

Haakon Aleksander Dahl  
Simon Kjøpstad Finnøy  
Simen Rudsengen Hansen  
Per Måløy

## Dimensjonering av LED-anlegg med svært høye startstrømmer

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi  
Veileder: Eilif Hugo Hansen  
Mai 2023



Haakon Aleksander Dahl  
Simon Kjøpstad Finnøy  
Simen Rudsengen Hansen  
Per Måløy

# **Dimensjonering av LED-anlegg med svært høye startstrømmer**

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi  
Veileder: Eilif Hugo Hansen  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



**NTNU**

Kunnskap for en bedre verden



## Bacheloroppgave BIELEKTRO

<b>Oppgavetittel</b> Dimensjonering av LED-anlegg med svært høye startstrømmer	
<b>Project title:</b> Design of electrical installations with high inrush currents from LED luminaires	
<b>Gruppedeltakere</b> Haakon Aleksander Dahl    tlf: 93468479    e-post: haakonad@ntnu.no Simon Kjøpstad Finnøy    tlf: 99495319    e-post: simonkf@ntnu.no Simen Rudsengen Hansen    tlf: 41333884    e-post: simerh@ntnu.no Per Måløy    tlf: 45095556    e-post: perwd@ntnu.no	<b>Prosjektnummer:</b> E2329 <b>Innleveringsdato:</b> 22.05.2021 <b>Gradering:</b> <input checked="" type="checkbox"/> åpen <input type="checkbox"/> lukket
<b>Studium:</b> Elektroingeniør - BIELEKTRO	
<b>Studieretning:</b> Elkraft og bærekraftig energi	
<b>Intern Veileder:</b> Eilif Hugo Hansen	
<b>Institutt:</b> Institutt for elektrisk energi	
<b>Oppdragsgiver:</b> Norconsult	
<b>Kontaktperson:</b> Bjørn Sveberg, bjørn.sveberg@norconsult.no, 97753790	
<b>Stikkord:</b> Dimensjonering, LED-anlegg, startstrømmer, LED-lysrør, utløserkarakteristikk	<b>Key Words:</b> Designing, LED installations, inrush current, LED tubes, circuit breaker characteristics



## Sammendrag

Denne oppgaven har forsket på startstrømmer fra LED-drivere og metoder for å øke antall LED-armaturer på en kurs, samt hvilken innvirkning kabellengde og nettsystem har. Den har også undersøkt om utskifting av lysstoffrør til LED-lysrør vil introdusere problemer med startstrøm på eksisterende anlegg.

Målinger av startstrøm og stasjonær strøm ble gjennomført på LED-anlegg ved NTNU og Studentersamfundet i Trondheim. Resultatet indikerer at startstrømsdataen for armaturene stemmer godt. Målingene viste at anleggene er overdimensjonert med tanke på nominell strøm.

På Studentersamfundet ble tre kurser sammenkoblet til ett vern og målt til en startstrøm på 728A, som førte til at vernet løste ut hver gang. En startstrømbegrenser ble testet og resultatet viste at den begrenset strømmen ned til 48A, og muliggjorde reduksjon av tre kurser til én uten at vernet løste ut. Et nullgjennomgangsrelé ble også testet og startstrømmen ble betydelig redusert. Vernet løste derimot fortsatt ut og reléet fungerte ikke like godt som begrenseren. Resultatene indikerte imidlertid at reléet kan fungere ved lavere strømmer.

Utløserkarakteristikken til C16-vern ble testet og sammenlignet med impulsutløserkurvene fra Siemens, ABB og Eaton. Resultatene viste at Siemens-kurven stemte godt overens med vernet, mens ABBs kurve var mindre treffsikker og Eatons kurve stemte dårlig. En generell kurve ble utviklet og testet opp mot databladet til 109 ulike armaturer. Hensikten var å se om kurven tillater flere armaturer per kurs enn databladet oppgir. Resultatene varierte veldig mellom ulike armaturer, og metoden egner seg derfor ikke til å dimensjonere LED-anlegg på generell basis.

Det kunne ikke påvises betydelig forskjell i startstrømmen på LED-lysrør, sammenlignet med konvensjonelle lysrør. Det kunne heller ikke påvises noe forskjell på startstrømmene med IT- eller TN-nett. Målingen viste at kabellengde kan være med på å dempe størrelsen på startstrømmen.





# Abstract

This thesis has investigated inrush currents from LED drivers and methods to increase the number of LED luminaires on a single circuit. Additionally, the study has examined whether replacing fluorescent tubes with LED tubes would introduce issues with inrush current in existing installations. The influence of cable length and different power distribution systems on the inrush current was also considered.

Measurements of inrush current and steady-state current were conducted on LED installations at NTNU and Studentersamfundet in Trondheim. The results indicates that the given inrush current data for the LED-luminaires are correct. The measurements revealed that the installations are over-dimensioned in relation to the nominal current. At Studentersamfundet, three circuits were interconnected to a single circuit breaker, resulting in a measured starting current of 728A, which caused the circuit breaker to trip every time.

An inrush current limiter was tested. The results showed that it successfully limited the current to 48A, allowing the reduction of three circuits to one without tripping the circuit breaker at Studentersamfundet. A zero-crossing relay was also tested, and it significantly reduced the inrush current. However, the circuit breaker still tripped, indicating that the relay did not perform as effectively as the inrush current limiter. Nevertheless, the results suggested that the relay may function well at lower inrush currents.

The tripping characteristics of C16 circuit breakers were tested and compared to the impulse tripping curves from Siemens, ABB, and Eaton. The results showed that the Siemens curve closely matched their circuit breaker, while ABB's curve was less accurate, and Eaton's curve did not coincide. A general curve was developed and tested against the datasheets of 109 different luminaires. The purpose was to determine if the curve allows for more luminaires per circuit breaker than stated in the datasheets. The results varied greatly among different luminaires, and therefore, this method is not suitable for general dimensioning of LED installations.

The results of the experiment conducted on LED and fluorescent tubes suggest that there is not a considerable difference between the tubes in inrush currents. Nor could it be proven that there was a difference in inrush current between IT and TN power systems. The experiments did however prove that increasing the cable length reduces the inrush current.



## Forord

Denne bacheloroppgaven er avsluttende oppgave for fire studenter ved bachelorstudiet Elektroingeniør med studieretning Elkraft og bærekraftig energi, ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2023. Bacheloroppgaven har et omfang på ca. 550 timer per student, som tilsvarer 20 studiepoeng. Oppgaven er gitt av Norconsult, som er Norges største tverrfaglige rådgiverbedrift.

Denne oppgaven tar for seg startstrøms-problematikken ved LED-anlegg, og det har blitt gjort forsøk for å komme frem til alternative metoder for å dimensjonere LED-anlegg på. Oppgaven har hatt en svært praktisk tilnærming, har bydd på utfordringer og gitt mye lærdom innenfor et tema som vi er interesserte i.

Vi ønsker å benytte anledningen til å takke intern veileder fra NTNU i Trondheim, førsteamanuensis Eilif Hugo Hansen, for stor hjelp til gjennomføringen av oppgaven og som har gitt gode innspill underveis. Det rettes også en takk til Bjørn Sveberg i Norconsult for oppgaven og for god veiledning samt faglige innspill. Til slutt vil det rettes en takk til Servicelaben ved NTNU som har vært svært behjelpelig med både utstyr og måleoppsett. I tillegg vil vi rette en takk til personer vi har vært i kontakt med, som har vært svært behjelpelig med svar på spørsmål.

Haakon A. Dahl  
Haakon Aleksander Dahl

Simon K. Finnøy  
Simon Kjøpstad Finnøy

Simen R. Hansen  
Simen Rudsengen Hansen

Per Måløy  
Per Måløy

Trondheim, Mai 2023



# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Forord</b>	<b>vii</b>
<b>Innhold</b>	<b>ix</b>
<b>Figurer</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xvii</b>
<b>Ordliste</b>	<b>xix</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avgrensinger	2
1.4 Rapportens struktur	3
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Startstrømmer i LED-belysning	5
2.1.1 Hvordan startstrømmer blir definert	7
2.1.2 IEC 63129:2020	7
2.2 Kraftelektronikken bak LED-drivere	8
2.2.1 Likerettere og DC-DC omformere	8
2.2.2 Oppladning og utladning av kondensatorer	8
2.3 Ulike faktors innvirkning på startstrømmen	11
2.3.1 Kabelens innvirkning på startstrømmen	11
2.3.2 Sammenheng mellom startstrøm og antall armaturer	11
2.4 Vern i elektriske anlegg	12
2.4.1 Enpolet og topolet vern	13
2.5 Oppgitt produsentdata	14
2.6 Hvordan blir det dimensjonert	15
2.6.1 Trefase-anlegg	16
2.6.2 Miljømessige hensyn ved dimensjonering	16
2.7 Hvordan dimensjonere for å begrense problemet	17
2.7.1 Impulsutløserkurve	17
2.7.2 Startstrømbegrensere	20
2.7.3 Nullgjennomgangsrelé	22
2.7.4 Pris	23
2.8 Lysrør	23
2.9 Måleutstyr og usikkerhet	24
2.9.1 Tangamperemeter	24
2.9.2 Oscilloskop	24
2.9.3 FLUKE 435-II	27

2.9.4	Beregning av standardavvik og kombinert usikkerhet	27
2.10	Overharmoniske frekvenskomponenter og deres innvirkning på målinger	28
<b>3</b>	<b>Metode og utstyr</b>	<b>31</b>
3.1	Målinger på anlegg	31
3.1.1	Presentasjon av anlegg på NTNU	32
3.1.2	Måling på NTNU	38
3.1.3	Målinger på Studentersamfundet	41
3.1.4	Behandling av måledata fra anlegg	43
3.2	Målinger på lab	45
3.2.1	Test av startstrømbegrensere og nullgjennomgangsrelé	45
3.2.2	Utløserkarakteristikk til vern	47
3.2.3	Startstrøm på LED-lysrør	52
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>55</b>
4.1	Målinger på anlegg	55
4.1.1	Måling på NTNU	55
4.1.2	Måling på Studentersamfundet	57
4.2	Målinger på lab	61
4.2.1	Test av strømbegrensere og nullgjennomgangsrelé	61
4.2.2	Utløserkarakteristikk for vern	62
4.2.3	Måling av startstrømmen på LED-lysrør	81
4.3	Resultater av FFT-analyse	82
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>83</b>
5.1	Målinger på anlegg	83
5.1.1	Målinger ved NTNU	83
5.1.2	Måling på Studentersamfundet	85
5.2	Målinger på lab	86
5.2.1	Test av strømbegrensere og nullgjennomgangsrelé	86
5.2.2	Utløserkarakteristikk til vern og Universalkurve	86
5.2.3	Målinger på LED-lysrør	90
5.3	Lønnsomheten av startstrømbegrensere og nullgjennomgangsrelé	92
5.4	Usikkerhet og mulige feilkilder	93
5.4.1	Innstillinger på oscilloskop	93
5.4.2	Samplingsfrekvens på oscilloskop	93
5.4.3	Undersøkelse av båndbredde og FFT	94
5.4.4	Gjennomføring av målinger på anlegg	94
5.4.5	Databehandling	95
5.4.6	Ulikhet mellom startstrømmer på samme målinger på forskjellige dager	95
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>97</b>
6.1	Videre arbeid	98
	<b>Bibliografi</b>	<b>99</b>
<b>A</b>	<b>Informasjon om Måleutstyr</b>	<b>103</b>
A.1	Tangamperemeter	103
A.2	Oscilloskop	103
<b>B</b>	<b>Kurver fra forsøk av utløserkarakteristikk</b>	<b>105</b>
<b>C</b>	<b>Oversikt over målinger av startstrøm på NTNU</b>	<b>113</b>
C.1	Startstrømmer	113
C.2	Pulsbredde	114
C.3	Strømforhold i anlegg	114

<b>D</b>	<b>Oversikt over resultat fra måling av startstrøm fra PC- strømforsyninger</b>	<b>115</b>
<b>E</b>	<b>Impulsutløserkurver til ABB og Eaton sammenliknet med alle målinger gjort på C16-vern</b>	<b>117</b>
<b>F</b>	<b>Beregning av usikkerhet for målinger av utløserkarakteristikk</b>	<b>119</b>
	F.1 Vertikal usikkerhet	119
	F.2 Horisontal usikkerhet	121
<b>G</b>	<b>Tabell fra test av universalkurven</b>	<b>123</b>
<b>H</b>	<b>Oversikt over målinger på startstrømmer ved konvensjonelle lysrør og LED-lysrør</b>	<b>127</b>
<b>I</b>	<b>Oversikt over målinger på innvirkning fra kabelimpedans på LED-lysrør</b>	<b>129</b>
<b>J</b>	<b>Oversikt over målinger på LED-lysrør ved IT- og TN-nett</b>	<b>131</b>
<b>K</b>	<b>Resultater av FFT-analyse</b>	<b>133</b>
	K.1 FFT for målinger på anlegg	133
	K.2 FFT av målinger på lysrør	136
<b>L</b>	<b>Samplingsfrekvens for lysrør</b>	<b>137</b>
<b>M</b>	<b>Populærvitenskapelig artikkel</b>	<b>139</b>





# Figurer

2.1	Sinusformet spenningskurve med fasereferanser. . . . .	6
2.2	Definisjon av en standard startstrømpuls [4]. . . . .	7
2.3	Oppbygging av LED-driver [6]. . . . .	8
2.4	Enkel kondensatorkrets, før $t=0$ har bryteren stått slik at kondensatoren er fullt oppladet til spenningen $U$ . . . . .	9
2.5	Spenning (rød) og strøm (blå) under utladning av kondensator. . . . .	11
2.6	Skjerm bilde av utløserkarakteristikken til Schneider iC60 RCBO C16 fra Febdok. . . . .	12
2.7	Et LED-anlegg med en kurs. . . . .	15
2.8	Et LED-anlegg med tre kurser. . . . .	15
2.9	Impulsutløserkarakteristikk for ABB S 200/S 200 M. Gjengitt med tillatelse. <sup>1</sup> . . . . .	17
2.10	Impulsutløserkarakteristikk for Siemens 5SY. Gjengitt med tillatelse. <sup>2</sup> . . . . .	18
2.11	Impulsutløserkarakteristikk for Eaton [17]. . . . .	19
2.12	To ulike varianter av startstrømbegrensere fra CAMTEC. Bildene er gjengitt med tillatelse. . . . .	20
2.13	Koblingskjema ESB101.LED [20]. Gjengitt med tillatelse. <sup>3</sup> . . . . .	21
2.14	Sammenlikning av innkoblingsforløpet til standard relé og nullgjennomgangsrelé [21]. . . . .	22
2.15	Skjerm bilde av en måling av strøm (blå) og spenning (rosa) gjort med oscilloskopet Rohde & Schwarz RTB2004. . . . .	24
2.16	Prinsippskisse som viser hvordan en kurve kan flyttes for å fylle hele skjermen til skopet, grafen til venstre har null sentrert på y-aksen, mens grafen til høyre har null plassert nederst. . . . .	26
2.17	Illustrasjon av hvordan for lav samplingsfrekvens kan gi unøyaktige målinger. . . . .	27
2.18	Fourier-serier med de første overharmoniske (i rødt) for et firkantet pulstog (i blått), hentet fra brukeren Jim.belk på Wikipedia [33]. . . . .	28
3.1	Oversiktsbilde av Elektrovarmelaben (ikke i målestokk). . . . .	32
3.2	Oversiktsbilde av høystrømbryterlaben (ikke i målestokk). . . . .	33
3.3	Oversiktsbilde av verkstedhallen (ikke i målestokk). . . . .	34
3.4	Oversiktsbilde av varelager (ikke i målestokk). . . . .	35
3.5	Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AQ F3 (ikke i målestokk). . . . .	36
3.6	Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AQ F4 (ikke i målestokk). . . . .	36
3.7	Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F4 (ikke i målestokk). . . . .	37
3.8	Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F5 (ikke i målestokk). . . . .	37
3.9	Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F6 (ikke i målestokk). . . . .	37
3.10	Koblingskjema for måling på anlegg av stasjonær strøm enfase. . . . .	38
3.11	Koblingskjema for måling på anlegg av stasjonær strøm trefase. . . . .	39
3.12	Koblingskjema for måling av startstrøm på anlegg. . . . .	39
3.13	Koblingskjema og måleoppsett med startstrømbegrensere på Samfundet. . . . .	42

3.14	Koblings skjema og måleoppsett med nullgjennomgangsrelé på Samfundet. . . . .	42
3.15	Oppkobling 1: Referanseoppsett. . . . .	46
3.16	Oppkobling 2: Startstrømbegrenser. . . . .	46
3.17	Oppkobling 3: Nullgjennomgangsrelé. . . . .	47
3.18	Utladning av kondensatorbank. . . . .	49
3.19	Oppladning av kondensatorbank. . . . .	50
3.20	Måleoppsett for lysrørarmatur. . . . .	53
4.1	Måledata fra oscilloskop av målingen med høyest startstrøm uten startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé. . . . .	58
4.2	Måledata fra oscilloskop av målingen med høyest startstrøm med startstrømbegrenser innkoblet. . . . .	59
4.3	Måledata fra oscilloskop fra målingen med høyest startstrøm med nullgjennomgangsrelé innkoblet. . . . .	60
4.4	Utløserkarakteristikk for Schneider iC60 RCBO C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	62
4.5	Utløserkarakteristikk for Schneider iC60 RCBO B16 med ABB- og Siemens-kurven. . . . .	63
4.6	Utløserkarakteristikk for Eaton xDigital NdRBM C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	64
4.7	Utløserkarakteristikk for Gewiss GW95277 C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	65
4.8	Utløserkarakteristikk for Chint NB1-64H C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	66
4.9	Utløserkarakteristikk for Bitema C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	67
4.10	Utløserkarakteristikk for ABB S 202M C16 med ABB-kurven. . . . .	68
4.11	Utløserkarakteristikk for ABB S 202M C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	69
4.12	Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med Eaton-kurven. . . . .	70
4.13	Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med tilpasset Eaton-kurve. . . . .	71
4.14	Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med Siemens- og universalkurven. . . . .	72
4.15	Utløserkarakteristikk for Siemens 5SY4316-7 C16 med Siemens-kurven. . . . .	73
4.16	Alle målingene gjennomført på C16 vern samlet. . . . .	74
4.17	Alle målinger av C16 vern bortsett fra Schneider. . . . .	75
4.18	Alle målinger av C16 vern med Siemens-kurven. . . . .	76
4.19	Universalkurven. . . . .	77
4.20	Alle målinger av C16-vern med universalkurven. . . . .	78
4.21	Alle målinger av C16-vern med universal-, ABB- og Siemens-kurven. . . . .	79
4.22	Sammenlikning av antall armaturer tillatt av datablad og Universalkurven. . . . .	80
B.1	Vernet løste ut og resultatet ble beholdt. . . . .	105
B.2	Vernet løste ut og resultatet ble beholdt. . . . .	106
B.3	Vernet løste ut og resultatet ble beholdt. . . . .	106
B.4	Vernet løste ut og resultatet ble beholdt. . . . .	107
B.5	Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt. . . . .	107
B.6	Vernet løste ikke ut og resultatet beholdt. . . . .	108
B.7	Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt. . . . .	108
B.8	Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt. . . . .	109
B.9	Vernet løste ut og resultatet ble forkastet. . . . .	109
B.10	Vernet løste ut og resultatet ble forkastet. . . . .	110
B.11	Vernet løste ut og resultatet ble forkastet. . . . .	110
B.12	Vernet løste ut og resultatet ble forkastet. . . . .	111
E.1	Alle målinger av C16 vern med ABB-kurven. . . . .	117
E.2	Alle målinger av C16 vern med Eaton-kurven. . . . .	118

K.1	Resultater av FFT for 10. måling av startstrøm i Elektrovarmalaben rad 2. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret. . . . .	133
K.2	Resultater av FFT for 15. måling av startstrøm i høystrømbryterlaben. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret. . . . .	134
K.3	Resultater av FFT for måling 0 av startstrøm i verkstedet rad A. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret. . . . .	134
K.4	Resultater av FFT for 7. måling av startstrøm i AQ fordeling F3. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret. . . . .	135
K.5	Resultater av FFT for 4. måling av startstrøm i AQ fordeling F4. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret. . . . .	135
K.6	Resultater av FFT for måling av startstrøm i konvensjonelt lysrør. . . . .	136
K.7	Resultater av FFT for måling av startstrøm i LED-lysrør. . . . .	136
L.1	Skjerm bilde fra oscilloskop av måling på startstrøm til LED-lysrør. . . . .	137



# Tabeller

2.1	Data for sikringskarakteristikkene B, C og D [10]. . . . .	13
2.2	Opgitt data for FlexBend SM340C 35S/940 fra Phillips [12]. . . . .	14
2.3	Utklipp av tabell for antall Phillips Xitanium-drivere per kurs [13]. . . . .	14
2.4	Prisestimat på komponenter og arbeidskraft til elektroinstallasjoner. . . . .	23
3.1	Måleutstyr brukt i elektrovarmelab. . . . .	32
3.2	Måleutstyr brukt i høystrømbryterlab. . . . .	33
3.3	Måleutstyr brukt i verkstedet. . . . .	35
3.4	Måleutstyr brukt i AQ- og AS-fordelingen i kjelleren til Elektrobygget. . . . .	38
3.5	Måleutstyr brukt til målinger på Studentersamfundet i Trondheim. . . . .	41
3.6	Utstyrsliste til test av startstrømmer fra strømforsyning til PC-er. . . . .	45
3.7	Utstyr som ble testet med strømforsyning til PC-er. . . . .	45
3.8	Vern som ble testet. . . . .	47
3.9	Utstyrsliste til test med utladning av kondensatorbank. . . . .	48
3.10	Utstyrsliste til test med oppladning av AC-kondensatorbank. . . . .	49
3.11	Måleutstyr til test av lysrør. . . . .	52
4.1	Gjennomsnitt av målinger tatt på NTNU for startstrøm, pulsbredde og nominell strøm. . . . .	55
4.2	Sammenlikning av målinger i korridor mot oppgitt data fra datablad. . . . .	56
4.3	Målinger tatt på anlegg for utnyttelse av kurskapasitet. . . . .	56
4.4	Gjennomsnittlig startstrøm og pulsbredde fra målinger utført på Studentersamfundet. . . . .	57
4.5	Gjennomsnittlig startstrøm og pulsbredde fra målinger på PC-strømforsyninger. . . . .	61
4.6	Resultat av test av universalkurven opp mot datablad. . . . .	80
4.7	Forskjell på konvensjonell mot vanlig LED-lysrør. . . . .	81
4.8	Startstrømmen med og uten 40m trommel med 1,5mm <sup>2</sup> ledertverrsnitt. . . . .	81
4.9	Differanse på startstrømmer ved TN og IT. . . . .	82
C.1	Målinger tatt på anlegg for startstrømmer og tilhørende usikkerheter. . . . .	113
C.2	Målinger tatt på anlegg for pulsbredde og tilhørende usikkerheter samt In. . . . .	114
C.3	Forholdet mellom startstrøm og nominell strøm. . . . .	114
D.1	Resultater fra målinger med PC-strømforsyninger. . . . .	115
H.1	Resultater fra målinger på konvensjonelt- og LED-lysrør. . . . .	127
I.1	Resultater fra målinger på LED-lysrør med 40m kabeltrommel. . . . .	129
J.1	Resultater fra målinger på forskjell mellom IT- og TN-nett. . . . .	131



# Ordliste

<b>Ord</b>	<b>Forklaring</b>
$I_4$	<i>Største strømmen som ikke fører til elektromagnetisk utkobling. Vernet skal ikke løse ut innen 0,1 sekund ved denne verdien. 12, 19, 71, 87</i>
<b>A/div</b>	<i>Ampere per divisjon, beskriver hvor mange ampere hver linje på et oscilloskops y-akse representerer. 24, 25, 40</i>
<b>CSV</b>	<i>Comma Seperated Values, en tekstfil som består av tallverdier, som kan tolkes av programmer som feks Microsoft Excel. 26, 40, 43, 49, 50</i>
<b>Holdestrømmen</b>	<i>Den maksimale strømmen vernet ikke skal løse ut på. Er også nevnt som <math>I_{hold}</math>. 17, 19, 51, 85–87</i>
<b>Impulsutløserkurve</b>	<i>Kurve hvor man kan lese av holdestrømmen for vernet. 17, 47, 51, 62, 70, 74, 76, 86–88</i>
<b>Prell</b>	<i>Mekanisk vibrasjon mellom kontaktene i en bryter som lukkes. Kan gi støy i strømmen ved innkobling. Omtales også som “bounce”. 90</i>
<b>Samplingsfrekvens</b>	<i>Antall målinger et oscilloskop gjør per sekund, en sample rate på 100 MSa/s vil tilsvare et digitalt signal med <math>100 * 10^6</math> punktprøver per sekund. 26, 103</i>
$T_{50}$	<i>Pulsbredden til startstrømmen. 7, 14, 57, 58, 62</i>
<b>Variac</b>	<i>En variabel AC transformator. 48</i>





# Kapittel 1: Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Norconsult er en tverrfaglig rådgiverbedrift som blant annet dimensjonerer elektriske anlegg. Under dimensjonering av LED-anlegg står de ovenfor utfordringer med startstrømmer. Dagens metoder er ikke ideelle og beslutningsgrunnlaget for alternative løsninger er begrenset.

Ved dimensjonering av belysningsanlegg ønsker man å dimensjonere vern etter den nominelle strømmen anlegget trekker. Det vil si strømmen som går under normale driftforhold. Ettersom LED-armaturer trekker svært lav nominell strøm, kan man potensielt ha veldig mange armaturer på et vern.

En startstrøm er den strømmen som trekkes momentant etter at en last har blitt tilkoblet strømmettet. Det er ikke uvanlig at elektrisk utstyr har startstrømmer. Et vern er i stand til å tåle en viss startstrøm i en kortvarig periode, uten å løse ut. LED-armaturer har derimot svært store startstrømmer som kan være et hundretalls ganger nominell strøm, med en svært kort varighet ned mot 0,2 ms. Den korte varigheten ligger utenfor utløserkarakteristikken som vernprodusenter vanligvis oppgir. Dette gjør det vanskelig å forutsi hvordan vern vil reagere på startstrømmen. Noen produsenter oppgir imidlertid en såkalt impulsutløserkarakteristikk for dette tidsrommet, men dette omtales lite.

Dersom det kobles for mange armaturer på én kurs kan dette medføre at vernet løser ut som følge av den store startstrømmen. Dette betyr at vern må tilpasses startstrømmen istedenfor den nominelle strømmen. Antall armaturer som kan tilkobles et vern oppgis i armaturens datablad, og i mange tilfeller er dette tallet mye lavere enn dersom man kun betrakter den nominelle strømmen. Dette fører til overdimensjonerte anlegg relatert til nominell strøm.

På grunn av et nytt EU-direktiv som fører til utfasing av konvensjonelle lysrør, vil det i tiden fremover bli installert mange nye LED-lysrør som erstatning. Dersom startstrømmen i disse er betydelig større enn i konvensjonelle lysrør kan dette medføre utfordringer i eksisterende anlegg.

Det er ønskelig å finne løsninger som tillater flere armaturer tilkoblet ett vern. Dette vil kunne redusere overdimensjonering og føre til et mer kostnadseffektivt LED-anlegg. Det eksisterer produkter som startstrømbegrensere og nullgjennomgangsreléer som potensielt kan redusere startstrømmene, men hvor godt disse fungerer er ukjent. Samtidig er det interessant å undersøke påvirkningen av faktorer som kabellengde og nettsystem.

## 1.2 Problemstilling

**Hvilke utfordringer oppstår på grunn av startstrømmer i LED-anlegg, og hvordan kan disse løses?**

Problemstillingen kan brytes ned til følgende punkter:

- I hvor stor grad overdimensjoneres LED-anlegg?
- Hvor godt stemmer oppgitt startstrøm i databladet til LED-armaturer?
- Hvor godt fungerer startstrømbegrensere?
- Hvor godt fungerer nullgjennomgangsrelé?
- Hvordan er utløserkarakteristikken til vern i tidsrommet til startstrømmer fra LED-belysning?
- Hvor godt stemmer produsentenes impulsutløserkarakteristikk?
- Kan det utvikles en universalkurve for utløserkarakteristikk til C16-vern som tillater å dimensjonere LED-anlegg med flere tilkoblede armaturer?
- Vil utskifting av konvensjonelle lysrør til LED-lysrør kunne medføre problemer med startstrøm på eksisterende anlegg?
- Hvilken innvirkning har kabellengde og nettsystem på startstrømmen?

For å svare på spørsmålene, er det gjennomført målinger på LED-anlegg og i laboratorium.

## 1.3 Avgrensinger

Oppgaven omfatter ikke detaljert oppbygning av LED-drivere eller eventuelle soft-start teknologier de kan inneholde.

Ved test av utløserkarakteristikk ble det hovedsakelig gjort forsøk på vern med C-karakteristikk etter som disse er vanligst å benytte i LED-anlegg.

Vern med D-karakteristikk har ikke blitt undersøkt i denne oppgaven på grunn av mangel på vern som kan testes, samt for å begrense omfanget til oppgaven.

Innvirkningen av andre begrensende faktorer ved dimensjonering av LED-anlegg, som for eksempel lekkstrømmer til jord, er ikke undersøkt.

## 1.4 Rapportens struktur

Rapporten er delt inn i seks kapitler:

**Innledning** presenterer bakgrunnen, problemstillingen og avgrensningene for rapporten.

**Teori** tar for seg teori som er nødvendig for å forstå innholdet i rapporten.

**Metode og utstyr** presenterer anleggene det er gjort målinger på, måleutstyret, fremgangsmåten for målinger og databehandling.

**Resultat** inneholder grafer og tabeller med beskrivelse.

**Diskusjon** tolker og drøfter resultatet av forsøkene.

**Konklusjon** oppsummerer hva rapporten har kommet fram til og foreslår videre arbeid.



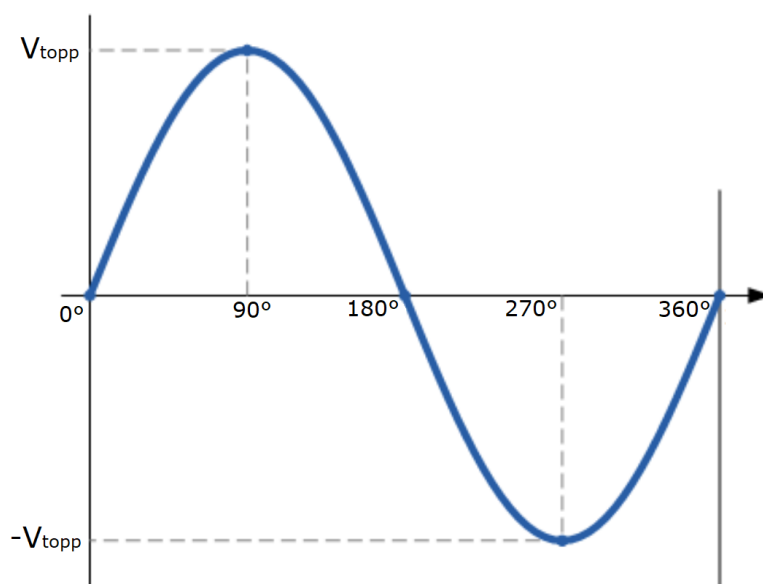
## Kapittel 2: Teori

### 2.1 Startstrømmer i LED-belysning

Startstrømmer har lenge vært et velkjent problem i blant annet motorer og transformatorer. Etter LED har overtatt markedet som den foretrukne lyskilden, har det også blitt økende fokus på startstrømmer fra LED-belysning. Likevel er det ganske stor forskjell på startstrømmene mellom dem. Mens en motors startstrøm kan være rundt fem til syv ganger større enn merkestrømmen [1] i noen få sekunder, kan en LED-armaturs startstrøm ligge på godt over hundre ganger merkestrømmen, men gjerne bare i omtrent 0,2-0,5 ms. Den korte tiden til startstrømmen gjør det ekstra utfordrende siden det er lite informasjon om hvor stor strøm vernet tåler uten å løse ut ved dette området.

Høye startstrømmer kan føre til at vernet løser ut selv om den nominelle strømmen til lasten er langt under vernets merkestrøm, og kan dermed føre til driftsproblemer. Dette gjør det utfordrende å dimensjonere belysningskurser uten å overdimensjonere, da man må ta hensyn til startstrømmene istedenfor den nominelle strømmen utstyret trekker. I tillegg kan utstyr som relèer ta skade av høye startstrømmer. Et relè benyttes ofte til styring av større belysningsanlegg. Er man uheldig kan startstrømmene bli så store at relékontaktene kan bli ødelagte. I visse tilfeller kan kontaktene også sveises sammen, på grunn av lysbue over kontaktene [2].

Startstrømmen stammer fra LED-driveren i armaturen. LED-driverer inneholder diverse kondensatorer. Når LED-driverne kobles til strømmettet, lades disse kondensatorene raskt opp, og det oppstår en startstrøm. Størrelsen på startstrømmen er avhengig av flere faktorer, blant annet impedanser i kabler, utstyr og foranliggende nett. Hvor på sinuskurven spenningen befinner seg i det lasten kobles inn har også mye å si for størrelsen på strømmen.



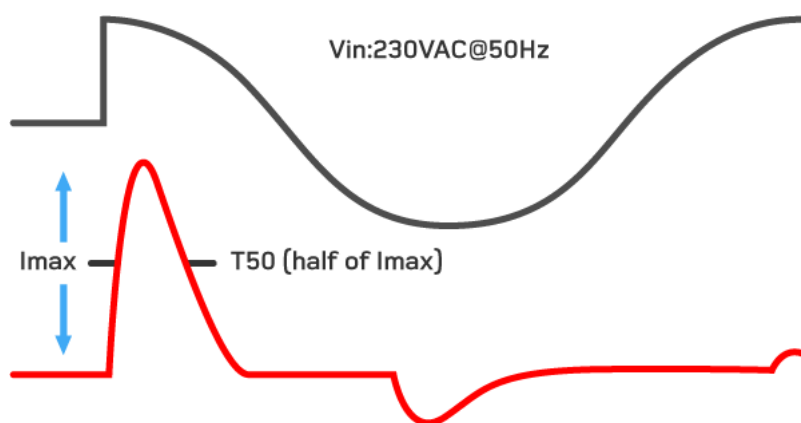
**Figur 2.1:** Sinusformet spenningskurve med fasereferanser.

Figur 2.1 viser hvordan spenningsverdien avhenger av fasen over en sinusperiode. Dersom spenningen er på  $90^\circ$  eller  $270^\circ$ , vil absoluttverdien av spenningen være på sin toppverdi. Motsatt ser man at spenningen er null i det man er på  $0^\circ$  eller  $180^\circ$ .

Størrelsen på startstrømmene i LED-drivere avhenger sterkt av hvor stor spenningen er i innkoblingsøyeblikket. Dersom spenningen i innkoblingsøyeblikket er på toppverdi, altså med fase lik  $90^\circ$  eller  $270^\circ$ , vil startstrømmen bli langt høyere enn dersom man treffer i nullgjennomgang.

### 2.1.1 Hvordan startstrømmer blir definert

Startstrømmene oppgis som en toppverdi med en pulsbredde, gjerne kalt  $T_{50}$ . Figur 2.2 viser hvordan en typisk startstrøm kan se ut. Størrelsen på startstrømmen defineres som amplituden  $I_{max}$ . Pulsbredden til startstrømmen defineres som tiden  $T_{50}$ , som angir tiden det tar for strømmen å nå halvparten av toppverdi på stigende flanke, til den når halvparten av toppverdi på synkende flanke [3].



Figur 2.2: Definisjon av en standard startstrømpuls [4].

### 2.1.2 IEC 63129:2020

International Electrotechnical Commission (IEC) er en internasjonal, ikke-statlig organisasjon som utvikler og publiserer tekniske standarder innen elektrofag. Norge er representert i IEC ved Norsk Elektroteknisk Komité (NEK). Alle IEC-standarder nummereres og merkes med prefikset IEC [5].

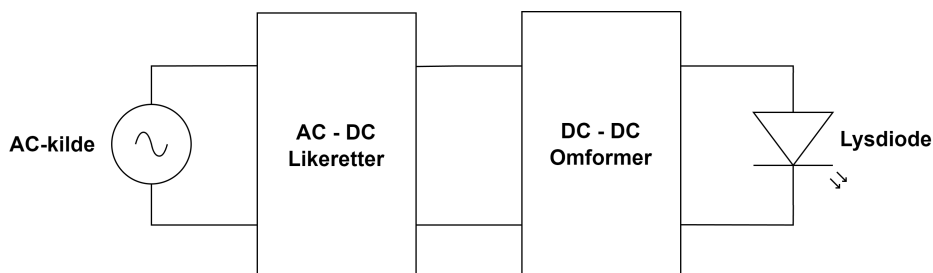
IEC 63129:2020 (NEK EN IEC 63129:2020) beskriver hvordan man, basert på målinger kombinert med beregninger, kan fastslå startstrømskarakteristikken til et enkelt eller flere belysningsutstyr av samme type. Med startstrømskarakteristikk menes toppverdien til startstrømpulsen, samt pulsbredden til startstrømmen. Dokumentet tar bare for seg belysningsutstyr tilkoblet 230V AC-spenning.

Standarden beskriver i detalj to forskjellige metoder for å bestemme startstrømsdataen til belysningsutstyret. Ved å benytte startstrømsdataen funnet fra metoden i standarden, er det mulig å sammenligne dette opp mot oppgitt utløserkarakteristikk fra vernprodusenten, for å finne maksimalt antall enheter per kurs. En metode for å finne ut antall belysningsutstyr man kan ha per vern, er for tiden under vurdering av IEC [3].

## 2.2 Kraftelektronikken bak LED-drivere

### 2.2.1 Likerettere og DC-DC omformere

En LED-drivers formål er å forsyne LED-lys med en likerettet spenning med ønsket størrelse. Dette gjøres ved å først likerette AC-spenningen før den omformes til et passende nivå i en DC-DC omformer. Figur 2.3 viser blokkskjematisk oppbygning av en LED-driver.



Figur 2.3: Oppbygging av LED-driver [6].

Startstrømmen i LED-drivere kommer fra glattekondensatorer i likeretteren og DC-DC omformerens [4]. Ved oppstart vil disse lades opp og trekke en stor strøm. Denne startstrømmen er ikke kun begrenset til LED-drivere, men kan være et problem i annen last som PC-ladere og diverse elektronikk med likerettere.

### 2.2.2 Oppladning og utladning av kondensatorer

#### 2.2.2.1 Oppladning

I utgangspunktet vil en kondensator være utladet i normal tilstand. Den starter å lades opp når spenning blir tilført, for eksempel fra et batteri.

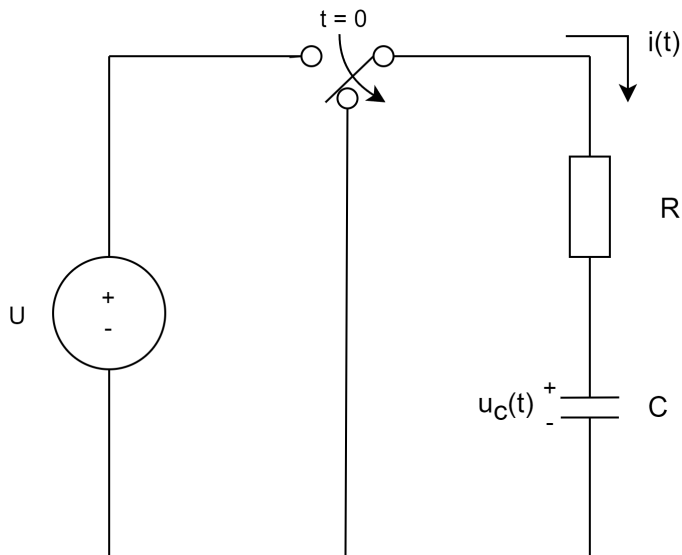
Elektroner beveger seg mot den ene polen til kondensatoren, som gir en negativ ladning her og en elektronfattig plate på den andre siden. Ladningen som blir bygd opp fortsetter å øke inntil den treffer sin maksimumsverdi, som er lik størrelsen på den tilførte spenningen. I dette stadiet er den fullt ladet. Det blir en potensialforskjell mellom platene, slik at kondensatoren får en positiv og en negativ plate. Her er den lagrede energien. For å oppnå dette kreves store mengder strøm for å flytte på elektronene og for å få en positiv og negativ side [7]. Dette er startstrømmen i kretsen, og defineres som:

$$I = C \times \frac{dv}{dt} \quad (2.1)$$

Formelen viser at dersom spenningen er konstant, så er strømmen null. Her kan det da vises hvorfor det ikke går noen strøm gjennom en kondensator dersom den tilføres en stabil DC spenning [8].



## 2.2.2.2 Utladning



**Figur 2.4:** Enkel kondensatorkrets, før  $t=0$  har bryteren stått slik at kondensatoren er fullt oppladet til spenningen  $U$ .

Utladningen skjer når spenningstilførselen til kondensatoren blir fjernet og kondensatorens poler kobles sammen. Da flyter elektronene over til den andre platen. Her vises hvorfor en kondensator kan sammenlignes med et batteri. Elektronene er blitt lagret som potensial som kan tilføres kretsen kondensatoren tilhører når spenningskilden fjernes. Utladning av kondensator er altså å bruke opp den lagrede energien til kondensatoren.

Utladning vil for eksempel skje dersom en kondensatorkrets kortsluttes. Kretsdiagrammet viser en enkel krets med kondensator, bryter og motstand. I  $t=0$  vil det oppstå en utladningsstrøm med verdi  $-\frac{U}{R}$  [A]. Når kretsen er helt utladet, og bryteren skrues på igjen, vil kondensatoren lades opp igjen.

For å finne utladningsstrømmen brukes Kirchoffs spenningslov:

$$u_c + iR = 0 \Rightarrow u_c + RC \frac{du_c}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

$$u_c = -RC \frac{du_c}{dt} \Rightarrow \frac{du_c}{u_c} = -\frac{dt}{RC}$$

Videre integreres begge sider, og får integreringskonstanten " $C_1$ ":

$$\int \frac{du_c}{u_c} = -\int \frac{dt}{RC} \quad (2.3)$$

$$\ln(u_c) = -\frac{t}{RC} + C_1$$

Ved  $t = 0$  er  $u_c = U$ :

$$\ln(U) = -\frac{0}{RC} + C_1 \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow C_1 = \ln(U)$$

Dette settes deretter tilbake i likning (2.3).

$$\begin{aligned}
 \ln(u_c) &= -\frac{t}{RC} + \ln(U) \\
 \Rightarrow \frac{u_c}{U} &= e^{-\frac{t}{RC}} \\
 \Rightarrow u_c &= Ue^{-\frac{t}{RC}}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Disse utregningene brukes så for å finne utladningsstrømmen:

$$\begin{aligned}
 i_c &= -\frac{u_c}{R} = -\frac{1}{R}Ue^{-\frac{t}{RC}} \\
 &= -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{RC}} = -Ie^{-\frac{t}{RC}}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

$$i_c = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \tag{2.7}$$

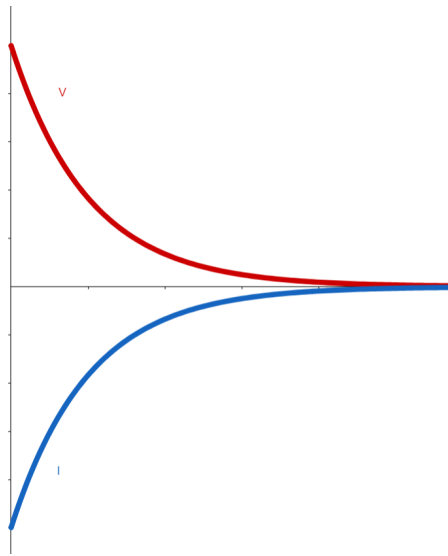
Tilsvarende kan oppladningen av en kondensator vises å være gitt med formel (2.8) og (2.9).

$$u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \tag{2.8}$$

$$i_c = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \tag{2.9}$$

$R \cdot C$  kalles for tidskonstanten og skrives ofte som  $\tau$ . Fra formel (2.7) og (2.9) kommer det fram at kondensatorstrømmen avhenger av tidskonstanten. Med større motstand og kapasitans i kretsen vil utladningen være lenger. Formelen viser også at den største strømmen i kondensatoren oppstår umiddelbart etter innkobling, med en størrelse som defineres av spenningen og resistansen i kretsen.

Strøm og spenning ved utladning av en kondensator vises som funksjon av tid i figur 2.5. Dette er en teoretisk utladningskurve. I praksis vil det være induktive elementer fra kabler og trafoer som har innvirkning på strømforløpet.



Figur 2.5: Spenning (rød) og strøm (blå) under utladning av kondensator.

## 2.3 Ulike faktorerers innvirkning på startstrømmen

### 2.3.1 Kabelens innvirkning på startstrømmen

Kabelens lengde og tverrsnitt påvirker strømmen den evner å levere. Resistansen i kabelen øker når lengden øker, men reduseres når tverrsnittet øker. Resistansen i en leder kan beregnes med formel (2.10), hvor  $\rho$  er den spesifikke motstanden,  $l$  er lengden og  $A$  er tverrsnittet til lederen. Den spesifikke motstanden til en leder er en materialkonstant som forteller noe om hvor godt et materiale leder strøm [9].

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (2.10)$$

Formel (2.7) viser at størrelsen på strømmen i en kondensator avhenger av resistansen i kretsen. Ettersom en lenger kabel har høyere resistans vil opp- og utladningsstrømmene i en kondensator bli lavere og få lenger varighet når kabellengden blir lenger.

### 2.3.2 Sammenheng mellom startstrøm og antall armaturer

Ved å øke antall armaturer eller drivere som er parallellkoblet i et anlegg, øker også den totale startstrømmen til anlegget. Det er mulig å anslå startstrømmen til et LED-anlegg ved å gange opp antall armaturer med startstrømmen per armatur. Dette anslaget anbefales blant annet i IEC 63129:2020 og av flere lysprodusenter ettersom det gir et anslag på den største startstrømmen man kan forvente på en kurs.

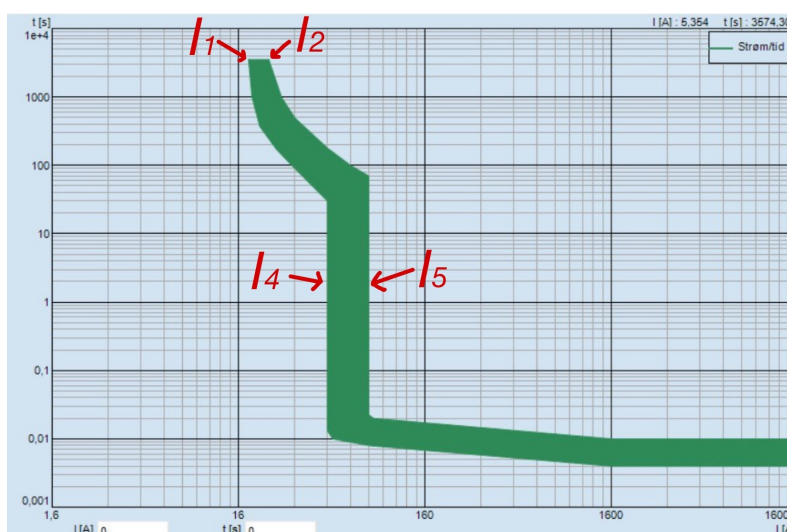
## 2.4 Vern i elektriske anlegg

Et overstrømsvern har i oppgave å beskytte det elektriske anlegget mot overbelastning og kortslutning. Det brukes for å beskytte en kurs, som er en inndeling av det elektriske anlegget. Vernet plasseres som regel i et fordelingsskap, hvor det vanligvis benyttes en automatsikring med innebygd jordfeilvern, også kalt jordfeilautomat. Ved større belyningsanlegg, for eksempel kontorlokaler, er det vanlig med egne kurser for belyningsanlegget.

En automatsikring har både en termisk og en elektromagnetisk utløserdel. Den angis med utløserkarakteristikker, som forteller hvor lang tid vernet bruker på å reagere på overstrømmer. Figur 2.6 viser et eksempel på hvordan en utløserkarakteristikk kan se ut.

Den termiske utløserdelen, som er det krumme området i figur 2.6, har en utløsertid på opptil én time, og sørger for utkobling ved mindre overstrømmer. Dette tillater at man kan overbelaste kablet litt, men bryte strømmen før det oppstår skadelig oppvarming [10].

Den elektromagnetiske utkoblingsdelen er den vertikale delen i figuren. Den har en utløsertid som er mindre enn 0,1s, og løser ut vernet momentant. Om vernet kobler ut termisk eller elektromagnetisk kommer an på størrelsen til strømmen.



**Figur 2.6:** Skjerm bilde av utløserkarakteristikken til Schneider iC60 RCBO C16 fra Febdok.

Standard utløserkarakteristikker for automatsikring benyttet i husholdninger og lignende installasjoner er B, C og D [11]. Grenseverdiene til utløserkarakteristikken benevnes med  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_4$  og  $I_5$ .

- $I_1$  er den største strømmen vernet skal tåle i 1 time uten at det løser ut.
- $I_2$  er den minste strømmen som vernet garantert skal løse ut på innen 1 time.
- $I_4$  er den største strømmen som ikke fører til elektromagnetisk utkobling. Vernet skal ikke løse ut innen 0,1 sekund ved denne verdien.
- $I_5$  er den minste strømmen som skal føre til elektromagnetisk utkobling. Vernet skal løse ut innen 0,1 sekund ved denne verdien.

Utløserkarakteristikk	Merkestrømsområde [A]	Ikke utkobling I4	Utkobling senest ved I5
B	6-63	$3 \times I_n$	$5 \times I_n$
C	6-63	$5 \times I_n$	$10 \times I_n$
D	6-63	$10 \times I_n$	$20 \times I_n$

**Tabell 2.1:** Data for sikringskarakteristikkene B, C og D [10].

Dersom automatsikringen løser ut som følge av en startstrøm i et LED-anlegg, vil det være en elektromagnetisk utkobling. Tabell 2.1 viser prøvestrømmen for elektromagnetisk utløsning. Dette angis med antall ganger nominell strøm, som er det sikringen tillater i normal drift. Har man en 16A sikring med B-karakteristikk, skal ikke vernet løse ut momentant før det overstiger en verdi på  $3 \times 16A$ .

Utløserkarakteristikk-kurver i henhold til standarden IEC 60898-1 er ikke påkrevd å inneholde strømmer med varighet rundt 0,2 ms, og det er heller ikke vanlig å oppgi dette. Dette gjør det krevende å vite hvor stor startstrøm fra LED-anlegg vernet tåler før det løser ut, ettersom varigheten ligger utenfor den oppgitte karakteristikken.

### 2.4.1 Enpolet og topolet vern

Det er i verdenssammenheng vanlig å benytte enpoledde vern. Dette medfører at mye av tilgjengelig data tar utgangspunkt i enpoledde vern. I Norge benyttes det vanligvis kun flerpoledde vern i lavspentinstallasjoner. De bryter og beskytter alle lederne tilkoblet fra overstrømmer.

Bruken av topolet sikring kommer fra utbredt bruk av IT-nett i Norge. Her stilles det krav til topolet vern. NEK400:2022 er normen benyttet i elektriske lavspenningsinstallasjoner og stiller følgende krav:

- **431.1** alle kurser skal beskyttes av et overstrømsvern som skal koble ut alle spenningsførende ledere.
- **431.3.2.1** åpner opp for at man i TN-nett ikke trenger å beskytte nøytralleder mot overbelastningsstrømmer med visse betingelser.
- **431.3.2.1 Veiledning 1** anbefaler sterkt å bruke topolet overbelastningsvern hvor både nøytralleder og faseleder beskyttes og kobles ut og inn samtidig.
- **537.2.1.1** stiller krav til at faselederne blir frakoblet samtidig som nøytralleder, som gjør at det kreves minst 1+N-vern som beskytter og bryter tilførsellederen, og samtidig bryter nøytralleder.

I praksis medfører dette at det benyttes som oftest de samme topoledde vernene også for TN-nett.

Det finnes også vern ment for tre-faset anlegg. Ved IT-nett så har man et trepolet vern som bryter og i tillegg beskytter alle lederne. I TN-nett kan man også ha et trepolet vern som har tilkobling for alle tre fasene, men også faseleder. Denne bryter og beskytter alle fasene, og i tillegg bryter nøytralleder. Alternativt kan man benytte et firepolet vern, som også beskytter nøytralleder mot overbelastningsstrømmer.

## 2.5 Oppgitt produsentdata

Produsentene av LED-belysning oppgir ulik informasjon om startstrømmene. De fleste oppgir et maksimalt antall armaturer man kan ha per kurs, spesifisert med vernstørrelse og karakteristikk. Andre oppgir en toppverdi på startstrømmen, med en pulsbredde (startstrømsid), for én armatur. Noen oppgir også begge deler. Et eksempel på sistnevnte er produsenten Phillips Lightning. De oppgir god informasjon om startstrøm, pulsbredde og maksimalt antall per kurs på de aller fleste av armaturene sine.

Drift og elektrisk	
Inngangsspenning	220 til 240 V
Inngangsfrekvens	50 til 60 Hz
Effektforbruk (CLO)	25 W
Gjennomsnittlig strømforbruk	-W
Startstrøm	25,1 A
Startstrømsid	0,214 ms
Strømfaktor (min.)	0.9
Antall produkter på MCB av 16 A type B	15

**Tabell 2.2:** Oppgitt data for FlexBend SM340C 35S/940 fra Phillips [12].

Av databladet til FlexBend SM340C 35S/940 fra Phillips, vist i figur 2.2, kan man se at denne armaturen har en startstrøm på 25,1A med pulsbredde  $T_{50}$  på 0,214 millisekunder. I tillegg oppgis det at man kan ha maksimalt 15 armaturer på et 16A-vern med B-karakteristikk.

Vernkarakteristikk	Nominell vernstørrelse (A)	Relativt antall LED-drivere (%)
B	10	63
B	16	100 (referanse)
C	10	104
C	16	170

**Tabell 2.3:** Utklipp av tabell for antall Phillips Xitanium-drivere per kurs [13].

Dersom man ønsker å bruke andre vern enn B16, har Phillips også en tabell for dette. Tabell 2.3 viser et utklipp av Phillips sin tabell for å bestemme maksimalt antall Xitanium-drivere per kurs med forskjellige vernstørrelser og karakteristikk. Denne dataen er basert på et anlegg med en linjeimpedans på 400 mΩ. Det skal med en kobberkabel med ledertversnitt 2,5mm<sup>2</sup>, tilsvare 15 meter til første armatur, og ytterligere 20 meter til midten av sløyfen [13].

Phillips oppgir også at tallene gjelder for bruk av enpolet vern, og anbefaler å redusere antall armaturer per kurs med 20% dersom man benytter flerpoled vern [13], uten at det oppgis noen begrunnelse for dette. I Norge brukes det i veldig stor grad flerpoled vern, så denne anbefalingen vil derfor være aktuell å følge. Ved å bruke tabellen kan man finne ut hvor mange flere armaturer man kan ha på andre typer vern ved hjelp av formel 2.11.

$$\text{Maks drivere} = \text{Maks drivere (referansevern)} \times \frac{\text{Relativt antall LED-drivere (fra tabell)}}{100} \quad (2.11)$$

Fra figur 2.2 ser man at maksimalt antall armaturer av typen FlexBend SM340C 35S/940 er 15 for et B16-vern. Denne verdien inkluderer ikke reduksjonsfaktoren som er anbefalt ved bruk av flerpoledet vern. Ved å bruke formel 2.11 kan man enkelt regne ut hvor mange drivere man kunne hatt dersom man hadde benyttet et C16-vern. Her inkluderes også en reduksjonsfaktor på 0,8, ettersom man går ut i fra at vernet er flerpolet:

$$\text{Maks drivere}_{C16} = 15 \times 0,8 \times \frac{170}{100} = 20,4 \approx \mathbf{20 \text{ drivere}}$$

Det er verdt å merke seg at det ikke oppgis hvilke vern Phillips har tatt utgangspunkt i for disse tallene, da det kan være forskjell mellom ulike vernprodusenter. I tillegg er dette begrenset til Phillips Xitanium-drivere, og ikke nødvendigvis representativt for andre drivere.

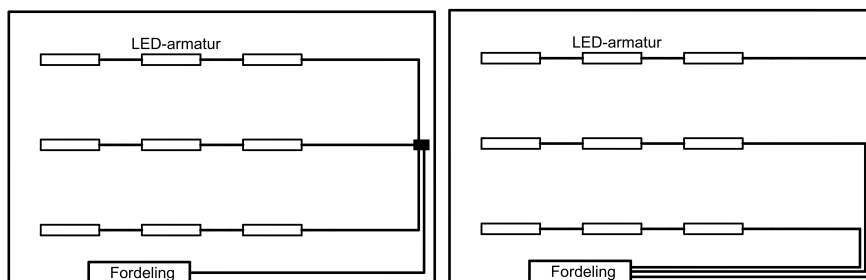
## 2.6 Hvordan blir det dimensjonert

I følge Norconsult pleier de å følge anbefalingene i databladet når det kommer til antall armaturer de kan ha på et vern. Vernstørrelse og utløserkarakteristikk velges utifra hva som passer best med antall armaturer som anlegget skal ha. Det er ønskelig å belaste kursen med 50-80 % av tilgjengelig kapasitet. I utgangspunktet benyttes det vanligvis C-karakteristikk ettersom prisen er tilnærmet lik prisen for B-karakteristikk, men gir mulighet til å montere flere armaturer per kurs. Det er mulig å dimensjonere anlegget med både topolet og trepolet vern.

Hvor mange kurser som er nødvendig, kommer da an på hvor mange armaturer man skal ha og hvor mange man kan ha på et vern. Hver kurs trenger egen kabel fra fordelingen til anlegget. Dersom LED-anlegget krever tre vern, trengs det også tre separate kabler fra fordelingen til armaturene. Dette medfører ekstrakostnader for både kabel, vern og arbeidstimer. Det er derfor mest kostnadseffektivt å ha flest mulig armaturer på et vern, og ha færrest mulig vern.

Det må nevnes at det finnes flere faktorer enn startstrømmen som er med på å bestemme hvordan anlegget blir dimensjonert. Dette inkluderer blant annet hvordan anlegget skal styres, og mulighet for senere utvidelser.

Figur 2.7 og 2.8 viser prinsipiell forskjell på kabling av LED-anlegg inndelt i én eller tre kurser.



Figur 2.7: Et LED-anlegg med en kurs.

Figur 2.8: Et LED-anlegg med tre kurser.

Det er ofte ønskelig å ha et vern med minst mulig vernstørrelse. Har man en mindre vernstørrelse kan man åpne muligheten for å benytte et mindre tverrsnitt på kabelen som er billigere og mindre ressursavhengig.

### 2.6.1 Trefase-anlegg

Når man benytter et trefase-vern for belyningsanlegg kan man i IT-nett fordele lasten mellom L1-L2, L1-L3 og L2-L3. Ved TN blir det L1-N, L2-N og L3-N. Ved symmetri i en trefasekurs og med sinusformede strømmer, vil strømmen i N-leder bli null [10]. Dersom lasten blir skjevfordelt, ved for eksempel at flere armaturer blir koblet mellom L1-N sammenlignet med de andre fasene, vil den usymmetriske strømmen gå i nøytralleder [14].

I tillegg er en LED-driver en ulineær last og man vil få ikke-sinusformede strømmer som vil introdusere harmoniske strømmer i nøytralleder [14]. Dette kan føre til at strømmen som går i nøytralleder i verstefall kan bli høyere enn i faselederene [10].

### 2.6.2 Miljømessige hensyn ved dimensjonering

Miljø, gjenbruk og bærekraft er tema som opptar alle involverte i byggebransjen i økende grad. Eiendomsforvaltere, arkitekter, og rådgivende ingeniører søker nye løsninger og strategier for å utvikle bærekraftige bygg og konstruksjoner. Slike løsninger er attraktive for leietakere og kjøpere. Byggherrer og entreprenører spør som en følge av dette etter produkter og løsninger som støtter denne tilnærmingen [15].

Ved å dimensjonere LED-anlegget i henhold til startstrømmen, medfører dette at anlegget blir overdimensjonert sammenlignet med nominell strøm, og man får ikke utnyttet kapasiteten til vernet. En vanlig LED-armatur kan ha en nominell strøm på 0,2A. Dette betyr at man kan potensielt ha 80 armaturer på en 16A kurs. Startstrømmen til LED-armaturet kan derimot begrense dette antallet til for eksempel 15 stykk.

Ved å unngå overdimensjonering av kurser, vil man kunne spare inn betydelige mengder kabel. En typisk installasjonskabel som brukes mye i næringsbygg er PFXP. Dette er en blyfri, dobbelisolert kabel som er velegnet for bruk på kabelbroer eller inntrekking i rør eller kanal. Leder materialet til kabelen er kobber, mens både lederisolasjon, fyllmateriale og ytre kappe består av polyvinylklorid, gjerne kalt PVC [16].

Dersom man klarer å redusere antall kurser i et LED-anlegg, vil dette kunne bidra til å redusere mengden kobber og PVC-isolasjon i installasjonen. Det vil dermed senke miljøavtrykket og bidra til en mer bærekraftig installasjon. Det vil også være økonomisk bærekraftig, da man i mange tilfeller kan spare inn kostnader.



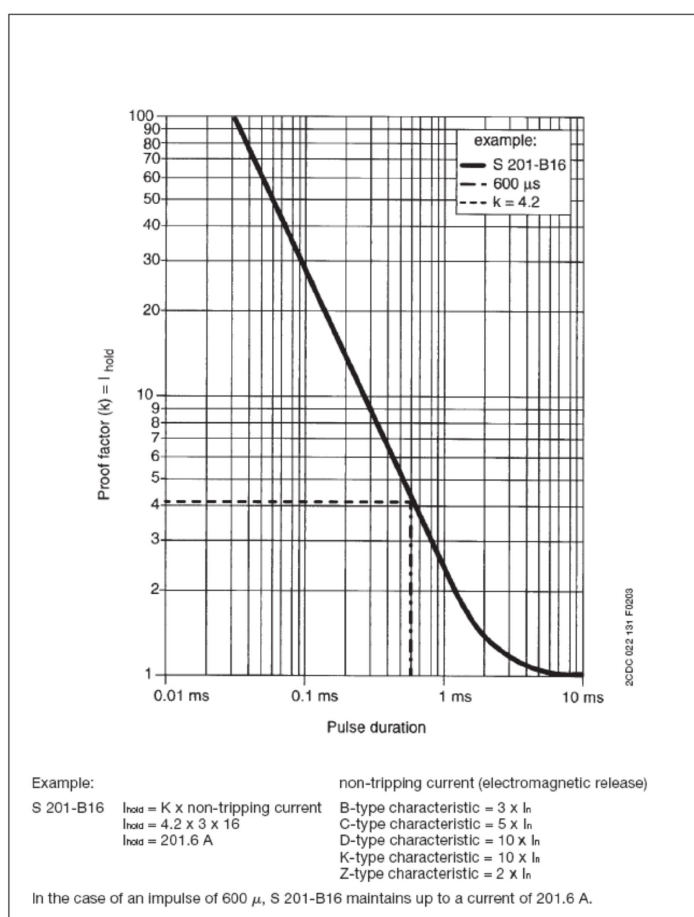
## 2.7 Hvordan dimensjonere for å begrense problemet

### 2.7.1 Impulsutløserkurve

Noen vernprodusenter har laget egne kurver som kan benyttes for å beregne strømmen vernet skal tåle uten å løse ut ved en gitt pulsbredde. Kurvene er laget for en spesifikk vernmodell, og gjelder ikke alle vern fra produsenten. De har gitt disse kurvene ulike navn, men denne oppgaven vil tiltale disse kurvene som impulsutløserkurver. Kurvene brukes for å finne en korreksjonsfaktor  $K$ , som avhenger av pulsbredden til startstrømmen. Med korreksjonsfaktoren kan man beregne den teoretiske forventede strømmen vernet skal holde for en gitt pulsbredde. Denne kalles holdestrømmen  $I_{hold}$  og beregnes med formel (2.12). Fremgangsmåten til de ulike produsentene er ganske lik, men det er noen forskjeller på hvordan kurvene er laget.

$$I_{hold} = K \times I_4 \quad (2.12)$$

Pulse tripping of the MCBs S 200/S 200 M made by ABB-STOTZ-KONTAKT



Figur 2.9: Impulsutløserkarakteristikk for ABB S 200/S 200 M. Gjengitt med tillatelse.<sup>1</sup>

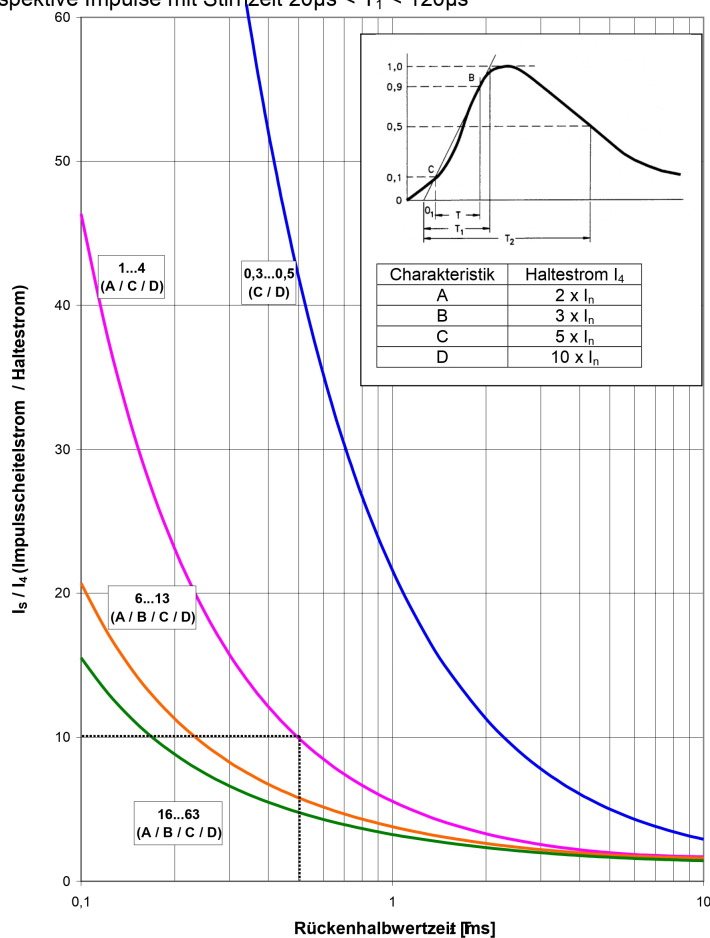
<sup>1</sup>Epost fra ansatt i ABB, Magne Holdhus, *Personlig kommunikasjon* (17.02.2023)

Kurven til ABB i figur 2.9 viser pulsbredden til strømmen i x-aksen og korreksjonsfaktoren i y-aksen. For en gitt pulsbredde kan man bruke kurven til å lese av en korreksjonsfaktor som kan brukes i formel (2.12).

## SIEMENS

Impulsauflösekennelinie der LS-Schalter 5SY. (ohne 5SY.0.)

Prospektive Impulse mit Stirnzeit  $20\mu\text{s} < T_1 < 120\mu\text{s}$



z.B.: Ein 5SY-C4 hält bei einem Impuls von 0,5ms bis zu einem Strom von  $10 \times 5 \times 4 = 200\text{A}$ .

I BT ET CP EL1

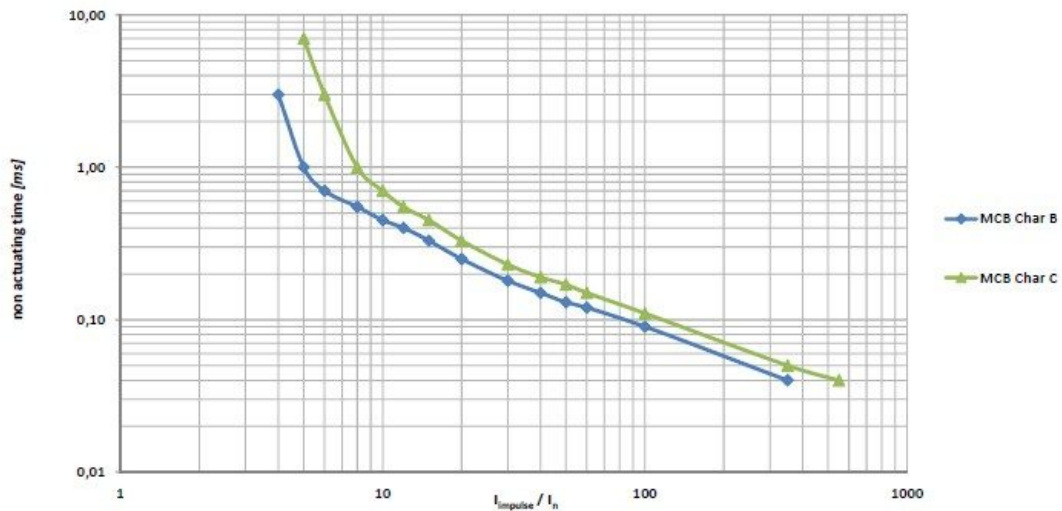
November 2008

EL1-2589a 5SY Impulsauflösung.pdf

**Figur 2.10:** Impulsutløserkarakteristikk for Siemens 5SY. Gjengitt med tillatelse.<sup>2</sup>

Kurven til Siemens har i likhet med ABBs kurve pulsbredde i x-aksen og korreksjonsfaktoren i y-aksen. Her er det derimot flere kurver, og man må se på riktig kurve i forhold til vernets merkestrøm. Har man for eksempel et C16-vern, skal man bruke den grønne kurven.

<sup>2</sup>Epost fra ansatt i Siemens, Geir Roald Bråthen, *Personlig kommunikasjon* (17.02.2023)



Figur 2.11: Impulsutløserkarakteristikk for Eaton [17].

Kurven til Eaton har pulsbredden på y-aksen og forholdet  $I_{impulse} / I_n$  på x-aksen. Her leser man altså korreksjonsfaktoren av x-aksen. Det er også inntegnet to kurver avhengig av om vernet har B- eller C-karakteristikk.

Eaton spesifiserer i et eksempel på sine nettsider [17] at korreksjonsfaktoren man leser av kurvens x-akse skal multipliseres med vernets  $I_4$ -verdi, selv om x-aksen i figur 2.11 er merket  $I_{impulse} / I_n$ . holdestrømmen beregnes i likhet med de andre kurvene med formel (2.12).

Dersom en LED-armatur oppgir startstrømmens størrelse og pulsbredde kan man bruke pulsutløserkurvene for å dimensjonere LED-anlegg. Dette gjøres ved å finne vernets holdestrøm for startstrømmens pulsbredde. Deretter beregnes antall armaturer i formel (2.13) som forholdet mellom holdestrømmen og startstrømmen med en sikkerhetsmargin på 80%, som anbefales av ABB [18].

$$\text{Antall LED-armaturer} = \frac{I_{\text{hold}} \times 0.8}{I_{\text{startstrøm}}} \quad (2.13)$$

## 2.7.2 Startstrømbegrenser

En måte å motvirke høye startstrømmer på er å bruke en startstrømbegrenser. En startstrømbegrenser har som hensikt å begrense strømmen i kretsen i en kort periode, slik at vernet ikke løser ut som følge av høy startstrøm.

Startstrømbegrensere kommer i både modulær utforming for montering i fordelingsskap, og i innkapslet utforming for montering ute i anlegg. Figur 2.12 viser et eksempel av begge utformingene.



**Figur 2.12:** To ulike varianter av startstrømbegrensere fra CAMTEC. Bildene er gjengitt med tillatelse.

Det finnes ulike produsenter av startstrømbegrensere, og ulike teknikker for å begrense strømmen. Det er i hovedsak to forskjellige metoder som brukes for å eliminere de høye startstrømmene.

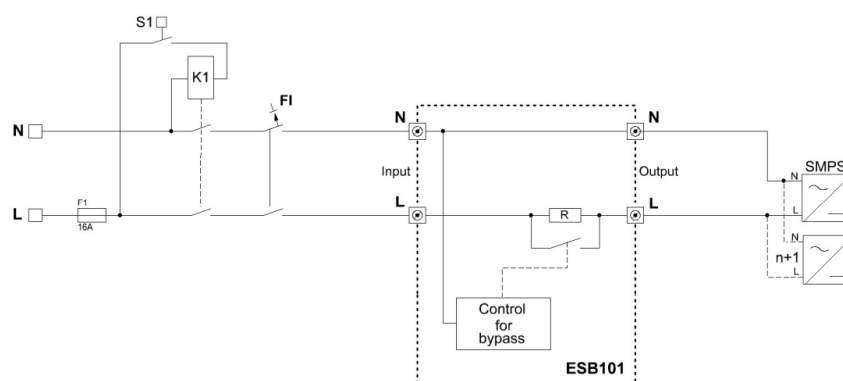
### Begrensning med NTC-termistor

Den første er ved å bruke en NTC-termistor. En NTC-termistor er en temperaturavhengig motstand som bruker en spesiell halvlederkeramikk med en negativ temperaturkoeffisient. De fungerer slik at resistansen til NTC-termistoren avtar når temperaturen øker. Ved romtemperatur vil resistansen være høy, men når den blir tilført energi i form av en strøm som går gjennom den, vil det genereres varme slik at resistansen synker. Denne egenskapen gjør den gunstig til å motvirke høye startstrømmer, da motstanden vil være høy i øyeblikket lasten kobles inn, og deretter synke i det temperaturen øker. En ulempe med denne metoden er at en NTC-termistor er svært temperaturavhengig. Derfor er det ikke sikkert at denne løsningen vil fungere som ønsket dersom omgivelsestemperaturen er enten veldig lav eller veldig høy. En annen ulempe er at termistoren må kjøles ned igjen før ny innkobling. Tiden på det kan variere fra 30 sekunder til omtrent 2 minutter, og dersom kretsen blir koblet inn igjen før termistoren er nedkjølt, kan dette føre til en høyere startstrøm [19].

### Begrensning med fast motstand

Den andre metoden er å bruke en fast motstand parallellkoblet med en bypasskrets. Med denne metoden vil den faste motstanden begrense startstrømmen til et visst nivå, i en gitt tid, før bypasskretsen kobles inn og strømmen flyter gjennom den. Størrelsen på startstrømmen vil avhenge av størrelsen på motstanden. Dette er en dyrere og mer kompleks metode enn NTC-termistorer, men til gjengjeld er den uavhengig av omgivelsestemperaturen og har mindre effekttap. I tillegg har den kortere nedkjølingstid enn en NTC-termistor.

#### 2.7.2.1 CAMTEC ESB101.LED



Figur 2.13: Koblingsskjema ESB101.LED [20]. Gjengitt med tillatelse.<sup>3</sup>

ESB101.LED er en modulær startstrømbegrenser fra den tyske kraftelektronikkprodusenten CAMTEC for montering i fordelingsskap. Denne startstrømbegrenseren er designet for kapasitiv last, slik som LED-drivere. Den egner seg ikke til ohmske eller induktive laster [20].

Figur 2.13 viser prinsipiell oppbygning av startstrømbegrenseren. Nøytralleder (N) går rett gjennom begrenseren, mens begrensningskretsen ligger på faseleder (L). Når lasten kobles inn, vil begrensningskretsen sørge for at startstrømmen blir begrenset ned til maksimalt 48A toppverdi i 300 ms, uavhengig av lastens teoretiske startstrøm. Dette skjer ved hjelp av fire parallellkoblede 27 $\Omega$ -motstander som utgjør en total resistans på 6,75 $\Omega$ . Ohms lov tilsier at dette gir en maksimalverdi på strømmen tilsvarende omtrent 48A, ved en spenning på 325V toppverdi.

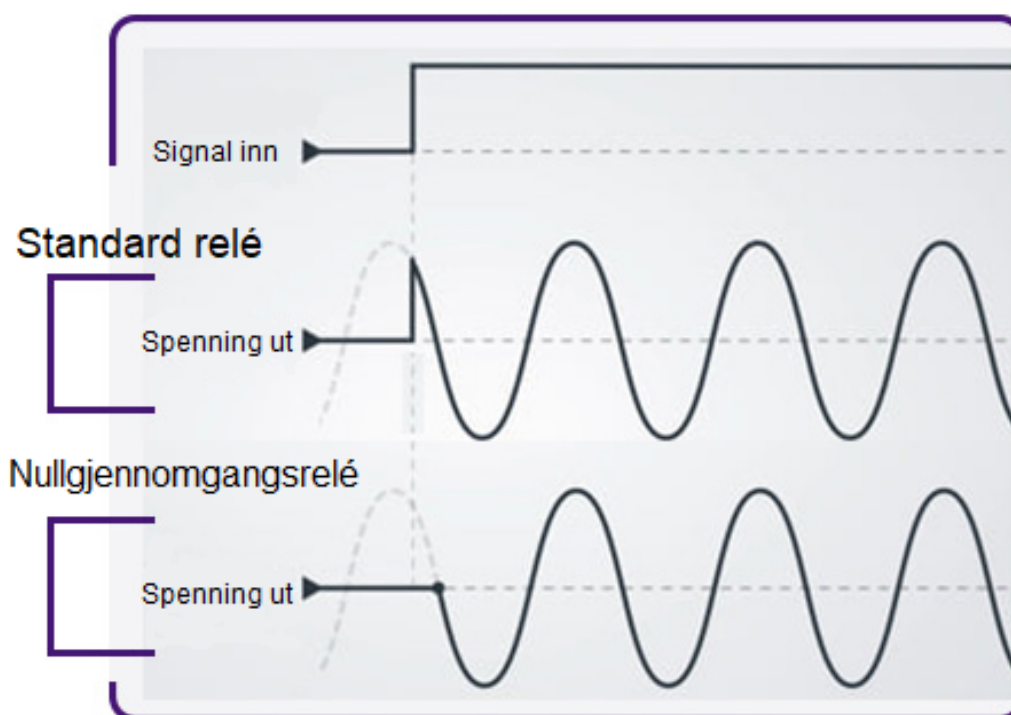
Etter det har gått 300ms, vil motstandene frakobles via en bypasskrets, som vist i figur 2.13. Dette gjør at lasten blir koblet direkte til strømnettet igjen, og man slipper effekttap fra motstandene i strømbegrenseren. Den har også en innebygd termisk sikring som bryter strømmen dersom temperaturen blir for høy, for å unngå brannutvikling. Mellom hver innkobling må det gå 20 sekunder, for at begrenseren skal få nedkjølt seg.

Startstrømbegrenseren tåler 16A kontinuerlig last, og produsenten CAMTEC hevder at man ved å benytte seg av denne kan dimensjonere belyningskursen etter nominelt strømtrekk, og dermed slipper å tenke på startstrømmene [20].

<sup>3</sup>E-post fra CEO i CAMTEC, Oliver Walter, *Personlig kommunikasjon* (04.05.2023)

### 2.7.3 Nullgjennomgangsrelé

En annen måte å begrense startstrømmer på er å bruke et nullgjennomgangsrelé. Dette er et relé som kobler inn lasten i det spenningen krysser null på sinuskurven. Dette sørger for at startstrømmen blir minimal, da den er veldig avhengig av hvor på sinuskurven spenningen befinner seg i innkoblingsøyeblikket. Figur 2.14 viser forskjellen mellom et nullgjennomgangsrelé og et standard relé. Der kan man se at et standard relé legger inn så fort det får signal inn, mens nullgjennomgangsreléet venter til halvperioden er ferdig, slik at spenningen krysser nullgjennomgang på sinuskurven. Dette egner seg godt når man har laster med høye startstrømmer, og man ikke er avhengig av momentan innkobling.



Figur 2.14: Sammenlikning av innkoblingsforløpet til standard relé og nullgjennomgangsrelé [21].

#### 2.7.3.1 CTM Lyng Microsafe Relé 2-polt

Et eksempel på et nullgjennomgangsrelé er norske CTM Lyngs Microsafe-relé. Dette er et 16A-relé som kan kobles enten som enpolet eller topolet, og som kobler alle laster i nullgjennomgang. Når spenningen krysser null på sinuskurven, kobles automatisk reléet L1-L2 inn, og lasten blir dermed koblet inn i nullgjennomgang, slik at man begrenser startstrømmen [22].

## 2.7.4 Pris

Økonomi er en viktig faktor når det kommer til dimensjonering av LED-anlegg. Det er ønskelig at anlegget blir så billig som mulig, og dette vil være førende for hvilken dimensjoneringsmetode man benytter.

Det er vanskelig å fastsette eksakte kostnader for kabler, vern og arbeidskraft, da forskjellige installatører/entreprenører har ulike avtaler. Likevel er det blitt gjort et forsøk på å estimere en fornuftig pris for lesere som ikke har kjennskap til dette. Prisene er basert på tidligere erfaring samt innhentet priser fra Elektroimportøren.

Hva	Navn	Pris
Kabel	PFXP 3G2,5	40 kr per meter
Vern	C16 Automatsikring	300-700 kr per stykk
Startstrømbegrenser	CAMTEC ESB101.LED	500-1500 kr stykk
Nullgjennomgangsrelé	CMT Lyng Microsafe Relé 2-polt	500-1500 kr stykk
Arbeidskraft	Elektriker	800-1200 kr per time

**Tabell 2.4:** Prisestimat på komponenter og arbeidskraft til elektroinstallasjoner.

## 2.8 Lysrør

I løpet av året 2023 blir det ulovlig å importere vanlige lysrør til EØS og EU. Årsaken til dette er de farlige stoffene som konvensjonelle lysrør inneholder, deriblant kvikksølv. Nye LED-alternativer har vært med på å igangsette denne prosessen [23].

For å tenne et konvensjonelt lysrør trengs det en høy spenning. Dette gjøres med hjelp av en drossel, som er en spole, i serie med lysrøret. Etter spolen er det en tenner med elektroder som bøyer seg ved tilført spenning. Ved kontakt i tenneren, får spolen ladet seg ut, og tenner lysrøret. Spolen begrenser i tillegg strømmen ved normal drift. For å holde en stabil tilførsel av spenning og kompensering for faseforskyvning til spolekretsen er det tilknyttet en kondensator [24].

Den prinsipielle virkemåten til LED-lysrør er den samme som for LED-pærer, og inneholder derfor LED-driver. Forskjellen er at et LED-lysrør er bygd opp av en rekke LED-dioder, og kan ses på som en LED-stripe. I tillegg til å ikke inneholde giftige gasser for mennesket som også er dårlig for miljøet, vil et LED-lysrør ha lengre levetid, være uavhengig av en spesiell starter for stabil funksjon, ha bedre energiutnyttelse og mindre flimring. Dessuten kan de plasseres inn i allerede eksisterende armaturene til vanlige lysrør. Ut ifra hvordan og hvem som produserer dem, så kan LED-lysrørene kunne funke ved egne armaturer, eksisterende armaturer eller til begge. Da må den være både elektronisk og fysisk kompatibel [25].

## 2.9 Måleutstyr og usikkerhet

### 2.9.1 Tangamperemeter

Et tangamperemeter er et måleinstrument for måling av strøm og er formet som en tang eller klype som legges rundt lederen. Det finnes noen ulike virkemåter for tangamperemeterer, men prinsippet er hovedsakelig likt. Når det går en strøm i lederen vil det induseres et magnetfelt rundt den. Tangamperemeteret måler magnetfeltet rundt lederen og gjør det mulig å måle strømmen i lederen basert på magnetfeltet [26].

Ulike tangamperemeterer kan ha ulike måleområder. Noen er ment for å måle store strømmer, mens andre er ment for å måle mindre strømmer. Noen tangamperemeterer har også en "range" bryter som endrer hvilket strømområde de kan måle. Usikkerheten til tangamperemeteret kan variere avhengig av hvilket måleområde de er innstilt på, og av frekvensen til strømmen som måles. Usikkerheten oppgis ofte som en prosentandel av målingen summert med et fast tall.

### 2.9.2 Oscilloskop

Et oscilloskop er et måleinstrument som kan tegne grafer for hvordan en måleverdi, som strøm eller spenning, varierer med tid. Tegneområdet på skjermen til oscilloskopet består av et rutenett der en rute ofte kalles for en divisjon. Det er mulig å "zoome" inn og ut på y-aksen ved å endre hvor mange volt eller ampere hver rute representerer, dette kalles input sensitivity og benevnes A/div eller V/div. Man kan også justere x-aksen ved å endre hvor lang tid hver rute representerer, denne innstillingen benevnes med for eksempel ms/div (men kan også benevnes med andre prefikser som s/div,  $\mu$ s/div eller ns/div).



**Figur 2.15:** Skjerm bilde av en måling av strøm (blå) og spenning (rosa) gjort med oscilloskopet Rohde & Schwarz RTB2004.



Figur 2.15 viser et skjermbilde av en måling med oscilloskop. Nederst i venstre hjørne står det 2A/ som betyr at den blå linjen er tegnet med 2A per linje på y-aksen. 100V/ betyr at den rosa linjen er tegnet med 100V per linje på y-aksen. 2ms/ øverst i venstre hjørne betyr at hver horisontale divisjon har en varighet på 2ms, dette gjelder begge linjene.

#### Ordbruk og begrep for oscilloskop:

**Divisjon** er avstanden mellom to linjer på skopet, langs enten x- eller y-aksen.

**A/div** (ampere per divisjon) forteller hvor mange ampere hver divisjon på y-aksen representerer. 2A/div vil si at det er 2A mellom hver linje på y-aksen. Med 2A/div vil en måling med høyde på fire divisjoner tilsvare 8A

**ms/div** (millisekund per divisjon) er hvor mange milli-sekund hver divisjon på x-aksen representerer.

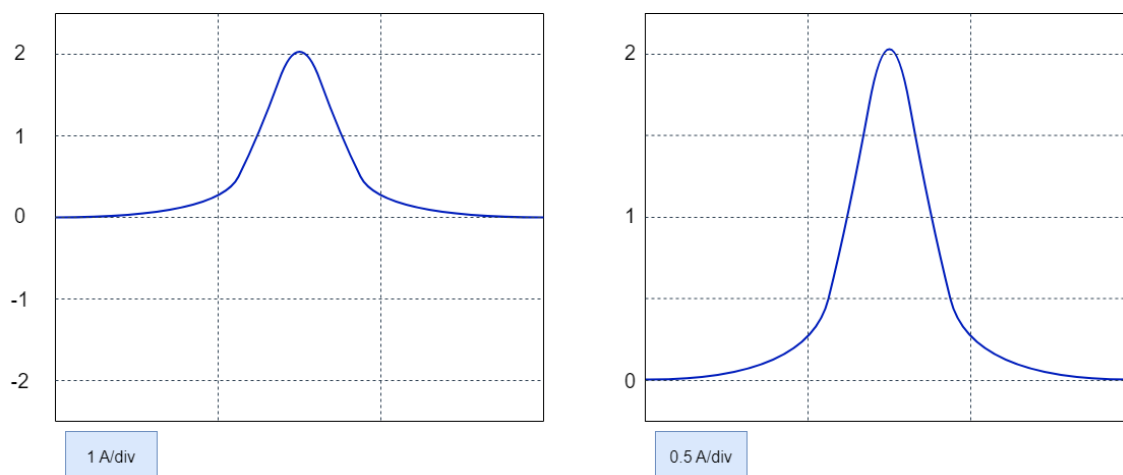
**Skjermens totale måleområde** beskriver hvor store målinger man kan gjøre og avhenger av innstillingene på skopet. Dersom skopets skjerm har en total høyde på 10 divisjoner og er innstilt med 3A/div vil det totale måleområdet være 30A. Tilsvarende beskriver bredden på skjermen og ms/div innstillingen hvor "lange" målinger man kan ta.

Usikkerheten til skopet avhenger av input sensitivity og ms/div innstillingene til skopet. Dersom man har zoomet ut slik at man kan måle store strømmer over stor tid (A/div og ms/div er store tall) blir usikkerheten i ampere og sekund større enn dersom man zoomer inn. Dette kommer av at usikkerheten beregnes basert på en prosentandel av skjermens totale måleområde, som avhenger av A/div og ms/div innstillingene.

Det er fordelaktig at den målte kurven fyller hele skjermen fra topp til bunn, slik at størrelsen på usikkerheten er minst mulig sammenliknet med størrelsen på målingen. Dersom en måling ikke er symmetrisk om null, for eksempel en puls som bare er positiv, er det lurt å "flytte" hvor null på y-aksen er plassert på skjermen slik at det ikke er tomrom på den ene siden av kurven. Dette kan gjøres med "offset"-innstillingen på skopet og illustreres i figur 2.16.

Figur 2.16 viser to skisser på målinger av en strømpuls og hvordan de kan vises på skjermen til et oscilloskop. Begge skissene skal framstille den samme strømpulsen med 2A toppverdi. På grafen til venstre er null sentrert på y-aksen, dette medfører at pulsen maksimalt kan fylle halve skjermen. På grafen til høyre er null på y-aksen flyttet ned slik at grafen kan tegnes over et større område på skjermen.

Forskyvningen langs y-aksen tillater grafen til høyre å bli tegnet med 0.5A/div. Med en toppverdi på 2A, vil den framstå som fire divisjoner høy og fylle hele den hypotetiske skjermen. Derimot må grafen til venstre tegnes med 1A/div for å få plass. Noe som fører til at den kun tegnes over to ruter, og fyller halve skjermen. Å flytte 0A til nederst på skjermen forhindrer tomrommet under grafen til venstre og tillater bruk av et lavere tall for A/div, noe som fører til at det totale måleområdet går fra 4A til 2A. Ettersom usikkerheten til skopet beregnes som en prosentandel av det totale måleområdet, får målingen gjort med 0.5A/div lavere usikkerhet enn målingen med 1A/div.



**Figur 2.16:** Prinsippskisse som viser hvordan en kurve kan flyttes for å fylle hele skjermen til skopet, grafen til venstre har null sentrert på y-aksen, mens grafen til høyre har null plassert nederst.

To eksempler på oscilloskop er Rohde & Schwarz RTB2004 og Keysight DSOX2014A. Den vertikale usikkerheten til disse skopene oppgis som DC measurement accuracy og DC vertical accuracy i databladene deres [27, 28]. Dette er i prinsipp den samme usikkerheten, og formelene for å beregne usikkerheten er omtrent lik. Nøyaktigheten man beregner med formelen kan tolkes som nøyaktigheten til en måling på oscilloskopet, eller nøyaktigheten til et individuelt målepunkt i en lagret CSV-fil [29].

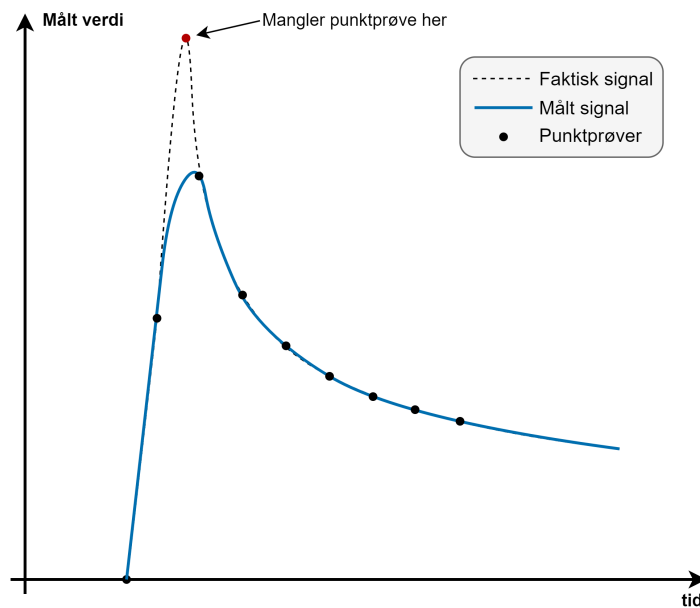
Den horisontale usikkerheten til oscilloskopene oppgis som “ $\Delta$  Time accuracy”. Denne usikkerheten beskriver hvor nøyaktig man kan beregne tiden mellom to punkter på målingen.

Oscilloskop har også en båndbredde, men den er ofte så stor at tangamperemeteret som brukes er den begrensende faktoren for måling av strøm. Til sammenlikning kan tangamperemeteret FLUKE i200s brukes på frekvensen mellom 40Hz og 10kHz [30], mens oscilloskopet Rohde & Schwarz RTB2004 har en båndbredde på 300MHz [27].

En viktig faktor i denne forbindelse er likevel oscilloskopets samplingsfrekvens som beskriver avstanden mellom målepunktene til skopet. Samplingsfrekvensen kan variere med skopets ms/div innstilling. Dersom det tas en måling med 100ms/div vil samplingsfrekvensen kunne være lavere enn en måling med 100 $\mu$ s/div.

For at måleresultatene skal bli nøyaktige må målingen gjøres med tilstrekkelig samplingsfrekvens. Dersom samplingsfrekvensen er for lav kan man risikere at signalet har store endringer mellom målepunktene uten at de fanges opp av skopet. Dette illustreres i figur 2.17 hvor den stiplede linjen er det faktiske signalet, mens den blå linjen er signalet som oscilloskopet måler. Ettersom samplingsfrekvensen er for lav tas punktprøvene med så langt mellomrom at skopet ikke fanger opp den høye toppverdien og målingen er feil.

Dette kan være et problem dersom målinger framstår svært “tynne” på skopets skjerm, da samplingsfrekvensen kan være for lav for å fange opp alle endringene i signalet. Det er derfor lurt å “fylle” bredden på skopet for å få flest mulige punktprøver på signalet som skal måles slik at det kan gjengis så nøyaktig som mulig.



**Figur 2.17:** Illustrasjon av hvordan for lav samplingsfrekvens kan gi unøyaktige målinger.

Vedlegg A, har en mer detaljert forklaring av formler for beregning av usikkerhet til tangamperemeter og oscilloskop.

### 2.9.3 FLUKE 435-II

FLUKE 435-II er en trefaset effektanalysator med mulighet til å gjøre svært mange målinger av strøm, spenning og effekt. Usikkerheten til målingen av RMS-strøm oppgis i databladet som  $\pm 0,5\%$  av måleverdien  $\pm 5$  tellinger.

### 2.9.4 Beregning av standardavvik og kombinert usikkerhet

Standardavvik er et mål på spredningen i målingene og beregnes med formel (2.14) [31].

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.14)$$

Den kombinerte standard usikkerheten til en målestørrelse  $Y$ , er standard usikkerhet til målingen dersom det er flere bidrag til usikkerhet. Usikkerhet kan komme fra kilder som måleutstyr og variasjon i målinger.

Dersom man antar at usikkerhetene er normalfordelte kan man beregne kombinert standard usikkerhet med formel (2.15), der  $u_c$  er kombinert standard usikkerhet og  $u(X_i)$  er de ulike bidragene til

usikkerheten [31]. Dette antar at de ulike kildene til usikkerhet ikke vil inntreffe samtidig. Den kombinerte usikkerheten kan også beregnes med formel (2.16) som tar høyde for at alle bidragene kan forekomme samtidig og representerer et verste tilfelle [29, 32].

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(X_i)} \quad (2.15)$$

$$u_c(Y) = \sum_{i=1}^n u(X_i) \quad (2.16)$$

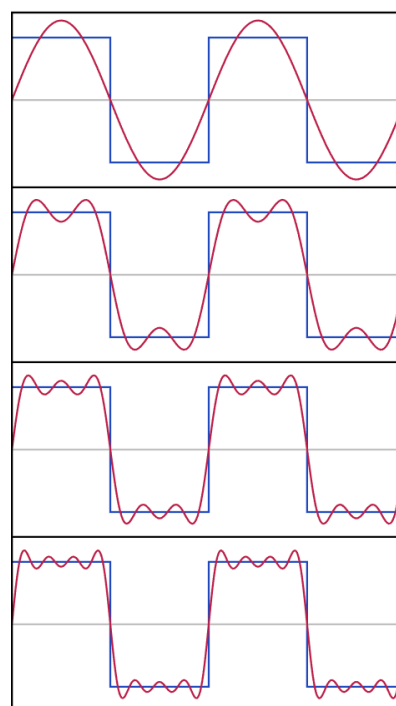
## 2.10 Overharmoniske frekvenskomponenter og deres innvirkning på målinger

Fouriers teorem sier at alle periodiske signaler består av rene sinuskurver, med ulik frekvens, fase og amplitude [34]. Man kan altså bygge opp et vilkårlig periodisk signal som en sum av uendelig mange sinusfunksjoner. Disse sinusfunksjonene kalles ofte for overharmoniske eller ulike frekvenskomponenter til signalet.

I praksis er det ikke mulig å summere uendelig mange sinusfunksjoner til en eksakt kopi av et signal. Det kan likevel lages en tilnærming av signalet med en Fourier-serie der antall ledd i serien (antall overharmoniske som inkluderes i summen) vil bestemme hvor nøyaktig tilnærmingen er. Dersom man inkluderer få overharmoniske vil ikke kurven bli særlig nøyaktig, men med økende antall frekvenskomponenter blir tilnærmingen likere det opprinnelige signalet [35]. Dette kommer fram i figur 2.18, hvor det er tydelig at Fourier-rekken starter som en ren sinus med kun grunnfrekvensen inkludert. Dersom det legges på flere overharmoniske begynner rekken å likne mer på et firkantet pulstog.

Dersom en målt puls har svært bratt stigning kan signalet bestå av overharmoniske med høye frekvenser. Om pulsen skal gjengis som en Fourier-serie er det derfor nødvendig å inkludere disse høye frekvenskomponentene for at den gjengitte pulsen skal være nøyaktig.

En mulig utfordring under måling av en slik puls er at måleutstyret ikke er i stand til å måle de høye frekvenskomponentene til pulsen. En tommelfingerregel er at båndbredden til oscilloskopet skal være tre ganger så høy som den høyeste frekvensen som blir målt [36]. Dersom båndbredden er for lav kan overharmoniske bli dempet eller forsvinne fra målingen. Dette kan gjøre målingen unøyaktig og føre til at den gir et feil bilde av hvordan pulsen ser ut.



**Figur 2.18:** Fourier-serier med de første overharmoniske (i rødt) for et firkantet pulstog (i blått), hentet fra brukeren Jim.belk på Wikipedia [33].

For å undersøke om en måling kan være unøyaktig som følge av manglende båndbredde kan det derfor være ønskelig å undersøke hvilke frekvenskomponenter måledataen inneholder. Dersom måledataen inneholder frekvenskomponenter tett oppmot måleutstyrets båndbrede kan det være grunn til å mistenke at signalet ikke er nøyaktig gjengitt.

Fast Fourier Transform (FFT) er en algoritme som tar inn et tidssignal og beregner de ulike frekvenskomponentene signalet består av [37]. Slik kan man mate et målt signal inn i FFT-algoritmen for å undersøke hvilke frekvenskomponenter signalet består av. Dette gjør det mulig å undersøke om det ligger overharmoniske tett oppmot båndbredden til måleutstyret.



## Kapittel 3: Metode og utstyr

For å finne svar på spørsmålene lagt frem i problemstillingen har det blitt gjennomført målinger både på anlegg og i laboratorium.

Målingene gjennomført på anlegg er:

- Måling av startstrøm på ulike anlegg ved NTNU og Studentersamfundet
- Test av startstrømbegrenser ved Studentersamfundet
- Test av nullgjennomgangsrelé ved Studentersamfundet

Målingene gjennomført på laboratorium er:

- Test av startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé.
- Test av utløserkarakteristikk til vern.
- Måling av startstrøm på LED-lysrør sammenlignet med konvensjonelle lysrør.
- Måling av kabelimpedansens innvirkning på startstrømmen.
- Sammenligning av startstrømmer i IT- og TN-nett.

### 3.1 Målinger på anlegg

Det ble gjort målinger av startstrømmen og stasjonær strøm til LED-anlegg i kjelleren til Elektrobygget ved NTNU, samt et anlegg på Studentersamfundet i Trondheim. Formålet med målingene kan deles opp i følgende punkter:

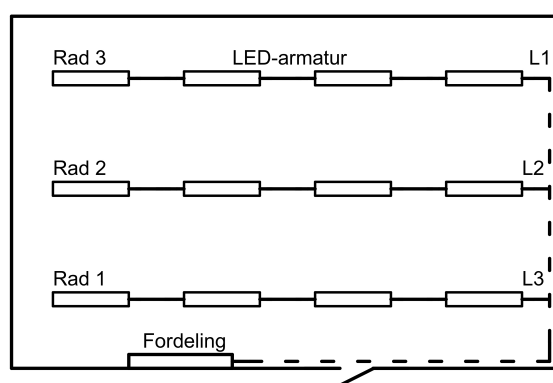
- Sammenligne den målte startstrømmen med de oppgitte verdiene i armaturens datablad.
- Undersøke hvor mye anleggene overdimensjoneres med tanke på stasjonær strøm.
- Finne ut om startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé fungerer på LED-anlegget på Studentersamfundet i Trondheim.

### 3.1.1 Presentasjon av anlegg på NTNU

Alle anleggene som ble målt ved NTNU ligger i kjelleren til Elektrobygget.

#### 3.1.1.1 Elektrovarmelaben

Elektrovarmelaben har totalt 12 LED-armaturer fra Glamox av typen GIR-1500 LED 9000 HF 840. Armaturene er fordelt på tre rader, med fire armaturer per rad. Dette er en trefasekurs og er vernet med et 4-polt C16 Schneider vern som sitter i en fordeling inne på laben. Fasene er fordelt mellom radene og kan styres individuelt via relé. Radene benevnes heretter rad 1, rad 2, og rad 3.



Figur 3.1: Oversiktsbilde av Elektrovarmelaben (ikke i målestokk).

#### Måleutstyr

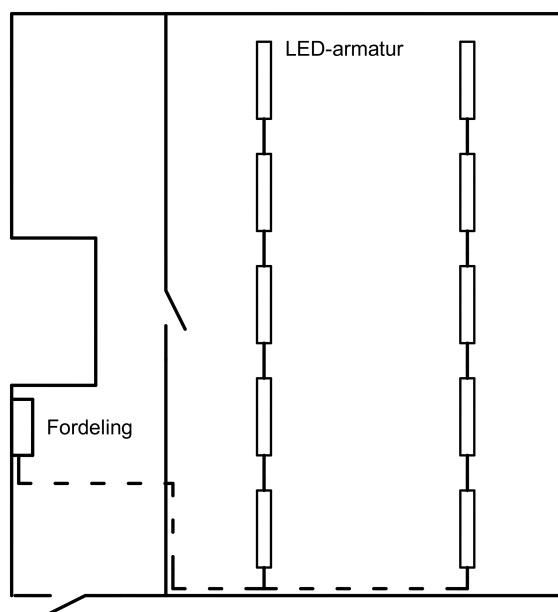
Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004	1333-1005K04-203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter til måling av startstrøm	FLUKE	i200s	-	I04-0505
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516
3-fase effektanalysator	FLUKE	435-II	40053106	H02-0205
4x Tangamperemeter til måling av stasjonær strøm	FLUKE	i200s	-	I04-0615 I04-0598 I04-0610 I04-0509

Tabell 3.1: Måleutstyr brukt i elektrovarmelab.



### 3.1.1.2 Høystrømbryterlaben

Høystrømbryterlaben har totalt 10 Fagerhult InduLED armaturer. Disse er fordelt på to rader med fem armaturer per rad. Alle armaturene er koblet på en enfasekurs vernet med et topolet Schneider C16-vern som sitter i en fordeling inne i laben.



Figur 3.2: Oversiktsbilde av høystrømbryterlaben (ikke i målestokk).

### Måleutstyr

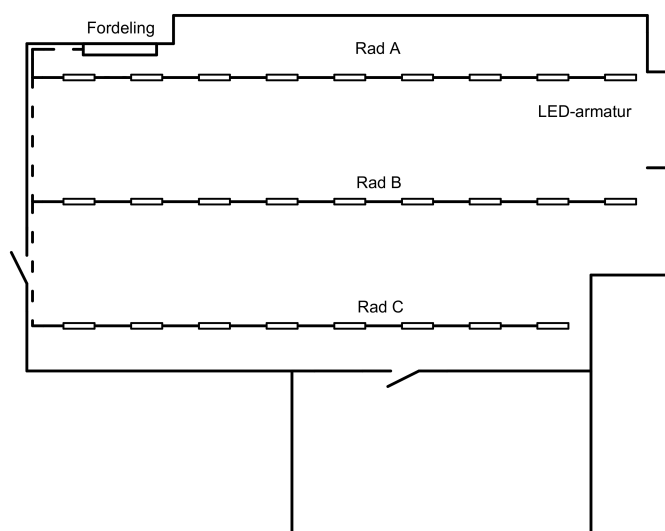
Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004	1333-1005K04-203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter til måling av startstrøm	FLUKE	i200s	-	I04-0505
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516
3-fase effektanalysator	FLUKE	435-II	40053106	H02-0205
4x Tangamperemeter til måling av stasjonær strøm	FLUKE	i200s	-	I04-0615 I04-0598 I04-0610 I04-0509

Tabell 3.2: Måleutstyr brukt i høystrømbryterlab.

### 3.1.1.3 Verkstedet

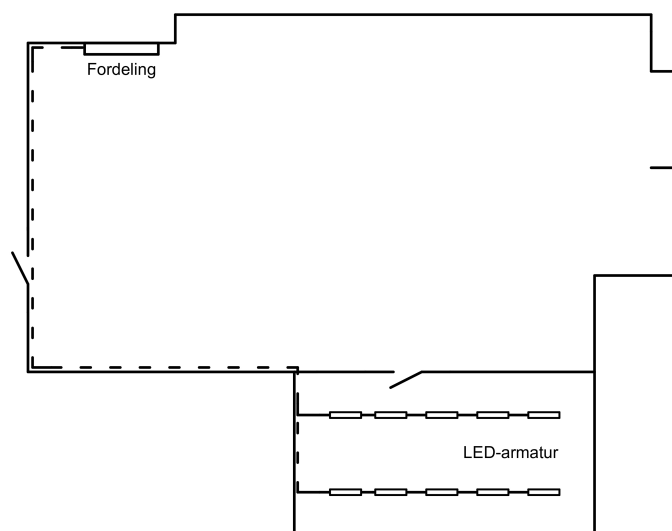
Verkstedet består av en stor verkstedhall, samt en mindre hall som betegnes som varelager i kursfor-tegnelsen, men som i dag brukes som sveiseverksted. Fordelingen står i verkstedhallen, som har en trefase belysningskurs vernet med et 4-polt Schneider C16-vern. L1, L2 og L3 er fordelt på tre rader med armaturer som kalles henholdsvis A, B og C, slik at hver fase er tilknyttet kun én rad. Rad A er nærmest fordelingen, rad B er i midten av hallen og rad C er på motsatt langside fra fordelingen.

Disse radene styres individuelt av tre brytere ved inngangsdøren slik at hver bryter styrer en rad med armaturer via et relé i fordelingen. På rad A og B er det montert ni armaturer, mens det på rad C er montert åtte. Alle radene består av Glamox-armaturer av typen GIR-1500 LED 11000 HF 840.



**Figur 3.3:** Oversiktsbilde av verkstedhallen (ikke i målestokk).

Varelageret er en mindre hall som er tilknyttet verkstedet diagonalt ovenfor fordelingen. Her er belysningskursen dimensjonert som en enfase kurs med 10 tilkoblede armaturer. Disse armaturene er av samme type som de i verkstedhallen og er fordelt likt på to rader.



Figur 3.4: Oversiktsbilde av varelager (ikke i målestokk).

### Måleutstyr

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004	1333-1005K04-203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter til måling av startstrøm	FLUKE	i200s	-	I04-0505
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516
3-fase effektanalysator	FLUKE	435-II	40053106	H02-0205
4x Tangamperemeter til måling av stasjonær strøm	FLUKE	i200s	-	I04-0615 I04-0598 I04-0610 I04-0509

Tabell 3.3: Måleutstyr brukt i verkstedet.

#### 3.1.1.4 Korridor i kjeller

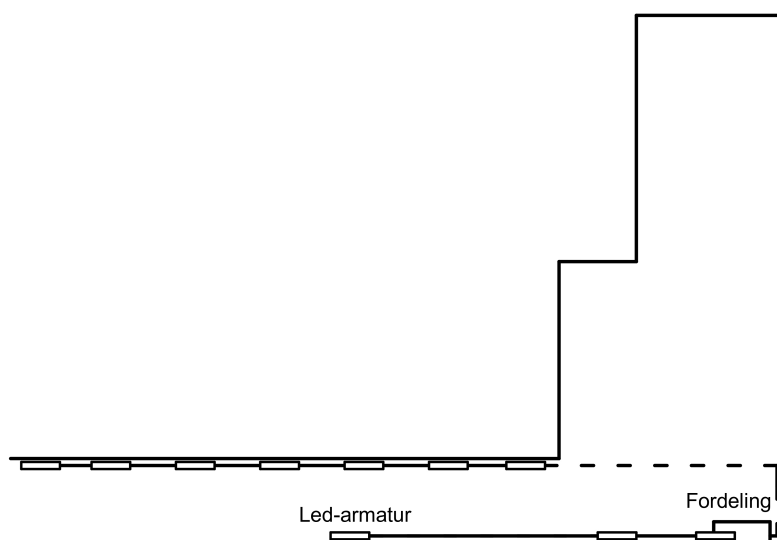
Mellom labene i kjelleren er det korridorer med flere belyningskurser hvor det ble gjort målinger. Belyningskursene er plassert i to fordelinger som benevnes AQ og AS. Disse fordelingene er oppdelt slik at AQ-fordelingen dekker belyningskursene i et område av kjelleren, mens AS-fordelingen dekker et annet område.

I korridoren henger armaturene så lavt at det er mulig å ta av dekselet og undersøke driveren de inneholder. Dette gjør det mulig å sammenlikne oppgitt startstrøm til armaturen med den målte startstrømmen til anleggene.

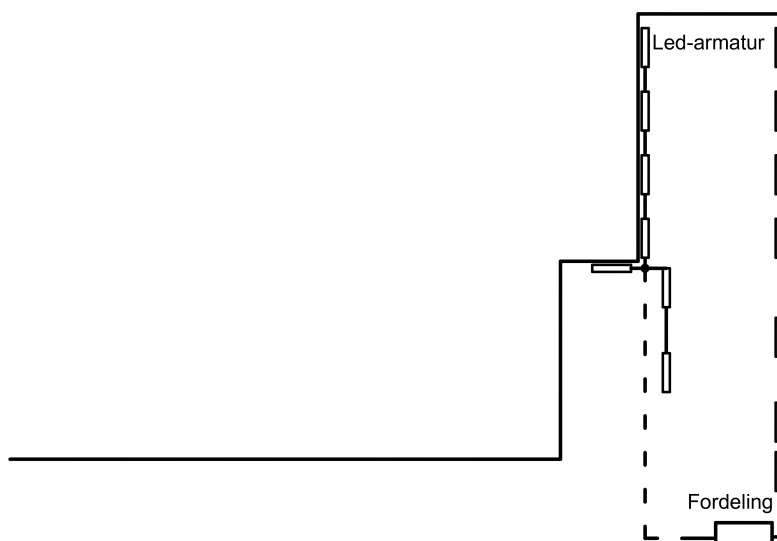
**AQ-fordelingen**

AQ-fordelingen ligger utenfor Høystrømbyterlaben i kjelleren i nærheten av et varemottak. Her er det to enfase belyningskurser som vernes med Schneider C16-vern. De to belyningskursene er:

- **F3:** 10 armaturer av typen Fagerhult Kaptur 39347.
- **F4:** 14 armaturer av typen Fagerhult Kaptur 39347



**Figur 3.5:** Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AQ F3 (ikke i målestokk).

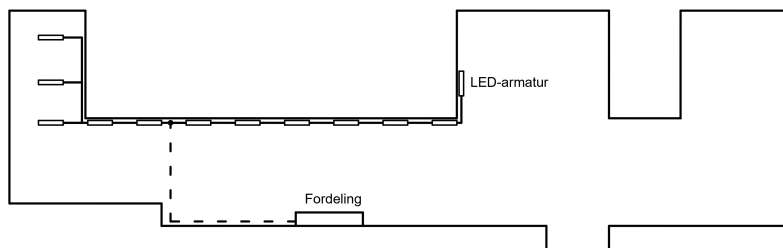


**Figur 3.6:** Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AQ F4 (ikke i målestokk).

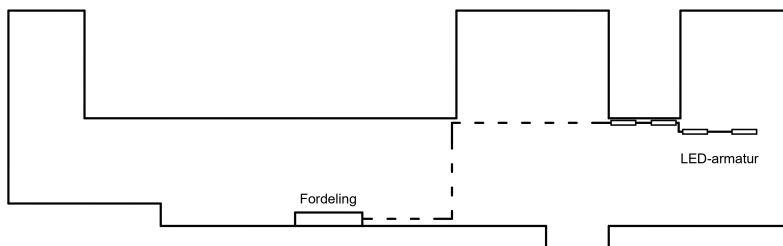
**AS-fordeling**

AS-fordelingen ligger utenfor Smartgrid-laben i kjelleren. Belysningskursene i denne fordelingen dekker en korridor som knytter sammen flere laber og benevnes:

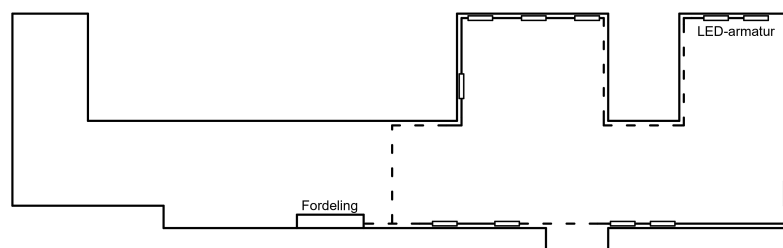
- **F4:** 12 armaturer av typen Fagerhult Kaptur 39347.
- **F5:** 4 armaturer av typen Fagerhult Kaptur 39347.
- **F6:** 11 armaturer der
  - 9 armaturer er av typen Fagerhult Kaptur 39347.
  - 2 armaturer er av typen Glamox GIR LED 9000 HF 840 LED 60W.



**Figur 3.7:** Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F4 (ikke i målestokk).



**Figur 3.8:** Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F5 (ikke i målestokk).



**Figur 3.9:** Oversiktsbilde av armaturer tilknyttet AS F6 (ikke i målestokk).

### Måleutstyr

Alle målingene på AQ- og AS-fordelingene ble gjort med det samme måleutstyret.

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004	1333-1005K04-203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter til måling av startstrøm	FLUKE	i1000s	-	I04-0479
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516
3-fase effektanalysator	FLUKE	435-II	40053106	H02-0205
4x Tangamperemeter til måling av stasjonær strøm	FLUKE	i200s	-	I04-0615 I04-0598 I04-0610 I04-0509

**Tabell 3.4:** Måleutstyr brukt i AQ- og AS-fordelingen i kjelleren til Elektrobygget.

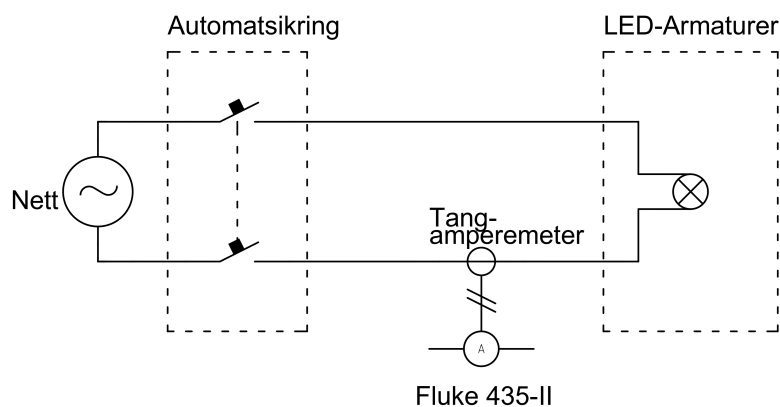
## 3.1.2 Måling på NTNU

### 3.1.2.1 Måling av stasjonær strøm

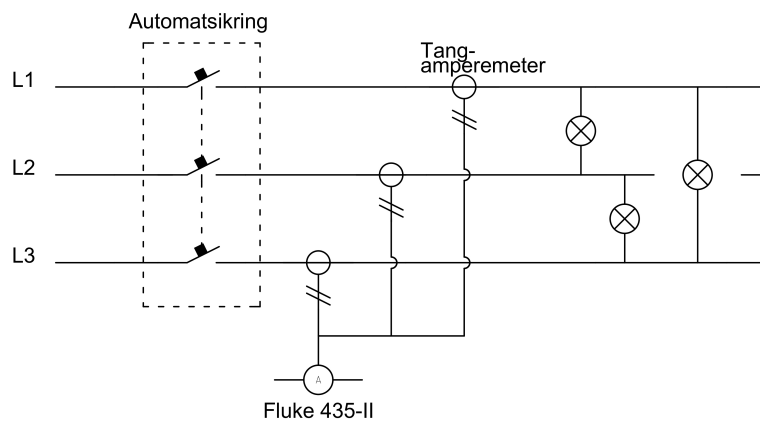
Måling av stasjonær strøm ble gjort med FLUKE 435-II og FLUKE i200s strømtang. Framgangsmåten var tilnærmet lik på alle anlegg, der eneste forskjell var om kursen var enfase eller trefase.

For måling av stasjonær strøm på enfase-kurser ble tangamperemeteret tilkoblet faselederen og den stasjonære strømmen ble avlest fra skjermen til måleinstrumentet og notert i et Excel-ark. I noen tilfeller kunne strømmen variere litt, derfor ble det tatt fire målinger på hver kurs med noen sekunder mellomrom og gjennomsnittet av disse målingene ble brukt.

På trefase-kurser var framgangsmåten identisk, men tangamperemeteret ble tilkoblet L1, L2 og L3 og strømmen fra alle fasene ble notert. Oppkobling for måling av stasjonær strøm vises i figur 3.10 og 3.11.

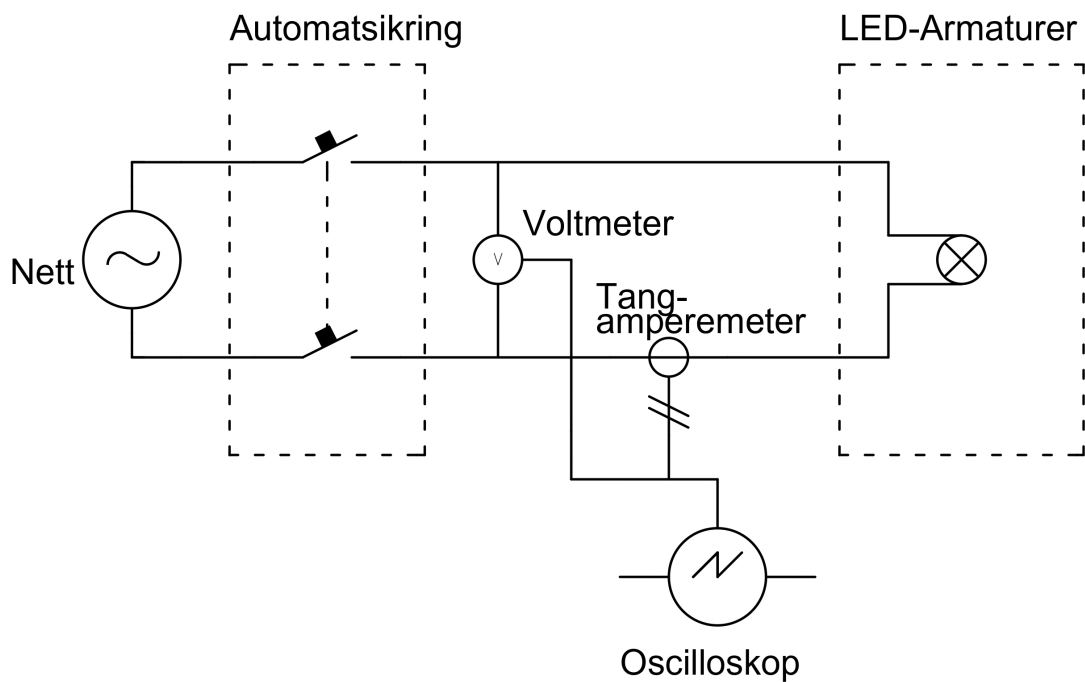


**Figur 3.10:** Koblingskjema for måling på anlegg av stasjonær strøm enfase.



Figur 3.11: Koblings skjema for måling på anlegg av stasjonær strøm trefase.

### 3.1.2.2 Oppsett for måling av startstrøm



Figur 3.12: Koblings skjema for måling av startstrøm på anlegg.

For alle målingene på anlegg ved NTNU var det generelle måleoppsettet og framgangsmåten lik. Den aktuelle kursen som skulle måles ble funnet i fordelingen. Tangampèremeter og spenningsprober ble koblet inn på kursen og i oscilloskopet som vist i figur 3.12. Deretter ble oscilloskopet satt opp med passende innstillinger og det ble gjort noen testmålinger for å se størrelsen på startstrømmen til anlegget. Basert på testmålingene ble det gjort fininnstillinger av måleoppsettet.

Basert på testmålingene ble det antatt omtrent hvor stor startstrømmen på anlegget kunne bli. Dersom denne var under 200A ble FLUKE i200s tangen brukt i 200A måleområde. i200s tangen ble foretrukket ettersom den er mindre og lettere å plassere inne i fordelingen. Dersom man kunne forvente startstrømmer over 200A ble FLUKE i1000s tangen brukt i 1000A måleområde.

Etter at strømtangen ble satt opp måtte også A/div-innstillingen på skopet stilles inn. Denne ble valgt slik at antatte største startstrøm ikke ville gå utenfor måleområdet på skopet. Alle målingene ble tatt med 0A på y-aksen sentrert på skjermen til oscilloskopet slik at både positive og negative strømmer kunne måles. Det ble brukt 2ms/div på x-aksen for å få med en hel periode av spenningen. Til slutt ble det valgt et filnavn som beskrev anlegget slik at måledataen kunne lagres til minnepenn og behandles videre senere.

### 3.1.2.3 Framgangsmåte for måling av startstrøm

Etter at måleutstyret var koblet inn og oppsettet var klart ble målingene tatt med følgende framgangsmåte:

1. Lyset på den aktuelle kursen ble slått av.
2. Det ble ventet 20 sekunder.
3. Lyset ble slått på og oscilloskopet fanget opp startstrømmen.
4. Måleresultatet på oscilloskopet ble lagret som en CSV-fil og som et skjermbilde til minnepenn.

Det ble brukt en ventetid på 20s mellom hver måling. Ventetiden ble valgt for å gi kondensatorene i driverne litt tid til å lade seg ut. Samtidig skulle den redusere risikoen for at størrelsen på startstrømmen kunne variere utifra en varierende ventetid.

Målingene på anlegg involverte repeterte inn- og utkoblinger av lyset. Dette førte ofte til et tidspress for å bli ferdig før andre skulle bruke en lab. Derfor ble det ikke skrevet ned noe data under selve målingene, men kun lagret skjermbilder og CSV-filer som ble analysert senere.

### 3.1.2.4 Måling av kabellengde

Ettersom kabellengde kan ha innvirkning på startstrømmen ble kabellengde til første armatur målt for anleggene på NTNU. Målingene ble tatt med en Kendo 35492 laseravstandsmåler.



### 3.1.3 Målinger på Studentersamfundet

Gruppen fikk tilgang til å utføre målinger på et belyningsanlegg på Studentersamfundet i Trondheim, heretter kalt Samfundet. Der hadde de for en stund tilbake fått installert nye RGBW-lys med tilhørende RGBW-drivere. Anlegget besto i totalt 26 RGBW-drivere, i tillegg til åtte andre LED-armaturer.

Alle armaturene ble koblet sammen på en 16A-kurs med C-karakteristikk. Dette førte til problemer med høye startstrømmer, og vernet løste ut gang på gang. Deretter ble det forsøkt å dele det inn i to kurser, men uten hell. Løsningen ble da å dele det inn i tre separate 16A-kurser, for å unngå at vernene løste ut av den høye startstrømmen. Hensikten med målingene på Samfundet var å se om alternative løsninger som startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé kunne løse startstrømsproblematikken deres.

#### 3.1.3.1 Måleutstyr

Det samme måleutstyret ble benyttet til alle målingene på Samfundet.

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwarz	RTB2004	1333-1005K04-203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter	FLUKE	i1000s	-	I04-0479
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516

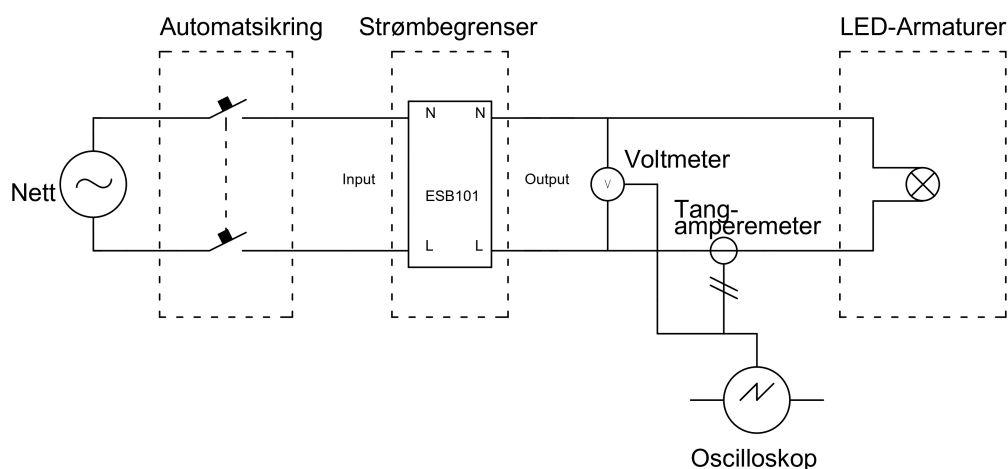
**Tabell 3.5:** Måleutstyr brukt til målinger på Studentersamfundet i Trondheim.

#### 3.1.3.2 Måling av startstrømmer med eksisterende løsning

Den første målingen som ble tatt på Samfundet var av startstrømmen til én av kursene (Q3), med samme måleoppsett som i figur 3.12. Kursen besto av syv RGBW-drivere, i tillegg til to andre LED-armaturer. Målingene ble gjentatt helt til fem av målingene hadde truffet toppverdien til spenningen i innkoblingsøyeblikket. Mellom hver måling ble det ventet 20 sekunder for utladning av kondensatorene.

Deretter ble alle armaturene koblet over til én kurs, slik det opprinnelig ble installert, og det ble tatt 14 målinger med 20 sekunders mellomrom.

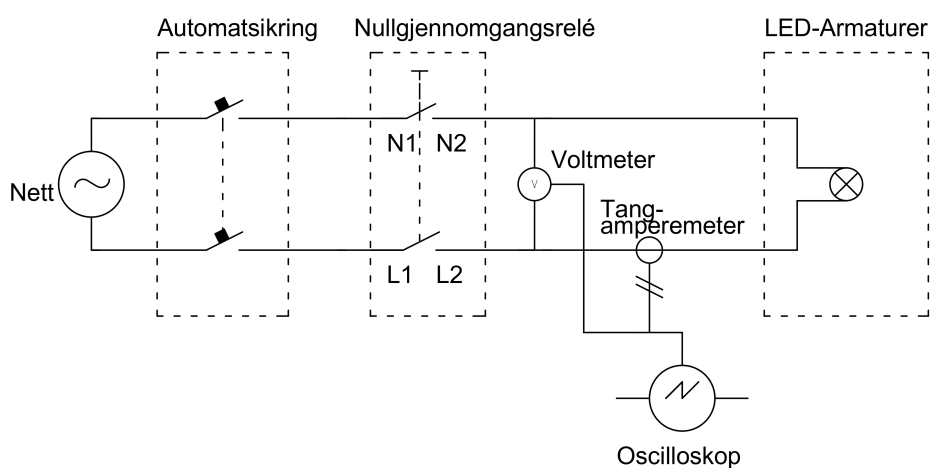
### 3.1.3.3 Måling av startstrømmer med startstrømbegrenser



**Figur 3.13:** Koblingskjema og måleoppsett med startstrømbegrenser på Samfundet.

CAMTECs ESB101.LED (ref. 2.7.2.1) startstrømbegrenser ble koblet inn mellom vern og last, som vist i figur 3.13, mens alle armaturene fremdeles var koblet på én kurs. Startstrømsmålingene ble gjentatt med 20 sekunders mellomrom helt til det var oppnådd 10 målinger hvor spenningen traff toppverdi på sinuskurven i innkoblingsøyeblikket.

### 3.1.3.4 Måling av startstrømmer med nullgjennomgangsrelé



**Figur 3.14:** Koblingskjema og måleoppsett med nullgjennomgangsrelé på Samfundet.

Til de siste målingene ble startstrømbegrenseren byttet ut med CTM Lyngs nullgjennomgangsrelé (ref. 2.7.3.1), som vist i figur 3.14. Det ble utført åtte målinger av startstrømmen med 20 sekunders mellomrom.

### 3.1.3.5 Måling av stasjonær strøm

Måling av stasjonær strøm ble gjort med tangamperemeter og oscilloskopets automatiske beregning av RMS-strøm. På grunn av dårlig tid var det kun mulig å måle stasjonær strøm med alle tre kursene sammenkoblet og startstrømbegrenseren tilkoblet kursen.

### 3.1.4 Behandling av måledata fra anlegg

Behandlingen av måledata fra NTNU og Samfundet ble gjort i to trinn:

1. Først ble målingene der innkoblingen skjedde på toppverdien til spenningen valgt ut manuelt. CSV-filene fra disse målingene ble importert til Python hvor de ble analysert og plottet.
2. Deretter ble dataen fra enkeltmålingene eksportert til et Excel-dokument hvor gjennomsnitt og usikkerhet ble beregnet, og anleggene kunne sammenliknes med stasjonær strøm og hverandre.

#### 3.1.4.1 Plotting og beregninger i Python

Måledataen fra anlegg ble analysert med programmeringsspråket Python samt Python-modulen Pandas, som er en populær utvidelse for behandling av store datasett. Til slutt ble det tegnet grafer ved hjelp av Python-modulen Matplotlib.

I denne sammenhengen er det interessant å se på det verste tilfellet, hvor startstrømmen er størst. Derfor startet analysen med en gjennomgang av skjermbildene fra oscilloskopet slik at målingene som så ut til å treffe på toppverdien til spenningen kunne velges ut manuelt. Ettersom svært få målinger vil treffe nøyaktig 90° eller 270° på spenningens sinuskurve ble "toppverdi" definert til innkobling der spenningen var over 300V.

Disse målingene ble deretter analysert i et Python-skript hvor følgende verdier ble beregnet:

- Størrelsen på startstrømmens toppverdi.
- Pulsbredden til startstrømmen.
- Spenningen ved innkoblingsøyeblikket.

Størrelsen på startstrømmen ble funnet ved å finne det målepunktet i CSV-filen med størst verdi. Deretter ble pulsbredden funnet ved å filtrere ut de verdiene i datasettet hvor strømmen var større enn 50% av toppverdien og finne tiden mellom første og siste målepunkt.

Ved innkoblingen kan det være et spenningsfall som følge av brå innkobling av en stor kapasitiv last. For å forhindre at dette gir feil spenningsavlesning blir spenningen beregnet rett før innkobling. Dette gjøres ved å trekke fra 1/4 av pulsbredden fra tidspunktet hvor strømmen først krysser 50% av toppverdien på stigende flanke.

Dette gir et estimat på starten av pulsen, som er like før den faktiske innkoblingen. Utregning gjøres med formel (3.1). Hvor  $t_0$  er estimatet på innkoblingstidspunktet,  $t_{50}$  er tidspunktet strømmen krysser 50% av toppverdien på stigende flanke og  $pw$  er pulsbredden. Spenningen ved innkobling estimeres deretter som spenningen i tidspunktet  $t_0$ .

$$t_0 = t_{50} - \frac{1}{4} * pw \quad (3.1)$$

Etter at startstrømmen er analysert tegnes det grafer av forløpet med hjelpelinjer for pulsbredde, toppverdi og 50% av toppverdi. Til slutt skrives toppverdien til startstrømmen, pulsbredden og spenningen ved innkobling til et Excel-regneark som senere brukes for å sammenlikne ulike anlegg. Dette gjøres for alle målingene.

For å sjekke om det var overharmoniske komponenter i startstrømmen tett oppmot båndbredden til måleutstyret ble det også gjort en FFT av en tilfeldig valgt startstrøm per anlegg. FFT-analysen ble gjort i Python med modulen `numpy.fft`. Det ble deretter tegnet en graf med resultatet av FFT-analysen og dette ble sammenliknet med båndbredden til tangamperemeteret og oscilloskopet.

#### 3.1.4.2 Usikkerhetsberegning i Excel

I Excel ble gjennomsnittlig toppverdi og pulsbredde til startstrømmen beregnet for hvert anlegg. Deretter ble standardavviket til målingene og usikkerheten fra tangamperemeteret og oscilloskopet beregnet.

##### Kombinert usikkerhet i strømmens toppverdi

Usikkerheten i toppverdien ble beregnet som summen av standardavviket i målingene, usikkerheten fra strømtangen og usikkerheten fra oscilloskopet. Standardavviket til målingene ble beregnet med Excel-funksjonen "STDAV.S".

Usikkerheten fra strømtangen der FLUKE i200s tangen ble brukt (elektrovarmelab, høystrømbryterlab, verksted) ble beregnet utifra formler fra datablad for "Basic accuracy" og "Additional error". Der FLUKE i1000s tangen ble brukt (AQ- og AS-fordelingen på NTNU, og på Samfundet) ble formler for "Accuracy" og "Influence of conductor position in jaw opening" brukt. Der usikkerheten ble oppgitt som "<x% av målingen" (der x er et tall) ble x% av målingen brukt som usikkerhet for å dekke verste tilfelle. Usikkerheten fra oscilloskopet ble beregnet fra formelen for "DC measurement accuracy".

##### Kombinert usikkerhet i pulsbredden

Usikkerhet i pulsbredden ble beregnet som summen av standardavviket i målingene og usikkerheten i oscilloskopet. Standardavviket i målingene ble regnet likt som for toppverdien i Excel, mens usikkerheten fra oscilloskopet ble beregnet med formelen for "Delta time accuracy".

**Kombinert usikkerhet i stasjonær strøm**

Usikkerheten i stasjonær strøm ble beregnet som summen av standardavviket i målingene, usikkerheten i tangamperemeteret og usikkerheten i effektanalysatoren. Usikkerheten i FLUKE 435-II ble beregnet utifra formelen for "Accuracy" i databladet.

Måling av stasjonær strøm på Samfundet ble gjort med oscilloskop, derfor ble usikkerhet i stasjonær strøm på Samfundet beregnet som summen av usikkerheten til tangamperemeteret og oscilloskopet.

**3.2 Målinger på lab****3.2.1 Test av startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé**

Startstrømmer som kommer fra strømforsyninger til PC-er oppfører seg ganske likt som startstrømmer i LED-driverne. Derfor ble det ordnet et oppsett bestående av 10 bærbare PC-er med tilhørende strømforsyninger for å simulere en høy startstrøm. Hensikten med denne målingen var å teste hvilken effekt startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé hadde på startstrømmen.

**Måleinstrumenter**

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwartz	RTB2004	1333-1005K04 -203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter	FLUKE	i1000s	-	I04-0479
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516

**Tabell 3.6:** Utstyrliste til test av startstrømmer fra strømforsyning til PC-er.

**Utstyr som ble testet**

Instrument	Fabrikant	Navn	Elnummer
Nullgjennomgangsrelé	CTM Lyng	Microsafe 2-polt relé	4150105
Startstrømbegrenser	CAMTEC	ESB101	4100291

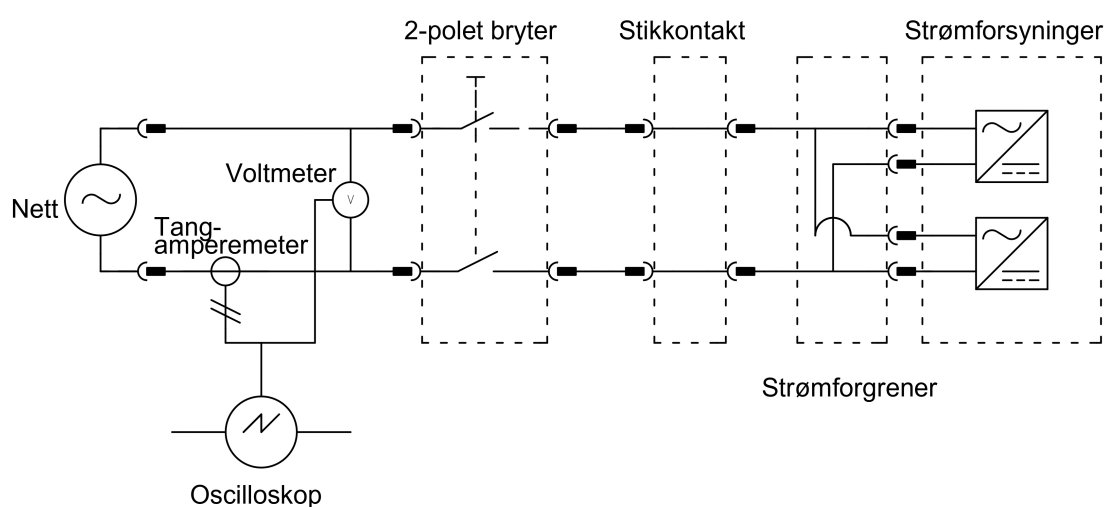
**Tabell 3.7:** Utstyr som ble testet med strømforsyning til PC-er.

**Annet utstyr**

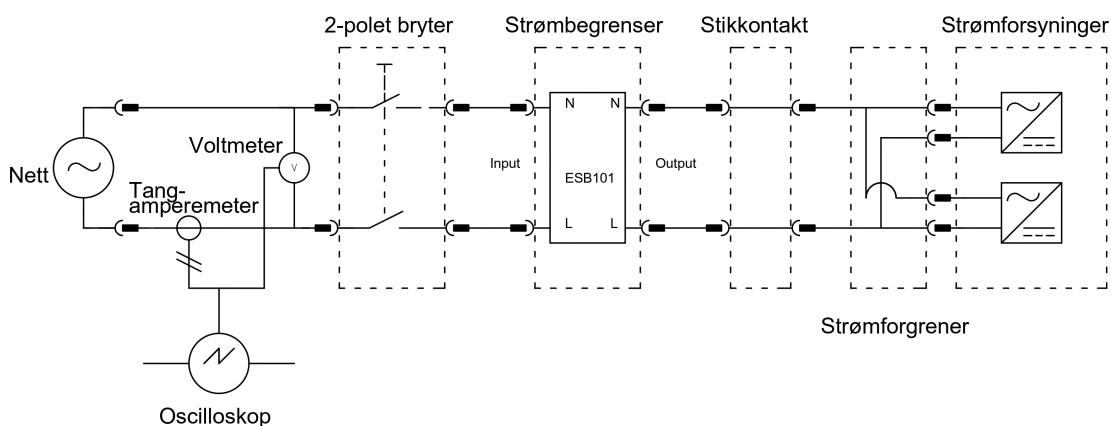
- 10 PC-er med tilhørende strømforsyning
- Labledninger
- 2-polt bryter
- Stikkontakt
- Strømforgrener (skjøteledning)

Testen besto av tre ulike oppsett, hvor alle oppsett brukte en bryter for å koble lasten inn og ut. Mellom hver måling ble det ventet 20 sekunder for å la kondensatorene i strømforsyningene lade seg ut. For å måle startstrømmen ble et tangamperemeter koblet på faseleder inn til bryteren. Strømtangen var koblet til et oscilloskop hvor man kunne lese av startstrømmen og pulsbredden. På hvert av de tre oppsettene ble målingene gjentatt helt til det var oppnådd 10 målinger hvor spenningen traff toppverdi på sinuskurven i innkoblingsøyeblikket.

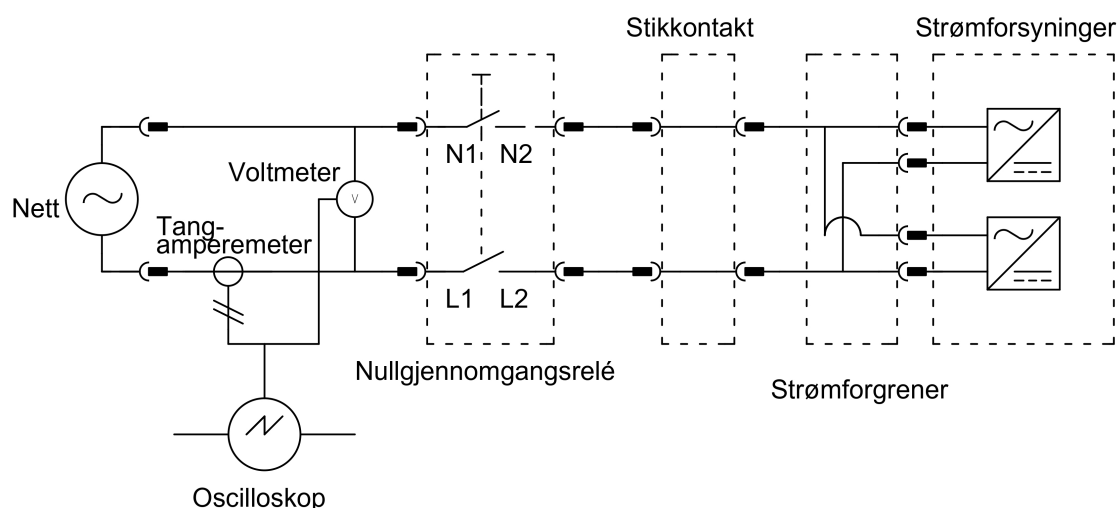
Første oppkobling besto av strømforsyningene koblet til nettspenning på arbeidsbenk via bryter, stikkontakt og strømforgrener, som vist i figur 3.15. Andre og tredje oppkobling var lik som første, men med henholdsvis startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé innkoblet.



Figur 3.15: Oppkobling 1: Referanseoppsett.



Figur 3.16: Oppkobling 2: Startstrømbegrenser.



Figur 3.17: Oppkobling 3: Nullgjennomgangsrelé.

### 3.2.2 Utløserkarakteristikk til vern

Utløserkarakteristikken til ulike vern ble målt for å finne ut hvor godt impulsutløserkurvene fra ABB, Siemens og Eaton stemte med tilhørende vern. I tillegg ble det brukt for å lage en universalkurve som kunne benyttes generelt for alle vern. Det har blitt tatt målinger av ni ulike vern fra syv produsenter med fokus på 16A-vern med C-karakteristikk. Valg av hvilke vern som ble testet, var ut ifra hva som var tilgjengelig. Tabell 3.8 viser hvilke vern som ble testet.

Produsent	Navn	Karakteristikk og størrelse	EL.Nr
Schneider	iC60 RCBO	C16	1600911
Schneider	iC60 RCBO	B16	1600903
Eaton	xPole digital NdRBM	C16	1611926
Siemens	5SY4316-7	C16	1642515
ABB	S 202M	C16	1665235
Chint	NB1 -63H	C16	1615529
Eaton	xEffect FAZ	C16	1605606
Biltema	Art. 44-556	C16	-
Gewiss	GW95227	C16	1606402

Tabell 3.8: Vern som ble testet.

Det ble utført to ulike tester med simuleringer av startstrømmer med ulike størrelser og pulsbredder, for å fastslå utløserkarakteristikken til de ulike vernene. Ettersom startstrømmen i LED-drivere kommer fra kondensatorer, ble det brukt kondensatorbanker for å simulere høye startstrømmer fra LED-drivere. Forskjellen på de to testene som ble gjennomført er om kondensatorbanken ble oppladet eller utladet.

### 3.2.2.1 Utladning av kondensatorbank

I tabellen under er det en liste over måleutstyret benyttet i dette forsøket:

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Keysight technologies	DSOX2014A	MY58103164	G04-0383
Tangamperemeter	FLUKE	i1000s	-	I04-0665
Multimeter	FLUKE	175	60130629	S03-0534
variac	Metrel	MA 4804	14151	B01-1085
Kontaktor	Schneider	LC1D18	-	-
Elektrolytisk kondensatorbank med likeretter	NTNU	-	-	B02-0627
Labledninger	-	-	-	-
2-polt bryter til styring av kontaktor	-	-	-	-
Vern	-	-	-	-
Modulkapsling til montering av vern	Namron	-	-	-

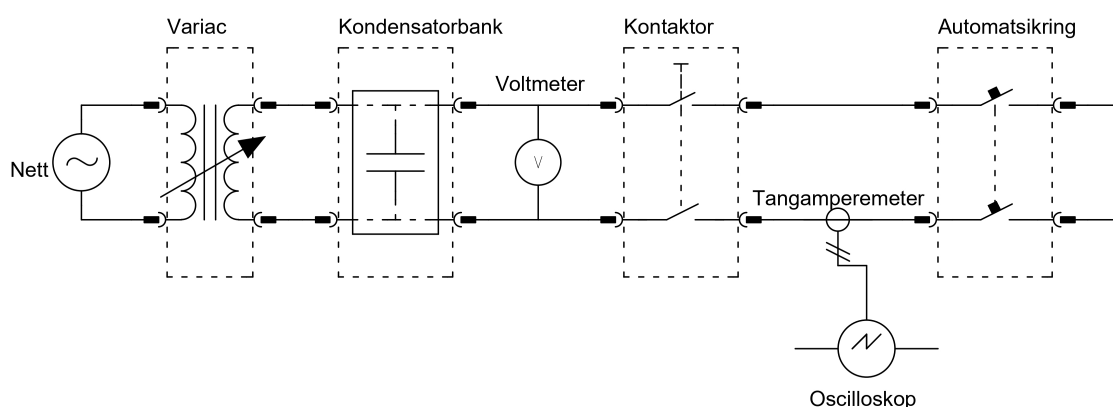
**Tabell 3.9:** Utstyrsliste til test med utladning av kondensatorbank.

I dette forsøket ble en kondensatorbank ladet opp med en variac. Kondensatorbanken ble deretter kortsluttet igjennom et vern for å generere en strømpuls, og det ble notert om strømpulsen løste ut vernet. For å lage varierte strømpulser, ble kondensatorbanken ladet opp til ulike spenningsnivå. Testen ble gjennomført i følgende trinn:

1. Kondensatorbanken ble ladet opp til ønsket spenningsnivå. Dette ble kontrollert med et voltmeter på kondensatorbankens utgang.
2. variac ble slått av.
3. Kortsluttet vern ble koblet inn ved hjelp av en kontaktor.
4. Strømpulsen ble målt av oscilloskopet og resultatet ble notert i Excel.

Automatsikringen som ble testet var kapslet inn i modulkapsling og kondensatorbanken var tildekt med en skjerm av plexiglass. Alle koblinger ble gjort med hjelp av helisolerte bananplugg og bananplugg-innganger tilkoblet på kontaktor og automatsikring. Kortslutningsstrømmen ble målt med hjelp av tangamperemeter og oscilloskop.





Figur 3.18: Utladning av kondensatorbank.

For hver måling ble testspenning, toppverdien og pulsbredden til strømmen, samt informasjon om vernet løste ut eller ikke, notert ned i Excel. I tillegg ble skjermbilde av oscilloskop og CSV-fil lagret for hver måling. Toppverdien og pulsbredden ble de fleste gangene automatisk beregnet og lest av oscilloskopet. For noen kurver beregnet oscilloskopet feil, og de målingene ble derfor målt manuelt inne på oscilloskopet.

Mange av målingene som ble tatt hadde ikke en lignende kurveform som startstrømmen på LED-anlegg. Disse målingene ble forkastet underveis i forsøket og ikke notert. Det estimeres at det ble gjort rundt 8000-9000 forsøk, hvor omtrent 10% ble lagret. Vedlegg B viser eksempel på kurver som ble lagret og forkastet underveis.

### 3.2.2.2 Oppladning av kondensatorbank

I tabellen under er det en liste over alle måleinstrumentene benyttet i dette forsøket:

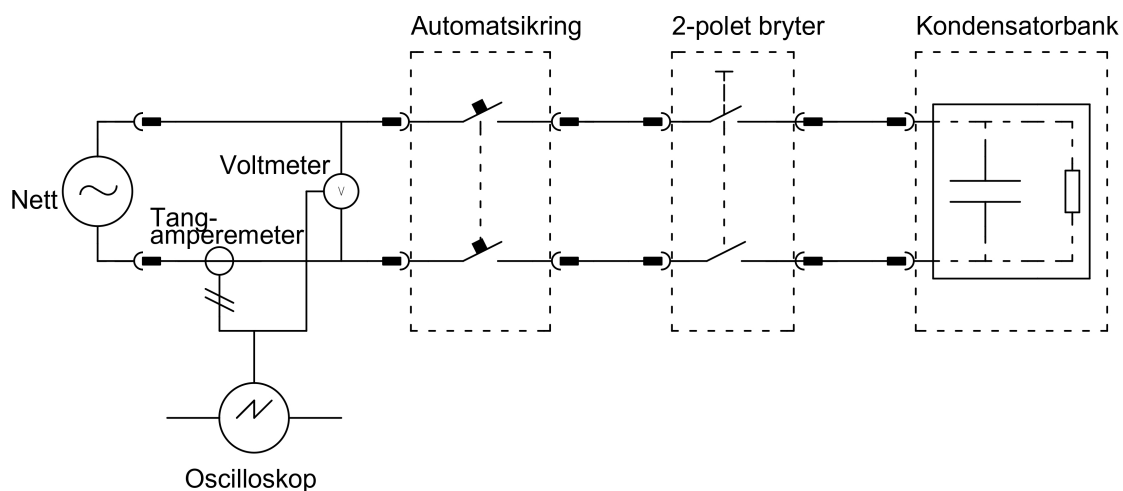
Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwartz	RTB2004	1333-1005K04 -203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter	FLUKE	i1000s	-	I04-0479
Kontaktor	Moeller	DIL M(C)17	-	-
3 × AC-kondensatorbanker	NTNU	B25832-A4336-K009	-	K03-0028 K03-0029 K03-0030
Labledninger	-	-	-	-
2-polt bryter til styring av kontaktor	-	-	-	-
Vern som skal testes	-	-	-	-
Modulkapsling til montering av vern	Namron	-	-	-
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516

Tabell 3.10: Utstyrsliste til test med oppladning av AC-kondensatorbank.

I dette forsøket ble det brukt tre identiske kondensatorbanker, som besto av 15 innkapslede  $33\mu\text{F}$  kondensatorer. Mellom hver kondensator på kondensatorbanken var det tilkoblinger som lett kunne kobles sammen ved hjelp av lasker. På denne måten kunne man variere lasten med alt fra én til 45 kondensatorer parallellkoblet, og kapasitansen kunne dermed endres fra  $33\mu\text{F}$  til  $1485\mu\text{F}$ . Dette gjorde det mulig å simulere startstrømmer med ulike størrelser og varigheter. Ved å øke antall kondensatorer, kan man øke startstrømmen og pulsbredden. Kondensatorbanken ble koblet gjennom vernet som skulle testet. Det ble i denne testen benyttet 230V AC-spenning fra TN-forsyningen i lab-benken, koblet mellom N og L1. Testen ble gjennomført i følgende trinn:

1. Kontaktor ble koblet inn med hjelp av bryter.
2. Kondensatorbanken ble ladet opp.
3. Kontaktor ble koblet ut.
4. Strømpulsen ble målt av oscilloskopet og resultatet ble notert ned i Excel og lagret med CSV-fil og skjermbilde.
5. Kondensatorbanken ladet seg ut gjennom parallelle motstander.
6. Spenningen over kondensatorbanken ble målt for å bekrefte at den har ladet seg ut.

Det ble benyttet modullkapsling, plexiglass og bananpluggen likt som ved utlading av kondensatorbank. Oppladningsstrømmen ble målt med hjelp av tangamperemeter og oscilloskop. For å kunne se hvor på spenningskurven innkoblingen skjedde, ble også spenningen målt med oscilloskopet.



Figur 3.19: Oppladning av kondensatorbank.

For hver måling ble det notert ned antall kondensatorer, toppverdien til strømmen, pulsbredden og om vernet løste ut eller ikke. Toppverdien ble lest av inne på oscilloskopet ved å zoome inn på kurven på skjermen. Pulsbredden ble lest av mellom 50% av toppverdi på stigende flanke, og 50% på synkende flanke. Noen kurver krysser 50% av toppverdien flere ganger og ved disse tilfellene måles det fra første stigende krysning til siste synkende krysning av 50% av toppverdien. I tillegg ble skjermbilde og CSV-fil lagret for hver måling.

Orginalt var dette forsøket tiltenkt å teste hvor mange kondensatorer som kunne kobles inn før vernet løste ut, og deretter sammenligne dette med antallet man kunne koble inn med startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé. Det viste seg derimot at denne testen ikke funket og den ble forkastet.

Resultatet ble derimot benyttet til utløserkarakteristikken. Med dette som utgangspunkt ble det ikke tatt veldig mange målinger sammenliknet med det andre forsøket.

### 3.2.2.3 Beregning av forventet utløserkarakteristikk

Ved hjelp av impulsutløserkurvene fra ABB, Siemens og Eaton ble holdestrømmen beregnet for tilhørende vern med formel (2.12), som gjengis i formel (3.2). Dette ble brukt til å sammenligne resultatet fra målingene opp mot kurven.

$$I_{hold} = K * I_4 \quad (3.2)$$

### 3.2.2.4 Universell utløserkurve

Det har blitt laget en utløserkurve basert på måleresultatet fra forsøkene. Måleresultatene fra alle C16-vern ble samlet og grafisk framstilt i et spredningsdiagram. Utløserkurven er laget ved å tegne en linje med verdier som ligger ved skillet mellom hvor vernene løser ut eller ikke.

For å se hvor godt den universelle utløserkurven fungerer til å kunne dimensjonere flere LED-armaturer på samme kurs, har kurven blitt testet. Den ble testet opp mot dokumentasjonen til 109 ulike LED-armaturer fra produsentene Ledvance og Phillips. Disse produsentene har oppgitt både antall armaturer som kan tilkobles til en C16-kurs, og verdier på startstrøm og pulsbredde per armatur.

For å beregne antall lamper som kan tilkobles én C16-kurs, ble universalkurven benyttet med metoden som forklares i delkapittel 2.7.1. Holdestrømmen blir lest av universalkurven, og brukes til å beregne antall LED-armaturer som kan tilkobles kursen. Antallet sammenlignes deretter med antallet i databladet på samme vern, for å se om universalkurven kan tillate flere.

### 3.2.2.5 Behandling av måledata

Utløserkarakteristikken til vernene ble tegnet med Python og Python-modulen Matplotlib. Her ble målinger for de forskjellige vernene tegnet i et spredningsdiagram med strøm på x-aksen og tid på y-aksen. Diagrammet ble tegnet slik at hvert punkt representerer en enkeltmåling og fargen på punktet representerer om vernet løste ut eller ikke. Målingene ble også tegnet sammen med impulsutløserkurvene fra ABB, Siemens og Eaton for sammenlikning.

Dataen for testen med utløserkarakteristikk består av mange enkeltmålinger og usikkerheten kan derfor ikke oppgis som gjennomsnitt  $\pm$  usikkerhet. Om det skal regnes en usikkerhet for denne målingen må det gjøres for hvert enkelt målepunkt og eventuelt illustreres med usikkerhetsstolper i spredningsdiagrammet.

Ettersom det er svært mange målepunkter som ligger tett inntil hverandre, ville det blitt så mange

usikkerhetsstolper at diagrammet blir utydelig og vanskelig å lese. Samtidig ville dette vært en tidkrevende prosess som ikke tilfører noe særlig verdi. Derfor ble det valgt å ikke beregne usikkerheten per punkt, men heller oppgi usikkerheten til måleutstyret som ble brukt.

### 3.2.3 Startstrøm på LED-lysrør

Det ble gjort målinger av startstrømmen fra både LED-lysrør og konvensjonelle lysstoffrør. Hensikten med disse målingene var for å se om startstrøm fra LED-lysrør var vesentlig høyere og potensielt kunne være et problem ved utbytting til LED-lysrør i eksisterende anlegg med konvensjonelle lysrør.

I tillegg ble det gjort målinger med ulik kabellengde på tilførselen, og med IT- og TN-nett for å se hvilken innvirkning dette ville ha på startstrømmen på et LED-lysrør.

For alle målingene ble pulsbredde og toppverdi funnet ved å bruke “zoom”-funksjonen på oscilloskopet, lese av verdiene fra skjermen og notere de i Excel. Deretter ble gjennomsnittet, standardavviket i målingene, usikkerheten fra tangamperemeteret og usikkerhet fra oscilloskopet beregnet likt som for målingene på anlegg.

#### Måleinstrumenter

Instrument	Fabrikant	Modell	Serienummer	NTNU reg.nr.
Oscilloskop	Rohde & Schwartz	RTB2004	1333-1005K04 -203723-DA	G04-0406
Tangamperemeter	FLUKE	i1000s	-	I04-0479
Differensial spenningsprobe til oscilloskop	Tektronix	P5200A	C020633	I06-0516

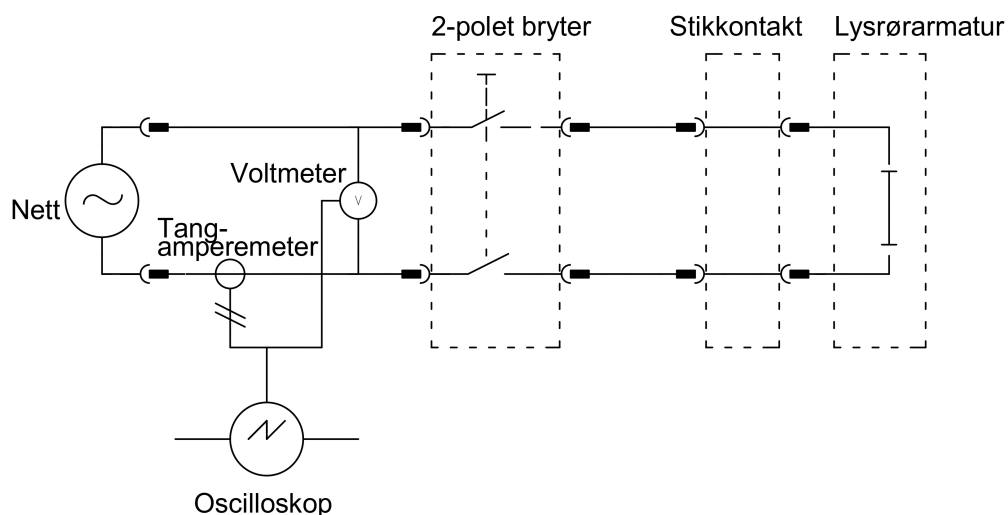
**Tabell 3.11:** Måleutstyr til test av lysrør.

#### Annet utstyr

- Elektronisk tenner til lysrør.
- Osram ST111 tenner til lysrør.
- 36W OSRAM Lumilux lysrør.
- 20W OSRAM SubstiTUBE EM LED-lysrør.
- Labledninger.
- 2-polt bryter.
- Stikkontakt.
- Skjøtetrommel 40m 1,5mm<sup>2</sup>.
- Arbeidsbenk med mulighet til å skifte mellom IT- og TN-nett tilførsel.

### 3.2.3.1 LED-lysrør og lysstoffrør

Måleoppsettet besto av en enkel 120 cm lang armatur koblet til 230V nettspenning via en stikkontakt og bryter. Mellom hver måling ble det ventet 10 sekunder for utladning av kondensatorer. Det ble utført noen testmålinger, og funnet at det var tilnærmet ingen forskjell på startstrømmene om man ventet 10 eller 20 sekunder. Derfor ble ventetiden kuttet ned til 10 sekunder for å spare tid. Alle målingene ble gjentatt helt til 10 av målingene traff toppverdien til spenningen i innkoblingsøyeblikket.



Figur 3.20: Måleoppsett for lysrørarmatur.

Det ble først utført målinger av startstrømmen til et Osram Lumilux 36W T8 lysstoffrør med en vanlig singeltenner. Deretter ble det utført nye målinger på samme Lumilux-lysrør, men denne gang med elektronisk tenner. Det ble gjort målinger med begge for å se om det var noe vesentlig forskjell med ulike tenner.

Til slutt ble Lumilux-lysrøret erstattet av et Osram SubstiTUBE 20W LED-lysrør. Dette lysrøret er ment som erstatning for Lumilux-lysrøret som ble testet først. Tennen ble byttet ut med en tennererstatning som følger med LED-lysrøret. Det ble også gjort en FFT-analyse for en tilfeldig måling av LED-lysrør og konvensjonelle lysrør.

### 3.2.3.2 Kabelimpedansens innvirkning på startstrømmen

For å se hvor stor innvirkning kabelens impedans har på startstrømmen, ble det utført målinger med samme LED-lysrør og måleoppsett som i figur 3.20, men med ulike kabellengder. Mellom hver måling ble det ventet 10 sekunder for utladning av kondensatorer. Alle målingene ble gjentatt helt til 15 av målingene traff toppverdien til spenningen i innkoblingsøyeblikket.

Først ble startstrømmen til LED-lysrøret målt med samme oppsett som tidligere. Deretter ble det koblet inn en skjøtetrommel mellom lysarmatur og stikkontakt. Kabelen på trommelen var 40 meter lang, og ledertverrsnittet var  $1,5\text{mm}^2$ .

### 3.2.3.3 Forskjell på startstrømmer i IT- og TN-nett

For å se om det var noe vesentlig forskjell på startstrømmer i IT- og TN-nett, ble det utført en test av dette på LED-lysrør. Måleoppsettet var det samme som i figur 3.20. Mellom hver måling ble det ventet 10 sekunder for utladning av kondensatorer. Alle målingene ble gjentatt helt til 15 av målingene traff toppverdien til spenningen i innkoblingsøyeblikket.

Først ble det tatt målinger av startstrømmen med 230V forsyning fra TN-nett i arbeidsbenk på laben. Deretter ble nettsystemet til arbeidsbenken skiftet over til IT-nett. Samme målinger og måleprosess ble utført på IT-nettet.

# Kapittel 4: Resultat

## 4.1 Målinger på anlegg

### 4.1.1 Måling på NTNU

Dette delkapittelet tar for seg startstrømmen og stasjonær strøm som ble målt ved anlegg på NTNU. Måleresultatet ble sammenlignet med datablad og det ble sett på utnyttelse av tilgjengelig kurskapasitet. Resultatet fra målt stasjonær strøm ved Samfundet er også inkludert i delkapittelet.

#### 4.1.1.1 Startstrømmens størrelse og varighet

Tabell 4.1 viser startstrømmer, pulsbredde, nominell strøm, kabellengde til første armatur og forholdet mellom startstrøm mot nominell strøm på anleggene på NTNU. Målingene av strøm og pulsbredde er gjennomsnittsverdier. En større oversikt er vedlagt i vedlegg C.

Sted	$I_{max}$ [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Nominell strøm [A]	$I_{max}/I_N$	Kabellengde til første armatur [m]
Verksted,A	141 $\pm$ 38	367 $\pm$ 18	2,99 $\pm$ 0,63	47	12
Verksted, B	123 $\pm$ 30	418 $\pm$ 0	3,02 $\pm$ 0,63	41	16
Verksted,C	112 $\pm$ 28	429 $\pm$ 0	2,67 $\pm$ 0,62	42	20
Verksted, varelager	98 $\pm$ 31	482 $\pm$ 31	3,32 $\pm$ 0,63	30	33
Høystrømbryterlab	155 $\pm$ 36	241 $\pm$ 7	2,31 $\pm$ 0,61	67	15
Elektrovarmelab, rad 1	60 $\pm$ 14	221 $\pm$ 0	1,00 $\pm$ 0,58	60	20
Elektrovarmelab, rad 2	57 $\pm$ 13	220 $\pm$ 0	1,03 $\pm$ 0,58	55	24
Elektrovarmelab, rad 3	58 $\pm$ 17	233 $\pm$ 10	1,02 $\pm$ 0,58	57	27
Kjeller, AS fordeling, F4	195 $\pm$ 25	290 $\pm$ 13	2,18 $\pm$ 0,60	89	23
Kjeller, AS fordeling, F5	118 $\pm$ 18	192 $\pm$ 11	0,88 $\pm$ 0,57	134	33
Kjeller, AS fordeling, F6	183 $\pm$ 20	322 $\pm$ 5	2,24 $\pm$ 0,61	81	41
Kjeller, AQ fordeling, F3	174 $\pm$ 21	338 $\pm$ 9	2,22 $\pm$ 0,61	78	3
Kjeller, AQ fordeling, F4	224 $\pm$ 28	396 $\pm$ 9	3,13 $\pm$ 0,06	72	6

**Tabell 4.1:** Gjennomsnitt av målinger tatt på NTNU for startstrøm, pulsbredde og nominell strøm.

Startstrømmene målt på anleggene ved NTNU har en størrelse som ligger mellom 57A og 224A. Pulsbredden til strømmene ligger mellom 192 $\mu$ s og 482 $\mu$ s. Det er altså ganske stor variasjon i startstrømmens størrelse og varighet mellom anleggene. Her kommer det også fram hvor mye større startstrømmene er enn nominell strøm, og i AS-fordelingens kurs F5 i kjeller er den hele 134 ganger større.

#### 4.1.1.2 Startstrøm på anlegg sammenliknet med datablad

Databladet til armaturene oppga ingen informasjon om størrelse og varighet på startstrømmen. Det er derfor ikke mulig å sammenlikne mange av målingene med databladet. Fagerhult-armaturen i korridoren bruker en 75W Phillips Xitanium driver som oppgir både startstrøm og pulsbredde i databladet. Dette er gjengitt i tabell 4.2 sammen med måledataen for kursene denne armaturen var montert i.

Sted	Antall armaturer	Målt startstrøm per armatur [A]	Målt pulsbredde [ $\mu$ s]	Oppgitt startstrøm [A]	Oppgitt pulsbredde [ $\mu$ s]	Kabellengde til første armatur [m]
Kjeller, AS fordeling, F4	12	16	290	20	240	23
Kjeller, AS fordeling, F5	4	30	192	20	240	33
Kjeller, AQ fordeling, F3	10	17	338	20	240	3
Kjeller, AQ fordeling, F4	14	16	396	20	240	6

**Tabell 4.2:** Sammenlikning av målinger i korridor mot oppgitt data fra datablad.

Tre av fire kurser hadde en lavere startstrøm per armatur enn hva som oppgis i databladet, mens kurs F5 i AS-fordelingen hadde større startstrøm på 30A per armatur.

Pulsbredden varierer en god del mellom anleggene. Kurs F5 i AS-fordelingen hadde kortest varighet på 192 $\mu$ s, og kurs F4 i AQ-fordelingen hadde den lengste pulsbredden på 396 $\mu$ s. AS-fordelingens F5 skiller seg ut som målingen med både størst strøm per armatur og kortest varighet.

#### 4.1.1.3 Utnyttelse av tilgjengelig kurskapasitet ved anlegg

Tabell 4.3 tar for seg en oversikt over hvor stor del av tilgjengelig kurskapasitet de ulike belysningskursene bruker. Tallene er basert på målt stasjonær strøm sammenliknet med vernets merkestrøm.

Sted	Antall armaturer	Stasjonær strøm [A]	Nominell utløsestrøm vern [A]	Utnyttelse av kurskapasitet [%]	Antall armatur for C16 i datablad
Verksted	26	8,68	16	54,3	22
Verksted, varelager	10	3,33	16	20,8	22
Høystrømbryterlab	10	2,31	16	14,4	16/22 <sup>1</sup>
Elektrovarmelab	12	3,05	16	19,1	22
Kjeller, AS fordeling, F4	12	2,18	16	13,6	40
Kjeller, AS fordeling, F5	4	0,88	16	5,5	40
Kjeller, AS fordeling, F6	11 <sup>2</sup>	2,24	16	14,0	40
Kjeller, AQ fordeling, F3	10	2,22	16	13,9	40
Kjeller, AQ fordeling, F4	14	3,11	16	19,5	40
Samfundet, fordelt på tre kurser	34	4,41	3×16	9,2	-
Samfundet, alle kurser sammenkoblet	34	4,41	16	27,5	-

**Tabell 4.3:** Målinger tatt på anlegg for utnyttelse av kurskapasitet.

Målingene viser at det i verste tilfelle kun blir utnyttet 5,5% av installert kurskapasitet, og dette gjaldt for kurs F5 i AS fordeling. I beste tilfelle blir kurskapasiteten på Verkstedet utnyttet med 54,3%.

<sup>1</sup> Usikkert hvilken armatur-modell som er installert.

<sup>2</sup> AS F6 har 9 Fagerhult-armaturer og 2 Glamox-armaturer, antall fra datablad er basert på Fagerhult-armaturen og blir ikke helt nøyaktig.



Tabellen viser også at antall armaturer installert er vesentlig lavere enn anbefalt i databladet. Unntaket er verkstedet, hvor det er benyttet trefase-kurs.

Dersom man tar utgangspunkt i målt stasjonær strøm og antallet armaturer gitt i databladet, kan man oppnå følgende utnyttelse av kurskapasiteten:

- **Verksted, varelager** 46 %
- **Høystrømbryterlab** 32 %
- **Elektrovarmelab** 35 %
- **Kjeller** 56%

#### 4.1.2 Måling på Studentersamfundet

Her presenteres resultatene fra målingene som ble utført på Samfundet, hvor startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé ble testet. Tabell 4.4 viser gjennomsnittlige verdier for startstrøm og pulsbredde ved de forskjellige målingene på Samfundet. Verdiene fra raden med nullgjennomgangsrelé er basert på gjennomsnittet av alle åtte målinger tatt med reléet, mens resterende rader angir gjennomsnittsverdier av alle toppverdi-målinger.

Måling av stasjonær strøm med alle tre kurser sammenkoblet på ett vern med startstrømbegrenser, viste en RMS-strøm på 4,4A.

	Startstrøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
<b>Kun kurs Q3</b>	355 $\pm$ 46	292 $\pm$ 10
<b>Alle kurser sammenkoblet</b>	728 $\pm$ 130	555 $\pm$ 55
<b>Alle kurser sammenkoblet med startstrømbegrenser</b>	46 $\pm$ 11	2452 $\pm$ 551
<b>Alle kurser sammenkoblet med nullgjennomgangsrelé</b>	127 $\pm$ 13	3159 $\pm$ 151

**Tabell 4.4:** Gjennomsnittlig startstrøm og pulsbredde fra målinger utført på Studentersamfundet.

Gjennomsnittlig startstrøm ble målt til 728A med alle kurser sammenkoblet. Ved å koble inn startstrømbegrenser ble den redusert til 46A, mens nullgjennomgangsreléet reduserte strømmen til 127A. Ved begge tilfeller ble pulsbredden betydelig større.

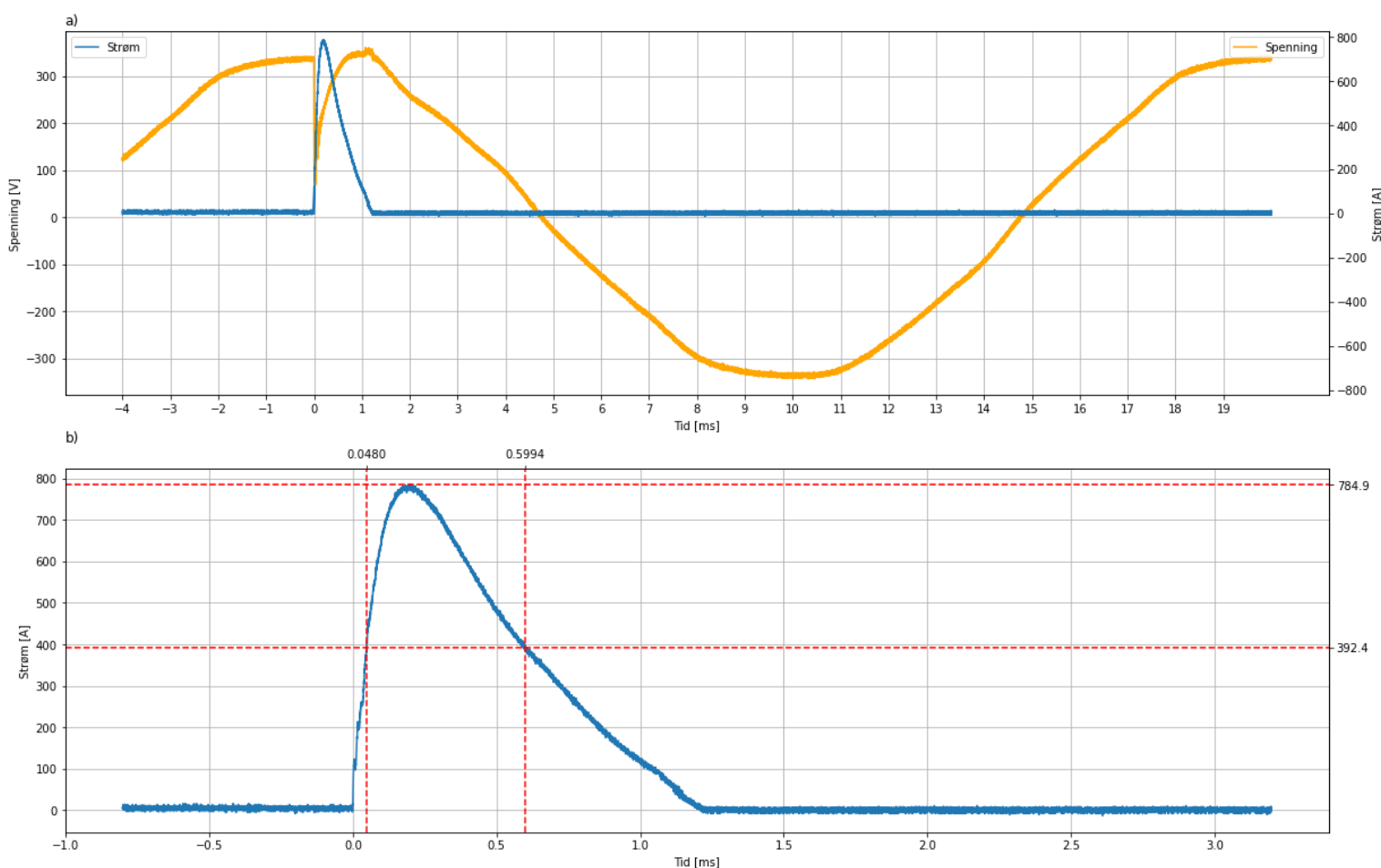
Målingene på Samfundet ga følgende resultater på utløsermekanismen til C16-vernet fra Chint:

- Med kun én kurs innkoblet løste vernet ut **0/5** ganger.
- Med alle kursene sammenkoblet løste vernet ut **13/14** ganger.
  - Løste ikke ut ved nullgjennomgang med 167A toppverdi og pulsbredde  $T_{50}$  på 3,06ms.
- Med alle kursene sammenkoblet, med startstrømbegrenser, løste vernet ut **0/20** ganger, hvor 13 av målingene traff toppverdi.
- Med alle kursene sammenkoblet, med nullgjennomgangsrelé, løste vernet ut **8/8** ganger.
- Med to kurser innkoblet, med nullgjennomgangsrelé, løste vernet ut **0/2** ganger.

#### 4.1.2.1 Høyeste startstrøm med alle tre kurser sammekoblet

Figur 4.1 viser måledata fra oscilloskopet av høyeste målte startstrøm da alle tre kursene var sammenkoblet uten startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé.

Øverste graf i figuren viser strøm (blå) og spenning (oransje) over hele perioden, mens nederste graf har zoomet inn på startstrømmen og inneholder markeringer for toppverdi og pulsbredde  $T_{50}$ .

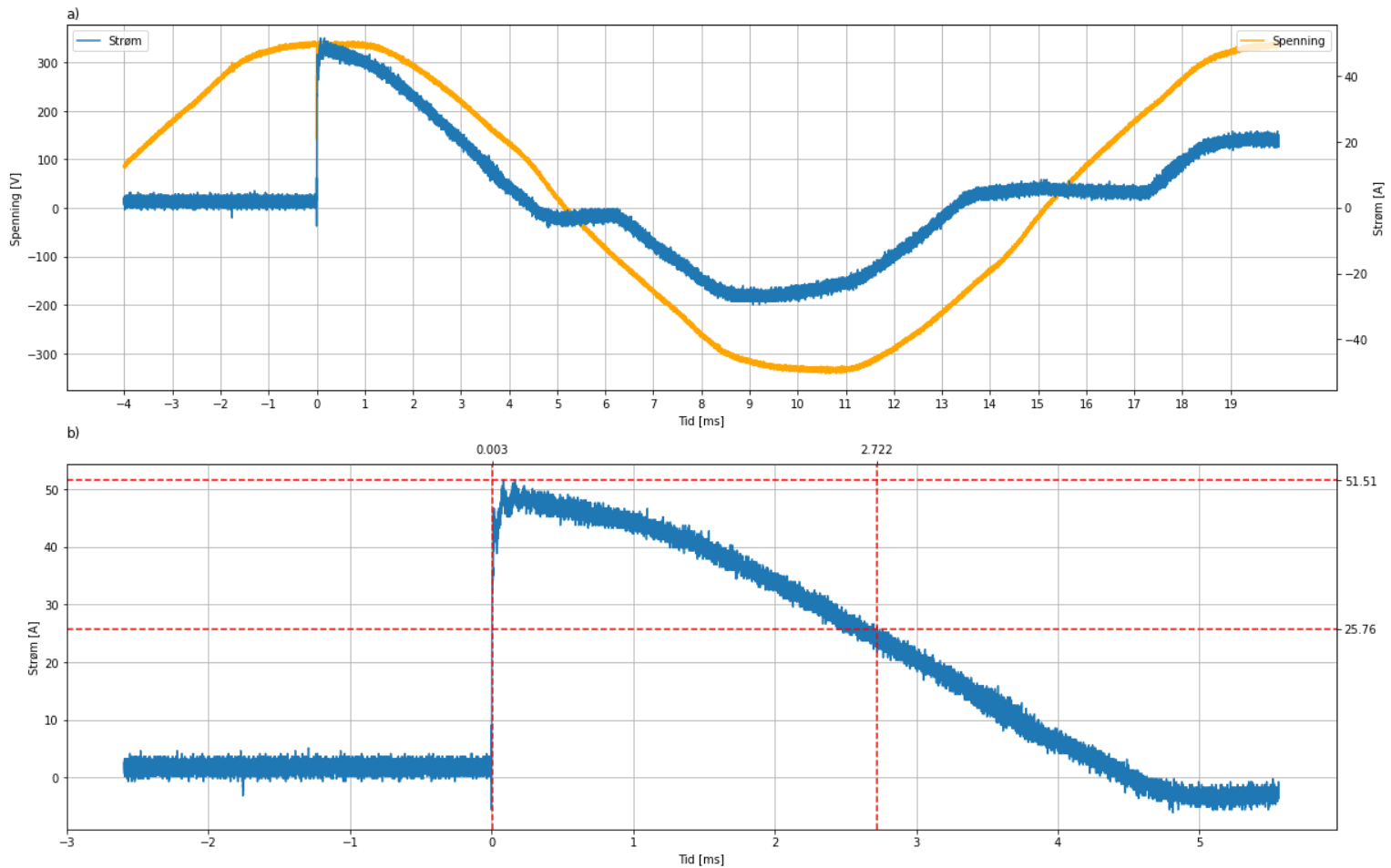


**Figur 4.1:** Måledata fra oscilloskop av målingen med høyest startstrøm uten startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé.

Den største startstrømmen målt ved Samfundet uten startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé var 784,9A med en pulsbredde på 550 $\mu$ s.

#### 4.1.2.2 Høyeste startstrøm med startstrømbegrenser

Figur 4.2 viser måledata fra oscilloskopet av høyeste målte startstrøm med startstrømbegrenser innkoblet. Øverste graf i figuren viser strøm (blå) og spenning (oransje) over hele perioden, mens nederste graf har zoomet inn på startstrømmen og inneholder markeringer for toppverdi og pulsbredde

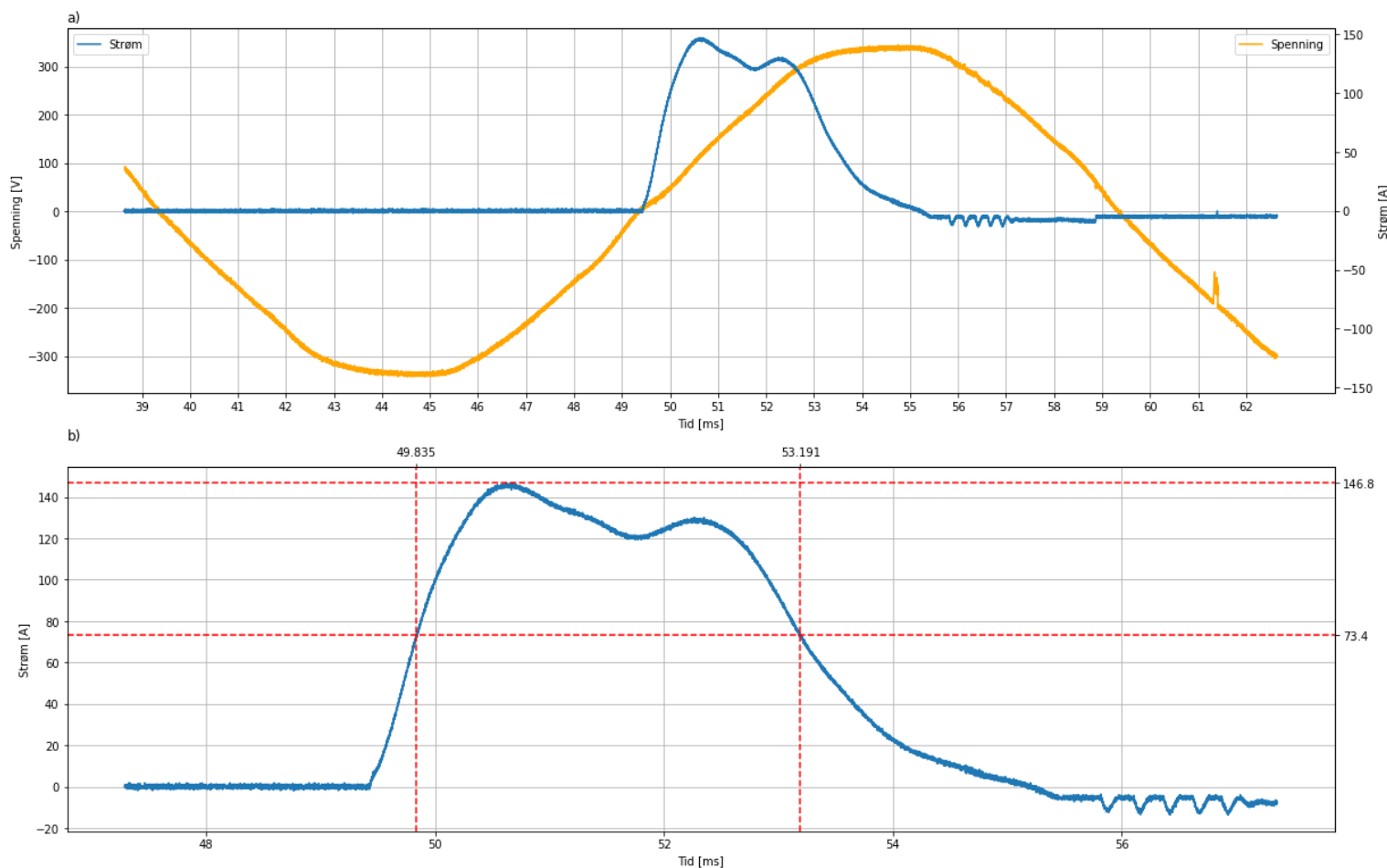


**Figur 4.2:** Måledata fra oscilloskop av målingen med høyest startstrøm med startstrømbegrenser innkoblet.

Med startstrømbegrenseren innkoblet på Samfundet ble den største startstrømmen redusert til 51,5A, mens pulsbredden ble forlenget til 2720 $\mu$ s.

### 4.1.2.3 Høyeste startstrøm med nullgjennomgangsrelé

Figur 4.2 viser et skjermbilde fra oscilloskopet av høyeste målte startstrøm med nullgjennomgangsrelé innkoblet. Øverste graf i figuren viser strøm (blå) og spenning (oransje) over hele perioden, mens nederste graf har zoomet inn på startstrømmen og inneholder markeringer for toppverdi og pulsbredde



**Figur 4.3:** Måledata fra oscilloskop fra målingen med høyest startstrøm med nullgjennomgangsrelé innkoblet.

Den største startstrømmen målt med nullgjennomgangsreléet var 146,8A. Her ble pulsbredden forlenget til 3360μs.

## 4.2 Målinger på lab

### 4.2.1 Test av strømbegrenser og nullgjennomgangsrelé

Startstrømbegrenseren og nullgjennomgangsreléet ble testet på lab med hjelp av bærbare PC-er. Tabell 4.5 inneholder gjennomsnittsverdier av målingene av startstrøm og pulsbredde fra forsøket. Verdiene oppgis som gjennomsnittsverdier av alle målingene, med kombinert usikkerhet.

	Startstrøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
<b>Direktekoblet</b>	183 $\pm$ 19	281 $\pm$ 12
<b>Startstrømbegrenser</b>	34 $\pm$ 6	863 $\pm$ 167
<b>Nullgjennomgangsrelé</b>	20 $\pm$ 4	2742 $\pm$ 65

**Tabell 4.5:** Gjennomsnittlig startstrøm og pulsbredde fra målinger på PC-strømforsyninger.

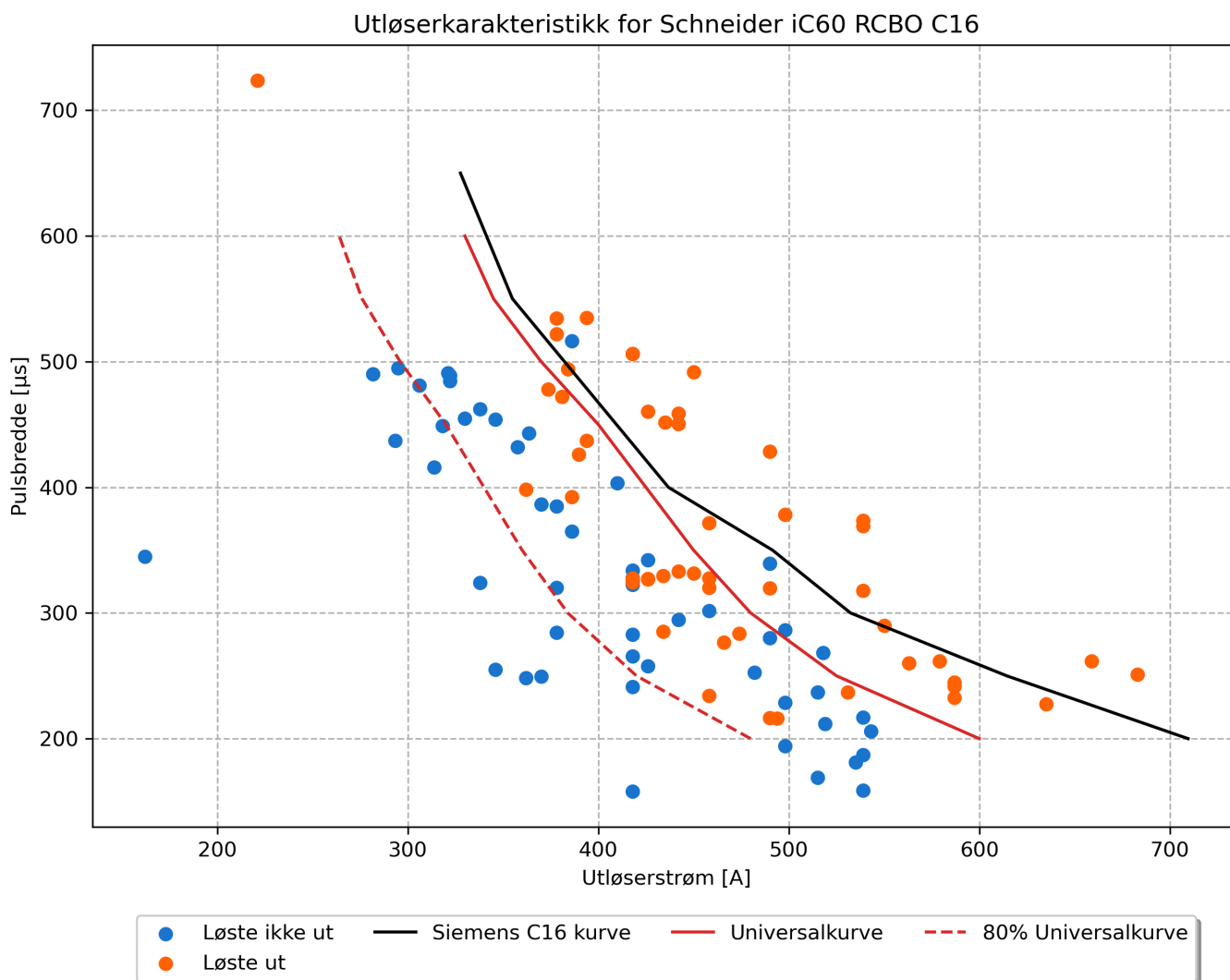
Resultatet fra målingene hvor strømforsyningene er koblet direkte til tilførsel, viser en gjennomsnittlig startstrøm på 183A med en gjennomsnittlig pulsbredde på 281 $\mu$ s. Dette er tall som kan være representative for et mindre LED-anlegg.

Resultatet viser også at både startstrømbegrenseren og nullgjennomgangsreléet reduserer startstrømmen betraktelig. Samtidig kan man se at pulsbredden blir betydelig lengre, noe som samstemmer godt med målingen gjennomført på samfundet.

Fullstendig tabell med alle måleresultater finnes i vedlegg D.

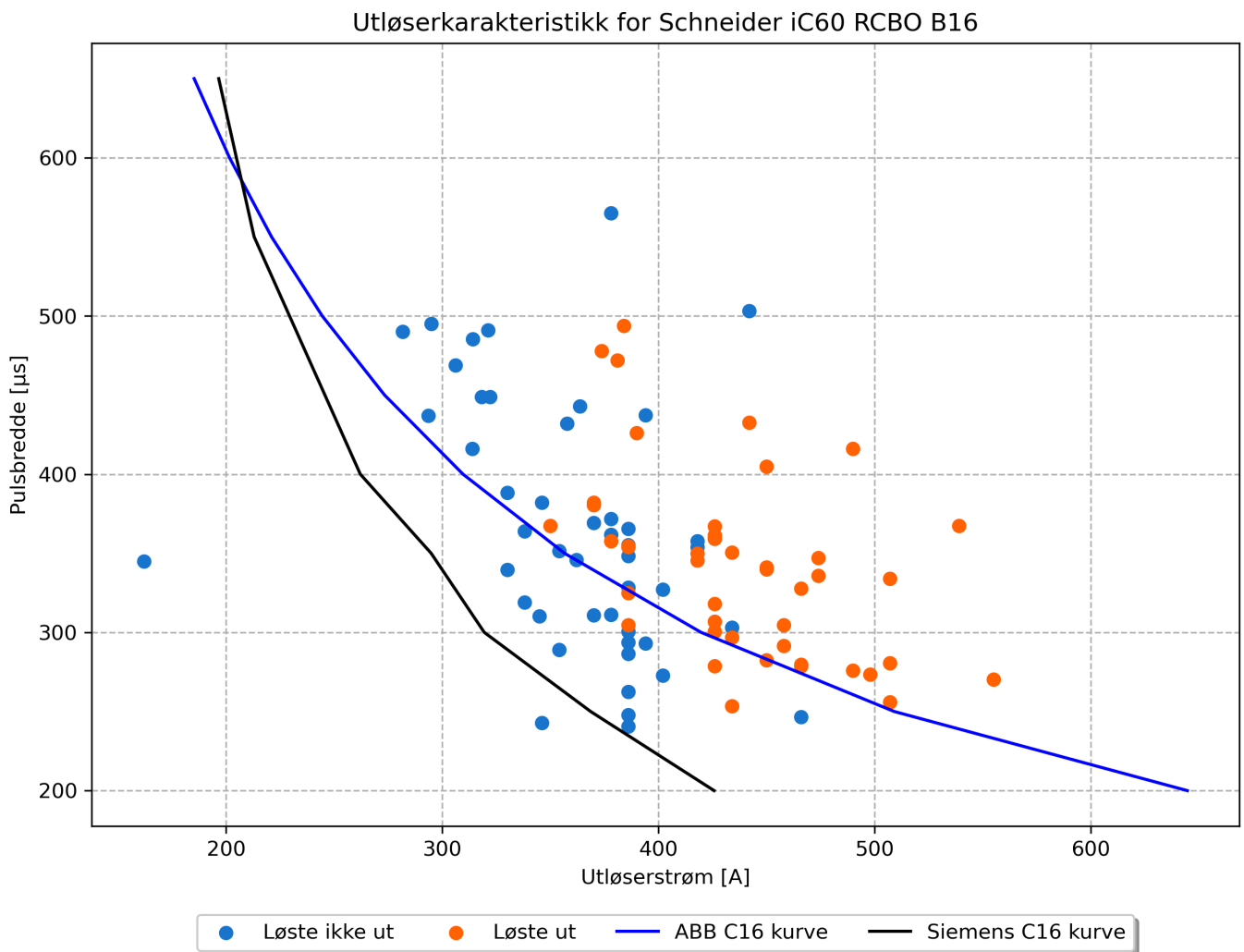
## 4.2.2 Utløserkarakteristikk for vern

Figur 4.4 til Figur 4.15 viser resultatet av forsøket gjennomført på åtte C16-vern og ett B16-vern. X-aksen forteller hvilken toppverdi strømmen hadde, og Y-aksen er pulsbredden  $T_{50}$ . Blå prikk betyr at vernet ikke løste ut ved gitt strøm og pulsbredde, mens oransje prikk betyr at det løste ut. Målingene er plottet sammen med oppgitte impulsutløserkurver fra de aktuelle produsentene og universalkurven. Disse kurvene skal gi strømmen vernene ikke skal løses ut på. Universalkurven er kurven laget av gruppen med bakgrunn av målingene som har blitt utført.



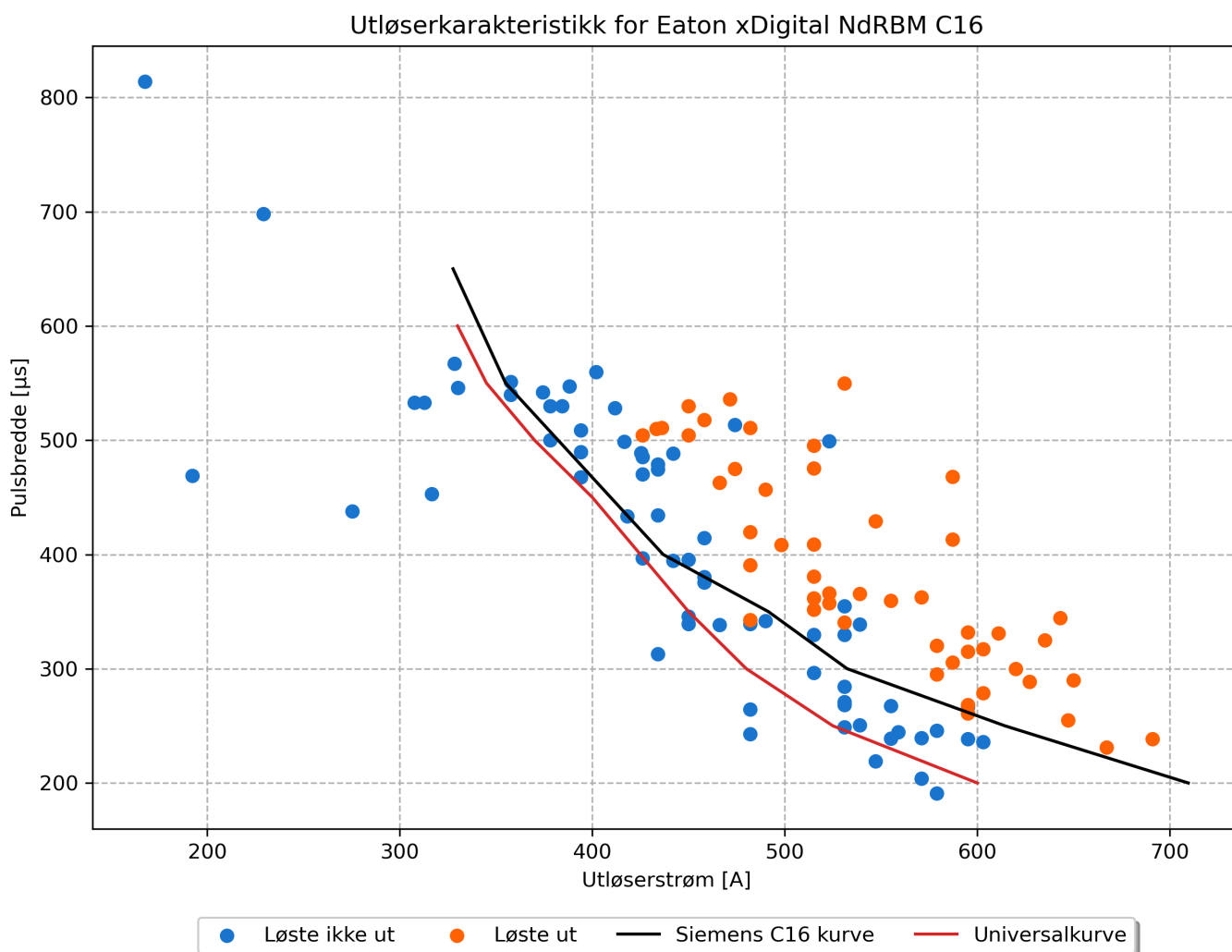
**Figur 4.4:** Utløserkarakteristikk for Schneider iC60 RCBO C16 med Siemens- og universalkurven.

I Figur 4.4 kan man se spredningen i hvor vernet løser ut og ikke løser ut for Schneider C16. Det kan observeres et område hvor vernet både løser ut og ikke. Det er også verdt å notere seg hvor kurven til Siemens ligger i forhold til målingene, samt Universalkurven.



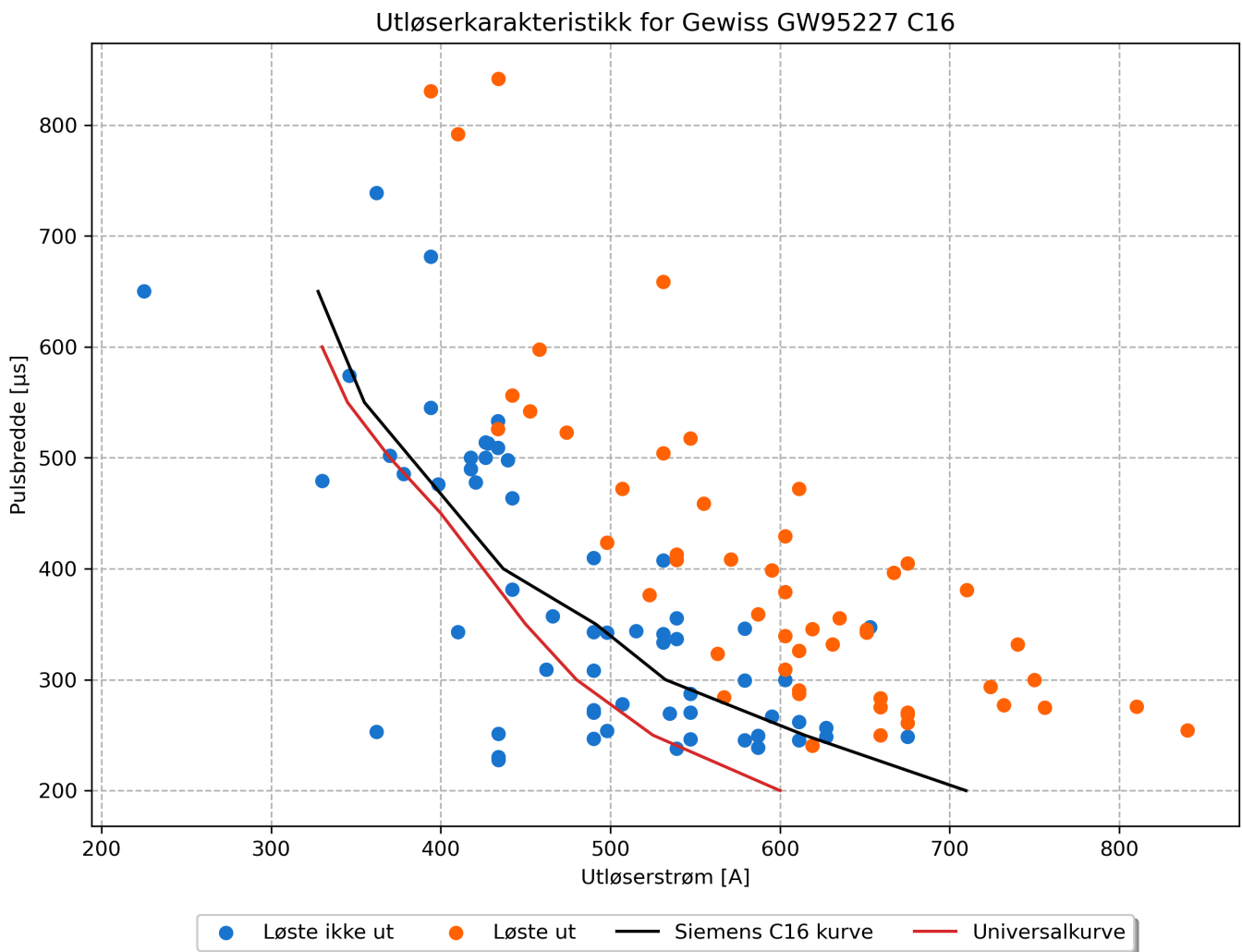
**Figur 4.5:** Utløserkarakteristikk for Schneider iC60 RCBO B16 med ABB- og Siemens-kurven.

Det ble gjort målinger også på et Schneider B16-vern. Dette var for å kunne sammenligne om dette vernet også hadde lignende spredning på hvor vernet løste ut og ikke løste ut. Området hvor vernet løser ut og ikke, er her mye mindre sammenlignet med C16-vern. Målingene er tegnet sammen med ABB- og Siemens-kurven med B-karakteristikk.



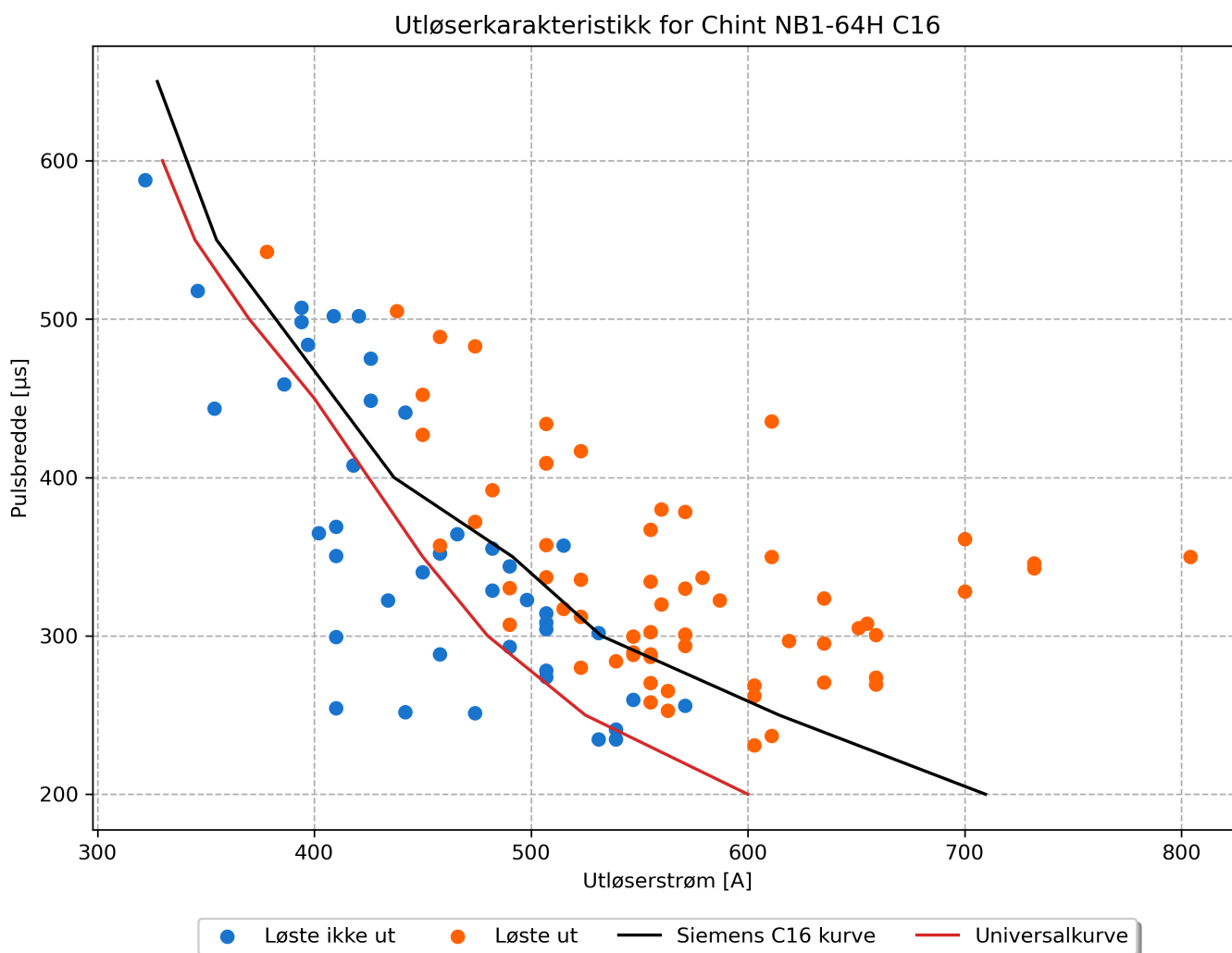
**Figur 4.6:** Utløserkarakteristikk for Eaton xDigital NdRBM C16 med Siemens- og universalkurven.





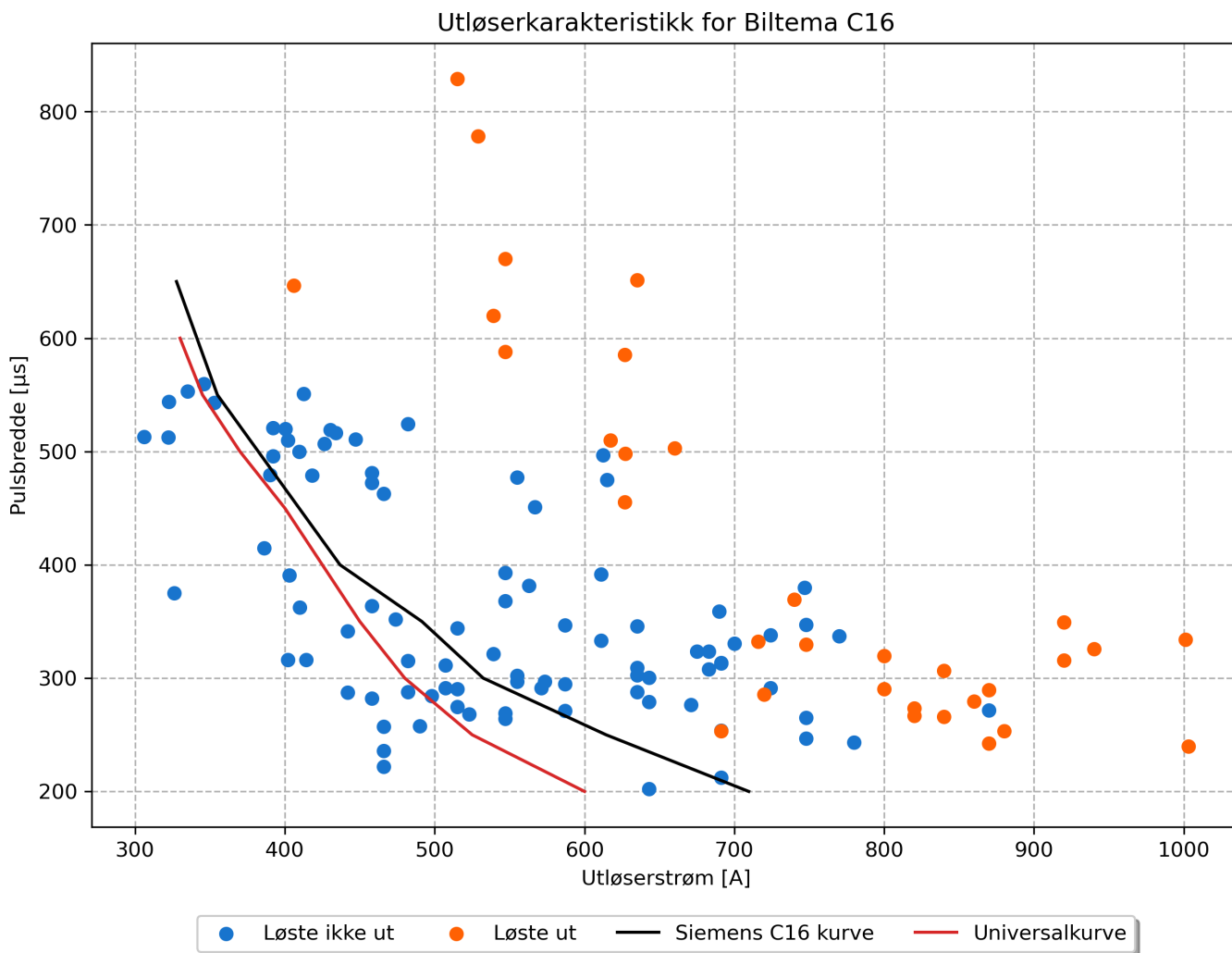
**Figur 4.7:** Utløserkarakteristikk for Gewiss GW95277 C16 med Siemens- og universalkurven.

Figur 4.6 og 4.7 viser et tydeligere skille mellom hvor vernet løser ut og ikke. Siemens-kurven ser også ut til å stemme bedre for disse vernene enn for Schneider C16.



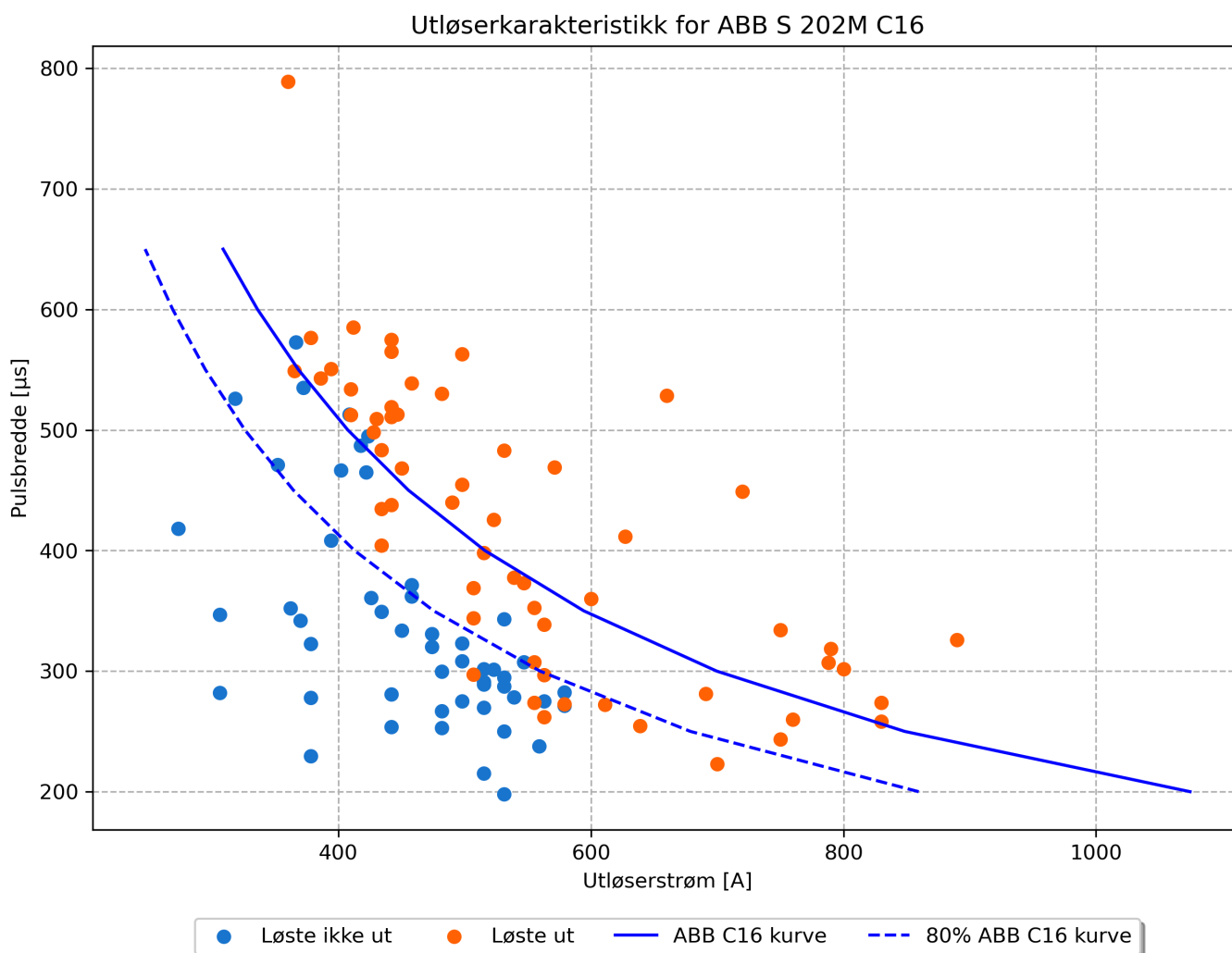
**Figur 4.8:** Utløserkarakteristikk for Chint NB1-64H C16 med Siemens- og universalkurven.

Kurven til Siemens er i dette tilfelle litt optimistisk i forhold til målt verdi på dette vernet. Universalkurven er tilpasset slik at kurven har en lavere verdi enn målingene hvor vernet har løst ut.



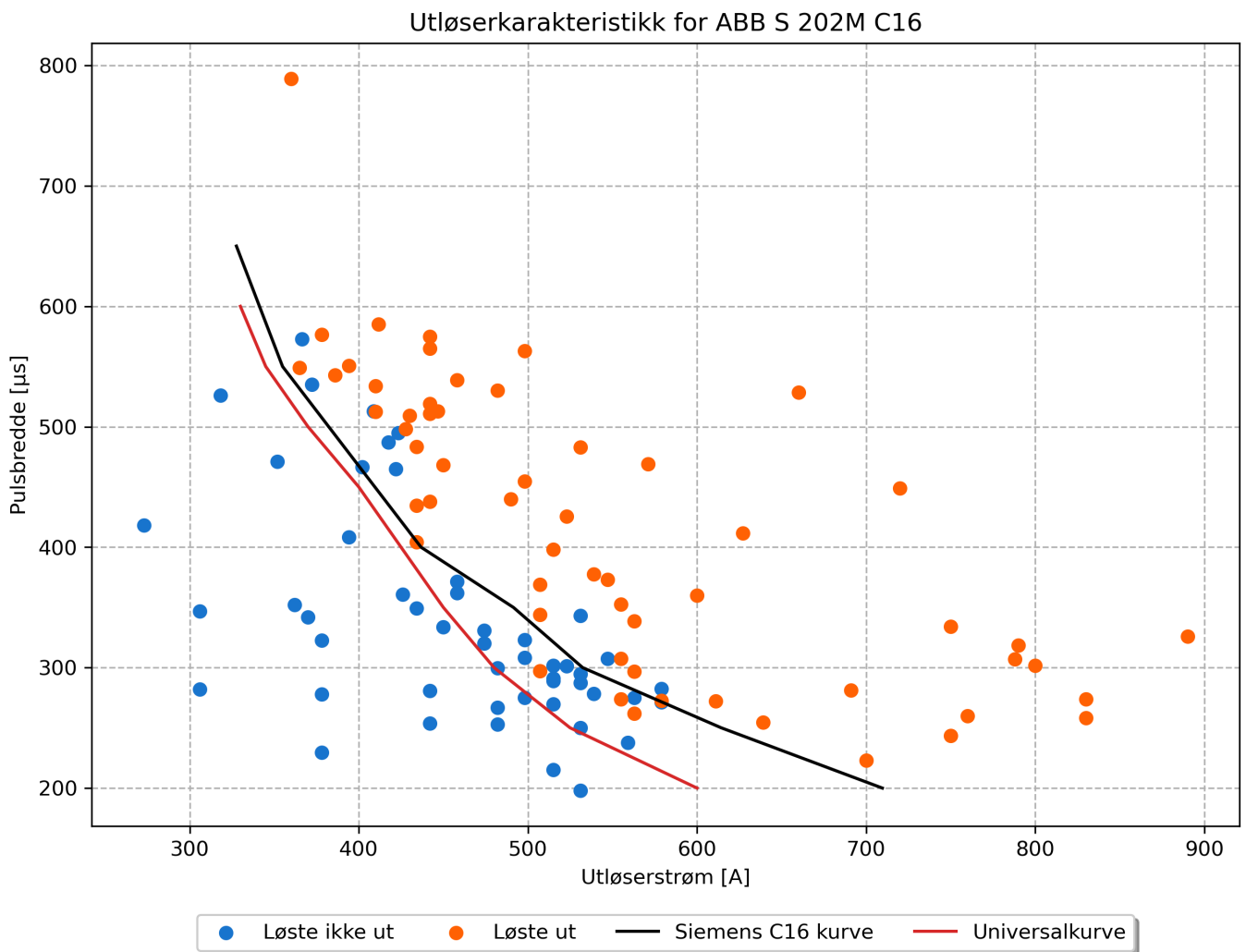
Figur 4.9: Utløserkarakteristikk for Biltema C16 med Siemens- og universalkurven.

Vernet fra Biltema overrasket stort i forsøket som ble gjort. Her viser resultatet at vernet tåler en stor startstrøm sammenlignet med Siemens-kurven og de andre vernene.



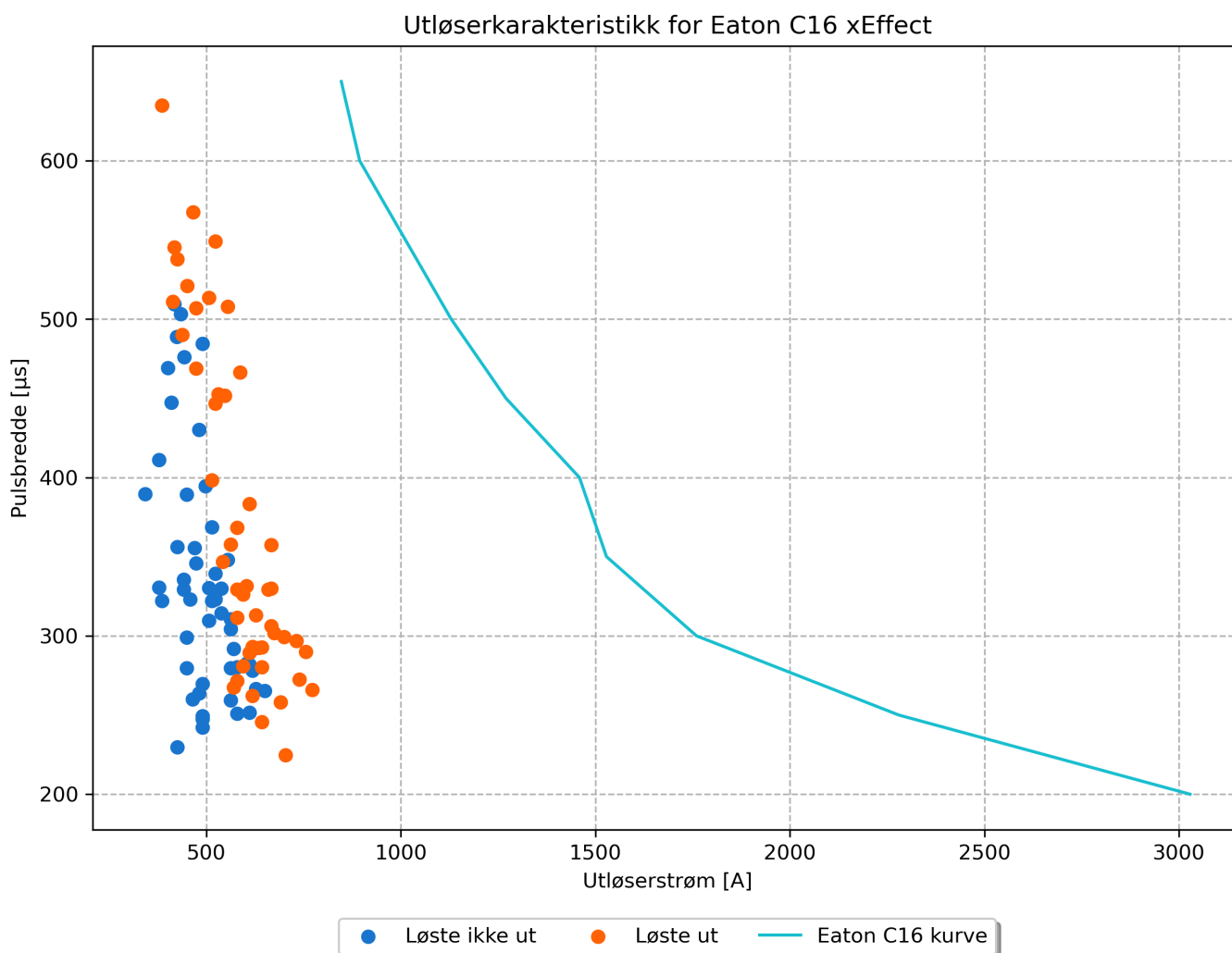
**Figur 4.10:** Utløserkarakteristikk for ABB S 202M C16 med ABB-kurven.

Det kan observeres i figur 4.10 hvordan kurven til ABB samsvarer med målinger gjort på tilsvarende vern. Selv med en sikkerhetsmargin på 20 % faller noen målinger hvor vernet har løst ut, under kurven.



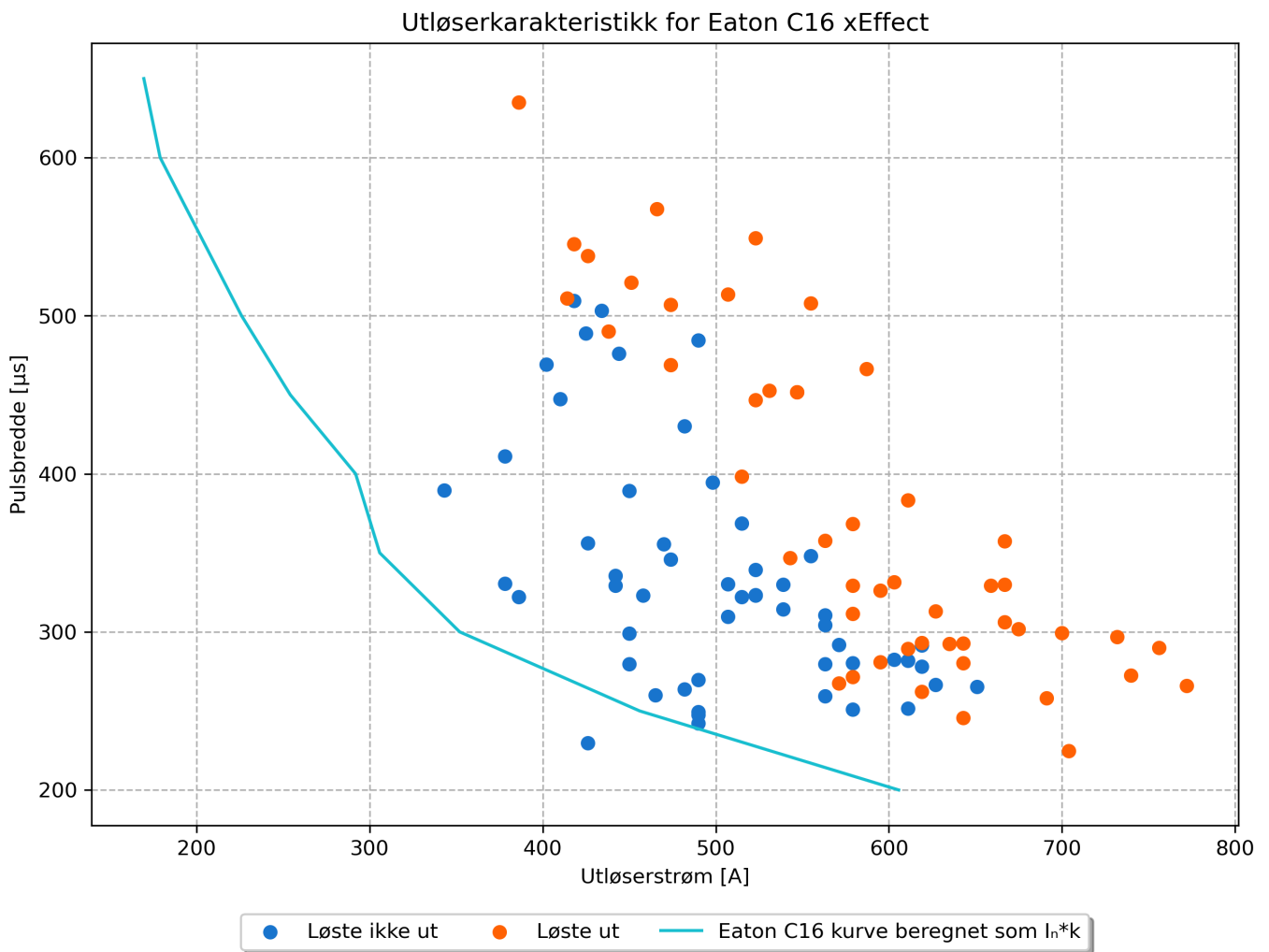
**Figur 4.11:** Utløserkarakteristikk for ABB S 202M C16 med Siemens- og universalkurven.

Her er samme målinger med Siemens-kurven og Universalkurven. Siemens-kurven stemmer godt med vernet fra ABB.



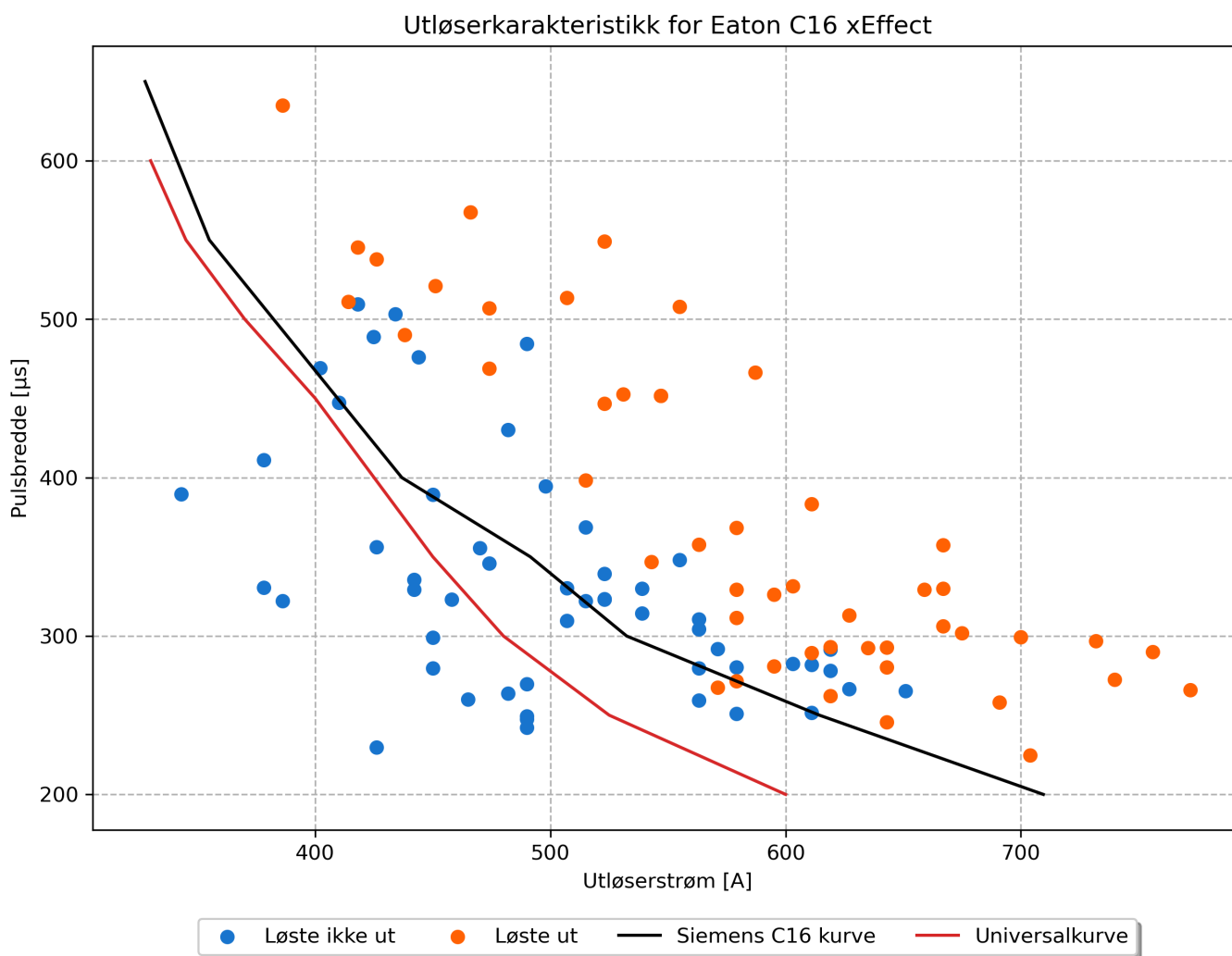
**Figur 4.12:** Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med Eaton-kurven.

Figur 4.12 viser målingen gjort på Eaton xEffect med tilhørende impulsutløserkurve ment for Eaton xEffect. Kurven gir langt høyere holdestrøm enn målingene på vernet tilsier.



**Figur 4.13:** Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med tilpasset Eaton-kurve.

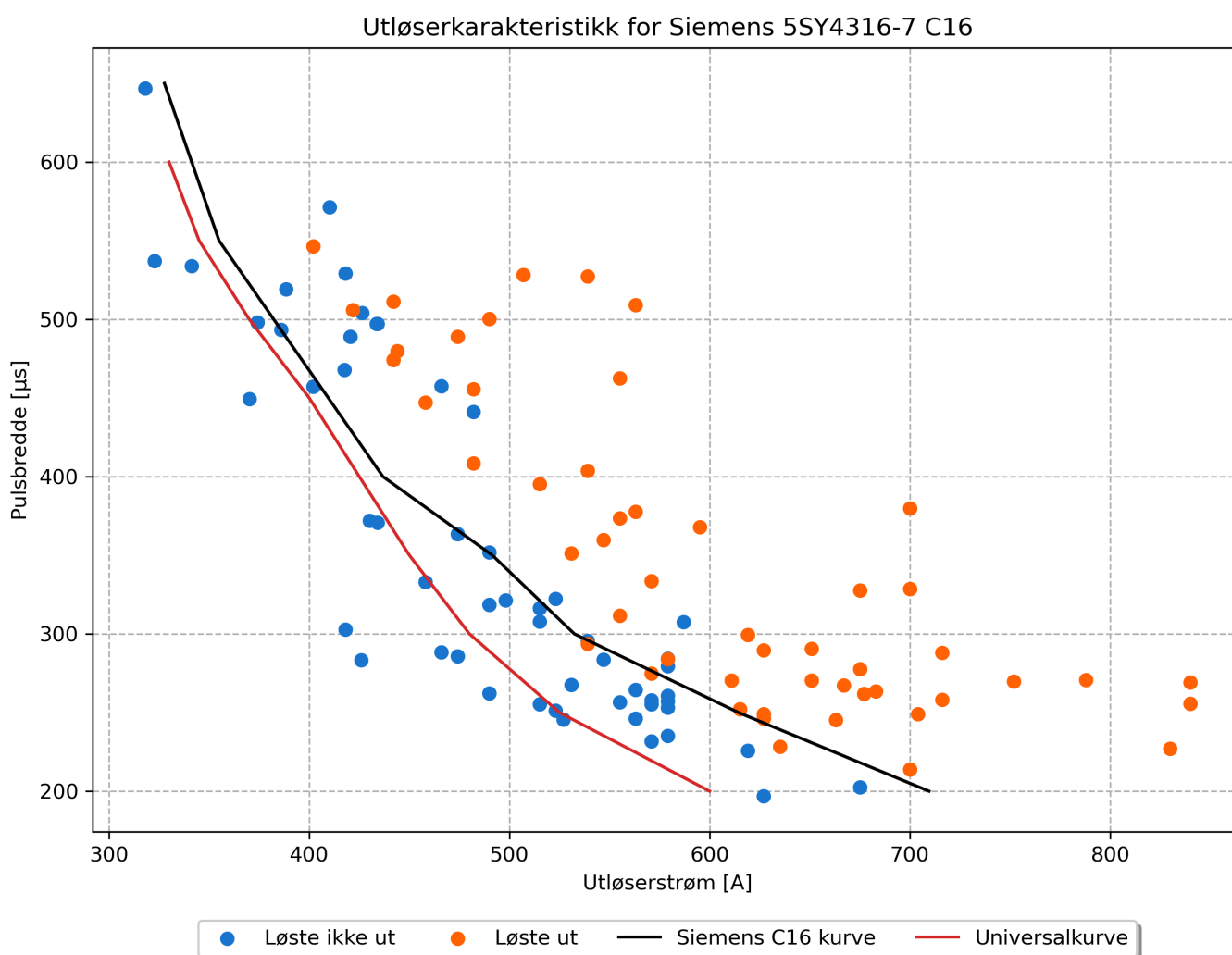
Her er samme målingene sammen med en alternativ versjon av Eatonkurven. Her er fremgangsmetoden for kurven endret, for å se om kurven kunne stemme bedre. Kurven har blitt multiplisert med nominell strøm isteden for  $I_4$ -verdien. Her får kurven derimot veldig lave verdier, sammenlignet med det som er målt.



**Figur 4.14:** Utløserkarakteristikk for Eaton xEffect C16 med Siemens- og universalkurven.

Siemens-kurven stemmer bedre overrens med Eaton xEffect enn Eatonkurven, i følge målingene.



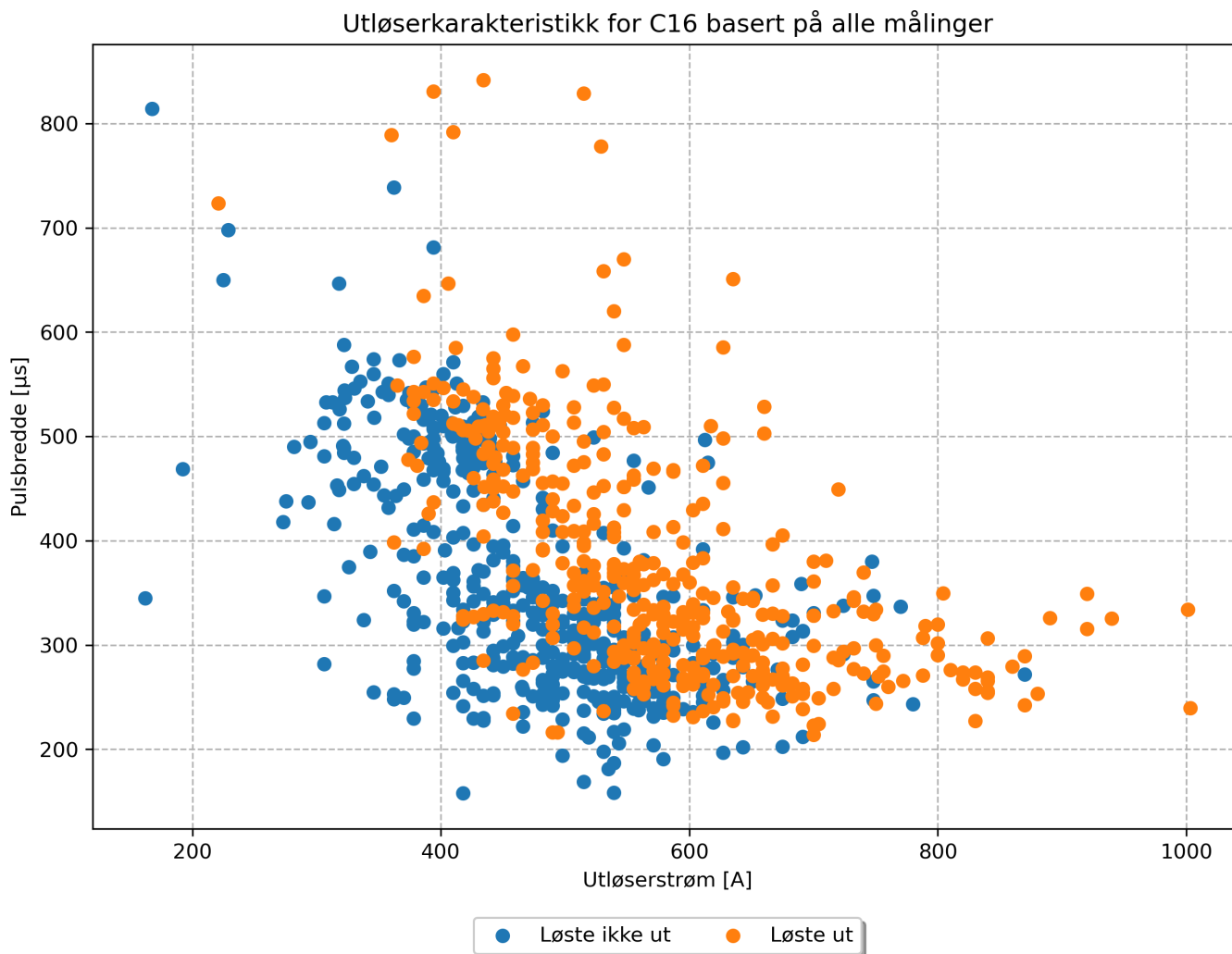


**Figur 4.15:** Utløserkarakteristikk for Siemens 5SY4316-7 C16 med Siemens-kurven.

Figuren viser Siemens-kurven sammen med måleresultatet fra Siemens-vernnet. Her kan man se hvordan kurven samsvarer godt med målingene.

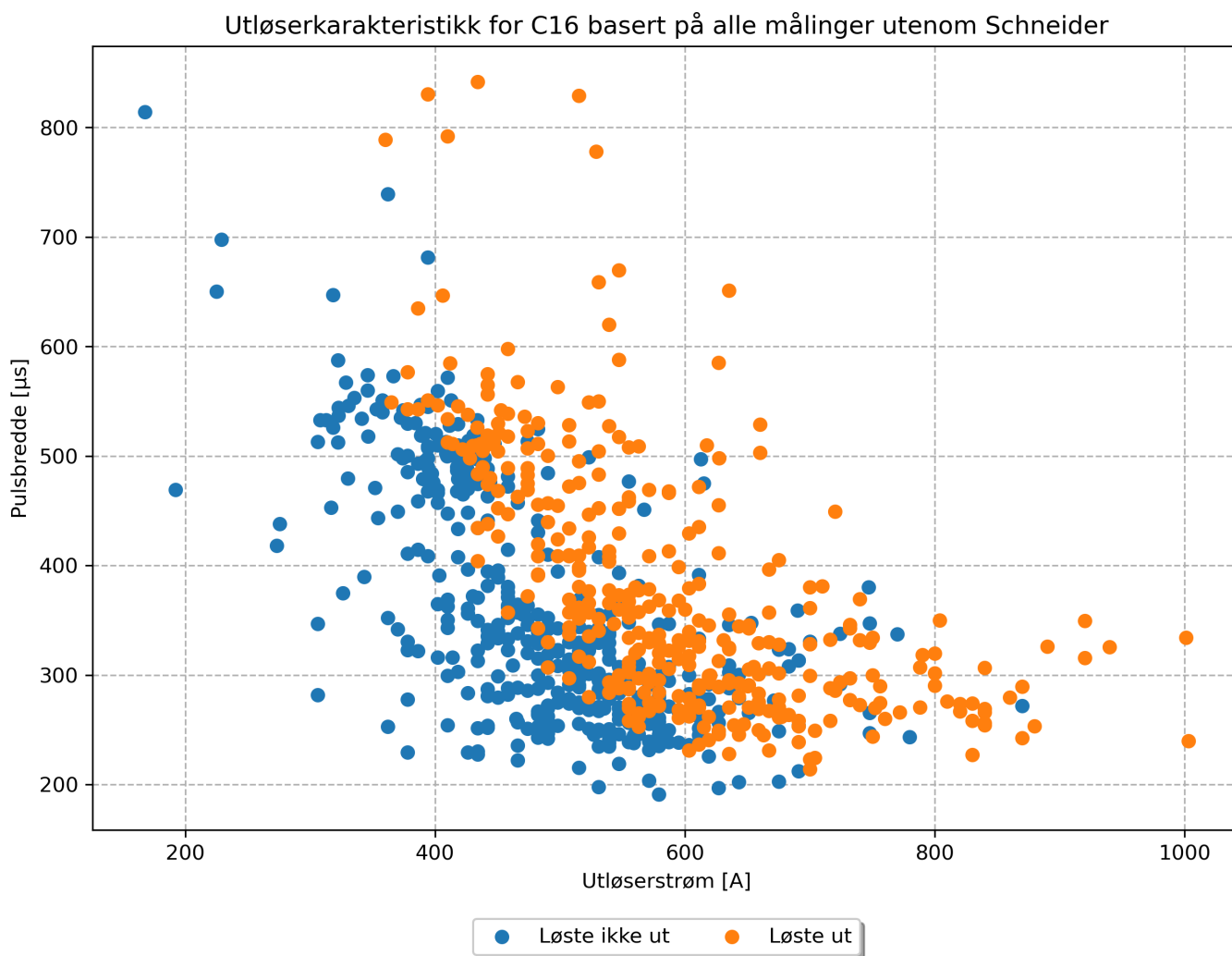
#### 4.2.2.1 Utløserkarakteristikk for C16-vern sammenlignet med impulsutløserkurver

Alle målingene fra C16 vernene har blitt samlet til en graf.



**Figur 4.16:** Alle målingene gjennomført på C16 vern samlet.

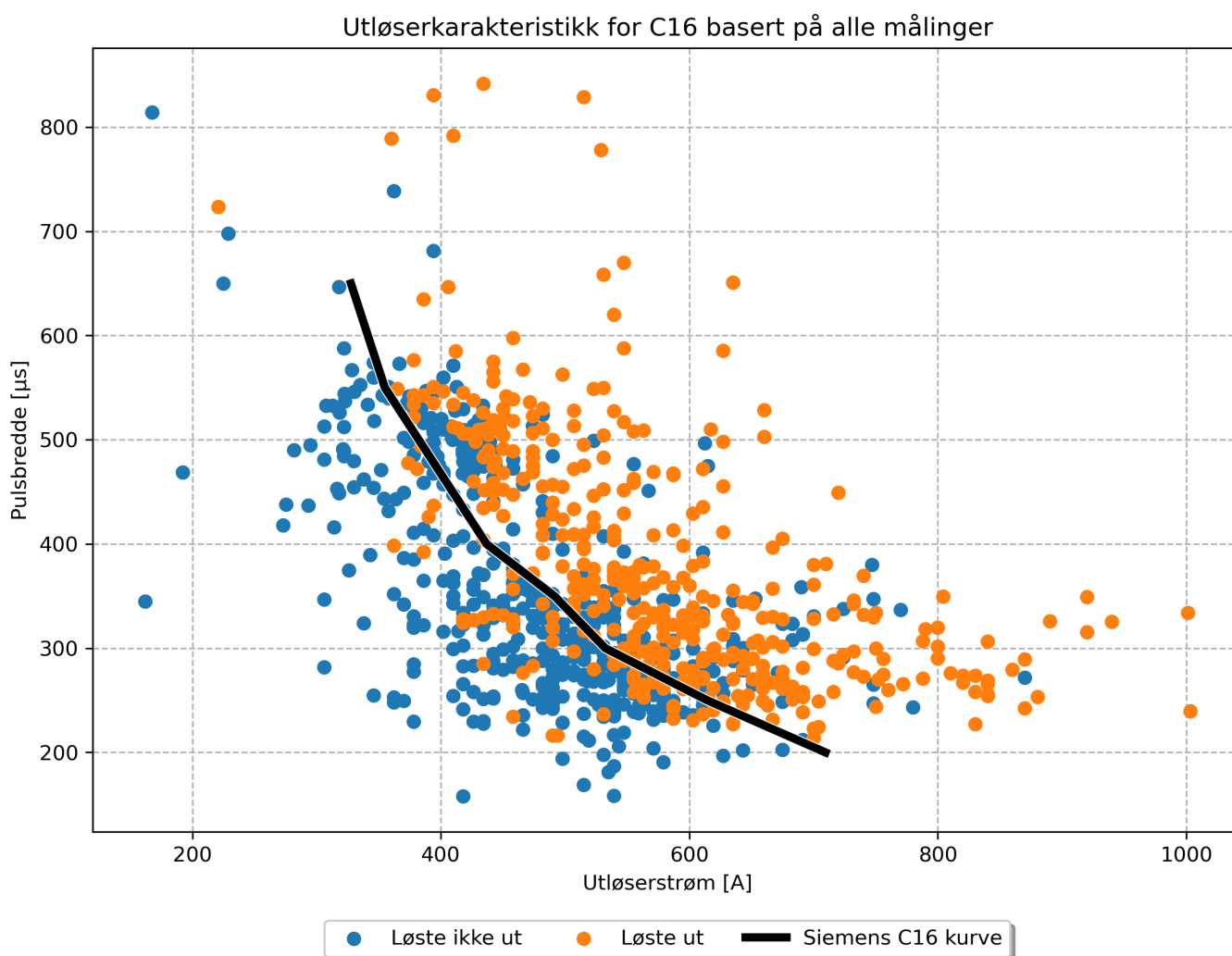
I Figur 4.16 kan man se en god spredning hvor vernene har løst ut og ikke løst ut. Den viser derimot et tydelig skille mellom hvor vernene løser ut og ikke. I området 400A-500A og rundt 300µs er det et overlapp av målinger som har løst ut som ligger over svært mange målinger som ikke har løst ut. De fleste av de oransje punktene er målinger på Schneider C16, som altså skiller seg ut fra de andre vernene. Figur 4.17 viser målingene uten Schneider C16-vernet.



Figur 4.17: Alle målinger av C16 vern bortsett fra Schneider.

I figur 4.17 er ikke målingene på Schneider C16 inkludert, her er det et tydeligere skille mellom hvor vernene løser ut og ikke.

Figur 4.18 viser alle målingene tatt på C16 vern sammenlignet med impulsutløserkurvene til Siemens. En lignende sammenlikning for ABB og Eaton ligger i vedlegg E.

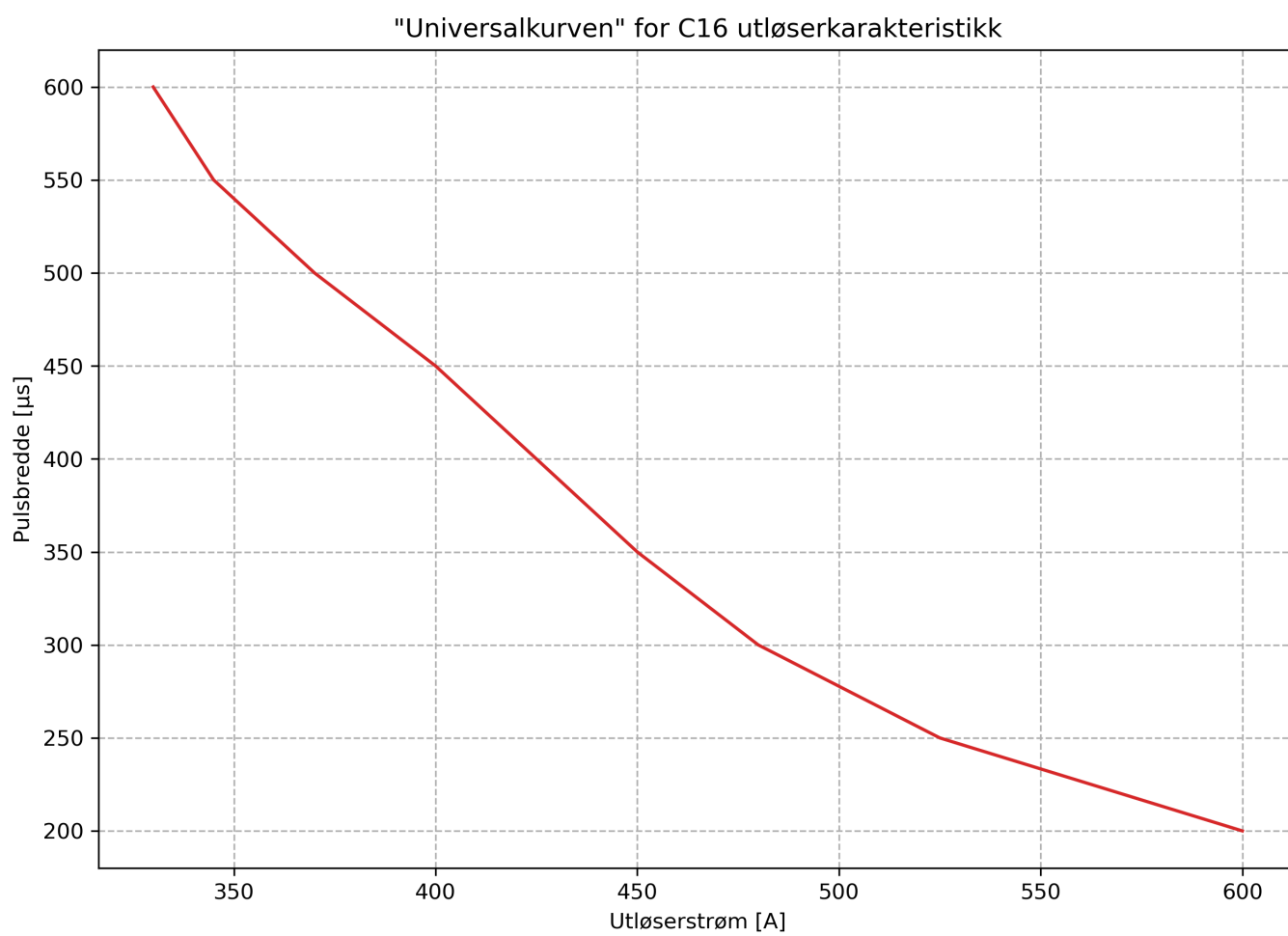


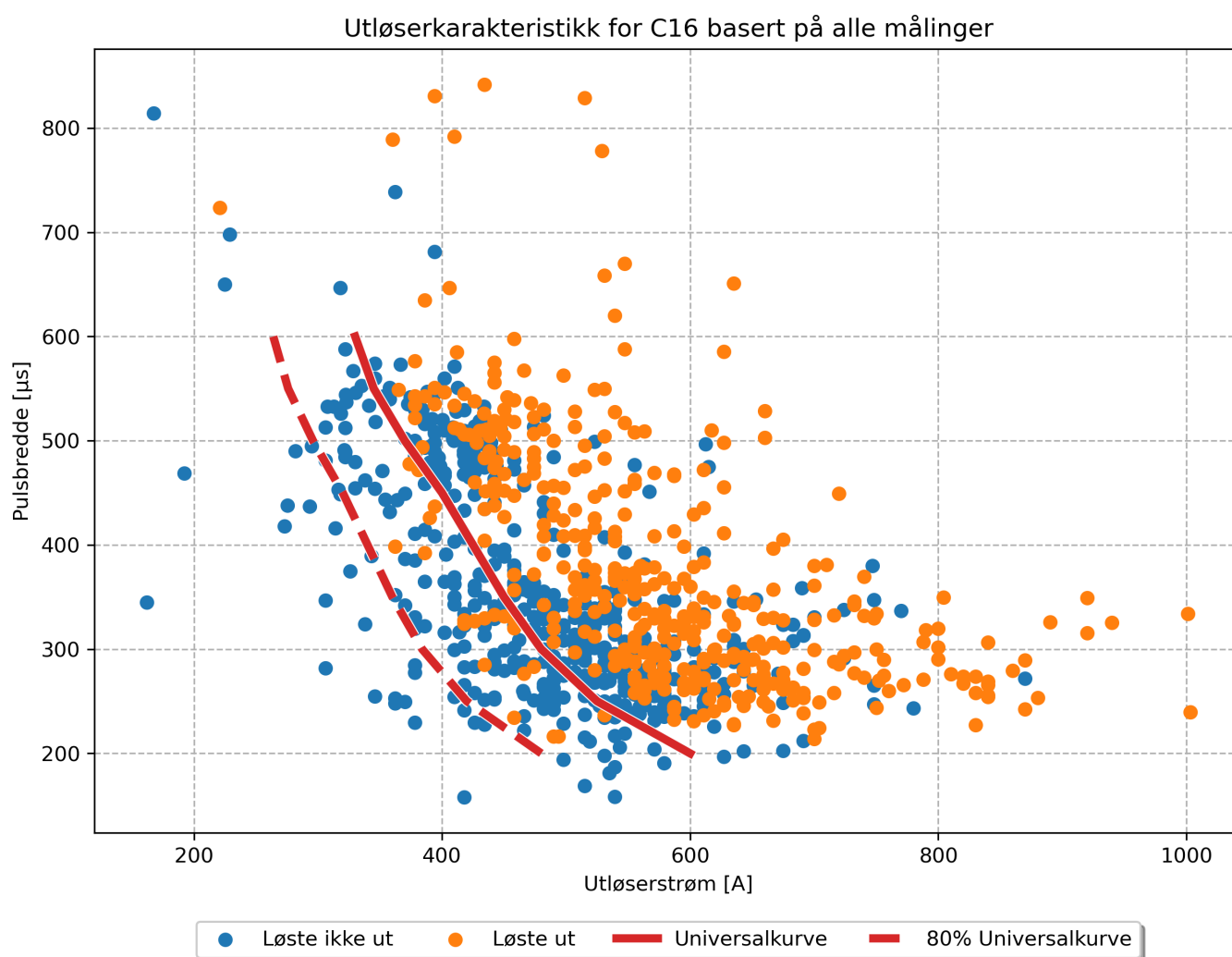
**Figur 4.18:** Alle målinger av C16 vern med Siemens-kurven.

Kurven til Siemens stemmer ganske godt med målingene. Det er et lite område mellom pulsbredde på  $200\mu\text{s}$  til  $300\mu\text{s}$  hvor kurven fungerer litt dårligere. Dette er et godt utgangspunkt for en universalkurve.

#### 4.2.2.2 Universalkurven

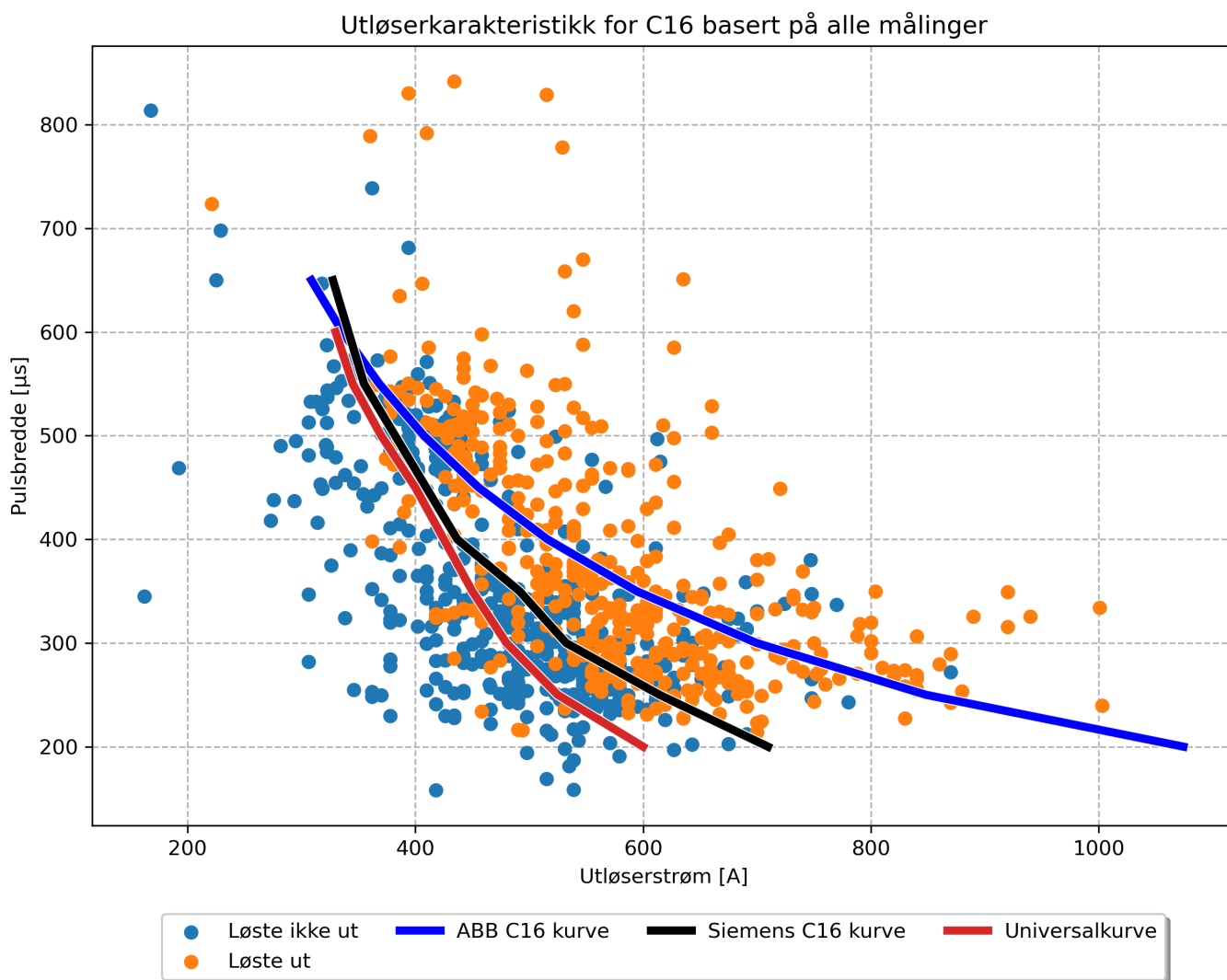
Målingene på C16-vernene ble brukt til å lage en Universalkurve, som skal beskrive utløserkarakteristikken til C16-vern for startstrømmer med varighet mellom  $200\mu\text{s}$  og  $600\mu\text{s}$ . Kurven vises i figur 4.19. Lengre ned sammenliknes Universalkurven med alle målingene, og kurvene fra ABB og Siemens.

**Figur 4.19:** Universalkurven.



Figur 4.20: Alle målinger av C16-vern med universalkurven.

Grafen viser at Universalkurven uten sikkerhetsmargin gir en litt høyere holdestrøm enn noen av uteliggerne. Med en sikkerhetsmargin på 20% så havner kurven under disse målingene.



**Figur 4.21:** Alle målinger av C16-vern med universal-, ABB- og Siemens-kurven.

Her kan man observere hvordan Universalkurven ser ut i forhold til kurvene til ABB og Siemens. Universalkurven gir en lavere holdestrøm enn disse kurvene.

#### 4.2.2.3 Test av universal-kurven

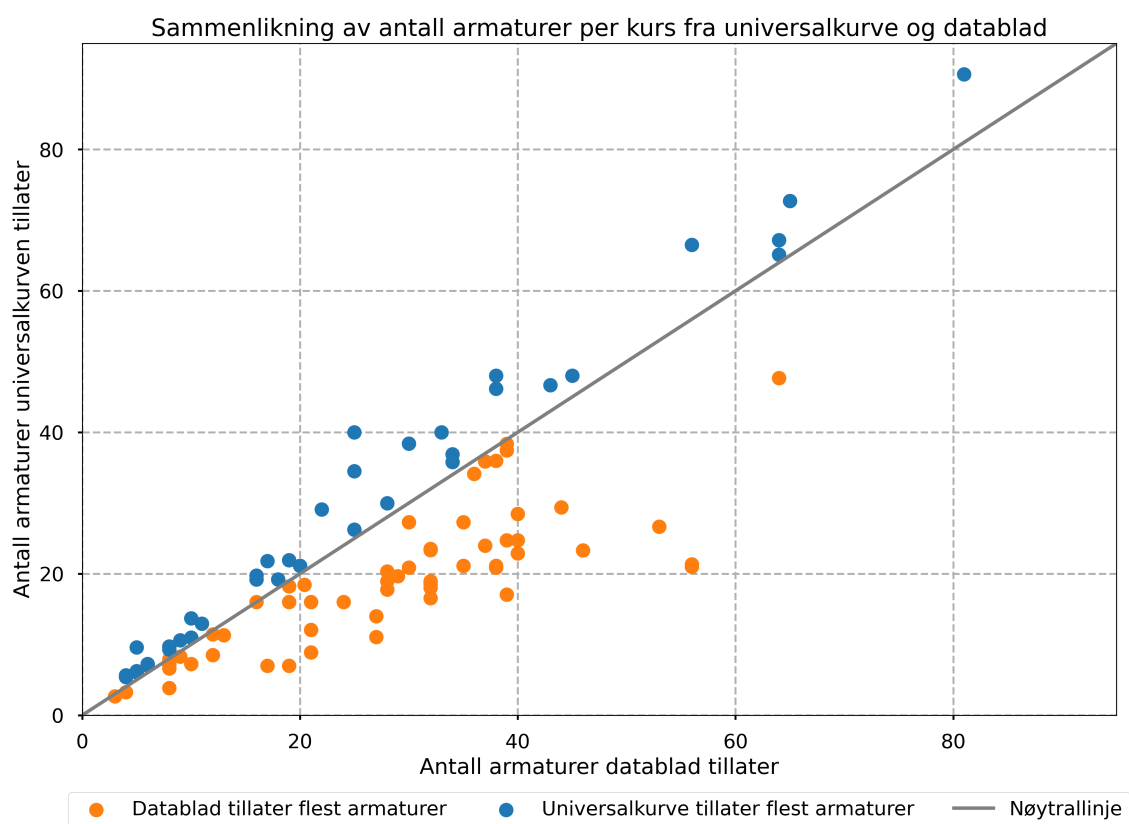
En test av Universalkurven ble gjort for å se om kurven oppnår målet om å kunne øke antall LED-armaturer på et vern.

Tabell 4.6 viser resultatet av testen gjennomført på 109 LED-armaturer. "Fungerte bedre" betyr at universalkurven tillater et høyere antall armaturer på en C16-kurs enn det oppgis i databladet. Resultatet viser at kurven fungerer dårligere omtrent halvparten av tiden. Fullstendig resultat med verdier fra armaturene ligger i vedlegg G.

	Universalkurven fungerte bedre	Like bra	Universalkurven fungerte dårligere
Antall	39	14	56
Prosent	35,8	12,8	51,4

**Tabell 4.6:** Resultat av test av universalkurven opp mot datablad.

- 82 LED-armaturer fra Ledvance ble testet hvor Universalkurven fungerte bedre på 34 stykk og like bra ved 14.
- 23 LED-armaturer fra Phillips ble testet hvor Universalkurven fungerte bedre på 5 stykk og like bra ved 1.



**Figur 4.22:** Sammenlikning av antall armaturer tillatt av datablad og Universalkurven.

Figur 4.22 viser hvor mye bedre eller dårligere Universalkurven fungerer sammenliknet med databladet. Dersom man tar utgangspunkt i at databladet oppgir rundt 20 armaturer, kan man finne dette antallet i x-aksen. Oransj betyr at universalkurven fungerte dårligere, og blå motsatt. Avstanden fra den grå linjen forteller hvor mye dårligere eller bedre den fungerte.

Grafen viser at det er ved flere tilfeller en svært kort avstand til den grå linjen når kurven har fungert. Avstanden er betydelig større når universalkurven ikke fungerte. Man kan også se at avstanden til den grå linjen øker, når antallet i databladet øker.



#### 4.2.2.4 Usikkerhet fra måleutstyr

Alle målingene av utløserkarakteristikk er gjort med FLUKE i1000s tangamperemeter og Keysight InfiniiVision DSOX2014A oscilloskop. Dette gir følgende usikkerheter:

- Tangamperemeteret har en usikkerhet på 1% av måleverdien  $\pm 1A$  og en ekstra usikkerhet på  $<0.5\%$  for frekvenser mellom 10Hz og 5kHz.
- De fleste målingene er tatt med skopet stilt til 200A/div, dette tilsvarer  $\pm 74A$  usikkerhet.
- Noen få målinger med stor strøm er tatt med 300A/div, dette tilsvarer  $\pm 110A$  usikkerhet.
- Alle målinger er tatt med skopet stilt inn på 1ms/div, dette tilsvarer  $\pm 16\mu s$  usikkerhet.

Utrekninger av usikkerheten til skopet ligger i vedlegg F.

### 4.2.3 Måling av startstrømmen på LED-lysrør

#### 4.2.3.1 Forskjell på vanlig- og LED-lysrør

Tabell 4.7 presenterer resultatet av målingene som ble tatt for å se på forskjellen mellom konvensjonelle lysrør og LED-lysrør. Her vises en oversikt over gjennomsnittlig størrelse på startstrømmene og pulsbredden til et konvensjonelt lysrør, både med vanlig og elektronisk tenner, og til LED-lysrør. Full tabell med antall målinger og usikkerhetsverdier er vedlagt i vedlegg H.

	Startstrøm [A]	Pulsbredde[ $\mu s$ ]
Vanlig tenner	$63 \pm 11$	$30 \pm 1,08$
Elektronisk tenner	$61 \pm 9$	$32 \pm 0,82$
LED-Lysrør	$64 \pm 11$	$32 \pm 0,88$

Tabell 4.7: Forskjell på konvensjonell mot vanlig LED-lysrør.

Resultatet av målingene viser liten forskjell mellom startstrømmen på LED-lysrør og konvensjonelle lysrør. Med vanlig tenner er det en forskjell på rundt 1A mellom LED og konvensjonell, og med elektronisk tenner er det en litt større differanse på rundt 3A.

#### 4.2.3.2 Effekt av kabellengde på startstrømmer

Tabell 4.8 viser hvilken innvirkning kabellengden hadde på startstrømmene til LED-lysrøret.

	Startstrøm [A]	Pulsbredde[ $\mu s$ ]
Direkte tilførsel	$55 \pm 9$	$31 \pm 0,5$
40m trommel	$44 \pm 8$	$39 \pm 0,5$

Tabell 4.8: Startstrømmen med og uten 40m trommel med  $1,5\text{mm}^2$  ledertverrsnitt.

Ved en økning på 40m kabellengde viser resultatet at startstrømmen synker med 11A, samtidig som pulsbredden øker med  $8\mu s$ .

Fullstendig oversikt over alle målingene og tilhørende usikkerheter ligger i vedlegg I.

#### 4.2.3.3 Test på forskjell mellom TN og IT-nett

Tabell 4.9 viser gjennomsnittlig startstrøm og pulsbredde fra LED-lysrøret for både IT- og TN-nett.

	Startstrøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
TN	$68 \pm 14$	$27 \pm 6$
IT	$68 \pm 12$	$32 \pm 1$

**Tabell 4.9:** Differanse på startstrømmer ved TN og IT.

Full oversikt over målingene som er tatt og vedhørende usikkerheter ligger i vedlegg J.

### 4.3 Resultater av FFT-analyse

For å undersøke om startstrømmene inneholder overharmoniske frekvenser som ligger utenfor båndbredden til måleutstyret ble det gjort en FFT-analyse av målingene. Dette ble gjort for en tilfeldig valgt måling per anlegg på NTNU, en måling på konvensjonelt lysrør og en måling på LED-lysrør. Kurver for de aktuelle startstrømmene og tilhørende FFT frekvensspekter ligger i vedlegg K.

#### Målinger av anlegg på NTNU

Målinger på Elektrovarmelaben, Høystrømbryterlaben og Verkstedet ble gjort med FLUKE i200s tangamperemeter som kan brukes opp til 10kHz. Overharmoniske på disse anleggene ser ut til å forsvinne like før 10kHz.

Målingene i AQ- og AS-fordelingen ble gjort med FLUKE i1000S tangamperemeter som kan brukes opp til 100kHz. Overharmoniske på disse anleggene forsvinner innen 20kHz og er sterkt dempet over 10kHz.

#### Målinger av startstrøm i lysrør

Måling av startstrømmer i konvensjonelle- og LED-lysrør har overharmoniske komponenter som forsvinner rundt 100kHz. Disse målingene er tatt med FLUKE i1000s tangamperemeter som kan brukes opp til 100kHz.

# Kapittel 5: Diskusjon

## 5.1 Målinger på anlegg

### 5.1.1 Målinger ved NTNU

#### **Størrelsen og varigheten til startstrømmer på LED-anlegg ved NTNU**

Variasjon i startstrømmens størrelse og varighet er ganske stor mellom anleggene. Dette gir mening ettersom målingene ble gjort ved ulike anlegg, på ulike armaturer og med ulikt antall armaturer per kurs. Startstrømmen varierer mellom 30 og 134 ganger nominell strøm og pulsbredden fra 0,19ms til 0,48ms. Dette er som forventet ettersom de innledende antagelsene var at startstrømmen kan bli et hundretalls ganger den nominelle strømmen, med en varighet ned mot 0,2ms.

En begrensning i testen er at alle målingene er gjort i det samme bygget ved NTNU. Det kan derfor tenkes at feilkilder som den lokale spenningskvaliteten kan ha hatt en innvirkning på alle målingene. Ettersom målingene ble gjort i kjelleren på Elektrobygget deler belysningskursene også transformator med ulike laber. Forsøk på labene, som ble gjort samtidig som målingene av startstrømmer, kan ha hatt en innvirkning på resultatene. For eksempel kan et labforsøk introdusere spenningsfall eller støy på nettet. Ettersom målingene ble gjort over flere dager kan det tenkes at dette har hatt innvirkning på målinger som ble tatt én dag, men ikke den neste. Det anses likevel som usannsynlig at dette har hatt en stor innvirkning på resultatene ettersom både størrelsen og varigheten på startstrømmen ligger innenfor et forventet område.

#### **Startstrøm på anlegg sammenliknet med datablad**

Tabell 4.2 viser at størrelsen på startstrømmen stemmer relativt godt med databladet for nesten alle kursene. Unntaket er F5 i AS-fordelingen, som hadde større startstrøm enn oppgitt. Mange av kursene ligger likevel litt under den forventede verdien. Det kan tenkes at dette forårsakes av en sikkerhetsmargin i databladet. Ettersom spenningen på nettet kan variere, kan det tenkes at startstrømmen på 20A er beregnet utifra et verste tilfelle. Dette forklarer likevel ikke hvorfor målingene på AS F5 skiller seg ut med større strøm enn forventet. Dette kan komme av mange ulike faktorer.

Når den totale startstrømmen deles på antall armaturer antas det at alle armaturene har et likt bidrag, og at man lineært kan legge sammen bidragene til armaturene. Dette nevnes som en brukbar tilnærming for å beregne størrelsen på startstrømmen i noen armaturers datablader, samt i IEC 63129 [3]. F5 i AS-fordelingen skiller seg fra de andre kursene ved at den kun har fire armaturer tilkoblet, sammenliknet med 10-14 armaturer på de andre kursene i AS- og AQ-fordelingene.

Det kan tenkes at tilnærmingen stemmer bedre for et visst antall armaturer, og at den ikke stemmer så bra når det kun er fire armaturer tilkoblet kursen. Dette er en mulig forklaring på hvorfor startstrømmen er så mye større per armatur på denne kursen.

En annen mulig forklaring på hvorfor en lineær summering av bidragene blir feil er at hver nye armatur på en kurs vil få et lenger kabelstrekk enn den forrige. Det vil derfor være en høyere kabelimpedans fram til den siste armaturen enn den første. Dette kan dempe startstrømmen og føre til at hver nye armatur har et mindre bidrag til den totale startstrømmen.

Det er også mulig at samtidigheten endres når flere armaturer tilkobles samme kurs. Selv om armaturene slås på samtidig, vil tilfeldig variasjon i elektronikken til driverne kunne gjøre at armaturene slår seg på ved litt ulike tidspunkt. Ettersom startstrømmen har svært kort varighet vil selv en liten forsinkelse kunne ha ganske stor betydning i denne sammenhengen. Dette kan potensielt føre til at strømmen blir fordelt utover en lenger periode, slik at toppverdien til startstrømmen blir redusert.

Generelt viser fortsatt målingene at det stemmer greit med startstrømmene oppgitt i databladet. Tre av fire anlegg viste at startstrømmer per armatur var omtrent 20A som var oppgitt i datablad.

En tydelig svakhet i testen er at det kun er fire anlegg som har oppgitt data for startstrømmens størrelse og pulsbredde. Samtidig består disse anleggene av kun én type armatur, som gjør det vanskelig å sammenlikne kvaliteten på informasjonen fra ulike produsenter. Dersom informasjonen i databladene skal undersøkes nærmere burde det derfor ses på flere ulike armaturer fra ulike produsenter, og gjøres målinger på flere anlegg. For å undersøke innvirkningen av antall armaturer kan det være interessant å gjøre målinger på et pluggbasert anlegg med mulighet til å gradvis koble inn flere armaturer for å se hvordan startstrømmens størrelse og varighet endres med antall armaturer.

#### **Utnyttelse av tilgjengelig kurskapasitet**

Flere av målingene fra anlegg på NTNU viser klare tendenser til overdimensjonering. De tre belyningskursene (F4, F5 og F6) i AS-fordelingen i kjeller har en kursutnyttelse på henholdsvis 14%, 6% og 14%. Dersom alle disse hadde vært koblet på samme kurs, ville man fremdeles bare ha utnyttet 33% av tilgjengelig kurskapasitet. Dette kan fremdeles anses som overdimensjonert, ettersom man ønsker en utnyttelse en plass mellom 50-80%.

Målingene fra Samfundet viste at stasjonær strøm fra alle LED-driverne samlet var 4,4A. På grunn av de høye startstrømmene ble dette delt inn i tre separate 16A-kurser. 4,4A fordelt på 48A kapasitet tilsvarer en utnyttelse av tilgjengelig kapasitet på 9%, dersom man ser på de tre kursene som et samlet system. Ved å kunne samle alle driverne på én kurs ved hjelp av en startstrømbegrenser, vil man kunne oppnå en utnyttelse av kurskapasitet på 28%. Det kan fremdeles kalles overdimensjonert, men er likevel en klar forbedring fra 9%.

Jevnt over kan man se at belyningskursene overdimensjoneres. Det er muligens bare verkstedet med en utnyttelse på 54% som ligger på et akseptabelt nivå. Hvorfor det er delt inn i flere kurser i AS- og AQ-fordelingene i kjelleren er usikkert. Ut ifra målingene og produsentdata på armaturene kunne flere av disse kursene blitt slått sammen. Det kan hende at det er blitt gjort endringer på kursene som har gjort belastningen lavere, uten at det har blitt tatt hensyn til å slå sammen kurser. Det kan også hende at det av praktiske årsaker var ønskelig å dele inn ulike deler av belyningsanlegget i ulike kurser.

Resultatet viser hvor mye man maksimalt kan utnytte kursen dersom man benytter antall armaturer oppgitt i databladet. Dette viser at anleggene fortsatt hadde blitt overdimensjonert ved å følge produsentens anbefaling. Det antas at dette gjelder generelt for mange anlegg.

### 5.1.2 Måling på Studentersamfundet

Resultatet fra målingene på Samfundet viser at med alle tre kursene sammenkoblet på ett vern, var gjennomsnittlig toppverdi av startstrømmen 728A, med en gjennomsnittlig pulsbredde på 555 $\mu$ s. Dette førte til at vernet løste ut i 13 av 14 forsøk. Det ene forsøket vernet ikke løste ut på var da innkoblingen skjedde like før nullgjennomgang for spenningen, med en startstrøm på 167A og pulsbredde 3060 $\mu$ s.

Med startstrømbegrenseren innkoblet ble gjennomsnittlig startstrøm redusert til 46A, noe som gir en reduksjon på 93,7%. Vernet løste aldri ut på de 20 testene som ble utført, selv om 13 av testene traff toppverdi. Det ga en indikasjon på at startstrømbegrenseren fungerer som tiltenkt. Den teoretiske verdien startstrømmen skulle begrenses til var 48A toppverdi [20], så en gjennomsnittlig toppverdi på 46A virker fornuftig.

Pulsbredden ble godt over fire ganger så stor med startstrømbegrenseren innkoblet, da den økte til 2452 $\mu$ s. Dette er en stor økning, og gjør at holdestrømmen til vernet blir vesentlig lavere. Likevel vil ikke dette være et problem så lenge startstrømmen blir begrenset til rundt 48A. Et C16-vern vil kunne holde 48A mye lenger enn pulsbredden på 2452 $\mu$ s.

Med nullgjennomgangsreléet innkoblet ble gjennomsnittlig startstrøm redusert til 127A, noe som gir en reduksjon på 83%. Gjennomsnittlig pulsbredde ble 3159  $\mu$ s, altså nesten seks ganger større. Dette førte til at vernet løste ut på alle forsøkene, selv om lasten ble koblet inn i null hver gang. Dette tyder på at når startstrømmene kommer opp til en viss størrelse, vil også startstrømmene i nullgjennomgang bli så store at vernet løser ut.

Et interessant resultat er at vernet ikke løste ut i nullgjennomgang uten bruk av nullgjennomgangsrelé eller begrenser, men at det løste ut gjentatte ganger med reléet koblet inn. Dette til tross for at startstrømmen tilsynelatende ble lavere med reléet. Det er vanskelig å si hva som forårsaket dette. Pulsbredden ble litt lenger med nullgjennomgangsreléet, og kan derfor ha vært med på å utløse vernet. Det er likevel rart om dette hadde en stor innvirkning når strømmen med reléet var betydelig lavere enn uten.

Det ble også utført noen få målinger hvor bare to av de tre kursene ble koblet sammen på ett vern via nullgjennomgangsrelé. På disse testene løste ikke vernet ut, men på grunn av mangel på tid ble det ikke utført nok målinger til å kunne konkludere med noe.

## 5.2 Målinger på lab

### 5.2.1 Test av strømbegrenser og nullgjennomgangsrelé

Resultatet fra forsøket med startstrømbegrenseren innkoblet mellom strømforsyningene og tilførsel, er vist i tabell 4.5. Her ble den gjennomsnittlige startstrømmen kraftig redusert fra 183A til 34A, noe som tilsvarer en reduksjon på 81%. Gjennomsnittlig pulsbredde med startstrømbegrenseren ble 863  $\mu$ s, noe som tilsvarer en tredobling. Dette er naturligvis en stor økning, men er ikke et problem så lenge strømmen begrenses til 34A.

Resultatene fra målingene med nullgjennomgangsreléet viser en gjennomsnittlig startstrøm på 20A, noe som tilsvarer en reduksjon på 89%. I tillegg viste målingene at den konsekvent koblet inn lasten i nullgjennomgang. Pulsbredden ble nesten tidoblet, da den økte til 2742  $\mu$ s. En så kraftig økning betyr at holdestrømmen synker betydelig. Dette kan føre til problemer med at vernet løser ut når strømmen blir høy nok, noe som var tilfelle på Samfundet.

Labforsøket er noe begrenset, ettersom det kun er én og samme startstrøm det har blitt målt på. Ved å simulere startstrømmer av ulike størrelser og pulsbredder, kunne man tydeligere sett hvordan effekten av komponentene endrer seg med størrelsen av startstrømmen.

### 5.2.2 Utløserkarakteristikk til vern og Universalkurve

#### 5.2.2.1 Utløserkarakteristikk til vernene

Forsøket gjort på utløserkarakteristikken til vern, viser at de oppfører seg relativt likt i det aktuelle testområdet. På de fleste vernene kan man se et tydelig skille på hvor vernet løser ut og ikke. I tillegg stemmer impulsutløserkurven til Siemens ganske godt med mange av vernene.

#### **Schneider iC60 RCBO B16 & C16**

Figur 4.4 viser Schneider C16, som er vernet med minst tydelig skille mellom hvor det løste ut eller ikke. Forsøket på B16-vernet til Schneider antyder den samme tendensen, men måleoppsett og utstyr gjorde det utfordrende å teste B-vernet med passende strømmer og pulsbredder. Dette medførte at området man kan anslå en utløserkarakteristikk er svært begrenset. Derfor er det vanskelig å si om B16-vernet også hadde en uforutsigbar utløserkarakteristikk. For å få et bedre resultat, kunne man benyttet flere kondensatorer med ulike størrelser, som hadde muliggjort flere ulike strømpulser.

Man kan se at C16-vernet løser ut for strømmer mye lavere enn kurven til Siemens, og er vernet som kommer dårligst ut av testen. En mulig forklaring er at det har blitt benyttet i labforsøk ved NTNU. Dette var riktignok med lave strømmer, og man ser ikke samme resultat ved Eaton xDigital som har blitt benyttet i samme labforsøk.

### Biltema C16

Dette vernet tålte en veldig høy startstrøm, og er også det billigste vernet av alle som ble testet. Årsaken til at vernet holder så godt er uklart. Selv om det i denne testen tilsynelatende er positivt, kan det være en svakhet i andre tilfeller. Derfor skal man være forsiktig med å anbefale å bruke dette vernet, kun basert på at det kan holde en høy startstrøm.

### ABB S202M C16 og kurven til ABB

Figur 4.10 viser forsøket som ble gjennomført på ABB S202M C16. Her ser man at vernet løser ut på lavere strømmer enn hva kurven til ABB tilsier det skal gjøre. I tillegg ser man at dersom man multipliserer kurven med en sikkerhetsmargin på 0,8, som er anbefalt fra ABB [18], så er det fortsatt målinger under kurven der vernet har løst ut.

En mulig forklaring er at impulsutløserkurven er laget med utgangspunkt i ABB S201 som er et enpolet vern, mens S202M er topolet. Dette burde likevel ikke ha innvirkning på resultatet ettersom impulsutløserkurven er merket med S 200/S 200 M som inkluderer både enpoledede og topoledede vern. Denne forklaringen støttes av Magne Holdhus, teknisk rådgiver i ABB, som også mener at dette ikke skal ha en innvirkning.

En annen mulighet til at utløserkarakteristikken ikke stemmer med impulsutløserkurven kan være at kurven er utdatert i forhold til vernene som produseres i dag. Kurven er ikke datert, noe som gjør det vanskelig å anslå hvor stor innvirkning dette kan ha. Det kan også tenkes at variasjon i produksjon kan ha innvirkning på utløserkarakteristikken.

### Eaton xEffect FAZ C16

Figur 4.12 viser forsøket som ble gjennomført på Eaton xEffect-vernene. Her kan man se at kurven til Eaton ligger langt over området hvor vernet løser ut. Dette var som forventet ettersom kurven til Eaton tilsa at vernet skulle holde 2-8 ganger større strøm enn kurvene til Siemens og ABB.

Årsaken til at kurven tilsynelatende har veldig høye verdier, kan være en feil fra Eaton sin forklaring på hvordan man skal beregne holdestrømmen. Metoden forklarer at man leser av en korreksjonsfaktor  $K$ , som er bestemt av pulsbredden, og kurver for B- og C-karakteristikk[17]. Dette skiller seg fra kurvene til Siemens og ABB, ettersom de oppgir en felles kurve for alle karakteristikk.

Etter man har lest av  $K$ -faktoren skal man multiplisere den med  $I_4$ -verdien til vernet. Det at man multipliserer med  $I_4$ -verdien, som er bestemt av hvilken karakteristikk vernet har, og i tillegg leser av en  $K$ -faktor for gitt karakteristikk, virker underlig. Dette kunne vært en forklaring på hvorfor kurven gir så høye verdier for holdestrømmen. Mistanken om at dette er feil forsterkes av at x-aksen til Eatons kurve er merket med  $I_{Impulse}/I_n$ . Dette tilsier at man skal multiplisere faktoren med vernets nominelle strøm for å få holdestrømmen, ikke vernets  $I_4$ -verdi.

Hvis man går ut i fra at  $I_4$ -verdien er innbakt i  $K$ -faktoren, slik at man bare multipliserer  $K$ -faktoren med nominell strøm, får man en kurve med relativt lave verdier. Grafisk fremstilling av dette kan man se i figur 4.13. Her er kurven nærmere de målte verdiene, men stemmer fortsatt ikke. Dette tyder på at det er en feil med Eaton sin kurve som går utover feil formel for å beregne holdestrømmen. Dette virker likevel som en bedre kurve å dimensjonere etter siden den har en sikkerhetsmargin før vernet løser ut, istedenfor å ligge langt over den faktiske utløserkarakteristikken til vernet.

### Siemens 5SY4316-7 C16

Figur 4.15 viser målingene som ble gjort på Siemens C16 sammen med inntegnet kurve fra Siemens. Kurven ligger rimelig nøyaktig i skillet mellom hvor vernet løste ut eller ikke. Kurven ble laget i 2009, og vernet er en eldre modell med ukjent produksjonsår. At både vernet og kurven er flere år gamle kan være en forklaring på at resultatet stemte godt sammenlignet med ABB.

#### Usikkerhet

Det er gjennomført litt over 100 målinger på hvert vern, noe som gir et begrenset antall målepunkter til å lage en kurve. Basert på så få målinger, er det vanskelig å finne en nøyaktig utløserkarakteristikk til hvert vern. Tilgjengelig tid og ressurser for forsøket satte begrensning på antall vern og målinger som ble gjennomført. Det er i tillegg kun benyttet ett enkelt vern fra samme modell i forsøket. Det kan være små forskjeller på vernene som blir produsert.

På grunn av de varierte kurvene som oppsto ved utladningen av kondensatorbanken, var det nødvendig å gjennomføre flere målinger. Dette var for å oppnå en kurve som lignet startstrømmen til en LED-driver. Flere ganger ble det diskutert om målingen skulle registreres eller ikke. Beslutningen bunnset ofte i om det som skilte seg ut med kurven hadde noe effekt på om vernet løste ut eller ikke. Dette medfører at registrert data er selektert ut data. Vedlegg B viser ulike kurver, som enten er forkastet eller registrert og gir et innblikk av hvordan gruppen har tenkt. På bakgrunn av tilgjengelig ressurser og tid som er avsatt til oppgaven, anses dette som en god metode for å løse problemstillingen.

Utstyret benyttet i forsøket har også en betydelig usikkerhet. Dersom målingene for eksempel alltid havner 20A under faktisk verdi, vil dette påvirke resultatet av utløserkarakteristikken til vern og Universalkurven betraktelig.

#### 5.2.2.2 Utløserkarakteristikk for C16-vern sammenlignet med impulsutløserkurver

Figur 4.16 viser en grafisk fremstilling av alle målingene tatt på C16-vern satt sammen. Figuren viser at områdene hvor vernet løser ut eller ikke, er veldig overlappende. Dette kan oppstå ettersom det ikke er noen standard for hvordan vernene skal oppføre seg i dette området, som nevnt i delkapittel 2.4. Når målingene på Schneider C16 blir fjernet, får man en tydeligere samling av målepunkter hvor vernet har løst ut. Dette tydeliggjør at dette vernet kommer dårligst ut av forsøket.

Figur 4.18 viser impulsutløserkurven til Siemens sammenlignet med alle målingene gjort på C16-vern. Resultatet var overraskende og kurven er blitt brukt som utgangspunkt for å lage en Universalkurve. Det er noen målinger som har løst ut ved en lavere strøm enn kurven tilsier. Disse består for det meste av Schneider- og Chint-vernene.

#### 5.2.2.3 Universalkurven

Universalkurven er designet slik at ved å bruke en sikkerhetsmargin på 20% vil den komme under alle målinger der vernene har løst ut. Uten sikkerhetsmarginen ligger kurven der det er et tydelig skille på hvor vernet løser ut eller ikke. Figur 4.21 viser Universalkurven sammenlignet med kurvene fra ABB og Siemens. Noe av Universalkurvens styrke er at den er en sikrere versjon av Siemens-kurven.



En klar svakhet med Universalkurven er at den er basert på kun åtte vern. I tillegg er noen av disse vernene, for eksempel vernet til Siemens, eldre modeller som ikke blir brukt i nye anlegg i dag. Dette medfører at kurven har et svakt datagrunnlag for å kunne representere utløserkarakteristikken til vern generelt. Likevel kan det være en pekepinn, og det er ikke forventet at utløserkarakteristikken til vern solgt i dag, er vesentlig annerledes enn de som har blitt testet.

For å styrke datagrunnlaget kunne man eksklusivt testet vern solgt i dag, fra flere produsenter med ulike modeller. Dette ville riktignok ført til et mer kostbart forsøk. Det burde også blitt gjennomført et større antall målinger totalt sett. Sammen med flere målinger, kunne man også utnyttet flere ulike størrelser på kondensatorene. Dette hadde muliggjort flere ulike strømmer med flere pulsbredder.

#### 5.2.2.4 Test av universalkurven

Resultatet viste at Universalkurven fungerte bedre eller like bra omtrent 50% av tiden. Som et utgangspunkt er dette oppløftende. Det betyr at det er ganske mange armaturer hvor kurven kan ha en effekt.

Begynner man å analysere dataen videre, kan man derimot se en svakhet i resultatet. Figur 4.22 viser en grafisk fremstilling av hvor mye bedre kurven fungerer når den gir flere armaturer. I mange av tilfellene gir det få ekstra armaturer, sammenlignet med databladet. Grafen viser også hvor mye dårligere kurven fungerer når den gir færre armaturer. Når universalkurven tillater færre, er det ofte med en mye større margin sammenlignet med hva databladet oppgir. Oppsummert kan det sies at når den fungerer, tillates noen få flere armaturer, men når den ikke fungerer tillater den betydelig færre.

Universalkurven fungerte spesielt dårlig med armaturer fra Phillips, hvor den kun fungerte bedre 5 av 23 ganger. Noe av årsaken til dette kan være kvaliteten på de oppgitte startstrømtallene til driverne. Phillips nevner blant annet at startstrømtallene de oppgir kan bli oppdatert etter hvert som målinger blir gjort på anlegg [13]. Noe som også kan spille til fordel for Phillips er at de har få drivere som blir brukt til mange ulike armaturer, noe som gjør det enklere å anskaffe god startstrømsdata.

Universalkurven skal gi startstrømmen vernet skal tåle uten at den skal løse ut, for gitt pulsbredde i databladet til armaturen. Hver gang databladet oppgir et høyere tall enn Universalkurven, skal vernet i teorien løse ut med dette antallet tilkoblet. Det er derimot usannsynlig, da disse tallene skal være rimelig trygge å benytte.

En mulig forklaring til hvorfor databladet gir et høyere antall, er at fremgangsmetoden for å beregne antall armaturer med Universalkurven er en forenkling. Ved å multiplisere antall armaturer med startstrømmen tas det blant annet ikke høyde for kabellengde. Innvirkning av kabellengde ble også observert ved måling av anlegg, hvor startstrømmen ble sammenlignet med datablad. Dersom antallet oppgitt i databladet er basert på både labmålinger og måling på anlegg, vil man kunne få et rimelig nøyaktig tall. Disse tallene vil da også kunne ta høyde for blant annet kabellengde. Det er i tillegg benyttet en 20 % sikkerhetsmargin med Universalkurven, som også reduserer antall armaturer som tillates på en kurs.

Det er ikke benyttet en 20 % reduksjonsfaktor ved bruk av flerpolet vern som nevnt i delkapittel 2.5, fordi det ikke er funnet flere kilder enn Phillips på at dette bør gjøres. Det er heller ingen indikasjon på at Phillips benytter seg av denne reduksjonsfaktoren direkte, ved oppgitt antall i datablad i Norge. Det er også uklart hvorfor man skal benytte seg av denne reduksjonsfaktoren, da vernprodusenter som ABB stiller seg litt uklart til dette. Hadde man benyttet denne reduksjonsfaktoren, hadde kurven kommet bedre ut av testen.

En svakhet med denne testen er at det er kun LED-armaturer fra to lysprodusenter som er testet. Dette gir et dårligere bilde av hvor godt kurven faktisk fungerer. Denne usikkerheten forsterkes med at det er stor forskjell på resultatet mellom Phillips og Ledvance. Det var i tillegg vesentlig flere lamper fra Ledvance som ble testet i forhold til Phillips. Dette har med at Ledvance sine armaturer bruker mange forskjellige LED-drivere, som har ulike startstrømmer. Phillips benytter ofte samme driver for veldig mange lamper, som ga få ulike drivere å teste. Dette vil være med å påvirke resultatet, da lysprodusenten som kurven fungerte best på, også ble testet flest ganger. Grunnen til at kun to produsenter ble testet, er at få produsenter oppgir både startstrømsdata og antallet man kan ha på et C16-vern. Dette medfører at ved bruken av Universalkurven eller andre kurver, vil man måtte bruke tid på å anskaffe denne informasjonen.

### 5.2.3 Målinger på LED-lysrør

#### 5.2.3.1 Startstrømforskjell mellom konvensjonelle- og LED-lysrør

Tabell 4.7 viser at den gjennomsnittlige startstrømmen fra et konvensjonelt lysrør med vanlig tenner var 63A, mens LED-lysrøret hadde en gjennomsnittlig startstrøm på 64A. Dette tilsvarer en økning på omtrent 1,6%. Med en usikkerhet opp mot 11A tatt i betraktning, kan man si at dette er en ubetydelig forskjell. Konvensjonelt lysrør med elektronisk tenner hadde en noe lavere gjennomsnittlig startstrøm på 61A, så forskjellen er nokså liten her også.

Testen ble gjennomført med innkoblet drossel. Drosselen er en spole og kan begrense strømmen, men det er ukjent hvor stor effekt den har på startstrømmen. Det er også bare testet ett LED-lysrør, noe som gir et begrenset datagrunnlag for å trekke en generell konklusjon.

I tillegg er produksjonsdatoen til lysrøret ukjent. Det kan være store forskjeller på lysrøret som er testet, sammenlignet med de som selges i dag, ettersom det har kommet mange nye produkter som følge av utfasing av konvensjonelle lysrør. For å kunne svare bedre på denne problemstillingen, burde det blitt gjennomført målinger på flere LED-lysrør som selges på markedet i dag.

Målingene viser at startstrømmene har svært kort varighet. Denne varigheten er mye kortere enn pulsbredden som er målt på anlegg, noe som førte til at det ble stilt spørsmål til måleresultatet. En mulig forklaring er at det er gjort målinger av støy, som for eksempel prell (vibrasjon mellom bryterkontaktene) fra bryteren når den legges inn. Oscilloskopet er innstilt slik at det trigger ved en strømpuls i kretsen. Støy som likner på disse målingene har ved flere tilfeller trigget oscilloskopet tidligere og det anses derfor ikke som usannsynlig at det kan ha skjedd her også. Dersom målingene er støy, har ikke startstrømmen vært synlig i oscilloskopet, og strømpulsen som har blitt avlest har ikke vært den faktiske startstrømmen fra lysrøret.

Samtidig har en vanlig LED-armatur gjerne startstrøm på 20-25A, så måleverdien på 60A er mistenkelig høy. Man kan også finne oppgitt startstrøm på SubstiTube lysrør i samme effektstørrelse, hvor det er oppgitt en startstrøm på 22A [38]. Dette er ikke nøyaktig samme modell, men det er vanskelig å se for seg at det skal være 40A forskjell, noe som styrker mistanken om at strømpulsen som ble avlest ikke var den faktiske startstrømmen. Pulsbredden til startstrømmen var ikke oppgitt i databladet.

### 5.2.3.2 Kabelimpedansens påvirkning på startstrømmer

Målingene på LED-lysrør, viser at den gjennomsnittlige startstrømmen synker fra 55A til 44A ved å koble inn en skjøtetrommel med 40m 1,5mm<sup>2</sup> kabel. Dette tilsvarer en reduksjon på 20%. Samtidig økes pulsbredden med 26%, fra 31µs til 39µs.

Dette stemmer godt overens med teorien, da en økt impedans vil føre til en demping av strømmen som følge av Ohms lov. Samtidig vil en økt resistans føre til en større tidskonstant for oppladning av kondensator, noe som igjen vil øke pulsbredden.

Dette kommer også frem av målingene på startstrøm ved anleggene på NTNU, vist i tabell 4.1. Her ble det målt en startstrøm på 141A med pulsbredde 367µs på "Verksted, A". Denne kursen besto av ni armaturer, med 12m kabel fra fordeling til første armatur. Fra samme fordeling var det 33m kabel ut til første armatur på belysningskursen "Verksted, varelager", som besto av 10 armaturer av samme type som "Verksted, A". Startstrøm og pulsbredde på denne kursen ble målt til 98A og 482µs.

Så ved å øke kabellengden fra 12m til 33m, ble startstrømmen 30% lavere og pulsbredden 30% større. Dette til tross for at "Verksted, varelager" hadde en armatur mer.

Det er ikke utført nok målinger eller analyse til å kunne konkludere med en generell sammenheng på hvordan strømmen og pulsbredden endrer seg, men målingene bekrefter teorien om at økt impedans demper startstrømmen og øker pulsbredden. For å finne en klarere sammenheng på hvordan startstrømmene endrer seg med kabellengde, kan det tas målinger med ulike kabellengder og ledertverrsnitt.

### 5.2.3.3 Startstrømsforskjell ved IT- og TN-nett

Målingene på LED-lysrør i både IT- og TN-nett tyder på at det ikke er noen vesentlig forskjell på startstrømmene mellom de to nettsystemene. Den gjennomsnittlige startstrømmen var tilnærmet identisk, mens pulsbredden var litt større i IT-nett. Forskjellene i pulsbredde skyldes sannsynligvis at den kombinerte usikkerheten var en del større på TN-målingene, på grunn et høyere standardavvik. Dette kommer fra at det var et begrenset antall målinger som ble utført.

For å kunne svart bedre på problemstillingen, burde flere målinger blitt gjennomført. Dette var ikke en måling som det ble prioritert mye tid på, ettersom det var begrenset tid for å gjennomføre alle forsøkene. I dette forsøket ble det brukt samme måleoppsett og utstyr for de andre målingene på LED-lysrør. Måleresultatet ble også veldig likt, noe som fører til at det vil være samme usikkerhet til resultatet til målingen som ved forsøket mellom LED-lysrør og konvensjonelle lysrør.

Noe som kunne vært interessant å forske på, er hvor høy startstrømmen i nøytralleder kunne ha blitt, ved et anlegg med skjevt fordelt og ulineær last. Dette er noe som ikke vil være aktuelt ved IT-nett, men kan være et problem i TN-nett. Dessverre var ikke dette mulig å teste ut for denne rapporten.

### 5.3 Lønnsomheten av startstrømbegrenser og nullgjennomgangsrelé

Å vurdere lønnsomheten ved å ta i bruk startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé er veldig vanskelig fra et generelt utgangspunkt. Det vil variere fra anlegg til anlegg, men noen viktige faktorer som må vurderes er:

- Kabellengde fra fordeling til LED-armaturen.
- Antall kurser man opprinnelig må dele anlegget inn i.
- Arbeidstid for å dimensjonere og gjennomføre arbeidet.

Kabellengden fra fordeling vil ha en del å si, ettersom prisen på kabel er relativt høy. Prisen for PFXP 3G2,5, som er en vanlig kabel å benytte, ligger på rundt 40 kroner per meter på Elektroimportøren, som vist i delkapittel 2.7.4.

Dersom man har et anlegg med tre kurser, hvor det er 15 meter frem til første armatur, så vil man ha rundt 45 meter med kabel fra fordelingen til armaturene. Dette vil da tilsvare rundt 1800kr. Dersom man bruker startstrømbegrenser eller nullgjennomgangsrelé, som åpner for mulighet til å ha alt på en kurs, vil man potensielt kunne spare en betydelig mengde kabel. I tillegg vil man kunne spare inn på antall vern man trenger.

Arbeidstimene for å gjennomføre arbeidet kan også ha stor påvirkning på prisen. Ved å legge opp én kurs istedenfor tre kurser, sparer man ikke bare penger på kabel og festemateriell, men også på antall arbeidstimer. Om dette er positivt eller ikke avhenger vel av hvilke interesser man har, men for sluttkunde vil det hvertfall være positivt.

#### Sammenlikning av startstrømbegrenser og nullrelé

Fordelen med strømbegrenseren er at man har et tall på startstrømmens størrelse. Dette vil være en stor fordel ved dimensjonering av anlegg. Ved bruk av nullgjennomgangsrelé er ikke startstrømmen kjent før anlegget testes. Det kan derfor være vanskeligere å vite hvor mange armaturer man kan ha på et anlegg.

En ulempe med startstrømbegrenseren er at den har en nedkjølingstid på 20 sekunder. Dette kan potensielt være et faremoment dersom noen skruer lysbryteren av og på gjentatte ganger i et kort tidsrom. Det er usikkert hvordan startstrømbegrenseren reagerer på dette, men på generelt grunnlag er det lurt å følge produsentens anvisning. Nullgjennomgangsreléet derimot, tåler en koblingshyppighet på ett sekund, så denne vil sannsynligvis ikke ha noe problemer med å bli lagt inn og ut gjentatte ganger på kort tid.

Det var ikke mulig i dette forsøket å se hvordan komponentene fungerer over tid. Noe som kunne vært interessant, er å se om det kunne oppstått noen problemer med nedkjøling av startstrømbegrenseren som følge av koblingshyppigheten. Da kunne man også sett om komponentene begrenset strømmen like godt over tid.

Startstrømbegrenseren kom klart best ut av testen på Samfundet, mens på lab reduserte nullgjennomgangsreléet strømmen til et litt lavere nivå enn begrenseren (riktignok med betydelig lenger puls-bredde). Dette tyder på at nullgjennomgangsrelé kan være en like god løsning på mindre anlegg dersom man ønsker å legge til noen få ekstra armaturer. Målingene på Samfundet med nullgjennomgangsrelé og to kurser sammenkoblet støtter denne antydningen. Dersom kursen uansett skal ha relé-styring kan nullgjennomgangsrelé være en mulig løsning, men startstrømbegrenseren virker å være en tryggere løsning for større anlegg.

## 5.4 Usikkerhet og mulige feilkilder

### 5.4.1 Innstillinger på oscilloskop

Målingene gjort med oscilloskop ble gjort med 0A sentrert på oscilloskopets y-akse. Dette medførte at en måling av en strømpuls maksimalt kan fylle halve skjermen til oscilloskopet, fra null og til enten toppen eller bunnen av skjermen. Siden usikkerheten til skopet beregnes som en prosentandel av det totale måleområdet fra nederst til øverst på skopets y-akse, vil dette gi unødvendig stor usikkerhet relativ til strømpulsens størrelse. For målingene gjort på anlegg, og på lab med AC, var det nødvendig å sentrere 0A på skopet for å kunne måle både positive og negative strømpulser. Derimot var ikke dette nødvendig for målingene av utløserkarakteristikk gjort med utladning av en kondensator, ettersom strømpulsen her alltid var positiv. Derfor er usikkerheten til disse målingene større enn den kunne vært, og dette er noe som burde forbedres dersom det skal gjøres flere slike målinger.

### 5.4.2 Samplingsfrekvens på oscilloskop

På anlegg og lab med AC ble det tatt målinger slik at skjermen viser ca 20ms for å få med en hel periode av spenningen og gi en tydelig oversikt over hvor innkoblingen skjedde. Dette medførte at målingene framstår svært korte på skopets skjerm. Dette er spesielt tydelig på målingene av lysrør ettersom de har mye kortere varighet enn de andre startstrømmene.

Målinger på lysrør har svært kort pulsbredde sammenliknet med skjermens bredde. Vedlegg L viser skjerm bilde fra oscilloskop for en tilfeldig valgt måling av startstrømmen til LED-lysrør, hvor målingen framstår svært kortvarig på skjermen. Dette fører til at det er færre punktprøver på strømpulsen enn det ideelt sett kan være. Målingene ble tatt med enten 312MSa/s eller 250MSa/s samplingsfrekvens. 250MSa/s tilsvarer 4ns mellom punktprøvene og 6750 målepunkt for en puls på 27 $\mu$ s. Det antas at dette er tilstrekkelig samplingsfrekvens og at båndbredden til tangamperemeter vil ha mye større innvirkning på resultatet enn samplingsfrekvensen. Ettersom alle målingene framstår så korte på skopets skjerm svekker dette likevel tilliten til målingene.

### 5.4.3 Undersøkelse av båndbredde og FFT

#### Anlegg på NTNU

For målingene gjort med FLUKE i200s tangamperemeteret (Elektrovarmelab, Høystrømbryterlab og verksted) dør de fleste overharmoniske ut før 10kHz, som er båndbredden til tangamperemeteret. Likevel er noen av frekvenskomponentene ganske tett opp mot 10kHz. Disse frekvensene kan ha blitt dempet og ført til at signalet ikke er nøyaktig gjengitt, noe som svekker tilliten til målingene. Det burde blitt brukt et tangamperemeter med større båndbredde, selv om de målte frekvensene i all hovedsak ligger innenfor det produsenten oppgir som frekvensområde for "brukbar respons" [30].

For målingene gjort med FLUKE i1000s (AQ- og AS-fordelingen i korridoren) dør de overharmoniske ut innen 20kHz, og har svært lav amplitude over 10kHz. Dette er godt under båndbredden til tangamperemeteret på 100kHz [39] og tyder på at overharmoniske utenfor båndbredden til strømtangen ikke har hatt innvirkning på disse målingene. At de overharmoniske dør ut ved omtrent de samme frekvensene her gir også en indikasjon på at det ikke er svært høye frekvenser som er filtrert ut av målingene med i200s tangen. Dette styrker altså tilliten til målingene gjort på Elektrovarmelaben, Høystrømbryterlaben og verkstedet.

#### Startstrøm i lysrør

Målingene av lysrør har frekvenskomponenter opp mot 100kHz, som er grensen til tangamperemeterets båndbredde. Det er derfor vanskelig å si om signalet i realiteten inneholdt frekvenskomponenter over 100kHz eller ikke, ettersom høyere frekvenser kan ha blitt dempet eller filtrert vekk. Dette kombinert med tidligere nevnte faktorer (ref. 5.2.3.1) er med på svekke tilliten til målingene gjort på lysrør og gjør det vanskelig å konkludere sikkert på disse målingene.

### 5.4.4 Gjennomføring av målinger på anlegg

Under gjennomføring av målingene på anlegg ble det ventet 20 sekunder mellom hver måling. Dette tallet ble valgt litt tilfeldig som en grei kombinasjon av å gi tid til utladning og samtidig være kort nok til at det kunne bli gjort mange målinger.

Det kan tenkes at det hadde vært bedre med en lenger ventetid, ettersom man i praksis sjelden slår lyset på etter at det bare har vært av i 20 sekunder. I verste fall hadde ikke kondensatorene i driverene ladet seg helt ut mellom målingene, slik at startstrømmen i realiteten er større enn den som ble målt. Dette anses som usannsynlig ettersom lyset ble slått av og på under oppsett av måleutstyr før de faktiske testene ble gjort. Her ble det tatt tester med mer enn 20s mellomrom og det ble aldri observert noen tydelig forskjell på startstrømmen dersom ventetiden var lenger.

### 5.4.5 Databehandling

Under behandlingen av data ble målinger hvor spenningen ved innkobling var over 300V definert som målinger ved toppverdi. Dette fører til noe variasjon i målingene ettersom målinger der spenningen er 300V vil ha lavere startstrøm enn målinger der spenningen er 325V. Dette gjør seg synlig i standardavviket til målingene som sannsynligvis ville vært mindre dersom man definerte toppverdi som for eksempel over 310V eller 320V. Dette medfører også at gjennomsnittet til målingene trolig er lavere enn dersom man hadde valgt en høyere terskel for toppverdi, og at målingene ikke nødvendigvis er det absolutt verste tilfelle av startstrøm som kunne forekomme.

Likevel er det viktig å veie kravet til å treffe toppverdi opp mot den praktiske gjennomføringen av testen. Dersom man ønsker en mer nøyaktig definisjon av toppverdien til spenningen må testen gjøres flere ganger for å få like mange målinger som kan defineres som å ha blitt koblet inn ved toppverdi. Dette ville tatt lenger tid og kunne medført at det ikke ville vært tid til å måle på like mange anlegg.

Spenningen ved innkobling ble estimert i Python ved å finne spenningen rett før innkobling. Dette er et estimat og gir ikke helt riktig spenning. Denne unøyaktigheten antas å være uviktig ettersom det ikke er spenningen i seg selv som er interessant å måle, men den kun brukes for å gi forståelse av hvor på spenningskurven innkoblingen skjer. Derfor stilles det heller ikke noen strenge krav til nøyaktighet i spenningen.

### 5.4.6 Ulikhet mellom startstrømmer på samme målinger på forskjellige dager

Oppsettet til målingene på LED-lysrør var likt for alle testene, og det er rart at startstrømmene på testen for kabelimpedans og forskjellen ved IT- og TN-nett ga ulike størrelser for startstrøm. Den eneste forskjellen var at disse målingene ble gjort på forskjellige dager. Ut fra tabell 4.7 og tabell 4.9 kommer det fram at det er en gjennomsnittsforskjell på 13A. Viktig å nevne her er at det ligger usikkerheter ved hver måling, og at de er gjennomsnittsmålinger. Likevel er dette noe som bør nevnes. Målingene fra kabelimpedans-forsøket varierte fra 50,7A til 58,25A, og målingene på testen av nettsystem var fra 63A til 82A. Det er merkelig at den største målingen for det ene forsøket, ikke kom nær den laveste målingen for det andre.

En forklaring for dette kan være forstyrrelser på fordeling og foranliggende nett. NTNU Gløshaugen er et stort universitet der flere forsøk pågår samtidig, og dette kan ha påvirket resultatene. Samtidig kan usikkerheten i skopet ha hatt en innvirkning.

Likevel forsvinner ikke sammenlikningsgrunnlaget, ettersom testene på ulike dager ikke skulle sammenliknes med hverandre. Altså, den ene testen undersøker innvirkningen til kabelimpedans på startstrøm, og den andre forskjeller mellom TN-S og IT-nett. Det som påvirket testene den ene dagen vil påvirke alle målingene den dagen. For kabelimpedans-målingene viste det fortsatt at kabelstrek hadde en innvirkning på startstrømmene, og ved IT- mot TN-nett var det veldig liten forskjell mellom dem ettersom de begge tilførte samme spenning til systemet.





## Kapittel 6: Konklusjon

Denne rapporten har hatt som mål å se på ulike problemstillinger knyttet til startstrøm i LED-anlegg. Basert på målingene gjennomført, kan følgende konklusjoner trekkes:

- Målingene av anlegg på NTNU og på Studentersamfundet viser at disse LED-anleggene er overdimensjonert med tanke på nominell strøm. Det er grunn til å tro at dette gjelder LED-anlegg på generell basis.
- Målingene antyder at oppgitt startstrømsdata er en brukbar tilnærming for startstrømmen per armatur i et anlegg.
- Målingene viser at startstrømbegrenseren reduserer startstrømmen til 48A, slik at antall kurser kan reduseres.
- Målingene viser at nullgjennomgangsreléet kan redusere startstrømmen, men antyder at startstrømbegrenseren fungerer bedre for anlegg med svært store startstrømmer.
- Målingene antyder at utløserkarakteristikken til de forskjellige vernene er relativt like.
- Målingene viser at impulsutløserkurven til Eaton stemmer dårlig med utløserkarakteristikken til Eaton xEffect-vernet. Kurven til Siemens stemmer godt for Siemens-vernet, mens kurven til ABB må brukes med forsiktighet opp mot ABB-vernet.
- I enkelte tilfeller tillater Universalkurven noen få ekstra armaturer, men den er ikke egnet til å dimensjonere LED-anlegg på generell basis.
- Målingene kan ikke påvise at det er en betydelig forskjell mellom startstrømmen i LED-lysrør og konvensjonelle lysrør.
- Målingene kan ikke påvise at det er en betydelig forskjell på startstrømmer i IT- og TN-nett.
- Målingene på lab og anlegg bekrefter at kabellengde kan være med å dempe størrelsen på startstrømmen.

## 6.1 Videre arbeid

Rapporten har sett på ulike metoder for å kunne dimensjonere for flere LED-armaturer på en kurs. Det kunne vært interessant å se på flere metoder som for eksempel å benytte vern med D-karakteristikk eller LED-drivere med softstart. I tillegg har det blitt laget en universalkurve. Ved å gjennomføre flere målinger, med flere vern, kunne man fått en mer nøyaktig og pålitelig kurve.

Ved arbeid med denne rapporten har det blitt gjort funn som kan vurderes å arbeide videre med. Dette inkluderer blant annet forskjellen mellom enpolet og topolet vern og konsekvensen av firepolet vern ved TN-nett. Det kunne vært interessant å blant annet gjort forsøk på både enpolet og topolet vern og sett om det er noe forskjell i utløserkarakteristikken til vernene.

Forsøket gjort på startstrømbegrenseren og nullgjennomgangsreléet er begrenset med antall målinger gjennomført. Det hadde vært interessant å se hvordan det hadde fungert oppkoblet på et anlegg over tid. Da kunne man blant annet testet holdbarheten og konsekvensen av en raskere koblingshyppighet enn 20 sekunder.

## Bibliografi

- [1] Elfaq Entusiastene, «Beregning av motor,» mar. 2018. Tilgjengelig fra: <http://elfagentusiastene.blogspot.com/2018/03/beregning-av-motor.html> (Lastet ned: 18.05.2023).
- [2] Hubbell Power Systems, «INRUSH and LED Drivers,» Hubbell Power Systems, tekn. rapp., 2016. Tilgjengelig fra: <https://hubbellcdn.com/ohwassets/HLI/trp/resources/faq/TRP%20Inrush%20White%20Paper.pdf> (Lastet ned: 04.05.2023).
- [3] International Electrotechnical Commission, «Determination of inrush current characteristics of lighting products,» IEC, Elektroteknisk standard 63129, 2020.
- [4] Advanced Lighting Technologies, «LED Driver Inrush Currents,» *ADLT Insights*, 2018. Tilgjengelig fra: <https://adlt.com.au/led-driver-inrush-currents/> (Lastet ned: 14.04.2023).
- [5] K. Hofstad, «International Electrotechnical Commission,» i *Store norske leksikon*, 2022. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/International\\_Electrotechnical\\_Commission](https://snl.no/International_Electrotechnical_Commission) (Lastet ned: 25.04.2023).
- [6] One Electron Universe, «LED Driver circuit explained - Constant current vs Constant Voltage - Let there be light,» mai 2021. Tilgjengelig fra: [https://www.youtube.com/watch?v=kZiKqxN\\_GJ8](https://www.youtube.com/watch?v=kZiKqxN_GJ8) (Lastet ned: 20.04.2023).
- [7] A. Nishino, «Capacitors: operating principles, current market and technical trends,» *Journal of power sources*, årg. 60, nr. 2, s. 137–147, 1996, issn: 0378-7753. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775396800036> (Lastet ned: 05.05.2023).
- [8] J. Blom, «Capacitors,» jun. 2013. Tilgjengelig fra: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/capacitors/capacitor-theory> (Lastet ned: 25.04.2023).
- [9] T. R. Kuphaldt, «Specific Resistance,» 2021. Tilgjengelig fra: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-12/specific-resistance/> (Lastet ned: 12.04.2023).
- [10] E. H. Hansen, *Elektroinstallasjoner*. Kongsberg: Classica forlag AS, 2021.
- [11] NORSK ELEKTROTEKNISK KOMITE, «Electrical accessories - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations - Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation,» Geneva, Switzerland, tekn. rapp. NEK IEC 60898-1:2015+A1:2019, 2019.
- [12] Philips Lighting, *Datasheet FlexBlend, Surface Mounted*, Philips Lighting, mai 2023. Tilgjengelig fra: [https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/PhilipsLighting/content/fp910925867099-pss-global/910925867099\\_EU.en\\_AA.PROF.FP.pdf](https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/PhilipsLighting/content/fp910925867099-pss-global/910925867099_EU.en_AA.PROF.FP.pdf) (Lastet ned: 26.04.2023).

- [13] Philips Lighting, *Xitanium Indoor LED Drivers*, v.1.3, Philips Lighting, Eindhoven, Netherlands, aug. 2021. Tilgjengelig fra: [https://www.docs.lighting.philips.com/en\\_gb/oem/download/indoor-point/xitanium-indoor-led-drivers.pdf](https://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/indoor-point/xitanium-indoor-led-drivers.pdf) (Lastet ned: 26.04.2023).
- [14] Ø. Kjeldstad, «Dimensjonering av ledertverrsnitt i anlegg med overharmoniske strømmer,» mar. 2010. Tilgjengelig fra: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/256792/350779\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=I%5C%20TN%5C%2Dnett%5C%20for%5C%20ordin%5C%C3%5C%A6re,V%5C%20mellom%5C%20fase%5C%20og%5C%20n%5C%C3%5C%B8ytralleder.](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/256792/350779_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=I%5C%20TN%5C%2Dnett%5C%20for%5C%20ordin%5C%C3%5C%A6re,V%5C%20mellom%5C%20fase%5C%20og%5C%20n%5C%C3%5C%B8ytralleder.) (Lastet ned: 05.05.2023).
- [15] Nexans, «Bærekraftige bygg,» u.d. Tilgjengelig fra: <https://www.nexans.no/no/segments/building/installation-cables/sustainability.html> (Lastet ned: 19.04.2023).
- [16] Nexans, «PFXP 300/500 V Installasjonskabel med kobberleder,» (u.d.) Tilgjengelig fra: <https://www.nexans.no/.rest/catalog/v1/family/pdf/-536941171/PFXP-300-500-V-Installasjonskabel-med-kobberleder> (Lastet ned: 19.04.2023).
- [17] Eaton, «How to select the right LED luminaire and the correct number for a Miniature Circuit Breaker (MCB),» (u.d.) Tilgjengelig fra: <https://www.eaton.com/au/en-gb/products/lighting-controls/lighting-mcb.html/> (Lastet ned: 24.04.2023).
- [18] ABB, «How to protect lighting circuits for LED lights,» sep. 2020. Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/news/detail/67528/how-to-protect-lighting-circuits-for-led-lights> (Lastet ned: 27.04.2023).
- [19] TDK Corporation, «Application Note How to Use NTC Thermistors for Inrush Current Limiting,» jun. 2018. Tilgjengelig fra: [https://product.tdk.com/en/techlibrary/applicationnote/howto\\_ntc-limiter.html](https://product.tdk.com/en/techlibrary/applicationnote/howto_ntc-limiter.html) (Lastet ned: 12.04.2023).
- [20] Camtec Power Supplies Ltd., «CAMTEC ESB101 Datasheet,» mar. 2022. Tilgjengelig fra: <https://www.camtec-powersupplies.com/data-12/2/camtec-esb101-032022-00-0.pdf> (Lastet ned: 12.04.2023).
- [21] «Zero-cross or Random Relay: What are the Differences??» Mai 2023. Tilgjengelig fra: <https://www.celduc-relais.com/en-us/zero-cross-or-random-relay-what-are-the-differences/> (Lastet ned: 20.05.2023).
- [22] CTM Lyng AS, «Produktark: 2-pol 230V 16A relé,» aug. 2015. Tilgjengelig fra: [https://ctmlyng.no/wp-content/uploads/Produktark\\_2-pol\\_230V\\_16A-rele\\_Visning.pdf](https://ctmlyng.no/wp-content/uploads/Produktark_2-pol_230V_16A-rele_Visning.pdf) (Lastet ned: 12.04.2023).
- [23] Miljødirektoratet, «Lysrør med kvikksølv fases ut i 2023,» okt. 2022. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/oktober-2022/lysror-med-kvikksolv-fases-ut-i-2023/> (Lastet ned: 18.04.2023).
- [24] H.-H. Bjørset og E. H. Hansen, *Lysteknikk*. Kongsberg: Classica forlag AS, 2022.
- [25] Waveform Lighting, «LED Tube Lights,» mai 2022. Tilgjengelig fra: <https://www.waveformlighting.com/led-tube-lights> (Lastet ned: 12.04.2023).
- [26] Fluke Corporation, «Inside current transformer (ac) clamp meters,» (u.d.) Tilgjengelig fra: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/clamps/inside-current-transformer-ac-clamp-meters> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [27] Rohde & Schwarz, *R&S RTB2000 Oscilloscope Specifications*, Rohde & Schwarz, München, Tyskland, feb. 2022. Tilgjengelig fra: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/RTB2000\\_dat-sw\\_en\\_3607-4270-22\\_v1600.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTB2000_dat-sw_en_3607-4270-22_v1600.pdf) (Lastet ned: 13.05.2023).

- [28] Keysight Technologies, *InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes*, Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA, okt. 2022. Tilgjengelig fra: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02733/data-sheets/5990-6618.pdf> (Lastet ned: 13.05.2023).
- [29] Keysight Technologies, «Understanding Voltage Measurement Accuracy for Infiniivision Oscilloscopes,» jan. 2020. Tilgjengelig fra: <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/understanding-voltage-measurement-accuracy-for-infiniivision-oscilloscopes-584425356.html> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [30] Fluke Corporation, *i200s AC Current Clamp datasheet*, (u.d.), Fluke Corporation, Everett, WA, USA. Tilgjengelig fra: <https://www.fluke.com/no-no/product/accessories/current-clamps/fluke-i200s-ac-current-clamp/ds> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [31] H. Jonsdottir, *Usikkerhet og støy i målinger*. Bergen, Norge: Fagbokforlaget, 2016.
- [32] D. Deardorff, *Measurement and Uncertainty Analysis Guide*, jul. 2017. Tilgjengelig fra: <https://users.physics.unc.edu/~deardorf/uncertainty/UNCguide.pdf> (Lastet ned: 02.05.2023).
- [33] Jim.belk, «Fourier Series.svg,» okt. 2009. Tilgjengelig fra: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier\\_Series.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier_Series.svg) (Lastet ned: 03.05.2023).
- [34] Dr. Robertson WM., «Fourier's Theorem and the Spectrum of Complex Tones,» mai 2023. Tilgjengelig fra: [https://www.mtsu.edu/faculty/wroberts/teaching/fourier\\_4.php](https://www.mtsu.edu/faculty/wroberts/teaching/fourier_4.php) (Lastet ned: 03.05.2023).
- [35] Keysight Technologies, «Oscilloscopes - Fourier Series of a Square Wave (and Why Bandwidth Matters),» (u.d). Tilgjengelig fra: <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/oscilloscopes-fourier-series-of-a-square-wave-and-why-bandwidth-matters-583423317.html> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [36] M. Garza, «Supercharge Your Oscilloscope Bandwidth,» aug. 2019. Tilgjengelig fra: <https://www.keysight.com/blogs/tech/bench/2019/08/16/supercharge-your-oscilloscope-bandwidth> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [37] P. B. Andersen, «FFT,» i *Store norske leksikon*, jan. 2023. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/FFT> (Lastet ned: 03.05.2023).
- [38] LEDVANCE, «LEDVANCE - SubstiTUBE® Pro HF,» (u.d). Tilgjengelig fra: <https://www.ledvance.com/professional/products/lamps/led-tubes/substituber-t8-hf/substituber-pro-hf-c141585?productId=35283> (Lastet ned: 16.05.2023).
- [39] Fluke Corporation, *i1000s AC Current Clamp*, Fluke Corporation, Everett, WA, USA, 2017. Tilgjengelig fra: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i1000s\\_\\_umeng0300.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i1000s__umeng0300.pdf) (Lastet ned: 03.05.2023).
- [40] Fluke Corporation, *i200s AC Current Clamp manual*, Fluke Corporation, Everett, WA, USA, jan. 2006. Tilgjengelig fra: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i200s\\_\\_\\_iseng0500.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i200s___iseng0500.pdf) (Lastet ned: 05.05.2023).
- [41] NTNU, «Instrumentarkiv.» Tilgjengelig fra: <https://arkiv.elkraft.ntnu.no/instrumentarkiv/instsokresultat.php> (Lastet ned: 16.05.2023).



# Vedlegg A: Informasjon om Måleutstyr

## A.1 Tangamperemeter

### FLUKE i200s

Tangamperemeteret FLUKE i200s har oppgitt en grunnleggende usikkerhet på  $\leq 1,5\% + 0,5A$  for målinger mellom 48Hz og 65Hz, i tillegg er det en ekstra feil på  $< 12\%$  for målinger mellom 1kHz og 10kHz[40]. Tangen gir brukbare målinger mellom 40Hz og 10kHz. [30]

### FLUKE i1000s

FLUKE i1000s har en oppgitt usikkerhet på  $1\% \pm 1mV$  for målinger mellom 1A og 1000A og en usikkerhet på  $2\% \pm 5mV$  for målinger mellom 100mA og 100A. I tillegg har den oppgitt en usikkerhet på  $< 0,5\%$  for målinger mellom 10Hz og 5kHz. Tangen kan brukes i frekvensområdet 5Hz til 100kHz. [39]

## A.2 Oscilloskop

### Rohde & Schwarz RTB2004

Dette oscilloskopet har et måleområde som er  $10 \times 10$  divisjoner og har en båndbredde på 300MHz.

Usikkerheten til dette skopet oppgis med følgende formler:

- DC gain accuracy =  $\pm 1,5\%$  of full scale
- Offset accuracy =  $\pm (0,5\% * |\text{offset}| + 0,1 \text{ div} * \text{input sensitivity} + 1mV)$
- DC measurement accuracy =  $\pm (\text{DC gain accuracy} + \text{offset accuracy})$
- Timebase accuracy =  $\pm 2,5\text{ppm}$
- Delta time accuracy =  $\pm (1,19 F_s + \text{timebase accuracy} * |\text{reading}|)$ 
  - Hvor  $F_s$  = samplingsfrekvens

Her refererer "full scale" til den størrelsen på det vertikale måleområdet. Dette beregnes som antall

vertikale divisjoner (10), multiplisert med A/div innstillingen.

### **Keysight DSOX2014A**

Dette oscilloskopet har et måleområde som er 8 divisjoner høyt og 10 divisjoner bredt, båndbredden er 100MHz.

Usikkerheten til dette skopet oppgis med følgende formler:

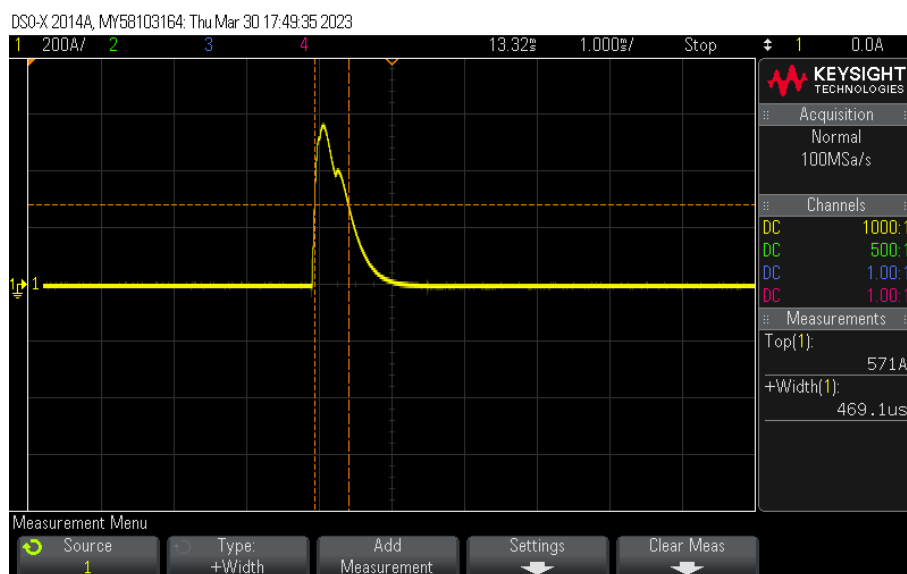
- DC vertical gain accuracy =  $\pm 3\%$  full scale
- DC vertical offset accuract =  $\pm (0,1 \text{ div} + 2\text{mV} + 1\% \text{ of offset setting})$
- DC vertical accuracy =  $\pm (\text{DC vertical gain accuracy} + \text{DC vertical offset accuracy} + 0,25\% \text{ full scale})$
- Time base accuracy =  $25\text{ppm} \pm 5 \text{ ppm per year (aging)}$
- $\Delta$  Time accuracy =  $\pm (\text{time base accuracy} * \text{reading}) \pm (0,0016 \text{ screen width}) \pm 100\text{ps}$

Her refererer også "full scale" til størrelsen på det vertikale måleområdet, men ettersom dette skopet har 8 vertikale divisjoner må A/div innstillingen ganges med 8 istedenfor 10.

Screen width betyr størrelsen på det horisontale måleområde og beregnes som antall divisjoner langs x-aksen (10) multiplisert med ms/div innstillingen.

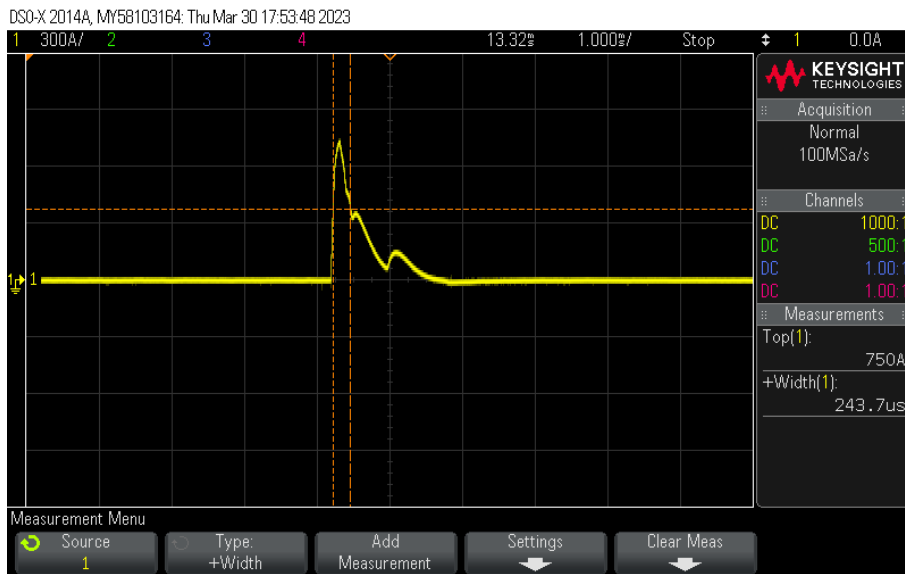


## Vedlegg B: Kurver fra forsøk av utløserkarakteristikk



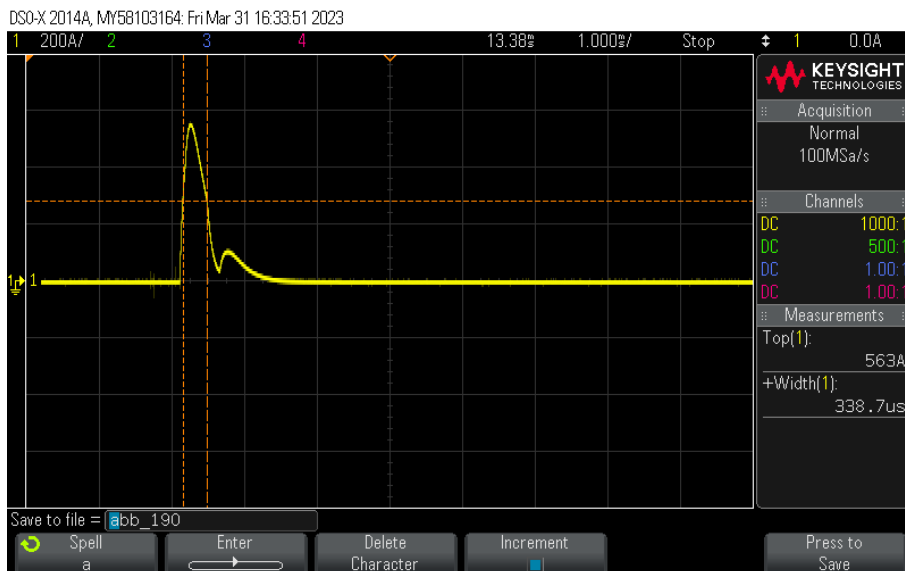
**Figur B.1:** Vernet løste ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.1 er lagret og beholdt ettersom kurven har en lignende form som startstrømmen til en LED-driver.



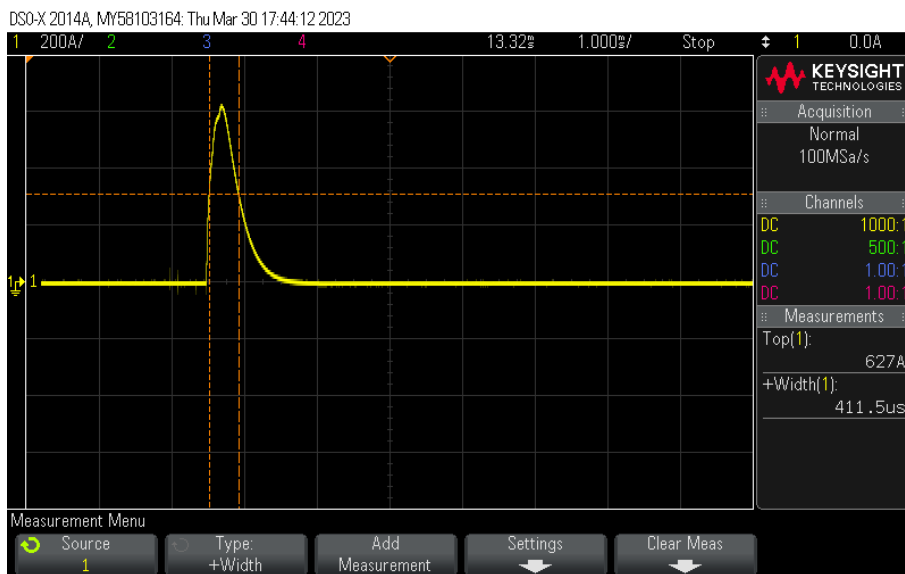
**Figur B.2:** Vernet løste ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.2 er litt ulik kurven til startstrømmen til en LED-driver. Kurven har en liten hump ved slutten. Her har det blitt antatt at denne humpen har hatt lite påvirkning på at vernet løste ut, ettersom den har en veldig lav amplitude sammenlignet med toppverdien.



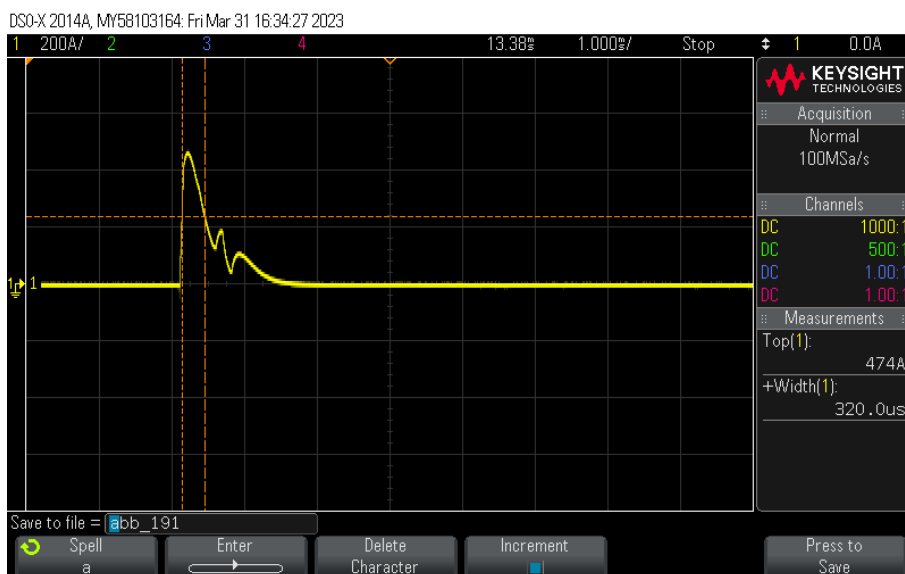
**Figur B.3:** Vernet løste ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.3 har også en hump, og i likhet med forrige kurve har det blitt antatt at den har lite påvirkning på at vernet løste ut.



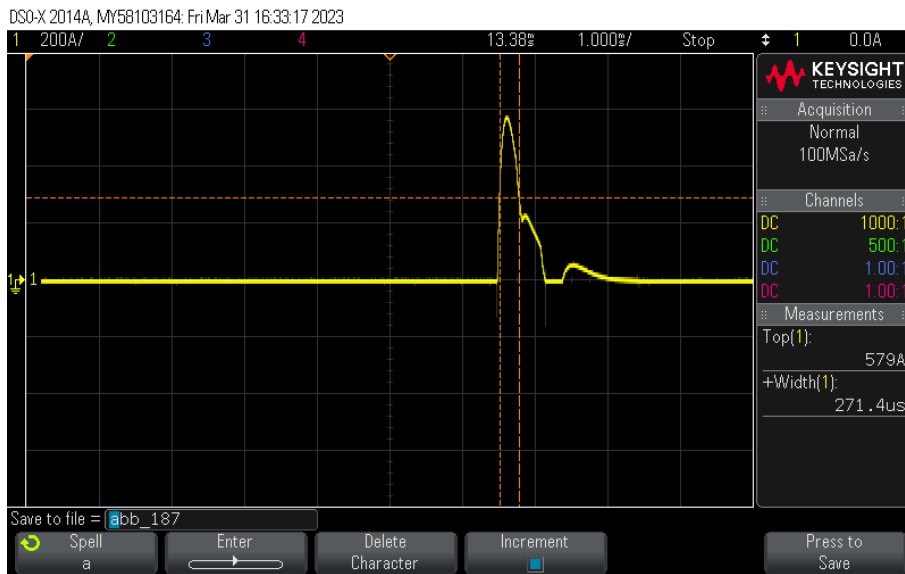
**Figur B.4:** Vernet løste ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.4 ligner på en typisk startstrøm fra en LED-driver.



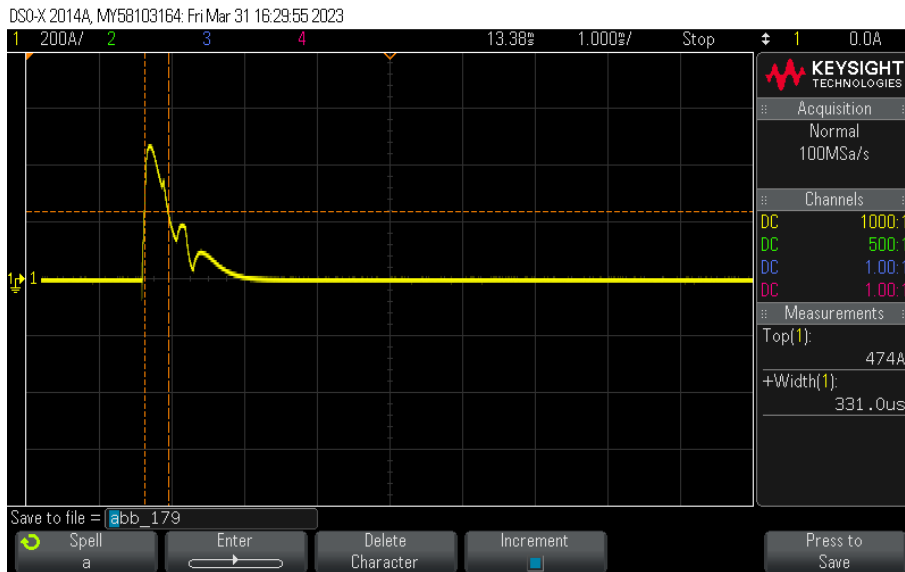
**Figur B.5:** Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.5 har en rar form, med et område hvor den går litt opp før den stuper ned igjen. Det er antatt at det ikke er stor forskjell sammenlignet med dersom kurven ikke hadde hatt denne lille toppen. I tillegg har ikke vernet løst ut, så dersom den lille toppen hadde hatt en påvirkning i den retning at den kunne løst ut vernet, spiller det uansett ikke rolle for resultatet.



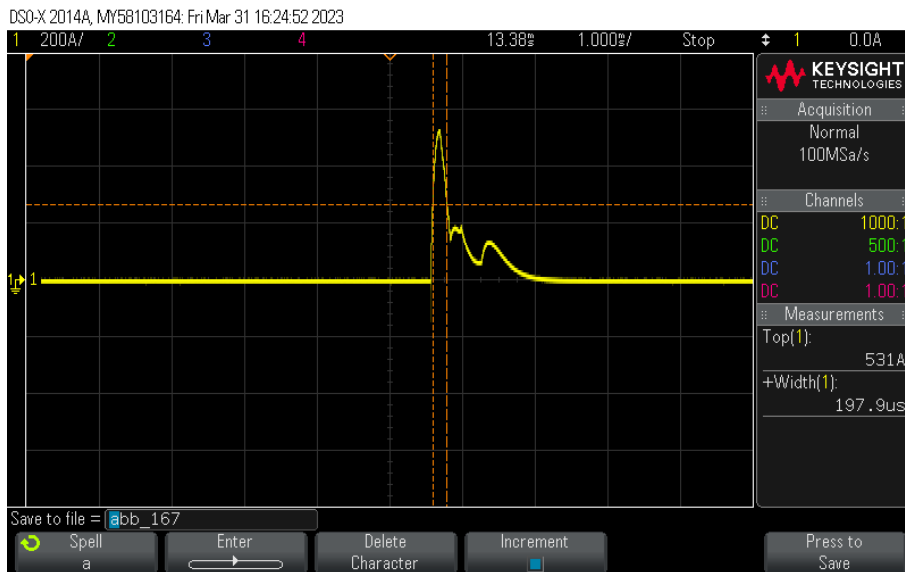
**Figur B.6:** Vernet løste ikke ut og resultatet beholdt.

I figur B.6 har ikke vernet løst ut. Den første pulsen som har en veldig høy verdi har ikke ført til at vernet har løst ut, og derfor har dette blitt lagret.



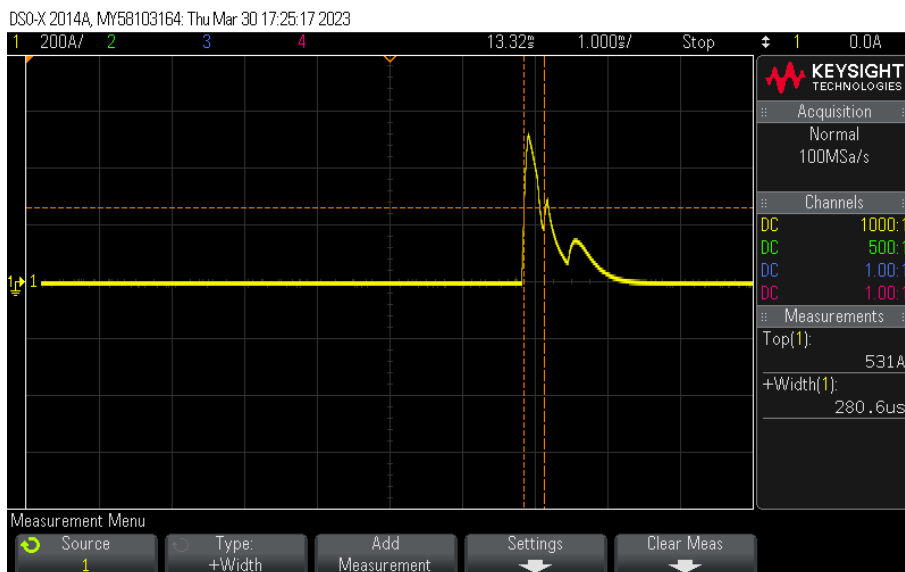
**Figur B.7:** Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt.

Kurven fra figur B.7 er beholdt med samme argument som tidligere.



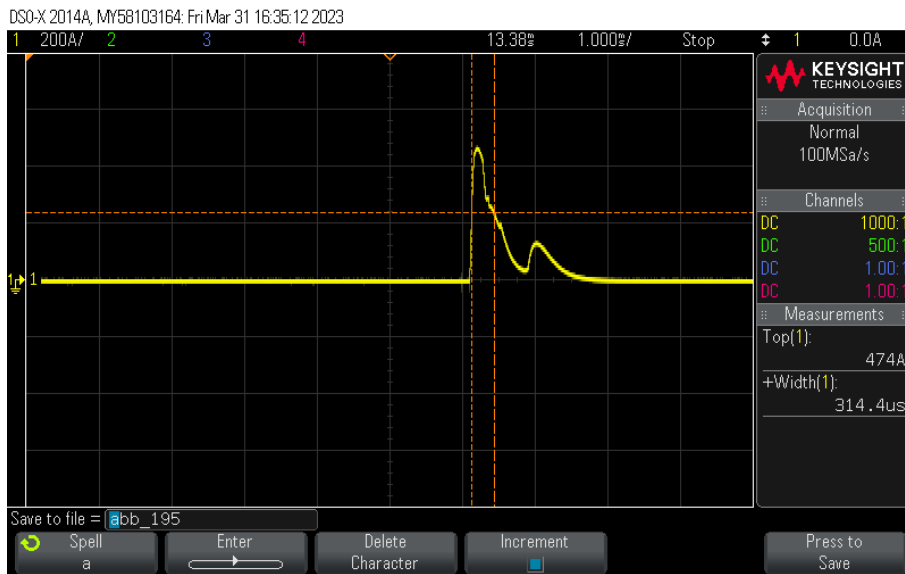
**Figur B.8:** Vernet løste ikke ut og resultatet ble beholdt.

Kurven i figur B.8 har en høy toppverdi som ikke har ført til at vernet har løst ut. Det som kommer etterpå løste heller ikke ut vernet. Derfor ble denne toppverdien og pulsbredden lagret.



**Figur B.9:** Vernet løste ut og resultatet ble forkastet.

Kurven i figur B.9 ble veldig rar. Ettersom kurven stupte ned og opp til et punkt over 50% av toppverdien, ble pulsbredden veldig lang. Vernet løste ut, og ettersom det er usikkert om pulsbredden ble riktig, ble resultatet forkastet.

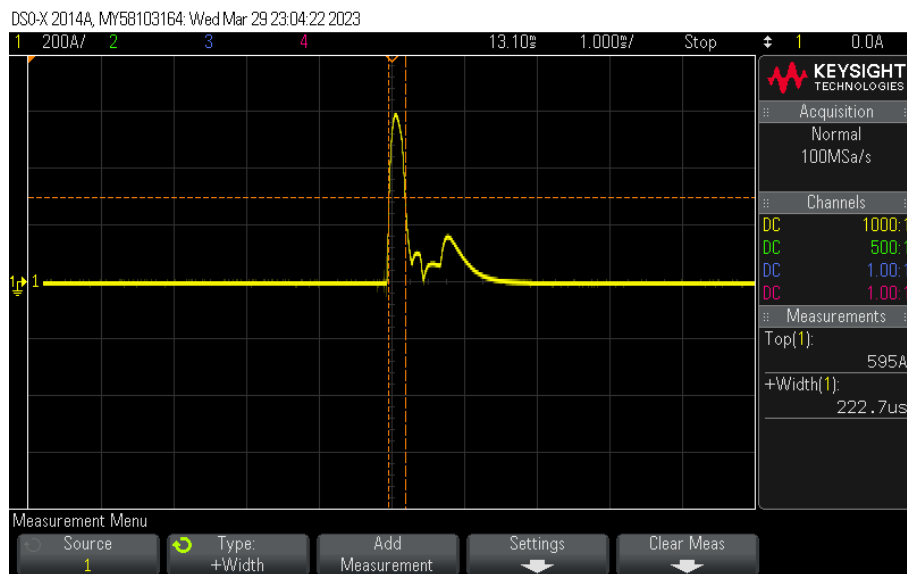


**Figur B.10:** Vernet løste ut og resultatet ble forkastet.

Kurven i figur B.10 ble også merkelig. På slutten av pulsen kommer det en hump, og det er usikkert om vernet ville løst ut eller ikke uten denne. Resultatet ble derfor forkastet.



**Figur B.11:** Vernet løste ut og resultatet ble forkastet.



**Figur B.12:** Vernet løste ut og resultatet ble forkastet.

Kurvene i figur B.11 og figur B.12 ble også forkastet, med samme argument som tidligere.





## Vedlegg C: Oversikt over målinger av startstrøm på NTNU

### C.1 Startstrømmer

Sted	Armaturer	Målinger	$I_{\max}$ [A]	Standardavvik [A]	Usikkerhet tang.amp [A]	Usikkerhet oscilloskop [A]	Tot. usikkerhet i strøm [A]
Verksted,A	9	4	141	5.66	19.53	12.60	37.79
Verksted,B	9	1	123	—	17.08	12.60	29.68
Verksted, C	8	1	112	—	15.63	12.60	28.23
Verksted, varelager	10	6	98	4.56	13.77	12.60	30.94
Høystrømbryterlab	10	4	155	1.93	21.41	12.60	35.94
Elektrovarmelab, rad 1	4	1	60	—	8.61	5.10	13.71
Elektrovarmelab, rad 2	4	1	57	—	8.16	5.10	13.26
Elektrovarmelab, rad 3	4	4	58	3.18	8.39	5.10	16.67
Kjeller, AS fordeling, F4	12	16	195	7.21	3.92	13.50	24.63
Kjeller, AS fordeling, F5	4	6	118	2.13	2.77	13.50	18.40
Kjeller, AS fordeling, F6	11	3	183	3.25	3.74	13.50	20.49
Kjeller, AQ fordeling, F4	14	18	224	7.26	4.37	16.00	27.62
Kjeller, AQ fordeling, F3	10	5	174	4.16	3.61	13.50	21.27
Samfundet, Q3	6	5	355	13.73	6.33	26.00	46.06
Samfundet, alle kurser	34	4	728	55.06	11.92	63.50	130.48
Samfundet, alle kurser med ssb	34	10	46	2.45	1.70	7.25	11.40

Tabell C.1: Målinger tatt på anlegg for startstrømmer og tilhørende usikkerheter.

## C.2 Pulsbredde

Sted	Pulsbredde [ms]	Usikkerhet oscilloskop [ns]	Standardavvik [ms]	Usikkerhet pulsbredde [ms]	V0 abs[V]	Nominell Strøm [A]	Usikkerhet In [A]
Verksted,A	0.37	4.73	0.02	0.02	319	2.9975	0.6299375
Verksted, B	0.42	4.86	-	0.00	315	3.02	0.6255
Verksted,C	0.43	4.89	-	0.00	315	2.67	0.61675
Verksted, varelager	0.48	5.02	0.03	0.03	320	3.32	0.633
Høystrømbryterlab	0.24	4.42	0.01	0.01	328	2.31	0.60775
Elektrovarmelab, rad 1	0.22	4.37	-	0.00	322	1.0025	0.5800625
Elektrovarmelab, rad 2	0.22	4.36	-	0.00	318	1.0325	0.5808125
Elektrovarmelab, rad 3	0.23	4.40	0.01	0.01	323	1.02	0.5755
Kjeller, AS fordeling, F4	0.29	4.54	0.01	0.01	324	2.175	0.6
Kjeller, AS fordeling, F5	0.19	4.29	0.01	0.01	323	0.88	0.57
Kjeller, AS fordeling, F6	0.32	4.62	0.01	0.01	332	2.2425	0.61
Kjeller, AQ fordeling, F4	0.40	4.80	0.01	0.01	319	3.113	0.63
Kjeller, AQ fordeling, F3	0.34	4.66	0.01	0.01	329	2.22	0.61
Samfundet, Q3	0.29	4.55	0.01	0.01	314	-	-
Samfundet, alle kurser	0.55	5.20	0.05	0.05	323	4.4052	1,37
Samfundet, alle kurser med ssb	2.45	9.94	0.55	0.55	331	4.4052	1,37

Tabell C.2: Målinger tatt på anlegg for pulsbredde og tilhørende usikkerheter samt In.

## C.3 Strømforhold i anlegg

Sted	Ipeak/Inominell	Strøm per armatur	Utnyttelse av kapasitet [%]
Verksted,A	47	16	18,7
Verksted, B	41	14	18,9
Verksted,C	42	14	16,7
Verksted, varelager	30	10	20,8
Høystrømbryterlab	67	15	14,4
Elektrovarmelab, rad 1	60	15	6,3
Elektrovarmelab, rad 2	55	14	6,5
Elektrovarmelab, rad 3	57	15	6,4
Kjeller, AS fordeling, F4	89	16	13,6
Kjeller, AS fordeling, F5	134	30	5,5
Kjeller, AS fordeling, F6	81	17	14,0
Kjeller, AQ fordeling, F4	72	16	19,5
Kjeller, AQ fordeling, F3	78	17	13,9
Samfundet, Q3		59	
Samfundet, alle kurser	165	21	27,5
Samfundet, alle kurser med ssb	11	1	27,5

Tabell C.3: Forholdet mellom startstrøm og nominell strøm.

## Vedlegg D: Oversikt over resultat fra måling av startstrøm fra PC- strømforsyninger

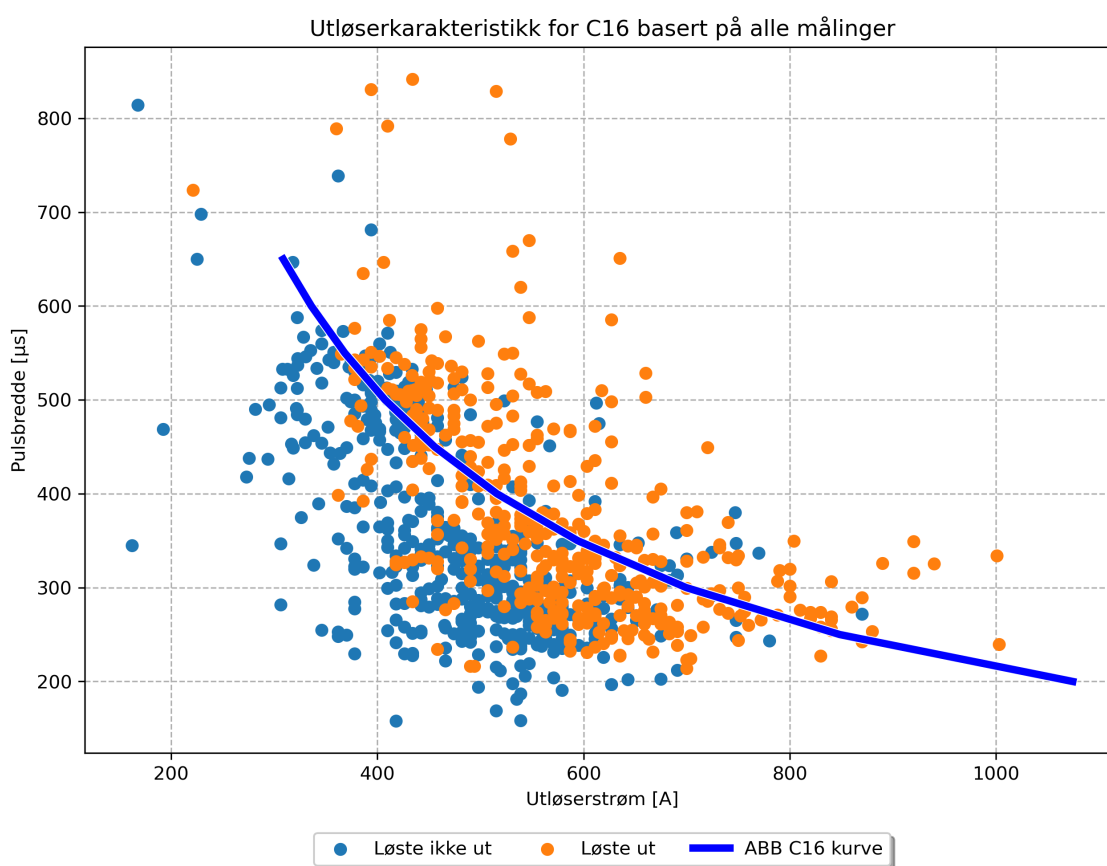
Måling nr.	Direkte kobling		Via starstrømbegrenser		Via nullgjennomgangsrelé	
	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
1	183,23	300	33,67	954	20,4	2710
2	181,77	282	32,57	612	19,12	2734
3	190,53	266	32,37	616	20,01	2667
4	183,96	273	33,35	1092	19,8	2701
5	173,01	297	34,13	929	20,1	2710
6	183,96	275	33,73	811	20,1	2748
7	173,74	294	32,76	856	19,65	2861
8	190,53	279	34,80	821	19,95	2844
9	181,77	274	35,88	837	20,25	2680
10	183,96	274	32,76	1098	19,95	2768
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>182,65</b>	<b>281,4</b>	<b>33,60</b>	<b>862,60</b>	<b>19,93</b>	<b>2742,3</b>
Standardavvik	5,81	11,61	1,10	166,50	0,36	65,44
Usikkerhet tangamp.	3,74	—	1,50	—	1,30	—
Usikkerhet oscilloskop	8,63	0,005	3,30	0,006	2,73	0,012
Kombinert usikkerhet	$\pm 19,17$	$\pm 11,62$	$\pm 5,91$	$\pm 166,51$	$\pm 4,38$	$\pm 65,45$
<b>Total</b>	<b><math>182,65 \pm 19,17</math></b>	<b><math>281,40 \pm 11,61</math></b>	<b><math>33,60 \pm 5,91</math></b>	<b><math>862,6 \pm 166,51</math></b>	<b><math>19,93 \pm 4,38</math></b>	<b><math>2742,30 \pm 65,45</math></b>

Tabell D.1: Resultater fra målinger med PC-strømforsyninger.



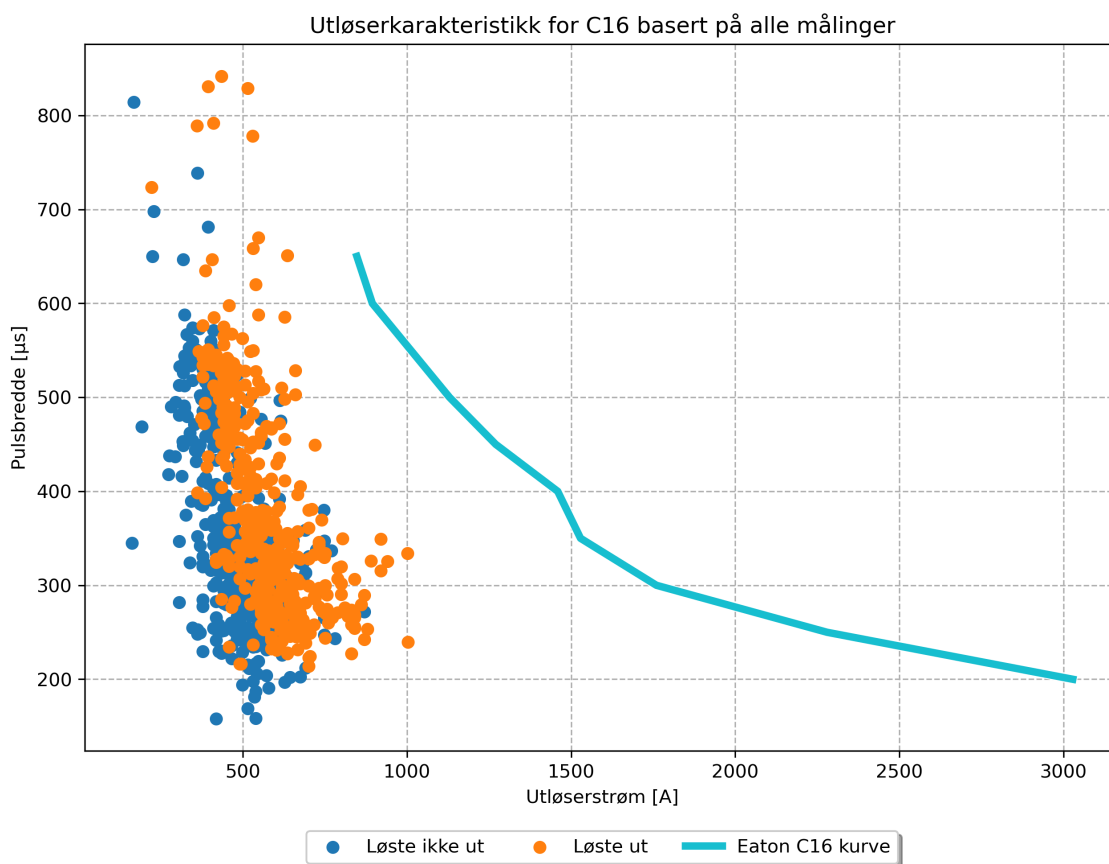
## Vedlegg E: Impulsutløserkurver til ABB og Eaton sammenliknet med alle målinger gjort på C16-vern

Figur E.1 og E.2 viser alle målingene tatt på C16 vern sammenliknet med impulsutløserkurvene til ABB og Eaton.



Figur E.1: Alle målinger av C16 vern med ABB-kurven.

Kurven til ABB gir en høyere holdestrøm enn målingene på C16 vernene tilsier.



**Figur E.2:** Alle målinger av C16 vern med Eaton-kurven.

Kurven til Eaton gir veldig høye verdier sammenlignet med målingene.

# Vedlegg F: Beregning av usikkerhet for målinger av utløserkarakteristikk

Målingene er gjort på et Keysight InfiniiVision DSOX2014A oscilloskop som har en skjerm som er 8div høy og 10div bred. FLUKE i1000s tangamperemeteret er brukt i instilling som gir 1A til 1000A måleområde og 1mV/A attenuation. Målingene er gjort med enten 200A/div eller 300A/div på y-aksen, og 1ms/div på x-aksen til skopet.

## F.1 Vertikal usikkerhet

Det er gjort målinger med både 200A/div og 300A/div som gir ulik usikkerhet, derfor beregnes begge.

### 200A/div

Målinger gjort med følgende innstillinger:

input sensitivity = 200A/div

offset = 0

$$\begin{aligned} \text{DC vertical gain accuracy}_{200} &= \pm 3\% \text{ full scale} \\ &= \pm 3\% * 200A/div * 8div \\ &= \underline{\pm 48A} \end{aligned} \quad (\text{F.1})$$

$$\begin{aligned} \text{DC vertical offset accuracy}_{200} &= \pm 0.1div \pm 2mV \pm 1\% \text{ offset setting} \\ &= \pm 0.1div * 200A/div \pm \frac{2mV}{1mV/A} \pm 1\% * 0A \\ &= \underline{\pm 22A} \end{aligned} \quad (\text{F.2})$$

$$\begin{aligned}
 \text{DC vertical accuracy}_{200} &= \pm(\text{DC vertical gain accuracy} + \text{DC vertical offset accuracy} + 0.25\% \text{ full scale}) \\
 &= 48A + 22A + 0.25\% * 200A/\text{div} * 8\text{div}
 \end{aligned}
 \tag{F.3}$$

$$\text{DC vertical accuracy}_{200} = \underline{\underline{\pm 74A}}
 \tag{F.4}$$

Målingene med 200A/div har altså en usikkerhet på  $\pm 74A$

### **300A/div**

Målinger gjort med følgende innstillinger:

input sensitivity = 300A/div

offset = 0

$$\begin{aligned}
 \text{DC vertical gain accuracy}_{300} &= \pm 3\% \text{ full scale} \\
 &= \pm 3\% * 300A/\text{div} * 8\text{div} \\
 &= \underline{\underline{\pm 72A}}
 \end{aligned}
 \tag{F.5}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DC vertical offset accuracy}_{300} &= \pm 0.1\text{div} \pm 2\text{mV} \pm 1\% \text{ offset setting} \\
 &= \pm 0.1\text{div} * 300A/\text{div} \pm \frac{2\text{mV}}{1\text{mV/A}} \pm 1\% * 0A \\
 &= \underline{\underline{\pm 32A}}
 \end{aligned}
 \tag{F.6}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DC vertical accuracy}_{300} &= \pm(\text{DC vertical gain accuracy} + \text{DC vertical offset accuracy} + 0.25\% \text{ full scale}) \\
 &= 72A + 32A + 0.25\% * 300A/\text{div} * 8\text{div}
 \end{aligned}
 \tag{F.7}$$

$$\text{DC vertical accuracy}_{300} = \underline{\underline{\pm 110A}}
 \tag{F.8}$$

Målingene med 300A/div har altså en usikkerhet på  $\pm 110A$



## F.2 Horizontal usikkerhet

$$\text{Timebase accuracy} = 25\text{ppm} \pm 5\text{ppm per year (aging)} \quad (\text{F.9})$$

Skopet er registrert i NTNUs instrumentarkiv med nummeret G04-0383. Ifølge instrumentarkivet ble skopet motatt i mai 2018 [41], som vil si at skopet er 5 år gammelt. Timebase accuracy beregnes derfor som:

$$\text{Timebase accuracy} = 25\text{ppm} \pm 5\text{ppm} * 5 \quad (\text{F.10})$$

$$\text{Timebase accuracy} = \underline{50\text{ppm}} \quad (\text{F.11})$$

Den horisontale usikkerheten til skopet er gitt av formel (F.12) og avhenger av måleverdien. Målingene av utløserkarakteristikk ligger grovt regnet mellom  $150\mu\text{s}$  og  $800\mu\text{s}$ . Usikkerheten beregnes derfor til begge pulsbreddene for sammenlikning.

$$\Delta\text{Time accuracy} = \pm(\text{time base accuracy} * \text{reading} + 0.0016 * \text{screen width} + 100\text{ps}) \quad (\text{F.12})$$

### 150 $\mu\text{s}$

Dette er den korteste pulsbredden og vil ha den minste usikkerheten.

$$\begin{aligned} \Delta\text{Timebase accuracy}_{150\mu\text{s}} &= \pm\left(\frac{50}{1000000} * 150\mu\text{s} + 0.0016 * 1\text{ms/div} * 10\text{div} + 100\text{ps}\right) \\ &= \pm(0.0075\mu\text{s} + 16\mu\text{s} + 0.0001\mu\text{s}) \\ &= \pm 16.0076\mu\text{s} \end{aligned} \quad (\text{F.13})$$

$$\Delta\text{Timebase accuracy}_{150\mu\text{s}} = \underline{16.0\mu\text{s}} \quad (\text{F.14})$$

### 800 $\mu\text{s}$

Dette er den lengste pulsbredden og vil ha den største usikkerheten.

$$\begin{aligned}
\Delta \text{Timebase accuracy}_{800\mu s} &= \pm \left( \frac{50}{1000000} * 800\mu s + 0.0016 * 1\text{ms}/\text{div} * 10\text{div} + 100\text{ps} \right) \\
&= \pm 0.04\mu s \pm 16\mu s + 0.0001\mu s \\
&= \pm 16.0401\mu s
\end{aligned}
\tag{F.15}$$

$$\Delta \text{Timebase accuracy}_{800\mu s} = \underline{16.0\mu s}
\tag{F.16}$$

I begge tilfeller kommer det fram at Timebase accuracy\*reading og 100ps leddene er neglisjerbare sammenliknet med 16μs leddet. Den horisontale usikkerheten er derfor 16.0μs for alle målingene av utløserkarakteristikk.

$$\Delta \text{Timebase accuracy}_{150\mu s} = \text{Timebase accuracy}_{800\mu s} = \underline{\underline{16.0\mu s}}
\tag{F.17}$$

## Vedlegg G: Tabell fra test av universalkurven

Navn	Antall fra datablad (C16)	Startstrøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Antall med Universalkurven	80% margin	
Panel 600	56	15	460	26,0	21,0	Dårligere
LN INDV D/I 1200 42 W	10	35	300	13,7	11,0	Bedre
LN INDV D/I 1200 56 W	8	35	400	12,1	9,7	Bedre
PANEL INDIVILED 625 ZIGBEE	16	30	200	20,0	16,0	Nøytral
PANEL 600 IP54 36 W 3000 K OP WT DALI	38	23	200	26,1	20,9	Dårligere
PANEL 600 IP54 36 W 3000 K OP WT	56	15	460	26,7	21,3	Dårligere
PL CMFT 600 P 28W 830 DALIVR	65	4,4	440	90,9	72,7	Bedre
PL CMFT 600 P 36W 930 940 U19 CPS CRI90"	25	12	200	50,0	40,0	Bedre
PL CMFT 600 P 36W 930 940 U19 DALIVR CS CRI90"	33	12	200	50,0	40,0	Bedre
PL PFM 600 25 W 3000 K	24	30	200	20,0	16,0	Dårligere
PL PFM 600 30 W 3000 K"	21	30	200	20,0	16,0	Dårligere
PL PFM 600 36 W 3000 K	19	30	200	20,0	16,0	Dårligere
PL PFM 600 36 W 4000 K ZBVR	16	25	200	24,0	19,2	Bedre
PANEL PFM 600 UGR < 19 TPA 36 W 4000 K WT	30	23	200	26,1	20,9	Dårligere
PANEL VAL 600 36 W 3000 K WT DALI"	38	10,4	200	57,7	46,2	Bedre
PANEL VALUE 1200x600 TPB 65 W 4000 K WT"	22	13,2	300	36,4	29,1	Bedre
SF BLKH 300 P 15W 830 BK IP65	81	3,53	456	113,3	90,7	Bedre
SF CIRC 250 V 13W 830 IP44	64	6,7	228	84,0	67,2	Bedre
SF CIRC 350 V 18W 830 IP44	56	7	212	83,1	66,5	Bedre
SF CIRC 400 V 24W 830 IP44	64	7,3	360	59,6	47,7	Dårligere
SF CIRC 400 SEN V 24W 830 IP44	56	7,3	256	71,1	56,8	Nøytral
SF CIRC 500 V 42W 830 IP44 PS"	17	23,2	280	21,5	17,2	Nøytral
SF CIRC 500 SEN V 42W 830 IP44 PS"	11	23,6	480	16,2	12,9	Bedre
PANEL D/I 1200 36 W 4000 K UGR19 ZBVR	16	30	200	20,0	16,0	Dårligere
LN INDV D/I 1200 42 W 3000 K DALI	10	35	200	17,1	13,7	Bedre
LN INDV D/I 1200 42 W 3000 K DALI	8	35	400	12,1	9,7	Bedre
LN INDV D/I 1500 56 W 3000 K	24	20	200	30,0	24,0	Nøytral
LN INDV D/I 1500 56 W 3000 K EM"	37	20	200	30,0	24,0	Dårligere
LN INDV D 1500 48 W 940"	45	10	200	60,0	48,0	Bedre
LN INDV D DALI 1500 25 W 3000 K	18	20	300	24,0	19,2	Bedre

Navn	Antall fra datablad (C16)	Startstrøm [A]	Pulsbredde [µs]	Antall med Universalkurven	80% margin	
LN INDV D 1200 34 W 3000 K DALI	38	21	230	26,4	21,1	Dårligere
LN INDV D 1500 48 W 3000 K DALI	20	21	230	26,4	21,1	Bedre
LN INDV D 1200 34 W 4000 K ZBVR	16	30	200	20,0	16,0	Nøytral
LN INDV D 1500 50 W 3000 K EM	38	10	200	60,0	48,0	Bedre
LN SF IP44 DALI 1200 P 32W 830 WT	53	18	200	33,3	26,7	Dårligere
LN SF IP44 DALI 1500 P 45W 830 WT	35	21	230	26,4	21,1	Dårligere
LN SF IP44 1500 43 W 4000 K WT	35	16	236	34,1	27,3	Dårligere
LN SF IP44 EM 1200 36 W 3000 K WT	25	15,6	265	32,8	26,2	Bedre
LN SF IP44 EM 1500 43 W 3000 K WT	30	16	236	34,1	27,3	Dårligere
LN COMP SWITCH 1500 17 W 4000 K	30	10	300	48,0	38,4	Bedre
DP 1200 32W 830 IP65 GY	39	12,2	210	48,0	38,4	Dårligere
DP 1500 46W 830 IP65 GY	37	12,7	220	44,9	35,9	Dårligere
DP 1500 58W 840 IP65 GY	38	12,6	222	45,0	36,0	Dårligere
DP 1500 81W 840 IP65 GY	16	13,5	590	24,7	19,7	Bedre
DP S 1200 32W 840 IP65 GY	39	12,5	210	46,8	37,4	Dårligere
DP SPECIAL 1200 22 W 4000 K WT IP67	36	13	230	42,7	34,2	Dårligere
DP SPECIAL 1500 30 W 4000 K WT IP67	36	13	208	45,2	36,2	Nøytral
DP SPECIAL 1200 42 W 4000 K WT IP67	34	13	224	43,4	34,7	Nøytral
DP SPECIAL 1500 50 W 4000 K WT IP67	34	13	212	44,8	35,8	Bedre
DP 1200 39 W 6500K IP65 GY	64	7	220	81,4	65,1	Bedre
TRUSYS FLEX P 70W 840 VW CL WT	12	38,8	230	14,3	11,4	Dårligere
TruSys® PFM VW 35 W/4000 K	19	25	220	22,8	18,2	Dårligere
TruSys® PFM VW 50 W/4000 K	13	30	400	14,2	11,3	Dårligere
TruSys® PFM W 50 W/4000 K	13	30	265	17,1	13,6	Nøytral
TruSys® PFM W 70 W/4000 K	9	32	400	13,3	10,6	Bedre
TruSys® W 53 W 3000 K SI	27	30	250	17,5	14,0	Dårligere
LB FLEX 1200 DALI P 42W 840 W	12	40	400	10,6	8,5	Dårligere
LB FLEX 1500 P 105W 840 N	27	35,35	290	13,8	11,1	Dårligere
HB P 87W 840 70DEG IP65	9	42	378	10,4	8,3	Dårligere
HB P 147W 840 70DEG IP65	6	49,4	380	8,8	7,0	Bedre
HB P 190W 840 70DEG IP65	5	50,4	480	7,6	6,1	Bedre
HB P 210W 840 70DEG IP65	4	54,6	500	6,8	5,4	Bedre
HB SEN P 87W 840 110DEG IP65	8	44	380	9,9	7,9	Dårligere
HB SEN P 147W 840 110DEG IP65	6	48,8	368	9,0	7,2	Bedre
HB 155 W 4000 K 70DEG IP65	8	49	368	9,0	7,2	Dårligere
HB 210 W 6500 K 70DEG IP65	5	55	550	6,3	5,0	Nøytral
HB DALI 93 W 4000 K 110DEG IP65	8	41,2	300	11,7	9,3	Bedre
HB DALI 155 W 4000 K 110DEG IP65	5	60,4	312	7,8	6,3	Bedre
HB DALI 190 W 4000 K 110DEG IP65	4	62	374	7,1	5,7	Bedre
HB DALI 190 W 4000 K 110DEG IP65	4	62,8	374	7,0	5,6	Bedre
FL PFM ASYM 55x110 50 W 3000 K BK	5	50	200	12,0	9,6	Bedre
FL PFM ASYM 55x110 100 W 3000 K BK	6	70	200	8,6	6,9	Nøytral
FL PFM ASYM 55x110 150 W 3000 K BK	4	110	200	5,5	4,4	Nøytral
FL PFM DA ASYM 55X110 150W 3000K BK	8	125	200	4,8	3,8	Dårligere
FL PFM DA ASYM 55X110 200W 3000K BK	4	110	350	4,1	3,3	Dårligere
FL PFM DA ASYM 55X110 290W 3000K BK	3	110	500	3,4	2,7	Dårligere
FL AREA ASYM 48x92 72 W 3000 K BK	25	13,9	202	43,2	34,5	Bedre
ECO HP FLOOD 300W 840 VN 36600LM BK	3	80	500	4,6	3,7	Nøytral
ECO HP FLOOD 500W 840 VN 61000LM BK	1	150	500	2,5	2,0	Nøytral
SL FLEX MD RV25ST P 58W 727 WAL	21	54	200	11,1	8,9	Dårligere
SL FLEX MD RV25ST P 58W 727 WAL	19	65	220	8,8	7,0	Dårligere
SL FLEX LA RV25ST P 110W 727 WAL	17	65	220	8,8	7,0	Dårligere

Navn	Antall fra datablad (C16)	Startstrøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Antall med Universalkurven	80% margin	
SP532P LED49S/940 PSD PI5 SM2 L1130 ALU	39	26	230	21,3	17,1	Dårligere
SP533P LED41S/940 PSD PI5 SM2 L1130 ALU	39	19,4	200	30,9	24,7	Dårligere
SM350C 27S/840 PSU PCS L1200 ALU	32	12,5	266	40,8	32,7	Nøytral
SM350C 27S/830 PSD PCS L1200 ALU	29	23,1	221	24,6	19,7	Dårligere
SM350C 40S/840 PSU PCS L1200 WH	32	22,4	326	20,7	16,6	Dårligere
SM350C 27S/840 WIA PCS L1200 BK	32	19	230	29,2	23,4	Dårligere
SP342P 45S/940 PSD PCS SMT L150 WH	20,4	25,1	214	23,1	18,5	Dårligere
PT520T LED27S/827 PSU MB CURVE GR	46	18	250	29,2	23,3	Dårligere
RC461B LED34S/940 PSD W30L120 VPC PIP	40	19,4	230	28,6	22,9	Dårligere
RC461B LED80S/TW9 DIA W60L60 VPC PIP	21	29,6	356	15,1	12,1	Dårligere
RC330V 36S/940 PSD W60L60 OC	32	20,4	195	29,4	23,5	Dårligere
RC330V 42S/940 SEIA W60L60 OC IA4	43	9	250	58,3	46,7	Bedre
RC360B LED34S/940 PSU W60L60 VPC PIP	44	15,1	230	36,8	29,4	Dårligere
RC340B LED36S/940 PSU W60L60 VPC MLO PIP	32	22	282	22,5	18,0	Dårligere
RC340B LED36S/940 SRD W60L60 VPC PCS U4	32	21	280	23,7	19,0	Dårligere
RC400B LED42S/840 SRD W30L120 VPC IA4PIP	32	24,9	215	23,2	18,6	Dårligere
RC132V G5 36S/840 PSU W60L60 OC ELB3	28	16	200	37,5	30,0	Bedre
RC132V G5 36S/840 PSD W60L60 OC	19	18,3	276	27,4	21,9	Bedre
RC132V G5 36S/940 PSU W60L60 OC	34	13	200	46,2	36,9	Bedre
RC132V G5 29_34_40S/830 PSU W60L60 OC	17	19,7	242	27,3	21,8	Bedre
RC136B 31S_37S_43S/840 PSD W60L60 OCELB3	40	15,6	230	35,6	28,5	Dårligere
RC065B LED41S/840 PSU W60L60 NOC	28	23	210	25,4	20,3	Dårligere
SP533P LED41S/940 PSD PI5 SM2 L1130 ALU	40	19,4	200	30,9	24,7	Dårligere
SM530C LED50S/940 PSD PI5 L1410 ALU	28	25	230	22,2	17,8	Dårligere
SM530C LED50S/940 PSD PI5 L1410 ALU	28	21	280	23,7	19,0	Dårligere
BY120P G5 LED105S/840 PSU NB	8	40	600	8,3	6,6	Dårligere
BY121P G5 LED200S/840 PSD NB	10	53	300	9,1	7,2	Dårligere



## Vedlegg H: Oversikt over målinger på startstrømmer ved konvensjonelle lysrør og LED-lysrør

Måling nr.	Konvensjonelt lysrør med elektronisk tenner		Konvensjonelt lysrør med vanlig tenner		LED-lysrør	
	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
1	60,45	32	67,67	28	56,34	31
2	58,41	32	61,43	31	65,0	33
3	62,21	31	63,77	28	65,91	32
4	62,40	31	63,18	30	59,28	31
5	61,60	32	62,01	30	63,8	33
6	60,23	32	57,53	29	69,81	32
7	62,99	31	62,21	30	61,8	31
8	60,65	33	64,16	29	65,13	32
9	63,38	33	65,33	30	69,03	33
10	60,65	33	57,92	31	64,4	31
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>61,29</b>	<b>32</b>	<b>62,52</b>	<b>29,6</b>	<b>64,05</b>	<b>31,9</b>
Standardavvik	1,51	0,82	3,10	1,07	4,10	0,88
Usikekrhet tangamp	1,92	—	1,94	—	1,96	—
Usikkerhet oscilloskop	6,001	0,005	6,001	0,005	4,751	0,005
Kombinert usikkerhet	$\pm 9,43$	$\pm 0,82$	$\pm 11,04$	$\pm 1,08$	$\pm 10,81$	$\pm 0,88$
<b>Total</b>	<b>61,29 <math>\pm</math> 9,43</b>	<b>32 <math>\pm</math> 0,82</b>	<b>62,52 <math>\pm</math> 11,04</b>	<b>29,6 <math>\pm</math> 1,08</b>	<b>64,05 <math>\pm</math> 10,81</b>	<b>31,9 <math>\pm</math> 0,88</b>

Tabell H.1: Resultater fra målinger på konvensjonelt- og LED-lysrør.





## Vedlegg I: Oversikt over målinger på innvirkning fra kabelimpedans på LED-lysrør

Måling nr.	Koblet direkte til tilførsel		Koblet via 40m kabeltrommel	
	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
1	54,15	32	45,71	39
2	50,7	31	44,15	39
3	54,60	31	46,18	39
4	54,75	31	42,28	40
5	52,12	32	42,12	39
6	57,54	31	42,23	40
7	51,4	32	45,24	38
8	58,25	31	46,18	39
9	55,04	31	42,28	39
10	54,03	32	46,58	39
11	56,36	31	44,41	39
12	57,3	32	46,18	38
13	57,75	31	43,06	39
14	56,85	32	42,12	39
15	57,2	31	45,09	39
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>55,20</b>	<b>31,40</b>	<b>44,27</b>	<b>39,00</b>
Standardavvik	2,41	0,51	1,73	0,53
Usikkerhet tangamp.	1,83	—	1,66	—
Usikkerhet oscilloskop	4,75	0,004	5,00	0,004
Kombinert	$\pm 8,98$	$\pm 0,51$	$\pm 8,40$	$\pm 0,54$
<b>Total</b>	<b><math>55,20 \pm 8,98</math></b>	<b><math>31,40 \pm 0,51</math></b>	<b><math>44,27 \pm 8,40</math></b>	<b><math>39,00 \pm 0,54</math></b>

Tabell I.1: Resultater fra målinger på LED-lysrør med 40m kabeltrommel.



## Vedlegg J: Oversikt over målinger på LED-lysrør ved IT- og TN-nett

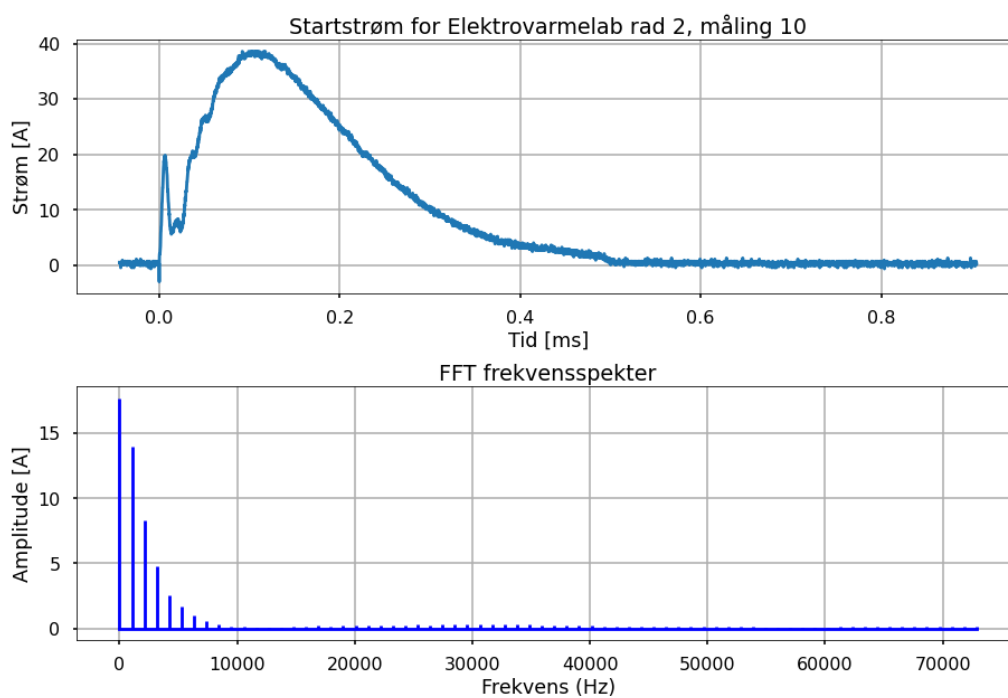
Måling nr.	TN-nett		IT-nett	
	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]	Størrelse på strøm [A]	Pulsbredde [ $\mu$ s]
1	64,66	32	70,52	33
2	64,90	28	71,25	31
3	67,34	27	69,78	33
4	75,00	17	70,03	31
5	63,93	29	67,10	33
6	63,68	29	61,98	33
7	66,12	29	68,07	32
8	82,47	29	70,27	32
9	63,44	31	60,42	31
10	70,52	16	69,54	32
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>68,21</b>	<b>26,70</b>	<b>67,90</b>	<b>32,10</b>
Standardavvik	6,19	5,62	3,74	0,88
Usikkerhet tangamp.	2,02	---	2,02	---
Usikkerhet oscilloskop	6,25	0,004	6,35	0,004
Kombinert usikkerhet	$\pm 14,47$	$\pm 5,62$	$\pm 12,01$	$\pm 0,88$
<b>Total</b>	<b><math>68,21 \pm 14,47</math></b>	<b><math>26,70 \pm 5,62</math></b>	<b><math>67,90 \pm 12,01</math></b>	<b><math>32,10 \pm 0,88</math></b>

Tabell J.1: Resultater fra målinger på forskjell mellom IT- og TN-nett.

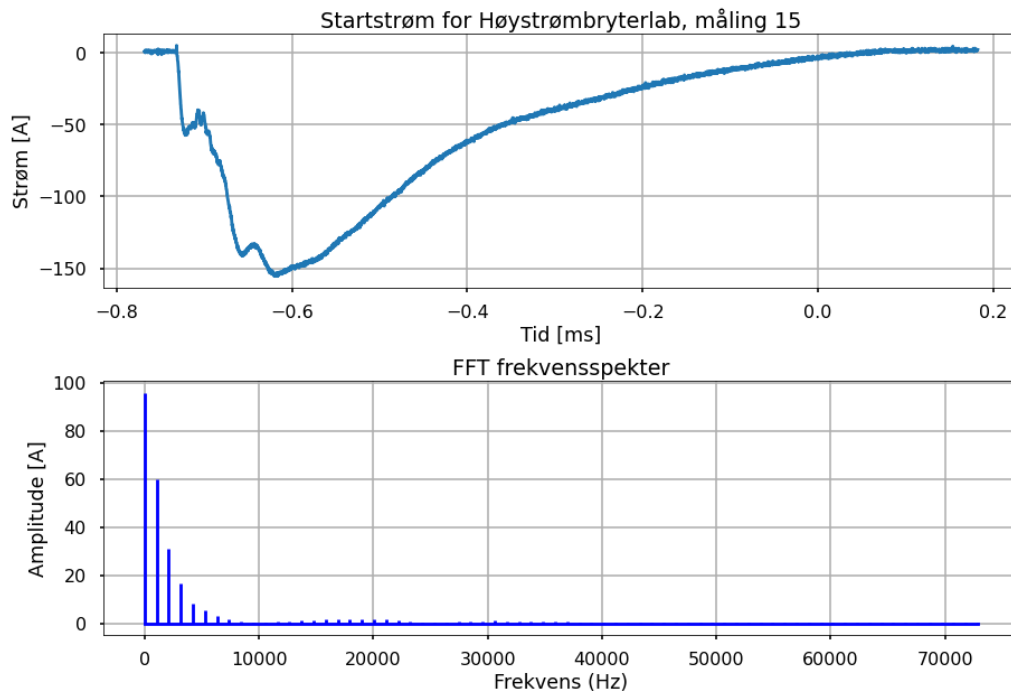


# Vedlegg K: Resultater av FFT-analyse

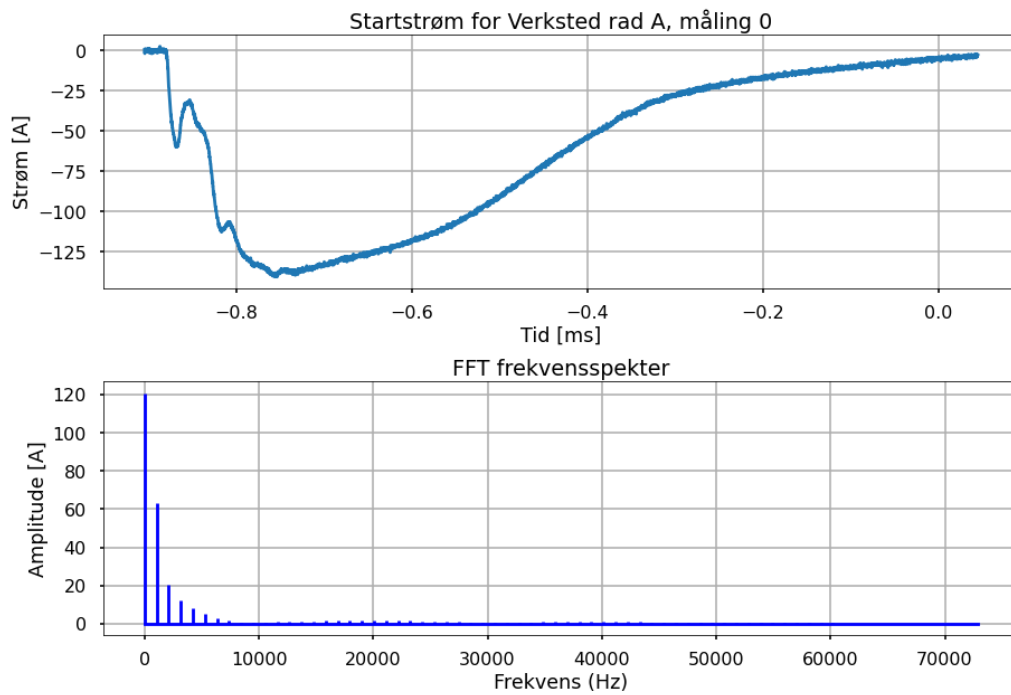
## K.1 FFT for målinger på anlegg



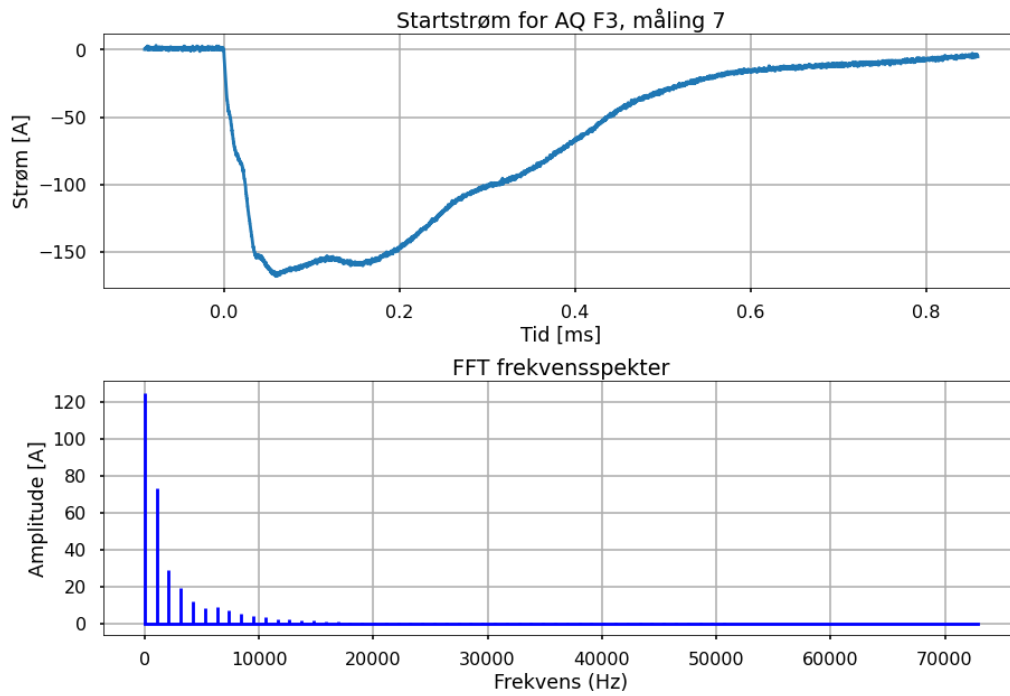
**Figur K.1:** Resultater av FFT for 10. måling av startstrøm i Elektrovarmalaben rad 2. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret.



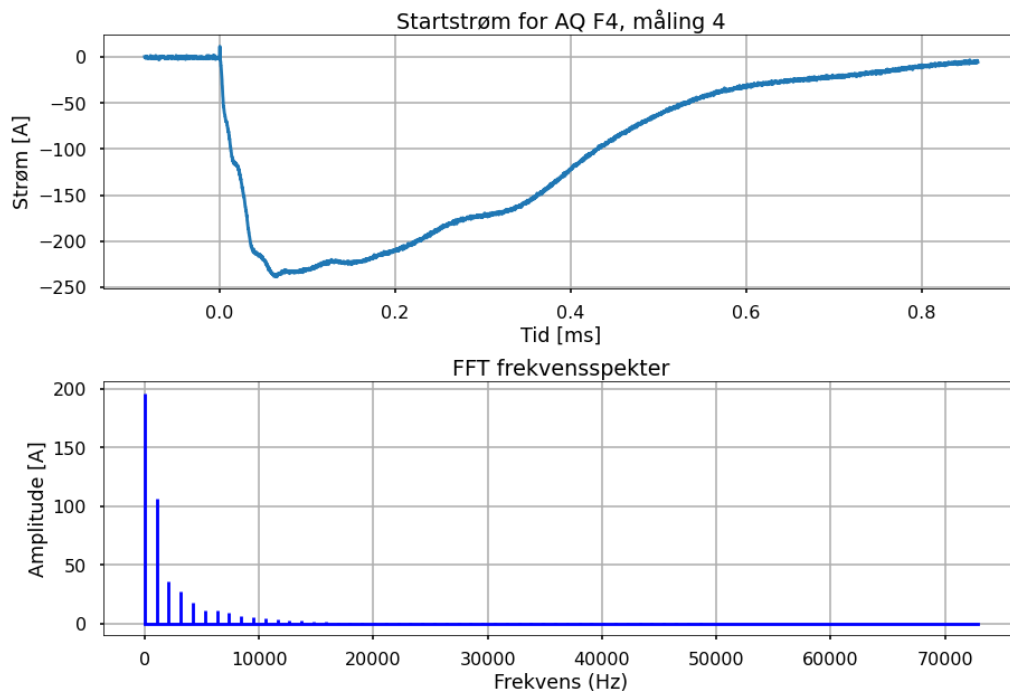
**Figur K.2:** Resultater av FFT for 15. måling av startstrøm i høystrømbryterlaben. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret.



**Figur K.3:** Resultater av FFT for måling 0 av startstrøm i verkstedet rad A. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret.

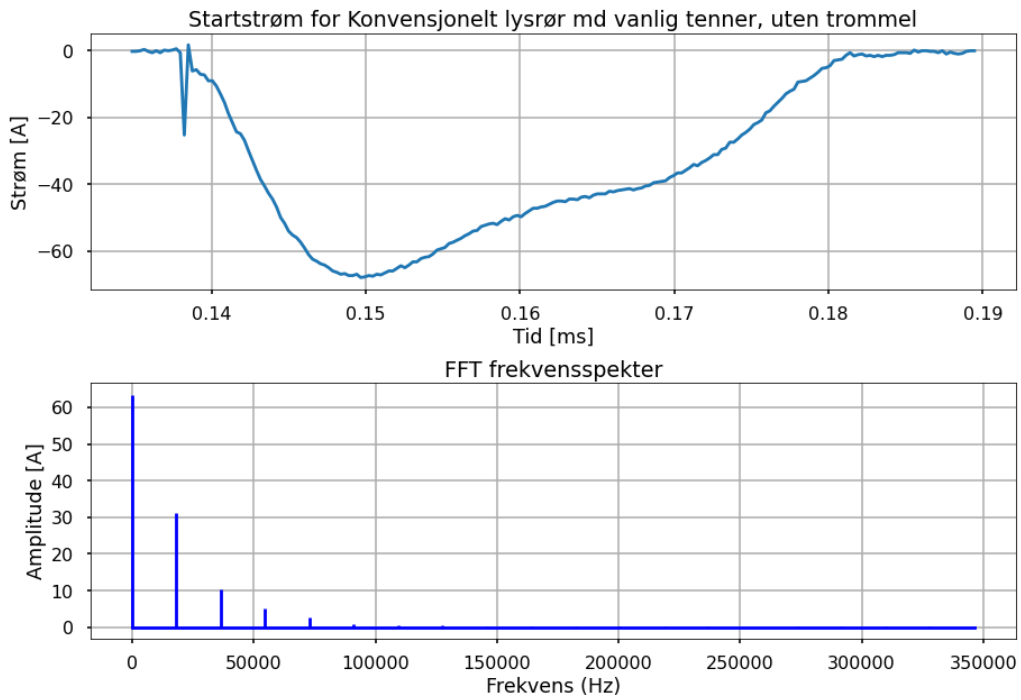


**Figur K.4:** Resultater av FFT for 7. måling av startstrøm i AQ fordeling F3. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret.

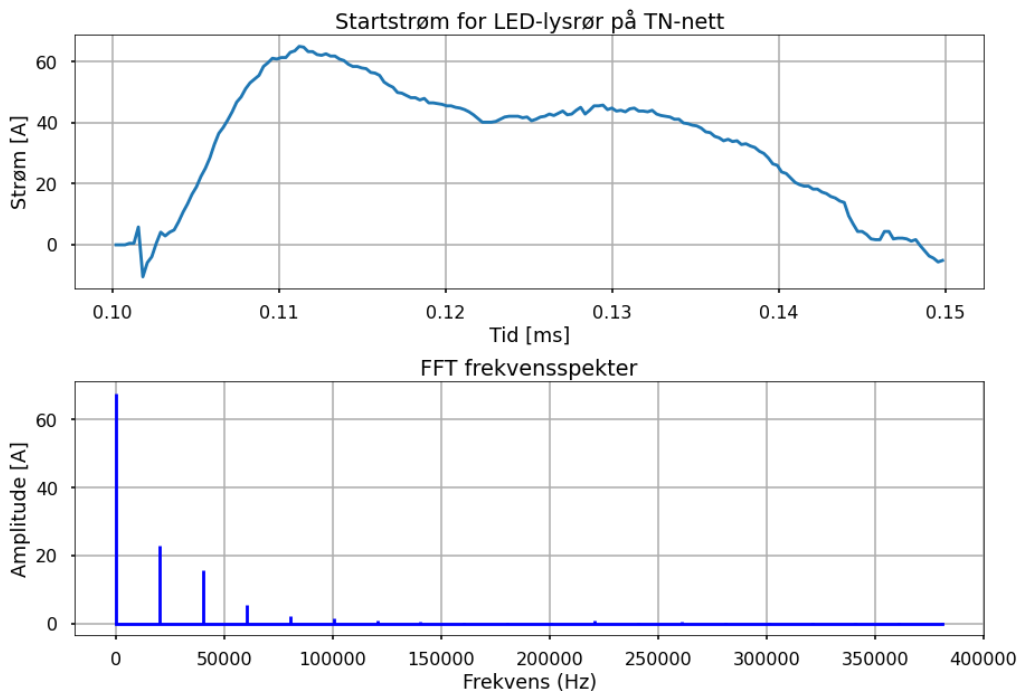


**Figur K.5:** Resultater av FFT for 4. måling av startstrøm i AQ fordeling F4. Øverste graf viser startstrømmen som funksjon av tid, nederste graf viser frekvensspekteret.

## K.2 FFT av målinger på lysrør



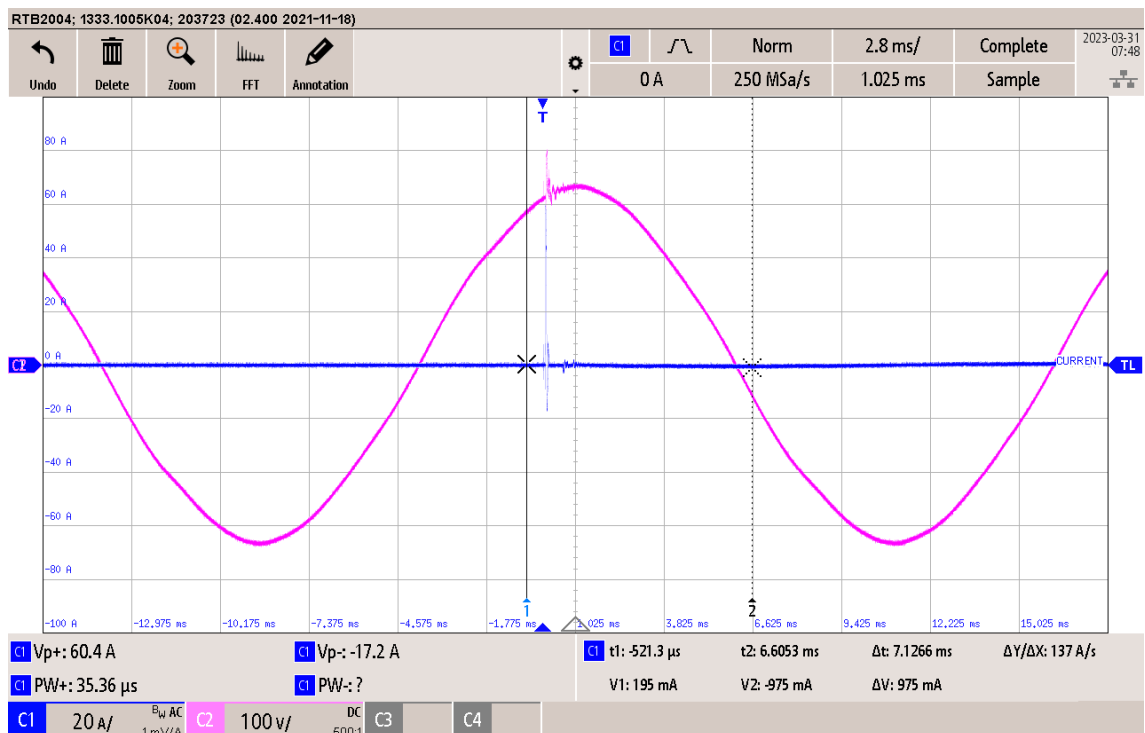
Figur K.6: Resultater av FFT for måling av startstrøm i konvensjonelt lysrør.



Figur K.7: Resultater av FFT for måling av startstrøm i LED-lysrør.



## Vedlegg L: Samplingsfrekvens for lysrør



Figur L.1: Skjermbilde fra oscilloskop av måling på startstrøm til LED-lysrør.



## **Vedlegg M: Populærvitenskapelig artikkel**

---

# STARTSTRØMMER I LED-BELYSNING

Alternativer i dimensjoneringen

## INNLEDNING

LED-belysning har for lengst overtatt markedet som den foretrukne lyskilden. Med sitt lave energiforbruk og lange levetid, gjør dette godt for både miljø og lommebok. Det følger også med noen utfordringer. Elektronikken i LED-belysningen gjør at strømmen som trekkes akkurat i det lyset skrur på kan bli over 100 ganger så stor som strømmen lyset trekker til vanlig. Denne startstrømmen er svært kortvarig, men kan bli så stor at sikringen løser ut. Dette kan føre til at belysningsanlegg må deles inn i flere kurser enn det normalt sett ville blitt. En gruppe ingeniørstudenter ved NTNU har på oppdrag fra Norconsult forsket på denne problematikken, og blant annet sett på løsninger for å senke startstrømmen slik at man unngår å dele inn anlegget i unødvendig mange kurser.

## OVERDIMENSJONERING AV ANLEGG

Produsentene av LED-belysning pleier i databladet å oppgi et maksimalt antall lyskilder man kan ha per kurs, avhengig av hvilken sikring man velger. Dette tallet er basert på målinger eller beregninger, og begrenses av startstrømmen til lyskilden. Ved å holde seg under dette antallet, skal man være sikker på at sikringen ikke løser ut som følge av startstrømmen. Noen lysprodusenter oppgir også størrelsen på startstrømmen, samt startstrømmens varighet, gjerne kalt pulsbredde.

Prosjekterende ingeniører eller installatører pleier som regel å følge anbefalingene om maksimalt antall per kurs, for å være trygge på at de leverer et driftssikkert anlegg. Ulempen med å dimensjonere etter startstrøm istedenfor nominell strøm, som man vanligvis gjør i elektroinstallasjoner, er at man fort kan ende opp med å benytte en svært liten andel av tilgjengelig kurskapasitet.

Studentene fikk tilgang til å utføre målinger på fem ulike belysningsanlegg ved NTNU. De fem anleggene var inndelt i totalt ni kurser, og det ble gjort målinger av både startstrøm og stasjonær strøm under vanlig drift på alle kursene. Hensikten med målingene var å finne ut i hvor stor grad anleggene er overdimensjonerte, ved å sammenligne den stasjonære strømmen med sikringens merkestrøm.

Tallene var klare. Alle kursene var sikret med 16A-sikringer, og gjennomsnittlig stasjonær strøm av alle kursene var 3,1A. Dette betyr at det i snitt bare utnyttet 19,4% av total kurskapasitet. På et av belysningsanleggene var det totalt 5,3A stasjonær strøm, fordelt på tre 16A-kurser. Dersom alle disse tre kursene hadde blitt slått sammen til én, hadde det fremdeles bare vært utnyttet 33,1% av tilgjengelig kapasitet. Målingene viser altså at belysningsanleggene er overdimensjonerte, sett fra den stasjonære strømmen.

## STARTSTRØMBEGRENSER

For å teste hvordan en startstrømbegrenser fungerer i praksis, ble ESB101.LED fra den tyske kraftelektronikk-produsenten CAMTEC testet på lab med simulerte startstrømmer. Resultatene fra labmålingene viste at startstrømmen i snitt ble redusert fra 183A til 34A, noe som gir en reduksjon på 81,4%. Samtidig ble gjennomsnittlig pulsbredde mer enn tredoblet.

Studentene fikk også muligheten til å teste begrenseren på Studentersamfundet i Trondheim, kjent som «Samfundet». Der hadde det for en liten tid tilbake blitt installert nye LED-lys som skapte problemer med startstrømmer. Der måtte lysanlegget deles inn i tre separate kurser, istedenfor én, for å unngå at sikringen løste ut som følge av startstrømmen.

Alle lysene ble koblet tilbake på én 16A-kurs, slik at studentene kunne gjennomføre målinger. Sikringen løste da ut ved innkobling. Målingene av startstrømmen ga en gjennomsnittlig toppverdi på 728A. Dette er hele 165 ganger større enn den stasjonære strømmen som ble målt til 4,4A, og tilsvarer strømmen fra 167 varmeovner på 1000W.

Deretter ble startstrømbegrenseren ESB101.LED innkoblet. Resultatet ble at startstrømmen ble redusert med hele 94%, ned til 46A. Startstrømmens pulsbredde ble riktignok over fire ganger så stor. Om sikringen løser ut eller ikke av startstrømmen er veldig avhengig av pulsbredden. Vernet kan tåle en større strøm jo mindre pulsbredden er. Så en firedobling i pulsbredde vil bety at sikringen tåler en mye lavere strøm før den løser ut. Likevel ble startstrømmen så kraftig redusert i dette tilfellet at sikringen aldri løste ut på de 20 forsøkene som ble gjort. Målingene tyder derfor på at startstrømbegrenseren fungerer som den skal, og den var i stand til å løse problemet de hadde på Samfundet.

## NULLGJENNOMGANGSRELÉ

En annen komponent studentene ønsket å teste ut var et nullgjennomgangsrelé. Reléet som ble testet var «Microsafe Relé 2-polt» fra norske CTM Lyng. Et relé brukes gjerne til å koble inn og ut strømmen i større belysningsanlegg, da de tåler høyere strømmer enn vanlige lysbrytere. Relé kan styres på signal fra lysbrytere ute i anlegget. Et nullgjennomgangsrelé skiller seg ut fra vanlige reléer, ved at den venter til spenningen krysser null på sinuskurven før den kobler inn lasten.

Nullgjennomgangsreléet ble i likhet med startstrømbegrenseren også testet både på lab og på anlegget på Samfundet. Labmålingene viste at reléet reduserte startstrømmen med 89%, samtidig som pulsbredden ble nesten 10 ganger så stor. Inntrykket studentene satt igjen med etter labmålingene var at reléet begrenser strømmen veldig godt, men at pulsbredden blir forlenget så mye at det kan føre til problemer.

### ESB101.LED

- Som oppgave å begrense startstrømmen.
- Kan monteres i sikringsskap eller ute i anlegg.
- Begrenser startstrømmen til maksimalt 48A i 300 ms.
- Kan i praksis dimensjonere etter strømmen belysningen trekker til vanlig. [1]



### Microsafe Relé 2-polt

- Kobler inn strømmen når spenningen krysser null på sinuskurven.
- Reduserer startstrømmen ettersom den er svært avhengig hvor stor spenningen er i innkoblingsøyeblikket.
- Kobler de fleste laster gnistfritt og med tilnærmet ingen støy [2].



Målingene på Samfundet bekreftet dette. Reléet reduserte startstrømmene med 83%, ned til 127A. Samtidig ble pulsbredden nesten seks ganger større, noe som førte til at sikringen løste ut gang på gang.

Dermed virker det ikke som at et nullgjennomgangsrelé begrenser startstrømmen tilstrekkelig når det er snakk om strømmer på samme størrelse som på Samfundet. Likevel er det et godt alternativ til et vanlig relé, og vil sannsynligvis fungere bedre i anlegg hvor startstrømmen er på et lavere nivå enn på dette aktuelle anlegget. Tabell 1 viser en sammenstilling av resultatene fra målingene på Samfundet.

	Startstrøm		Pulsbredde	
	Størrelse [A]	Reduksjon [%]	Varighet [ms]	Økning [%]
<b>Uten begrensere eller relé</b>	728	-	0,56	-
<b>Med startstrømbegrensere</b>	46	94	2,45	338
<b>Med nullgjennomgangsrelé</b>	127	83	3,16	464

**TABELL 1 - RESULTATER FRA MÅLINGER PÅ SAMFUNDET**

Målingene fra Samfundet viser at å bruke startstrømbegrensere var den beste måten å senke startstrømmene på. På denne måten var det mulig å slå sammen tre kurser til én. Mens nullgjennomgangsreléet er veldig avhengig av hvor stor startstrømmen i anlegget kan bli, vil startstrømbegrenseren begrense til maksimalt 48A, uansett teoretisk verdi. Dette gjør den mer allsidig, da den kan brukes på flere og større anlegg enn reléet.

Det vil ikke alltid være lønnsomt å benytte startstrømbegrensere, da dette kommer an på anlegget. Likevel er det denne løsningen studentene har kommet frem til som den mest pålitelige og enkleste måten å dimensjonere flere lyskilder på én og samme sikring.

## UTLØSERKARAKTERISTIKK

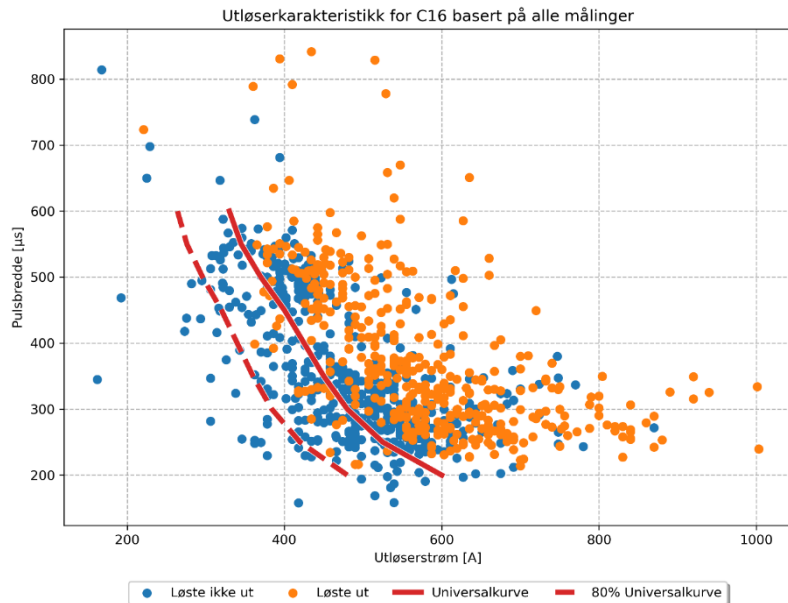
En automatsikring har som oppgave å beskytte det elektriske anlegget mot overstrømmer. De kommer med en merkestrøm som angir hvor høy strøm de skal tillate før de løser ut, men i en kort periode kan man overbelaste sikringen med høyere strømmer uten at de løser ut. Produsentene oppgir kurver for dette i databladene sine, såkalte «tid-strøm»-kurver. Disse angir hvor høye strømmer sikringen skal kunne holde i en gitt tid, uten å løse ut. Kurvene inneholder ofte utløserkarakteristikken i tidsrommet fra omtrent 5 ms og opp til én time. Startstrømmer fra LED-belysning ligger gjerne i området 0,2-0,5 ms, og faller derfor utenfor disse kurvene.

Enkelte produsenter oppgir også egne kurver for impulsutløserkarakteristikk, som kan brukes for kortere startstrømmer. Disse kan gå helt ned til 0,01 ms, og kan brukes til å finne ut hvor høy startstrøm sikringen kan holde uten å løse ut ved en gitt pulsbredde. Studentene ønsket å finne ut hvor godt disse kurvene stemte, i tillegg til å lage en egen kurve basert på resultatene. Derfor ble det utført omtrent 900 tester, fordelt på 9 ulike sikringer, og opprettet en såkalt Universalkurve. Testene ble gjort ved å simulere startstrømmer med ulike størrelser og pulsbredder på lab.

Siemens, ABB og Eaton var de tre produsentene som hadde oppgitt egne kurver for impulsutløserkaraktistikk. Ved å teste deres sikringer opp mot kurvene, fant studentene ut at Siemens sine kurver stemte ganske godt, ABB stemte delvis og Eaton stemte dårlig.

Figur 1 viser punkter av alle målingene som ble tatt på de ulike sikringene, med informasjon om de løste ut eller ikke. På bakgrunn av denne informasjonen ble det opprettet en universalkurve, som vist i rød kurve. Stiplet rød kurve viser universalkurven med en 20% sikkerhetsmargin lagt inn.

Hensikten med kurven var å se om man kunne dimensjonere flere lyskilder per kurs enn lysprodusentene oppgir. Beregningen vil innebære å gange opp antall lyskilder med oppgitt startstrøm per lyskilde. Det viste seg derimot at lysprodusentene ofte oppgir et større antall lyskilder per kurs enn hva universalkurven tillater, og at denne metoden fungerer dårlig som en generell tilnærming til dimensjonering.



FIGUR 1 UNIVERALKURVEN MED PUNKTER FRA ALLE MÅLINGER

## STARTSTRØMMER FRA LYSRØR

EU har vedtatt at flere typer lysstoffrør som inneholder kvikksølv skal fases ut i løpet av 2023 [3]. Blant disse finner man T5- og T8-lysrør, som er mye brukt i belysningsanlegg i diverse næring- og industribygg. Derfor er det grunn til å tro at en del belysningsanlegg med konvensjonelle lysrør vil byttes ut med LED-lysrør fremover.

Studentene ønsket derfor å se på om disse utskiftningene ville føre til problemer med startstrømmer, ettersom LED normalt har større startstrømmer enn konvensjonelle lyskilder. Det ble derfor utført målinger på en lysrørarmatur på lab. Først ble startstrømmen fra et 36W Osram Lumilux lysrør målt. Deretter ble lysrøret byttet ut med et Osram SubstiTUBE 20W LED-lysrør, som er Osrams LED-erstatning for nevnte konvensjonelle lysrør.

Det kunne ikke påvises at LED-lysrør har betydelig større startstrøm enn konvensjonelle lysrør. Det er derimot stor usikkerhet knyttet til målingene, noe som gjør det vanskelig å konkludere sikkert.

## OPPFORDRING TIL NYTENKING

Avslutningsvis vil gruppen komme med en oppfordring til prosjekterende ingeniører og installatører om å tenke nytt og vurdere nye løsninger. Målingene gir lovende resultater for startstrømbegrenseren, og tyder på at denne kan brukes for å redusere graden av overdimensjonering. Gruppen håper disse funnene kan øke bevisstheten rundt alternative løsninger og kan bidra til mindre overdimensjonerte anlegg. For mer informasjon om disse målingene les gjerne bacheloroppgaven *Dimensjonering av LED-anlegg med svært høye startstrømmer*.

## REFERANSELISTE

- [1] Camtec Power Supplies. (2023). *ESB101 Datasheet*. Tilgjengelig fra <https://www.camtec-powersupplies.com/esb101> (Hentet: 09.05.2023)
- [2] CTM Lyng AS. (2015). *Relé 2-polt 230V 16A*. Tilgjengelig fra <https://ctmlyng.no/produkter/rele-2-polt-230v-16a/> (Hentet: 09.05.2023)
- [3] Miljødirektoratet. (2022). *Lysrør med kvikksølv fases ut i 2023*. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/oktober-2022/lysrør-med-kvikksolv-fases-ut-i-2023/> (Hentet: 09.05.2023)



