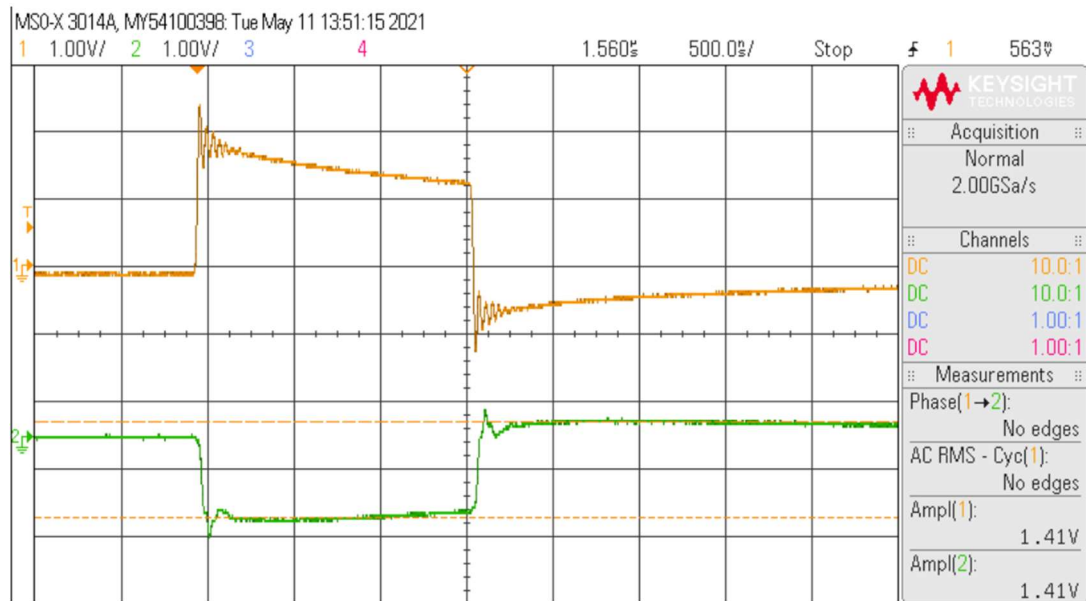
$$L = \frac{0.8(R^2 \times N^2)}{6R + 9l + 10D}$$

*L = induktans
R = Radius = 2mm
l = lengde = 11mm
N = viklinger = 200
D = Dybde = 0.75mm*

Formel 1: Formel og verdier brukt til induktansestimering [10]. L er oppgitt i µH.

Test:

Prototypen ble testet med et pulstog med firkantpuls⁸ på 1.5V med varierende bredde, og gav resultat vist i skjermdump fra oscilloskop (Figur 10).



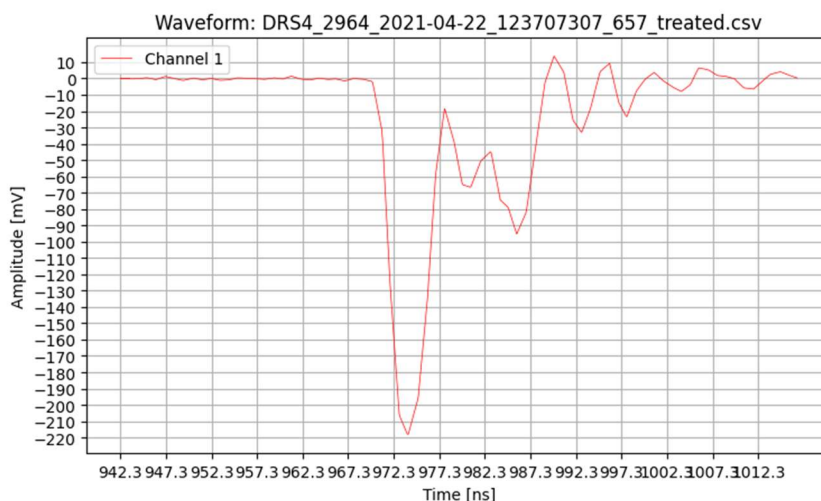
Figur 10: Oscilloskopskjermdump. Kanal 1 (oransje) er inngangssignal, og kanal 2 (grønn) er utgangssignal

⁸ Firkantpulsene hadde frekvens på 10 Hz. Bredden på pulsen var mellom 10 – 2000 ns under testing.

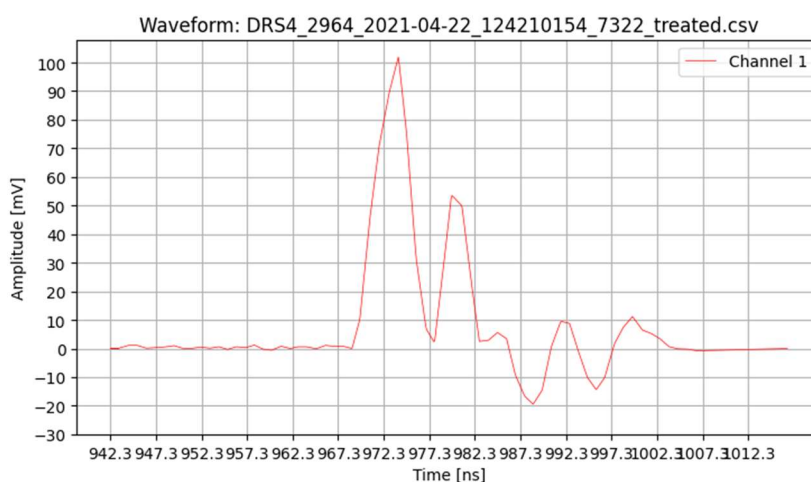
5 Analyse av målinger

5.1 Påvirkning av inverterer

Isolert sett ser vi kun amplitudereduksjon gjennom inverteren. I Tabell 1 ser man at alle resultat, med unntak av «Amplitude», overlapper om et konfidensnivå på 3 σ blir benyttet.



Figur 11: Eksempel på typisk bølgeform observert av DRS4 kortet. Ikke invertert.



Figur 12: Eksempel på typisk bølgeform observert av DRS4 kortet. Invertert.

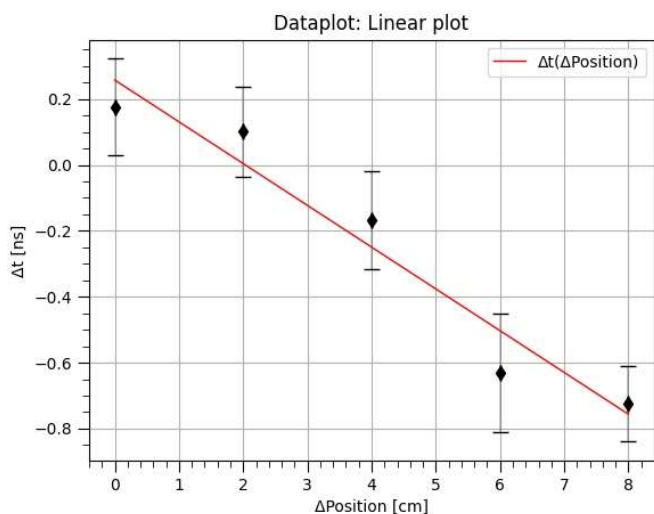
Forvrengningen av et typisk signal er tilsynelatende minimal, som kan observeres i Figur 11 og Figur 12. Datasett med registrerte bølgeformer for inverterens inn- og utgang, for å observere faktisk påvirkning av en bølgeform, har dessverre ikke blitt samlet inn, slik at det kun er mulig å sjekke om gjennomsnittsformen⁹ til bølgeformene er ulike. Resultat av manuell inspeksjon av tilfeldige

⁹ NovolInspector fra versjon 2.1.x har en algoritme for å konstruere gjennomsnittsbølgeformen. Et problem med implementasjonen i V2.1.x er at algoritmen brukt har tidskompleksitet $O(k^2nm^2)$ (k: antall bølgeformer, n: antall kanaler per bølgeform, m: antall punktprøver per kanal). Et forsøk på å kjøre algoritmen ble startet 28.05.2021 og avbrutt 30.05.2021. Nytt forsøk ble startet 30.05.2021 kl. 21:30 med mer lagringseffektivt datasett og har i skrivende stund (01.06.2021 12:07:13) ikke terminert. Det er dermed uvisst om algoritmen faktisk utfører det tiltenkte arbeidet.

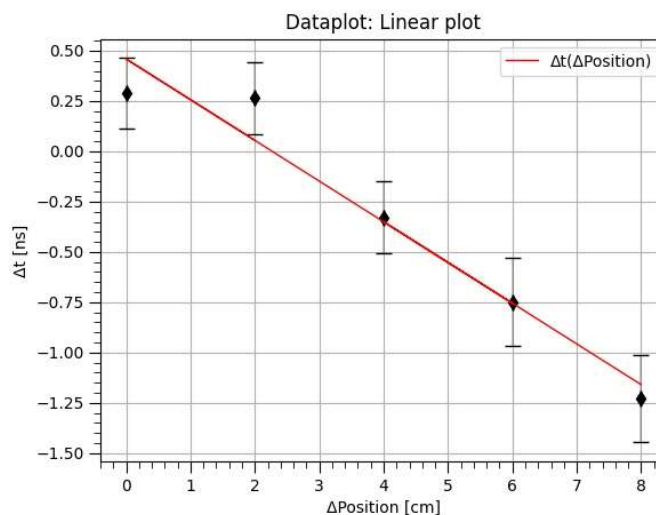
bølgeformer gir ikke grunnlag til påstand om betydelig forvrengning, som videre bygges opp med at bachelorgruppa kan hevde statistisk likhet mellom datasettene, om vi ser vekk fra et tap i pulsamplituden. Se Appendiks F for histogram fra datasettene.

5.2 Påvirkning på målesystem

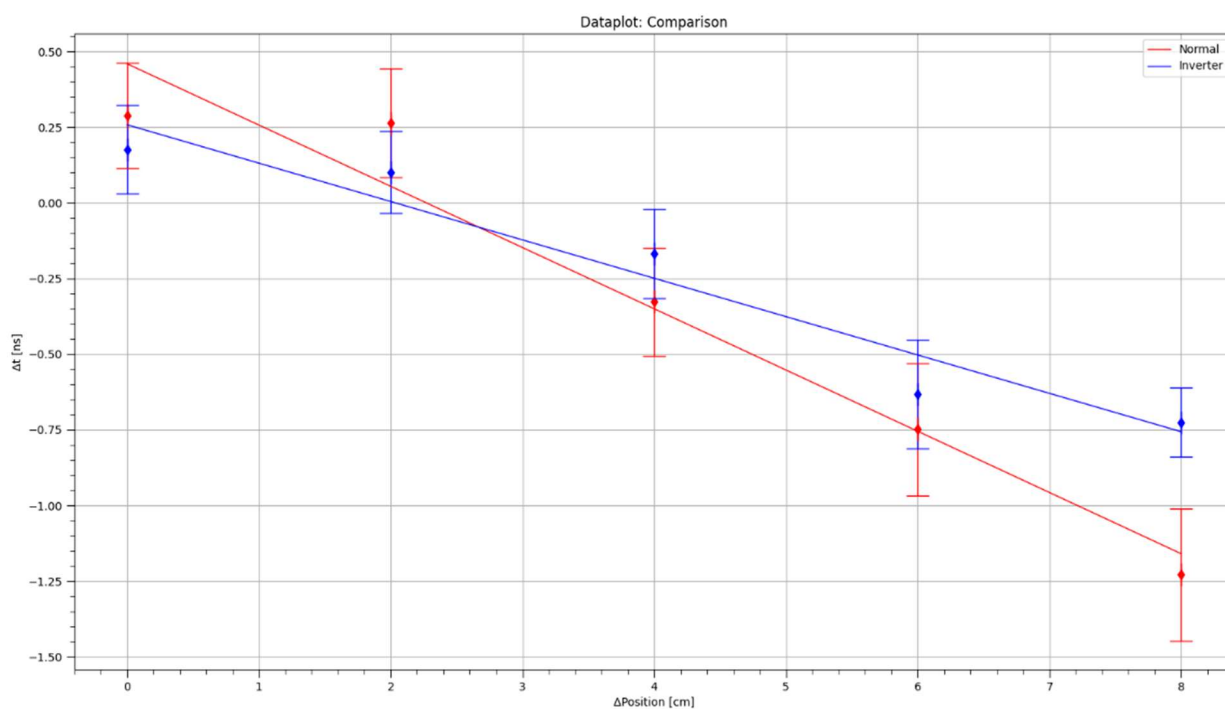
Konsidensmålingene med ukollimert strålekilde gir lignende resultat, som kan observeres i Figur 13 og Figur 14.



Figur 13: Lineær sammenheng mellom forskyvning av betakilde langs scintillator og tidsdifferanse mellom pulsdeteksjon. Målesystem med inverter.



Figur 14: Lineær sammenheng mellom forskyvning av betakilde langs scintillator og tidsdifferanse mellom pulsdeteksjon. Målesystem uten inverter.



Figur 15: Sammenligning av lineære sammenhenger.

Ved å tegne grafene i samme diagram (Figur 15) kan en lettere observere ulikhetene. Her kan man se myke overlapping ved et konfidensnivå på 1 σ . Ved 3 σ vil resultatene være tilnærmet statistisk like.

Noe av forskjellene observert i Figur 15 kan komme av det faktum at betakilden brukt til forsøkene er ukollimert.

5.3 Hypotetisk invertermodell

Der er eksperimentelt bevist at den hypotetiske modellen fungerer i praksis. Ytelsen til den eksperimentelle inverteren er ulik ytelsen til inverteren fra Marki Microwave. Se Figur 17 for detaljer.

Det er tydelig at prototypen ikke håndterer pulser i det nødvendige frekvensområdet, men som vist i Figur 10, fungerer prototypen godt nok som et bevis på konseptet. For at inverter skal kunne operere i tiltenkt frekvensområde, må den ferromagnetiske kjernen og spolene ha perfekt geometri og riktig induktans. I tillegg er det en sannsynlighet for at jordingssystemet til kretsen inneholder imperfeksjoner som fører til signal lekkasje mellom spolene. Dette kan også forklare resultatene gitt i figur 15, ved at signalet slipper gjennom og i tillegg skaper resonans i systemet.

Det avdekkes etter nærmere etterforskning at inverterens frekvensområde avhenger av antall viklinger, arealet til kjernen, maksimal flukstetthet til kjernematerialet og spenningen over primærviklingen, i tillegg til geometri. I dette tilfellet er det brukt en jernkjerne med 100 viklinger og radius på 2 mm.

Etter Faradays lov [9, p. 960] (B = flukstetthet, V =volt, A = tverrsnitt areal, N = antall viklinger, f = frekvens) med 1,5 V og 200 MHz vises det at kjernen har en fluks-tetthet på ca. 0,9498 μT , som rett og slett kan være for lavt for prosjektets formål, da vi ser at flukstettheten synker med økende frekvens.

Punktene over etterlater oss med 2 mulige problemer: Signallekkasje og for lav magnetisk fluks.

Formel 2: Faraday

Faradays lov

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

U = spenning

N = antall viklinger

Φ = fluxtetthet

$$\begin{aligned} &= -N \frac{d}{dt} (\Phi \cos(\omega t)) \\ &= -N\Phi(-\omega) \sin(\omega t) \\ &= 2\pi f N \Phi \sin(\omega t) \end{aligned}$$

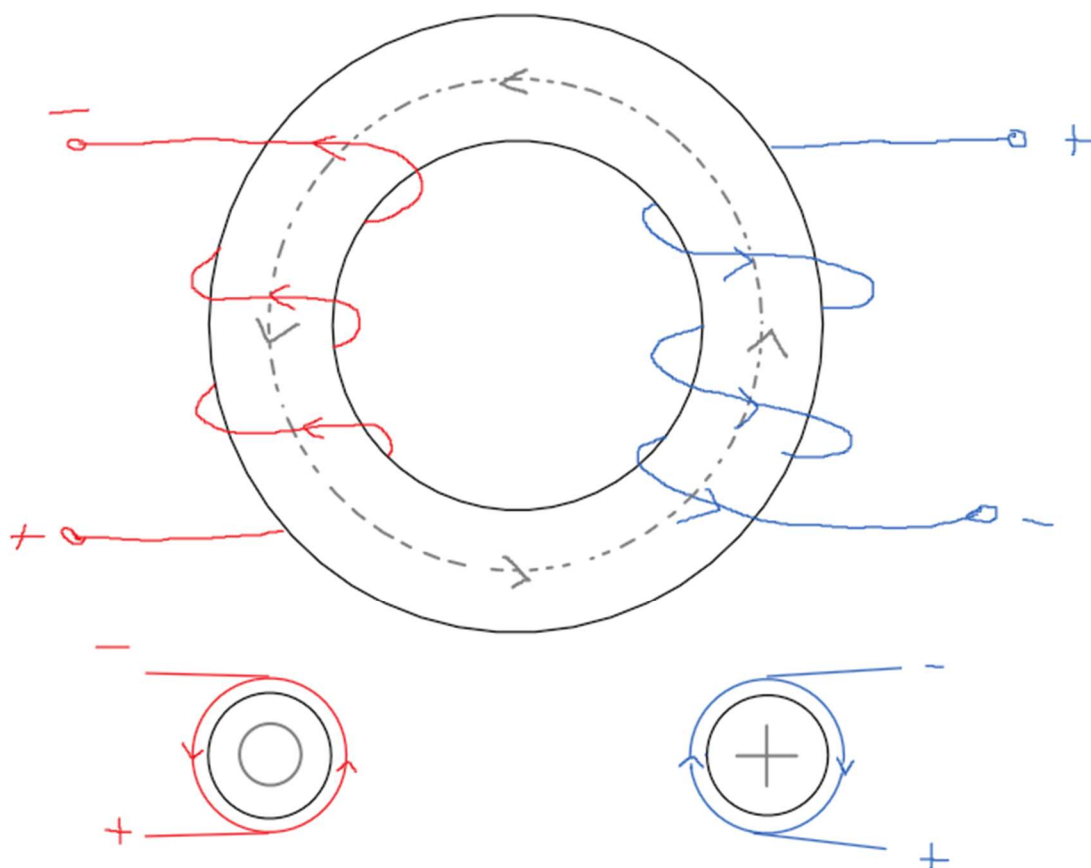
ved $U_{peak} \Rightarrow$

$$\begin{aligned} U_{peak} &= 2\pi f N \Phi \\ &= 2\pi f N B A \end{aligned}$$

A = tverrsnitt areal

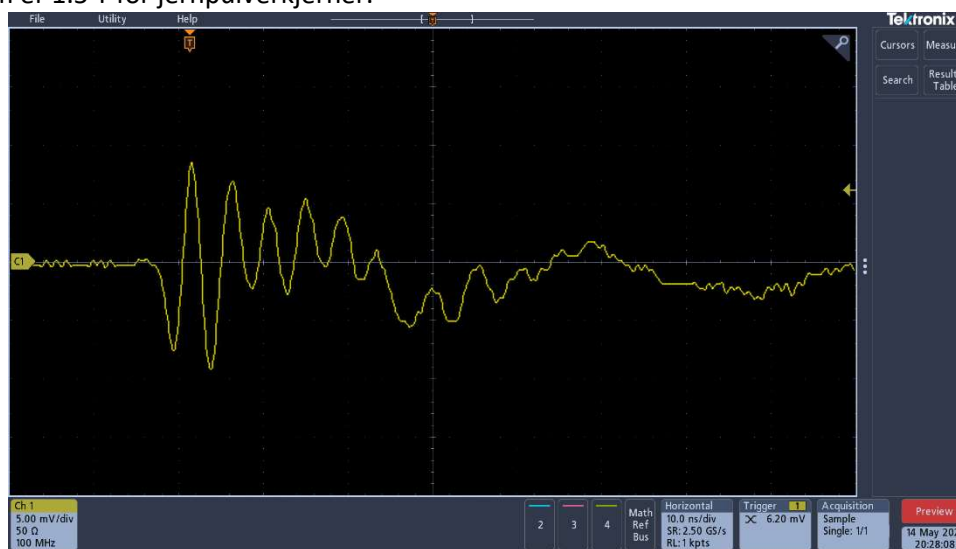
B = magnetisk flux

$$B = \frac{U_{peak}}{2\pi f N A}, \quad \Phi = \frac{U_{peak}}{2\pi f N}$$



Figur 16: Toroidtrafo

For å korrigere de tidligere nevnte problemene, må det sørges for liten resistans mellom spolene og jordpotensial i kabel, da det spekuleres at høyere resistans mellom spolenes jording og ekte jord enn mellom selve spolene kan ha oppstått i prototype nr. 3, og det må sørges for at kjernearealet og antallet viklinger er lavt nok. Det ønskes en flukstetthet så nærme B_{\max} til det brukte materialet som mulig, som er 1.5 T for jernpulverkjerner.



Figur 17: Oscilloskopskjermdump. Test av prototype-inverter med målesystemet

Det er tydelig fra Faradays lov at for å opprettholde styrken til magnetfeltet fra primærspolen når frekvensen økes, må arealet til spolen eller antall viklinger reduseres. En toroid spolekjerne vil tilrettelegge for å senke tverrsnittarealet betraktelig, men likevel gi plass til et tilstrekkelig antall viklinger. I tillegg, vil en toroidkjerne ha en geometri som begrenser flukstap. Se artikkel «Analysis and design of toroidal transformers» fra IRJET [10].

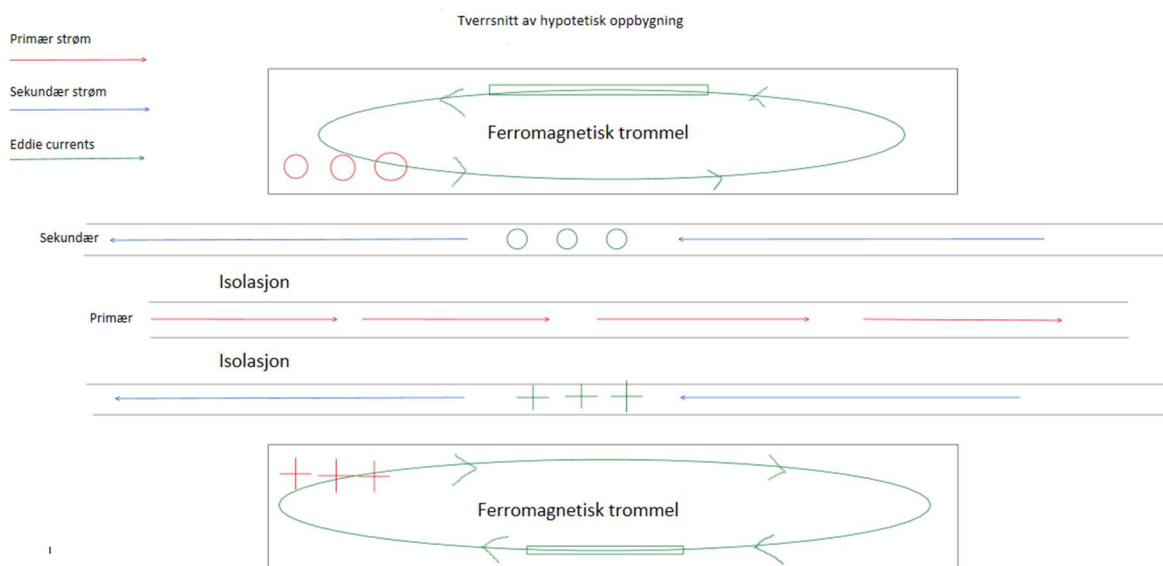
I Figur 16 ser vi en visualisering av en toroidkjerne med primær- og sekundærviklinger som illustrerer strømretning i forhold til retning til magnetfelt.

Formel 3

$$B = \frac{U_{peak}}{2\pi f} * \frac{1}{N A}$$

Om en ser tilbake til Faradays lov, ser en at den kan deles opp i Formel 3 hvor man ser at magnetfeltet styrkes når produktet av antall viklinger og arealet til kjernen er lavere enn 1. Dette medfører dessverre enten et ekstremt lavt antall viklinger, eller et kjerneareal tilnærmet lik null. Med en kjerne radius på 0,5 mm og 15 viklinger produseres en flukstetthet på 101,32 μT som ansees som det maksimale en kan oppnå før kjernens integritet blir satt på spill.

INV0065 ble videre demontert etter klarsignal fra veileder (Se Appendiks E , E.2 Destruert inverter, for bilder av resultatet), hvor det ble oppdaget at dette fenomenet er arbeidet rundt ved å kun ha en primærleder og en sekundærleder, hvor sekundærlederen ligger som et kobberrør rundt primærlederen. Disse er isolert fra hverandre. Lederne ligger gjennom en ferromagnetisk trommel av solid materiale. Inversjon er da tenkt å være skapt av eddiestrømmer i den ferromagnetiske trommelen rundt lederne, ved at magnetfeltet til primærlederen skaper eddiestrømmer i trommelen, som skaper et motgående magnetfelt som der etter inducerer en strøm i sekundærlederen (Figur 18). Det er mulig at flere magnetiske kjerner er brukt for å kansellere ut uønskede magnetfelt. Dette er en ikke-utforsket hypotese.



Figur 18: Hypotetisk oppbygning av inverter.

Å konstruere en inverter på denne måten vil være tid- og resurskrevende, og antageligvis mer kostbar enn å benytte de kommersielle inverterne fra Marki Microwave. På en annen side er det hypotetisk mulig at en inverter konstruert som beskrevet tidligere kan utfylle oppgaven i NOVO-prosjektet.

6 Konklusjon

Det kommer frem etter dataanalyse at Marki Microwave puls-inverter INV0026 påvirker målesystemet i liten nok grad til at det kan ansees som en tilstrekkelig løsning på problemet med DRS4-kortet. Uansett er komponentene veldig kostbare, som gav motivasjon til å undersøke inverterens konstruksjon i håp om å kunne konstruere en skreddersydd komponent til NOVO-prosjektet.

Prototypeinverteren dokumentert i oppgaven fungerer som konseptbevis for invertere som består av en transformator med innerskoblet sekundærvikling, og med denne informasjonen er det mulig å produsere en mer økonomisk modell til prosjektet.

For å konstruere en inverter til bruk i MHz området, eller høyere, er en løsning en toroid ferrittkjerne. Det ble spekulert om det var dette som observeres i senter av INV0026 og INV0065 grunnet formen på de interne komponentene og frekvensområdet til inverterene. Spekulasjonen ble senere avkreftet (Se Appendiks E , E.2 Destruert inverter). Ferritt som materiale vil sørge for optimal fluks-link og uniformt magnetfelt ved høye frekvenser. Toroidkjerner er mest optimale for høyfrekvenstransformatorer grunnet den uniforme geometrien de introduserer.

Det konkluderes da at det er to fornuftige løsninger på problemet:

1. fortsette bruk av INV0026
2. konstruere skreddersydd inverter.

Likevel vil innsamling av større datasett med kollimert strålekilde være anbefalt som videre slagplan for begge løsningene. Dette er for å bedre kunne fastslå påvirkningen invertere har på målesystemet.

Referanser

- [1] HVL, «Om Høgskulen på Vestlandet,» 20 Februar 2021. [Internett]. Available: <https://www.hvl.no/om/>. [Funnet 23 Mai 2021].
- [2] HVL, «Nøkkeltal for HVL,» 8 Mars 2021. [Internett]. Available: <https://www.hvl.no/om/nokkeltal/>. [Funnet 23 Mai 2021].
- [3] K. S. Ytre-Hauge, K. Skjerdal, J. Mattingly og I. Meric, «A Monte Carlo feasibility study for neutron based real-time range verification in proton therapy,» *Scientific Reports*, p. 9, 9 Oktober 2019.
- [4] Paul Scherrer Institut, «DRS4,» 9 Juli 2009. [Internett]. Available: https://www.psi.ch/sites/default/files/import/drs/DocumentationEN/DRS4_rev09.pdf. [Funnet 29 Mai 2021].
- [5] Marki Microwave, «INV0065.pdf,» April 2019. [Internett]. Available: <https://www.markimicrowave.com/Assets/datasheets/INV0065.pdf?v=040519>. [Funnet 28 Mai 2021].
- [6] Marki Microwave, «INV0026.pdf,» April 2019. [Internett]. Available: <https://www.markimicrowave.com/Assets/datasheets/INV0026.pdf?v=040519>. [Funnet 28 Mai 2021].
- [7] Wikipedia, «OrCAD,» 19 April 2021. [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/OrCAD>. [Funnet 29 Mai 2021].
- [8] E. Bjerkan, «High frequency modeling of power transformers: Stresses and Diagnostics,» NTNU, Trondheim, 2005.
- [9] Z. Sears, University Physics volum 2, 13. utgave.
- [10] International Research Journal of Engineering and Technology, «Analysis and Design of Toroidal Transformer,» April 2018. [Internett]. Available: https://www.homemade-circuits.com/wp-content/uploads/2021/04/toroidal-transformer_compressed.pdf. [Funnet 28 Mai 2021].
- [11] Amer Radio Relay League, The ARRL Handbook for Radio Communications 2017, Amer Radio Relay League, 2016.
- [12] Wikipedia, «Strontium-90,» 1 April 2021. [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Strontium-90>. [Funnet 30 Mai 2021].

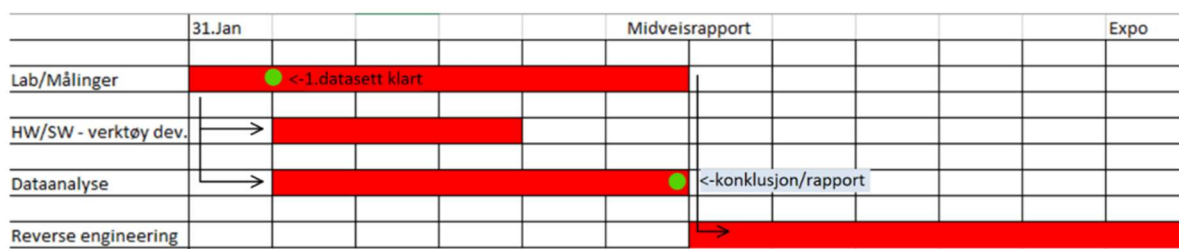
Appendiks A Forkortelser og ordforklaringer

ADC	Analog to Digital Converter
DRS4	Domino Ring Sampler version 4
HVL	Høgskulen på Vestlandet
NOVO	Neutron and gamma-ray imaging for real-time range verification and image guidance in particle therapy
PMT	Photo Multiplier Tube. Fotomultiplikator-rør

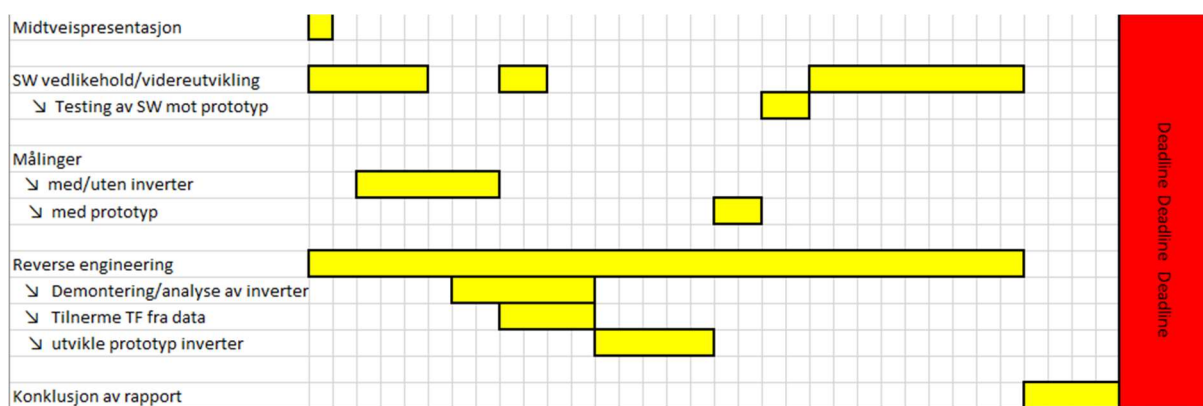
Appendiks B Om arbeidsfordeling

B.1 Kort om prosjektfaser og generelt om arbeidsfordeling

«Prosjektfasene» kommer av den todelt tidsplanen utarbeidet i forstudien av oppgaven. Den opprinnelige planen forutsatte at all programvare skulle være ferdig i løpet av første prosjektfase, men etter hvert som at graden av kompleksitet i programvaren økte, måtte flere arbeidstimer allokere til dette formålet. Resultatet av denne beslutningen er at programvareutviklingen strekker seg ut i andre prosjektfase, samtidig som at flere eksperimentale forsøk på spesialisert programvare oppstår. Disse blir senere konsolidert til å bli Novoinpector (Appendiks D). Øvrig har resten av tidsplanen blitt fulgt som planlagt, så lenge at poster som var avhengige av leveranse av innkjøpte komponenter ikke ble forsinket.



Figur 19: Gantt diagram for generell prosjektidsplan. Utarbeidet i forstudie.



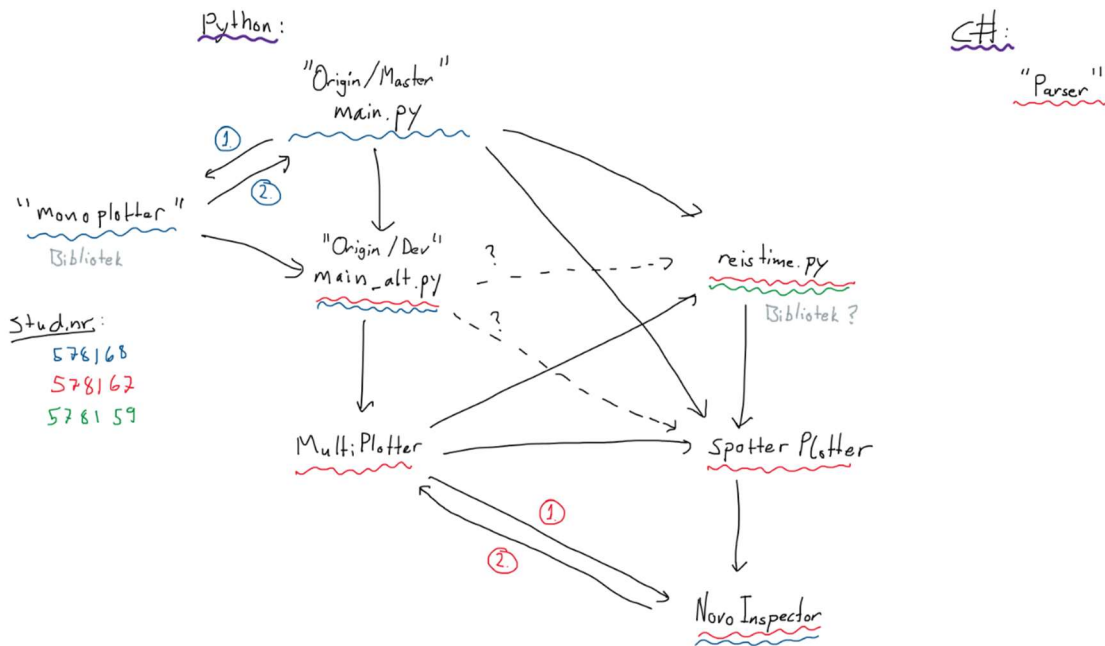
Figur 20: Gantt diagram for tidsplan til fase 2. Utarbeidet ved starten av fase 2.

Arbeidsfordelingsmodellen brukt i gruppen baserer seg på «ansvar». Ansvar for en bestemt arbeidsoppgave blir tildelt med grunnlag i enkeltperson sine ferdigheter og tilgjengelige arbeidskraft. «Ansvaret» gir rett til å diktere/overstyre beslutninger for gitt arbeidsoppgave. Gruppemedlemmer uten «ansvar» plikter å stille med arbeidskraft dersom situasjonen tilsier det, slik at en oppnår dynamisk fordeling av arbeidskraft. I praksis fungerer dette slik at en hjelper andre gruppe-medlem dersom en har tid selv.

B.2 Programvare

Ansvar for programvareutvikling var todelt i første fase av prosjektet. Danielsen hadde ansvar for utvikling i Python og Bø hadde ansvar for utvikling i C#. Etter hvert som at programmene oppnådde tiltenkt funksjonalitet, ble det mulig å gjennomføre kollaborasjoner, som fører til at rollene innen

programvareutvikling endrer seg i andre fase av prosjektet. Bø får ansvaret for utvikling av NovoInspector og vedlikehold/utvikling av NovoParser (Appendiks C).



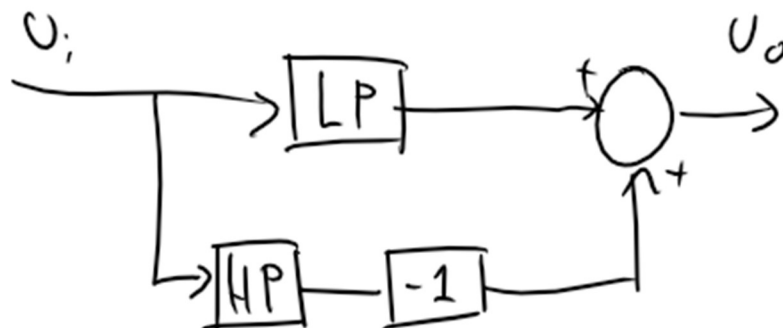
Figur 21: "Slektstre" for programvare. Viser "arv" mellom hovedprogram, og hvem som hadde hovedansvaret for program.

B.3 Praktisk arbeid

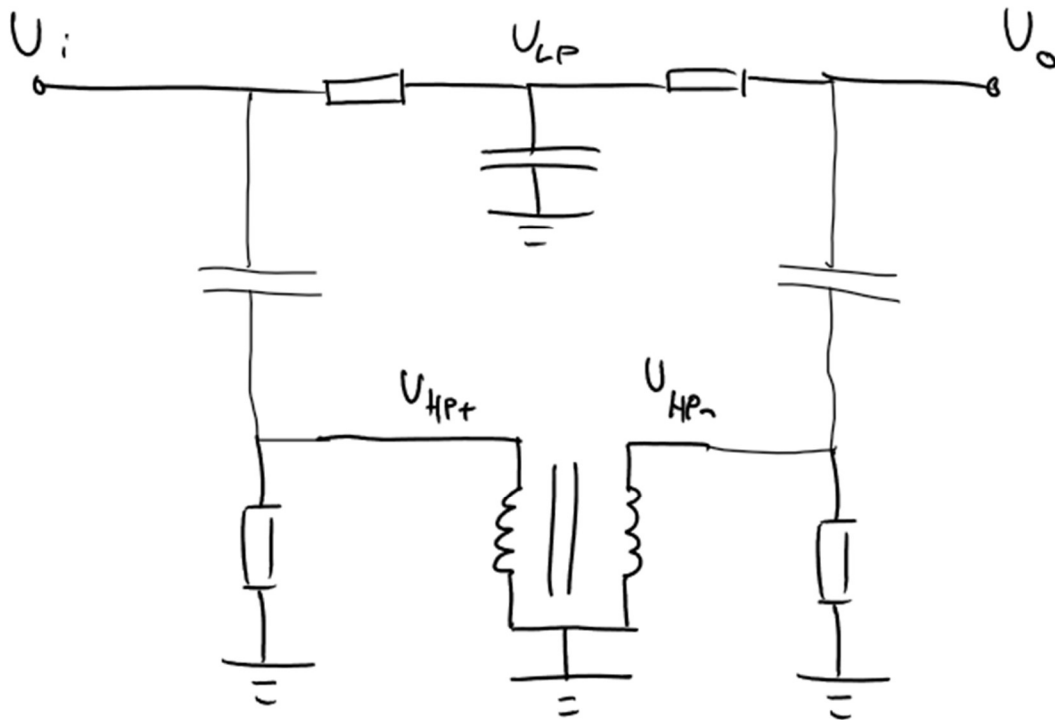
Praktisk arbeid startet i andre fase av prosjektet. Danielsen fikk hovedansvaret for dette arbeidet av praktiske grunner.

B.4 Teoretisk arbeid

Teoretiske modeller ble utformet i både første og andre fase av prosjektet. I første fase ble ansvar for fordelt til Bø. I andre fase ble ansvaret overført til Danielsen.



Figur 22: Tidlig prinsippskisse for inverterfunksjon. Er grunnlaget for Figur 1 i 3.1.1.1.



Figur 23: Siste modell basert på Figur 1 i 3.1.1.1. Ble forkastet.

B.5 Håndtering av innkjøp og budsjett

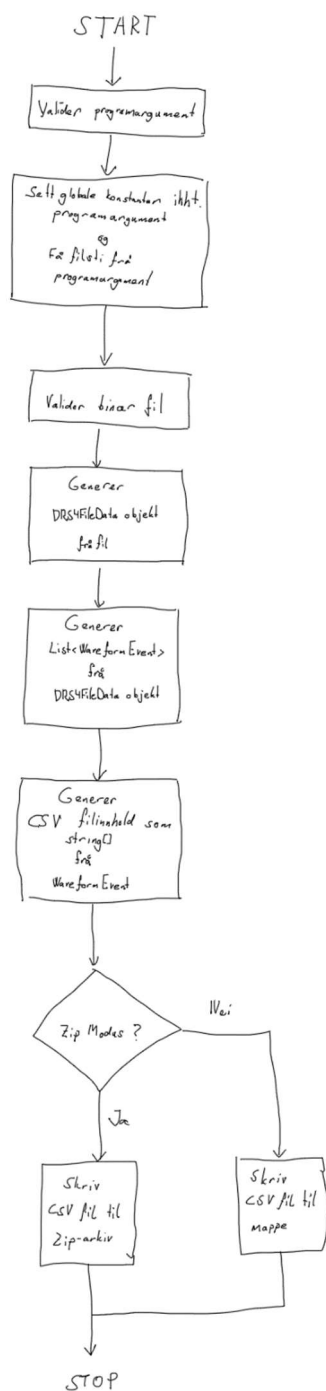
Økonomisk ansvar ble delegert til Lee i første fase av prosjektet. Dette har ikke endret seg siden ansvaret først ble delegert.

Appendiks C NovoParser

C.1 Om programmet

NovoParser er ett program som oversetter binære datafiler fra DRS4 kortet, til CSV-regneark. Etter behov ble funksjonalitet utvidet, slik at Zip-arkiv med CSV-regneark blir generert.

C.2 Flytskjema



Figur 24: NovoParser. Forenklet flytskjema.

Appendiks D NovolInspector

D.1 Om programmet

NovolInspector er et analyse- og visualiseringsverktøy skrevet i Python til bruk i denne oppgaven. Programmet bruker data generert av NovoParser (Appendiks C) til analyse.

D.2 Om algoritmer

Algoritmene brukt i NovolInspector bruker relative terskler for å beregne analytiske størrelser. Størrelser som stigetid er definert med relative terskler, som gir påskudd for å bruke denne typen terskel i NovolInspector i stedet for statiske terskler. Algoritmene til å finne tidsstempeler til relative

```
def findTime(timeVector, valueVector, relativeThreshold):
    if len(timeVector) != len(valueVector):
        return 0
    else:
        signal_absMax = max([abs(item) for item in valueVector])
        amp = relativeThreshold * signal_absMax
        t = 0
        for i in range(1, len(valueVector)):
            if valueVector[i - 1] <= amp < valueVector[i]:
                t = (amp - valueVector[i - 1]) * (timeVector[i] - timeVector[i - 1]) / (valueVector[i] - valueVector[i - 1]) + timeVector[i - 1]
                break
            if valueVector[i] < -amp <= valueVector[i - 1]:
                t = (-amp - valueVector[i - 1]) * (timeVector[i] - timeVector[i - 1]) / (valueVector[i] - valueVector[i - 1]) + timeVector[i - 1]
                break
        return t

def findTimeReverse(timeVector, valueVector, relativeThreshold):
    if len(timeVector) != len(valueVector):
        return 0
    else:
        signal_absMax = max(abs(valueVector))
        amp = relativeThreshold * signal_absMax
        t = 0
        for i in range(len(valueVector) - 1, 0, -1):
            if valueVector[i - 1] <= amp < valueVector[i]:
                t = (amp - valueVector[i - 1]) * (timeVector[i] - timeVector[i - 1]) / (valueVector[i] - valueVector[i - 1]) + timeVector[i - 1]
                break
            if valueVector[i] < -amp <= valueVector[i - 1]:
                t = (-amp - valueVector[i - 1]) * (timeVector[i] - timeVector[i - 1]) / (valueVector[i] - valueVector[i - 1]) + timeVector[i - 1]
                break
        return t
```

Figur 26: Algoritmer for tidsstempel.

```
def Statistics(data):
    mu_hat = sum(data) / len(data)
    S = math.sqrt(sum([math.pow(element - mu_hat, 2) for element in data]) / ((len(data) + 1) * len(data)))
    return mu_hat, S
```

Figur 25: Algoritme for statistiske beregninger. Er basert på estimatorer for normalfordeling

terskler går gjennom alle punktprøver, fra starten eller slutten på en bølgeform, fram til den finner et par med punktprøver som kan brukes til å interpolere verdien til tidsstempellet.

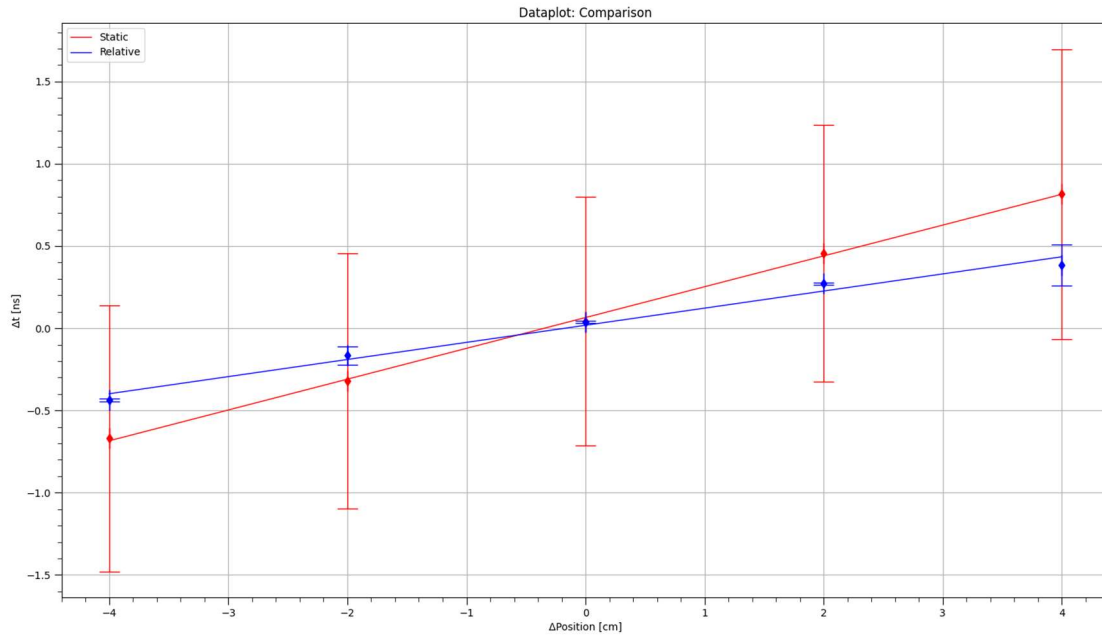
Da en bruker relative terskler på et diskretisert *kontinuerlig* signal, skal det alltid være mulig å finne minst ett tidsstempel for en gitt relativ terskel. Algoritmer basert på statisk terskel vil ikke gi riktig resultat om signalet ikke krysser terskelen (med god margin).

Pulsbredde blir definert som tidsdifferansen mellom første og siste tidsstempel for en terskel på 10% av maksimal amplitude.

Stigetid blir definert som tidsdifferansen mellom det første tidsstempellet for en terskel på 10% av maksimal amplitude, og det første tidsstempellet for en terskel på 90% av maksimal amplitude.

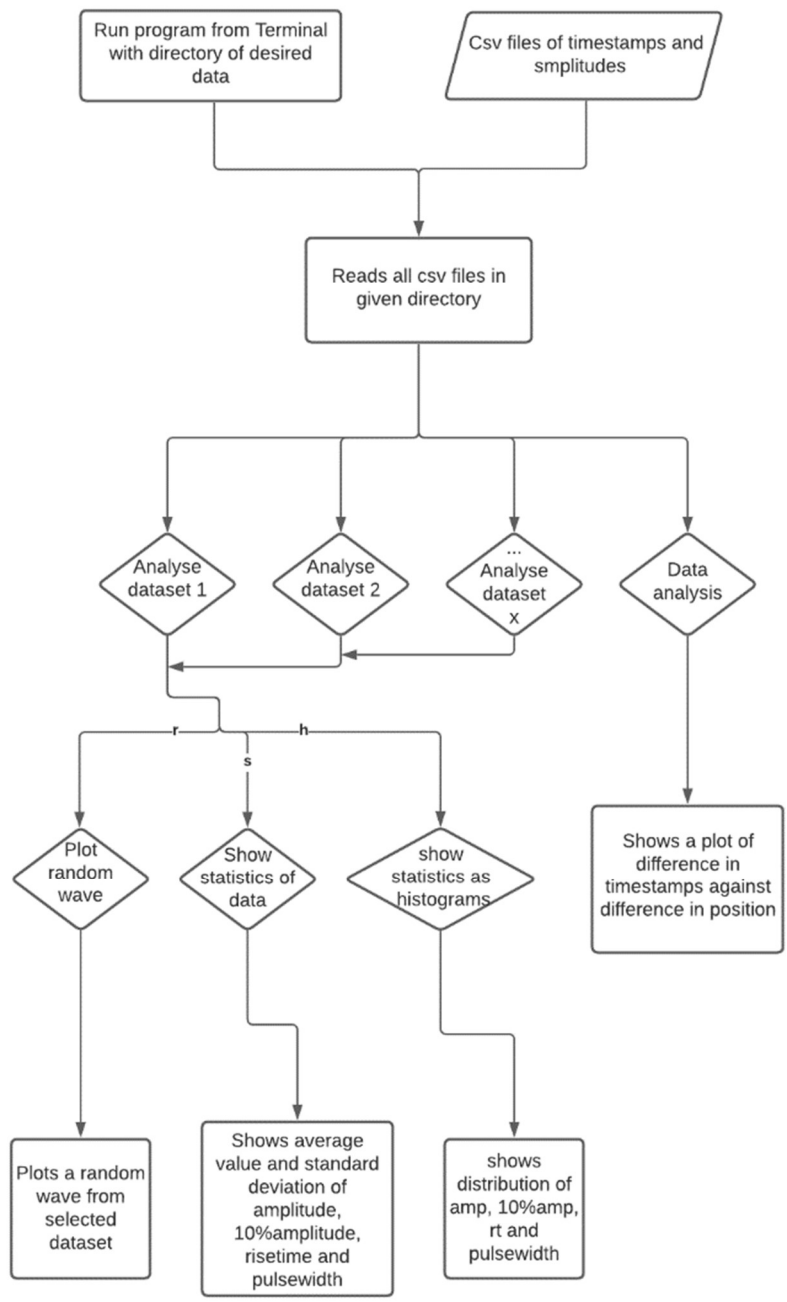
Tidsdifferanse mellom kanaler blir definert som tidsdifferansen til første tidsstempel for 10% av maksimal amplitude for hver kanal. NovolInspector regner kun ut denne størrelsen for de to første

kolonnene med kanaldata for hver CSV-fil generert av NovoParser, dersom det er tilstrekkelig med kolonner med kanaldata.



Figur 27: Diagram med lineære sammenhenger beregnet relative terskler (blå) og statiske terskler (rød). Basert på koinsidensdatasett fra 22. – 23. februar 2021.

D.3 Flytskjema



Appendiks E Fotografi av oppsett og komponenter

E.1 Demontert inverter

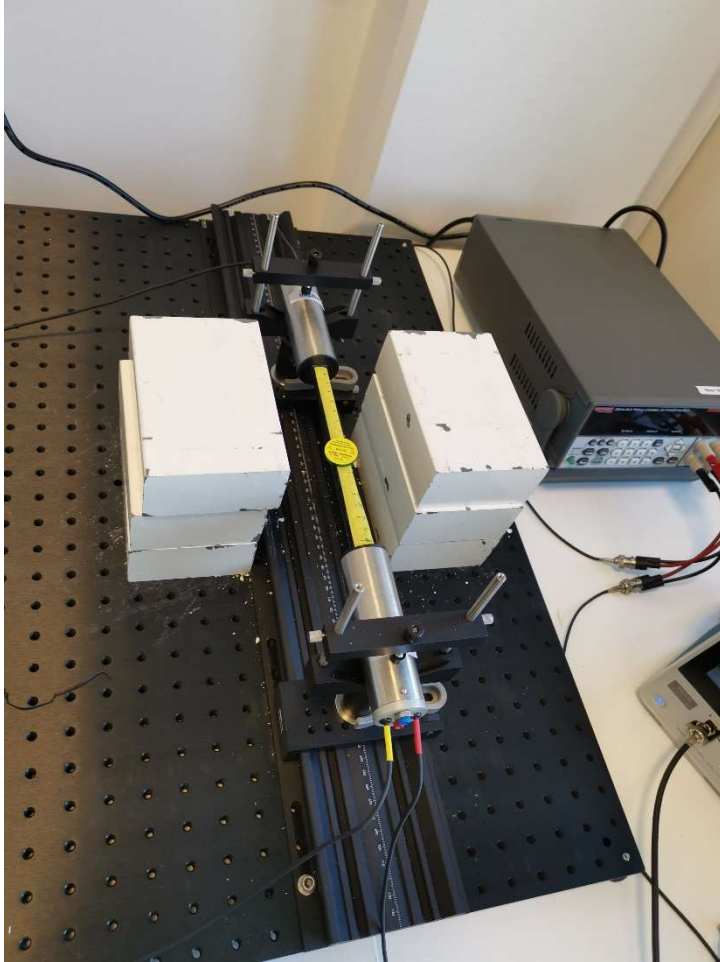


E.2 Destruert inverter

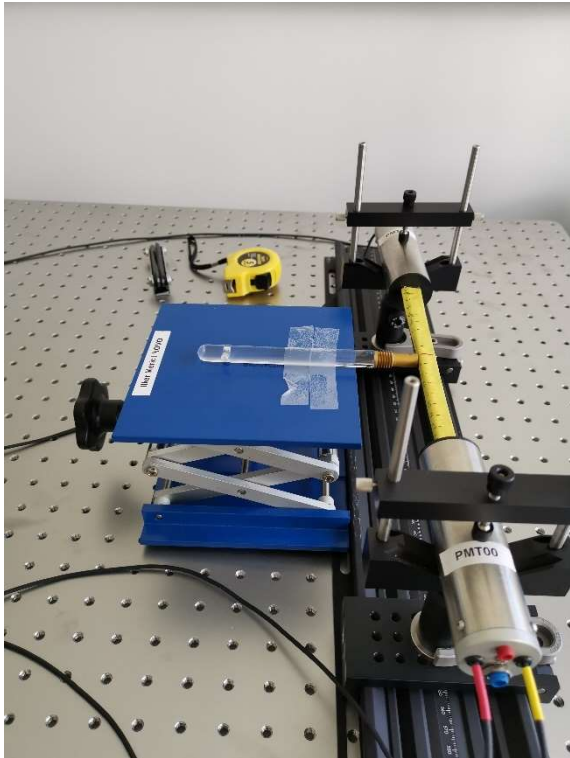
Forsøk på videre demontering av INV0065 resulterte i permanent tap av funksjon. Resultatet av dette er at påstand om bruk av tradisjonell toriodkjerne i inverteren kan avkreftes.



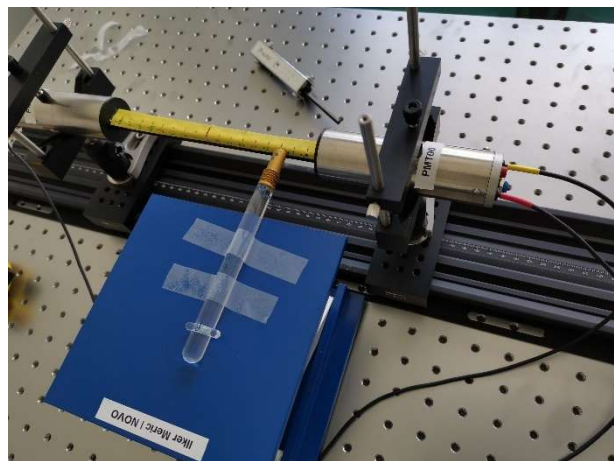
E.3 Oppsett Måling 1: Med/uten inverter



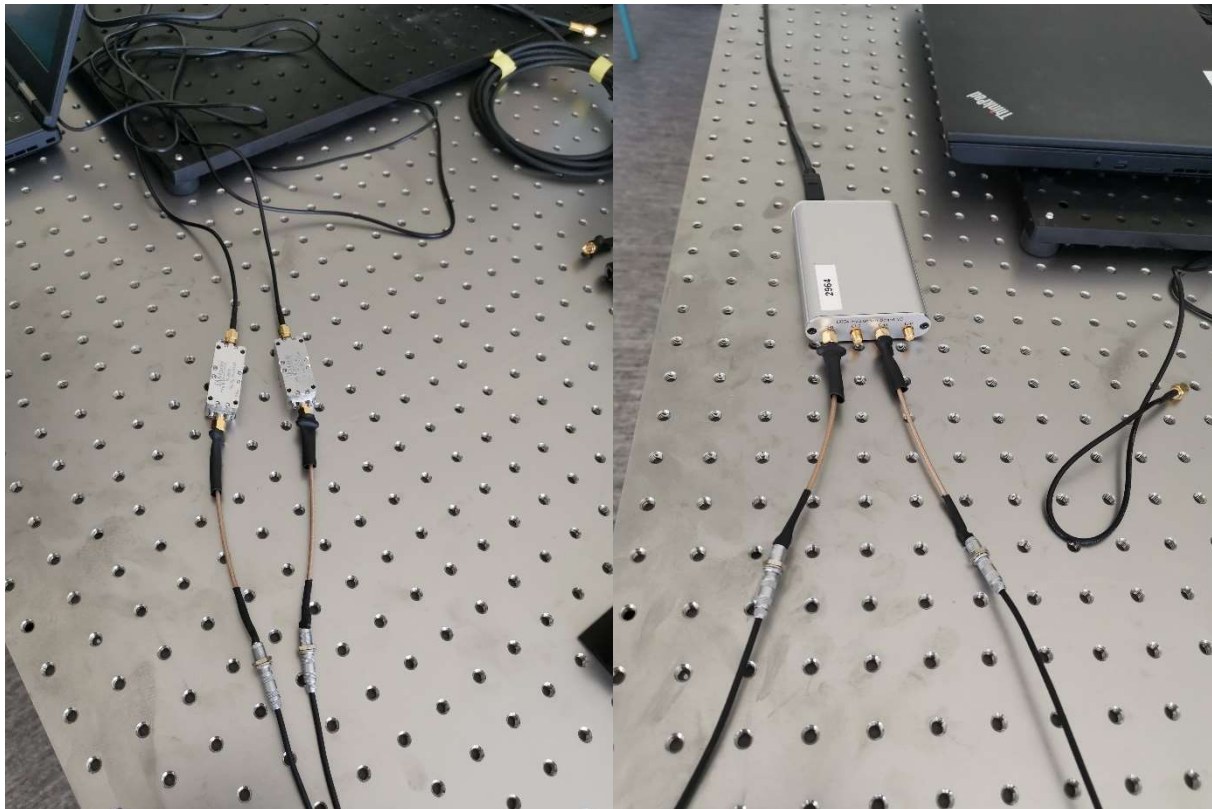
E.4 Oppsett Måling 2: Koinsidens



Figur 30: Oppsett for koinsidens med kilde i senter av scitillasjonsrør

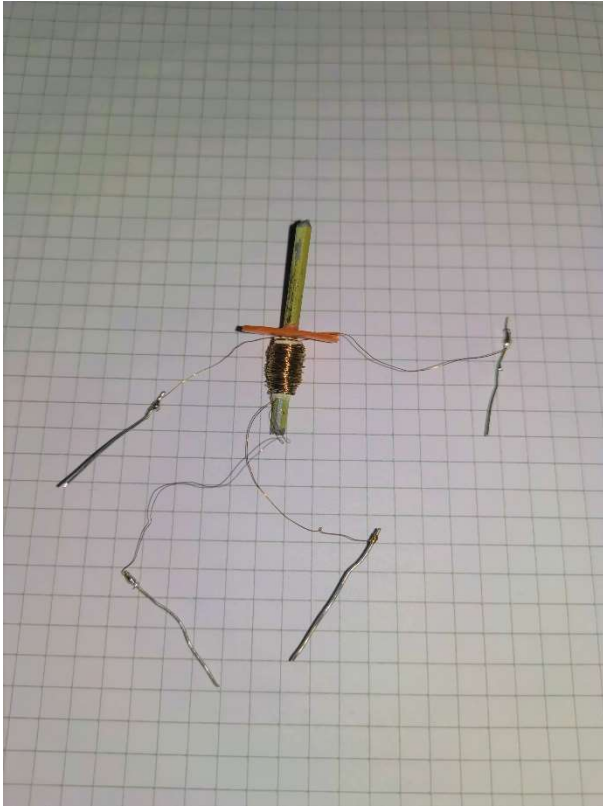


Figur 29: Oppsett for koinsidens med kilde plassert 6 cm fra sentermerket i retning mot PMT00



Figur 28: Oppkobling av 2 INV026(venstre) og DRS4(høyre)

E.5 Prototyp inverterere:



Figur 32: Prototype nr. 1



Figur 33: Prototype nr. 2



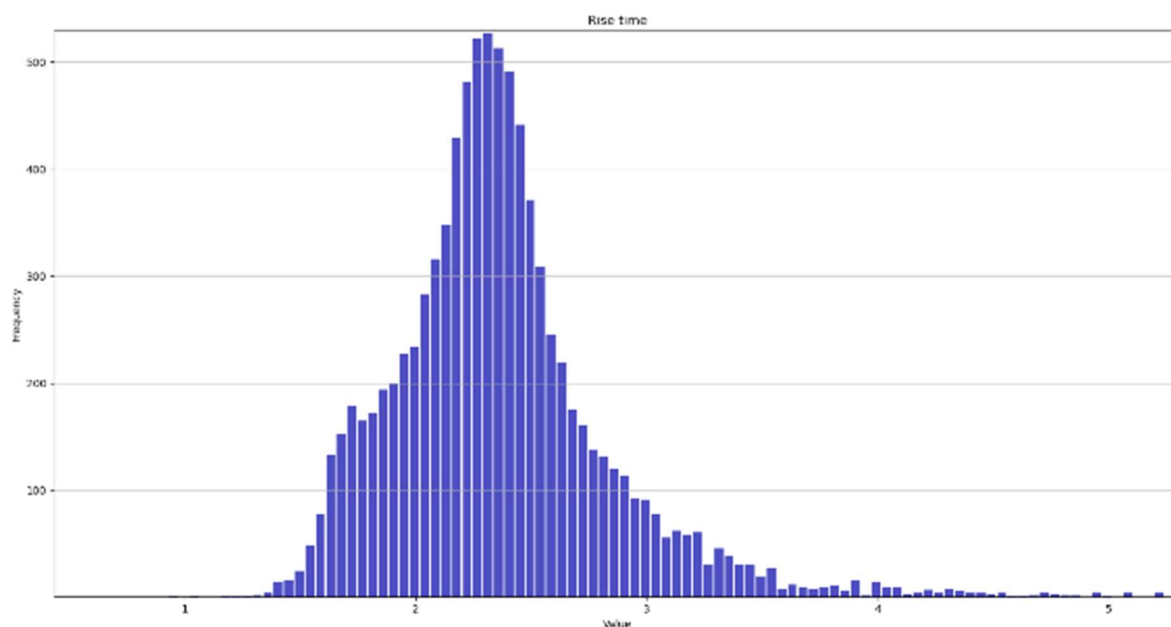
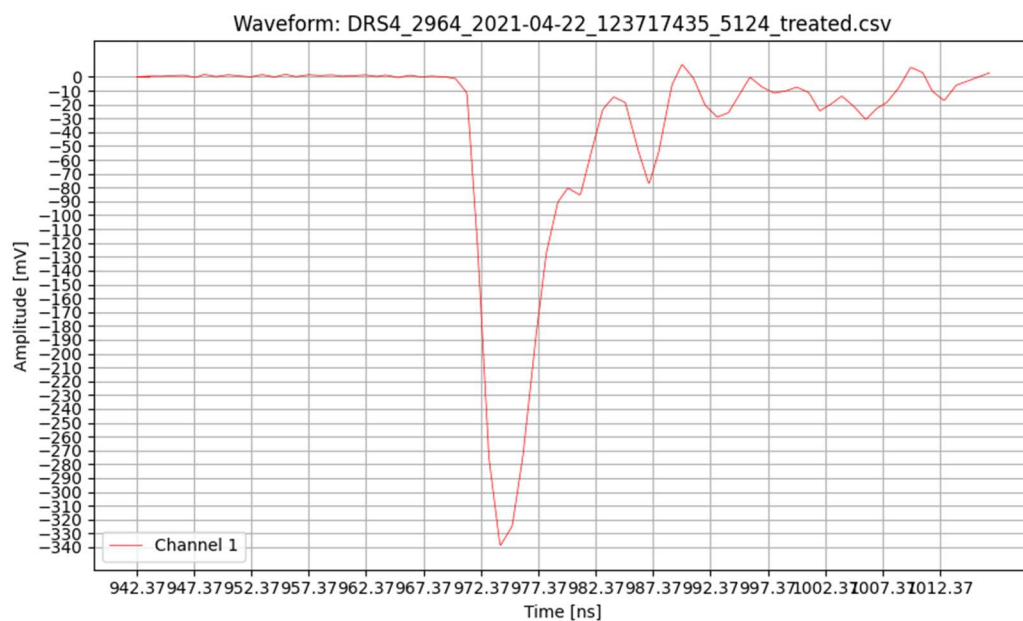
Figur 31: Prototype nr. 3

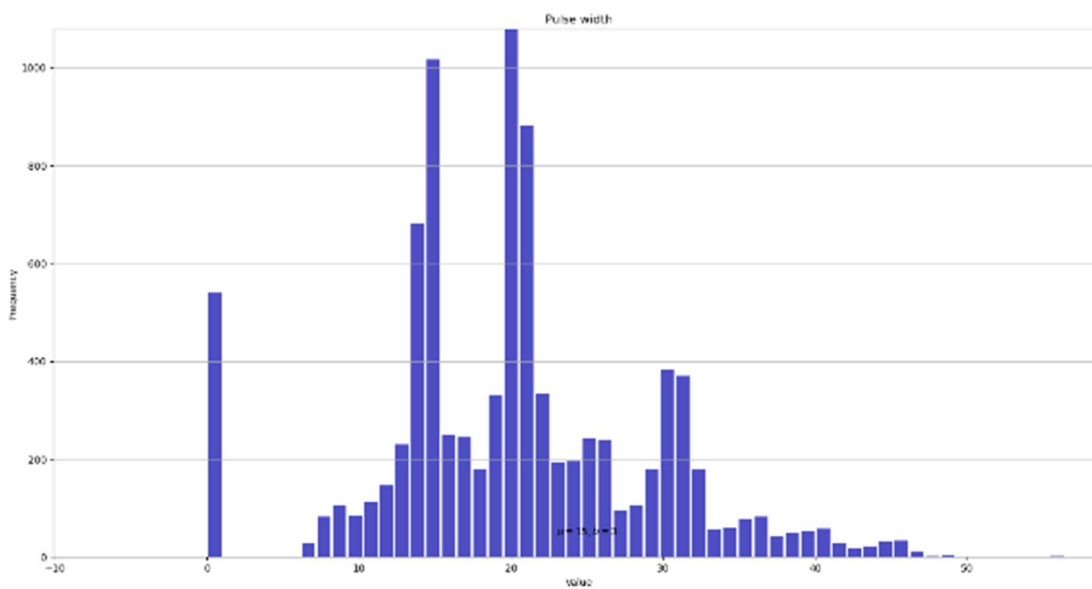
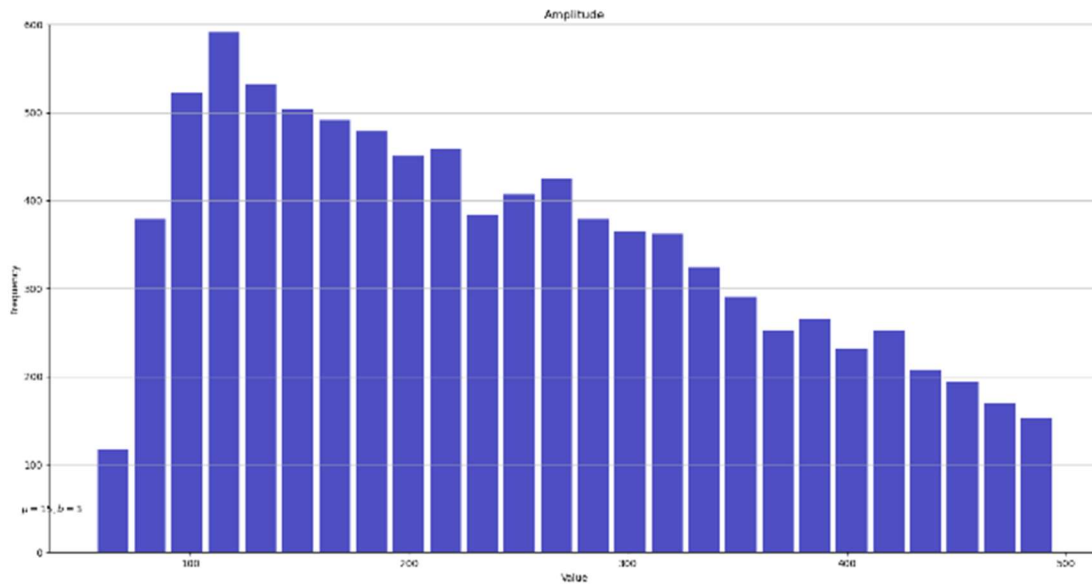
Appendiks F Testresultater: Måling 1 - med/uten inverter

F.1 Uten inverter

Følgende tabell inneholder verdier beregnet av NovoInspector programmet. Verdiene er oppgitt slik som de ble rapportert av programmet med enhet lagt til.

Rise time:	$\mu = 3.519890405738458 \text{ ns}$	$\sigma = 0.24793716765651838 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 243.49323393172733 \text{ mV}$	$\sigma = 1.1833853722757122 \text{ mV}$
Pulse width	$\mu = 21.27945442948005 \text{ ns}$	$\sigma = 0.26972760551087516 \text{ ns}$

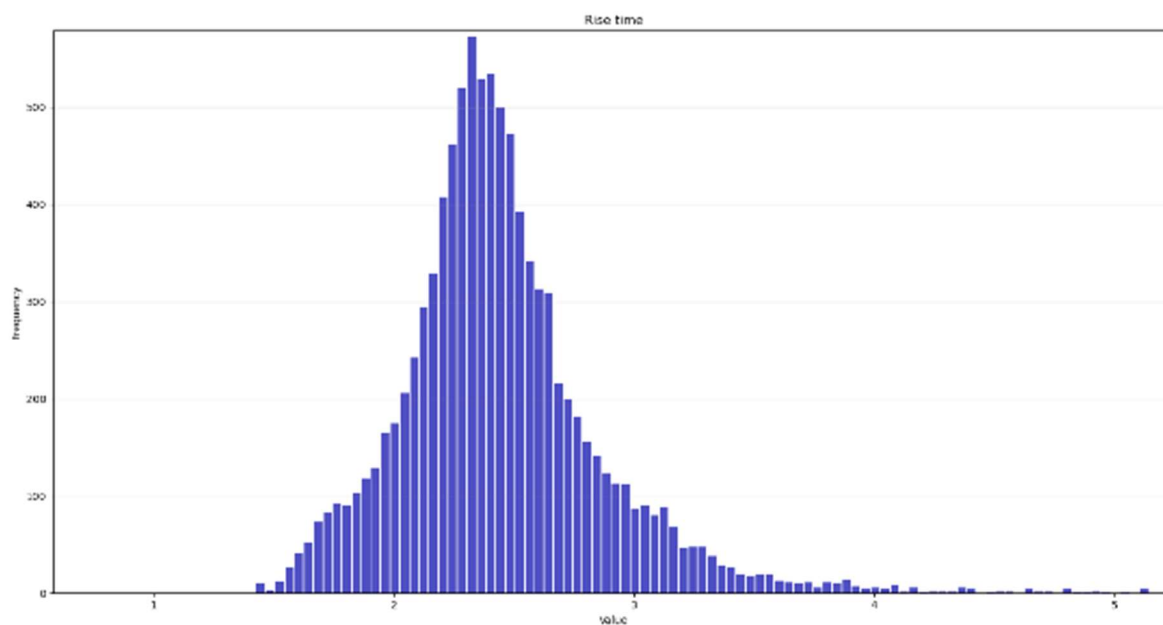
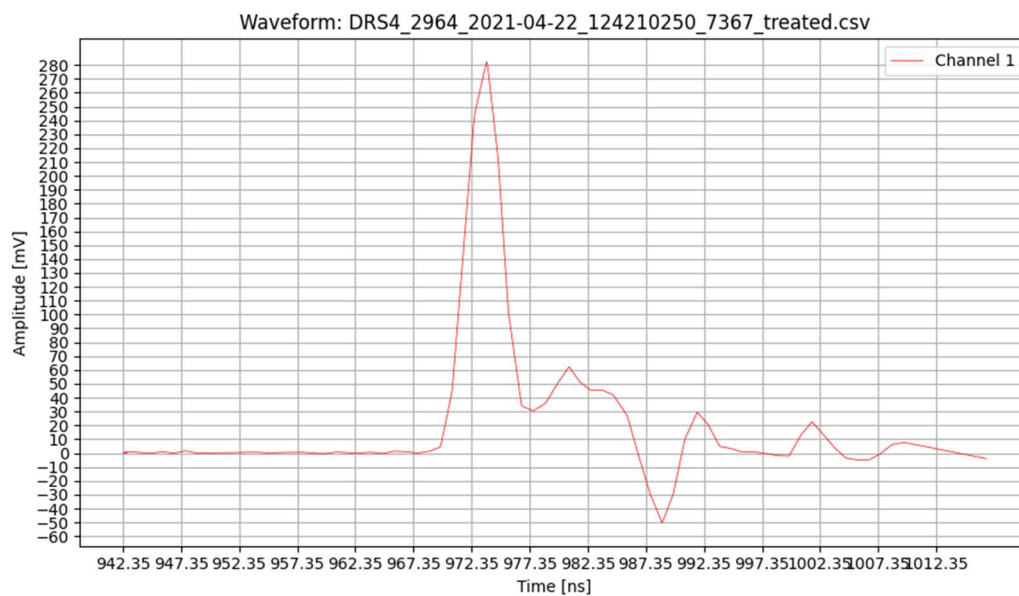


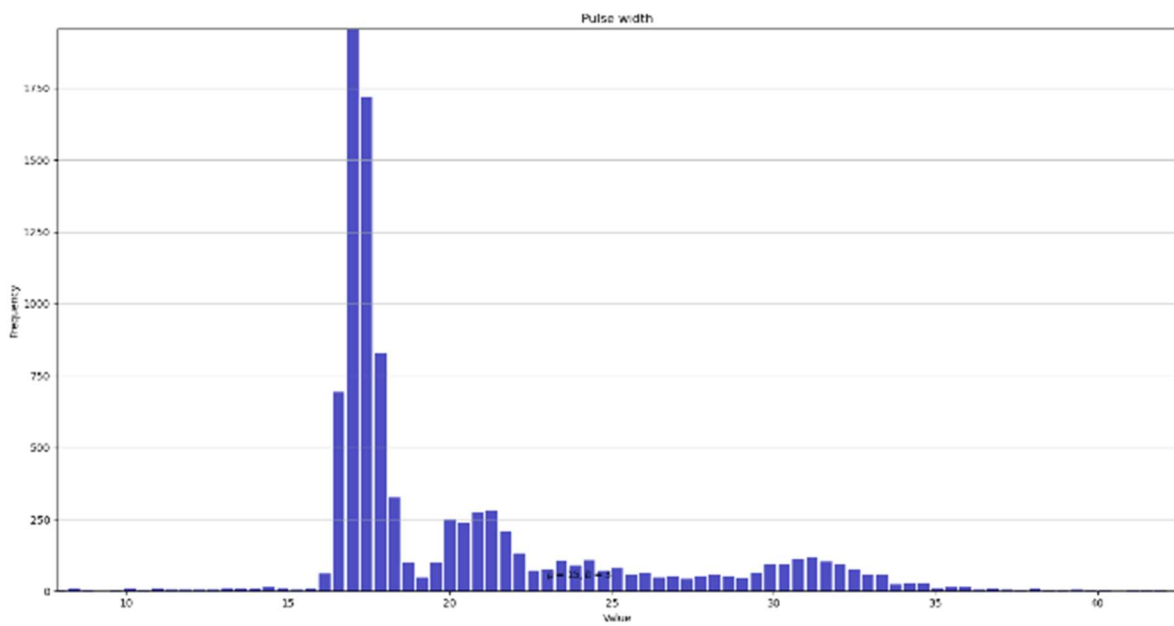
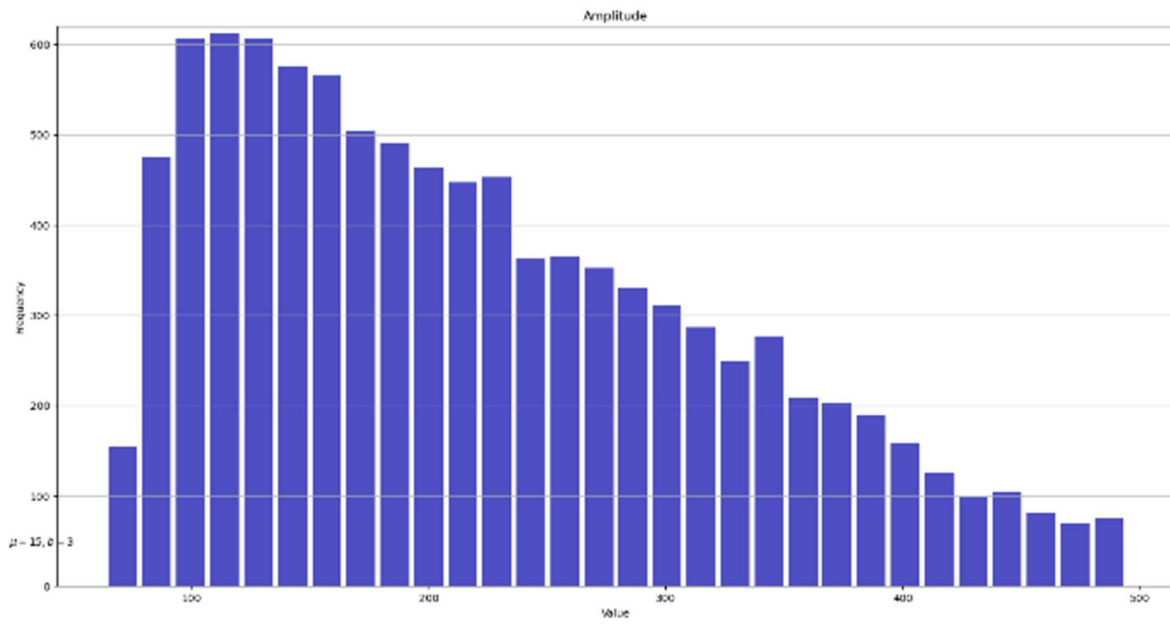


F.2 Med inverter

Følgende tabell inneholder verdier beregnet av NovoInspector programmet. Verdiene er oppgitt slik som de ble rapportert av programmet med enhet lagt til.

Rise time:	$\mu = 3.1849332827221146$ ns	$\sigma = 0.1683634775752449$ ns
Amplitude:	$\mu = 221.2333690430989$ mV	$\sigma = 1.037320077624749$ mV
Pulse width	$\mu = 20.641287826634244$ ns	$\sigma = 0.17941945773687562$ ns





Appendiks G Testresultater: Måling 2 – Koinsidensmåling

Følgende tabeller inneholder verdier beregnet av NovolInspector programmet. Verdiene er oppgitt slik som de ble rapportert av programmet med enhet lagt til.

G.1 Uten inverter

Dataset statistics of 0 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = 0.2645403051437762 \text{ ns}$	$\sigma = 0.18037188582562 \text{ ns}$
Rise time:	$\mu = 2.69309466858506 \text{ ns}$	$\sigma = 0.09231149967702892 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 226.111725010908 \text{ mV}$	$\sigma = 0.7492551275854673 \text{ mV}$
Pulse width:	$\mu = 15.031667731916588 \text{ ns}$	$\sigma = 0.10800700336990851 \text{ ns}$

Dataset statistics of 2 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = 0.28858849849281887 \text{ ns}$	$\sigma = 0.17489293977804857 \text{ ns}$
Rise time:	$\mu = 2.660707993287243 \text{ ns}$	$\sigma = 0.08758205871819609 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 226.7189091506127 \text{ mV}$	$\sigma = 0.7612754795156867 \text{ mV}$
Pulse width:	$\mu = 15.097345957173841 \text{ ns}$	$\sigma = 0.10184050789727424 \text{ ns}$

Dataset statistics of 4 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -0.7487238755513671 \text{ ns}$	$\sigma = 0.21857354977014257 \text{ ns}$
Rise time:	$\mu = 2.855639841984312 \text{ ns}$	$\sigma = 0.13262826277995274 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 225.61948616008073 \text{ mV}$	$\sigma = 0.7908362853810436 \text{ mV}$
Pulse width:	$\mu = 15.29018744851896 \text{ ns}$	$\sigma = 0.14230388032944516 \text{ ns}$

Dataset statistics of 6 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -0.3272746753861823 \text{ ns}$	$\sigma = 0.1774831685372691 \text{ ns}$
Rise time:	$\mu = 2.6279567295269897 \text{ ns}$	$\sigma = 0.08886658975414347 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 223.44392272291088 \text{ mV}$	$\sigma = 0.8341169192058207 \text{ mV}$
Pulse width:	$\mu = 14.923042620247548 \text{ ns}$	$\sigma = 0.10468986852834 \text{ ns}$

Dataset statistics of 8 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -1.2279610619682515 \text{ ns}$	$\sigma = 0.21854761536020112 \text{ ns}$
Rise time:	$\mu = 2.6723999619737207 \text{ ns}$	$\sigma = 0.10935271237942155 \text{ ns}$
Amplitude:	$\mu = 224.0008220858871 \text{ mV}$	$\sigma = 0.9346408146268532 \text{ mV}$
Pulse width:	$\mu = 14.726730055956754 \text{ ns}$	$\sigma = 0.12404048918008583 \text{ ns}$

G.2 Med inverter

Dataset statistics of 0 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = 0.17593871486348417$ ns	$\sigma = 0.14629185177444373$ ns
Rise time:	$\mu = 2.6925970359221583$ ns	$\sigma = 0.073197898341194$ ns
Amplitude:	$\mu = 215.0735197494805$ mV	$\sigma = 0.6508235904965955$ mV
Pulse width:	$\mu = 16.431148268794484$ ns	$\sigma = 0.0858224980675583$ ns

Dataset statistics of 2 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = 0.1013207850211559$ ns	$\sigma = 0.1364060779291834$ ns
Rise time:	$\mu = 2.739313277681358$ ns	$\sigma = 0.07679001919616552$ ns
Amplitude:	$\mu = 217.1694803972668$ mV	$\sigma = 0.6554974571039245$ mV
Pulse width:	$\mu = 16.57442941117742$ ns	$\sigma = 0.10513188307507484$ ns

Dataset statistics of 4 cm displacement:

Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -0.1675562156351403$ ns	$\sigma = 0.14796096772125705$ ns
Rise time:	$\mu = 2.899686591477686$ ns	$\sigma = 0.1089278099990273$ ns
Amplitude:	$\mu = 220.25174689190771$ mV	$\sigma = 0.6813982171326747$ mV
Pulse width:	$\mu = 16.839294761180096$ ns	$\sigma = 0.12163657496169171$ ns

Dataset statistics of 6 cm displacement:

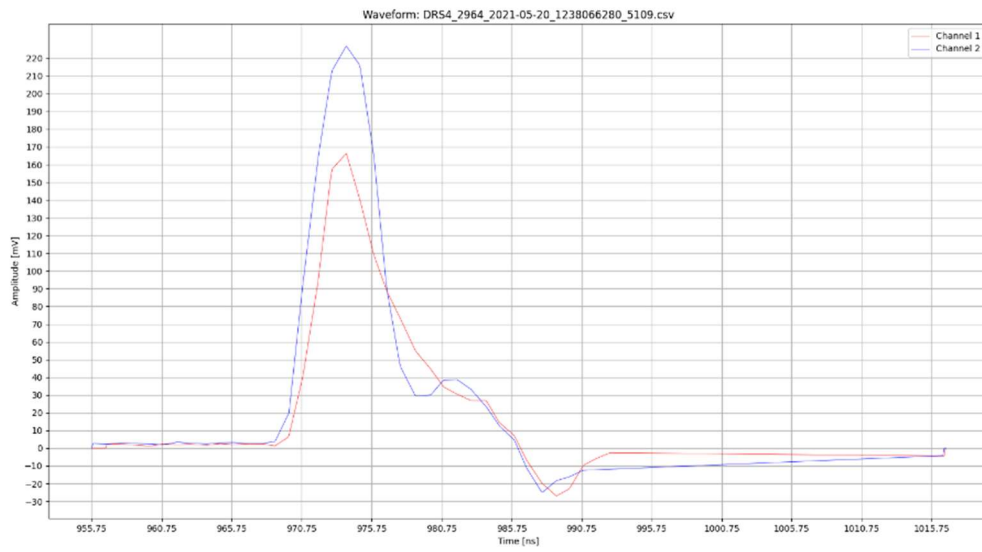
Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -0.6311073591438168$ ns	$\sigma = 0.17949853002307145$ ns
Rise time:	$\mu = 2.742639545513237$ ns	$\sigma = 0.09121758993647985$ ns
Amplitude:	$\mu = 219.2404218449554$ mV	$\sigma = 0.7227260174062481$ mV
Pulse width:	$\mu = 16.700919245044194$ ns	$\sigma = 0.10044121326119552$ ns

Dataset statistics of 8 cm displacement:

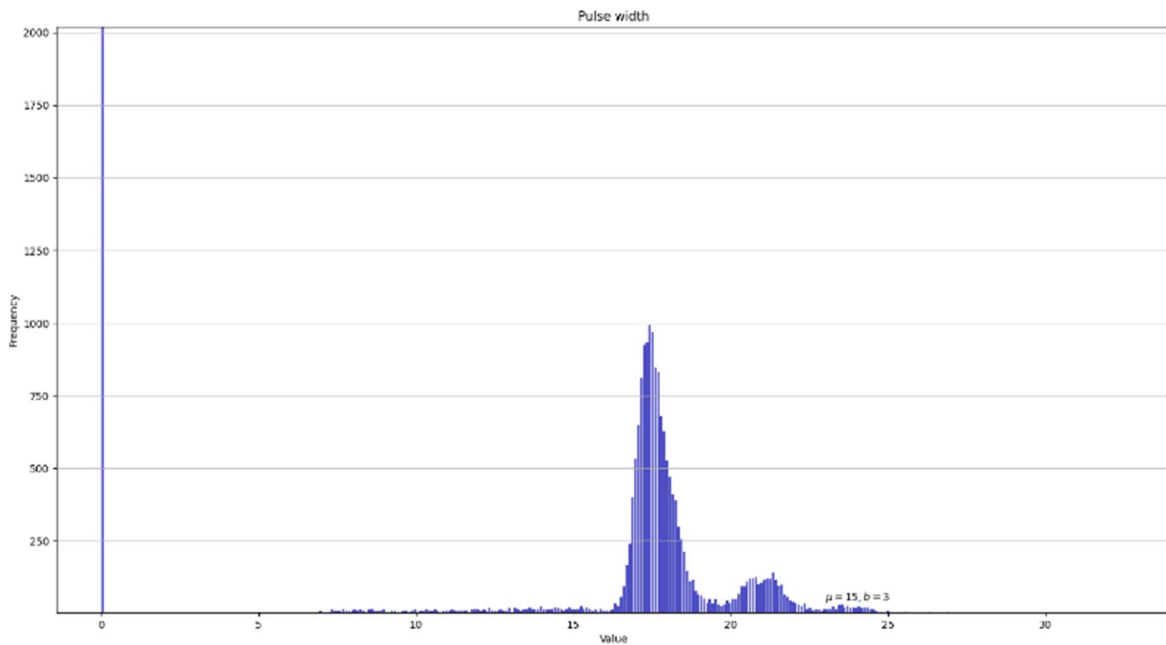
Differential 10% of maximum amplitude timestamp:	$\mu = -0.7252600739742583$ ns	$\sigma = 0.11443110846947513$ ns
Rise time:	$\mu = 2.5551689553018773$ ns	$\sigma = 0.04464481798007303$ ns
Amplitude:	$\mu = 224.12674393772014$ mV	$\sigma = 0.828561153908539$ mV
Pulse width:	$\mu = 16.604418508662384$ ns	$\sigma = 0.07122366951847513$ ns

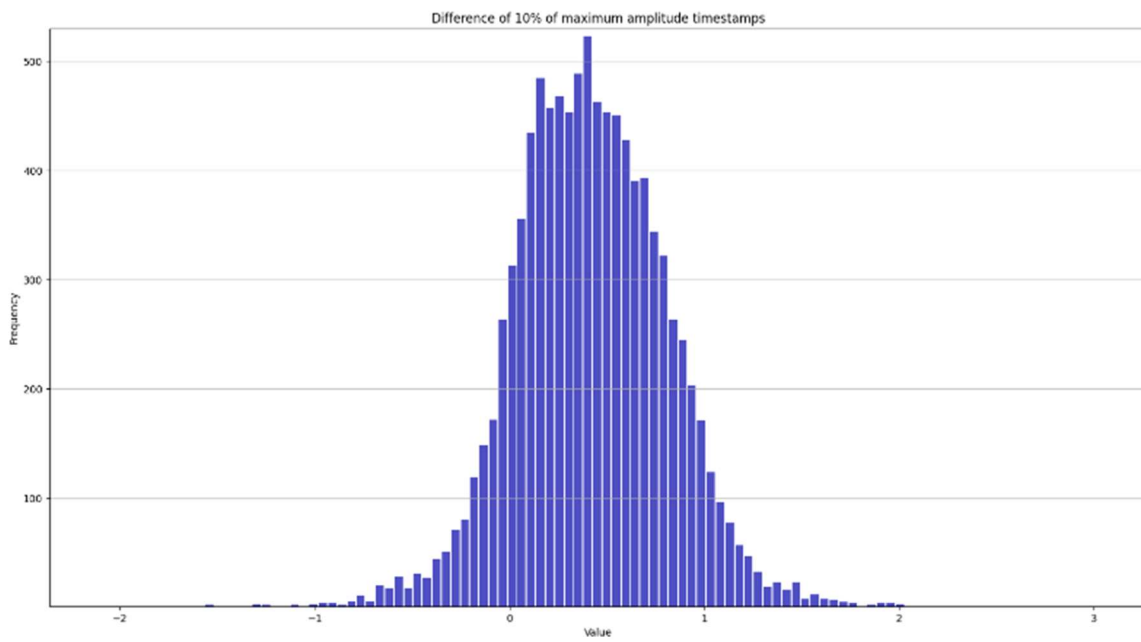
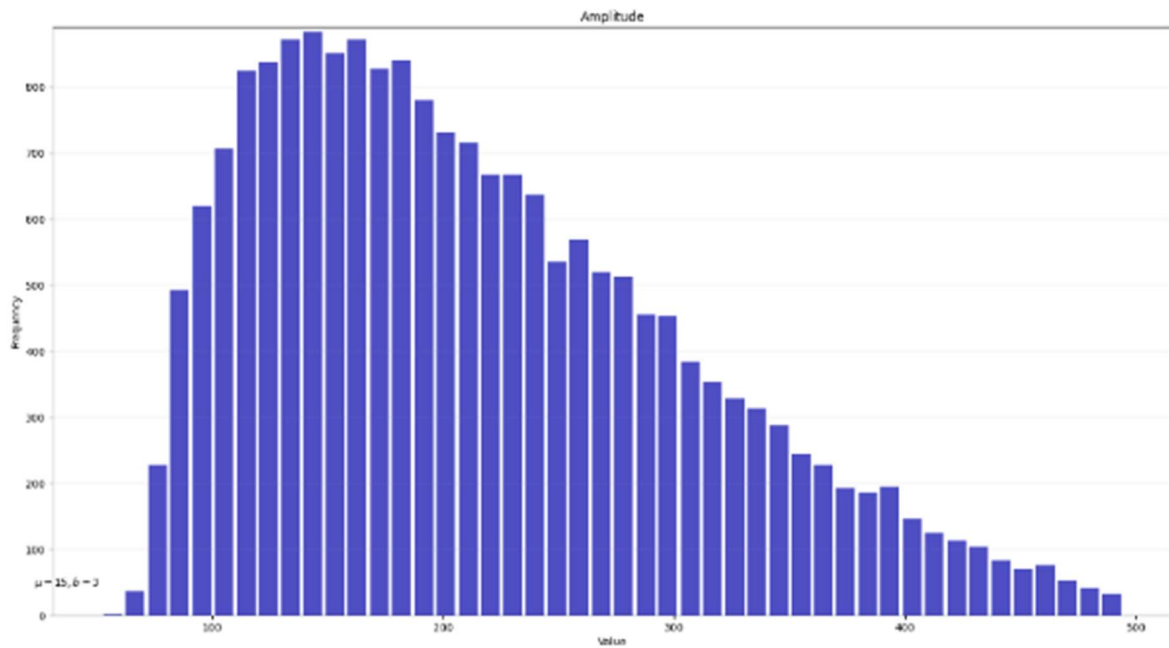
Appendiks H Figurer: Konsidensmåling

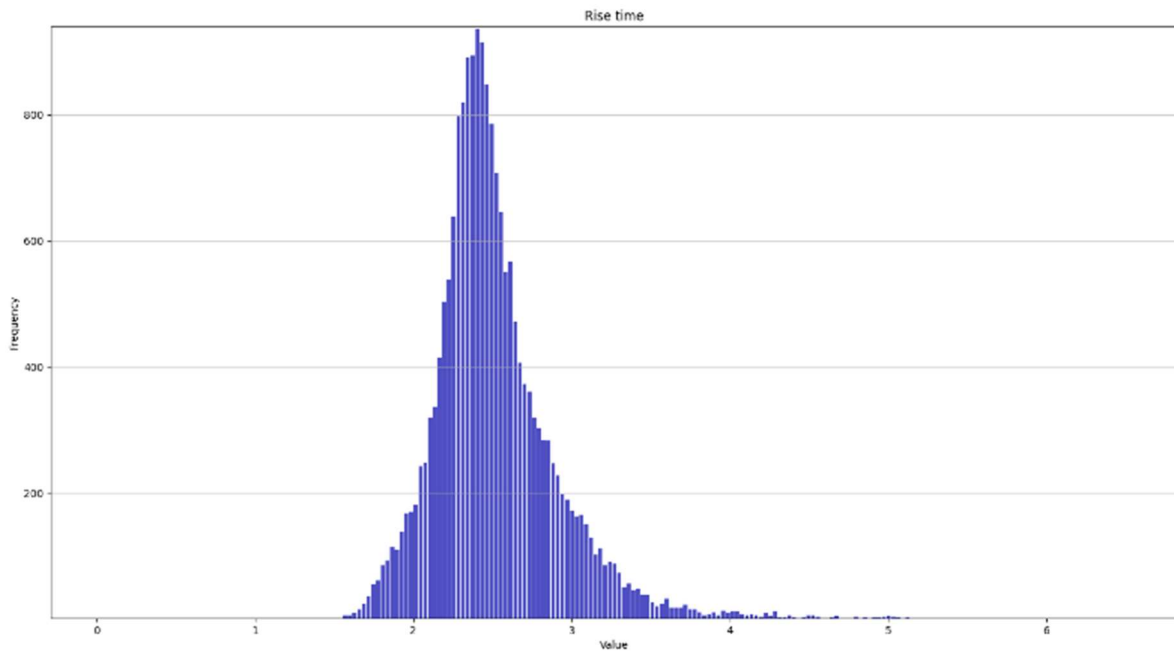
H.1 Med inverter



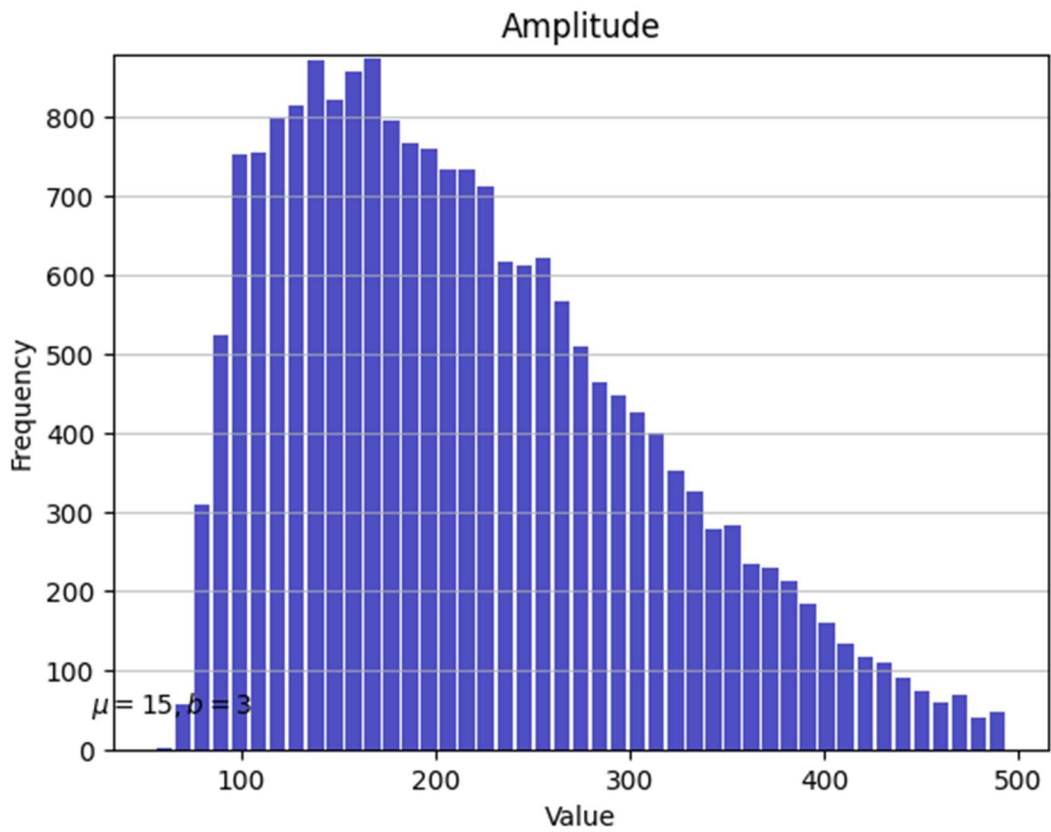
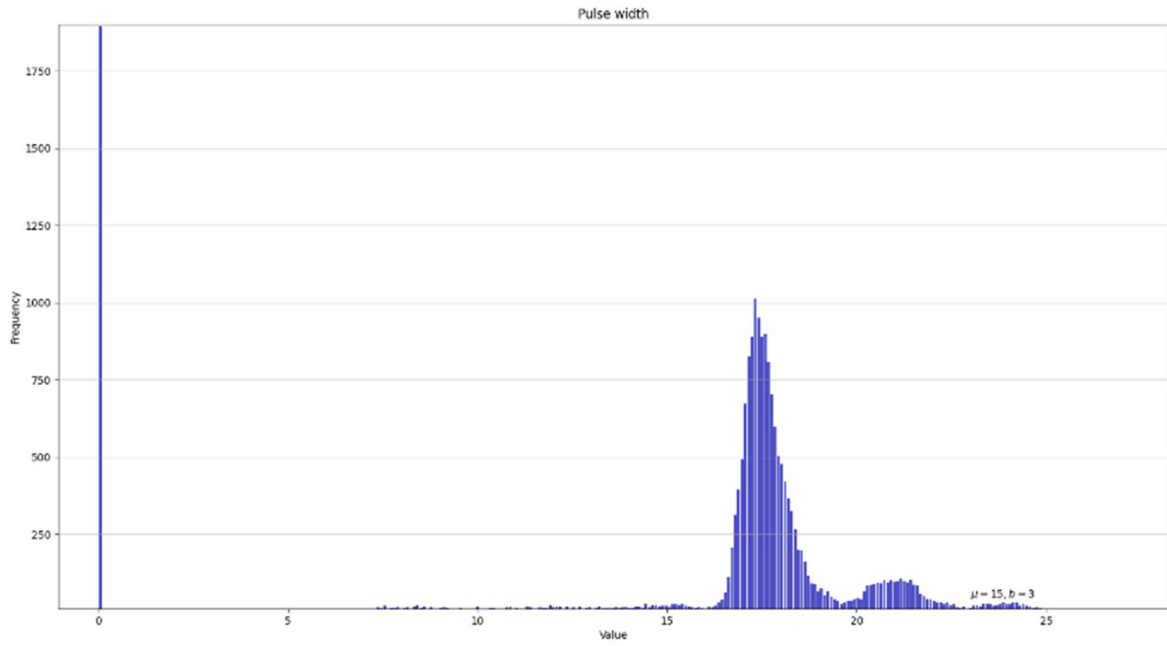
Sentermåling:

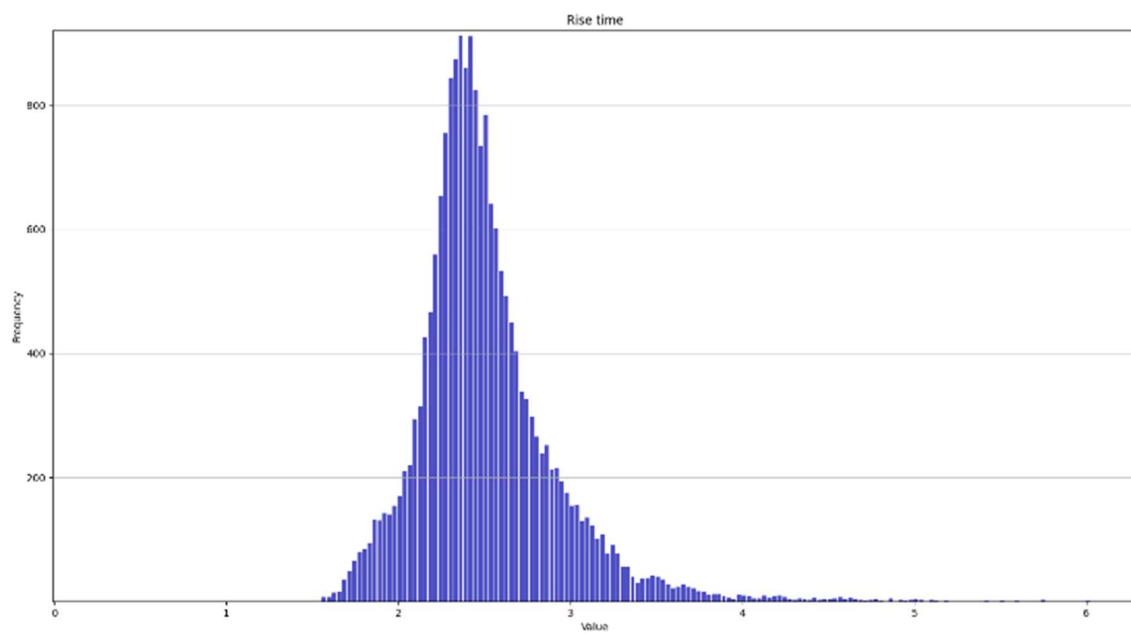
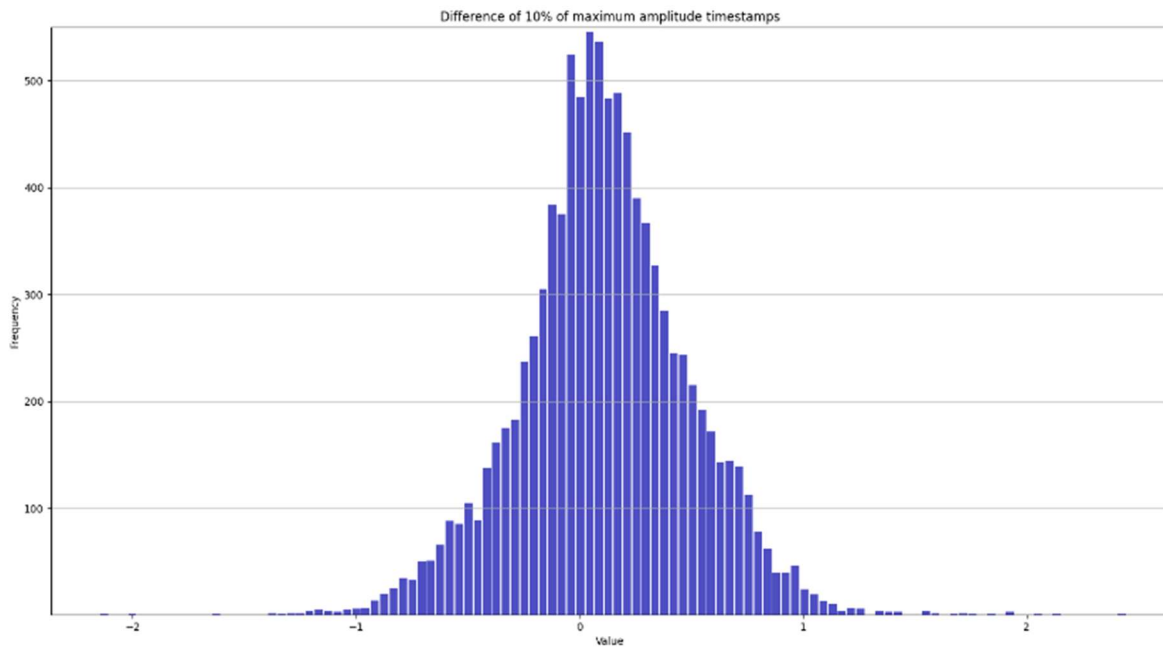




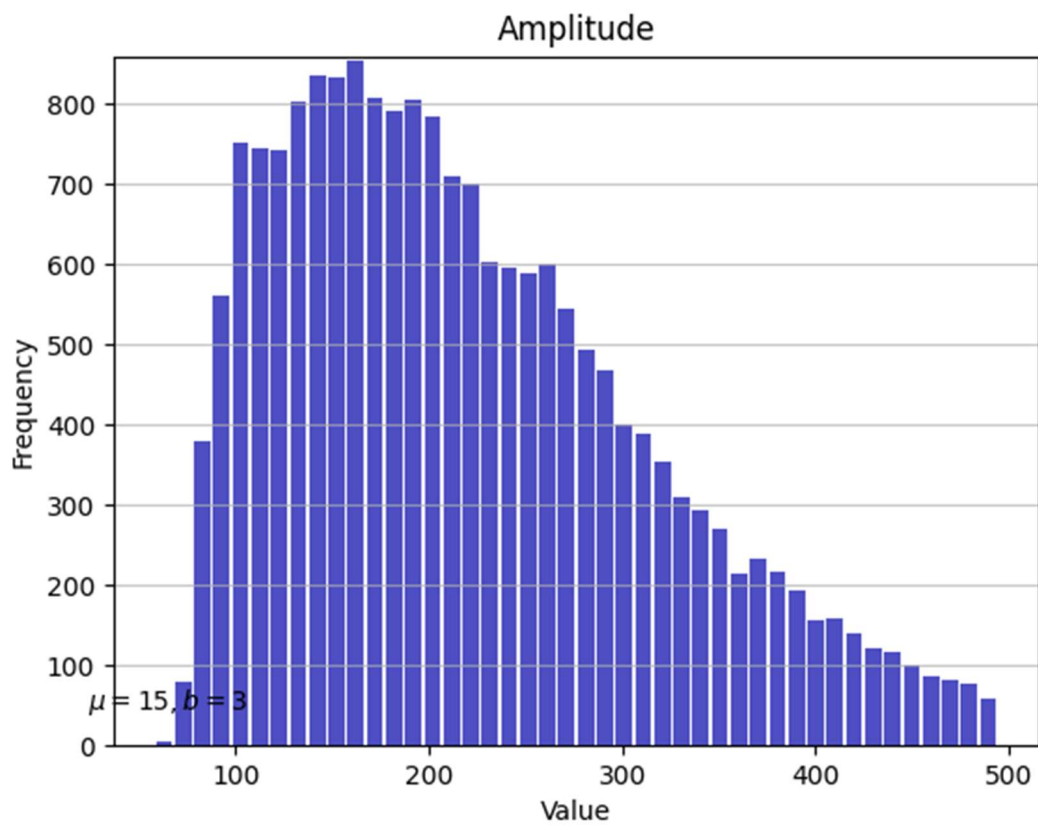
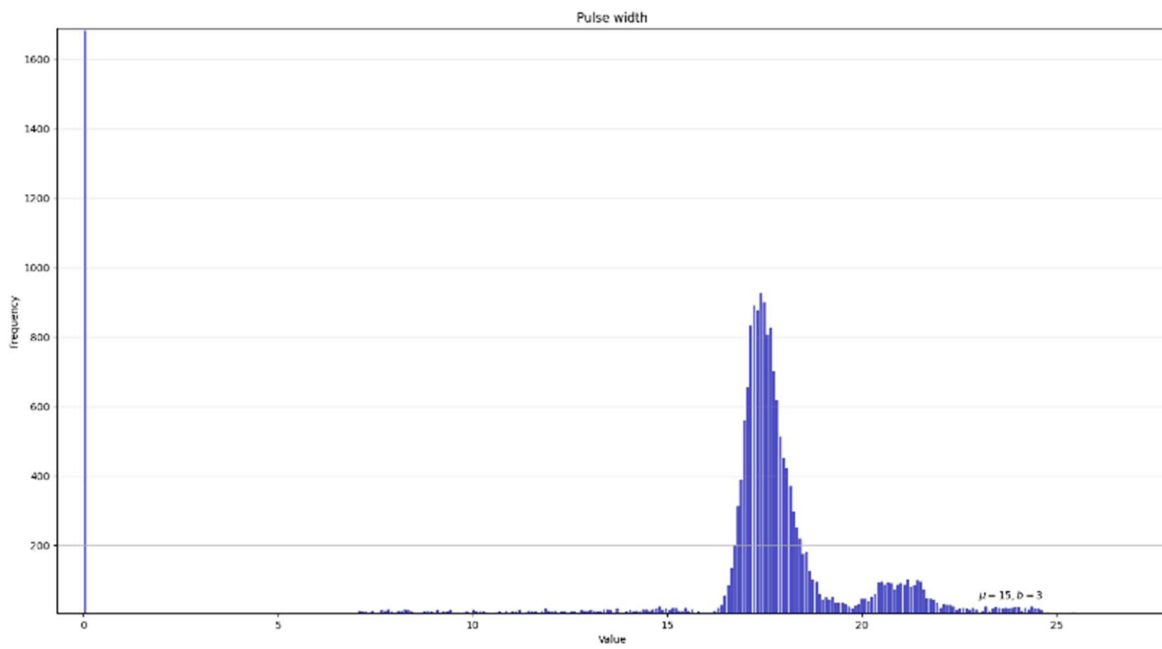


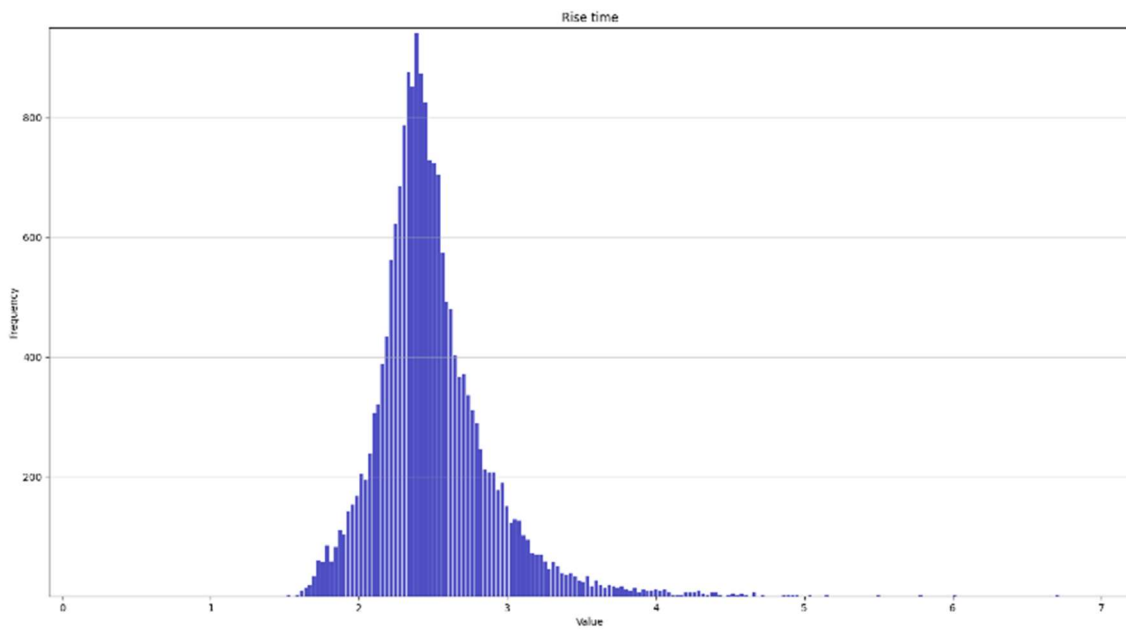
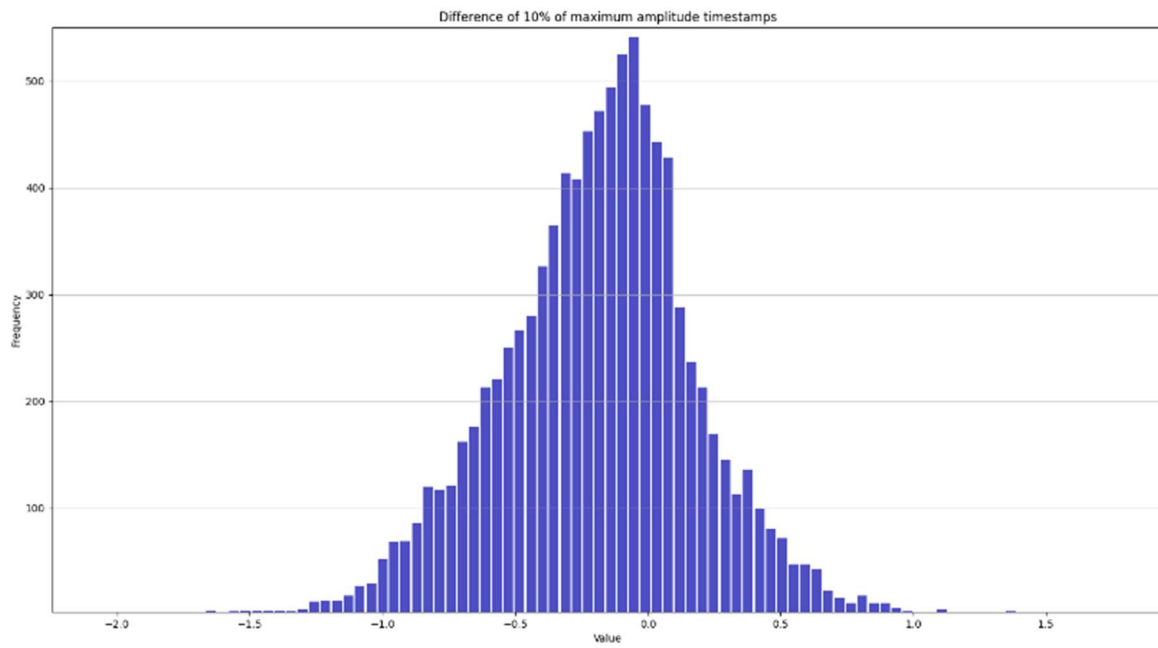
2cm måling:



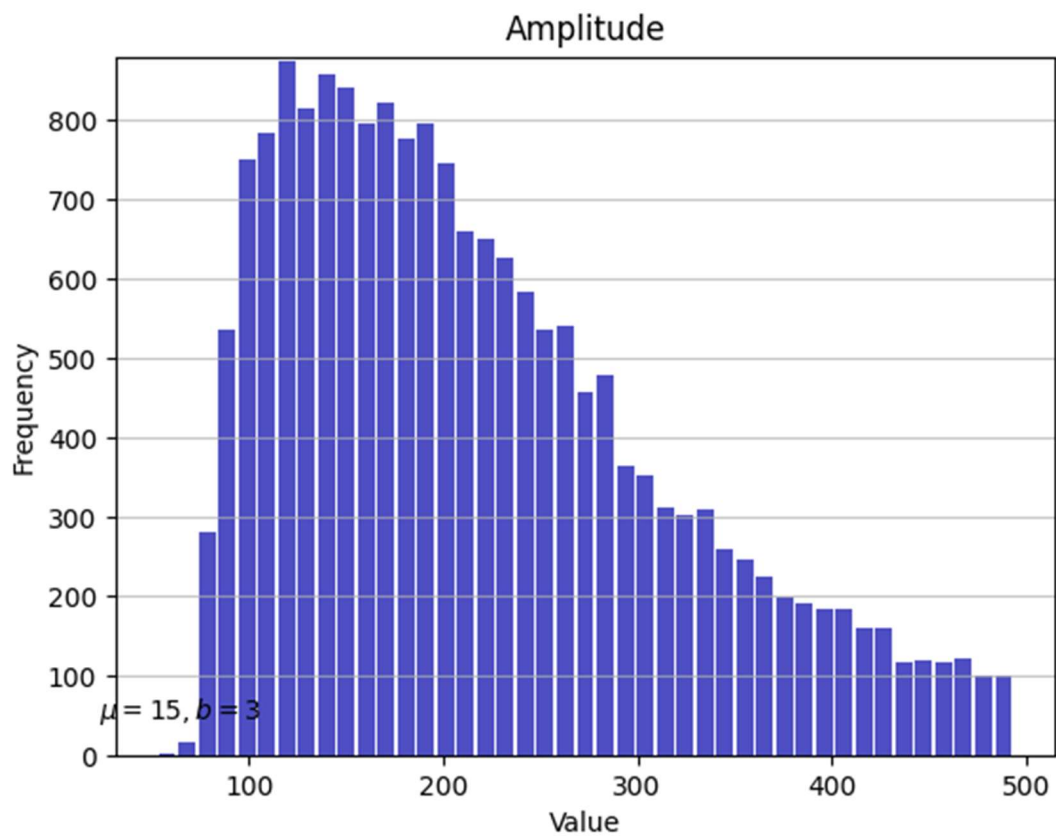
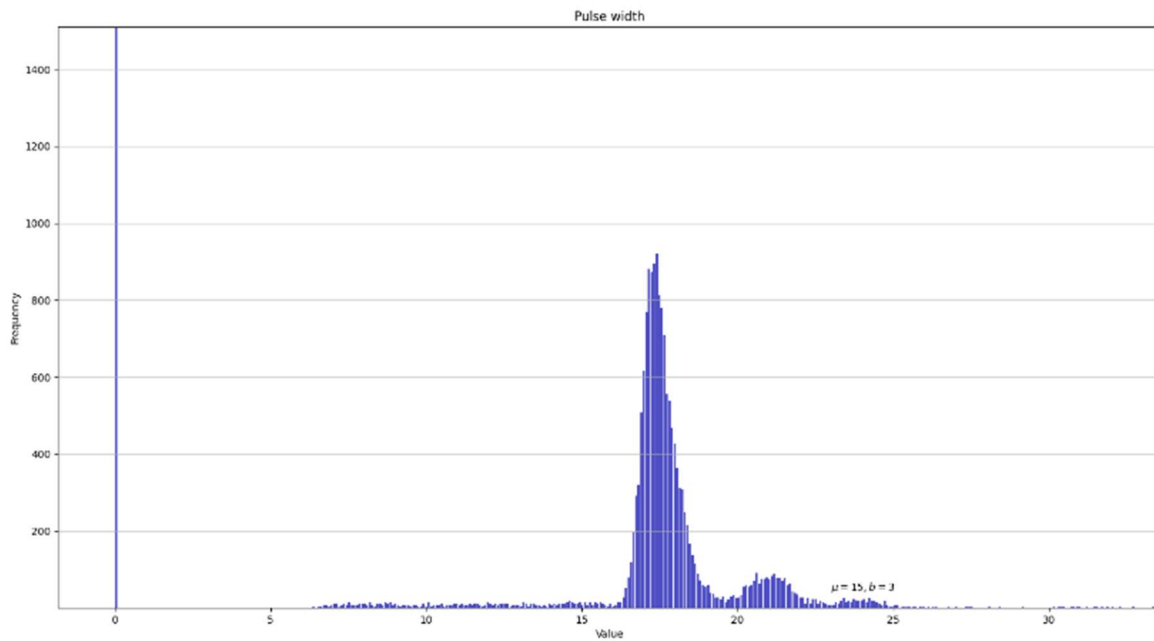


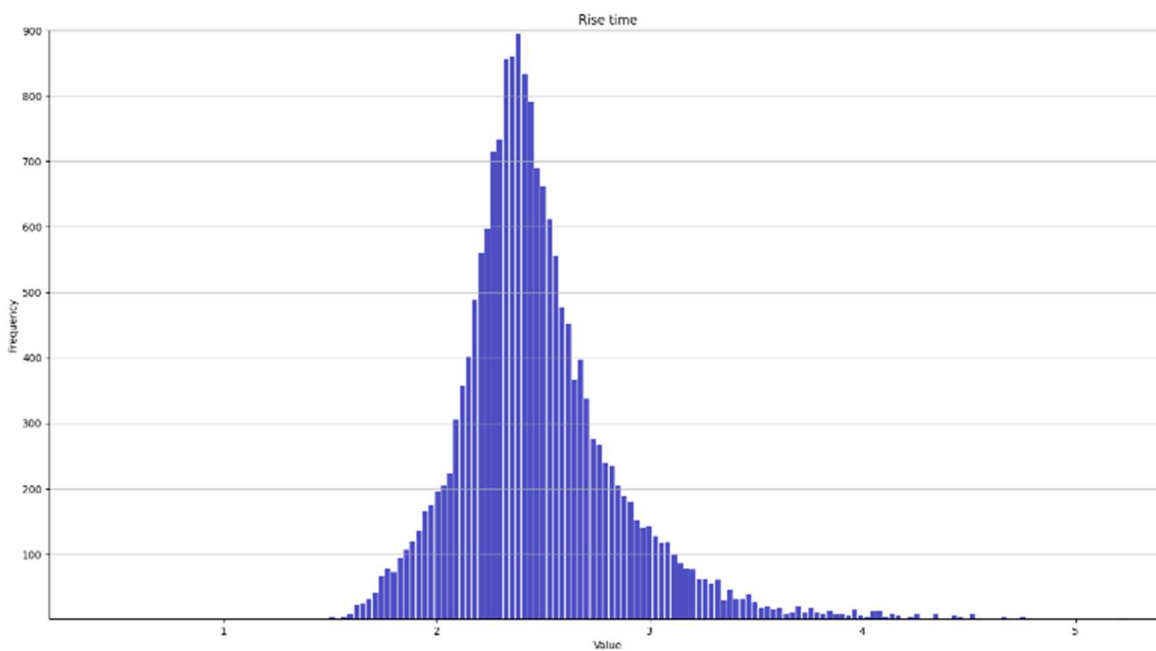
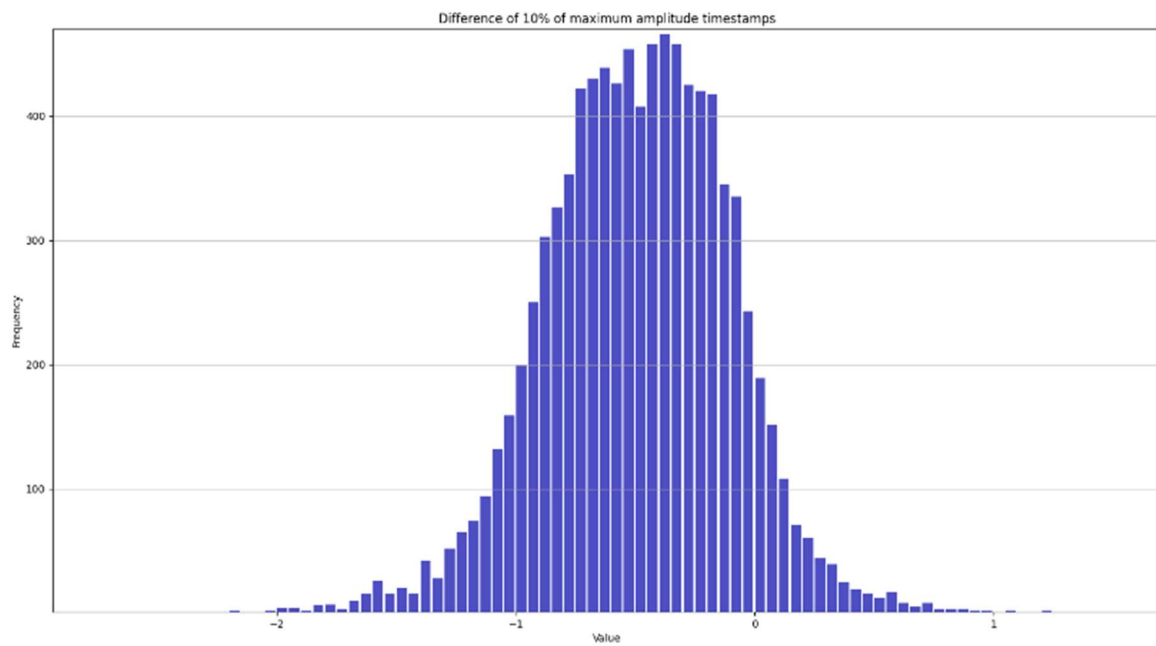
4cm måling:



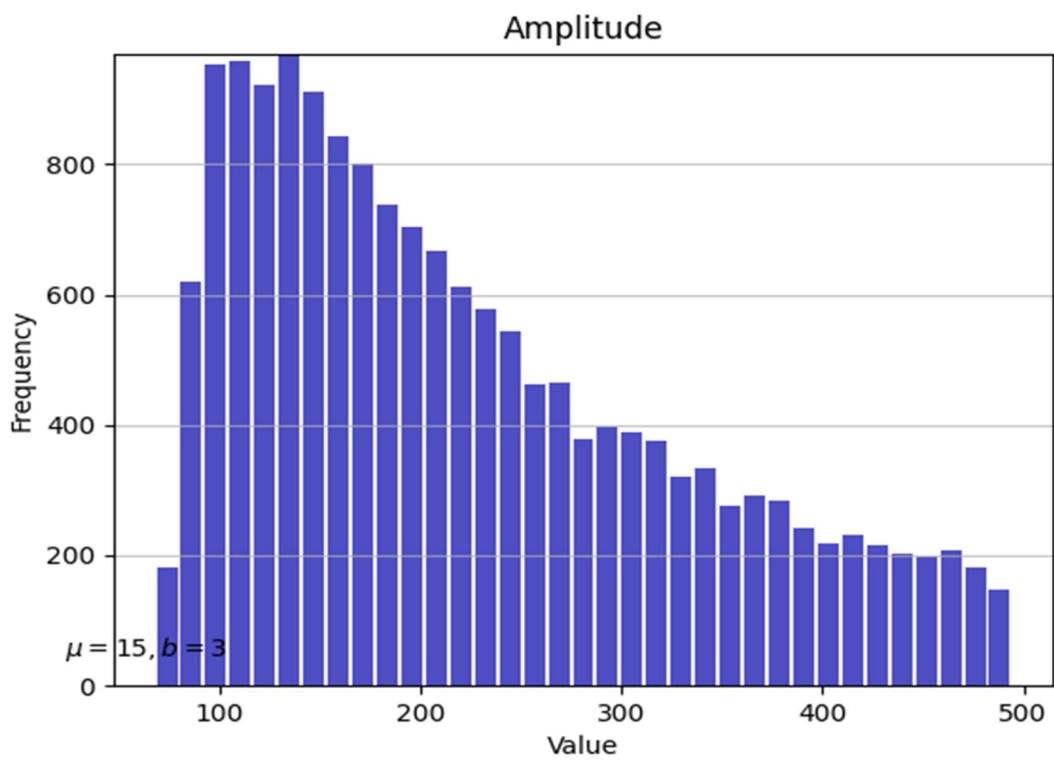
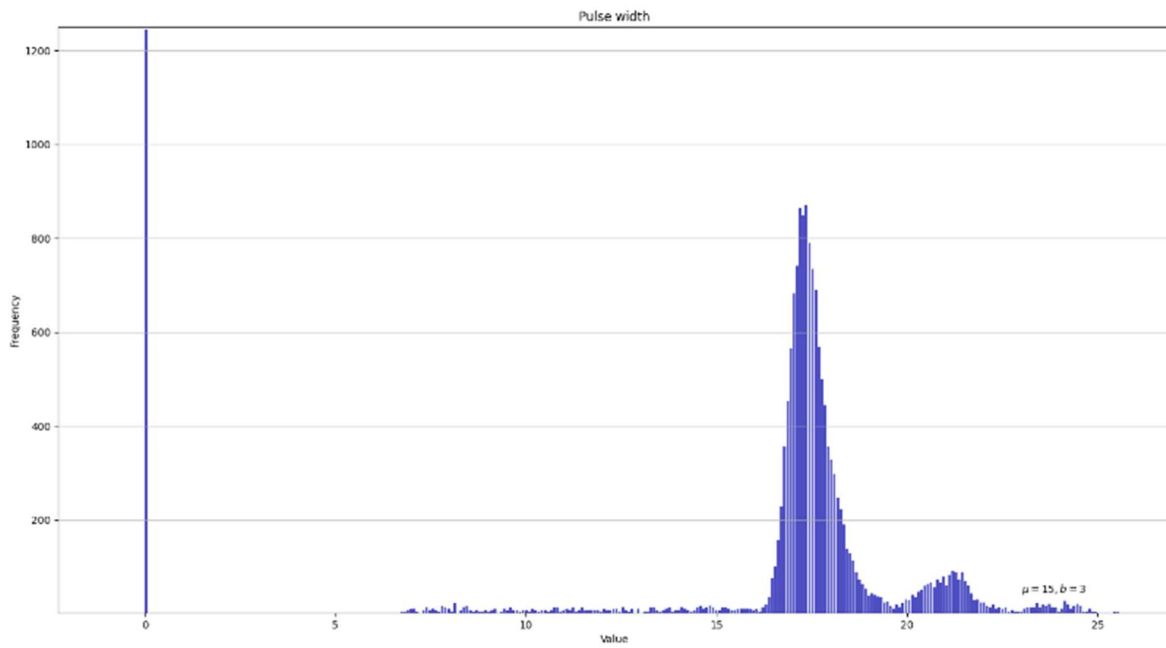


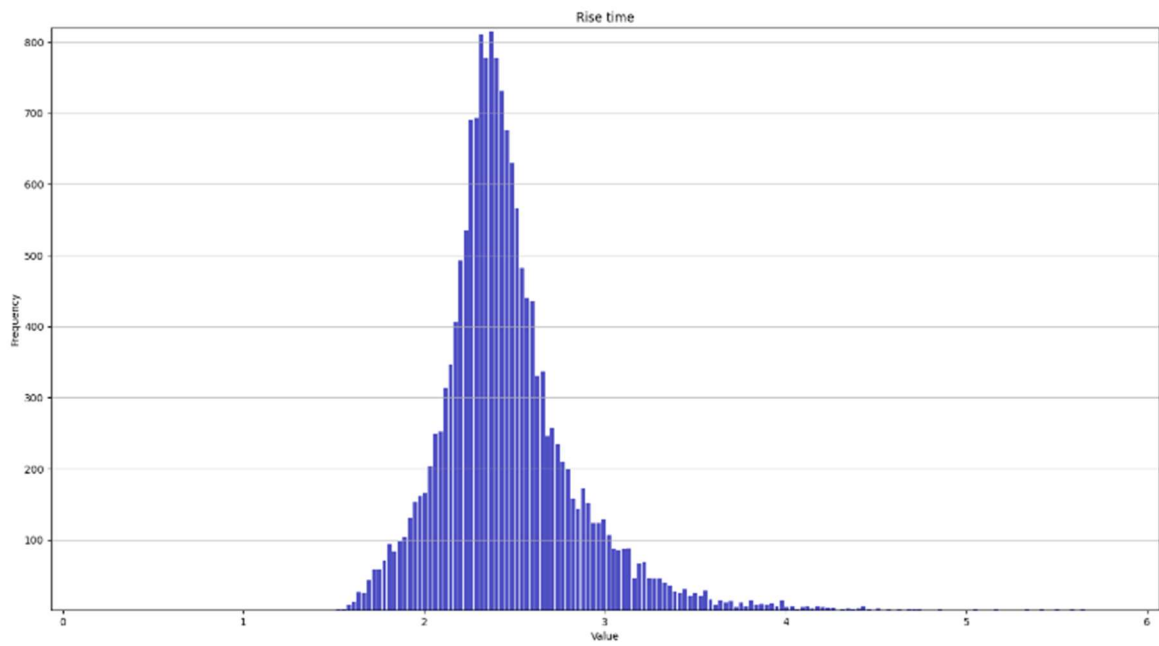
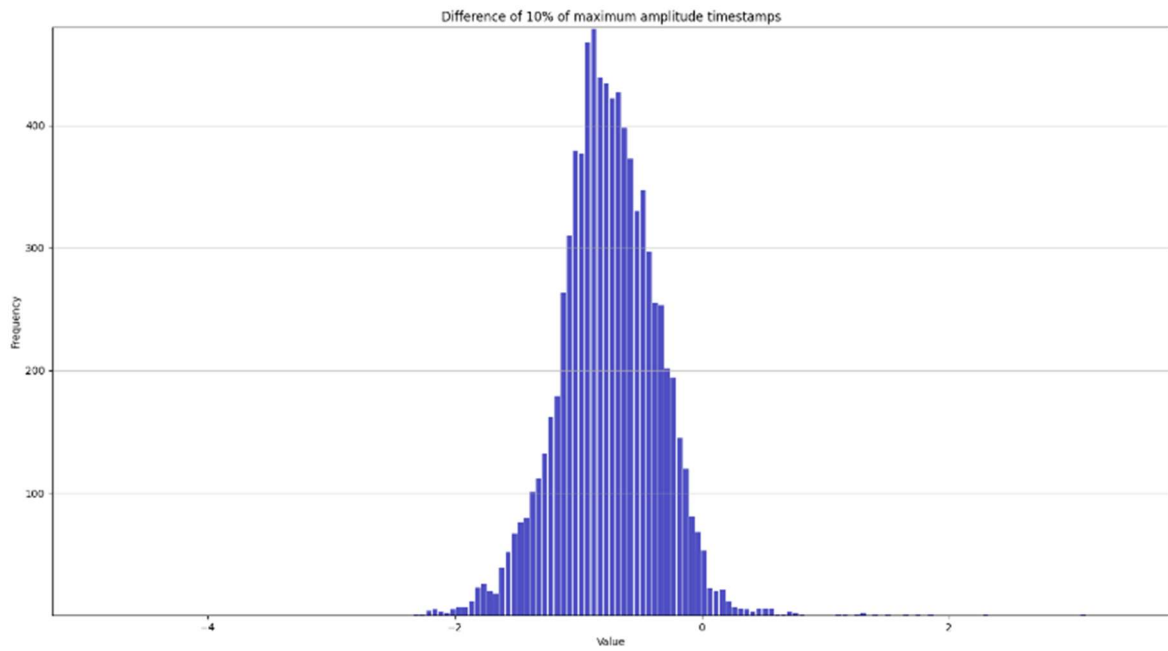
6cm måling:



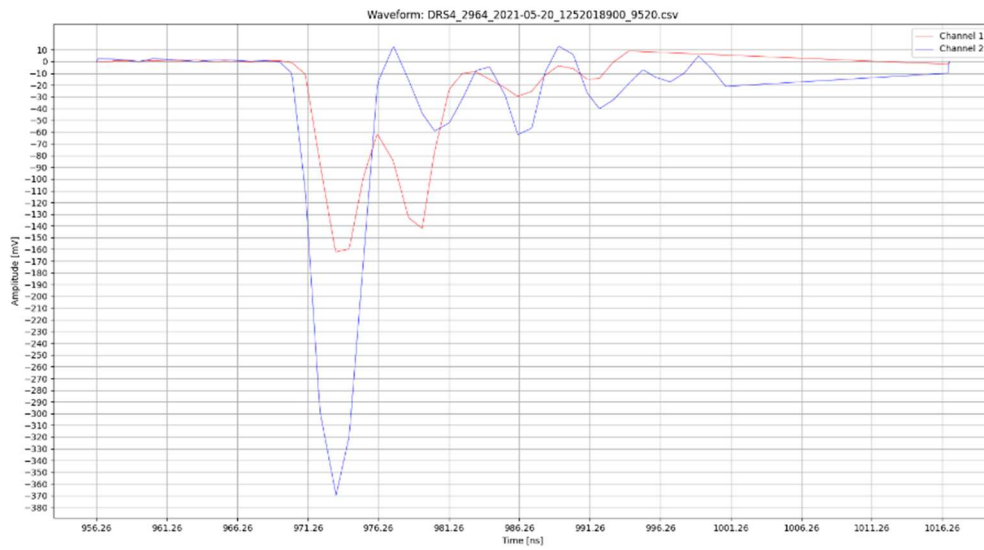


8cm måling:

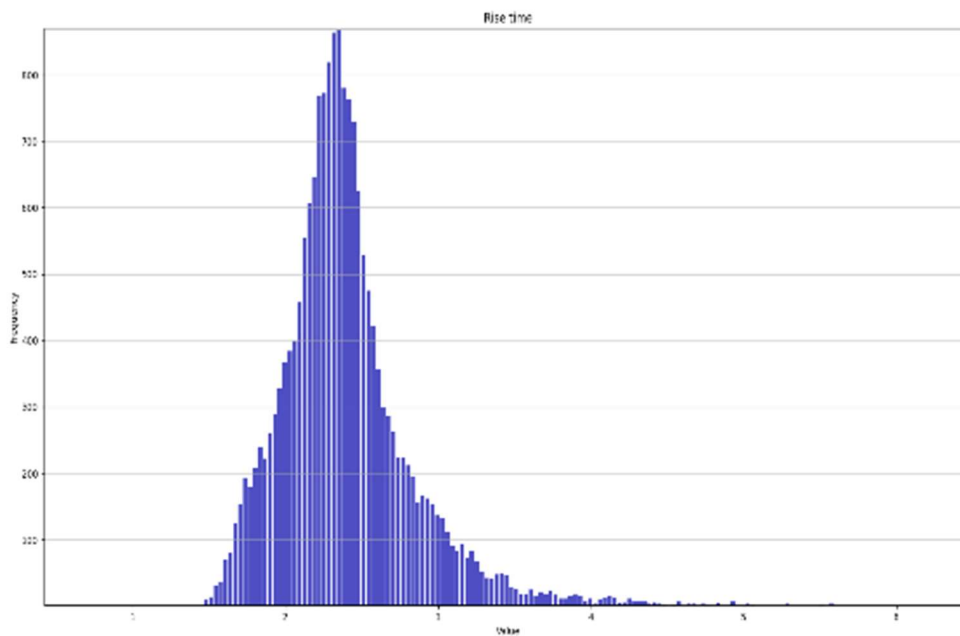


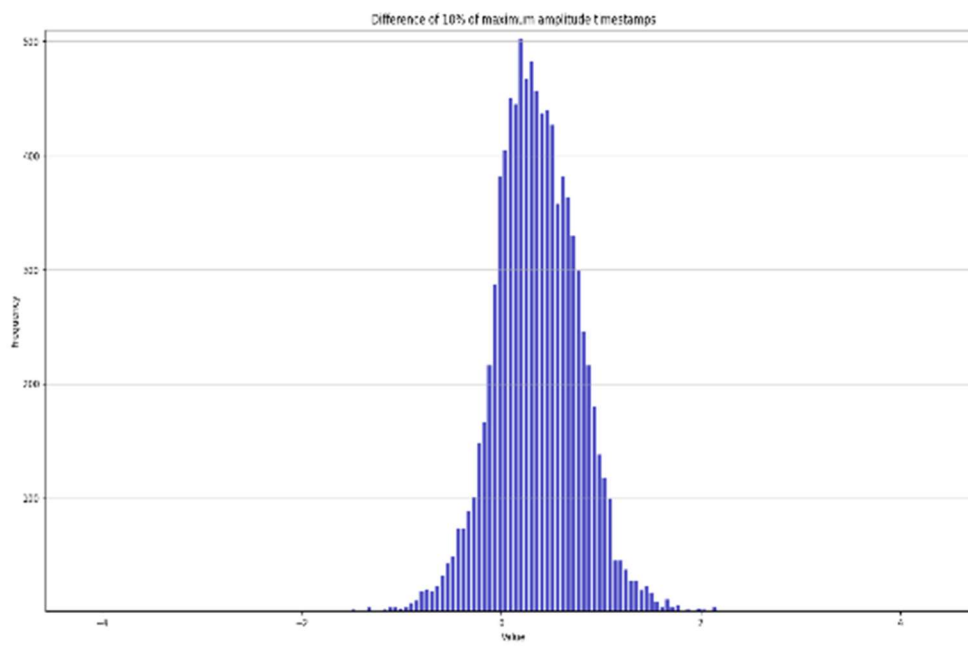
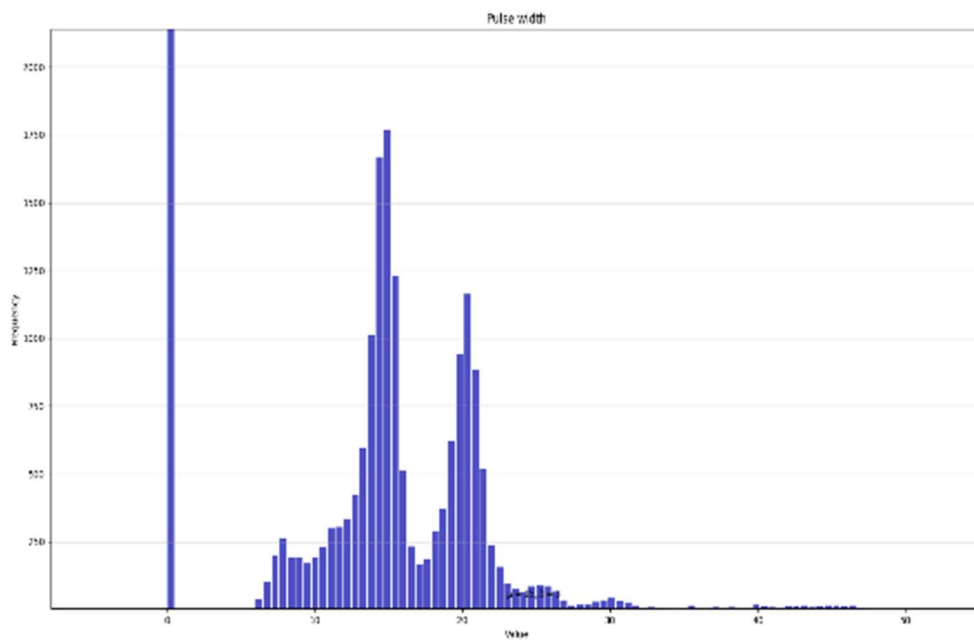


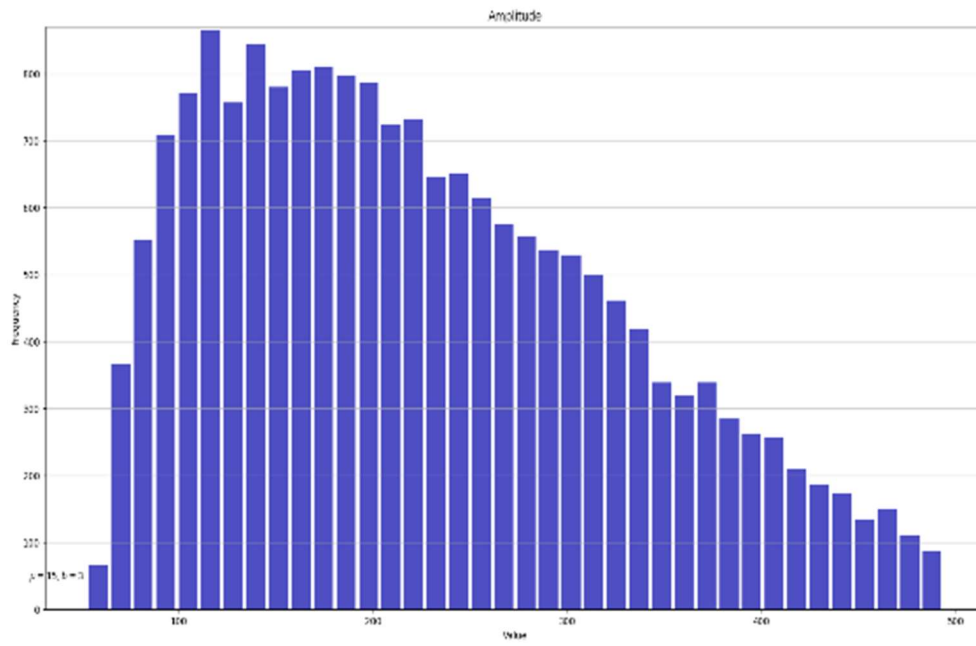
H.2 Uten inverter



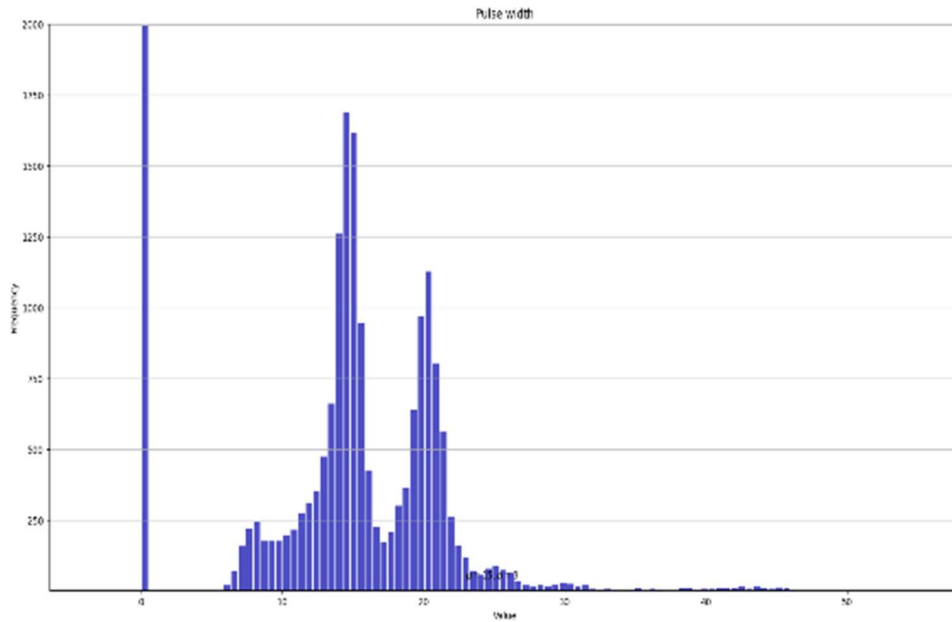
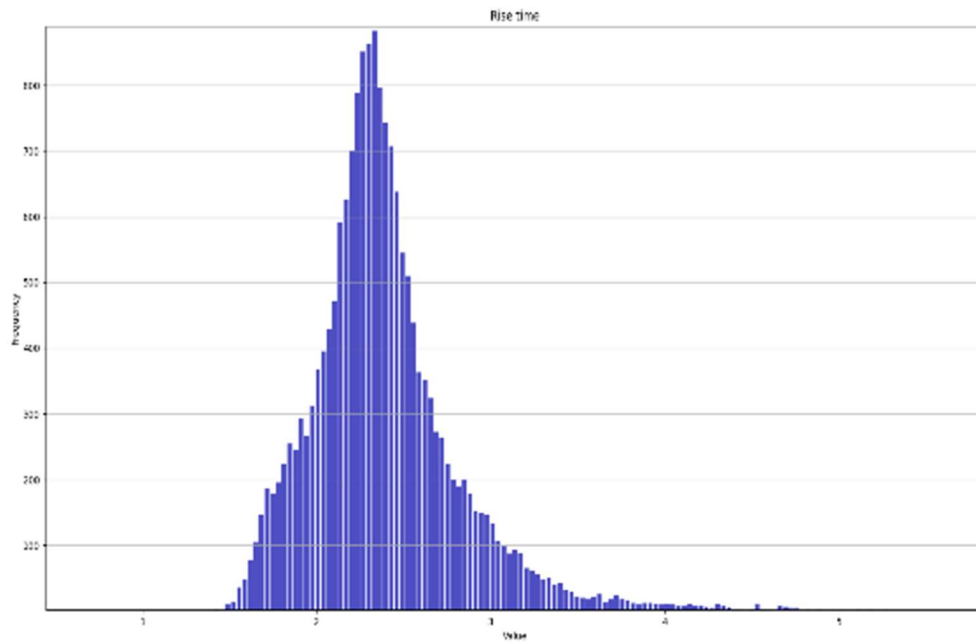
Sentermåling:

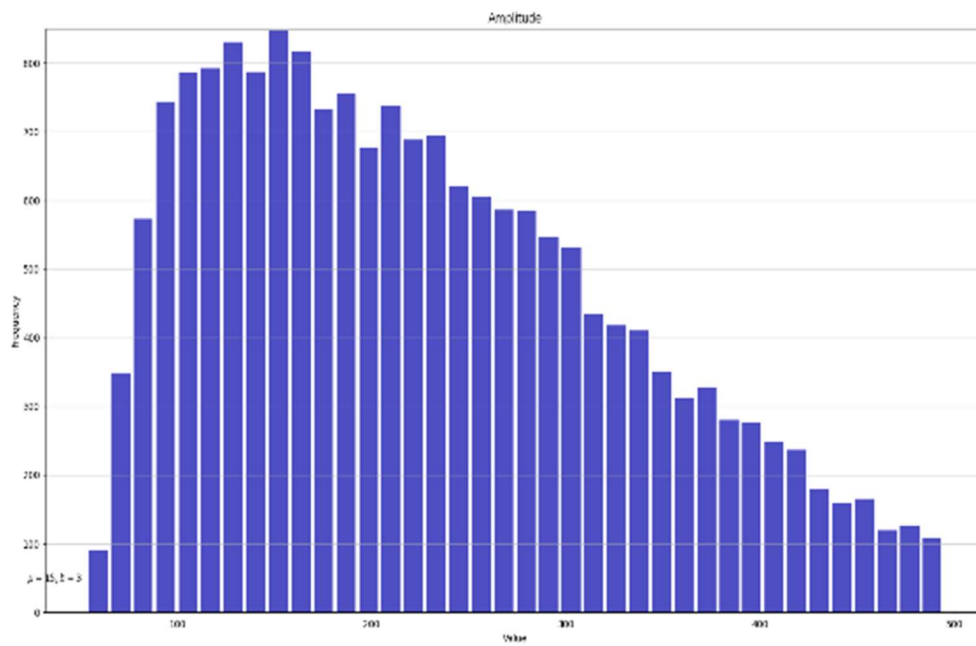
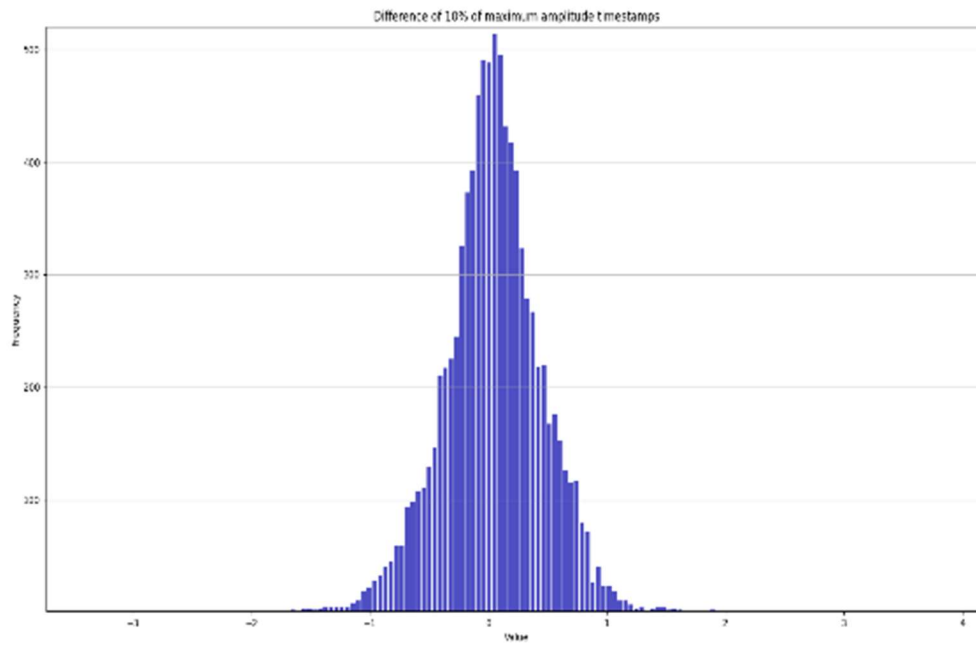




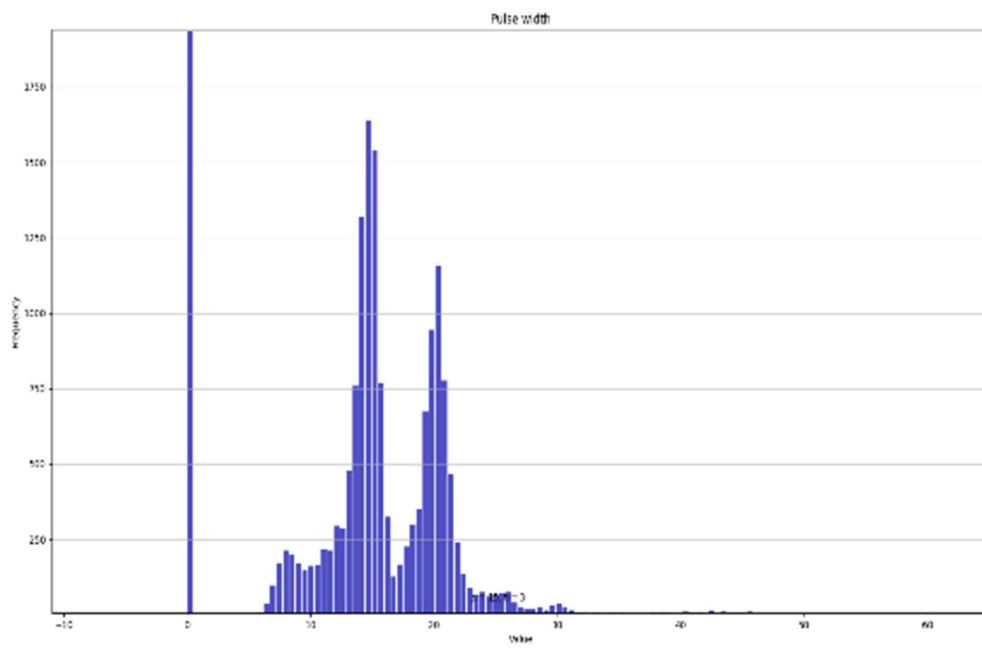
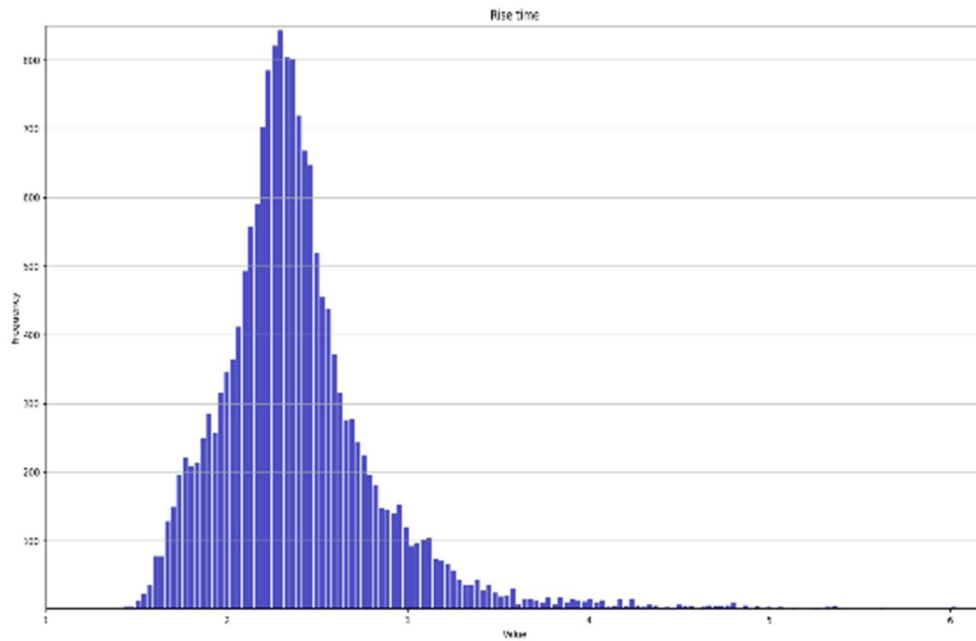


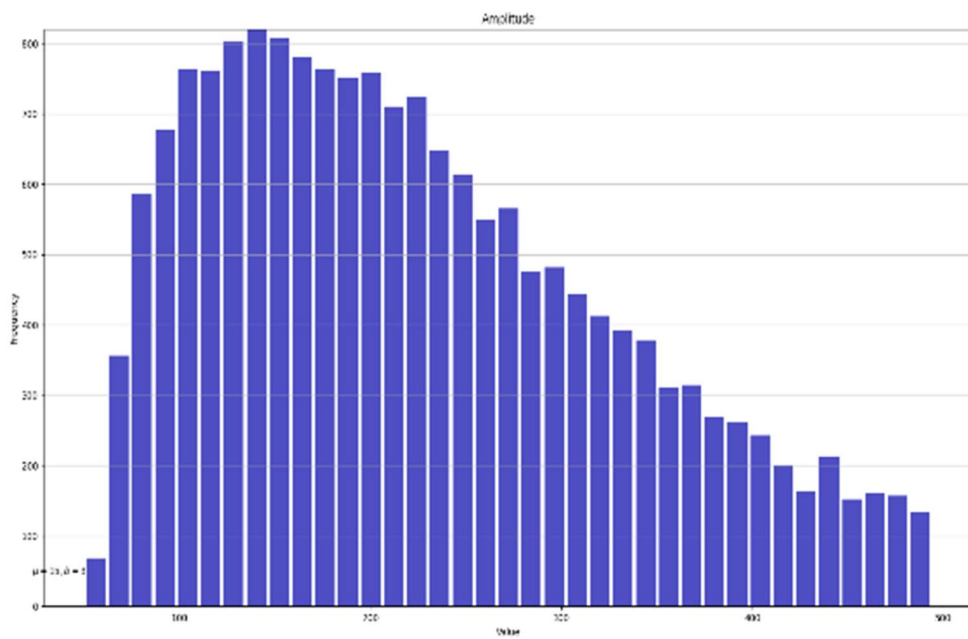
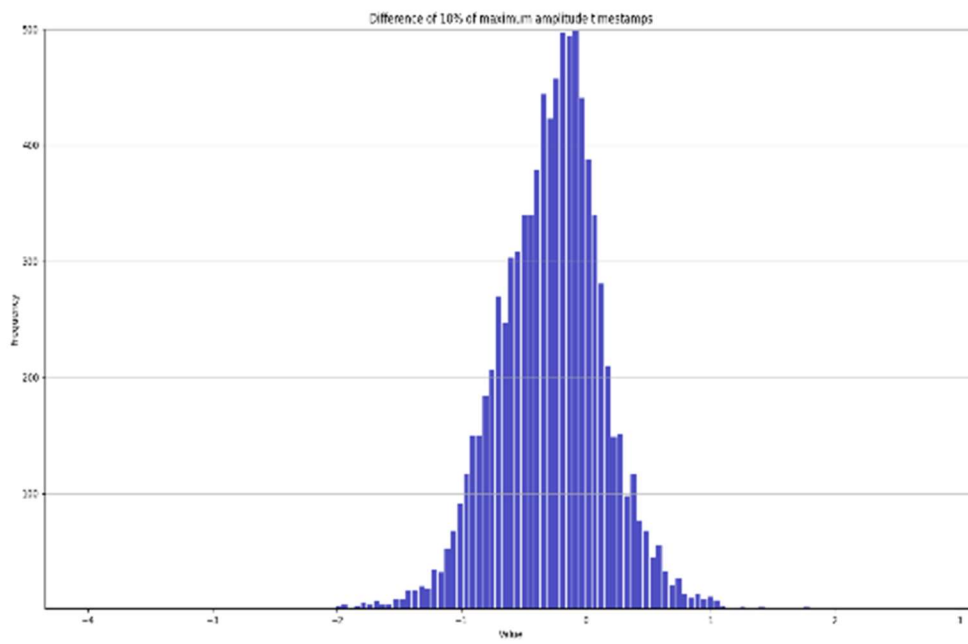
2cm måling:



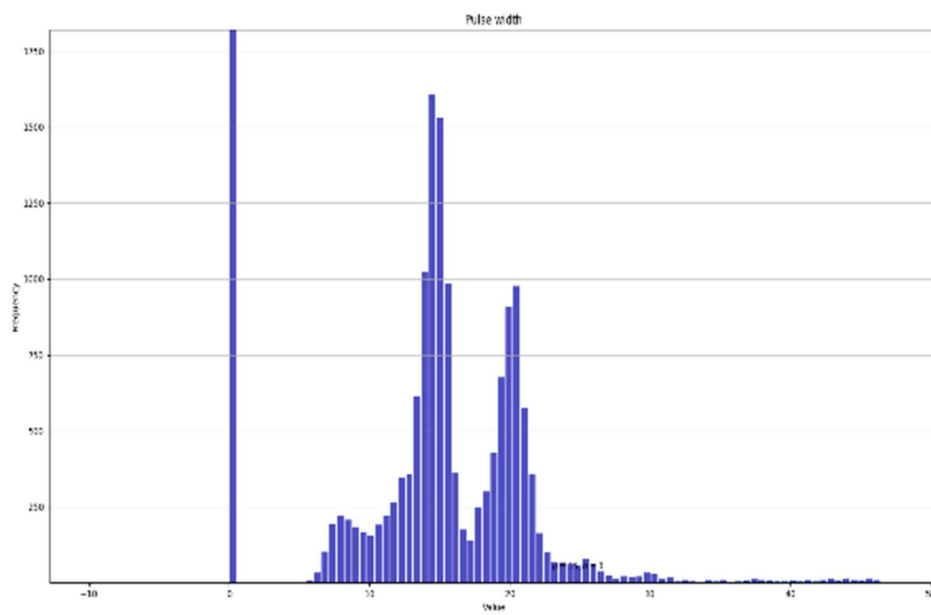
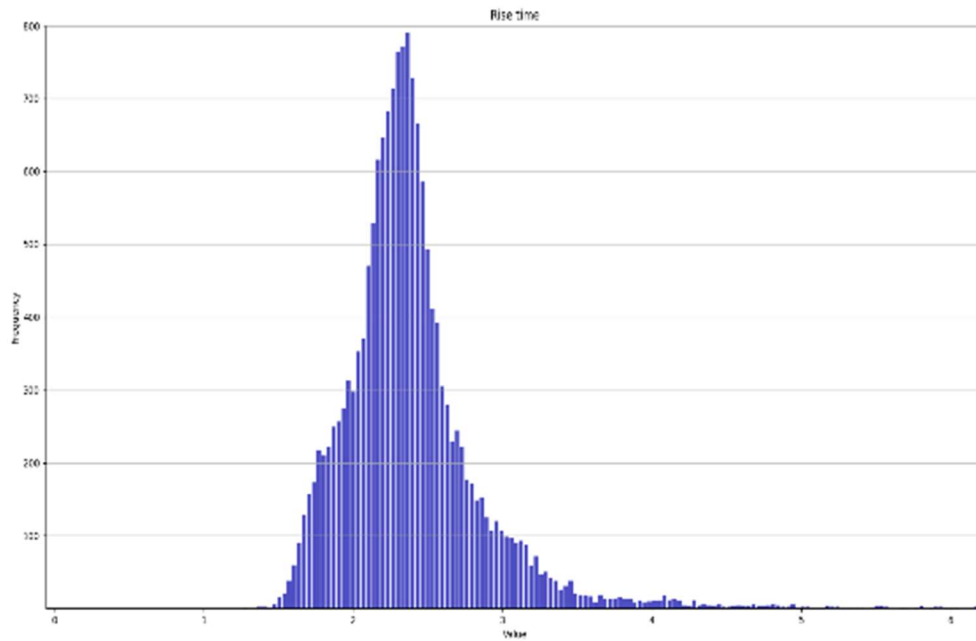


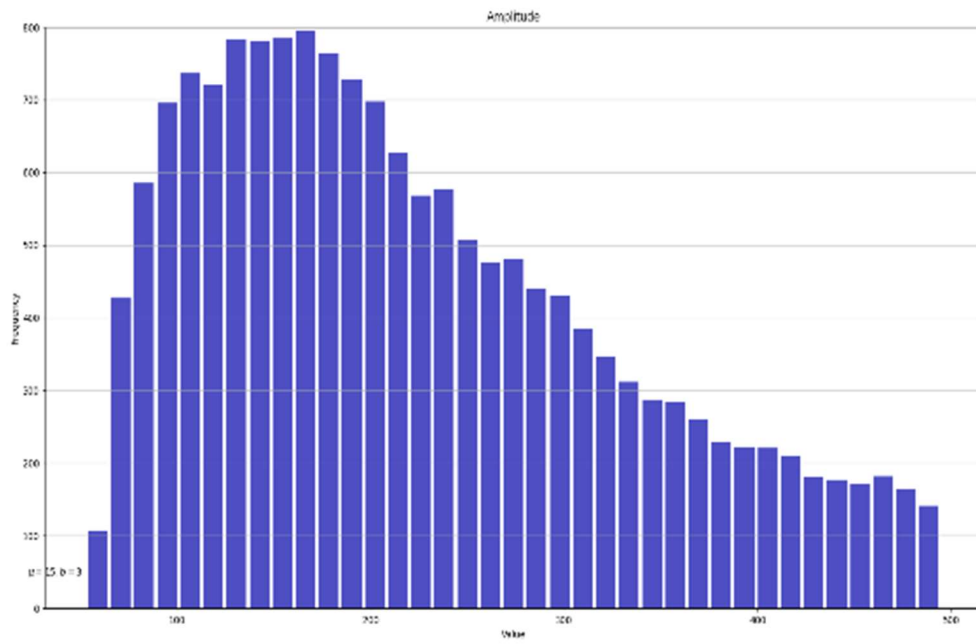
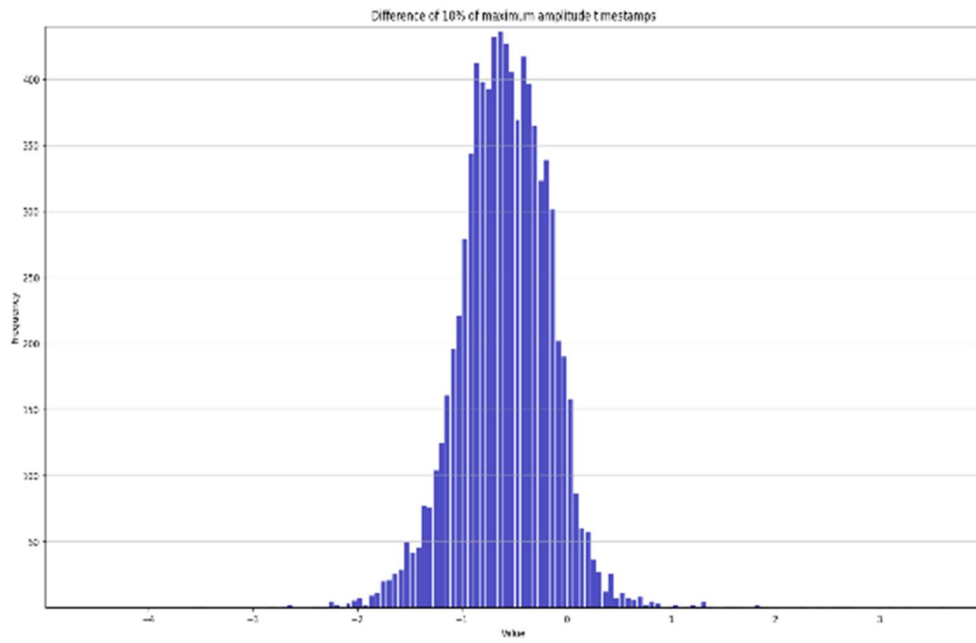
4cm måling:





6cm måling:





8cm måling:

