



Seriefeilvern som beskyttelse mot brann

Maren Bjørnbakk Nilsen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

NTNU



MASTEROPPGAVE

- Kandidatens navn : Maren Bjørnbakk Nilsen
- Fag : ELKRAFTTEKNIKK
- Oppgavens tittel (norsk) : **Seriefeilvern for beskyttelse mot brann**
- Oppgavens tittel (engelsk) : Series fault protection devices for protection against fire
- Oppgavens tekst : Elektriske anlegg forårsaker mange branner og medfører årlig store brannskader i Norge. De fleste bygningsbranner skyldes elektrisitet. Teknisk svikt eller feil bruk av elektrisk utstyr forårsaket i 2011 nesten 50 % av brannene. En av de hyppigste årsakene til disse brannene er seriefeil. I perioden 2009-2014 døde 15 personer som følge av branner forårsaket av seriefeil. På grunn av begrensninger i tilgjengelige løsninger for deteksjon av seriefeil på det norske markedet, er det hittil ikke blitt stilt krav til seriefeilvern i Norge. Andre land har imidlertid begynt å stille krav til slike vern, og flere leverandører har nå løsninger tilgjengelig. Vernene har ulike egenskaper og deteksjonsmetoder. Noen er basert på å detektere lysbue, mens andre detekterer varmeutvikling.

Kandidaten skal

- utforske forholdene knyttet til antennelse ved ulike typer seriefeil
- undersøke egnethet for typer seriefeilvern-løsninger for å beskytte mot brann

- Oppgavens gitt : 15.01.15
- Besvarelsen levert : 30.06.15
- Kandidatens veileder : Eilif Hugo Hansen

Trondheim, 14.01.15

Forord

Forord

Rapporten er et resultat av prosjektarbeid i emnet TET4900 Elektrisk energiteknikk og smarte nett, masteroppgave ved NTNU. Oppgaven ble skrevet vårsemesteret 2015. Veileder for oppgaven var Eilif Hugo Hansen.

Masteroppgaven er en videreføring av et fordypningsprosjekt fra høsten 2014, med samme tema. Fordypningsprosjektet var et forstudie av temaet, og en introduksjon til testmetoder. I masteroppgaven er det gått dypere inn i teorien, og det er utført en rekke andre tester i tillegg til de testmetodene som ble benyttet i fordypningsprosjektet. Deler av teorien fra fordypningsprosjektet er tatt med videre i masteroppgaven.

Lysbuevern fra ulike leverandører har blitt testet. Det har ikke vært ønskelig å sammenlikne lysbuevern fra ulike produsenter. Grunnen til det er at hensikten var å utforske lysbueverns potensiale og begrensning, ikke å favorisere en produsent foran andre produsenter. Av den grunn blir det ikke oppgitt hvilke produsenter som har tillatt testing av deres lysbuevern. Bare Siemens har et vern på markedet per dags dato. Siemens er også eneste leverandør som har delt informasjon om hvordan lysbuevernene fungerer, som kan offentliggjøres. Dermed er Siemens lysbuevern tatt for seg som et eksempel på lysbuevern.

Arbeidet med oppgaven har vært morsomt og inspirerende. Det har virket å være stor interesse for temaet, og samtlige som har blitt kontaktet har bidratt med ideer, opplysninger og synspunkter. Dette settes stor pris på.

Jeg ønsker spesielt å takke min veileder, Eilif Hugo Hansen, for hans støtte under arbeidet med oppgaven. En takk rettes også til avdelingsingeniør Bård Almås ved servicelaben og Morten Flå ved verkstedet, ved institutt for elkraftteknikk, for all hjelp med laboratoriearbeidet. Videre ønsker jeg å takke ansatte ved KRIPOS, kriminalteknisk avdeling, seksjon for brann og kjemi, for deres innspill og for at de tok seg tid til å undersøke testutstyr. Takk til Magne Runde, sjefforsker ved SINTEF, som har delt sine synspunkter med meg underveis i arbeidet.

En stor takk rettes også til Jean-Mary Martel, som skriver en doktorgradsavhandling omhandlende flere av de samme temaene som blir tatt opp i denne oppgaven. Martel inviterte meg til Tyskland, hvor teoretisk grunnlag ble diskutert og Siemens sitt lysbuevern ble presentert og forklart.

Trondheim, 30. juni 2015

Maren Bjørnbakk

Sammendrag

Hvert år koster branner samfunnet store summer, og liv går tapt. Elektriske feil teller for mellom 40-45 % av de etterforskede brannene. Seriefeil skiller seg tydelig ut som syndebukk, og motstandsoppvarming med påfølgende serielysbue står for hele 37 % av brannene forårsaket av elektriske feil.

Begrepet seriefeil dekker både motstandsoppvarming, glødende kontaktforbindelser og serielysbuer. Vernene som tradisjonelt brukes i elektriske installasjoner beskytter ikke mot seriefeil, men det har de senere år blitt utviklet ulike typer vern som skal kunne tilføre en slik beskyttelse. Tester av seriefeilvern ble utført med den hensikt å kartlegge funksjonaliteten. Det er ønskelig med et vern som kan beskytte mot branner som skyldes alle typer skadelige seriefeil.

Seriefeilvernene har ulike deteksjonsprinsipper, og de enkelte vernene beskytter ikke mot alle typer seriefeil. Derfor var det interessant å se på hvordan materialer omkring feilstedet antenner som følge av seriefeil. Isolasjonsmaterialer ble forsøkt antent med glødende kontaktforbindelser. Ved alle tilfellene isolasjonsmaterialene tok fyr, ble det i forbindelse med antennelsen observert lysbuer. En skrivepapirbit ble også forsøkt antent med glødende kontaktforbindelse. Det lyktes å forbrenne biten i form av en glødebrann, uten at det var lysbuer tilstede. En glødebrann kan utvikle seg til en brann der også flammer inngår. Testene viser derfor at det er mulig å starte en brann kun som følge av glødende kontaktforbindelse, dersom forholdene ligger til rette for det.

Tester der lysbuer og glødende kontaktforbindelser ble skapt mellom to kobberledere ga resultater som peker i retning av at seriefeil, som gjennomgår ulike stadier med både lysbuer og gløding, er den mest skadelige formen for seriefeil.

I 2013 kom det en egen standard for lysbuevern, IEC 62606. Det ble utført tester fra standarden på lysbuevern fra ulike produsenter. Lysbuevernene tilfredstilte kravene i standarden ved tester med karboniserte kabelprøver. Ved tester der lysbuer ble skapt ved bruk av lysbuegenerator, tilfredstilte ikke alle resultater standardens krav, da det forekom tilfeller hvor lysbuer ikke ble detektert.

Ei vurderingen av lysbuestandarden førte til kritikk av at det ikke kreves mer omfattende tester for feildeteksjoner og for deteksjoner av lysbuer i en krets med flere tilkoblede laster, som kan gi strømmer som likner lysbuestrømmer. Det foreslås også å gjøre ei vurdering av hvorvidt den minste lysbuestrømmen, som standarden krever deteksjon av lysbuer ved, kan reduseres uten at dette fører til en uakseptabel økning av feildeteksjoner.

Seriefeilvernene som baserer seg på å oppdage forhøyet temperatur, oppdaget varmgang på grunn av dårlig kontakt ved alle tester. Forutsetningen for at vernene skal oppdage en feil, er at feilen oppstår i vernenes umiddelbare nærhet. Dersom funksjonaliteten til lysbuevern er tilfredsstillende, kan lysbuevern trolig beskytte mot de seriefeil som tester indikerte var de mest skadelige; seriefeilene som gjennomgikk ulike stadier av både gløding og lysbuer. Verken seriefeilvernene som baserer seg på å oppdage forhøyet temperatur eller lysbuevern kan beskytte mot alle seriefeil som kan oppstå i en boliginstallasjon.

Abstract

Every year, fire causes huge costs to the society, and loss of life. The electrical faults count for 40-45% of the investigated fires. Series faults clearly stands out as a scapegoat. Resistance heating followed by series arc is accountable for as much as 37% of the fires caused by electrical faults.

The term series fault covers resistance heating, glowing contact connection and series arc. The protection devices traditionally applied in electrical installation does not protect against series faults. However, by the latest years, there has been developed several protecting devices providing such protection. Series protection devices currently developed or under development, have been tested. These tests were conducted with the mapping of functionality in mind. The objective is to find a protection device that is able to prevent fires caused by any harmful series fault.

The series fault protection devices have various principles of detection. None of the protection devices can protect against all types of series faults. Therefore, it was considered interesting to examine how an ignition of adjacent materials takes place. First, an attempt to ignite insulation materials was conducted using glowing contacts. An arc, at the moment of ignition, could be observed in all cases when the materials caught fire. Further, an attempt to ignite a piece of paper by glowing was carried out. The combustion of the paper was successful, by the means of incandescent fire, without any arcs present. An incandescent fire may develop into a fire including flames. This indicates that it is possible to start a fire only by the means of glowing connections, if the conditions are right for it.

Tests show that the serial faults that causes the most severe damage, are the ones that go through various stages with both arcs and annealing.

A separate IEC-standard, IEC 62606, considering arc fault detection devices, AFDDs, has been developed. AFDDs from different manufacturers were tested, using the procedures described in the standard. The AFDDs tested in this thesis were according to the standard when tested with samples of carbonized cable. When tested using an arc generator, not all of the results satisfied the standard. This due to the fact that arcs were not detected.

An assessment of the standard led to criticism regarding the lack of extensive tests for both unwanted tripping's and for detection of arcs in a circuit with disturbing loads. It is also proposed to make an assessment of whether a reduction of the lowest arc current, where the detection of an arc is required, can be reduced without leading to an unacceptable increase of unwanted tripping's.

The serial fault protection devices based on detecting elevated temperatures, detected overheat due to poor connections during all tests. A prerequisite for fault detection is that the fault has to be in the immediate vicinity of the protection device. If the functionality of an arc fault detection device, AFDD, is satisfactory, the AFDD may most likely protect against the serial arc fault that tests indicated were the most harmful, namely the series fault going through the stages of both arcs and annealing. Neither the

Abstract

series protection devices based on detecting elevated temperatures nor the AFDD can protect against all types of series faults that can occur in a residential installation.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag	ii
Abstract.....	iii
1 Introduksjon.....	1
2 Brannstatistikk.....	2
3 Seriefeil.....	5
3.1 Motstandsoppvarming og glødende kontaktforbindelse.....	5
3.1.1 Kontaktpunkt.....	8
3.1.2 Temperaturberegninger	9
3.1.3 Sammenheng mellom temperatur, motstand, strøm og spenning.....	12
3.1.4 Effekttutvikling ved dårlig kontaktforbindelse.....	15
3.1.5 Kobberoksid, temperatur og glødende filament.....	17
3.2 Lysbue	20
3.2.1 Ulike typer lysbue.....	20
3.2.2 Hvorfor en lysbue oppstår	21
3.2.3 Hvordan en lysbue oppstår	22
3.3 Lysbuens egenskaper	24
3.3.1 Temperaturen i en lysbue	24
3.3.2 Strøm og spenning for å oppnå stabil lysbue.....	24
3.3.3 Lysbuekarakteristikk: tidsforløp.....	24
3.3.4 Karakteristiske frekvenser ved lysbuer	26
3.3.5 Elektrodematerialets betydning for stående lysbue.....	27
3.4 Spor etter motstandsoppvarming, glødende kontaktforbindelse og lysbue	28
4 Isolasjonsmaterialet PVC	31
5 Brannårsak.....	35
5.1 Feil i støpsler	36
5.1.1 Skruestøpsler.....	36
5.1.2 Støpte støpsler	37
5.2 Stikkontakt.....	38
5.3 Redusert ledertverrsnitt og brudd i leder	39
5.4 Dårlig kontakt i koblingsklemmer	40
5.5 Utvendig varmetilførsel.....	40
6 Deteksjonsprinsipper	41
6.1 Varmedeteksjon ETIM.....	41
6.2 Ionedeteksjon EFP	43
6.3 Lysbuedeteksjon Siemens.....	45
6.4 Lysbuedeteksjon andre leverandører.....	50
6.5 Varmedeteksjon som gir kunstig jordfeil	51
7 IEC 62606.....	53
7.1 Tester med karboniserte kabelprøver	54
7.1.1 Test 1 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det plutselig oppstår en serielysbue:.....	55
7.1.2 Test 2 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det settes inn en last med en serielysbuefeil:.....	55
7.1.3 Test 3 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det plutselig tilføres strøm til en krets med lysbuefeil:	56

Innholdsfortegnelse

7.2	Test ved bruk av lysbuegenerator	56
7.3	Test - Feildeteksjoner ved ulike forstyrrende laster	57
8	Test av seriefeilvern som baserer seg på varmedeteksjon.....	58
8.1	Bakgrunn	58
8.2	Måleoppsett og måleutstyr.....	59
8.2.1	Testvegg.....	59
8.2.2	ETIM-temperatursensorer.....	60
8.2.3	Termoelementer	60
8.2.4	Seriefeilvern som fremprovoserer jordfeil	61
8.2.5	Lysbuevern.....	61
8.2.6	Feilsituasjonen.....	61
8.2.7	Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern	63
8.3	Måleprosedyrer	64
8.3.1	Alle vern testet sammen	64
8.3.2	Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern	64
8.4	Resultater	64
8.4.1	Alle vern testet sammen	64
8.4.2	Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern	69
9	Test av lysbuevern.....	70
9.1	Bakgrunn	70
9.2	Måleoppsett og -utstyr	71
9.2.1	Dårlig kontaktforbindelse, fremprovosert ved vibrasjoner.....	71
9.2.2	Lysbuegenerator	72
9.2.3	Karboniserte kabelprøver.....	74
9.2.4	Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater	75
9.3	Måleprosedyrer	76
9.3.1	Dårlig kontaktforbindelse	76
9.3.2	Lysbuegenerator	76
9.3.3	Karboniserte kabelprøver.....	77
9.3.4	Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater	78
9.4	Resultater	79
9.4.1	Dårlig kontaktforbindelse, fremprovosert ved vibrasjon.....	79
9.4.2	Lysbuegenerator	87
9.4.3	Karboniserte kabelprøver.....	93
9.4.4	Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater	96
10	Antennelse ved glødende kontaktforbindelse	102
10.1	Bakgrunn	102
10.2	Måleoppsett og - utstyr.....	103
10.3	Måleprosedyrer	104
10.4	Resultater	104
11	Diskusjon	112
11.1	Alle vern testet sammen.....	112
11.2	Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern	114
11.3	Dårlig kontaktforbindelse	115
11.4	Lysbuegenerator	117
11.5	Karboniserte kabelprøver	119
11.6	Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater	120
11.7	Antennelse ved glødende kontaktforbindelse	122
11.8	IEC 62606.....	125
11.8.1	Lysbuegenerator.....	125
11.8.2	Karboniserte kabelprøver.....	126

Innholdsfortegnelse

11.8.3	Ønskede og uønskede utkoblinger.....	128
11.9	Beste beskyttelse mot seriefeil.....	128
11.9.1	ETIM.....	128
11.9.2	Seriefeilvern som skaper jordfeil.....	129
11.9.3	Lysbuevern.....	131
11.10	Forslag til videre arbeid.....	134
12	Konklusjon.....	135
	Referanser.....	137
	Vedlegg.....	140

1 Introduksjon

I 2013 var det 2877 boligbranner i Norge. Det samme året omkom 62 personer som følge av brann. I tillegg til liv som går tapt, forårsaker branner store materielle skader. De største brannårsakene er åpen ild og elektrisitet. Dersom både feil bruk av elektrisk utstyr og teknisk feil medregnes i statistikken, teller elektrisk feil for mellom 40-45 % av de etterforskede brannene. Seriefeil står for en betydelig andel av de elektriske brannene, og brannstatistikken til DSB angir serielysbue som brannkilden til 37 % av de elektriske brannene. [1]

I begrepet seriefeil inngår både motstandsoppvarming og serielysbuer. Når det oppstår økt motstand i en strømførende leder, vil temperaturen stige. Temperaturen kan stige så mye at punktet med økt motstand begynner å gløde. Glødetemperaturen til kobber er i området 1200-1300 °C [2, 3]. Serielysbuer er lysbuer som oppstår i serie med lederen. Temperaturen i en serielysbue kan bli 6000 °C [4]. Temperaturene ved både gløding og lysbuer er høyere enn antennelsestemperaturen til de fleste omkringliggende materialer.

Seriefeil oppstår når kontakten i en leder ikke er tilfredsstillende. Koblingspunkter er deler av den elektriske installasjonen som er spesielt utsatt. En dårlig kontaktforbindelse i et koblingspunkt kan oppstå eksempelvis dersom elektrikerer ikke skrur til skruene skikkelig, eller kontaktpunktet blir svekket over tid. Skadede ledere, stikkontakter og støpsler, samt feil bruk av elektrisk utstyr er blant kildene til seriefeil.

Seriefeil lar seg ikke beskyttes mot av de vernene som tradisjonelt brukes i elektriske installasjoner i dag. Gjeldende regelverk, FEL og NEK 400, stiller stadig strengere krav når nye revisjoner utarbeides. Mye av fokuset ligger på brannsikkerhet. Det er ønskelig at det utvikles seriefeilvern som er gode nok til at det kan stilles krav om seriefeilvern i elektriske installasjoner.

I senere tid har det blitt utviklet vern som skal være i stand til å beskytte mot seriefeil. Vernene baserer seg på forskjellige deteksjonsprinsipper, men i all hovedsak detekterer de enten lysbuer eller oppdager varmgang i kontaktpunkter. Vern med ulike deteksjonsprinsipper testes. Hensikten er å finne ut av om vernene er i stand til å beskytte mot seriefeil som kan oppstå. Andre fordeler og ulemper med vernene blir også belyst.

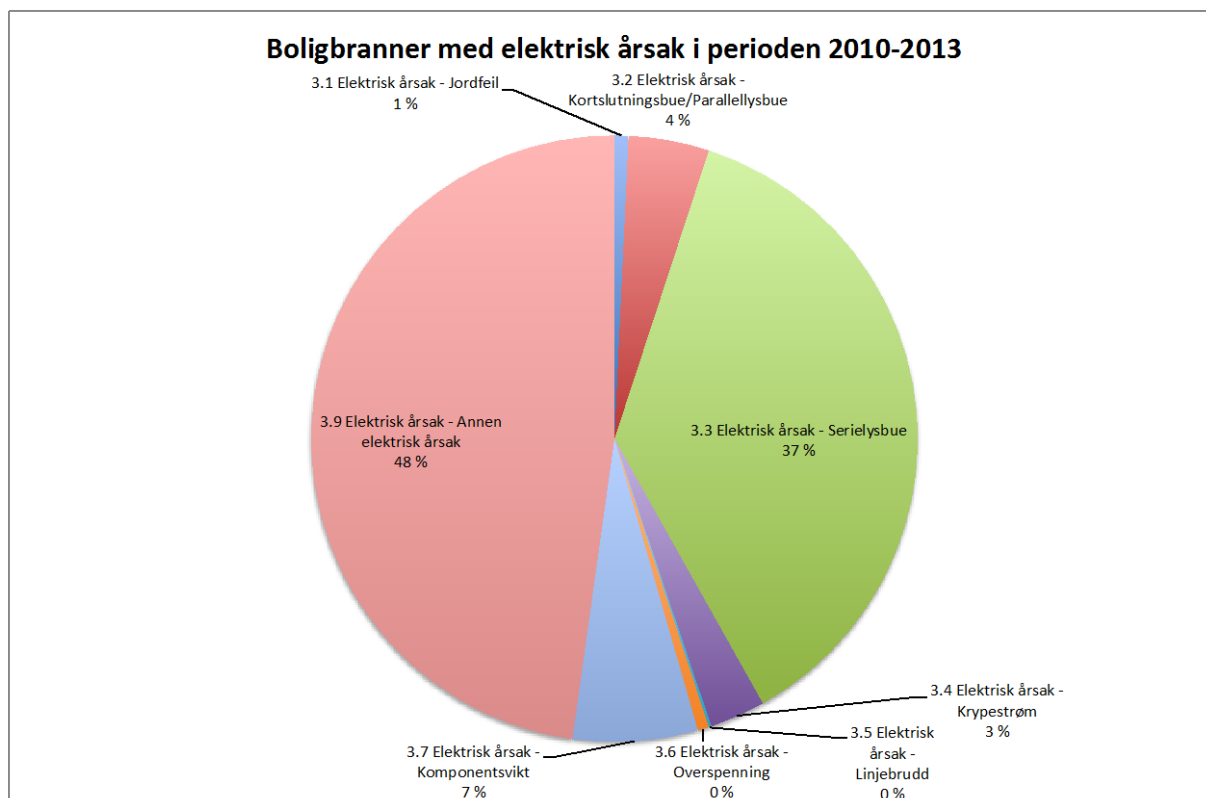
De høye temperaturene som en seriefeil medfører kan resultere i antennelse av omkringliggende materialer. Hvordan denne antennelsen foregår er ikke klart, og det forsøkes å finne svar på hvordan omkringliggende materialer antenner som følge av seriefeil. Dette er interessant å finne svar på fordi de ulike seriefeilvernene baserer seg på ulike deteksjonsprinsipper. Dersom antennelse skjer som følge av bare den ene typen seriefeil, vil det være u hensiktsmessig å installere et seriefeilvern som beskytter bare mot den andre typen seriefeil.

2 Brannstatistikk

I følge DSBs statistikker har brann forårsaket 248 dødsfall i Norge fra 2009 til og med 2013. Det betyr at mellom 40 til 60 personer har omkommet i brann hvert år de siste fem årene. 20 % av dødsbrannene tidsrommet 2009 til og med 2013 står registrert med ukjent årsak og 8 % av dødsbrannene er registrert med elektrisk årsak. Den elektriske årsaken som klart har forårsaket flest dødsfall i perioden, er serielysbue. I følge DSBs statistikker omkom 11 personer som følge av serielysbue i femårsperioden. [1]

De fire hovedårsakene til boligbranner er: Feil bruk, åpen ild, elektrisk årsak og "ukjent". Når feil bruk av elektrisk utstyr skilles fra statistikken, teller elektrisk årsak for 20 % av boligbrannene. Dette tilsvarer et gjennomsnitt på 169 branner i perioden 2010-2013.

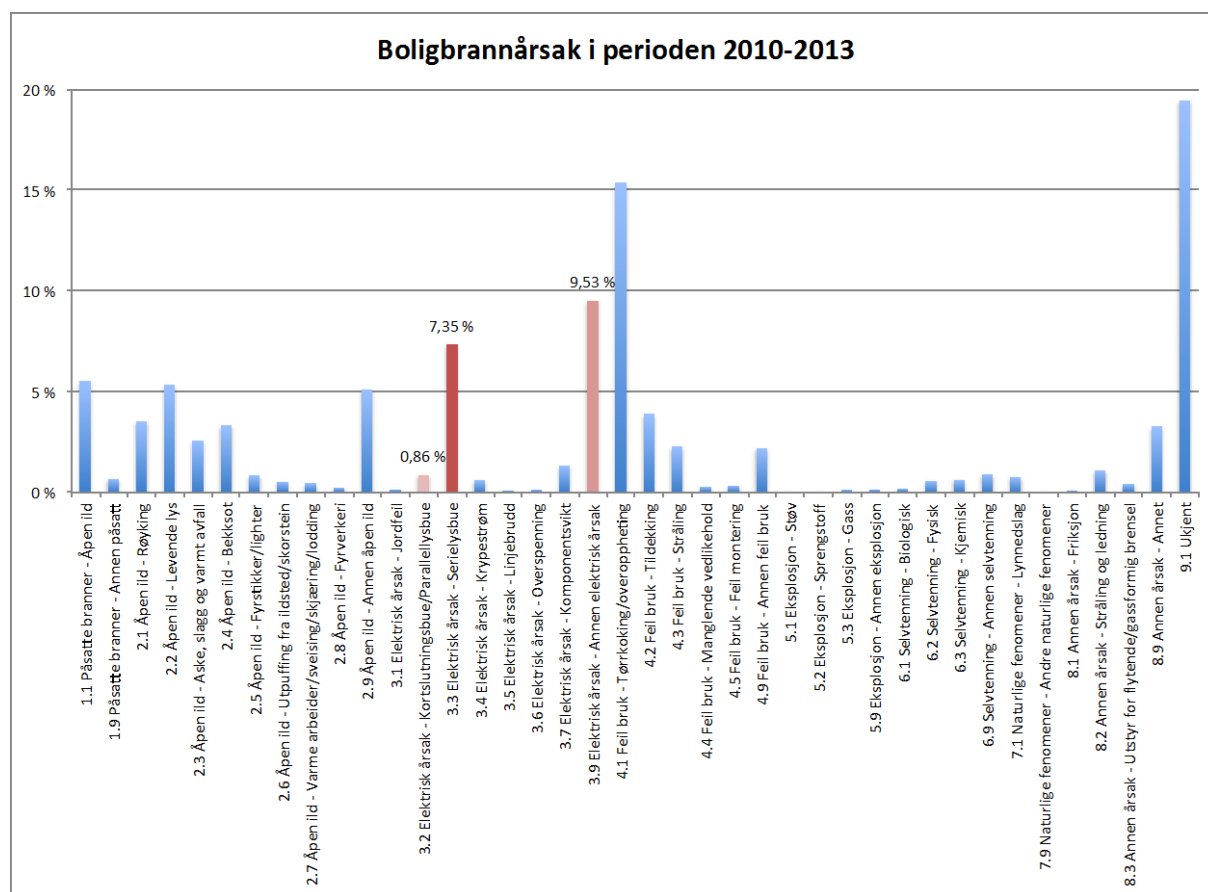
Blant de elektriske årsakene, utmerker serielysbuer seg spesielt. Serielysbuer står for hele 37 % av de elektriske årsakene til boligbranner. I Figur 1 kan en oversikt over de elektriske brannene sees.



Figur 1 - Boligbranner med ulike elektriske årsaker i perioden 2010 til og med 2013[1].

Brannstatistikken til DSB avslører også at det hyppigst oppstår brann i stuen. I stuen oppstår 29 % av de etterforskede brannene. Deretter følger kjøkken og soverom som områder i huset hvor det er registrert en hyppig forekomst av brann.

Blant det totale antallet branner som hvert år blir etterforsket, står serielysbue for 7,35 % av brannene. Fordelingen av brannårsaker er vist i Figur 2.



Figur 2 - Brannårsak i boliger i perioden 2010 til og med 2013. [1]

Politiet er pliktig til å etterforske alle branner, med formål å avklare brannårsak[5-7]. DSB har et nasjonalt ansvar vedrørende innsamling av opplysninger om brannårsak.

DSBs brannårsaksstatistikk har imidlertid en svakhet. Politiførstebetjent Susanne Moen ved branngruppa i Oslo politidistrikt skriver i en mail 17. mars 2015 at det ikke eksiterer noen enhetlige retningslinjer for hva som skal til for at det kan konkluderes med en brannårsak. Det betyr at det vil bli enkeltpersoners vurderinger som avgjør hvorvidt en brann blir registrert med eksempelvis “elektrisk årsak”, eller om bevisene vurderes for svake slik at brannårsaken blir registrert som “Ukjent” i stedet. Fra 2010 til og med 2013 er andelen branner registrert med “Ukjent” brannårsak 19 % [1].

Heller ikke for registrering av de forskjellige elektriske årsakene er det gitt klare føringer for når en konklusjon av brannårsak kan tillates. Dette er også noe som må vurderes av den enkelte. At det kan være vanskelig å komme med en konkret konklusjon dersom bevisene ikke vurderes holdbare nok, kan være en del av forklaringen på hvorfor hele 48 % av de elektriske årsakene registreres som “annet”[1].

Resultatet av de manglende retningslinjene for brannårsaksregistrering er at eksempelvis en brann, som ser ut til å ha startet i en stikkontakt, ikke nødvendigvis blir registrert med en mer konkret årsak enn “ukjent” eller “annen elektrisk årsak”. Uten en grundigere teknisk undersøkelse vil, for eksempel, en serielysbue vanskelig kunne dokumenteres godt nok til å være et holdbart bevis. Overfor DSB kan politiet registrere dette som “ukjent” eller “annen elektrisk årsak”, med noen ord om den sannsynlige

Brannstatistikk

brannårsaken i kommentarfeltet. Konsekvensen av denne feilkilden er at brannårsaken motstandsoppvarming og serielysbue sannsynligvis er større enn hva statistikken til DSB antyder. Dette er en påstand som bekreftes i en telefonsamtale med Moen, 16. mars 2015, og som støttes av Stensaas gjennomgang av kommentarene i kommentarfeltet til DSBs registreringsskjemaer [8].

3 Seriefeil

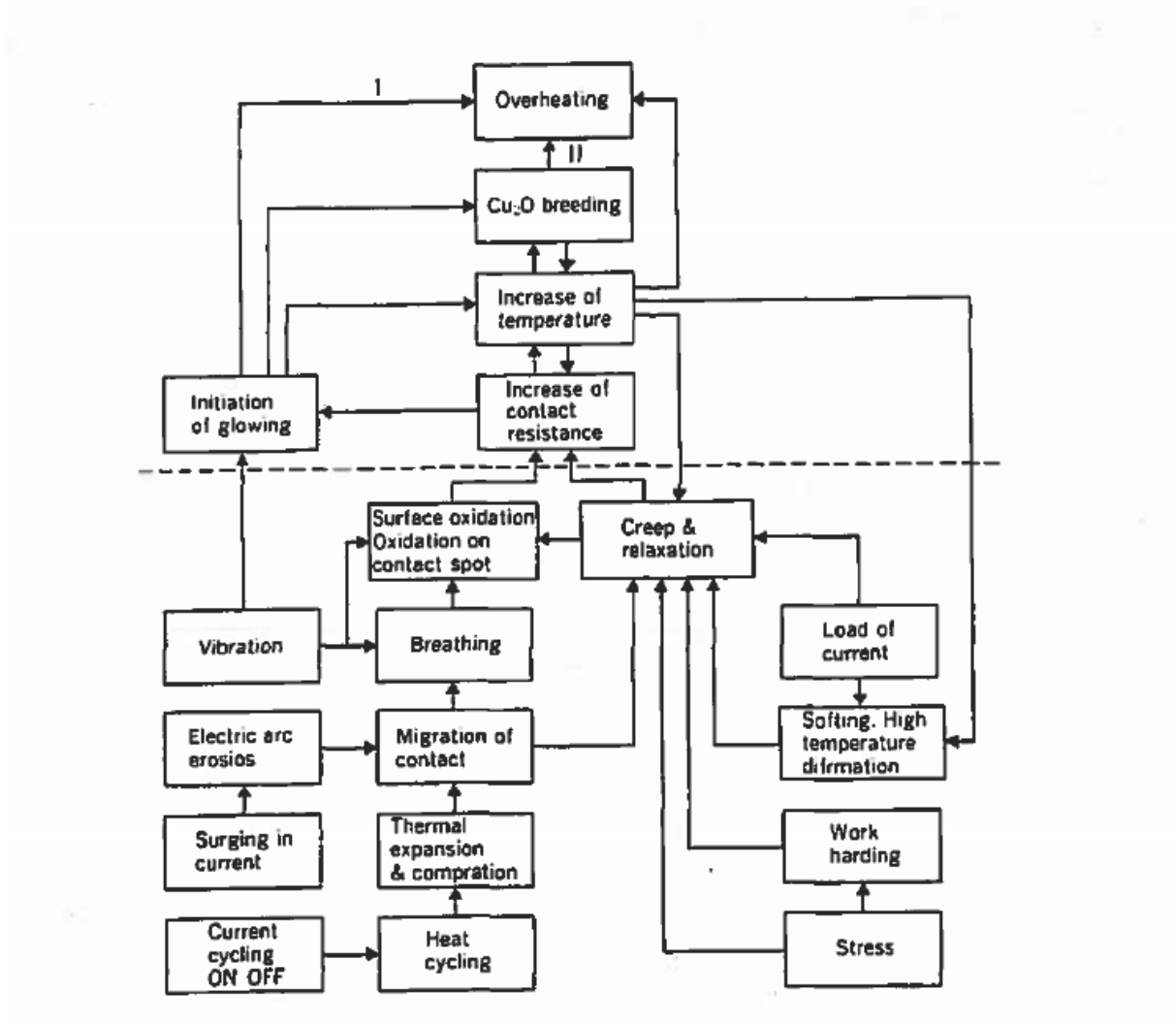
I begrepet seriefeil inngår både motstandsoppvarming og serielysbue. Dette er feil som ikke påvirker strømmen i den grad at et overstrømsvern eller en jordfeilautomat vil være i stand til å oppdage feilen. Det har som konsekvens at det i dag i en vanlig boliginstallasjon ikke finnes noen form for beskyttelse mot seriefeil. Brannfaren, dersom det skulle oppstå en seriefeil, er derfor en betydelig trussel.

I den påfølgende teorien skilles det mellom motstandsoppvarming og serielysbue. I et svakt punkt i en elektrisk installasjon hvor det oppstår seriefeil, vil feilen gjerne gjennomgå ulike stadier. Feilstedet kan dermed være utsatt for eksempelvis motstandsoppvarming, gnister, glødende kontaktforbindelser og serielysbue. Når omkringliggende materialer antenner som følge av en seriefeil, vil denne seriefeilen ofte være et sammensatt fenomen. Hva som er den utløsende årsaken til antennelse forsøkes å finnes ut av videre i oppgaven.

Babrauskas skriver i sin "Ignition Handbook" om hendelser som skyldes elektriske feil, og som kan lede til antennelse av omkringliggende materialer. Hendelsene som her beskrives er gnister eller lysbuer mellom to ledende materialer. Materialene skilles fra hverandre med et isolerende medium, en gass. Andre elektriske feil som kan være en kilde til antennelse er lysbuedannelse over en karbonisert vei, motstandsoppvarming og glødende kontaktforbindelser. [9]

3.1 Motstandsoppvarming og glødende kontaktforbindelse

Årsakene til varmgang og overoppheting i elektriske installasjoner er mange og sammensatte. Dette har Kuroyanagi m.fl. illustrert i et prosessdiagram, vist i Figur 3 [10]. Diagrammet gir et bilde av årsaker til varmgang og hendelsesforløpet fram til overoppheting. Eksempelvis blir av- og påslag av strømmen, samt vibrasjoner nevnt som årsaker til varmgang. Dannelse av kobberoksid har en sentral rolle under hendelsesforløpet fram mot overoppheting.



Figur 3 - Årsaker til varmgang og overoppheting i elektriske kontaktpunkter[10]

Babrauskas deler opp årsakene til motstandsoppvarming i fem hovedpunkter[11]:

1. Kraftig overbelastning

Antennelse på grunn av kraftig overbelastning av ledere forekommer sjeldent. Eksperimenter [9, 11] har vist at det kreves 3-7 ganger belastningsstrømmen som lederne er dimensjonert for, dersom antennelse skal skje. Et overstrømsvern vil derfor bryte strømmen i kursen før dette punktet nås.

I boka "Ignition handbook", skrevet av Babrauskas [9], er det beskrevet en forenklet formel, Formel 1, for å beskrive temperaturen til isolasjonsmaterialet omkring en leder.

$$T_{in} = \frac{I^2}{2\pi^2\sigma\lambda a^2} \left[\frac{1}{Bi} + \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad \text{Formel 1}$$

T_{in} er temperaturen til isolasjonen omkring lederen, oppgitt i Kelvin. I er strømmen(A) i lederen. Elektrisk konduktivitet er gitt av σ . For kobber er denne

Seriefeil

verdien lik $5,8 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$. Isolasjonsmaterialets termiske konduktivitet er gitt av λ , som oppgis i $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Isolasjonsmaterialets ytre radius beskrives av b i meter. Det samme gjelder lederens radius, a . Bi står for Biotnummeret. Biotnummeret kan finnes av Formel 2, hvor h er den konvektive varmeoverføringskoeffisienten, gitt i Wm^2K^{-1} .

$$Bi = \frac{bh}{\lambda}$$

Formel 2

Dersom overstrømmen er kjent kan Formel 1 benyttes til å finne ut hvor høy temperatur som skal til for at isolasjonsmaterialet antenner. Eventuelt dersom antennestemperaturen til isolasjonsmaterialet er kjent, kan det beregnes hvor mye strøm som kan gå gjennom lederen før isolasjonen antenner som følge av overstrøm.

2. For mye isolasjon

En leder, som verken har blitt utsatt for stor overbelastning eller har noen form for skade, kan relativt lett antenne dersom lederen blir tildekket med for mye isolasjon. Babrauskas forteller om et tilfelle der det var nok å kveile kabelen opp tre ganger for deretter å tildekke den med klær [11].

3. Lekkasjestrøm og jordfeil

Dette er en feil som kan oppstå dersom en leder som leder strøm kommer i kontakt med et annet ledende materiale, og strømmen dermed tar en annen vei som ikke er ment å være strømførende.

4. Overspenning

Vanligvis vil materialer som blir brukt som kabelisolasjon være i stand til å motstå spenningsvariasjoner som kan oppstå i strømmettet. Antennelse på grunn av overspenning blir derfor ansett for å være en relativt sjelden årsak til brann. Antennelse på grunn av overspenning kan eksempelvis skje dersom det oppstår et lynnedslag. Et lynnedslag kan medføre kraftig antennelse av alle typer brennbare materialer. En feilaktig levering av høy spenning i lavspenningskabler kan også føre til brann. Et overspenningsvern vil kunne beskytte mot overspenninger, og dermed være i stand til å forhindre antennelse.

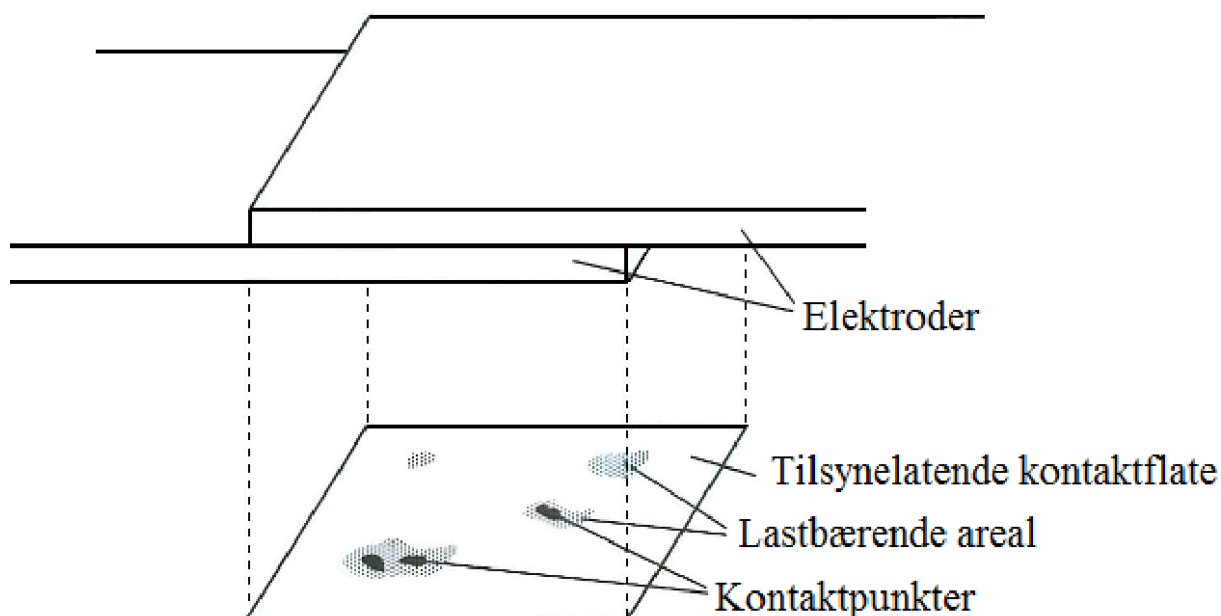
5. Dårlig kontaktforbindelse

I punkter med dårlig kontaktforbindelse vil motstanden være høyere. Den forhøyede motstanden i punktet gir en lokal oppvarming. Når temperaturen øker, framskyndes en prosess som innebærer oksidering og siging av metall. Oksidbelegget som blir dannet på overflaten av lederen, Cu_2O , leder strøm. Dette oksidbelegget har høyere motstand enn metallet. Dermed fører dette i sin tur til en selvforsterkende feil, og temperaturen fortsetter å øke. I følge Stensaas kan et slikt kontaktpunkt generere en varmeutvikling på 30-40W med en strøm på 15-20A [8]. I en dårlig kontaktforbindelse kan varmeutviklingen bli så stor at den dårlige kontaktforbindelsen blir glødende. Babrauskas viser til eksperimenter der det har blitt vist at glødende kontaktforbindelser ikke kan oppstå med lavere strømmer enn 4-6A [11]. Motsetningsvis skriver Martel at gløding kan oppstå ved 0,15A til 0,8A [12]. Varmeutviklingen kan føre til antennelse av nærliggende brennbare materialer.

Nøyaktig hvordan denne antennelsen foregår, finnes det foreløpig lite forskning på [8, 11-13].

3.1.1 Kontaktpunkt

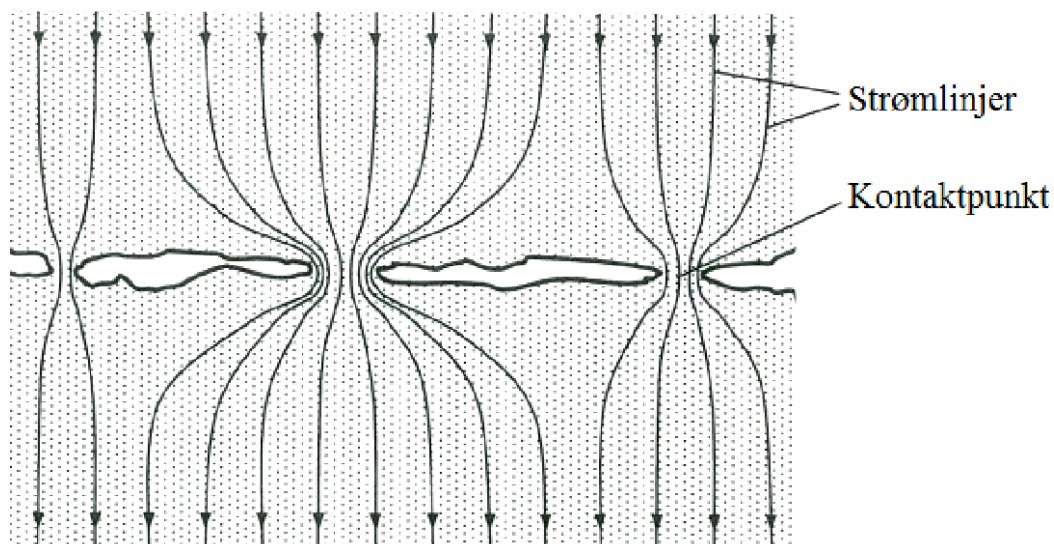
Koblingspunkter har vist seg å være det svakeste punktet i elektriske installasjoner [8]. Dette kan blant annet skyldes at det i en kontaktforbindelse normalt bare er noen få punkter som danner overgang for strømmen. Når to ledende materialer er ført sammen, vil det overlappende arealet være den tilsynelatende kontaktflaten. Det er ikke fysisk kontakt mellom materialene over hele denne kontaktflaten, da små ujevnheter på overflaten vil lage luftgap i den tilsynelatende kontaktflaten. Områdene der det faktisk er fysisk kontakt kalles det lastbærende areal. Innenfor dette arealet er det små områder som danner overgang for strømmen, kontaktpunkt [14, 15]. Figur 4 viser en kontaktflate mellom to ledere, der begrepene tilsynelatende kontaktflate, lastbærende areal og kontaktpunkter er tegnet inn.



Figur 4 - Kontaktflate mellom to ledere. Figuren er laget av Magne Runde, og gjengitt med hans godkjenning

En ru overflate vil kunne gi flere kontaktpunkter enn en glatt overflate [13]. Hardheten til materialet og kontaktkraften mellom lederne har direkte påvirkning på antallet og størrelsen på kontaktpunktene [15]. Hvor godt elektrikerne tiltrekker skrueforbindelsene i et koblingspunkt er bestemmende for kontaktkraften, og dermed antallet kontaktpunkter.

I kontaktpunktene vil strømtettheten være stor. Antallet kontaktpunkter og størrelsen på kontaktpunktene er bestemmende for hvor stor strømtettheten faktisk blir [13, 14]. Figur 5 viser en forstørret del av en kontaktflate. De hvite "boblene" illustrerer luftrom. Pilene er strømlinjer, og viser at strømmen må ta veien via de smale kontaktpunktene.



Figur 5 - Forstørret del av en kontaktflate. Figuren er laget av Magne Runde, og gjengitt med hans godkjenning.

Det faktum at strømmen må passere gjennom kontaktpunktene, gjør at motstanden i punktene er høyere som følge av det reduserte strømførende volumet. Dette kalles innsnevringssmotstand, på grunn av innsnevringen av strømbanen. Motstanden er et tillegg til motstanden i lederen, og kan beregnes ved bruk av Formel 3. Formel 3 er formelen for innsnevringssmotstanden i et sirkulært kontaktpunkt. Innsnevringssmotstanden blir bestemt av den spesifikke resistansen til lederen, ρ , og kontaktpunktets radius, a . [13-15]

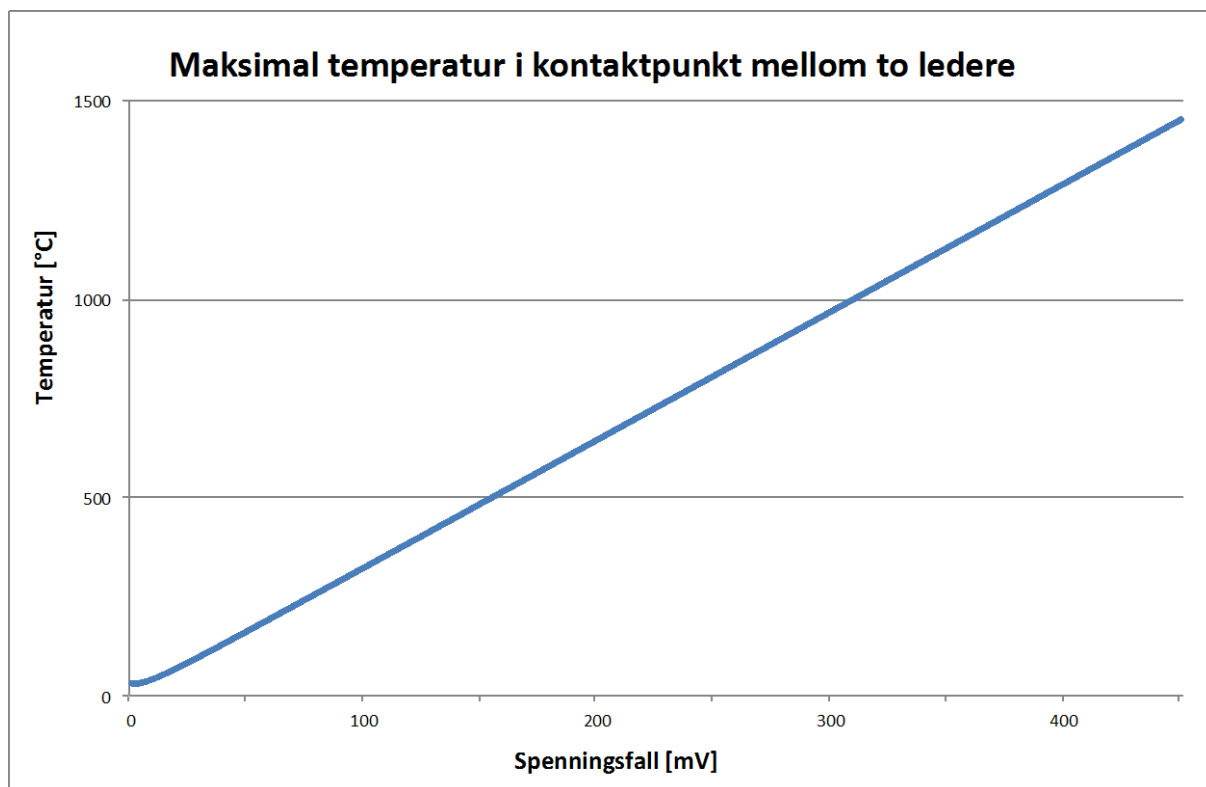
$$R = \frac{\rho}{2 \cdot a} \quad \text{Formel 3}$$

3.1.2 Temperaturberegninger

Magne Runde [15] beskriver en formel, Formel 4, for å beregne maksimaltemperaturen i kontaktflaten, forutsatt at begge elektrodene består av samme metall. Temperaturen vil da fordele seg symmetrisk over kontaktflaten. Maksimaltemperaturen i kontaktflaten bestemmes av spenningsfallet over kontaktflaten, U , absolutt temperatur i elektrodene langt unna kontaktpunktet, T_0 , og en konstant, L . Konstanten, L , vil for de fleste metaller som benyttes som ledere være $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$.

$$T_{max} = \sqrt{\frac{U^2}{4 \cdot L} + T_0^2} \quad \text{Formel 4}$$

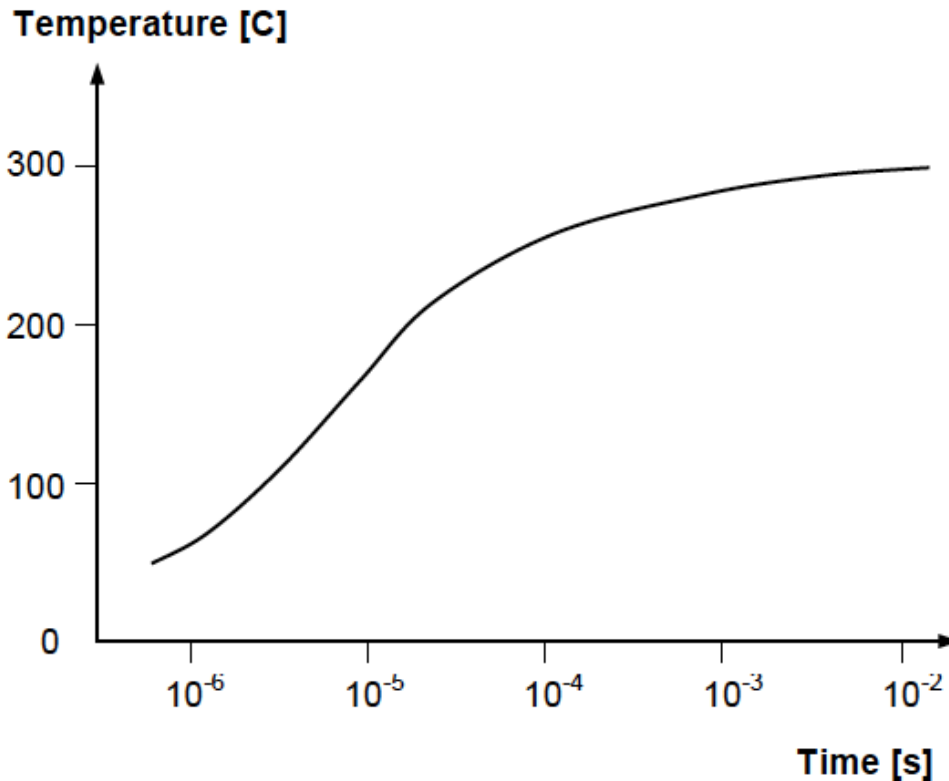
I følge denne formelen, er det kun spenningsfallet over kontaktpunktet som bestemmer temperaturen i kontaktpunktet. Sammenhengen mellom den maksimale temperaturen i kontaktpunktet og spenningsfallet over kontaktpunktet er vist i Figur 6. For lave spenningsfall er denne sammenhengen ikke-lineær. Med et økende spenningsfall over kontaktpunktet blir denne sammenhengen mer og mer lineær.



Figur 6 - Sammenhengen mellom maksimal temperatur i kontaktpunktet og spenningsfallet over kontaktpunktet. Den absolutte temperaturen i lederne langt unna kontaktpunktet er $T_0 = 30\text{ °C}$.

Temperaturen som beregnes ved hjelp av Formel 4 beskriver temperaturen meget lokalt i kontaktpunktet. På grunn av metallens gode varmeledningsegenskaper, er temperaturen i resten av kontaktflaten betydelig lavere [15].

Metallens gode varmeledningsegenskaper er også skyld i den hurtige termiske responstiden i kontaktpunktet. Som Figur 6 viser, vil temperaturen variere med spenningen. Denne temperaturendringen skjer så hurtig at den kan følge en 50Hz spenningsvariasjon. Konsekvensen av dette er at et kontaktpunkt, som det går vekselstrøm gjennom, utsettes for 100 store termiske amplitudesykluser hvert sekund. Et eksempel på termisk responstid i et kontaktpunkt er vist i Figur 7. I figuren er det vist hvordan temperaturen stiger i et $50\mu\text{m}$ kontaktpunkt i det kontaktpunktet utsettes for et 150mV spenningsprang. [15]



Figur 7 - Termisk responstid i et 50 μm kontaktpunkt i det kontaktpunktet utsettes for et 150mV spenningsprang[15].

Kontaktmotstandens temperaturavhengighet kan beskrives av Formel 6[14-16]. Denne formelen er bare en tilnærming av virkeligheten. Forskjellen fra formelen som beskriver den temperaturavhengige elektriske resistansen i en leder, Formel 5[16], er at temperaturkoeffisienten er redusert til $\frac{2}{3}$ av dens opprinnelige verdi.

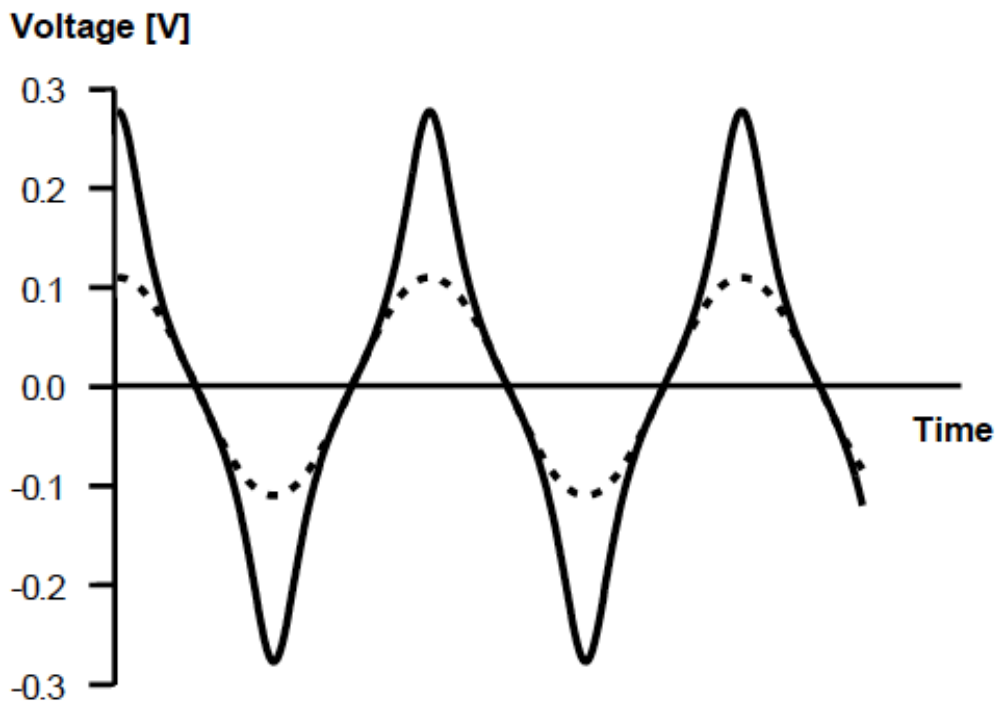
$$\rho_{\theta_2} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha(\theta_2 - 20^\circ\text{C})) \quad \text{Formel 5}$$

I Formel 6 beskriver $R(T_0)$ kontaktmotstanden i det tilfellet at strømmen som går gjennom kontaktmotstanden er så liten at den ikke forårsaker noen betydelig oppvarming av kontaktpunktene. Grunnen til at kontaktmotstandens temperaturavhengighet er mindre enn en leders temperaturavhengige resistans, er at oppvarmingen i et kontaktpunkt er meget lokal. Bare en liten del av kontaktmotstanden blir oppvarmet.

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + \frac{2}{3}\alpha(T_{max} - T_0)) \quad \text{Formel 6}$$

3.1.3 Sammenheng mellom temperatur, motstand, strøm og spenning

Konsekvensen av en forhøyet motstand i kontaktpunktet når kontaktpunktet utsettes for vekselstrøm, er at forholdet mellom strøm gjennom kontaktmotstanden og spenningen over kontaktmotstanden ikke er lineært. Ved strømmens nullgjennomgang kjøles kontaktmotstanden ned, og motstanden i kontaktpunktet er lik motstanden i resten av kontaktflaten. Dette var beskrevet i forbindelse med Formel 4. Når strømmen etter hvert øker, øker også spenningen. Av Figur 8 kan det sees at strøm og spenning like etter nullgjennomgang er proporsjonal. I det spenningen har steget til omkring 60-70mV, har temperaturen i kontaktpunktet steget så mye at resistansen er betydelig forhøyet. I det strømmen når sin maksimalverdi, har resistansen i kontaktpunktet steget så mye siden nullgjennomgang at verdien er mer enn fordoblet. Et spenningsforløp av en slik art er en tydelig indikasjon på at kontaktforbindelsen er i dårlig forfatning. [15]



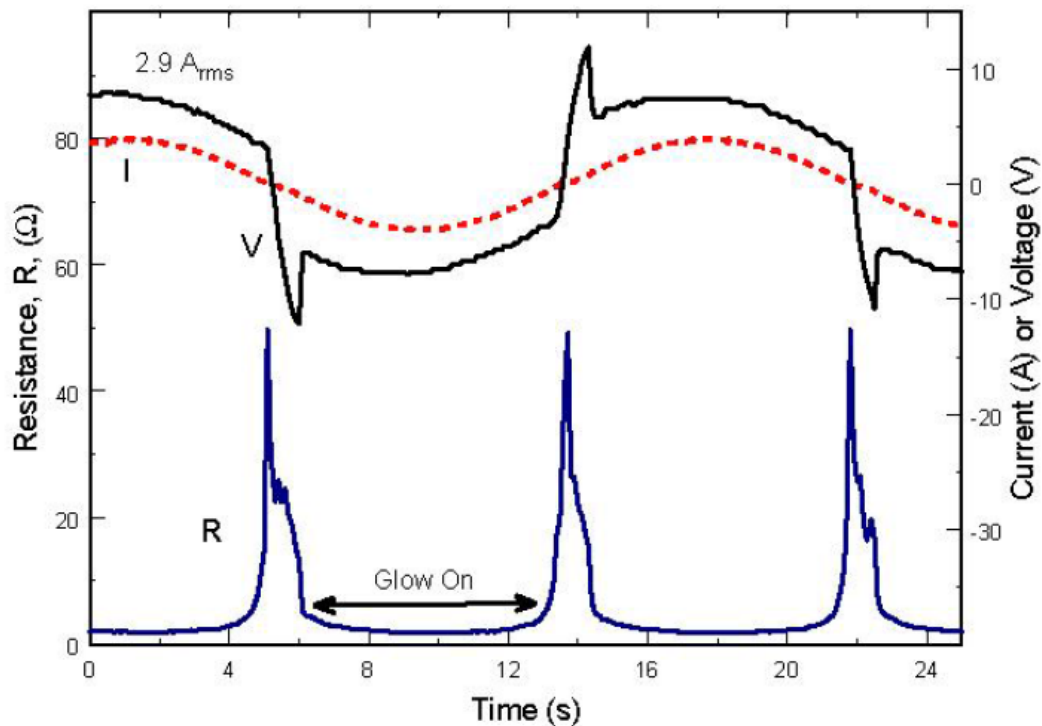
Figur 8 - Den heltrukne linja viser spenningsfallet over en dårlig kontaktforbindelse, når det går en vekselstrøm gjennom kontaktpunktet. Den sinusformede vekselstrømmen som går gjennom kontaktpunktet er vist med punktert linje. [15]

I en dårlig kontaktforbindelse kan det forventes et spenningsfall over kontaktpunktet omkring 100mV eller mindre, i følge Shea. Dette skiller seg klart fra hva som kan forventes av spenningsfall ved glødende kontaktforbindelser. Det kan forventes et spenningsfall på omkring 1-10 Volt ved glødende kontaktforbindelser hvor smeltede metalloksider ved temperaturer omkring 1200 °C inngår. [17]

Shea og Zhou har gjort forsøk med glødende kontaktforbindelser av ulike metaller og strømnivåer. Glødende kontaktforbindelser ble laget ved å skape og bryte kontakten

mellom ledere frem til gløding oppstod. En glødende kontaktforbindelse mellom to kobberledere ble klassifisert som vanskelig å lage, da det krevdes hundretalls sykluser med å skape kontakt for så å bryte kontakten igjen, før gløding oppstod. Lederne oksiderte, og det ble dannet både Cu_2O og CuO . [17]

Under forsøkene til Shea og Zhou ble to kobberledere med en diameter på 1mm utsatt for vekselstrøm på $2,9\text{A}_{\text{rms}}$. Figur 9 viser sammenhengen mellom den dynamiske resistansen, strømmen og spenningen ved glødende kontaktforbindelse. Av figuren kan det sees at i det strømmen har sin nullgjennomgang, økes oksidresistansen betydelig. Dette resulterer i en spiss på spenningsforløpet nær strømmens nullgjennomgang. Grunnen til at dette skjer er at glødetemperaturen reduseres når strømmen nærmer seg nullgjennomgang. Ved strømmens nullgjennomgang er glødetemperaturen ved sitt minimum. En reduksjon av temperaturen øker oksidresistansen. [17]

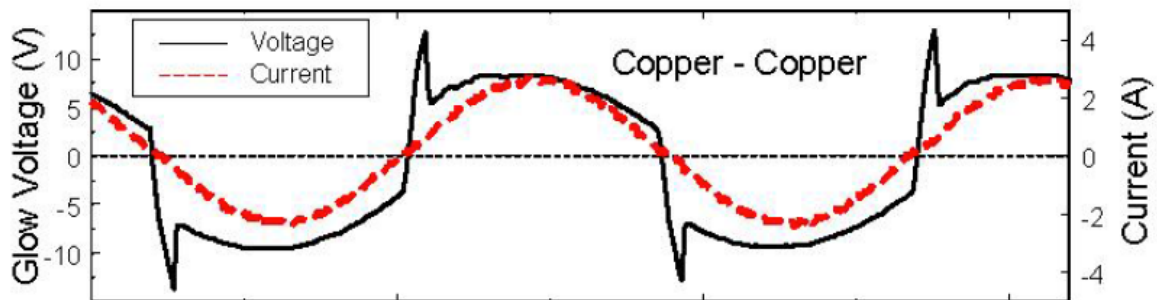


Figur 9 - Den dynamiske resistansen ved en glødende kontaktforbindelse mellom to 1mm kobberledere utsatt for vekselstrøm, $2,9\text{A}_{\text{rms}}$. Figuren viser en stor økning i kontaktpunktets resistans nær strømmens nullgjennomgang. [17]

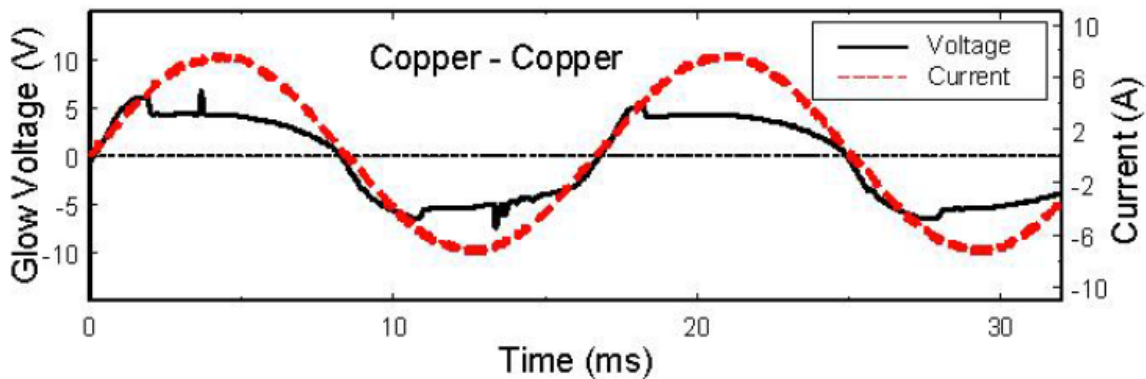
Figur 10 og Figur 11 viser resultatene av målt spenning og strømforløp ved glødende kontaktforbindelse mellom to kobberledere. Kobberledernes diameter var 1mm. I Figur 10 var strømmen i kretsen $1,6\text{A}_{\text{rms}}$. Som det kan sees av figuren har spenningen en tydelig spiss ved strømmens nullgjennomgang.

Seriefeil

I Figur 11 er strømmen i kretsen økt til $5A_{rms}$. Ved strømmens nullgjennomgang faller ikke temperaturen nok til at det oppstår en vesentlig økning i oksidresistans i kontaktpunktet. Resultatet av det er at den spisse økningen i spenningsverdi er flatet ut. Bare en liten endring kan sees på spenningen i Figur 11. Økes strømmen tilstrekkelig, vil det være vanskelig å se noen endringer på spenningen i det hele tatt. Dette skyldes liten temperaturendring og dermed liten endring i resistansen ved strømmens nullgjennomgang.



Figur 10 - Strøm og spenningsforløp ved glødende kontaktforbindelse mellom to 1mm kobberledere. Strømmen i kretsen er $1,6A_{rms}$. [17]

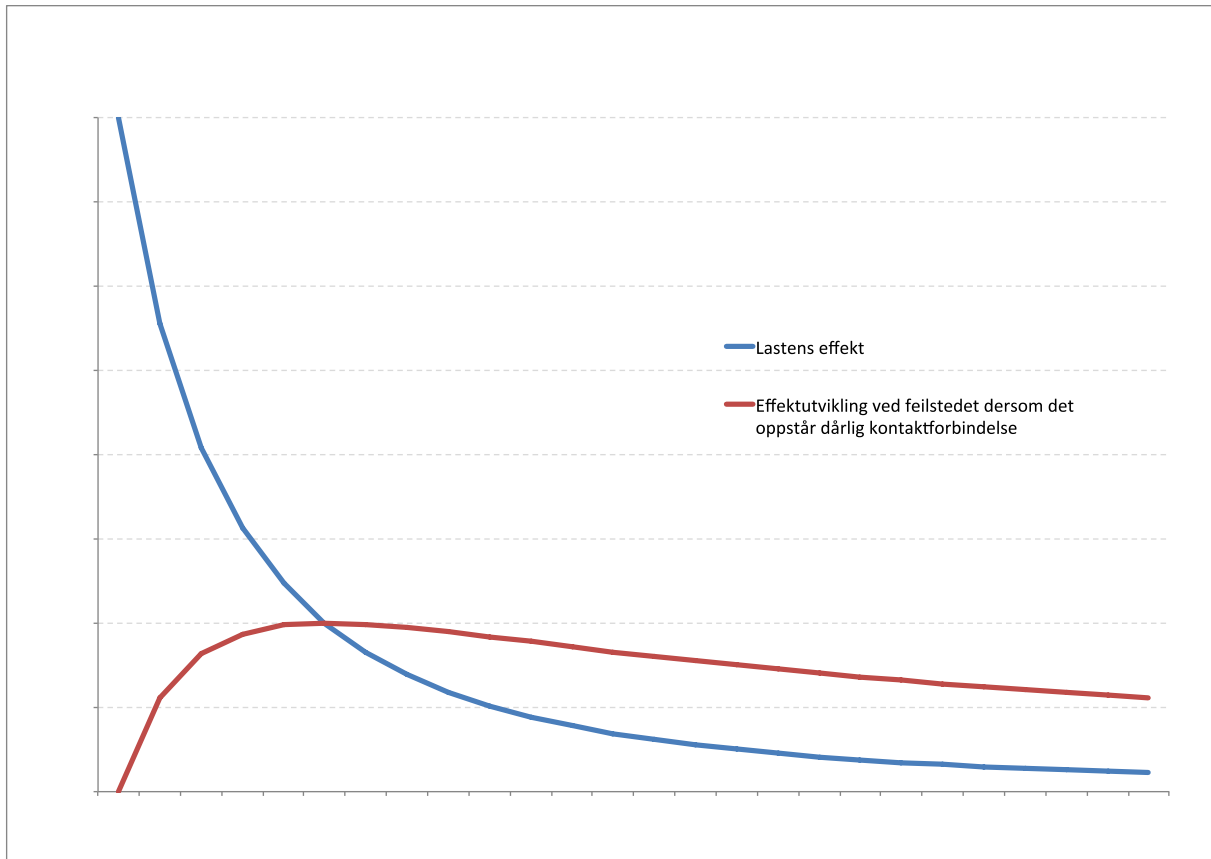


Figur 11 - Strøm og spenningsforløp ved glødende kontaktforbindelse mellom to 1mm kobberledere. Strømmen i kretsen er $5A_{rms}$. [17]

Dersom verdien på strømmen økes, vil dette føre til en økt oppvarming av kontaktpunktet. Med økende oppvarming av kontaktpunktet, tar det også lengre tid å kjøle ned kontaktpunktet i det strømmen har sin nullgjennomgang. Økes strømmen tilstrekkelig, vil ikke temperaturen rekke å reduseres til en temperatur som ikke forårsaker betydelig oppvarming, T_0 . Det betyr at temperaturendringen fra strømmens nullgjennomgang til strømmens maksimalverdi er mindre. Resistansen endres dermed ikke like mye etter en nullgjennomgang.

3.1.4 Effektutvikling ved dårlig kontaktforbindelse

Ved dårlig kontaktforbindelse vil det oppstå en effektutvikling ved feilstedet grunnet forhøyet motstand. Feilstedet introduserer et nytt punkt i kretsen med effektutvikling, og spenningen fordeles dermed over lasten og over feilstedet. I Figur 12 er lastens og feilstedets effektutvikling beregnet i et tilfelle der lastens opprinnelige effekt er 4000W. Figuren viser hvordan effekten utvikler seg i de to punktene dersom resistansen i den dårlige kontakten fortsetter å øke gradvis. Den horisontale akse viser forholdet mellom resistansen ved feilstedet og resistansen til belastningen.



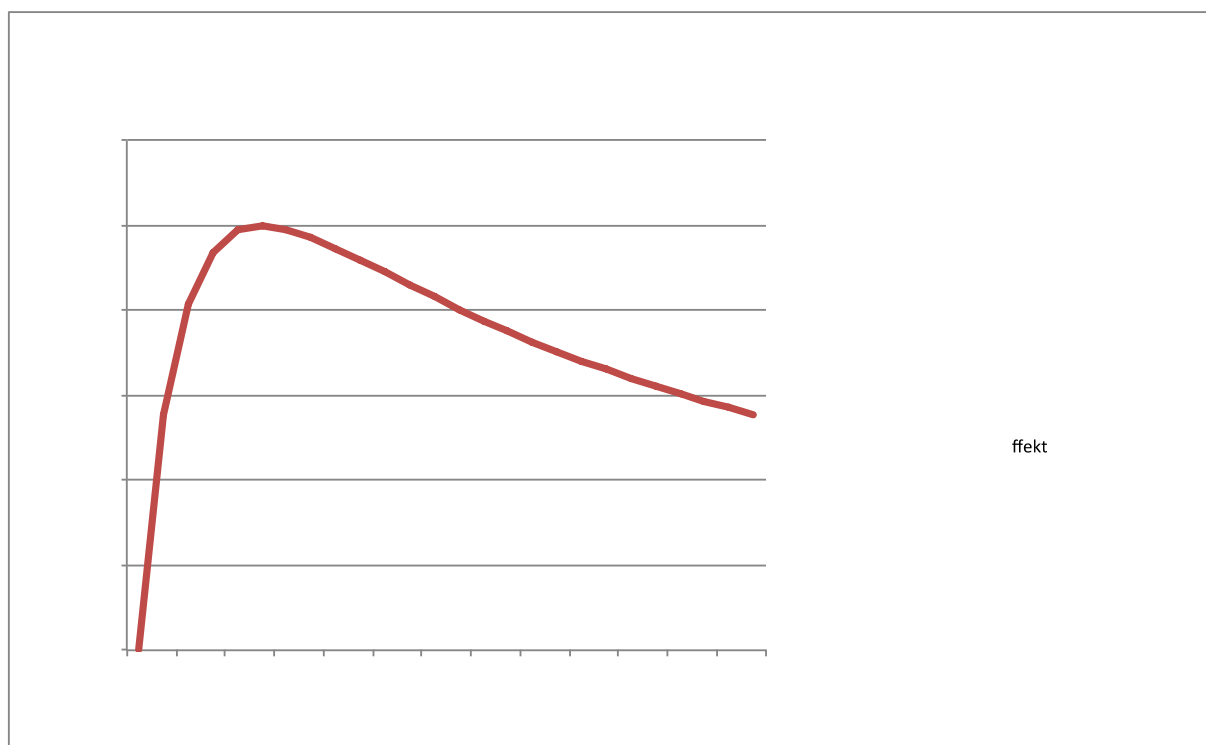
Figur 12 - Lastens og feilstedets effektutvikling ved dårlig kontaktforbindelse. Økt motstand ved feilstedet vil føre til en økt total motstand i kretsen, hvilket resulterer i at strømmen som flyter i kretsen reduseres. Spenningen fordeles seg over både feilstedets motstand og lasten. Dermed reduseres belastningens effekt, samtidig som effektutviklingen ved feilstedet øker, frem til resistansen er lik for belastningen og feilstedet. Den maksimale effektutviklingen som kan oppstå ved feilstedet er en fjerdedel av belastningens opprinnelige effekt.

Av Figur 12 kan det sees at effekten som oppnås i den dårlige kontaktforbindelsen maksimalt er 1000W. 1000W tilsvarer en fjerdedel av belastningens opprinnelige effekt. Dette er en regel som vil gjelde uansett hva belastningens effekt er; effektutviklingen ved en dårlig kontaktforbindelse er maksimalt 25 % av belastningens opprinnelige effekt. Ved dette tilfellet er resistansen ved feilstedet like stor som resistansen til belastningen. Spenningen fordeles da likt mellom punktene, og effektutviklingen er like stor i begge punktene ved dette tidspunktet. Dette er stedet som grafene krysser hverandre i Figur 12.

Seriefeil

Figur 13 viser det samme som eksempelet som er vist i Figur 12. I Figur 13 er effektutviklingen ved feilstedet vist i forhold til belastningens opprinnelige effekt. Det kan leses direkte av grafen at den maksimale effektutviklingen ved feilstedet er 25 % av den opprinnelige effekten til belastningen.

Feilstedet er ofte veldig lite. Det betyr at effekten per volum er høy. Konsekvensen av dette er en voldsom varmeutvikling ved feilstedet. Varmeutviklingen kan bli stor nok til at lederne oksiderer og danner en glødende kontaktforbindelse. En slik glødende kontaktforbindelse har en temperatur omkring smeltepunktet til kobberoksid, 1235 °C [2, 3].



Figur 13 - Effektutviklingen ved dårlig kontaktforbindelse i forhold til belastningens opprinnelige effekt. Når resistansen til belastningen og resistansen i den dårlige kontaktforbindelsen er like stor, oppstår den maksimale effektutviklingen ved feilstedet. Den maksimale effektutviklingen ved feilstedet er 25 % av belastningens opprinnelige effekt.

I masteroppgaven "Seriefeilvern i elektriske installasjoner" ble det utført forsøk med dårlige kontaktforbindelser i en testvegg [13]. Den dårlige kontaktforbindelsen var en stikkontakt, der den ene lederen ikke ble skrudd skikkelig til. Effektutviklingen som ble oppnådd i forsøkene, er gjengitt i Tabell 1. Testveggen som blir brukt, er nærmere beskrevet i kapittel 8.2.1. $P_{\max, \text{øvre del av vegg}}$ er effektutviklingen i et koblingspunkt i veggens øvre del, der det er 5cm mer isolasjon enn i veggens nedre del.

Seriefeil

Tabell 1 - Effektutvikling i dårlig kontaktforbindelse ved ulike strømmer og ledertverrsnitt. Dette er resultat av forsøk utført i masteroppgaven "Seriefeilvern i elektriske installasjoner" av Carl Olav Larsson[13]. Forskjellen på øvre og nedre del av vegg, er at det er 5cm mer isolasjon i veggens nedre del.

Ledertverrsnitt	Belastningsstrøm	P _{max} , øvre del av vegg	P _{max} , nedre del av vegg
2,5mm ²	15,5A	4,79W	4,60W
2,5mm ²	17,5A	8,86W	8,79W
1,5mm ²	15,5A	2,79W	3,35W
1,5mm ²	17,5A	5,51W	6,16W
0,75mm ²	15,5A	9,33W	6,31W

Stensaas skriver i rapporten "Branner på grunn av elektrisk installasjonsmaterieill" at et kontaktpunkt med dårlig kontaktforbindelse kan oppnå en varmeutvikling på 30-40W ved 15-20 Ampere [8]. En varmeutvikling på 30W ved 15A, tilsvarer et spenningsfall i kontaktpunktet på 2V. I følge Shea er dette i området en kan forvente spenningsfall på ved glødende kontaktforbindelser, 1-10V [17].

Hva resultatene til Larsson viser, er at det har vært en dårlig kontaktforbindelse til stede. Denne dårlige kontaktforbindelsen har ført til varmeutvikling ved feilstedet. Det at det måles en effektutvikling mellom 3,35W og 6,31W tilsvarer et spenningsfall over feilstedet på mellom 0,22V-0,41V. Dette er innenfor området av hva en kan forvente av spenningsfall ved motstandsoppvarming, et par hundre mV [17].

3.1.5 Kobberoksid, temperatur og glødende filament

Når lederne varmes tilstrekkelig opp på grunn av innsnevringmotstanden, vil det dannes kobberoksid på overflaten av lederne. Dersom temperaturen i koblingspunktet er under 250 °C, vil det dannes Cu₂O. Overstiger temperaturen 250 °C, vil oksidbelegget være CuO. Omkring 900 °C-1000 °C, vil CuO igjen gå over til å bli Cu₂O [14]. Kobberoksid leder strøm, men denne ledningsevnen er vesentlig dårligere enn ledningsevnen til kobber. Kobberoksid er klassifisert som en halvleder [8, 14, 16, 18].

Halvlederegenskapene til kobberoksidet innebærer en forhøyet motstand i forhold til kobber. Den forhøyede motstanden leder til varmgang. Når lederne varmes opp, vil det dannes mer kobberoksid. Prosessen er progressiv. Temperaturen kan utvikle seg til å bli så høy at kobberoksid dannelsen begynner å gløde. Gløding oppstår når temperaturen ligger i området 1200-1300 °C. Dette er temperaturer som ligger omkring smeltepunktet til kobberoksidene. Kobber smelter ved 1083 °C, kobberoksidet Cu₂O har sitt smeltepunkt ved 1235 °C, og CuO smelter ved 1326 °C. [17, 19]

Før en glødende kontaktforbindelse oppstår, har flere forsøk vist at det oppstår gnister eller lysbuer mellom lederne i kontaktpunktet [12, 14, 17, 19]. Det er ukjent hvorvidt det er mulig å starte en glødende kontaktforbindelse uten at det har vært noen lysbue tilstede først [17]. En lysbue mellom lederne vil kunne gi en betydelig oksidering av lederne, hvilket er nødvendig for at gløding skal kunne oppstå [12, 20]. Forholdet mellom oksidasjon og gløding ble bevist ved at det ble forsøkt laget en glødende kontaktforbindelse i et oksygenfattig miljø. Dette var ikke mulig. Det ble også forsøkt å opprettholde en allerede gløding i et oksygenfattig miljø. Det viste seg at glødingen opphørte ved mangel på oksygen [3, 12].

En lysbue mellom kobberledere vil som nevnt føre til oksidasjon av kobberet i kontaktpunktet. Dette oksidet legger seg som en ledende bro mellom lederne [4, 9, 14, 19, 21, 22]. Tverrsnittet til en slik ledende bro er lite, og strømtettheten vil derfor bli stor når all strøm skal passere gjennom kontaktpunktet. Den forhøyede strømtettheten og økte motstanden i kontaktpunktet gir en varmeutvikling i kontaktpunktet [14, 15, 22].

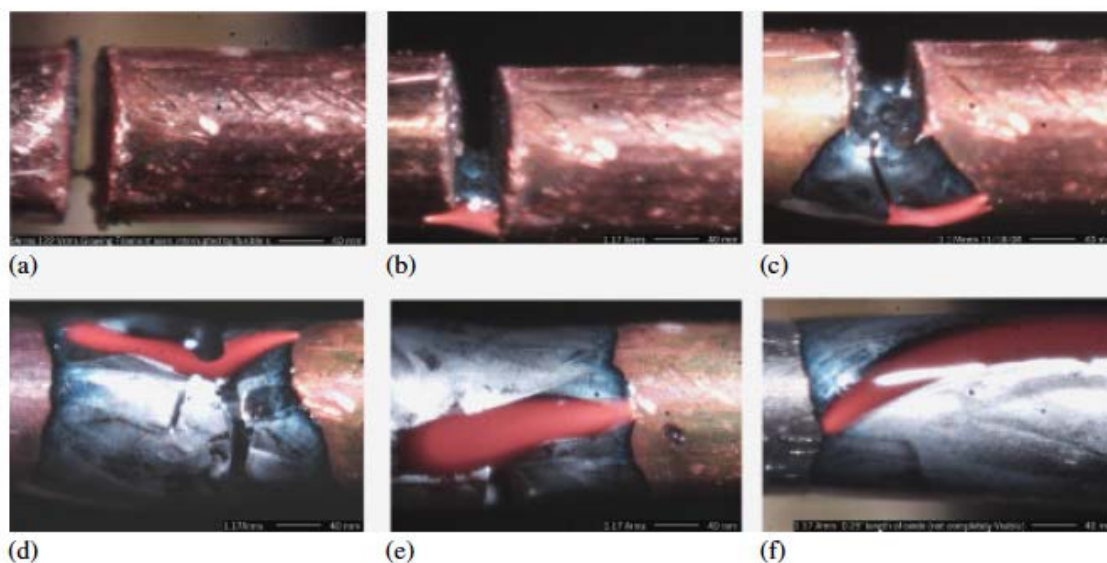
John Shea har gjort forsøk med glødende kontaktforbindelser [2, 3, 17]. Forsøkene hans har vist at kobberbroen kan sees på som en parallellkobling eller som en serie- og parallellkobling mellom glødende, flytende Cu og Cu₂O og fast CuO[3]. Forsøkene viste også at da det var en glødende kontaktforbindelse tok bare en liten del av strømmen veien om den faste broen av CuO. Hoveddelen av strømmen gikk gjennom den glødende væsken av Cu og Cu₂O.

Det ble også dokumentert at dersom strømmen var mindre enn 5A_{rms} sluttet kontaktforbindelsen å gløde ved strømmens nullgjennomgang, og all strømmen tok veien om den faste broen av CuO. Dette resulterte i karakteristiske kjennetegn på spenningen, en sagtannliknende form. Dersom strømmen var større enn 5A_{rms}, slukket ikke glødingen ved strømmens nullgjennomgang. Spenningen viste ikke noen karakteristisk form ved høyere strømmer.

Shea målte også temperaturen ved glødende kontaktforbindelse. Resultatet bekreftet en temperatur på omtrent lik smeltepunktet til Cu₂O, 1235 °C [2, 3]. Med økende strøm steg også temperaturen i det glødende filamentet mellom lederne. En strøm på 7,5A_{rms} resulterte i en temperatur på 1730 °C. Med enda høyere strømmer kan temperaturen stige opp til fordampningstemperaturen til Cu₂O, som er 1800 °C. Martel nevner en øvre grense på 10A ved glødende filament [12]. Dersom strømmen overstiger denne verdien, blir det vanskelig å opprettholde glødingen. Temperaturen overstiger fordampningstemperaturen til Cu₂O, og det glødende filamentet blir ustabil. Et ustabil glødende filament vil resultere i lysbue mellom kobberlederne. Dette er en av måtene en lysbue kan bli dannet på ved lavere spenning.

Det glødende filamentet som dannes mellom to kobberledere vandrer på overflaten av kobberoksidet [17, 19]. Figur 14 viser fotografier av utviklingen av et glødende filament. Bilde (a) viser kobberoksidbroen i det den akkurat har blitt dannet. Videre hendelsesforløp er dokumentert i bildene (b) til og med (f). Kobberlederne som ble benyttet i dette forsøket hadde en diameter på 1mm, og den initiale strømmen i kretsen var 1,17A_{rms}. Den faste delen av kobberoksidet, CuO, kan sees som den sorte delen av broen mellom lederne. Det glødende filamentet er en blanding av flytende Cu₂O og kobber. Figur 14 er bilder fra et forsøk utført av Shea. [2]

Seriefeil



Figur 14 - Dette er bilder som viser hvordan en kobberoksidbro vokser og hvordan et glødende filament oppstår og vokser på overflaten av kobberoksidbroen. Kobberoksidet vises som det sorte området mellom kobberlederne. Kobberlederne har en diameter på 1mm. Bildene er forstørret 37 ganger. Strømmen som initielt gikk gjennom kobberlederne var $1,17A_{rms}$. (a) initielt filament $t=0$, (b) oksidet vokser $t=2min$, (c) $t=8min$, (d) $t=28min$, (f) $t=64min$. [2]

Som Figur 14 viser, vil det i en glødende kontaktforbindelse mellom kobberledere oppstå et glødende filament som vandrer omkring på overflaten til oksidbroen. Formen på det glødende filamentet endres med strømnivået. Ved å øke strømmen vokser det glødende filamentet, som etterhvert kan komme til å dekke hele oksidoverflaten. Ved strømmer over $5A_{rms}$ vil det glødende filamentet få en mer kuleliknende form og bli mer ustabil. Grunnen til at dette skjer kan være at den termiske konduktiviteten til kobber reduseres drastisk fra $357W/m^{\circ}K$ ved $1000^{\circ}C$ til $167W/m^{\circ}K$ ved $1400^{\circ}C$. [17]

Gløding kan oppstå ved strømmer så lave som $0,15A$ til $0,8A$ [12]. Shea målte glødespenningen, og fant at den holdt seg relativt konstant selv om det glødende filamentet økte med tiden. For at dette skal være mulig, må oksidresistansen reduseres med økende lengde på det glødende filamentet. Det ble dokumentert en nesten lineær økning i effekt med økende strøm gjennom det glødende filamentet. At oksidresistansen reduseres med økende strøm skyldes at oksidet har en negativ temperaturkoeffisient for resistivitet. [17]

Fordi deler av strømmen tar veien om det glødende filamentet, og deler av strømmen tar veien om den faste kobberoksidbroen, vil glødespenningen være bestemt av en parallellkobling mellom de to resistansene. [17]

Sletbak m.fl. skriver i artikkelen "Glowing contact areas in loose copper wire connections" at antennelse trolig skjer på grunn av gløding [19]. Temperaturene ved glødende kobberoksid er høy nok til å kunne antenne samtlige vanlige brennbare materialer[8]. Martel fant på den andre siden at lysbuer oppstod i antennelsesøyeblikket hver eneste gang han lyktes i å antenne isolasjonsmaterialer, da han forsøkte å antenne materialene med glødende kontaktforbindelser [12].

3.2 Lysbue

En lysbue kan defineres som en lysende elektrisk utladning av høy temperatur over et isolerende medium [4, 8, 13, 23, 24]. Store norske leksikon definerer lysbue som "en lysende, buet strømbane som går mellom to strømførende metall- eller kullstifter i luft" [23]. Carl Olav Larsson definerer i sin masteroppgave lysbue som "en lysende elektrisk utladning mellom elektrisk ledende materialer over et isolerende medium" [13]. Dette er en noe vag definisjon av lysbue, som ikke skiller mellom lysbue og gnist.

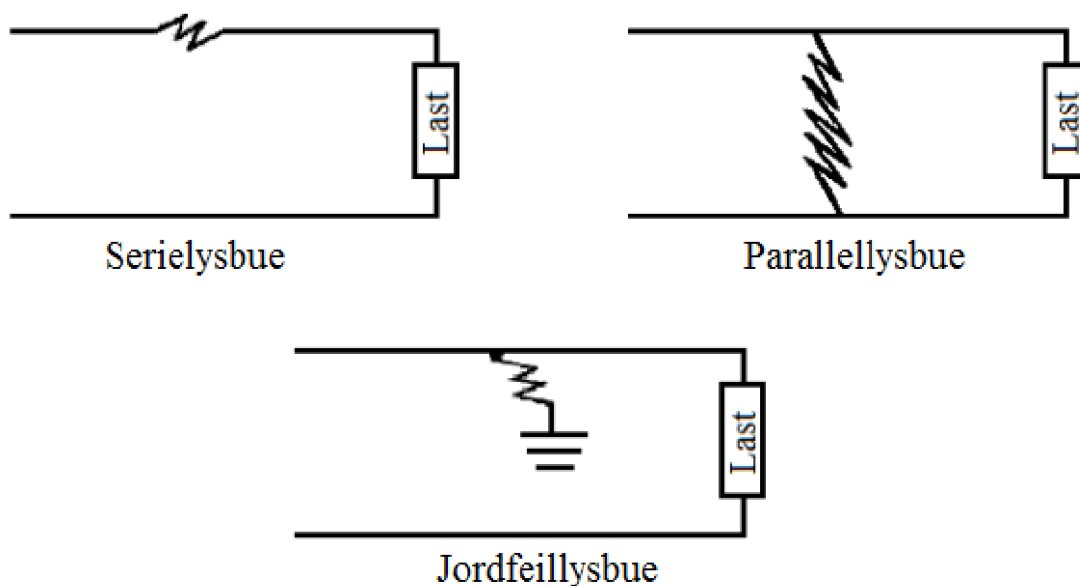
Babrauskas skriver i sin "Ignition handbook" [9] at en lysbue er en stabil utladning mellom to elektroder, der termionemisjoner responsmekanismen som vedlikeholder lysbuen [9]. Termionisk emisjon er en frigjøring av elektroner fra overflaten av et stoff som følge av tilført varmeenergi [25, 26]. Dersom en utladning pågår over en tid, vil til slutt katoden varmes opp tilstrekkelig til at termionemisjon fra katoden blir en viktig mekanisme for å frigjøre elektroner. Situasjonen vil da være en lysbue.

Store norske leksikon forklarer hvordan en lysbue oppstår, ved å studere elektrodeemisjonen fra glødende metaller [23]. Når en katode varmes opp, sender den ut elektroner. Disse elektronene beveger seg mot anoden, og oppnår tilstrekkelig fart til at de klarer å slå løs nye elektroner fra molekyler i luften. Dersom spenningen blir tilstrekkelig høy til at hvert elektron i gjennomsnitt slår løs minst ett annet elektron, er dette en elektrisk utladning. Dette kalles støt-ionisasjon [23, 27]. Etter hvert som flere og flere elektroner slås løs, øker strømmen. Med økende strøm, øker også ionisasjonen, som igjen øker strømmen. Strømmen i en lysbue er derfor ikke stabil. En elektrisk utladning kan observeres som en kortvarig gnist eller som en lysbue. Den primære forskjellen mellom en gnist og en lysbue er at en gnist er et transient fenomen, mens en lysbue vil ha en viss varighet [9].

3.2.1 Ulike typer lysbue

Lysbuer kan opptre i to former, som parallelllys bue eller som serielys bue [4, 13, 28]. En parallelllys bue er en lysbue mellom to ledere. Jordfeillys bue er også en type parallelllys bue, som oppstår i parallell med leder og jord. Effekten i en parallelllys bue er vesentlig større enn i en serielys bue, og vil ofte kunne løse ut overstrømsvernet. En serielys bue er en lysbue som oppstår i serie med lederen. Dersom det blir et brudd i lederen, vil det kunne oppstå en elektrisk utladning i form av en lysbue. Lysbuestrømmen i en serielys bue vil ikke kunne bli større enn belastningsstrømmen, og dermed ikke være i stand til å løse ut et overstrømsvern [9, 21, 28]. De ulike formene for lysbue er vist i Figur 15.

Seriefeil



Figur 15 - Typer av lysbuer

3.2.2 Hvorfor en lysbue oppstår

Der finnes tre hovedgrunner til at en lysbue oppstår[11]:

1. Karbonisering av isolasjonen

Lysbuer og krypestrømmer kan være et resultat av karbonisert isolasjon omkring lederen [4, 8, 9, 11, 18]. Forkullingen av isolasjonen kan skje som følge av fukt og forurensninger, som over tid danner et forkullet spor i isolasjonen. Det vil på overflaten av isolasjonen da kunne gå krypestrømmer og dannes lysbue. Forskjellige materialer vil være mulige å forkulle av ulik grad. I følge Babrauskas er PVC en av de minst tilfredsstillende polymerne med tanke på karbonisering [11]. Isolasjonsmaterialet PVC sine uheldige egenskaper med tanke på dannelse av lysbue ble også bekreftet ved forsøk utført av Martel [12]. Dette er meget uheldig da PVC er blant de vanligste isolasjonsmaterialene til kabler. Et forsøk der PVC ble korttids varmeeeksponert, omkring 10 timer, viste at PVC begynte å forkulle allerede ved en temperatur på 160 °C. Ved langtidseksponering kunne forkullingen foregå ved bare 70 °C [18]. Forkullet PVC opptrer som en halvleder.

2. Ytre ionisering av luften

En elektrisk utladning kan skje ved lavere spenning enn ved luftens gjennomslagsspenning, dersom luften på forhånd har blitt ionisert. En forutgående lysbue eller flammer i nærheten kan være en utløsende faktor for at en lysbue oppstår, da dette er hendelser som vil ionisere luften. Ionisert luft kan forflytte seg en avstand, og dermed føre til at det oppstår lysbuer et annet sted enn der luften ble ionisert[8, 11].

Lysbueødeleggelse er meget vanlig å finne ved brannsteder. Hvorvidt lysbuen er årsaken til at brannen i utgangspunktet oppstod, eller om den har oppstått som følge av en allerede antatt, kan være meget vanskelig å avgjøre under en brannetterforskning.

3. Kortslutning

En kortslutning kan beskrives som en feil med lav resistans og høy strøm, som plutselig oppstår i en krets. En slik feil kan oppstå på to måter, en full kortslutning med metallisk kontakt mellom lederne, eller som en kortslutningslysue. I en kortslutningslysue vil den metalliske kontakten mellom lederne opphøre, og en lysue er forbindelsen mellom lederne. [11]

I en kortslutningslysue er strømmen begrenset kun av impedansen i ledningsnett. I det en metallisk kontakt mellom to strømførende ledere oppstår, vil det utvikles tilstrekkelig varme til at metallet smelter. I den metalliske forbindelsen brytes, oppstår det lysuer mellom lederne. [11]

Omkringliggende materialer vil da kunne antennes direkte av lysuen ved pilotantennelse, eventuelt som følge av oppvarming og spontanantennelse. Ved en kortslutning mellom to ledere, vil strømstyrken normalt være høyere enn den strømstyrken som overstrømsvernet løser ut ved. Det betyr at overstrømsvernet beskytter mot en større andel av kortslutningsfeilene som kan oppstå i en boliginstallasjon. [11]

Det finnes likevel tilfeller hvor overstrømsvernet ikke løser ut ved en kortslutning. Dette kan skyldes at kortslutningsstrømmen er periodisk, slik at gjennomsnittsverdien til strømmen er lavere enn strømstyrken som overstrømsvernet løser ut ved [8]. Dersom impedansen i ledningsnett er stor, eksempelvis på grunn av langt ledningsnett eller utstrakt bruk av skjøteledninger, vil dette redusere strømstyrken [8]. Det er dermed en mulighet for at strømstyrken blir redusert nok til at den ikke løser ut overstrømsvernet ved en kortslutning.

I rapporten "Branner på grunn av elektrisk installasjonsmaterieil" [8] hevdes det at brennbare materialer vanskelig lar seg antenne av en kortslutningslysue i en vanlig strømkrets, dersom kretsen er beskyttet av et overstrømsvern som løser ut ved 20 Ampere eller mindre. Likevel beskriver Babrauskas flere forsøk med kortslutningslysuer som har antent mer lettantennelige materialer, til tross for at kretsen var beskyttet av en 20A automatsikring [11]. Ikke bare lysuen alene, men også smeltede biter av metall som ble slynget vekk fra feilstedet, antente lettantennelige omkringliggende materialer.

3.2.3 Hvordan en lysue oppstår

Babrauskas beskriver fire ulike måter en lysue kan oppstå [9]:

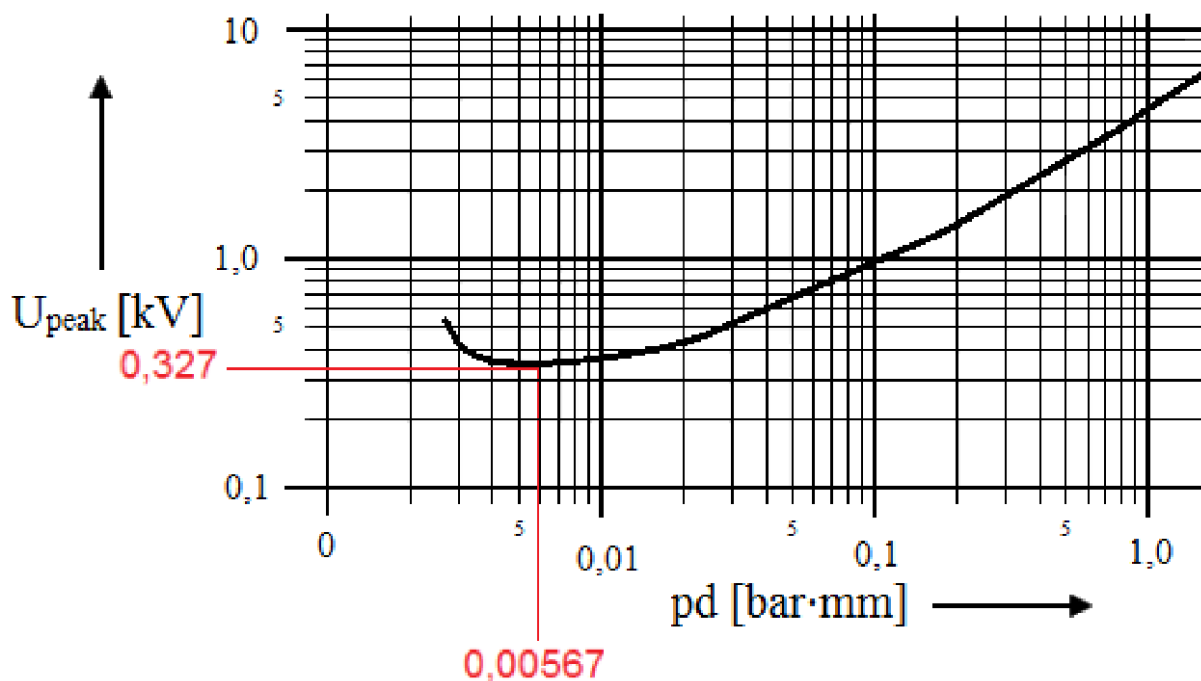
1. En lysue oppstår når den elektriske spenningen over to elektroder blir høyere enn gjennomslagsspenningen til materialet som skiller elektrodene. Det vil da oppstå en gnist mellom elektrodene. Denne gnisten vil kunne utvikle seg til en lysue dersom

Seriefeil

strøm og spenning er tilstrekkelig høy. Dette er en utladning som normalt bare vil forekomme ved spenning høyere enn 600V [9].

2. To elektroder beveges mot hverandre slik at kontakt oppnås, deretter skilles de fra hverandre. Når lederne dras fra hverandre dannes en lysbue. Dersom avstanden blir for stor slukker lysbuen. Lysbuer kan på denne måten skapes, selv med lavere spenning.
3. Dersom det dannes en karbonisert vei mellom ledere, kan det oppstå lysbuer som tar veien om den karboniserte veien.
4. En glødende kontaktforbindelse mellom ledere kan føre til dannelse av lysbue.

Paschenkurven beskriver den laveste gjennomslagsspenningen for luft ved en gitt temperatur. Paschens lov uttrykkes som funksjon av avstanden mellom elektrodene og trykket. Som det kan sees av Figur 16, er den laveste gjennomslagsspenningen for luft, ved 20 °C, 327V. Det betyr at det ikke vil være mulig å få en lysbue over et luftgap ved vanlig nettspenning, 230VAC, uavhengig av avstanden mellom elektrodene. En lysbue som oppstår på denne måten er derfor ikke et problem i boliginstallasjoner.



Figur 16 - Paschenkurven for luft ved 20 °C [13].

3.3 Lysbuens egenskaper

Lysbuens egenskaper er i stor grad avhengig av spenningen, avstanden mellom elektrodene, elektrodenes overflate og kretsens impedans [21].

3.3.1 Temperaturen i en lysbue

Temperaturen i en lysbue langt over antennelsestemperaturen til omkringliggende materialer. I litteraturen finnes ulike tall for hva som kan forventes av temperatur i en serielysbue, men de fleste kildene oppgir en temperatur på 5000 °C-6000 °C inne i selve lysbuen [4, 29]. Babrauskas skriver at temperaturen i en lysbue varierer stort, men at den under omgivelsestrykk på omtrent 1atm kan forventes å være omkring 6000 °C-12000 °C [9]. Hovedfaktoren for hvor høy temperaturen blir i en lysbue er lysbuestrømmen.

3.3.2 Strøm og spenning for å oppnå stabil lysbue

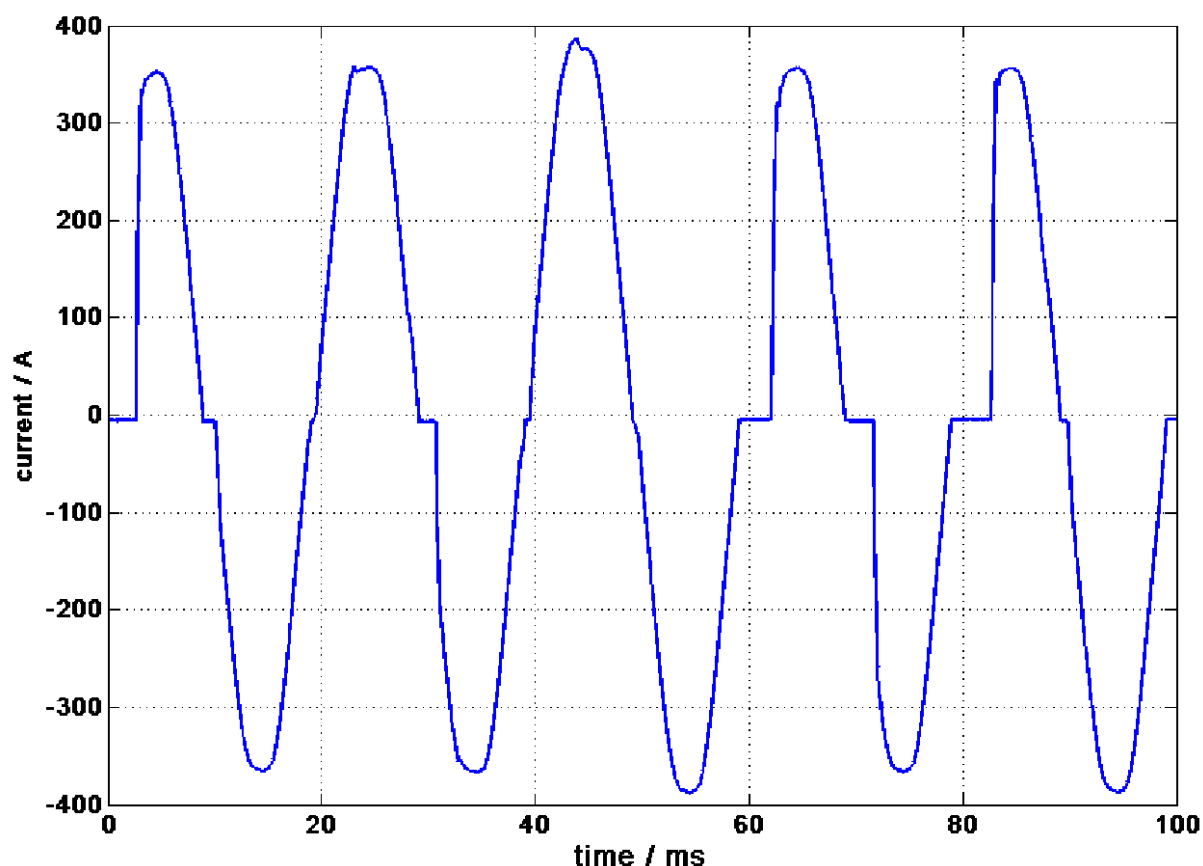
I "Ignition handbook" har Babrauskas samlet verdier på den minste strømmen og spenningen som må til for at en lysbue mellom ulike materialer skal opprettholdes i luft i en rent resistiv krets [9]. Verdiene som er gjengitt av Babrauskas er hovedsakelig fra Zborovszky, da det var verdiene fra hans forsøk som ble vurdert å være mest korrekt. For kobber er den minste spenningen oppgitt å være 13V. Den minste strømmen er oppgitt å være 0,45A. Verdiene er ekstremverdier, og en lysbue kan ikke opprettholdes dersom både strøm og spenning er ved minimumsverdier. Lengden på lysbuen er ved et minimum ved de oppgitte verdiene for minste strøm og minste spenning. Dersom avstanden mellom elektrodene økes, vil minste strøm og spenning øke betraktelig.

Minimum strøm og spenning i en lysbue er avhengig av hvordan en lysbue har oppstått. Eksempelvis vil en lysbue mellom to ledere i luft kreve spenning høyere enn minste gjennomslagsspenning i luft ved den gitte temperaturen. Dette kan finnes av Paschens kurve for luft. Er det derimot en lysbue over en karbonisert vei mellom to ledere, vil strøm og spenning for å opprettholde en stabil lysbue være betydelig redusert. Det er da mulig å oppnå en stabil lysbue mellom lederne selv ved vanlig nettspenning og strømmer godt under 2A [2, 4, 9, 24].

3.3.3 Lysbuekarakteristikk: tidsforløp

I en vekselstrømkrets vil en serielysbue slukke i strømmens nullgjennomgang. Lysbuen kan imidlertid tenne igjen dersom spenningen blir høyere enn gjennomslagsspenningen til det isolerende mediet mellom elektrodene. Perioden fra da lysbuen slukker og fram til lysbuen gjentener viser seg som skuldre på strømkurvene dersom strømmen vises som funksjon av tid [4, 9, 21, 30, 31]. Figur 17 viser en slik typisk strømmåling ved serielysbue [21].

Seriefeil



Figur 17 - Typiske strømmålinger ved en serielysbue. Strømmen er lik null ved hver halvperiode fordi lysbuen slukker og gjentenner når spenningen blir tilstrekkelig høy. Skuldrene til strømmen er ikke lik for hver halvperiode. Dette kan eksempelvis skyldes at kobber noen ganger smelter og danner en ledende bro mellom elektrodene. Dermed vil strømmen gå kontinuerlig. Dette kan være tilfellet etter ca. 50ms i figuren. [21]

Avstanden mellom elektrodene er en av de mest avgjørende faktorene for hvor store skuldrene blir [21]. Jo større avstanden er, dess mer spenning må til for at det skal bli en elektrisk utladning i form av en lysbue over gapet. I tillegg til avstanden mellom lederne, er også tilstanden til mediet mellom lederne av stor betydning. Når lysbuer oppstår, dannes det plasma mellom lederne. Dersom det allerede finnes plasma med lav resistivitet mellom lederne på grunn av en forutgående lysbue, vil dette redusere størrelsen på skuldrene, da gjennomslagsspenningen blir lavere.

Müller m.fl. refererer til en artikkel, "Dreiphasiges phänomenologisches Störlichtbogenmodell zur Berechnung der Stromund Spannungsverläufe", hvor det vises til at skulderstørrelsen også er avhengig av lysbueresistansen og lastinduktansen [21]. Induktive laster vil redusere størrelsen på skuldrene, samt stigningshastigheten til strømmen etter gjenvenning. Er lastens induktans stor i forhold til lysbues resistans, kan skuldrene bli borte.

En serielysbue vil kunne føre til at kobber smelter og danner en ledende kobberoksidbro mellom elektrodene [4, 9, 14, 19, 21, 22]. Dersom det blir dannet en slik ledende bro mellom lederne, vil de karakteristiske skuldrene for en serielysbue forsvinne. Strømmen går kontinuerlig gjennom punktet. Kobberoksidbroen har mindre tverrsnitt og høyere motstand enn resten av kobberlederen. Dette vil føre til oppvarming [14, 15, 22]. Situasjonen er da motstandsoppvarming og sannsynligvis glødende kontaktforbindelse.

Motstandsoppvarming og glødende kontaktforbindelse er beskrevet i kapittel 3.1, og en nærmere beskrivelse av kobberoksidbroen som dannes er beskrevet i kapittel 3.1.5.

Dersom temperaturen i en kobberoksidbro overstiger smeltepunktstemperaturen til kobberoksidet Cu_2O , som er $1800\text{ }^\circ\text{C}$, vil kobberoksidbroen bli ustabil. En slik ustabil kobberoksidbro resulterer i lysbuer, og det kan på denne måten dannes lysbuer ved lavere spenning enn hva Paschens minimum gjennomslagsspenning for luft tilsier. Grunnen til det er at det mellom lederne nå finnes et plasma med helt andre egenskaper enn luft. [2, 3]

3.3.4 Karakteristiske frekvenser ved lysbuer

Det har vist seg at frekvensene som oppstår ved lysbuer er spesielt karakteristiske for lysbuer, og lar seg til en viss grad skille fra andre normale og ufarlige hendelser [21]. Dette kan utnyttes når lysbuevern skal detektere lysbuer [30].

Dongwei Li m.fl. [32] har gjort forsøk med lysbuer i rent resistive kretser, samt i induktive kretser av varierende grad. Frekvens, strøm og spenning fra lysbuer ble sammenliknet med målinger fra andre krevende laster; datamaskiner og klimaanlegg. Det ble funnet at lysbuer kan kjennetegnes ved at det finnes en vesentlig grad av tredjeharmoniske komponenter. Dette i seg selv var ikke tilstrekkelig til å fastslå lysbue, da det viste seg at også datamaskiner lagde spesielt høye verdier av tredjeharmoniske strømmer. Müller m.fl. påstår at det er en spesielt høy forekomst av tredjeharmoniske komponenter ved parallelllysue [21].

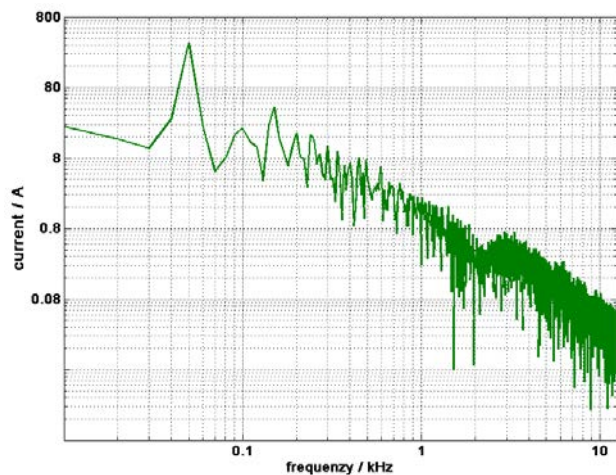
Resultatet av testene til Dongwei Li m.fl. [32] viste at den tredjeharmoniske komponenten til en lysbue ved en rent resistiv krets var nesten 0,25 av den grunnharmoniske frekvensen. Den relative verdien av den tredjeharmoniske komponenten til klimaanlegget viste seg å være 0,06. Testene med de induktive kretsene ble utført med en effektfaktor på 0,22, 0,52 og 0,78. Resultatet av den relative verdien på den tredjeharmoniske komponenten var henholdsvis 0,3, 0,13 og 0,16. Dette støtter påstanden om at det ikke lar seg gjøre å gjenkjenne en lysbue kun basert på deteksjon av en forhøyet andel av tredjeharmoniske frekvenser.

Müller m.fl. fant at ved lysbue vil den spektrale strøamplituden være forhøyet i hele frekvensområdet fra 100Hz til og med 1,5kHz [21]. Dette er et frekvensområde som vanligvis er dominert av enkelte harmoniske komponenter som utmerker seg med høyere amplitude. Den spektrale strøamplituden ved interharmoniske frekvenser ved en normalsituasjon er som regel mye lavere enn hva den viste seg å være ved lysbue. Grunnen til det er at lysbuer skaper bredbåndsstøy [31]. Dermed kan den forhøyede spektrale strøamplituden benyttes som ett av kriteriene ved deteksjon av lysbue.

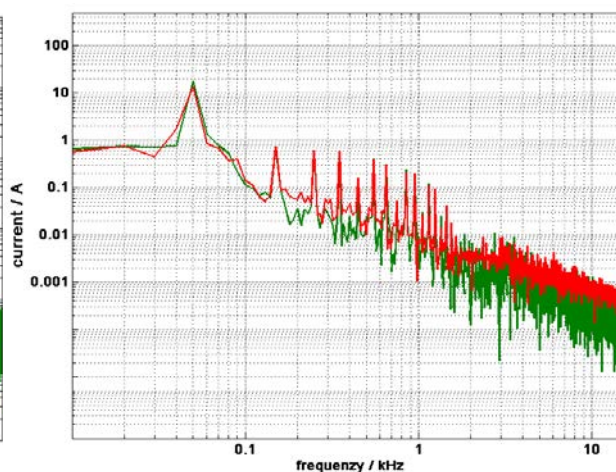
Müller m.fl. poengterer også at det ved lysbuer kan observeres en forhøyning i den spektrale strøamplituden i frekvensområdet mellom 2kHz og 5kHz [21]. Dette skyldes den hurtige strømmøkningen etter gjentening. Dette er likevel ikke mulig å benytte som kriterium ved deteksjon av lysbue, fordi andre laster i kretsen kan gi liknende frekvenser ved hurtige strømdringer.

To eksempler, fra forsøkene til Müller m.fl., på spektralanalyse av strømmen kan sees i Figur 18 og i Figur 19 [21]. Figur 18 viser en spektralanalyse av lysbuestrømmen ved en

serielsbue. Den høyeste verdien viser 50Hz frekvensen i strømmettet. Den tredjeharmoniske frekvensen utmerker seg også. I frekvensområdet 2-5kHz kan det sees en forhøyning i den spektrale strømamplituden. Figur 19 viser en spektralanalyse av to faser i en fabrikk. Den høyeste verdien er også her 50Hz frekvensen i strømmettet. Deretter kan det sees en forhøyning i strømamplituden ved den tredjeharmoniske frekvensen. En liten antydning til at noe skjer kan sees i frekvensområdet 2-5kHz. Dette er likevel ikke en klar forhøyning i strømamplituden slik det kan sees i tilfellet med en serielsbue.



Figur 18 - Spektralanalyse av lysbuestrømmen til en serielsbue. Den høyeste verdien er 50Hz frekvensen i nettet. Den tredjeharmoniske frekvensen utmerker seg. Fra 2-5kHz kan det sees en stigning i amplituden.[21]



Figur 19 - Spektralanalyse av to faser i en fabrikk. Den høyeste verdien er 50Hz frekvensen i nettet. Også her utmerker den tredjeharmoniske seg. Den kan sees antydninger til at noe skjer i området 2-5kHz, men dette er ikke like tydelig som ved serielsbue. [21]

I artikkelen skrevet av Müller m.fl. konkluderes det blant annet med at deteksjon av lysbue vil være svært krevende dersom lysbuestrømmen er liten i forhold til andre tilkoblede laststrømmer [21]. Å sette riktige grenseverdier til lysbuevern vil være avgjørende for vernets funksjonalitet. For lave grenseverdier vil kunne resultere i feildeteksjoner, mens for høye grenseverdier kan føre til at lysbuer ikke blir detektert.

3.3.5 Elektrodematerialets betydning for stående lysbue

Når en lysbue oppstår mellom to elektroder, vil de høye temperaturene som er involvert føre til at elektrodematerialet eroderer [9]. Erosjon av elektrodene vil føre til en økende avstand mellom elektrodene. Dersom avstanden blir tilstrekkelig stor, vil lysbuen slukke. For at lysbuen skal vedvare, må elektrodene flyttes nærmere hverandre underveis.

Dersom en uønsket lysbue oppstår i en boliginstallasjon, vil elektrodematerialet ofte være kobber. En lysbue vil dermed kunne slukke av seg selv dersom lederen eroderer tilstrekkelig til at avstanden blir for stor mellom elektrodene.

Er det derimot ønskelig å oppnå en stabil lysbue, kan karbon benyttes som elektrodemateriale. Karbon vil ikke smelte, bare oksidere og bli omgjort til gass, sakte men sikkert [9]. På grunn av karbonets egenskaper, vil det ta betydelig lengre tid før avstanden mellom elektrodene blir så stor at lysbuen slukker. Den minste lengden på en lysbue er omtrent 0,1mm. Dersom avstanden mellom elektrodene er mindre enn 0,1mm, vil lysbuen forme seg som en bue mellom elektrodene og dermed oppnå minste lengde [9].

Babrauskas beskriver et eksperimentelt studie utført av R. Blades(1993), hvor Blades fant ut at det var vanskelig å oppnå en stabil lysbue uten tilstedeværelse av polymerer som isolasjonsmateriale[9]. Grunnen til dette var at metallet eroderte slik at avstanden mellom elektrodene ble for stor, og lysbuen slukket. Ved å innføre polymeriske isolasjonsmaterialer i testene, klarte Blades å lage en vedvarende lysbue gjennom en karbonisert vei. Blades klarte også å lage en vedvarende lysbue dersom han brukte karbonelektroder som var forvarmet til 80 °C.

3.4 Spor etter motstandsoppvarming, glødende kontaktforbindelse og lysbue

”Håndbok i brannetterforskning” [29] gir en beskrivelse av hvordan brannetterforskere bør gå frem når de skal finne ut hva årsaken til en brann er. Det kan nemlig la seg gjøre å finne ut av hvorvidt en brann har startet som følge av motstandsoppvarming og/eller serielysbue. Ved å studere brannskadebildet, kan arnestedet kartlegges og området omkring undersøkes spesielt. Dersom det er mistanke om at brannen har startet som følge av en seriefeil, undersøkes kontaktpunkter.

Eksempelvis vil det i en stikkontakt være naturlig å se etter smelteskader. I tillegg er det meget interessant å undersøke hvorvidt det er forskjeller mellom fasene på for eksempel tilkoblingsklemmer, faseskinner eller støpselpinner. En skade på kun den ene fasen vil tyde på kontaktsvikt. Ofte vil det ved slike typer feil befinne seg en kortslutningsskade i nærheten. Kortslutningsskaden er en sekundær skade forårsaket av brannen [33].

På grunn av den høye temperaturen i en lysbue, opp mot 5000 °C, vil en lysbue gi karakteristiske skader. Et av kjennetegnene er et skarpt skille mellom det uskadede materialet og den smeltede delen på en leder. Enden av lederen kan få en dråpeliknende form. Det er kun denne dråpen som bærer preg av smeltet kobber. Lederen vil i området foran dråpen se relativt uskadet ut.

I et møte, 13. Februar 2015, med politioverbetjent Finn Rottem og spesialetterforsker Johnny P. Olsen ved KRIPOS, ble det sett på hvordan spor etter lysbuer kan se ut. Utstyr som hadde vært utsatt for lysbuer ble undersøkt. Sporene etter lysbuene kunne se ut som svært lokale, punktvis fordypninger eller forhøyninger i det ledende materialet. Da områdene ble undersøkt i mikroskop, ble inntrykket av at skaden var lokalisert til ett bittelite sted bekreftet. Lysbuen gir en ekstrem oppvarming i et svært konsentrert punkt.

Dette skiller seg fra motstandsoppvarming, der temperaturen er langt lavere. Oppvarmingen skjer over et lengre tidsrom enn ved lysbue. Dermed rekker en større del av utstyret å ta skade av temperaturøkningen. Varmen har fordelt seg mer jevnt i utstyret, og temperaturen som kan oppnås ved glødende kontaktforbindelse er fra

Seriefeil

1200-1300 °C og opp til 1800 °C. Dette er langt lavere enn temperaturen i en lysbue, men likevel høyere enn de fleste omkringliggende materialers antennelsestemperatur.

En brann som har oppstått på grunn av den høye temperaturutviklingen ved motstandsoppvarming byr på store utfordringer for brannetterforskerne. Overingeniør Wiggo Knudsen ved KRIPOS, Seksjon for brann og kjemi poengterer i en mail, 11. mars 2015, vanskelighetene med å kunne bestemme brannårsak dersom motstandsoppvarming er antennelsesårsaken. Uten noen spor etter lysbue, er det mulig at brannårsaken kan bli oversett. En slik feil kan forveksles med spor etter en brann som har startet med åpen ild.

Knudsen retter også fokus mot at det i mange tilfeller kommer en lysbue i etterkant og ødelegger sporene etter varmgangen. Årsaken kan dermed bli registrert som lysbue, til tross for at den egentlige brannårsaken var motstandsoppvarming og glødende kontaktforbindelse. Figur 20 og Figur 21 viser sporene etter en brann forårsaket av at en mangeleder var isatt en innstikk-klemme, som ikke var beregnet for denne type leder. Den dårlige kontaktforbindelsen som oppstod hadde resultert i økt motstand og dermed oppvarming av feilstedet over tid. Da brannen ble etterforsket, ble det funnet spor etter lysbue. Knudsen er av den oppfatning at ved det tidspunktet lysbuen oppstod, var brannen allerede et faktum.



Figur 20 - Feil type leder ble innsatt i en innstikk-klemme; dette førte til motstandsoppvarming med påfølgende lysbue. Bildet ble utvekslet i en mail med Overingeniør Wiggo Knudsen ved KRIPOS, seksjon for brann og kjemi 10. Mars 2015, og er gjengitt med tillatelse.



Figur 21 - Dette viser lysbueskader på en av lederne i flerlederen som ble innsatt i en innstikk-klemme. Bildet ble utvekslet i en mail med Overingeniør Wiggo Knudsen ved KRIPOS, seksjon for brann og kjemi 10. Mars 2015, og er gjengitt med tillatelse.

Figur 21 viser skader på en av lederne i flerlederen som ble feilaktig innsatt i en innstikk-klemme som ikke var beregnet for denne type leder. Det kan tydelig sees at enden av lederen har smeltet og fått en kuleliknende avslutning. På denne endeavslutningen kan det sees fordypninger som skyldes at lysbuenes høye temperatur har smeltet kobberet. Den grønne fargen som kan sees på lederen er kobberoksid, som dannes når lederen blir utsatt for høy varme. [29, 34]

I følge politioverbetjent Finn Rottem og spesialetterforsker Johnny P. Olsen ved KRIPOS, blir seriefeil som brannårsak ofte beskrevet som "dårlig kontakt med påfølgende

Seriefeil

serielysbue". Den samme betegnelsen benyttes i boka "Håndbok i brannetterforskning" [29]. Grunnen til det er at en seriefeil ofte vil kunne starte med dårlig kontaktforbindelse og motstandsoppvarming. Under brannetterforskningen vil det som regel finnes spor etter lysbue. Når i hendelsesforløpet denne lysbuen har oppstått er ikke klart. Det er uvisst hva som er den utløsende årsaken til stabile flammer, lysbuer, stabile så vel som ustabile, eller varmgang og glødende kontaktforbindelse.

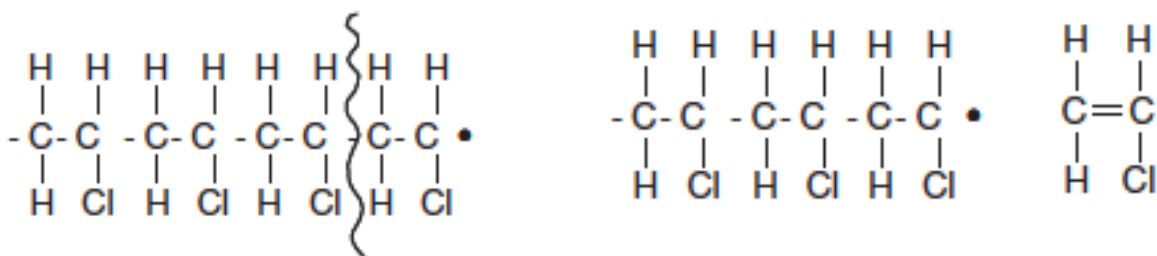
4 Isolasjonsmaterialet PVC

PVC er et av de vanligste isolasjonsmaterialene brukt i lavspentkabler, -ledninger og andre isolasjonsmaterialer som støpsler og stikkontakter. Fordi PVC er relativt stivt, blandes PVC som regel med mykningsmidler. Da blir kabelen myk og fleksibel. Opptil 50 % av isolasjonsmaterialet kan bestå av mykningsmidler. Det er ikke bare for å gjøre en kabel mykere at det iblandes myknere. Myknere kan også benyttes for å gjøre kabelen mer motstandsdyktig mot termisk nedbryting. Ut fra bruksområdet til kabelen blir myknere valgt. Det er mest vanlig at en PVC-kabel er ment å tåle 70 °C eller 90 °C. Når PVC varmes opp vil myknere og andre tilsatte stoffer langsomt forsvinne, og isolasjonen blir hard og sprø[8]. Det er spesielt to forhold ved PVC-isolasjon som kan være en trussel for brannsikkerheten; antennbare gasser som avgis ved oppvarming og dannelse av en karbonisert vei på isolasjonsmaterialet.

Når PVC brenner vil det utvikles en forkullet masse som hindrer flammespredning. I tillegg utvikles det hydrogenkloridgass, som også er flammehemmende. Klor blir tilsatt PVC på grunn av at hydrogenkloridet som utvikles hindrer forbrenning.[35] Stensaas skriver at det allerede ved 60-80 °C vil forsvinne målbare mengder hydrogenklorid, HCl, fra materialet[8]. Hydrogenkloridgass er en korrosiv gass. Dersom PVC avgir HCl, vil konsekvensen kunne være angrep på maskineri og utstyr, i tillegg til misfarging og raskere aldring av isolasjonen[8].

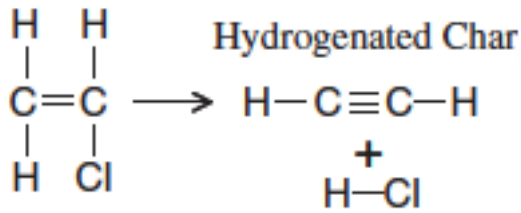
Martel degraderte PVC 70 °C ved å utsette materialet for høye temperaturer. Plastmaterialet startet nedbrytingen ved 230 °C. Ved denne temperaturen ble hydrogenkloridgass avgitt. Prosessen fortsatte opp til en temperatur på 350 °C. Ved denne temperaturen hadde plastmaterialet mistet 42 % av massen sin. Resultatet av en videre oppvarming var mest sannsynlig at andre, antennelige gasser ble frigitt fra plastmaterialet. [12]

Det som skjer når PVC blir utsatt for varme, er at molekylkjedene brytes ned. En slik nedbryting kan sees i Figur 22 og i Figur 23[28]. Resultatet av en slik termisk nedbryting er at det dannes hydrogenkloridgass og et karbonisert spor i isolasjonsmaterialet. Temperaturen som må til for at en slik nedbryting skal finne sted er som regel over 180 °C, hvilket er smeltepunkttemperaturen til PVC. [28]



Figur 22 – PVC-kjede med ett karbonatom med åpen binding. Termisk nedbryting fører til at en sidekjede frigis [28].

Isolasjonsmaterialet PVC



Figur 23 - Sidekjeden som avgis ved termisk nedbryting av PVC, vil videre brytes ned til saltsyre, HCl, og hydrert forkulling[28].

Dersom PVC initielt er ved romtemperatur, og antenner, vil materialet som regel karbonisere og deretter slukke av seg selv. Er PVC derimot forvarmet til en temperatur over eller omkring smeltetemperaturen til plastmaterialet, 180 °C, vil materialet fortsette å brenne dersom det blir antent. PVC er ofte tilsatt myknere, som ved temperaturer allerede ved 105 °C vil begynne å nedbrytes. Gasser vil da frigis, og et antennbart brennstoff blir dannet i det gassene blandes med oksygen i luften. Svært antennbare gasser kan dannes når PVC med myknere blir utsatt for temperaturpåkjenningene en glødende kontaktforbindelse eller lysbue tilfører.[28]

For at gassene som frigis skal kunne antennes, må konsentrasjonen av gassene være tilstrekkelig. Hvor høy konsentrasjon som kreves for at antennelse skal skje reduseres med økende temperatur. Spontanantennelsestemperaturen for rene hydrokarboner spenner fra 240° til 540 °C. Dette er temperaturer langt under temperaturene som utvikles ved glødende kontaktforbindelse, 1235 °C.[28]

Den minste antennesesenergien som må til for at en antennbar gass i blanding med oksygen kan antenne, spenner fra 0,1 til 0,3mJ for de fleste antennbare gasser. For hydrogen er denne verdien mye lavere, 17µJ. En lysbue, ved minste lysbuespenning på $10V_{\text{rms}}$ ved $0,2A_{\text{rms}}$, produserer en lysbueenergi på 16mJ ved første lysbuehalvsyklus. Dette er langt mer enn hva som må til for å antenne de brennbare gassene som frigis ved oppvarming av PVC.

Det har blitt vist at ved korttids varmepåvirkning med 160 °C i løpet av ti timer, ble PVC forkullet, og fikk dermed egenskaper som en halvleder[36]. Ved langtidseksposering vil PVC kunne forkulle ved temperaturer helt nede i 70 °C, i følge Steen-Hansen m.fl. [18]. Babrauskas[36] skriver at PVC får halvlederegenskaper dersom isolasjonsmaterialet utsettes for temperaturer på 110 °C i omtrent en måned.

Antennelsestemperaturen til PVC vil ikke gi et riktig bilde av hvilke temperaturer som skal til for å antenne kabelisolasjon når elektrisitet er involvert[36]. Spontanantennelsestemperaturen er den laveste temperaturen der det under angitte prøvebetingelser oppnås antennelse ved oppvarming uten annen tennkilde. Spontanantennelsestemperaturen er for PVC angitt å ligge i området 263-454°C[18, 35]. Dersom det i tillegg til varmekilden er en gnist eller en flamme tilstede, vil antennelsestemperaturen være noe lavere. Denne formen for antennelse kalles for pilotantennelse. Pilotantennelsestemperaturen for PVC ligger i området 200-525°C[18]. Rimelige mykningsmidler og andre tilsetningsstoffer tilsatt kabelisolasjonen kan redusere spontanantennelsestemperaturen[8].

Isolasjonsmaterialet PVC

Babrauskas henviser i artikkelen "Mechanisms and modes for ignition at low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products" til et forsøk utført i Japan der det ble vist at kabelisolasjon antente på grunn av den varme overflaten til en elektrisk leder. I dette tilfellet hadde lederen en overflatetemperatur på 550°C[36]. Babrauskas hevder likevel at antennelse av kabelisolasjon vanligvis skjer ved en betydelig lavere temperatur. Babrauskas nevner flere forhold som kan føre til at kabelisolasjon av PVC antenner ved lavere temperaturer enn spontanantennelsestemperaturen[36]:

- a) Produksjonsfeil
- b) Stor overstrøm
- c) For mye isolasjon, gjerne i kombinasjon med overstrøm
- d) Lokal oppvarming på grunn av brudd i en flertrådet leder
- e) Lokal oppvarming forårsaket av en stift eller spiker som skader lederen
- f) Lokal oppvarming på grunn av dårlig eller feil i tilkobling

I tillegg nevnes i) overdreven trekraft og siging av kabelen, ii) kjemiske reaksjoner og iii) sammenbrudd i kabel på grunn av overspenning.

I produksjonsfeil inngår feil sammensetning av PVC og andre tilsatte stoffer. Det kan eksempelvis være uheldige stabiliseringsmidler, uforenelige myknere eller overflødig fyllstoff. Det kan også oppstå feil i ekstruderingen av kabelen, med resultat at lederen ikke ligger i sentrum av isolasjonen. Hulrom, luftbobler og en oppsamling av bestanddeler kan forekomme. Forurensninger, der partikler som ikke er ment å være en del av isolasjonen likevel blir blandet inn, vil også være en produksjonsfeil. Det samme gjelder dersom det oppstår en oppsamling av fuktighet. PVC er et materiale som ikke er hygroskopisk, altså et materiale som ikke vil trekke til seg fuktighet fra omgivelsene. Likevel kan noen av stoffene som tilsettes PVC være det; dette gjelder spesielt tilsetningsstoffer som benyttes ved produksjon av sort PVC. Alle de nevnte typene produksjonsfeil vil kunne være en årsak til feil og antennelse av PVC-isolerte tekniske produkter [37].

I "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products" konkluderer Babrauskas med at den utløsende effekten for antennelse av PVC-isolasjonen i mange av de nevnte forholdene, er lysbue-/krypestrømdannelse i et forkullet spor i isolasjonen. Lysbue gjennom et forkullet spor forklares nærmere i kapittelet om lysbuer, kapittel 3.2.

Martel har gjort en sammenlikning av flere av de vanligste isolasjonsmaterialene. Forsøkene hans gikk ut på å plassere ulike isolasjonsmaterialer inntil en glødende kontaktforbindelse. Isolasjonsmaterialene kom ikke i direkte kontakt med det glødende filamentet. Det glødende filamentet forflyttet seg bort fra området der isolasjonsmaterialet var i direkte kontakt med kobberoksidet. Isolasjonsmaterialet ble likevel utsatt for betydelige temperaturer. Flere av isolasjonsmaterialene antente. Ved alle tilfellene der det ble observert antennelse, ble det i forkant av antennelsen observert en lysbue. [12]

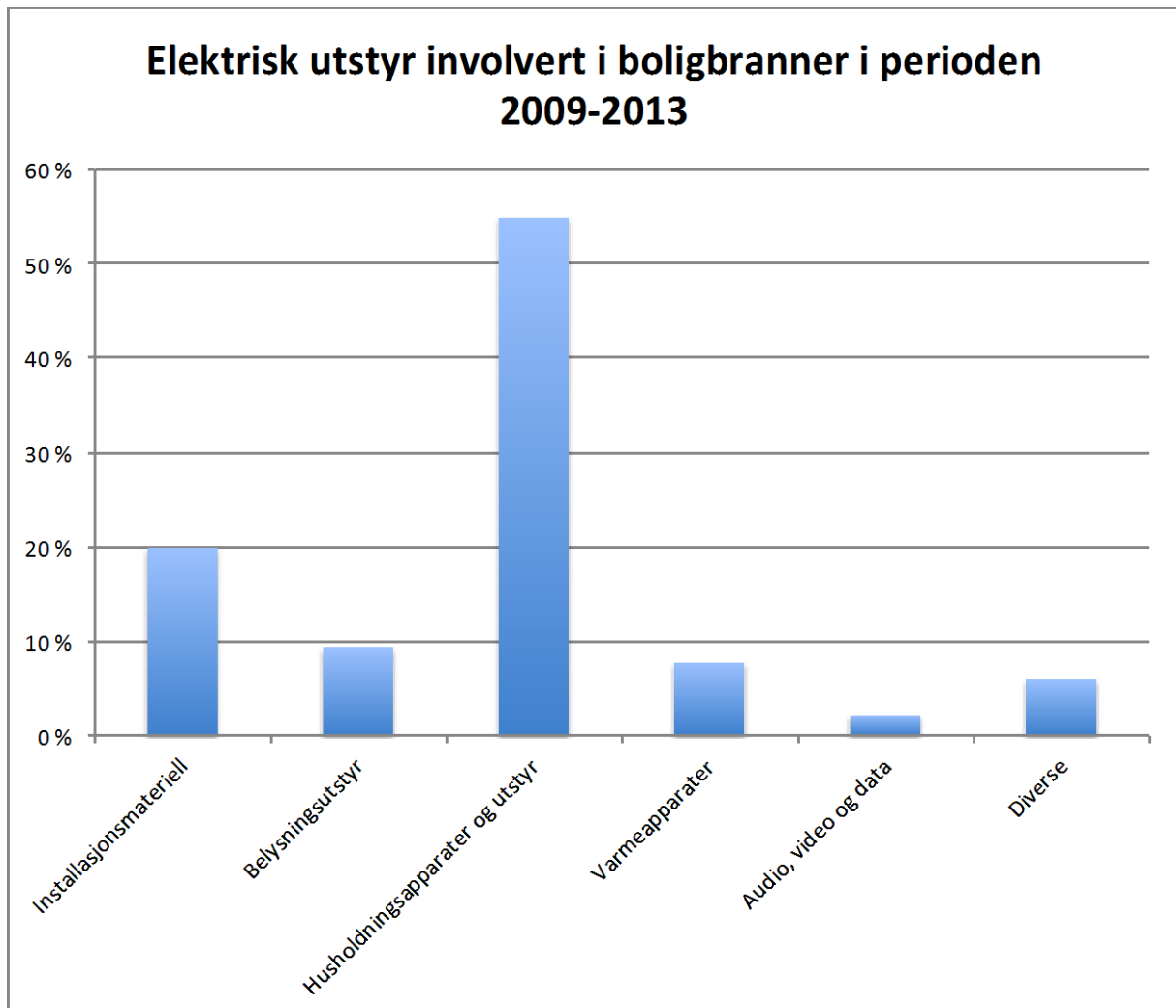
Resultatet av Martels forsøk viste store forskjeller mellom PE-baserte og halogenfrie polymerer og PVC-, PP- og PUR-baserte polymerer. PVC-, PP- og PUR-baserte polymerer ble rask deformert, smeltet, utviklet røyk og antente. Antennelsen skjedde som følge av

Isolasjonsmaterialet PVC

en stabil lysbue. PE-baserte og halogenfrie polymerer var meget stabile, og lot seg ikke antenne. At PVC-, PP- og PUR-baserte polymerer lettere lot seg antenne, skyldes polymerenes evne til å karboniseres, dersom de utsettes for de termiske påkjenningene en glødende kontaktforbindelse tilfører. Et karbonisert spor er meget lysbuevennlig. Det betyr at stabile lysbuer kan oppstå i slike spor. Stabile lysbuer har svært høy energitetthet, og kan raskt antenne brennbare materialer. [12]

5 Brannårsak

Om lag 20 % av boligbranner skyldes ulike elektriske årsaker. En gruppering av de ulike elektriske årsakene er vist i Figur 24. I figuren kan det tydelig sees at husholdningsapparater og utstyr er den gruppen som klart forårsaker flest branner. Det som gjør denne gruppen så stor er komfyr og kokeplater. I gjennomsnitt forårsaker komfyr og kokeplater 157 boligbranner. [1]



Figur 24 - Elektrisk utstyr som har forårsaket boligbranner i perioden 2009-2013, vist gruppevis.

Den nest største enkeltårsaken til boligbranner er ledninger og kabler, som i gjennomsnitt forårsaker 21,4 branner i året. Ledninger og kabler faller inn under gruppen installasjonsmateriell, som står for 20 % av boligbrannene. Flere andre typer elektrisk installasjonsmateriell har også vist seg å være blant de største enkeltårsakene til boligbranner, herunder koblingsbokser, koblingsklemmer og stikkontaktmateriell. [1]

Videre følger en liten gjennomgang av ulike feil som kan oppstå i støpsler, stikkontakter, ledere og koblingsklemmer. I tillegg blir utvendig varmetilførsel tatt for seg.

5.1 Feil i støpsler

Det kan skilles mellom to typer støpsler; støpte støpsler og skruestøpsler. I skruestøpsler er det mulig å åpne støpselet, slik at lederne kan kobles sammen ved hjelp av skruer. I støpslene kan følgende feil oppstå[8]:

- For dårlig tilskrudde skruer i skrustøpselet
- Støpselet sitter løst i stikkontakt
- Isolasjonen blir nedbrutt på grunn av høye temperaturer, høyt strømforbruk og spenning
- Krypestrøm som oppstår som følge av forurensninger og fuktighet på kontaktflaten til støpselet
- Mekanisk skade
- Mangelfull produksjon av støpsel
- Brudd i ledning ved strekkavlastning på støpsler

5.1.1 Skruestøpsler

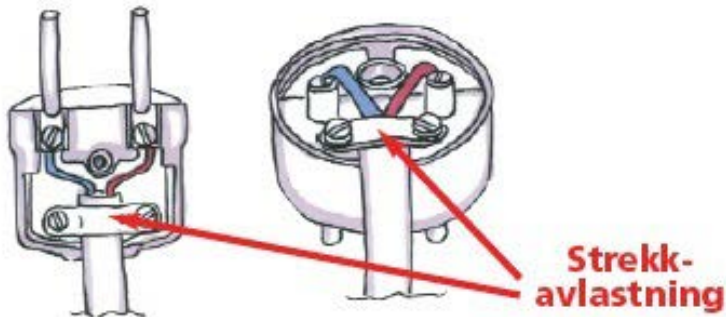
Ofte kan selve dekselet i skruestøpselet være laget av herdeplasten ureaplast. Dette materialet har den fordelaktige egenskapen at det ikke dannes hygroskopiske produkter ved termisk nedbryting, i motsetning til PVC. I tillegg er krypestrømbestandigheten meget god, og en viktig faktor å ta med i betraktningen. Blant de mindre fordelaktige egenskapene er det faktum at skruestøpsler av ureaplast ikke kan benyttes ved høyere kontinuerlig brukstemperatur enn 70 °C. Bruksområdet for ureaplast er hovedsakelig elektriske artikler som støpsler, kontakter og brytere. Termoplaster ser imidlertid ut til å ta over en stadig større del av bruksområdet for ureaplasten [38].

I slike skruestøpsel er det rom for at skruene ikke skrues til skikkelig, hvilket resulterer i dårlig kontaktforbindelse. Med tiden og påkjenninger som støpselet blir utsatt for, vil skrukoblingene kunne løsne tilstrekkelig til at kontaktforbindelsen blir dårligere. Vibrasjoner er en slik uheldig påkjenning. Det vil også kunne være ødeleggende for kontaktforbindelsen dersom det trekkes i ledningen i stedet for i selve dekselet når støpselet skal dras ut av en stikkontakt [8]. Da kan lederne løsne i skrukoblingen, og kontaktforbindelsen blir dårligere, eventuelt brutt dersom kontakten brytes helt.

Møbler som settes mot støpselet kan gi mekaniske skader som resulterer i en elektrisk feil i støpselet [8]. En slik feil kan eksempelvis være at pinnene i støpselet blir bøyd, slik at kontaktkraften i festet til pinnene reduseres. En annen feil kan være at ledningstråder i støpselet brytes, og motstanden i koblingspunktet dermed økes som følge av det innsnevrede strømførende området i feilstedet. Økt motstand vil gi varmeutvikling [13, 14].

Dersom skruene som benyttes til koblingene ikke er av det samme materialet som lederne, vil temperaturendringer kunne resultere i at de ulike metallene utvider seg ulikt. Dette vil i sin tur kunne føre til mindre kontaktkraft mellom lederne, og dermed dårligere kontaktforbindelser. I kombinasjon med vibrasjoner er dette spesielt kritisk. I noen skrustøpsler loddes koblingene sammen. Loddingene er et svakt punkt der det raskt vil kunne oppstå varmgang.

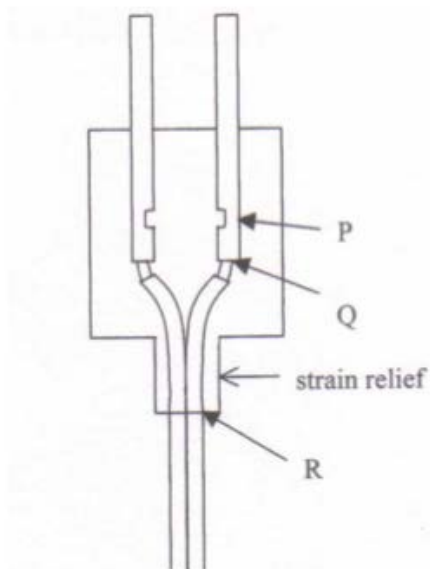
Alle de nevnte eksemplene vil kunne føre til glødende kontaktforbindelser, lysbuer eller en kombinasjon av glødende kontaktforbindelser og lysbuer. Skruestøpsel er også utsatt for lysbuer og kontaktkortslutninger mellom lederne [8]. Et bilde av et skruestøpsel uten jordtilkobling er vist i Figur 25.



Figur 25 - Skruestøpsel uten jord[39]

5.1.2 Støpte støpsler

Det støpte støpselet, støpt av isolasjonsmaterialet PVC, er det vanligste støpselet i Norge i dag. Også i dette støpselet kan det oppstå både glødende kontaktforbindelser, lysbuer og kortslutninger. Der finnes tre steder i denne typen støpsel som er spesielt utsatt for feil [8]. Dette er vist i Figur 26 som punktene P, Q og R. I punktene er det større fare for dårlig kontakt og varmgang enn ellers i støpselet.



Figur 26 - Typiske feilsteder i støpte støpsler[8]

Dersom et støpsel sitter løst i en stikkontakt, kan kontaktkraften mellom de ledende materialene bli for lav og temperaturen øker som følge av dette. Dersom kontakten i tillegg er utsatt for vibrasjoner eller andre bevegelser, kan det oppstå luftgap mellom lederne som videre kan resultere i lysbuer.

Stensaas [8] nevner en rekke japanske studier som er utført på støpsler, der ulike feil har blitt framprovosert. Blant annet nevnes en studie utført av Okamoto i 2003, som fant at dersom kraften som må til for å trekke et støpsel ut av en stikkontakt er 1N eller høyere, er varmeutviklingen ubetydelig. I det samme forsøket ble strømstyrkens effekt på varmeutviklingen dokumentert, og det ble konkludert med at det må en kombinasjon av løstsittende støpsel i stikkontakt og overstrøm over 15A til for at det skal oppstå en betydelig varmeutvikling. Dette vil i sin tur føre til en termisk nedbrytning av isolasjonsmaterialet, slik at isolasjonsmaterialet blir mer hygroskopisk og krypestrømsmotstanden reduseres. Støpselet blir dermed mer utsatt for krypestrømmer og lysbuer, som i sin tur kan føre til antennelse av isolasjon og andre omkringliggende materialer. Varmeutviklingen som oppstår kan også forårsake antennelse av isolasjonen og andre omkringliggende materialer.

5.2 Stikkontakt

Sannsynligheten for antennelse på grunn av feil i en av boligens stikkontakter er svært liten [8]. Det finnes imidlertid et betydelig antall stikkontakter i en bolig. Sammenlagt er antallet stikkontakter i norske boliger overveldende, og statistikken peker mot feil i stikkontakt som en av de største enkeltårsakene til boligbranner [1].

Feil i en stikkontakt er ofte produsert av ytre kilder. Dette kan eksempelvis være at elektrikeren ikke har tilskrudd skruene skikkelig, slik at der er løse koblinger med dårlig kontaktforbindelse i stikkontakten. I den dårlige kontaktforbindelsen blir det dannet et oksidbelegg med dårligere ledningsevne, dermed oppstår det varmgang. Dette er en progressiv feil, som etter hvert kan føre til så stor varmgang at det oppstår glødende kontaktforbindelser og lysbuer. Plastmaterialet kan på grunn av oppvarmingen bli så termisk nedbrutt at det forkuller, blir mer hygroskopisk og krypestrømsmotstanden reduseres.

I rapporten "Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennkilde i bygninger" blir det poengtert at det i litteraturgjennomgangen i forbindelse med rapporten ikke ble funnet noen referanser som kan dokumentere at det har oppstått branner på grunn av at varmgang har ført til dannelse av pyrofore plastmaterialer. Et pyrofort materiale er selvantennelige materialer som er i stand til å gløde. Herdeplast er mer tilbøyelig til å forkulle ved høyere temperaturer, og klassifiseres som et pyrofort materiale. PVC er en termoplast. Termoplaster har en tendens til å smelte. Materialer som kan smelte kan ikke bli pyrofore materialer. Dette betyr at termoplaster ikke kan bli pyrofore materialer. [40]

Dersom et støpsel settes inn og trekkes ut av en stikkontakt mange ganger, kan dette også lede til varmgang. Utføres dette med last som trekker mye strøm, kalles dette for "hot-plugging" [8]. Stensaas beskriver det som skjer ved "hot-plugging" som at materialet i stikkontakten og støpselet eroderer, slik at det dannes dårlige kontaktforbindelser. Det oppstår varmgang som etter hvert kan lede til en lysbue [8].

Vibrasjoner, mekanisk forårsaket av ytre kilder eller forårsaket av store strømvariasjoner er også en betydelig feilkilde. Ofte kan en kombinasjon av flere ulike feilfremkallende faktorer resultere i glødende kontaktforbindelser og lysbuer.

I USA har det vært utført forsøk som konkluderer med viktigheten av vridningsmomentet til skruene i koblingspunktet [41]. Med et vridningsmoment på 0,113Nm oppstod det en betydelig varmeutvikling. Var vridningsmomentet derimot på 0,452Nm, oppstod det ingen betydelig varmeutvikling. En annen faktor nødvendig for å oppnå glødende kontaktforbindelser var vibrasjoner. Da vibrasjoner ble introdusert, økte temperaturen betraktelig, og det ble målt temperaturer over 300 °C på skruehodet.

Det har også blitt introdusert stikkontakter med skrueløse klemmer. Det er ikke kjent om slike klemmer er mer eller mindre tilbøyelige til å kunne forårsake branner.

5.3 Redusert ledertverrsnitt og brudd i leder

Dersom en ledning er utsatt for ytre mekaniske påkjenninger, kan det oppstå brudd eller delvis brudd i ledningen. Ytre mekaniske påkjenninger kan eksempelvis være skruer eller spikre som ødelegger isolasjonen og eventuelt hele eller deler av selve ledningen. Ledertverrsnittet blir deformert og redusert. Ved en slik situasjon blir også isolasjonen ødelagt. Redusert og deformert ledertverrsnitt kan også være resultatet av for knapp bøyeradius på ledningen. Det samme gjelder for stramme kabelklips [4]. En konsekvens av det reduserte ledertverrsnittet er økt strømtetthet i det gjenværende kontaktpunktet, hvilket i sin tur fører til oppvarming lokalt.

Mekaniske skader som kan føre til redusert ledertverrsnitt eller brudd i ledningen kan oppstå som følge av klemskader, eksempelvis mellom ei dør og en dørkarm, eller et vindu og en vinduskarm [4]. En ledning kan også få klemskader av møbler. Det som kan skje er at det i en flertrådet leder blir klemt av flere av kobbertrådene som leder strømmen. Dette øker strømtettheten i de resterende kobbertrådene i ledningen, og vil i likhet med dårlig kontakt i et koblingspunkt resultere i lokal oppvarming.

Mye bevegelse er også en påkjenning for ledningen, og kan føre til at det utvikles en mekanisk skade. Dersom ledningen gjentatte ganger blir utsatt for knekk og bøy, vil trådene i en flertrådet leder kunne bli bøyd av. Dersom ledningen blir utsatt for strekk, eksempelvis dersom ledningen dras ut av støpselet ved at det trekkes i ledningen, kan det oppstå brudd i ledningen eller at enkelte av trådene i en flertrådet leder blir brutt. Endene i et slikt brudd inne i en leder vil kunne ligge inntil hverandre, som en dårlig kontaktforbindelse, slik at det oppstår varmgang. Dersom den fysiske kontakten mellom lederne blir brutt vil det kunne oppstå en lysbue mellom lederne. En slik lysbue er meget varm, og ansees som en betydelig antennelsesfare.

Skadedyr blir av både Stensaas og Siemens trukket frem som en kilde til skader i elektriske installasjoner [4, 40]. Rotter, slanger og insekter trekkes frem som sydebukker, og det påpekes at maur kan påføre betydelige skader på lik linje med rotter. Dersom en rotte gnager på en kabel, vil det kunne oppstå direkte metallkontakt. Krypstrøm, kontaktkortslutning, lysbueoverslag og overoppheting kan være resultatet av skader på isolasjonen påført av skadedyr.

5.4 Dårlig kontakt i koblingsklemmer

Ulike versjoner av koblingsklemmer, vrihylser og innstikklemmer har i lengre tid vært på markedet. Noen av versjonene har vært av dårligere kvalitet eller lettere å montere feil. Dette har i noen tilfeller utløst brann eller branntilløp [42]. Dårlig kontaktforbindelse i klemmen eller hylsen er årsaken til at det oppstår varmgang. Dette kan enten resultere i glødende kontaktforbindelse, lysbue eller selve klemmen kan smelte eller forkulle. Dersom klemmen eller hylsen smelter, kan strømførende deler som ikke er ment å komme i kontakt med hverandre, komme i kontakt med hverandre. Dette vil kunne resultere i en kortslutning.

I 2003 ble det rapportert til Produkt- og eltilsynet at wagoklemmer har medvirket til branner eller branntilløp. Det ble gjort nærmere undersøkelser av wagoklemmer, og i hvilken grad de kan forårsake branner og branntilløp. Et antall wagoklemmer i allerede eksisterende anlegg ble kontrollert, og antall skadede og ikke-skadede klemmer ble registrert. Antatt årsak til skaden ble også inkludert i kontrollen. [42]

Resultatet av denne kontrollen var at omtrent 87 % av anleggene ikke hadde noen feil, mens det i 13 % av anleggene var skade med antatt årsak feilmontasje. Av 2635 undersøkte klemmer, var det 13 av klemmene som var skadet, 5 stykker av klemmene beregnet for lederdiameter 1,5mm² og 8 for lederdiameter 2,5mm². Dette utgjør feil på 0,5 % av de kontrollerte kabelklemmene. Den største enkeltårsaken viste seg å være feil bruk av 1,5mm² flertrådet leder i en wagoklemme beregnet for entrådet ledere. [42]

Det konkluderes med at hovedårsaken til branner og branntilløp på grunn av wagoklemmer skyldes feil montering. Antallet skadede wagoklemmer i forhold til antallet omsatte klemmer er ikke stort. Det har nå blitt utviklet nyere versjoner av wagoklemmen som gjør feilmontasje vanskeligere.

5.5 Utvendig varmetilførsel

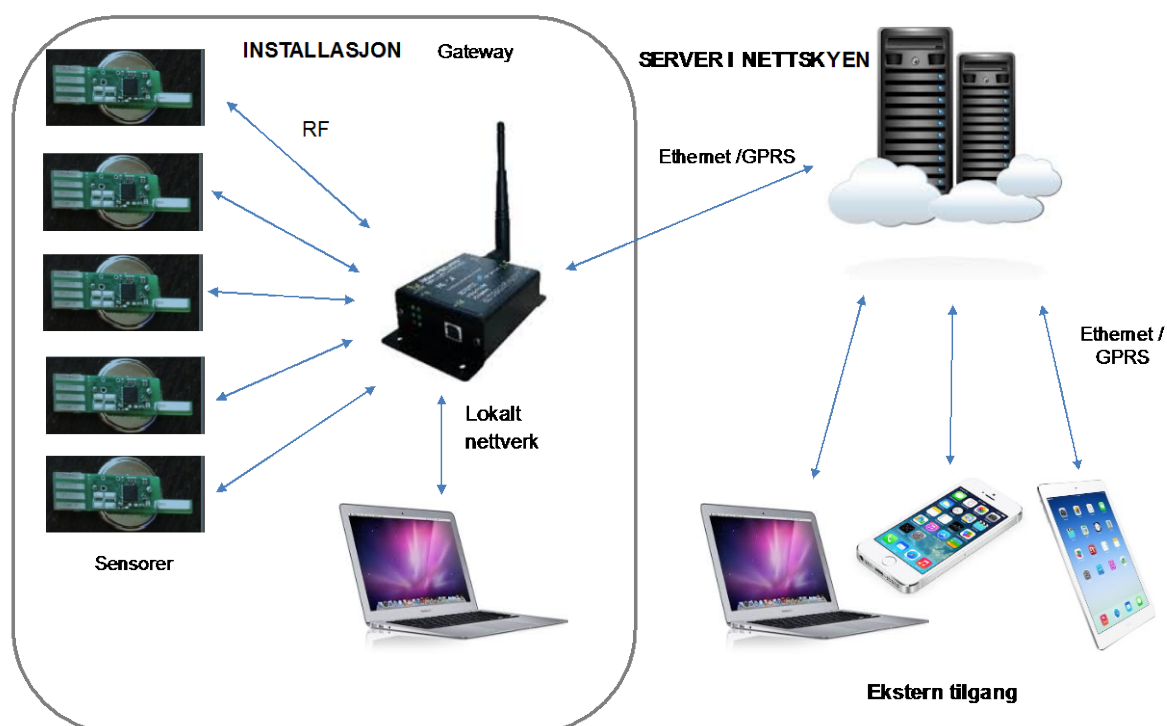
Utvendig varmetilførsel trekkes av Stensaas [8] og Babrauskas [36] frem som årsak til brann i elektriske anlegg. Babrauskas forteller om et forsøk utført av Chavez, beskrevet i "Steady-state environment cable damage testing", hvor kabler ble varmet opp i en ovn. Hensikten med dette forsøket var å finne elektrisk feil i kabler som funksjon av graden av oppvarming. Resultatet av forsøkene var at en kabel med PE-isolasjon sviktet ved 270 °C, mens en kabel med PE eller PVC-isolasjon sviktet ved 250 °C. Det ble antatt at den elektriske feilen som oppstod skyldtes kortslutning eller en tilstand med lav motstand på tvers gjennom kabelen.

Stensaas forteller om et forsøk utført av Fulcomer, beskrevet i rapporten "Temperature Measurement on operating surface mounted lighting fixtures". Det ble benyttet en vanlig kabel klassifisert for 60 °C i forsøket. Denne kabelen forsynte en pære med større effekt enn hva lampen egentlig var beregnet for. Dette førte til at temperaturen i koblingsboksen hvor kabelen var koblet nådde en temperatur i området 202 °C-205 °C. Etter mindre enn 65 timer oppstod det en feil i koblingsboksen. Feilen som oppstod skyldtes at den voldsomme overopphetingen førte til at kabelisolasjonen ble sprø, fikk sprekkdannelse og revnet. Isolasjonen løsnet dermed fra lederne, hvilket resulterte i kortslutning.

6 Deteksjonsprinsipper

6.1 Varmedeteksjon ETIM

Systemet Electric Temperature Increase Monitoring er under utvikling. Dette systemet måler og registrerer temperaturen og temperaturøkningen i koblingspunkter. Dersom temperaturen som måles overstiger en bestemt verdi, vil enheten sende et alarmsignal til en kontrollenhet, og huseier blir varslet om hendelsen. I Figur 27 er prinsippet for hvordan kommunikasjonen er tenkt å foregå illustrert.



Figur 27 - Kommunikasjonen for ETIM-vernet[43]

Denne overvåkningsanordningen har en separat temperaturregistreringsenhet. Temperaturregistreringsenheten er en liten brikke, ca. 3 cm. lang og 1,5 cm. bred, som er ment for montering enten inne i eller på utsiden av knutepunkter i elektriske anlegg. Slike knutepunkter kan eksempelvis være koblingsbokser, stikkontakter, brytere, fordelingsbokser, kontaktorer og sikringer [43].

Tanken er at sensorer skal plasseres i de mest utsatte koblingspunkter i et elektrisk anlegg. Dette vil innebære koblingspunkter med forhøyet sannsynlighet for varmgang, eventuelt koblingspunkter der konsekvensene av et branntilløp vil være spesielt store.

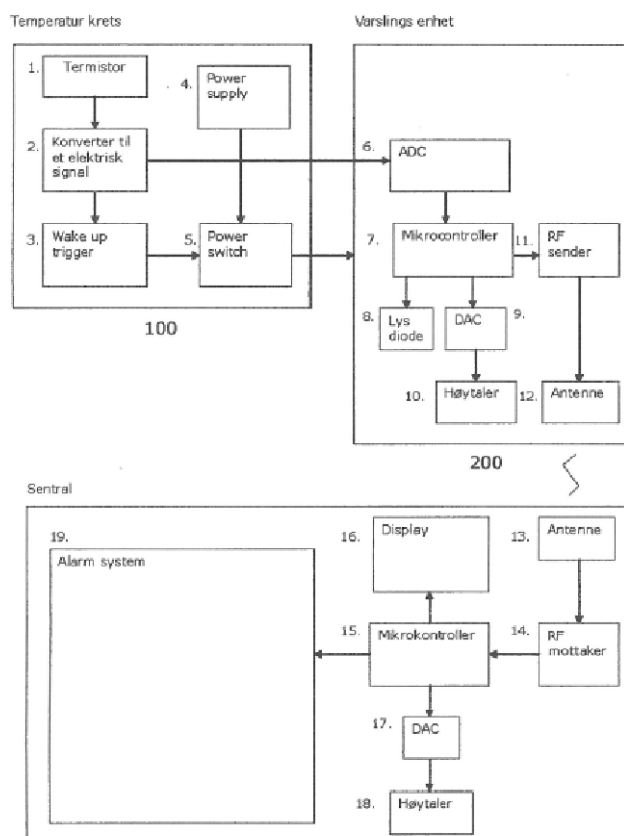
Overvåkningsanordningen

Overvåkningsanordningen består i grove trekk av en temperaturkrets, en varslingsenhet og en sentral [43]. Den lille brikken, temperaturregistreringsenheten, består av både temperaturkretsen og varslingsenheten. En elektrisk føler som måler temperaturen, er plassert i temperaturkretsen sammen med en aktiveringskrets og en strømtilførsel.

Deteksjonsprinsipper

ETIM har eksperimentert litt med hvilken form for strømtilførsel enheten skal ha [13]. Slik det ser ut i dag er en mulighet for strømtilførsel bruk av batteri. En annen mulighet som har blitt testet baserer seg på at temperaturregistreringsenheten selv skal produsere den energien som trengs for å sende signaler til kontrollenheten. Det gjøres ved å ta i bruk en spole. Gjennom spolen tres en strømførende leder. Lederen er en del av den elektriske installasjonen som skal beskyttes. Når det går strøm gjennom lederen vil induksjon føre til at temperaturregistreringsenheten får nok energi til at måleverdier kan sendes til sentralen. Begge løsningene har ulike fordeler og ulemper. Batteriet vil vare bare en begrenset tid, før det må byttes ut. For at løsningen med spole skal fungere tilfredsstillende, må det gå tilstrekkelig mye strøm gjennom lederen. I tillegg vil denne løsningen innebære et krav om at monteringen må gjøres av en elektriker.

Dersom temperaturregistreringsenheten måler en verdi over en forhåndsbestemt grenseverdi, vil aktiveringskretsen styre en strømbryter som gir strøm til varslingsenheten. I varslingsenheten er det en mikrokontroller som prosesserer signalene og utfører ulike handlinger [44]. Det sendes et varslingssignal til sentralen hvor signalene behandles videre. Figur 28 viser en skjematisk fremstilling av de enkelte elementer, gruppert i en temperaturkrets, en varslingsenhet og en sentral [44].



Figur 28 - Skjematisk fremstilling av de enkelte elementer, gruppert i en temperaturkrets, en varslingsenhet og en sentral[44]

Deteksjonsprinsipper

Sentralen kan sørge for at det sendes en SMS til huseier, en alarm aktiveres, varsling blir sendt til brannvesen, vaktsselskap eller liknende. Utkobling av den aktuelle strømkursen er også en mulighet dersom det installeres reléer. Tanken er i første omgang at det skal sendes en form for et alarmsignal til forhåndsbestemte mottakere, i prioritert rekkefølge. Systemet fortsetter å sende ut alarm fram til en av mottakerne kvitterer ut varslingen. [43, 44]

Sentralen vil kunne gi opplysninger om hvilke enheter som har sendt signal, og hvilken temperatur den aktuelle enheten har, samt temperaturstigningen siden siste måling. Denne informasjonen kan også logges, slik at det er mulig å følge temperaturutviklingen i de ulike koblingspunktene der sensorene er montert [43, 44]. Figur 28 viser en skjematisk fremstilling av de enkelte elementer, gruppert i en temperaturkrets, en varslingsenhet og en sentral [44].

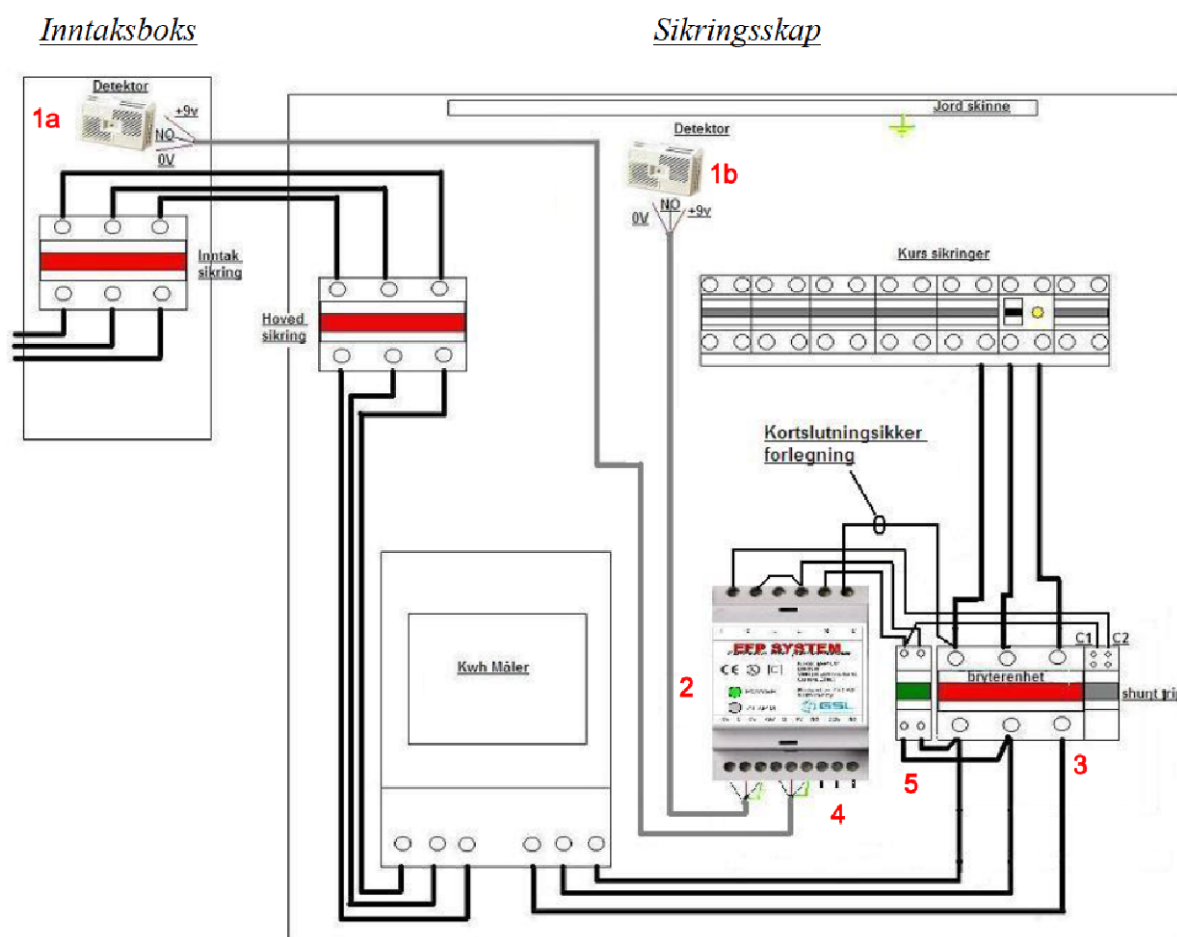
Denne lille brikken, temperaturregistreringsenheten, er ment å være rimelig i innkjøp og enkel å montere. Systemet skal tilby eier av anlegget mulighet for å avlese temperaturen og følge utviklingen av temperaturen i de ulike sensorene [43]. Denne måten å oppdage en seriefeil på skal oppdage varmgang før det skjer noen større skader [43].

6.2 Ionedeteksjon EFP

EFP, Electric Fire Prevention, skal forhindre branner ved å detektere ioner i luften som oppstår ved oppvarming av ulike materialer [45, 46]. Innretningen er oppfunnet av Per Erik Lie [47]. Systemet skal detektere og stoppe branntilløp i elektriske anlegg før en eventuell brann bryter ut. Dette gjør systemet ved å reagere på endringer i ioneflyten som oppstår når materialer oppvarmes og avgir blant annet hydrogenkloridgass og røyk. Ved temperaturer på 70 °C vil det utvikles gasser som er detekterbare for detektoren [45].

Detektorene er ment å monteres inn i sikringskap og dataskap i næringsbygg og boliger. Dette fordi dette er områder med mye elektrisk utstyr, og en kilde til en betydelig andel av de totale brannene og branntilløpene i Norge [48]. Det er mulig å plassere detektorene også ved andre risikoområder. Dette kan eksempelvis være i tekniske rom, vaskerom og kjøkken. Dermed vil områder hvor det erfaringsmessig er mer sannsynlig at det oppstår branner kunne beskyttes av systemet.

Deteksjonsprinsipper



Figur 29 - Systemskisse av EFP Systemet i en installasjon i et sikringskap med inntaksboks [48]

Figur 29 viser en systemskisse av EFP Systemet i en installasjon i et sikringskap og en inntaksboks [48]. Systemet består av detektorer, en sentralenhet, en bryterenhet, en potensialfri alarmutgang tilkoblet eksterne varslingsystemer og en styrestrømssikring. Videre følger en beskrivelse av de ulike enhetene i systemet [48]:

Detektorene plasseres på steder i det elektriske anlegget hvor det er forventet en større sannsynlighet for brann, eventuelt større konsekvenser dersom en brann skulle bryte ut. Detektorene er spesialutviklede, finkalibrerte og miljøvennlige [48]. De vil reagere dersom det oppstår varmgang i den elektriske installasjonen, som frigir klorgass og røyk. Varmgangen kan skyldes både motstandsoppvarming, lysbuer, kortslutninger, overbelastning og feil bruk av elektriske apparater. Når detektoren oppdager et branntilløp, vil et signal sendes til sentralenheten.

Sentralenheten er EFP-systemets hjerne. Denne sentralenheten har som oppgave å forsyne detektorene med strøm. Sentralenheten skal også motta signaler fra detektorene dersom de oppdager et branntilløp. Blir et branntilløp oppdaget har sentralenheten som oppgave å sende et potensialfritt alarmsignal samtidig som bryterenheten i systemet aktiveres.

Bryterenheten er en arbeidsstrømutløser koblet mot enten en automatsikring, en hovedsikring, en effektbryter, en motorvern eller en jordfeilbryter. Når bryterenheten

Deteksjonsprinsipper

aktiveres av sentralenheten, vil vernet som benyttes bryte strømmen i kretsen, og dermed stanse branntilløpet. Det er mulig å tilpasse bryterenheter etter behov. Eksempelvis kan det være fordelaktig å legge inn en tidsforsinkelse på bryterenheter, slik at det kan gjøres en kontrollert nedkjøring av sensitivt utstyr. En annen mulighet er å selektere kurser slik at noen kurser brytes momentant, noen får en tidsforsinkelse og noen ikke brytes.

Den potensialfrie alarmutgangen vil sende et signal til et eventuelt varslingssystem dersom sentralenheten aktiveres på grunn av et branntilløp. Ulike typer varslingssystemer som kan benyttes er eksempelvis:

- Brann- og innbruddsalarm. De fleste av dagens brann- og innbruddsalarmsystemer har et potensialfritt alarminntak. Dermed er det mulig å tilpasse systemet slik at brukeren får beskjed dersom EFP-systemet har gått i alarm og brutt strømmen. Brukeren får da beskjed fra sitt allerede eksisterende alarmsystem.
- Nummersender. En nummersender vil sørge for at bruker av systemet enten ringes opp eller mottar en SMS dersom EFP-systemet aktiveres.
- Akustisk og/eller visuell alarm.

Styrestrømssikringen tilkobles foran sentralenheten for å sikre sentralen mot kortslutningsstrømmer ved feil.

Systemet er fleksibelt, og kan installeres i allerede eksisterende elektriske anlegg. Installasjonen må utføres av en autorisert el-installatør som også har godkjenning fra GSL, Global Sourcing and Logistics AS[48]. Dette innebærer at det har vært gjennomført nødvendig opplæring i installasjon og vedlikehold av systemet.

6.3 Lysbuedeteksjon Siemens

Siemens har utviklet en lysbuedetektor. Lysbuedektoren skal beskytte mot både parallell- og serielysbue ved å bryte strømmen i kretsen dersom en lysbue oppdages. Lysbuevernet til Siemens skal være i henhold til standarden for lysbuevern, IEC 62606 [4]. Prinsippene bak virkemåten til detektoren beskrives videre i kapittelet.

Lysbuedektoren

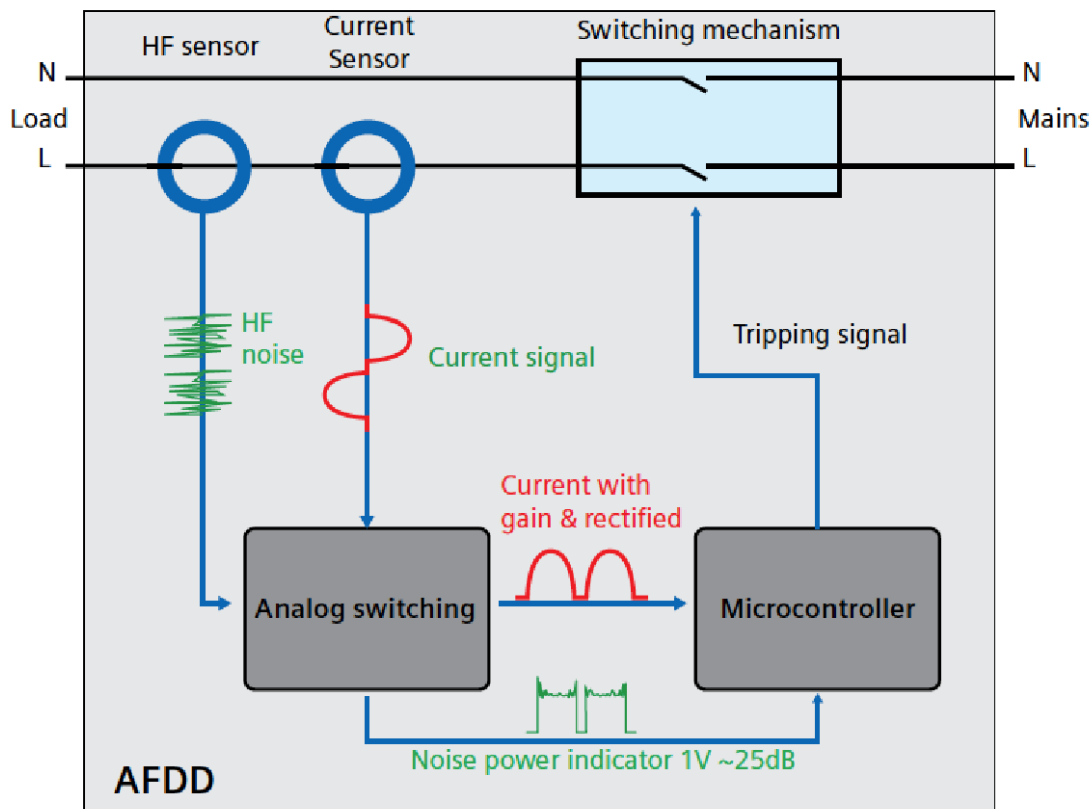
Siemens har utviklet en lysbuedetektor, 5SM6 AFD unit, som skal beskytte kurser mot brannfarlige lysbuer. Denne detektoren skal detektere lysbuer både i serie og i parallell, i tillegg til at den ikke skal bryte strømmen dersom det oppstår ufarlige lysbuer.

Den prinsipielle utformingen av detektoren er vist i Figur 30. Som figuren viser, skal aktive ledere gå gjennom enheten, og være tilkoblet en brytemekanisme. I det illustrerte eksempelet vil de aktive lederne være en nøytralleder og en faseleder. Faselederen passerer gjennom to ulike målesensorer. Den ene sensoren er en strømsensor, som måler lavfrekvente signaler. Den andre sensoren er en sensor som skal detektere høyfrekvente signaler [4].

Analog elektronikk forbereder signalene fra sensorene for videre prosessering i mikrokontrolleren. De høyfrekvente strømsignalerne blir skannet i frekvensområdet 22-

Deteksjonsprinsipper

24MHz. Det er dette som videre blir kalt RSSI; det står for "received signal strength indication". RSSI representerer da effekten i lysbuen ved en definert frekvens og båndbredde.



Figur 30 - Prinsipiell utforming av Siemens lysbuedetektor, 5SM6 AFD Unit [4]

Mikroprosessen prosesserer de målte signalene som på forhånd har blitt bearbeidet av den analoge elektronikken. Dersom mikroprosessen finner kriteriene for en skadelig lysbue for innfridd, vil mikroprosessen sende ut et utløsende signal til brytemekanismen. En automatsikring, med eller uten jordfeilvern, må benyttes samtidig med lysbuedetektoren. Det er i automatsikringen at selve brytemekanismen befinner seg. Det utløsende signalet fra mikrokontrolleren sender et utløsesignal til automatsikringen, som tar seg av selve utkoblingen av kretsen. Feilstedet mister dermed strømtilførselen sin, og en eventuell lysbue vil slukke. En lysbuedetektor sammen med en automatsikring er et lysbuevern, "arc fault detection device - AFDD" [4].

Deteksjon av serielysbue

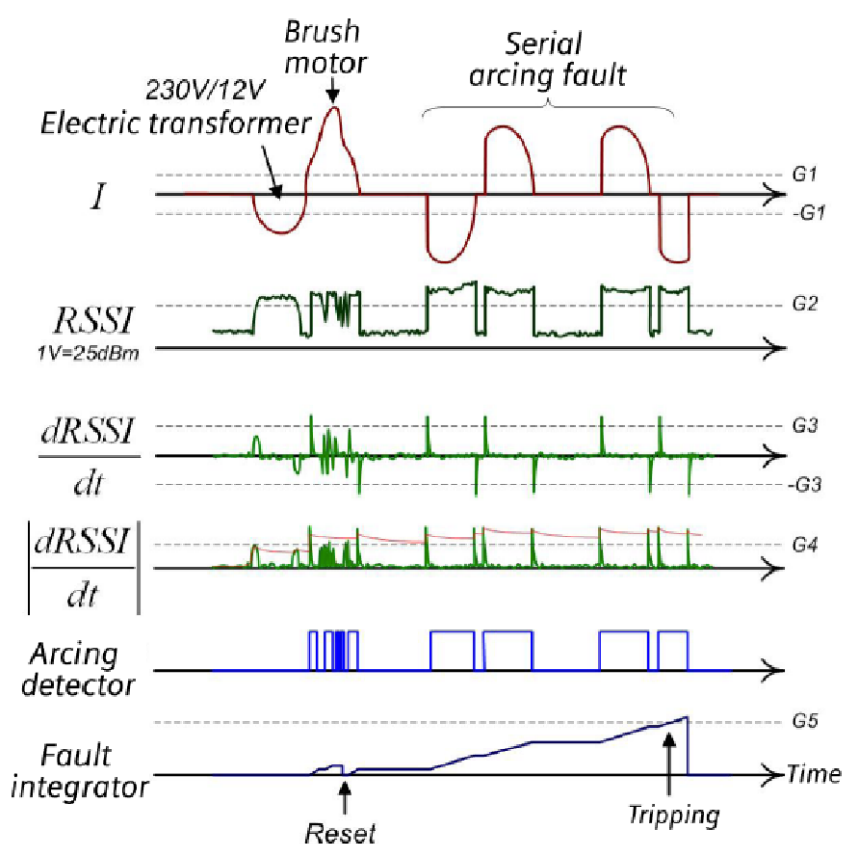
Lysbuedetektoren skal være i stand til å detektere lysbuer både i serie og i parallell mellom to ledere. Omtrent 80 % av kalkuleringsarbeidet som utføres av mikrokontrolleren blir brukt til å detektere serielysbue. De resterende 20 % går med til deteksjon av parallelllysbuer [4].

Serielysbuer detekteres i stor grad av RSSI-verdien og de hurtige endringene i RSSI. I det RSSI oppnår en verdi større enn G2, vist i Figur 31, er det første kravet for at signalet

Deteksjonsprinsipper

skal tolkes som en skadelig lysbue innfridd. RSSI-verdien blir derivert med hensyn på tid. Når en serielysbue oppstår eller slukker vil absoluttverdien til den tidsderiverte av RSSI gi betydelige utslag. Dersom denne verdien når en viss grenseverdi, G4 i Figur 31, innfris det andre kravet for at signalene skal tolkes som en skadelig serielysbue [4].

Absoluttverdien til den tidsderiverte av RSSI gir et referansesignal for feilintegratoren, som bygger seg opp når lysbuer tenner og slukker ved strømmens nullgjennomgang. For at et signal skal tolkes som en skadelig lysbue, må begge kravene være innfridd; grenseverdiene G2 og G4 må overskrides. Dersom dette er tilfelle vil feilintegratoren bygge seg opp, og når denne verdien når grenseverdien G5 i Figur 31, vil mikrokontrolleren sende et utløsesignal til bryteenheten i automatsikringen. Strømmen vil da brytes, og lysbuen slukker [4].



Figur 31 - Signalprosessering for deteksjon av serielysbue [4]

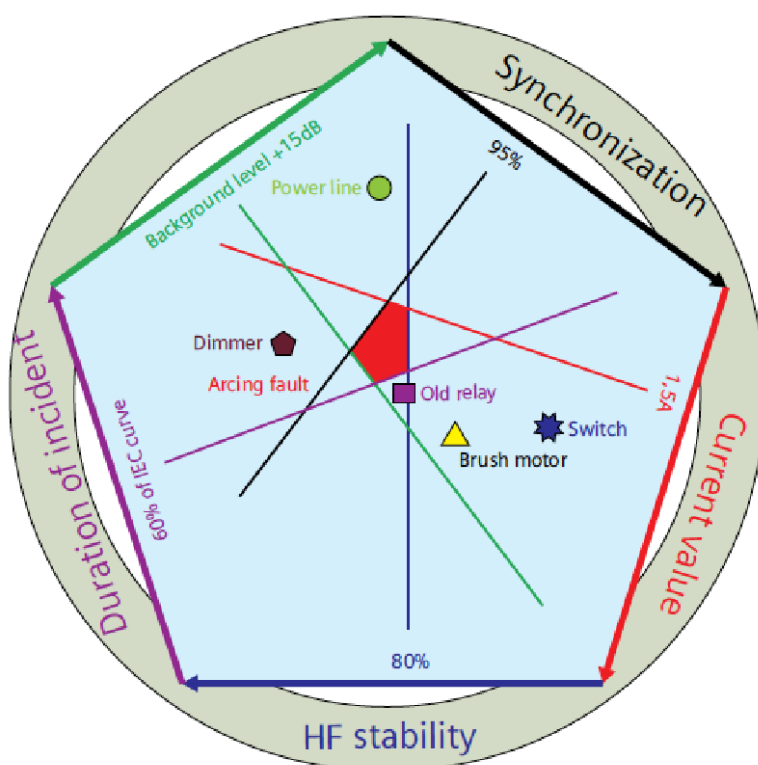
Hvordan skilles skadelige lysbuer fra andre typer forstyrrelser?

Der finnes flere typiske elektriske laster som gir høyfrekvent støy som kan forveksles med lysbuer. Eksempler på dette er børstemotoren i en boremaskin, startstrømmen i lysrør eller lysbuer som oppstår i brytere [4]. En annen krevende situasjon er lysbuer i en nærliggende krets. Det er ikke ønskelig at signalene fra slike enheter og situasjoner skal tolkes som en skadelig lysbue, og føre til at bryteenheten utløses og strømmen brytes.

Deteksjonsprinsipper

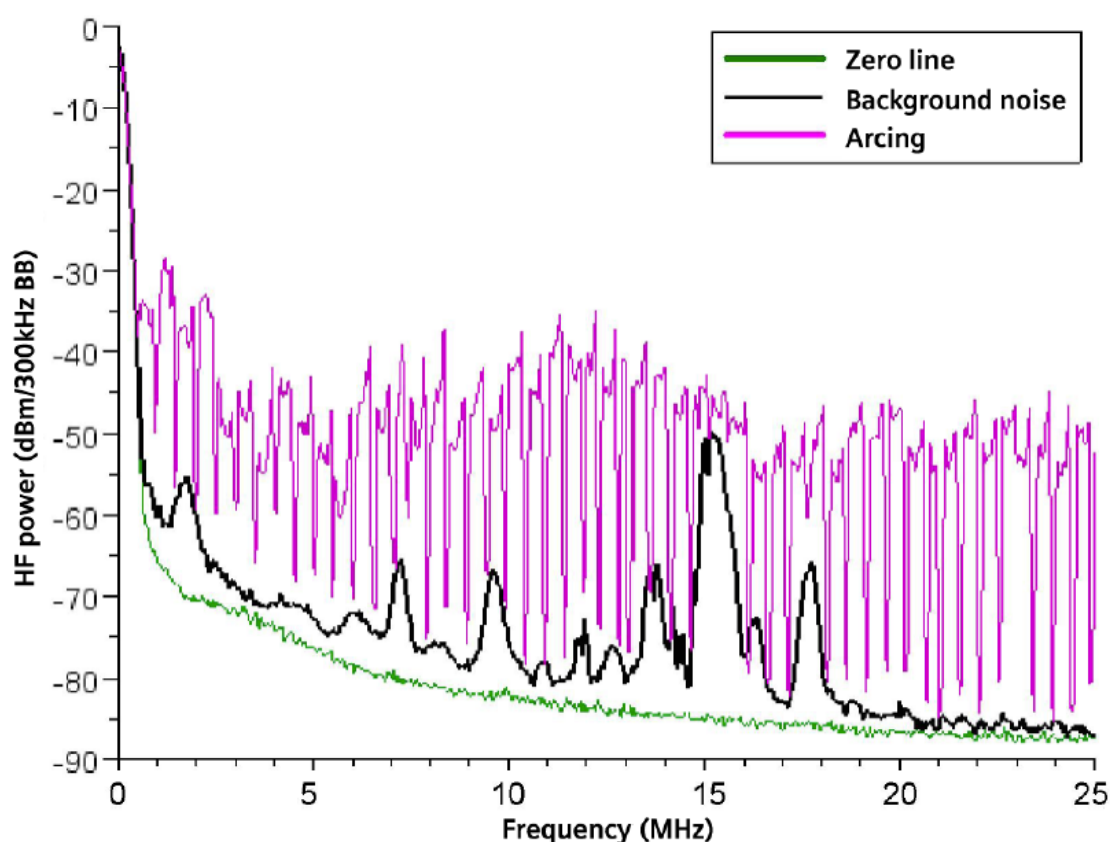
Dette har Siemens løst ved at feilintegratoren blir nullstilt med det samme en hendelse som er utypisk for en skadelig lysbue inntreffer. I Figur 31 blir dette illustrert i venstre halvdel. Det er her brukt det typiske eksempelet børstemotor. Børstemotoren har et litt annerledes strømsignal enn hva en serielysbue vil ha, da børstemotoren gjerne har en kontinuerlig kurve. Motsetningsvis vil en serielysbues strømkurve være lik null i et lite tidsrom ved strømmens nullgjennomgang. Børstemotorens høyfrekvente signaler(RSSI), bærer preg av interharmoniske frekvenser. En serielysbue skaper høyfrekvent bredbåndsstøy. Dermed vil RSSI-signalene fra en lysbue være jevnere. Dette er en måte å skille skadelige lysbuer fra ufarlige situasjoner på; registreres interharmoniske frekvenser nullstilles feilintegratoren.

Figur 32 viser kriteriene som må tilfredsstilles for at en situasjon skal oppfattes som en skadelig lysbue [4]. Målte verdier må overstige visse grenseverdier, vist ved streker i figuren, for at situasjonen skal tolkes som en skadelig lysbue. Eksempelvis må strømmen være høyere enn 1,5A samtidig som de høyfrekvente strømsignalene må ha en stabilitet på mer enn 80 %. Blir alle kriteriene innfridd, vil måleresultatene gi en verdi innenfor det røde området i midten. Lysbuevernet oppfatter situasjonen som en skadelig lysbue, og mikrokontrolleren sender da et signal til brytemekanismen, som bryter strømmen i kretsen.



Figur 32 - Kriterier for deteksjon av lysbuefeil [4].

I tillegg til å se på kriteriene i figuren, blir også høyfrekvent bakgrunnsstøy tatt hensyn til. Basert på egne erfaringer, har Siemens funnet ut av hvordan de best mulig skiller de høyfrekvente signalene fra en lysbue fra høyfrekvent bakgrunnsstøy. Laboratorieforsøk og erfaringer fra lysbuedetektorer i USA har indikert at frekvensområdet 22-24MHz vil være gunstig for å skille situasjonene. Grunnen til det er at det i dette frekvensområdet har vist seg å være mindre bakgrunnsstøy. Figur 33 gir et bilde på hvilke erfaringer Siemens har gjort seg. I frekvensområdet 22-24MHz kan det observeres en større forskjell mellom høyfrekvent bakgrunnsstøy og de høyfrekvente signalene fra en lysbue. [4]



Figur 33 - Høyfrekvent bakgrunnsstøy og høyfrekvente signaler fra lysbue [4]

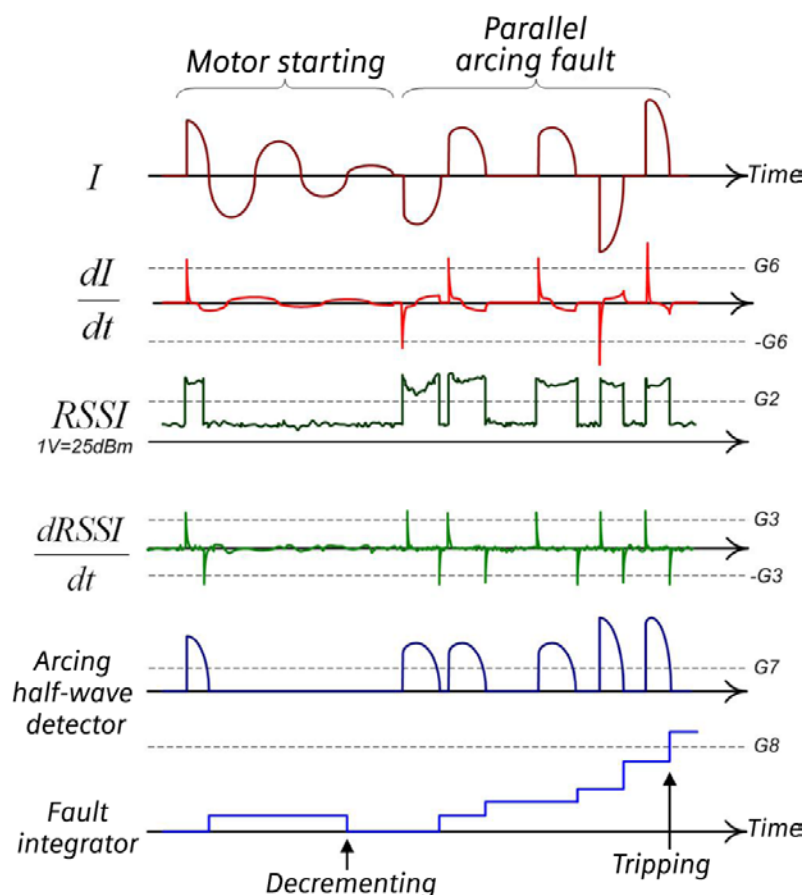
Deteksjon av parallelllysbue

Lysbuevernet til Siemens skal også være i stand til å detektere parallelllysbue. En parallelllysbue vil gi signaler forskjellig fra signalene fra en serielysbue, og må derfor analyseres separat. Typiske signaler fra en parallelllysbue som blir målt av lysbuedetektoren, er vist i Figur 34. En motorstart er vist i venstre del av figuren, da en motorstart kan gi signaler som kan likne på en parallelllysbue. En parallelllysbue er vist i høyre del av figuren.

Deteksjonsprinsipper

For deteksjon av en parallelllysbue kalkuleres den tidsderiverte av strømmen. Denne verdien må nå en viss verdi, $G6$, for at signalet skal kunne bli oppfattet som en serielysbue. I tillegg til dette kravet, er det et krav at RSSI må være større enn grenseverdien $G2$. Når begge kravene er innfridd, vil de ufullstendige strømkurvene bli oppfattet som en parallelllysbue, og feilintegratoren bygger seg opp med en verdi proporsjonalt med lysbuestrømmen. I det feilintegratoren når verdien $G8$, vil et utløsesignal bli sendt til brytemekanismen i automatsikringen som lysbuedetektoren er koblet sammen med. [4]

Detektoren skiller mellom en motorstart og en parallelllysbue ved å registrere hvor mange etterfølgende strømhålvkurver som oppstår. Dersom en viss tid går før eventuelt neste strømhålvkurve, vil feilintegratoren nullstilles. Dette er et kjennetegn ved motorstart og ikke parallelllysbue. Som strømkurven viser, vil en lysbue slukke i strømmens nullgjennomgang, og gjentenne først når spenningen overstiger gjennomslagsspenningen. Det er dette som gir de karakteristiske "skuldrene" til lysbuer som slukker og tenner omkring strømmens nullgjennomgang.



Figur 34 - Signalprosessering for deteksjon av parallelllysbue [4]

6.4 Lysbuedeteksjon andre leverandører

Ikke bare Siemens har utviklet lysbuevern. Flere av de større leverandørene av elektroutstyr har bekreftet at det jobbes med utvikling av lysbuedetektor. Enkelte av leverandørene har allerede bekreftet at de kommer til å lansere lysbuedetektorer i

Deteksjonsprinsipper

nærmeste fremtid. Prinsippene ser ut til å bygge på mange av de samme prinsippene som lysbuedetektoren til Siemens gjør. Mer dyptgående informasjon om virkemåten er imidlertid informasjon som ikke er offentliggjort. Virkemåten til lysbuevern laget av andre produsenter lar seg derfor vanskelig forklare. Presentasjonen av Siemens lysbuevern gir et eksempel på hvordan lysbuevern kan fungere.

Det finnes en mulighet for at noen av produsentene klarer å utvikle et tiltak som gjør feilsøking enklere. Dette kan eksempelvis være en form for minnefunksjon som kan leses av. Denne minnefunksjonen bør da kunne angi hvilken type last som har forårsaket utkoblingen. Type last kan muligens skilles på induktiv-, resistiv- eller kapasitiv last.

6.5 Varmedeteksjon som gir kunstig jordfeil

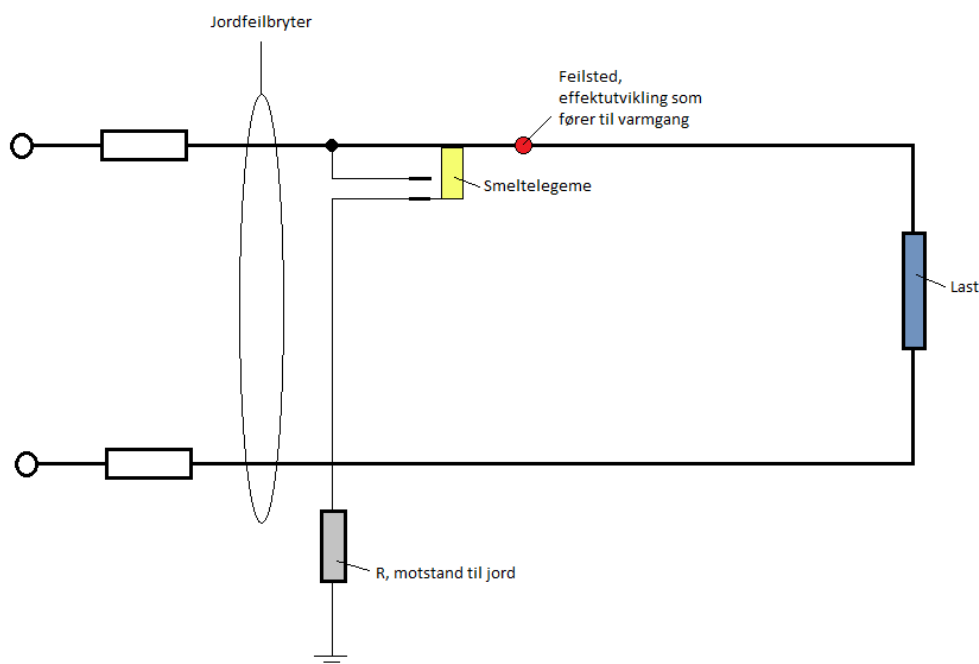
Aage Amundsen har utviklet et seriefeilvern som går ut på å framprovosere en kunstig jordfeil dersom det oppstår varmgang som følge av en seriefeil [49]. Den kunstige jordfeilen vil føre til at en jordfeilbryter legger ut kursen. Feilstrømmen er lav, men tilstrekkelig til at vernet løser ut. Det forutsettes altså at kretsen er beskyttet av et jordfeilvern for at denne innretningen skal fungere [49, 50].

Innretningen, som er beskrevet i Teknisk Ukeblad 03/06 [50], er en sylinder som kobles mellom fase og jord via ledninger. Selve sylindere er 20mm lang og har en diameter på omtrent 3mm [49]. Inne i sylindere vil det være en fjær av ledende materiale, et smeltelegeme og en motstand. Faseleder skilles fra jord ved det ikke-ledende smeltelegemet inne i sylindere. Det ikke-ledende smeltelegemet skiller den ledende fjæren, som er koblet til faseleder, fra ledningen som forbinder innretningen med jord. Smeltelegemet vil smelte når temperaturen omkring sylindere overstiger en viss temperatur over normale forhold. Dette kan eksempelvis være en smeltetemperatur på smeltelegemet mellom 80 °C og 120 °C. Det opprettes da en jordfeilstrøm mellom faseleder og jord, og denne jordfeilen vil bli detektert av jordfeilvernet.

Jordfeilstrømmen som går gjennom sylindere vil være begrenset av motstanden, men vil likevel være stor nok til å løse ut jordfeilvernet [51]. Et vanlig jordfeilvern løser ut ved 30mA. Dersom jordfeilbryteren av en eller annen grunn ikke løser ut når det er opprettet forbindelse til jord, skal motstanden som begrenser jordfeilstrømmen brenne av. På den måtes brytes forbindelsen til jord, og tilstanden er slik den ville vært uten noe seriefeilvern. Det finnes da en seriefeil i det elektriske anlegget.

Når smeltelegemet har smeltet, på grunn av høy omgivelsestemperatur, må hele innretningen byttes ut. Den lille sylindere må befinne seg i nærheten av seriefeilen, som vil føre til økt temperatur omkring feilstedet, for at den skal fungere hensiktsmessig. En mulighet er å løse dette ved å integrere innretningen i komponenter som erfaringsmessig kan være involvert i seriefeil. Slike komponenter er eksempelvis stikkontakter og støpsler.

Deteksjonsprinsipper



Figur 35 - Prinsippkisse av seriefeilvern med fremprovosert jordfeil [49, 51]

I en telefonsamtale 9. desember 2014 med Per Hopsø, daglig leder av selskapet Home Control AS som er innehaver av patentet, ble det informert om at seriefeilvernet tenkes lansert integrert i et stikkontaktdeksel av en meget spesiell utførelse. Dette dekselet har fått navnet "Flow", og oppfinneren, Nima Shahinian, vant i 2013 Norsk Designråds førstepris for unge talenter [52]. Dette stikkontaktdekselet er ment å passe til alle typer stikkontakter.

Løsningen med å plassere seriefeilvernet inne i selve dekselet, gjør det tillat å montere vernet uten elektriker. Alle har lov til å skru av dekselet på en stikkontakt. Dette er en klar fordel ved vernet.

Både stikkontakter og støpsler er syndebukker når det kommer til seriefeil. En feil i en av delene vil bli detektert av vernet, da vernet er plassert midt mellom både stikkontakten og støpselet. Varmgangen som en seriefeil vil kunne medføre, løser dermed ut jordfeilbryteren og strømmen i kretsen brytes.

Etter at en feil har oppstått, og jordfeilvernet har slått ut, må det søkes etter feilstedet på lik linje med søk etter jordfeil. Per Hopsø bekrefter i telefonsamtalen 9. desember 2014 at det i tillegg til denne søkemetoden er aktuelt å prøve å utvikle alternative metoder. Dette kan eksempelvis være et synlig tegn på stikkontakten dersom smeltelegemet har smeltet. En slik løsning vil lette letingen etter feilstedet betydelig.

I en e-post fra Per Hopsø, 9. desember 2014, ble det poengtert at produktet er ment å være en rimelig løsning på problemet med seriefeil. I produktet inngår selve stikkontaktdekselet, Flow, med seriefeilvernet integrert. Produktets enhetspris skal være langt fra avskrekkende, til tross for at det gjerne vil være nødvendig med et større antall stikkontakter i en boliginstallasjon.

7 IEC 62606

Det har blitt utviklet en internasjonal standard, IEC 62606 [53] for lysbuevern, "arc fault detection devices". Denne standarden setter krav til hvordan lysbuevern skal fungere, og hvilke krav de skal tilfredsstillere. Standarden er utformet på bakgrunn av laboratorieforsøk. Hensikten med laboratorieforsøkene var å finne ut hva som karakteriserer skadelige lysbuer og ufarlige lysbuer, samt hvilken effekt som skal til for at en lysbue skal være skadelig.

IEC 62606 setter dermed en rekke krav til lysbuevern. Videre følger en oppramsing av noen av kravene som inngår i standarden. Et lysbuevern i henhold til standarden skal tilfredsstillere IECs krav til blant annet responstid på vernet, krav om den mekaniske utformingen av vernet, hvordan vernet skal reagere ved overstrømmer og hurtige spenningsendringer, pålitelighet, EMC, motstandsdyktighet mot varme, omgivelsestemperatur, oppførsel av vernet ved kortslutningsstrømmer, hvordan vernet skal tåle ulike typer ufarlige laster uten å legge ut strømmen, operasjonelle egenskaper, dielektriske og isolerende egenskaper, beskyttelse mot elektrisk sjokk, mekanisk og elektrisk utholdenhet.

Denne standarden har blitt utviklet for lysbuevern som er ment å brukes i vanlige boliger. Av den grunn skal vernene kunne betjenes av ikke-instruert personell. Standarden tar for seg vern utformet som en enkelt enhet der brytemekanisme, for å bryte strømtilførselen i kretsen ved skadelig lysbue, er inkludert. Standarden tar også for seg enkeltenheter som kan påmonteres en annen beskyttelsesenhets med brytemekanisme, eksempelvis en automatsikring, samt en lysbuedetektor med beskyttelsesenhets integrert. Dette kan eksempelvis være en lysbuedetektor og en automatsikring integrert i en og samme enhet.

Lysbuevernene skal redusere risikoen for branner i elektriske kretser på grunn av lysbuer som utgjør en risiko for antennelse under visse forhold dersom lysbuen vedvarer [53]. I IEC 62606 blir et lysbuevern definert som en enhet som skal redusere risikoen for lysbuefeil ved å frakoble kretsen når en lysbue blir detektert [53]. Et lysbuevern skal være i stand til å detektere både serielysbue, parallelllysbue og jordfeillysbue. Lysbuevernene i standarden skal være tilpasset et IT-nett med 230V AC-spenning og 50Hz frekvens. Den minste strømmen i en lysbue som anses som en branntrusel i IEC 62606 er 2,5 Ampere [53].

Det er et krav i IEC 62606 [53] at lysbuedektoren og bryteenheten i vernet er fra samme leverandør eller tilknyttet det samme varemerket. Et annet krav i standarden som bør legges merke til er at det ikke er akseptert med lysbuevern som er konstruert på en slik måte at en lysbue fremprovoserer en strøm mellom en fase og nøytralleder, eller mellom fase og beskyttelsesleder i installasjonen, med den hensikt å utløse en annen enhet, eksempelvis en enhet med brytemekanisme. Standarden dekker ikke lysbuevern som tilføres strøm fra batterier eller en annen krets enn den kretsen som beskyttes av lysbuevernet [53].

En rekke tester av lysbuevern skal utføres for å verifisere at vernet er i henhold til standarden. Disse testene er beskrevet i standarden. I all hovedsak går testene ut på å bekrefte at vernene oppfyller de oppramsede kravene. De ulike testene som skal utføres

er beskrevet i kapittel 9 i standarden, og en oversikt over testene finnes i tabell 10 i standarden [53].

Testene, som er utformet med hensikt å teste funksjonaliteten til lysbuevernet ved serielysbue, skal alle testes med nominell spenning og strøm. Ved serielysbue skal vernet bryte strømmen innenfor tiden gitt i Tabell 2.

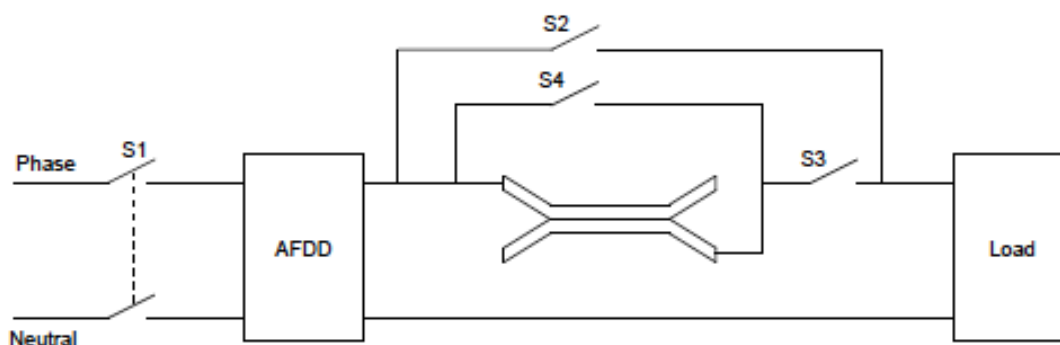
Tabell 2- Grenseverdier for lysbuevernets brytetid ved deteksjon av lysbue

Teststrøm (r.m.s. verdi)	2,5A	5A	10A	16A	32A	63A
Maksimal brytetid	1s	0,5s	0,25s	0,15s	0,12s	0,12s

Standarden setter en minste verdi til teststrømmen lik 2,5A. Skapes det lysbuer ved teststrømmer mindre enn $2,5A_{rms}$, krever ikke standarden deteksjon av lysbuen. Selve lysbuestrømmen vil være lavere enn teststrømmen, da strømmen i kretsen reduseres i det en lysbue oppstår. Skadelige lysbuer kan oppstå ved teststrømmer lavere enn $2,5A_{rms}$. Grunnen til at $2,5A_{rms}$ er valgt å være den laveste strømmen det stilles krav til, er et kompromiss mellom lysbuedeteksjoner og feildeteksjoner. Det ansees som meget uheldig at en situasjon som ikke er en lysbue blir detektert som en lysbue, og strømmen i kretsen blir brutt. Mange feildeteksjoner kan unngås ved at den laveste teststrømmen det stilles krav til deteksjon ved er $2,5A_{rms}$.

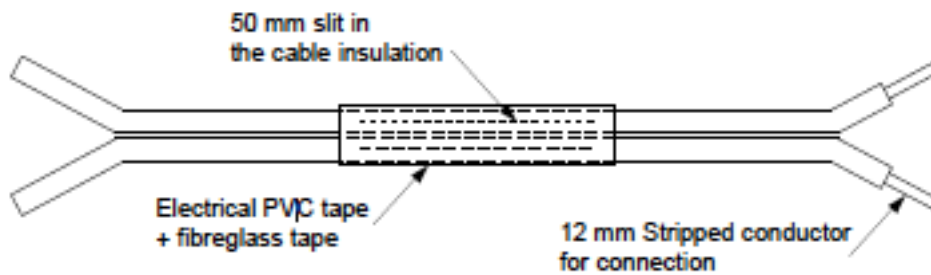
7.1 Tester med karboniserte kabelprøver

I standarden er det utformet en test som skal verifisere korrekt operasjon når en serielysbue plutselig oppstår i kretsen. En annen test skal verifisere korrekt operasjon dersom det settes inn en last med serielysbuefeil i kretsen. En tredje test skal verifisere korrekt operasjon dersom lysbuevernet settes inn i en krets med en allerede lysbuefeil. I alle de nevnte testene benyttes den samme testkretsen, vist i Figur 36. Alle de tre testene blir her beskrevet. De tre testene har det samme testoppsettet.



Figur 36 - Testkrets for serielysbue, IEC 62606 [53]

I testkretsen er to ledere bundet sammen på en måte som skal fremprovosere en lysbue. Ledertverrsnittet skal være 1,5mm², og testene skal foregå ved merkespenning. Kablene skal være minimum 200mm lang. I hver ende av kablene skal 25mm av hver kabel skilles fra hverandre. 50mm fra den ene enden skal det laget et lite kutt i isolasjonen, slik at lederne blir eksponert. Ingen tråder i lederne skal kuttes når isolasjonen slisses. Spalten i isolasjonen skal så dekkes over med et dobbelt lag av sort PVC. Deretter skal det samme området dekkes over med et dobbelt lag av fibreglasstape. Når dette er gjort skal kabelendene lengst unna spalten strippest for isolasjon de siste 12mm. Kablene er vist i Figur 37.



Figur 37 - Kabler hvor det lages en karbonisert vei mellom lederne, slik at det vil oppstå en serielysbue mellom kablene når det blir påsatt spenning, IEC 62606 [53]

Videre skal det dannes en karbonisert ledende vei over isolasjonen mellom lederne. Dette gjøres ved at kablene blir tilkoblet en krets med 30mA kortslutningsstrøm, og en tomgangsspenning på minimum 7kV. Det skal gå strøm gjennom kretsen i omtrent 10 sekunder, eller til røykutviklingen stopper. Deretter skal kretsen tilkobles en krets med 300mA kortslutningsstrøm, og en spenning på minst 2kV, eller tilstrekkelig til å gjøre kretsen strømførende. I ett minutt eller fram til røykutviklingen stopper skal det gå strøm gjennom lederne. Dannelsen av en karbonisert ledende vei over isolasjonen mellom lederne anses som fullført når en 100W glødelampe begynner å gløde dersom kretsen blir påsatt en spenning på 230V.

7.1.1 Test 1 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det plutselig oppstår en serielysbue:

Alle bryterne skal initielt være lukket fram til teststrømmen har stabilisert seg. Teststrømmen skal varieres fra den minste lysbuestrømmen og opp til lysbuevernets merkestrøm. For å variere strømmen endres lasten. Testbryteren S2 åpnes. Deretter åpnes testbryter S4. Kablene med den karboniserte ledende veien er da i serie med lasten, og det er forventet at det skal oppstå en lysbue mellom kablene. Lysbuevernets brytetid skal da måles tre ganger, og ingen målinger skal overgå verdiene i Tabell 2.

7.1.2 Test 2 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det settes inn en last med en serielysbuefeil:

Testbryterne S3 og S4 er i åpen posisjon. Testbryteren S1 er i lukket posisjon. Det er også lysbuevernet. Teststrømmen tilpasses ved å endre på lasten til den laveste anvendelige teststrømmen i Tabell 2. Testbryteren S2 skal så åpnes. Deretter lukkes

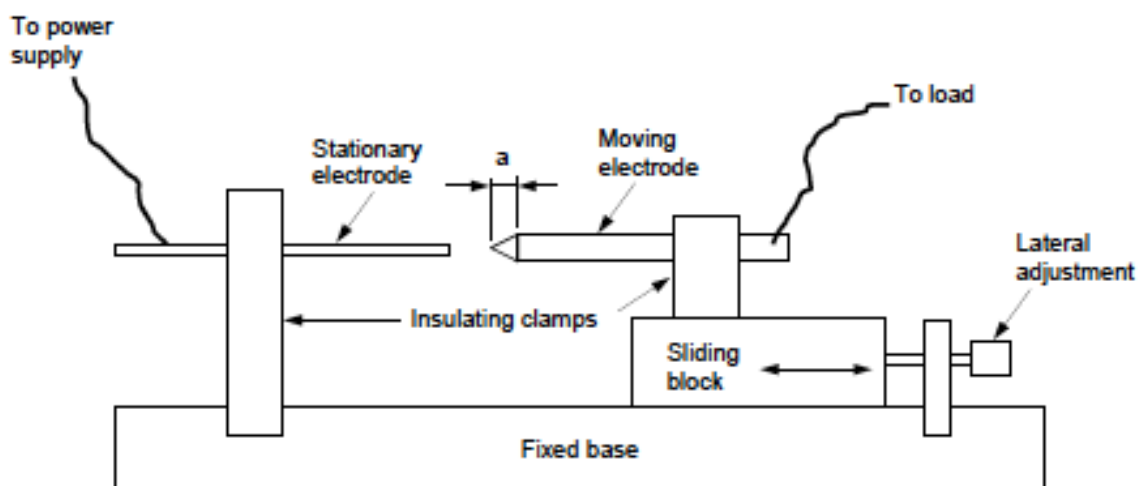
testbryter S3. Situasjonen er dermed at kablene med den karboniserte ledende veien er i serie med lasten, og en lysbue mellom kablene er forventet å oppstå. Tiden fram til vernet bryter strømmen måles tre ganger. Tiden skal ikke ved noen tilfeller overgå tiden gitt i Tabell 2. Når dette er gjennomført gjentas testen en gang til, men denne gangen med lysbuevernets merkestrøm.

7.1.3 Test 3 – Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevernet dersom det plutselig tilføres strøm til en krets med lysbuefeil:

Testbryter S1, S2 og S3, samt lysbuevernet skal initielt være i lukket posisjon. Testbryter S4 skal være i åpen posisjon. Teststrømmen tilpasses med lasten slik at den blir lik den minste anvendbare strømmen i Tabell 2. Deretter åpnes først testbryter S1, så åpnes testbryter S2. Når dette er utført lukkes testbryter S1 igjen. Bryter S1, S3 og lysbuevernet er dermed i lukket posisjon, og det vil gå en lysbuestrøm gjennom den karboniserte strømførende veien. Lysbuevernet skal da bryte strømmen i kretsen innenfor tidsrommet gitt i Tabell 2. Testen utføres tre ganger, og tiden skal være innenfor kravet alle tre gangene. Testen repeteres med lysbuevernets merkestrøm.

7.2 Test ved bruk av lysbuegenerator

I tillegg til de tre testene beskrevet er det også utformet en test med en lysbuegenerator. En prinsippsskisse av lysbuegeneratoren er vist i Figur 38. Den ene elektroden står fast, mens den andre kan beveges. Når kretsen blir påsatt spenning, skal det være kontakt mellom elektrodene. Elektrodene skal så dras en passende avstand fra hverandre, og det skal da oppstå en stående lysbue mellom elektrodene. Lysbuevernet skal bryte strømmen etter mindre enn 2,5 ganger brytetiden gitt i Tabell 2. Sammenliknet med testene med karbonisert vei mellom to kabler, er det 2,5 ganger mer energi i lysbuen med karbonisert vei enn hva det er i lysbuen laget av lysbuegeneratoren. Den ene elektroden skal bestå av karbon-grafitt, og være $6\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ lang. Den andre elektroden skal bestå av kobber. Det kan være nødvendig å rengjøre og spisse elektrodene for at lysbuetestene skal kunne gjentas.

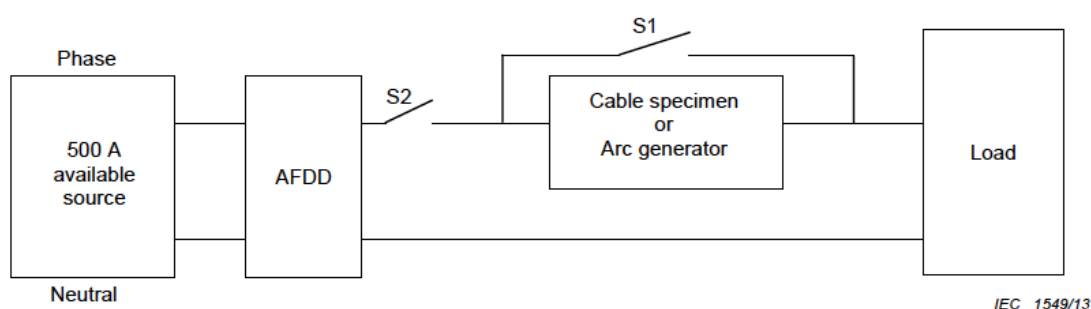


Figur 38 - Prinsippsskisse av en lysbuegenerator, IEC 62606 [53]

7.3 Test – Feildeteksjoner ved ulike forstyrrende laster

Lysbuevernet skal ikke bryte strømmen i kretsen med mindre situasjonen er en skadelig lysbue. Derfor skal lysbuevern testes med ulike laster som kan gi forstyrrelser som kan forveksles med en lysbue. Lysbuevernet skal klare å skille mellom ufarlige situasjoner og skadelige lysbuer, og kun bryte strømmen ved en skadelig lysbue. Det er også viktig at lysbuevernet klarer å oppdage en lysbue i kretsen, selv om kretsen er belastet med ulike andre krevende laster.

Kretsen skal settes opp som i Figur 39, med enten en karbonisert kabelprøve eller lysbuegenerator i parallell med bryter S1. Spenningen skal være merkespenningen til lysbuevernet; 230V eller 120V. Er merkespenningen 230V skal teststrømmen være 2,5A, er den 120V skal teststrømmen være 5A. I tilfellet der lysbuevernet skal testes med lysbuer, skal bryter S1 være åpen. Når lysbuevernet testes uten lysbuer, skal bryteren være lukket. Vernet skal bryte strømmen i tre av tre tilfeller med lysbue, og i ingen tilfeller uten lysbue.



Figur 39 – Testkrets [4]

I videre tester uten lysbue, varieres lasten. I minst 5 sekunder skal det gå strøm gjennom lasten. Fem repetisjoner med inn- og utkobling av lasten skal utføres. Testene utføres ved merkespenningen til vernet. Videre følger en oppramsing av de ulike lastene som skal testes, med de tilhørende kravene for en merkespenning ved 230V[4]:

- a) En støvsuger som trekker mellom 1150-1610W
- b) En strømforsyningsenhet med elektronisk kobling. Den totale laststrømmen må være minst 2,5A, med et minimum av total harmonisk forvrenging, THD, på 100 %. Individuelle minste andel harmoniske forstyrrelser skal være 75 % ved den tredjeharmoniske, 50 % ved den femteharmoniske og 25 % ved den syvendeharmoniske. Strømforsyningsenheten skal være påslått.
- c) En 2,2kW motor med kondensatorstart.
- d) En lampedimmer (tyristor) med en filtrerende spole som kontrollerer en 600W glødelampe. Dimmeren skal testes i posisjonen som gir maksimalt lys og i posisjoner som gir en ledevinkel på 60°, 90° og 120°, samt ved den minste stillingen hvor glødelampen fortsatt gløder.
- e) To fluorescerende lamper i tillegg til en resistiv last på 5A.
- f) 12V halogenlamper som får strømtilførselen sin fra en transformator med total effekt på minst 300W, i tillegg til en resistiv last på 5A.
- g) Et elektrisk håndverktøy med minimum 600W.

8 Test av seriefeilvern som baserer seg på varmedeteksjon

8.1 Bakgrunn

Hensikten med å gjøre forsøk med seriefeilvernene var først og fremst å teste funksjonaliteten til seriefeilvernet som skaper jordfeil. Lysbuevernets- og ETIM-vernets funksjonalitet ble testet i den forberedende prosjektoppgaven [22]. ETIM-vernet ble også testet i masteroppgaven "Seriefeilvern i elektriske installasjoner", skrevet av Carl Olav Larsson [13]. Larsson dokumenterte meget gode resultater for dette vernet, som reagerte akkurat som det lovte; når temperaturen oversteg en viss grenseverdi, ble en alarm utløst. ETIM-vernet er beskrevet i kapittel 6.1.

Testene i prosjektoppgaven bekreftet Larssons resultater; det temperaturovervåkende vernet, ETIM, detekterte seriefeil som førte til varmgang når temperaturen steg over grenseverdien, 50 °C, inne i koblingsboksen. Det var derimot ikke mulig for ETIM-vernet å oppdage serielysbuer når feilstedet ikke var varmet opp ved varmgang på forhånd. Lysbuene klarte ikke å varme opp hele koblingsboksen tilstrekkelig til at ETIM-vernet oppdaget feilen innen rimelig tid.

Lysbuene som ble skapt under forsøkene var ikke stabile nok til at lysbuevernet klarte å oppdage lysbuer ved alle tilfellene. Varmgang var også en feilsituasjon som lysbuevernet ikke detekterte. Den eneste feilen som lysbuevernet detekterer er stabile serielysbuer og parallelllysbuer. Det ble i prosjektoppgaven konkludert med at ingen av vernene som ble testet kunne beskytte mot alle seriefeil. Hvilke seriefeil som er de hyppigst forekommende og hvilke seriefeil som i størst grad fører til brann må finnes ut av før noen av seriefeilvernene kan framheves over andre.

Til tross for at ETIM-vernet allerede var testet, skulle det testes samtidig med seriefeilvernet som skaper jordfeil. Testene skulle være av lengre varighet enn testene i prosjektoppgaven. Det var da forventet en mer jevn økning av temperaturen i hele koblingsboksen. Dette ble sett på som et mer realistisk utviklingsforløp enn testene som ble utført i prosjektoppgaven, da seriefeil gjerne er feil som utvikler seg over lengre tid. Et tidsperspektiv på en arbeidsdag er likevel langt fra hva som kan forventes av en virkelig seriefeil, som kan utvikle seg over flere måneder og år. Både Babrauskas og Mostue poengterer den sentrale rollen tiden har i forbindelse med antennelse av materialer [54, 55].

Lysbuevernet ble også installert. Fordi seriefeilen var inni stikkontakten, ville en lysbue ikke kunne bli direkte observert. Ved å ta i bruk lysbuevernet, skulle lysbuevernet hjelpe med å skille en seriefeil med varmgang fra en seriefeil som innebar en stabil lysbue. Veldig hurtige temperaturstigninger nær koblingspunktet ville derfor ikke en lysbue automatisk få skylden for. Som allerede nevnt, er det likevel ikke gitt at en lysbue vil varme opp omgivelsene i betydelig grad, tross den høye temperaturen i selve lysbuen. Varmen fra en lysbue oppstår i et veldig konsentrert område. Lysbuen slukker i strømmens nullgjennomgang, og er ikke lysbuen stabil, gjentennes ikke lysbuen for hver nullgjennomgang. Dette kan være grunner til at lysbuene ikke klarer å varme opp omgivelsene i alle tilfeller.

Test av seriefeilvern

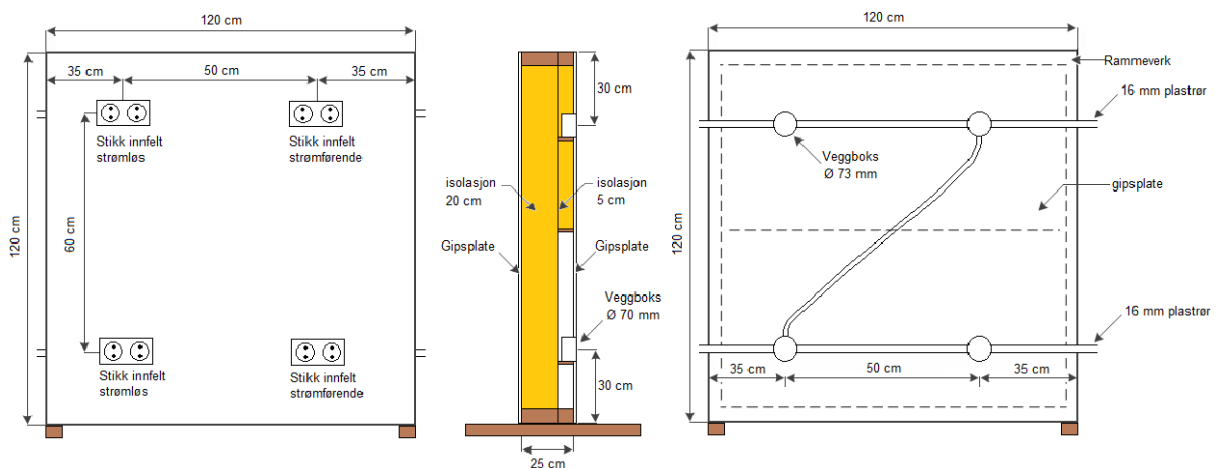
I tillegg til at seriefeilvernet som skaper jordfeil ved varmgang blir testet, vil testene også kunne gi svar på andre spørsmål. Ulikhetene i vernenes funksjonalitet tydeliggjøres når de testes sammen. Erfaringer fra den forberedende prosjektoppgaven tilsier at det kan forventes at de ulike vernene beskytter mot ulike typer seriefeil. Resultatene som fremkommer når de ulike vernene testes sammen, vil være interessant med tanke på å kartlegge hvilke tiltak som i størst mulig grad kan bidra til en reduksjon i antall branner i boliginstallasjoner.

Det var ønskelig å dokumentere om lysbuevernene var i stand til å oppdage en serielysbue, hvis en lysbue skulle oppstå i forbindelse med testveggen og den allerede innførte dårlige kontaktforbindelsen. Dette ville bidra til en økt tillit til lysbuevernene, dersom det ikke oppstod lysbuer i testene med dårlig kontaktforbindelse i testveggen, som kunne bekrefte funksjonaliteten til lysbuevernene. En økt tillit til lysbuevernene kunne i større grad gi en bekreftelse på at manglende deteksjoner av lysbuer betydde at det ikke hadde vært noen stabile lysbuer tilstede i den dårlige kontaktforbindelsen. Av den grunn ble det også utført en test der det ble laget lysbuer med lysbuegeneratoren.

8.2 Måleoppsett og måleutstyr

8.2.1 Testvegg

For å teste vernene som reagerer på høye temperaturer, ble det benyttet en testvegg. Testveggen skulle bidra til en mest mulig reell feilsituasjon. Testveggen som ble benyttet var den samme veggen som ble bygget i forbindelse med masteroppgaven til Carl Olav Larsson. Veggen ble bygget for å teste det temperaturovervåkende vernet ETIM. Testveggen er bygget etter forskrift om tekniske krav til byggverk, TEK10[56]. Det innebærer at testveggen har en isolasjonstykkelse på 20cm, som er minstekravet dersom det kompenseres for det økte varmetapet som en dårligere isolert vegg representerer. En skisse av veggen er vist i Figur 40.



Figur 40 - Skisse av testveggen konstruksjon [13]. Gjengitt etter godkjenning fra Carl Olav Larsson

Elrørene er flyttet innenfor de ekstra 5cm med isolasjon i veggens øvre del, i arbeid som ikke er en del av denne prosjektoppgaven. Av den grunn benyttes kun veggens nedre del. Denne delen av veggen er i henhold til forskriftenes minstekrav til isolasjon[56].

Test av seriefeilvern

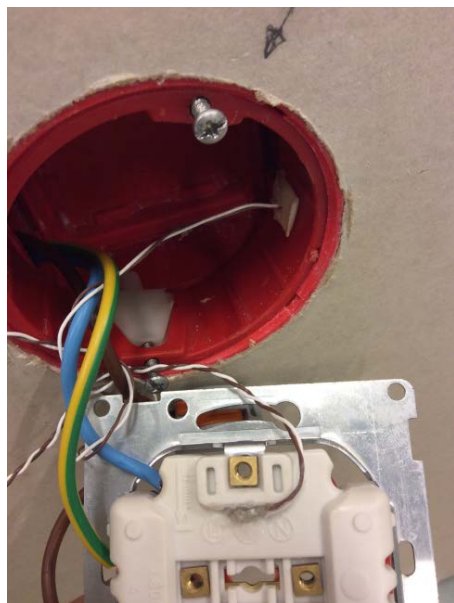
Konsekvensen av at testene utføres med en testvegg som tilfredsstillende minstekravene er bedre varmeavledningsevne. Det forventes dermed økte temperaturer ved seriefeil dersom bygninger tilfredsstillende kravene utover minstekravene.

8.2.2 ETIM-temperatursensorer

En temperatursensor fra ETIM ble plassert i hver av de to koblingsboksene til de innfelte stikkontaktene. Temperatursensorene har en viss størrelse, omtrent 1cm bred og 2,5cm lang. På grunn av plassmangel inne i koblingsboksen ble sensorene plassert i bunnen av koblingsboksen lengst inn. Dette er trolig ett av de kaldeste områdene i koblingsboksen. Basert på erfaringene fra prosjektoppgaven med samme tema, var det likevel forventet at temperaturen ville bli høy i hele koblingsboksen ved langtidsforsøk. [22]

8.2.3 Termoelementer

Termoelementer ble plassert fire ulike steder i testveggen med hensikt å ta kontrollmålinger på temperaturen. En datalogger med kobber-nikkel-termoelementer ble benyttet til å utføre kontrollmålingene. I begge koblingsboksene ble det plassert et termoelement. Termoelementet ble limt fast til koblingsboksens sidevegg. Et bilde av plasseringen til termoelementet kan sees i Figur 41. Kobber-nikkel-termoelementene er de brune og hvite lederne.



Figur 41 - Bilde av et termoelement som er limt fast til koblingsboksens sidevegg

I tillegg ble det limt fast et termoelement på selve stikkkontakten, like ved koblingspunktet med den dårlige kontaktforbindelsen. Dette termoelementet overvåket temperaturen helt i nærheten av den dårlige kontaktforbindelsen, og var forventet å måle en betydelig høyere temperatur enn termoelementet på koblingsboksens sidevegg og temperatursensoren fra ETIM. Figur 41 viser hvordan termoelementene var limt fast til stikkkontakten.

Det fjerde termoelementet ble festet til den ene lederen mellom stikkontaktene i testveggens nedre del. Dermed ble det mulig også å overvåke temperaturen inne i elrørene, som lederne var ført gjennom.

8.2.4 Seriefeilvern som fremprovoserer jordfeil

Det ble testet en prototyp av dette seriefeilvernet, som baserer seg på prinsippet om å skape en jordfeil dersom temperaturen stiger. Kursen ble beskyttet av en jordfeilautomat. Hvis seriefeilvernet skapte en jordfeil, var jordfeilautomatens oppgave å bryte strømmen i kursen.

Prototypen av seriefeilvernet var en del av selve stikkontakten. Prototypen skulle vise prinsippet med seriefeilvernets funksjonalitet. I den ferdige utgaven av dette seriefeilvernet, kommer utformingen av vernet til å være helt annerledes. Tanken er at den ferdige versjonen av vernet skal plasseres i dekselet til stikkontakten.

Prototypen er en stikkontakt som det er gjort små endringer med. Stikkontaktens plastmateriale er det selvslukkende plastmaterialet polykarbonat[57, 58]. En vanlig kulepennfjær forbinder skinnene, som holder pinnene til et støpsel på plass. Forbindelsen er ikke metallisk. Den metalliske kontakten er forhindret av en bit av isolerende PVC-tape mellom kulepennfjæren og skinnene på hver side. PVC-tapen tåler 90 °C. Kulepennfjæren har forbindelse til jord via en motstand. Dersom temperaturen stiger utover hva tapen tåler, vil tapen smelte og det dannes en forbindelse til jord. Dersom jordfeilbryteren ikke skulle fungere, vil motstanden brenne av, og situasjonen vil være en seriefeil som seriefeilvernet ikke lengre kan beskytte mot.

8.2.5 Lysbuevern

Kretsen er beskyttet av et lysbuevern med jordfeilautomat. Nominell strøm for det ene vernet er 16A og for det andre verner 25A.

8.2.6 Feilsituasjonen

Feilsituasjonen som vernene skulle oppdage ble laget ved å skape en dårlig kontaktforbindelse i stikkontakten. Hensikten var å skape varmgang tilstrekkelig til at vernenes funksjonalitet kunne testes. Lysbuevernet skulle beskytte kretsen dersom det mot formodning skulle oppstå en lysbue.

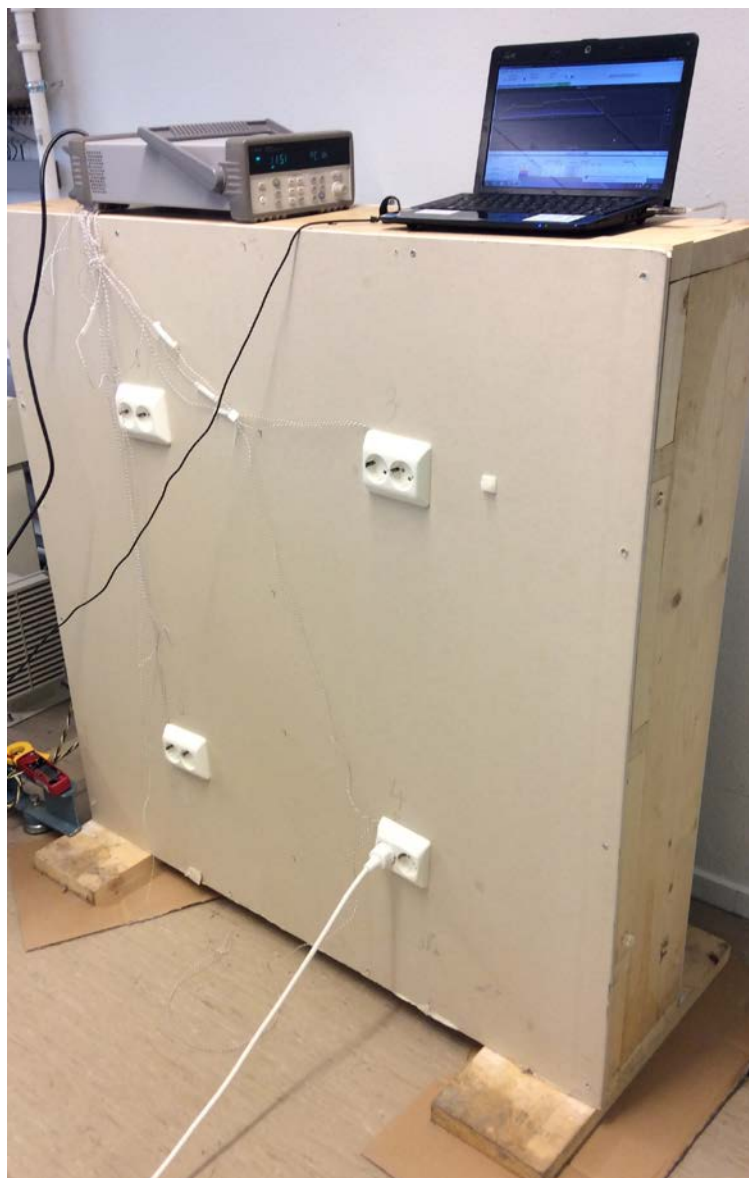
Den dårlige kontaktforbindelsen ble laget ved at antallet tråder i den ene flerlederkabelen ble betydelig redusert. Trådene kliptes bort, slik at bare fem tråder gjenstod. De fem trådene ble tilkoblet det ene koblingspunktet i stikkontakten. Foruten denne endringen ble stikkontakten korrekt montert. Innen dekselet ble påskrudd, ble kontaktkraften løsnet ved koblingspunktet med bare fem tråder. En momentskrutrekker av typen Belzer 6976 CN ble brukt for å måle tiltrekkingskraften på skruen. Skruen ble skrudd til med minste moment; 0,4Nm. Deretter ble skruen løsnet to til tre runder før dekselet ble påskrudd. På denne måten kunne ikke den dårlig tilkoblede lederen falle ut samtidig som stikkontakten ble montert. Innledende forsøk tilførte erfaringer om hvor mye skruen måtte løsnes for å oppnå en detekterbar feilsituasjon i løpet av en arbeidsdag. Det ble derfor valgt å løsne skruen 2-3 runder, avhengig av hvor oksidert lederne var på forhånd.

Test av seriefeilvern

Grunnen til at denne feilsituasjonen ble valgt, var at dette var en feil som innen en arbeidsdag kunne gi tilstrekkelig temperaturstigning til at vernene oppdaget feilen. I tillegg var dette en feil som lot seg gjenskape mange ganger. Feilen var i nærheten av seriefeilvernene, og feilen befant seg i en del av den elektriske installasjonen som har vist seg å være blant de hyppigere årsakene til seriefeil.

For å oppnå høye nok temperaturer til at vernene kunne oppdage feilen i løpet av en arbeidsdag, ble kontaktpunktet utsatt for høy strømgjennomgang. Mellom 10,4A-17,2A gikk gjennom kontaktpunktet. Motstanden som ble benyttet var en vannmotstand. Vannmotstanden ble valgt for å unngå ulempene ved å benytte for eksempel varmeelementer, som vil varme opp omgivelsene i betydelig grad dersom strømmer av størrelsesorden 10-17A skal gå gjennom kretsen.

Figur 42 viser testveggen der stikkkontakten med dårlig kontakt er tilkoblet en last. Dataloggeren og datamaskinen overvåker temperaturen inne i testveggen. Stikkkontakten tilkoblet last er stikkkontakten der seriefeilvernet som skaper jordfeil ved forhøyede temperaturer er plassert. Også ETIM-vernet overvåker temperaturen inne i veggboksene.



Figur 42 - Testveggen. Den dårlige kontakten er stikkkontakten tilkoblet en last. Dataloggeren tilkoblet PC overvåker temperaturen ved feilstedet.

8.2.7 Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern

Det ble utført tester som skulle verifisere påliteligheten til lysbuevernene i situasjonen med dårlig kontaktforbindelse i testveggen. En lysbue ble innført ved å koble lysbuegeneratoren i serie med den dårlige kontaktforbindelsen i stikkkontakten og den varierbare motstanden. Oppsettet var uendret foruten at det ble innført en serielysbue ved å tilkoble lysbuegeneratoren mellom den dårlige kontaktforbindelsen i stikkkontakten og den varierbare motstanden.

8.3 Måleprosedyrer

8.3.1 Alle vern testet sammen

Målingene ble satt på med høy strøm helt fra begynnelsen av. I de første forsøkene som ble utført startet forsøkene på 10,4-12,4A, og strømmen ble gradvis økt etter hvert som temperaturen stabiliserte seg på for lave nivå til at vernene oppdaget feilen. Forsøkene pågikk frem til enten lysbuevernet eller seriefeilvernet som lager jordfeil oppdaget feilen, slik at strømmen i kretsen ble brutt. Med andre ord ble ikke forsøkene stoppet selv om ETIM-vernet oppdaget en feilsituasjon.

8.3.2 Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern

Det ble testet hvorvidt lysbuevernene var i stand til å oppdage lysbuene som ble skapt i kretsen ved bruk av lysbuegeneratoren eller ikke. I utgangspunktet skulle 5 lysbuevern fra noen forskjellige leverandører testes ved tre strømnivåer: 2A; 8A og 17A. 2A er et lavere strømnivå enn hva lysbuestandarden krever deteksjon av lysbuer ved. Ved 8A bør lysbuevernet oppdage lysbuen og bryte strømmen i kretsen. 17A er et strømnivå større enn merkestrømmen til lysbuevernene og automatsikringene.

I tillegg til de tre strømnivåene ble det for to av vernene utført tilleggsmålinger ved strømnivåer innenfor grenseverdiene som vernene var konstruert for å detektere. Dette på grunn av mangelfulle deteksjoner utenfor verdiene som det kreves deteksjon ved. Strømnivåene som det ble utført tilleggstester ved var 4,35A og 10A.

Kobber- og karbonstaven i lysbuegeneratoren ble satt sammen, slik at det kunne flyte en strøm gjennom kretsen. Strømmen ble slått på og innstilt til den verdien som testene skulle utføres ved. Strømnivået ble målt ved bruk av en strømtang. En lysbue ble skapt ved å trekke kobber- og karbonstaven i lysbuegeneratoren fra hverandre ved å forsiktig vri på sveiven, slik at det oppstod en stabil lysbue.

8.4 Resultater

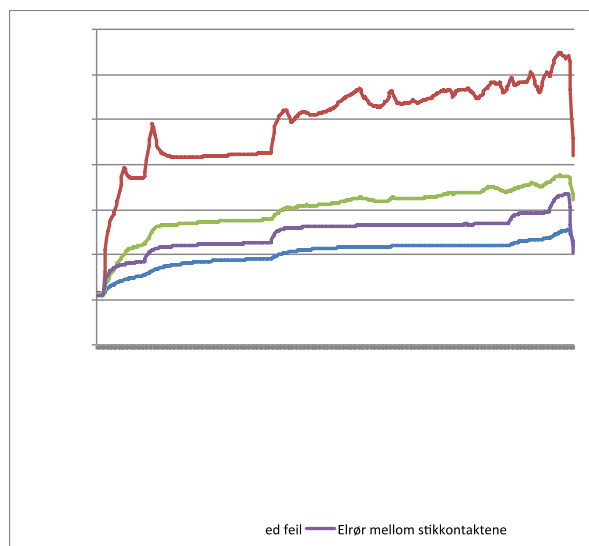
8.4.1 Alle vern testet sammen

Temperaturene som ble målt av termoelementene under ett av forsøkene er gjengitt i Figur 43. Dette forsøket varte i 7 timer og 25 minutter før strømmen ble brutt på grunn av jordfeilen som seriefeilvernet frembrakte. Den høyeste temperaturen som ble logget var 129,8 °C. Forsøket hadde da vart i 7 timer og 12 minutter, og klokken var da 21.06. Temperaturen ble målt av termoelementet, som var limt på stikkkontakten like ved feilstedet med dårlig kontaktforbindelse. Temperaturen ved feilstedet nådde denne verdien like før seriefeilvernet skapte jordfeil. Temperaturen målt av termoelementene svinger trolig på grunn av at kontaktpunktene endres som følge av temperaturendringer.

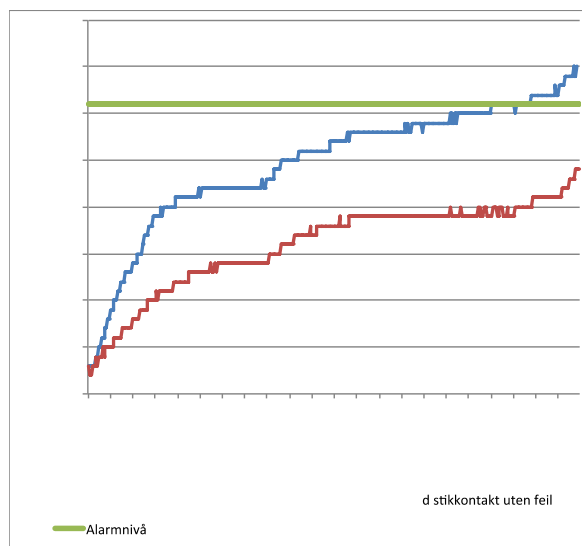
Temperaturen ved de resterende termoelementene var betydelig lavere. I sideveggen på veggboksen med stikkkontakten med feil, ble den nest høyeste temperaturen målt, 75,1 °C. I sideveggen på veggboksen der det ikke var noen feilsituasjon ble det målt en

Test av seriefeilvern

temperatur på maksimalt 51,1 °C. I samtlige forsøk var dette det stedet hvor det ble målt lavest temperatur. I elrøret, midt mellom stikkontaktene, ble den nest laveste temperaturen målt, 66,8 °C.



Figur 43 - Termoelementer



Figur 44 - ETIM-vern

Skruen er løsnet: 2,5 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

Strømmen i kretsen er 15,8 Ampere

Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

Klokken 19.55 registrerer ETIM-vernet temperaturer over grenseverdien.

I de ulike forsøkene varierte det litt på hvilket av målestedene som målte den høyeste temperaturen; i elrøret mellom stikkontaktene eller på sideveggen til veggboksen med en stikkontakt der det var innført feil. Det som avgjorde forskjellen var hvor mye strøm som gikk gjennom kretsen. En strøm på 17,2-17,4A resulterte i en høyere temperatur i elrøret. Var strømmen lavere ble temperaturen i veggboksen, som rommet feilstedet, høyere.

Figur 44 viser temperaturene som temperatursensorene til ETIM-vernet målte. Temperaturen i begge veggboksene steg ofte ganske likt. Forskjellen var at temperaturen i veggboksen som rommet feilstedet steg mer og raskere enn veggboksen som rommet den feilfrie stikkontakten. I forsøket fra Figur 44 målte ETIM-vernet en temperatur over grenseverdien på 51 °C etter 7 timer. Klokken var da 19.55.

I det ETIM-vernet målte at temperaturen hadde steget over grenseverdien på 51 °C, målte termoelementene verdier i samme område. En sammenlikning av hva temperaturen var ved de ulike målepunktene, i det øyeblikket grenseverdien til ETIM-vernet ble oversteget, kan sees i Tabell 3. Bare tre av de seks målingene resulterte i temperaturer i hele veggboksen så høye at ETIM-vernet oppdaget seriefeilen.

Test av seriefeilvern

Tabell 3 - Temperatur ved de ulike målepunktene i det ETIM-vernet måler temperatur over grenseverdien, samt oversikt over de ulike forsøkene varighet fram til strømmen ble brutt som følge av jordfeilen som seriefeilvernet skapte.

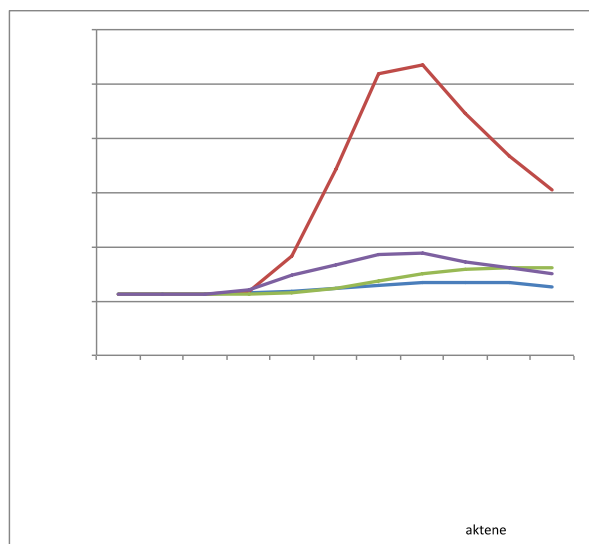
Forsøk	ETIM feil	ETIM Ikke feil	Sidevegg veggboksk uten feil	Elrør	Sidevegg veggboksk med feil	Like ved feilsted	Tid før ETIM-vern	Tid før strøm brutt	Største målte temp.
1	51 °C	40 °C	44,0 °C	53,6 °C	68,8 °C	112,4 °C	7t	7t 20min	129,8 °C
2	51 °C	48 °C	54,6 °C	101,8 °C	59,3 °C	103,0 °C	8t 54min	9t 2min	114,5 °C
3	51 °C	43 °C	48,9 °C	61,1 °C	53,3 °C	129,3 °C	5t 3min	6t 34min	149,7 °C

Temperaturmålingene indikerer at det er en del temperaturvariasjoner inne i testveggen. Trolig er temperaturen lavest i punktet lengst vekk fra feilstedet, også inne i selve veggboksen. Stedet med lavest forventet temperatur er da stedet hvor temperatursensorene fra ETIM var plassert. Dårlig plass og festemuligheter avgjorde plasseringen av temperatursensorene. Det kan konsekvent observeres en lavere temperatur målt av temperatursensorene fra ETIM enn temperaturen målt av termoelementet nærmest temperatursensorene.

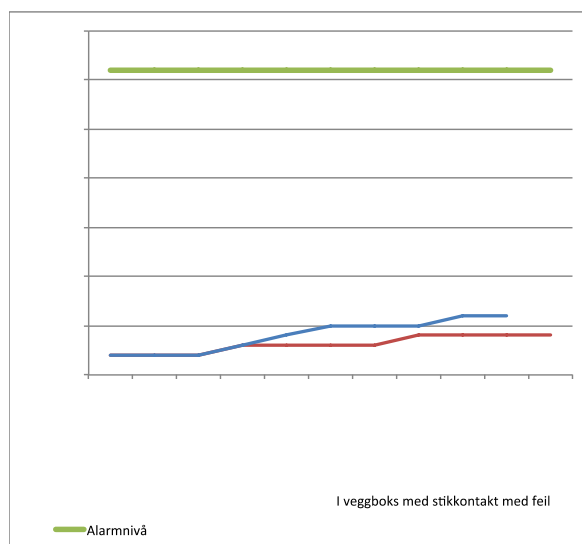
Tiden forsøkene varte var varierende. Likevel kan forsøkene deles opp i to grupper basert på varigheten før seriefeilvernet laget en jordfeil. En del av forsøkene tok betydelig kortere tid enn hva forsøkene som varte mellom 7-9 timer gjorde. Det finnes mange faktorer som avgjør varigheten av forsøkene, men forsøkene skilte seg i de to hovedgruppene ut fra hvor oksidert lederne var. I forsøk hvor lederne ble gjenbrukt fra et tidligere forsøk, og det tydelig kunne observeres kobberoksid på lederne, tok det en halvtime eller mindre før feilen førte til jordfeil.

Figur 45 og Figur 46 viser de målte temperaturene av termoelementene og temperatursensorene til ETIM ved et forsøk av kortere varighet. Lederne var på forhånd karbonisert ved et tidligere forsøk. I det strømmen ble slått på begynte temperaturen å stige umiddelbart. Strømmen i kretsen var 15,8A. Den høyeste temperaturen som temperatursensoren ved feilstedet målte var 68,1 °C. Fra strømmen ble slått på, og fram til strømmen ble brutt som følge av den framprovoserte jordfeilen tok det fem minutter. ETIM-vernet hadde i løpet av dette tidsrommet ikke rukket å måle noen betydelig temperaturstigning; bare 4 °C i veggboksen som rommet feilstedet.

Test av seriefeilvern



Figur 45 - Termoelementer



Figur 46 - ETIM-vern

Skruen er løst: 2,5 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

Strømmen i kretsen er 15,8 Ampere

Temperaturen synker etter ti minutter på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

ETIM-vernet måler aldri temperaturer over grenseverdien på 51 °C.

Temperaturøkningen mellom hver måling ble også registrert av ETIM-vernet. Dersom temperaturen økte mer enn 5 °C skulle alarmen utløses. Ikke ved noen av forsøkene ble det observert noen tilfeller med en temperaturstigning på mer enn 1 °C mellom hver måling, tross den markante temperaturstigningen fra 21 °C til 107,2 °C i løpet av fem minutter ved det ene forsøket. Ved det aktuelle forsøket ble det observert røykutvikling fra stikkontakten like før seriefeilvernet skapte jordfeil og strømmen ble brutt.

Tabell 4 viser en oversikt over temperaturen ved de ulike målepunktene i det strømmen ble brutt som følge av jordfeil som seriefeilvernet forårsaket. Strømmen ble brutt på under en halvtime i alle tilfeller. I løpet av den tiden hadde temperaturen ved feilstedet rukket å stige til over 100 °C i to av tilfellene. Temperaturen ved de andre målepunktene hadde ikke steget like mye i løpet av den korte tiden forsøket pågikk. I alle tilfellene var lederne ved feilstedet karbonisert på forhånd av et tidligere forsøk. Starttemperaturen var 21 °C i alle tilfellene.

Tabell 4 - Temperatur ved de ulike målepunktene i det jordfeilen fra seriefeilvernet førte til strømbrudd, samt oversikt over varigheten til forsøkene fram til strømbrudd. Lederne ved feilstedet var på forhånd karbonisert av et tidligere forsøk. Starttemperaturen var 21 °C i alle tilfellene.

Hvilket forsøk	Strømnivå	ETIM feil	ETIM Ikke feil	Sidevegg veggboks uten feil	Elrør	Sidevegg veggboks med feil	Like ved feilsted	Tid før strøm brutt
1	15,8A	25 °C	24 °C	26,9 °C	37,7 °C	30,3 °C	107,2 °C	5 min
2	17,4A	33 °C	26 °C	31,4 °C	46,4 °C	32,4 °C	109,2 °C	22 min
3	17,4A	30 °C	25 °C	30,1 °C	45,3 °C	40,4 °C	68,1 °C	10 min

Test av seriefeilvern

Etter det sjette forsøket var stikkontakten og seriefeilvernet som lager jordfeil så skadet av varmgang at det ikke lot seg gjøre å utføre flere forsøk. Et bilde av stikkontakten og den karboniserte lederen er vist i Figur 47. Av figuren kan det tydelig sees at stikkontakten har vært utsatt for store påkjenninger. Begge de smeltede kontaktpunktene har vært utsatt for løs tilkobling ved ulike forsøk. På det hvite plastdekselet smeltet det et hull på motsatt side av tilkoblingen. Dette kan sees ved det ene tilkoblingspunktet i figuren. I nærheten av tilkoblingspunktene med dårlig kontaktforbindelse var deler av plastmaterialet blitt karbonisert.



Figur 47 – Stikkontakten med seriefeilvernet som skaper jordfeil ved temperaturstigning over smeltelegemets grenseverdi.

Et lysbuevern var også tilkoblet kretsen. Fem lysbuevern ble tatt i bruk etter tur ved forsøkene. Resultatet var det samme for alle testene; ingen av testene resulterte i deteksjon av lysbue. Det har dermed med stor sannsynlighet ikke vært noen stabil lysbue ved feilstedet.

For å finne ut av om det faktisk hadde vært lysbuer tilstede, uten at lysbuene hadde vært stabile nok til at lysbuevernene var i stand til å detektere lysbuene, ble politioverbetjent Finn Rottem og spesialefterforsker Johnny P. Olsen ved KRIPOS, Kriminalteknisk avdeling, Seksjon for brann og kjemi kontaktet. I en mail, 10. juni 2015, og en telefonsamtale, 15. juni 2015, ble det informert om at undersøkelser av stikkontakten og lederne som hadde vært tilkoblet stikkontakten bekreftet at det ikke fantes spor etter lysbuer. På enkelte av kordelene på den ene lederen fantes små "perler". "Perlene" har blitt dannet som et resultat av "koking" av kobberet. Rottem påpekte at det vil være vanskelig å avgjøre hvor varmt det har vært i kontaktpunktet basert på sporene. Sporene indikerte ingen glødende kontaktforbindelse, og det er av den grunn svært usannsynlig at temperaturen har vært over 1000 °C.

8.4.2 Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern

Tabell 5 viser resultatene av lysbuetesten i testveggen. Tre av vernene hadde 100 % deteksjon av lysbuer. To av vernene skilte seg ut med en betydelig lavere andel deteksjoner av lysbuer. På grunn av betydelig færre deteksjoner, ble det utført flere tester med de to vernene som detekterte færre lysbuer. De utvidede testene ble utført ved strømnivåer innenfor kravene til deteksjon gitt av vernspesifikasjonene, 17A, og lysbuestandarden, 2A. Det ene vernet detekterte 33 % av lysbuene innenfor kravene, og det andre vernet detekterte 22 % av lysbuene innenfor kravene. I tabellen er de mørkere radene strømnivåer som ikke krever noen deteksjon. "X" betyr at vernet detekterte lysbue, og " - " betyr at lysbuen ikke ble oppdaget av vernet. Lysbuene som ikke ble detektert av vernet kunne brenne i flere minutter dersom elektrodene sakte ble ført mot hverandre etter hvert som metallet smeltet og ble karbonisert.

Tabell 5 - Lysbuevernernes deteksjoner av lysbuer skapt ved lysbuegeneratoren ved ulike strømnivåer. Lysbuegeneratoren var koblet i serie med den dårlige kontaktforbindelsen i testveggen, samt en varierbar motstand. "X" betyr at vernet brøt strømmen ved lysbue og " - " betyr at lysbuevernet ikke oppdaget noen lysbue. De mørkere radene viser deteksjoner ved strømnivåer utenfor kravene satt av lysbuestandarden, 2A, og vernspesifikasjonene, 17A.

Strøm[A]	Vern 1	Vern 2	Vern 3	Vern 4	Vern 5
2	X X X	- - -	X X X	- - -	X X X
8	X X X	- - -	X X X	X X X	X X X
17	X X X	X - -	X X X	- - -	X X X
(4,35)		- - -		- - -	
(10)		X - X		- - -	

9 Test av lysbuevern

9.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for dette forsøket var å teste hvorvidt lysbuevern kan fungere tilfredsstillende. For at lysbuevern skal vurderes som tilfredsstillende, bør de innfri kravene i lysbuestandarden. Av den grunn var det interessant å utføre noen av testene fra standarden. Produsentene hevder selv at vernene innfrir standarden. Det var likevel interessant å dokumentere dette, som en uavhengig part.

En fordel ved å utføre tester fra lysbuestandarden, er at vernene ble testet i en situasjon de var designet for å detektere som en skadelig lysbue. Det var derfor forventet at vernene skulle kunne oppdage alle lysbuer innenfor kravene til standarden. Ved å utføre testene etter lysbuestandarden, kan det ikke argumenteres med at en konstruert lysbue etterlikner en ufarlig situasjon mer enn en skadelig lysbue, og at vernene dermed er designet for ikke å bryte strømmen ved en slik situasjon.

Det ble ansett som interessant å vurdere hvorvidt lysbuestandarden setter krav som gjør at lysbuevern fungerer formålstjenlig. Utførelsen av en del av testene beskrevet i standarden, skulle fremme forståelsen av hvor dekkende lysbuestandarden er.

Det var også ønskelig å utføre tester ut over standarden. Dette var tester som innebar at lysbuevernene ble testet for feildeteksjoner ved ulike laster tilkoblet kretsen samtidig. Flere, og andre typer laster enn lastene beskrevet i lysbuestandarden ble testet. Det var ønskelig at vernet ikke brøt strømmen ved normalsituasjoner. Med flere typer laster tilkoblet samtidig, var det også interessant å teste hvorvidt lysbuevernet var i stand til å detektere en konstruert lysbue.

Testene der flere laster tilkobles samtidig, ble vurdert å være en mer reell situasjon enn lysbuestandardens tester, som krevde maksimalt to tilkoblede laster samtidig [53]. Resultatet av testene var vurdert å kunne gi betydningsfulle svar på hvordan lysbuevernet fungerer i en virkelig boliginstallasjon. I en boliginstallasjon er det svært viktig å unngå feildeteksjoner. Denne påstanden er en oppfatning også sjefingeniør Jostein Ween Grav, ved DSBs avdeling Elektriske anlegg, deler. Grav uttalte i en telefonsamtale, 17. februar 2015, at det er bedre at lysbuevernene har noen mangler enn at det feildetekterer. Det blir sett på som en meget uheldig situasjon dersom forbrukerne får mistillit til produktet. Det vil vanskeliggjøre en eventuell innføring av krav til lysbuevern. Grav påpeker også at teknologien med stor sannsynlighet vil utvikles de kommende årene, slik at en større andel av serielysbuer kan oppdages og stoppes. Dermed er det viktigste i første omgang at vernene ikke gir feildeteksjoner. Dette har tidligere vært en stor utfordring [59]. For at det i utgangspunktet skal ha noen hensikt å installere lysbuevern i boliginstallasjoner, må vernene kunne oppdage en viss andel av de seriefeilene som kan oppstå.

For å få et innblikk i hvordan lysbuevernene tilfredsstilte standarden, ble deteksjonstidene ved deteksjon av lysbuer målt og sammenliknet med deteksjonstidene fra standarden.

Test av lysbuevern

En av testene av lysbuevernene, der lysbuer og glødende kontaktforbindelser ble fremprovosert ved å innføre vibrasjoner, er en videreføring av tester utført i den forberedende prosjektoppgaven [22]. I den forberedende prosjektoppgaven oppførte ikke lysbuevernet seg som forventet. Å lage lysbuer viste seg å være meget enkelt ved bruk av innretningen som ble laget. Det samme gjaldt glødende kontaktforbindelser. Det var forventet at lysbuevernet ville oppdage lysbuene som ble laget, tolke lysbuene som skadelige lysbuer og dermed bryte strømmen i kretsen. Dette skjedde ved noen tilfeller, men svært ofte kunne lysbuene brenne over lengre tid. Ved noen tilfeller brente lederne av, og strømmen ble brutt som følge av for stort luftgap mellom restene av lederne.

Basert på lysbuevernets deteksjonsevne under forsøkene, ble det sådd tvil om hvorvidt lysbuevernene fungerte tilfredsstillende. Grunnen til de manglende deteksjonene av lysbuer var ikke klar. Bare ett lysbuevern ble testet i prosjektoppgaven. En mulighet var at det var noe galt med akkurat dette vernet. Det var derfor av interesse å teste flere lysbuevern med dette oppsettet, også vern fra andre leverandører. Målet var å finne ut av hvorfor lysbuevernet ikke hadde detektert lysbuer, da dette er et viktig punkt under vurderingen av hvorvidt lysbuevern tilfører en god nok beskyttelse mot seriefeil.

9.2 Måleoppsett og -utstyr

9.2.1 Dårlig kontaktforbindelse, fremprovosert ved vibrasjoner

Lysbuer ble dannet ved å skape dårlig kontaktforbindelse mellom to ledere. To ledere ble lagt mot hverandre med varierbar kontaktkraft. For å framskynde lysbuedannelsen ble den ene lederen utsatt for vibrering. Et lysbuevern skulle beskytte kretsen, og sørge for at strømmen ble brutt i det en skadelig lysbue ble detektert.

Kretsen bestod av et lysbuevern montert på en automatsikring, en trinnvis regulerbar motstandsvogn, samt et oppsett som var laget for å fremprovosere lysbue. Lysbuevernet med automatsikring var tilkoblet en vanlig stikkontakt. Dermed var kretsen forsynt med nettspenning, 230V og 50Hz. En PFXP-kabel med Cu 2,5mm², var da fast montert på inngangen til Siemens' Sentron 5SM6 AFD Unit, og hadde et støpsel i den andre enden. Lysbuevernet med automatsikringen var forankoblet oppsettet for å fremprovosere lysbue. I serie med den dårlige kontaktforbindelsen var det satt inn en trinnvis regulerbar motstandsvogn.

Oppsettet som var laget for å fremprovosere lysbuer bestod som nevnt av to ledere lagt mot hverandre med varierbar kontaktkraft. Kontaktkraften ble gjort mulig å variere ved å føre den ene lederen gjennom en sylinter med fjær i bunnen. Fjæren var hentet fra innmaten til en vanlig kulepenn. Sylindere hadde to åpninger, som gjorde det mulig å legge lederen på tvers. Ved å skru en skru på toppen av sylindere, var det mulig å variere kontaktkraften mellom lederne. Lederen på toppen, som lå mellom skruen og pennfjæren, på tvers av sylindere, kunne da presses ned mot den andre lederen i varierende grad. Innretningen er vist i Figur 48.

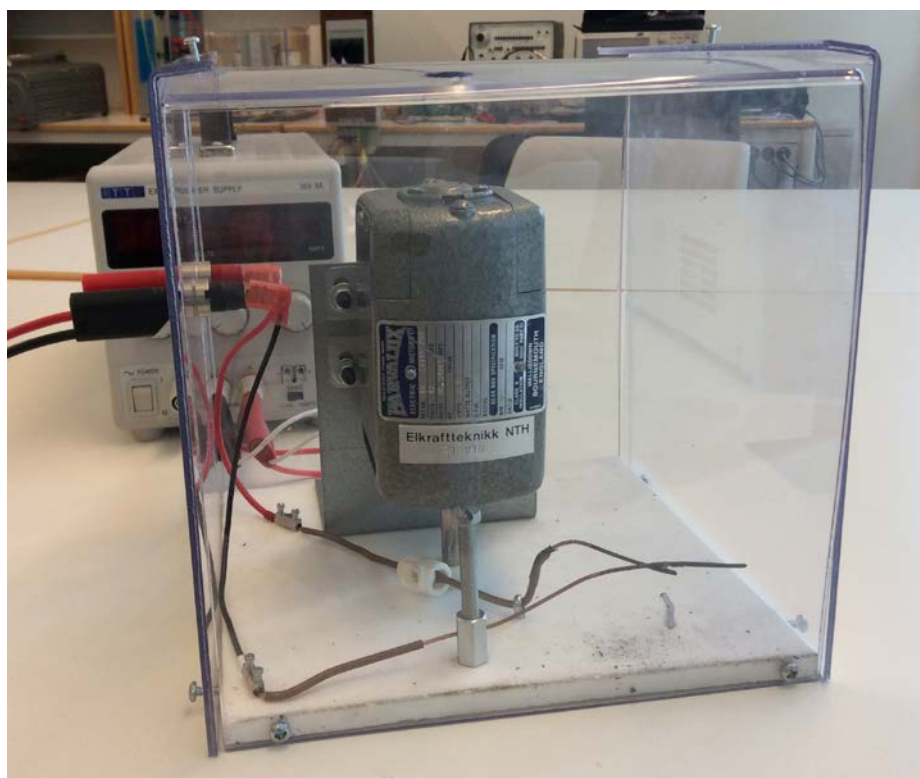
Lederne som ble brukt til å lage den dårlige kontaktforbindelsen var to 1,5mm² kobberledere. Isolasjonen var fjernet fra endene av ledningen, slik at det var kontakt mellom lederne. Den ene lederen ble lagt i kryss over den andre lederen. Det ble valgt

Test av lysbuevern

PVC-isolerte 1,5mm² kobberledere, da dette er hyppigst brukt i vanlige husinstallasjoner med 10A sikringer. Er sikringen på 16A, er det derimot vanlig med 2,5mm² PVC-isolerte kobberledere.

For å oppnå vibrasjoner ble en motor med en roterende stang tatt i bruk. I enden av stangen var det plassert en plastring. Denne plastringen var ikke helt sirkulær. Ved å plassere lederen inntil plastringen, begynte lederen å vibrere. For at ikke lederen skulle slites i stykker av plastringen, ble en beskyttende plastkappe skrudd fast til lederen ved kontaktpunktet mellom plastring og leder. Motoren var en 12V DC-motor. Motorens effekt kunne endres, dermed lot intensiteten av vibrasjonene seg også å variere. Motoren var ikke en del av kretsen som skulle beskyttes av lysbuevernet, og hadde derfor egen strømtilførsel.

Både motor og den dårlige kontaktforbindelsen ble montert på en varmebestandig teflonplate. Det ble valgt en teflonplate på grunn av elektrisk isolerende egenskaper samt teflonplatens tåleevne overfor høye temperaturer. Det var forventet at teflonplaten ikke ville avgi gasser som kunne påvirke resultatene. Hele innretningen ble beskyttet av et plastlokk for å unngå berøringsfare og brannfare, som følge av glødende metall som spruter bort fra kontaktpunktet.



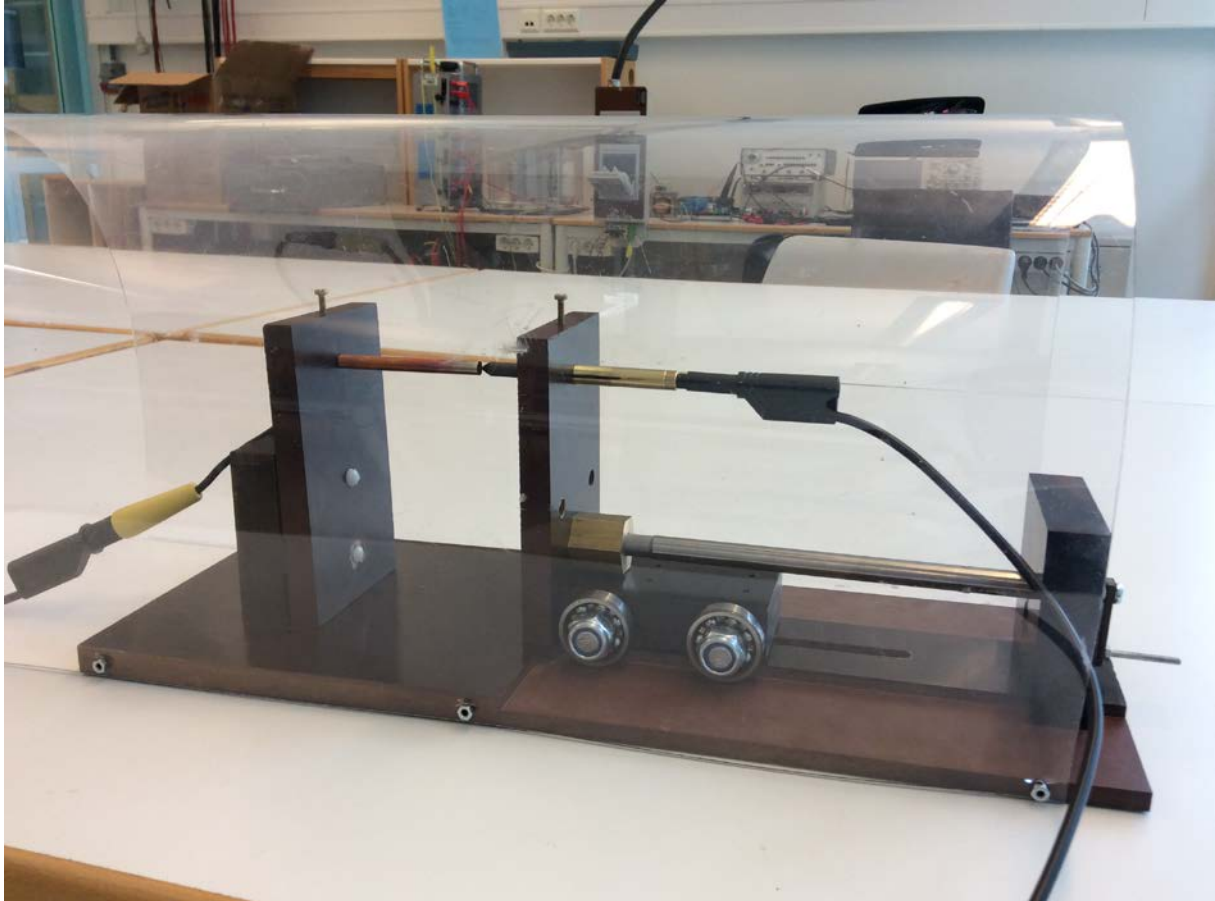
Figur 48 - Innretningen som fremprovoserte lysbuer ved å tilføre en kontaktforbindelse med lav kontaktkraft vibrasjoner.

9.2.2 Lysbuegenerator

En lysbuegenerator som tilfredsstiller kravene i IEC 62606, beskrevet i kapittel 7, ble benyttet. Figur 49 viser et bilde av lysbuegeneratoren. Prinsippet med lysbuegeneratoren er at en lysbue skal genereres ved at kontakten mellom elektrodene

Test av lysbuevern

brytes. I det kontakten brytes vil det oppstå en lysbue. Denne lysbuen vil slukke dersom avstanden mellom elektrodene blir for stor. Teori om lysbuer kan leses i kapittel 3.2. For å oppnå stabile lysbuer som er detekterbare lysbuevernet, ble det laget en meget finjustert forflytningsmekanisme. Forflytningsmekanismen tillot at elektrodene ble trukket fra hverandre bare en liten hårsbredd ad gangen, ved å vri på sveiven på lysbuegeneratorens høyre side, Figur 49.



Figur 49 - Lysbuegenerator. Avstanden mellom elektrodene justeres ved å vri på sveiven på lysbuegeneratorens høyre side.

I tillegg til den meget finjusterte forflytningsmekanismen ble det benyttet en grafitelektrode, med en diameter på 6mm. Grunnen til at det ble benyttet grafitt er fordi karbon ikke eroderer i tilsvarende grad som kobber. Dermed tok det lengre tid før avstanden mellom elektrodene ble så stor at en stående lysbue ikke kunne opprettholdes.

Lysbuegeneratoren ble montert i serie med en varierbar motstand. Motstanden var en motstandsvogn med trinnvis regulering av motstandsverdien. Foran lysbuegeneratoren og motstanden var lysbuevernet, montert sammen med en automatsikring, plassert. Lysbuevernets oppgave var da å bryte strømmen i hele kretsen det beskyttet da en stående lysbue ble generert. Inngangen til lysbuevernet var koblet til en vanlig stikkontakt. Kretsen var da forsynt med nettspenning, 230VAC, 50Hz.

9.2.3 Karboniserte kabelprøver

Ulike lysbuetester som baserer seg på å lage en serielysbue gjennom en forhåndskarbonisert vei mellom to ledere er beskrevet i IEC62606. De aktuelle testene forklart i kapittel 7. I dette kapitlet ble det også beskrevet hvordan den karboniserte veien mellom kabelprøvene lages. Kabelprøvene ble laget under et besøk på laboratoriet til Siemens, hvor de hadde laget en egen innretning for å lage den karboniserte veien mellom lederne. Denne innretningen utsatte kabelprøven for 7kV og 30mA i omkring 10 sekunder. Deretter ble kabelprøven utsatt for 2kV og 300mA, til det sluttet å røyke fra kabelprøven. Det ble laget X kabelprøver. Et bilde av en slik kabelprøve kan sees i Figur 50.

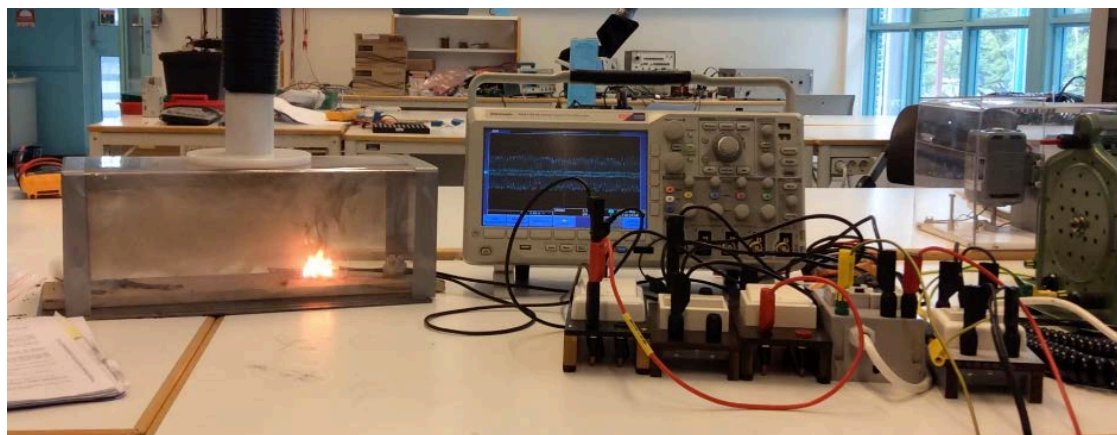


Figur 50 - Kabelprøve der det ved bruk av høy spenning over kort tid er laget en karbonisert vei mellom lederne. De avisolerte endene ble tilkoblet kretsen, slik at lysbuen som oppstod mellom lederne ble en serielysbue.

Testkretsen ble satt opp som beskrevet i IEC 62606, illustrert i Figur 36 og i Figur 52 [53]. Lasten i kretsen var ulike skyvemotstander eller en motstandsvogn med trinnavis regulering av motstanden. Hvilken motstand som ble tatt i bruk ble valgt ut fra hvilket strømnivå testene skulle utføres ved, da motstandene bare kunne varieres innenfor et begrenset intervall.

For at ikke kabelprøven skulle avgi mye røyk i det lysbuer oppstod, ble kabelprøven lagt på en steinplate inni et beskyttelsesglass. Til denne beskyttelsesbeholderen, ble det påmontert et avtrekk. Dette, sammen med resten av testoppsettet, kan sees i Figur 51.

Test av lysbuevern



Figur 51 - Testoppsett ved test av lysbuevern. Test 9.9.2.2, 9.9.2.3 og 9.9.2.4 fra IEC 62606 [53].

9.2.4 Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater

En rekke vanlige husholdningsapparater ble koblet til en krets beskyttet av lysbuevern. Husholdningsapparatene er listet opp i Tabell 6. På grunn av begrensninger på strømnivået satt av automatsikringen ved 16A, kunne kretsen tåle en effekt på maksimalt 3680W. Alle apparater kunne derfor ikke startes med maks effekt samtidig.

Tabell 6 - Elektriske husholdningsapparater testet mot uønskede og ønskede utkoblinger av strømmen utført av lysbuevern.

Type apparat	Merke	Type	Effekt
Håndmikser	Ukjent	Ukjent	300W
Stavmikser	Bamix		140W
Hårføner	BaByliss	Expert ioniCeramic	2000W
Hårføner	Braun	Creation 2	1600W
Støvsuger	Siemens	SUPER XS dino e	1500W
Strykejern	Philips	GC2510	2000W
Varmevifte	Calor		2000W

Åtte stikkontakter var koblet i parallell med hverandre. Hvert av de elektriske apparatene ble tilkoblet hver sin stikkontakt. Hele strømkretsen var beskyttet av et lysbuevern med automatsikring. Den totale lengden på kablet som forbandt stikkontaktene var omtrent 8m.

Under testene som skulle teste hvorvidt lysbuevernet klarte å detektere lysbuer i en krets med flere ulike tilkoblede laster, ble lysbuegeneratoren tilkoblet stikkontakten lengst vekk fra lysbuevernet. Som last ved denne stikkontakten ble vifteovnen tatt i bruk.

9.3 Måleprosedyrer

9.3.1 Dårlig kontaktforbindelse

Det var ønskelig å finne ut hvordan strøm og spenning oppfører seg når det oppstår en lysbue, og hva som skal til for at vernet legger ut strømtilførselen. Spenningen ble derfor målt over feilstedet ved hjelp av differensialprober, som ble koblet til et oscilloskop. I tillegg ble strømmen gjennom kretsen målt ved bruk av et tangamperemeter tilkoblet det samme oscilloskopet. En eventuell annerledes oppførsel av de nye lysbuevernene som ble testet gjorde det interessant å se på strøm- og spenningsforløpet.

Kretsen var tilkoblet en vanlig stikkontakt, og ble dermed forsynt av 230VAC med 50Hz. Det var ønskelig å utføre testene med et strømnivå omkring 5A, da dette er et gunstig strømnivå for både lysbuer og glødende kontaktforbindelser. I tillegg krever lysbuestandarder at en lysbue som oppstår ved 5A skal detekteres av lysbuevernet, og strømmen i kretsen må da brytes. Strømmen i kretsen reduseres i det en lysbue oppstår, men ikke tilstrekkelig til at lysbuestrømmen blir mindre enn strømnivået som lysbuestandarder krever deteksjon ved; 2,5A[53]. Den trinnvis regulerbare motstandsvognen ble dermed satt med en motstandsverdi på 49Ω , hvilket resulterte i en strøm gjennom kretsen på 4,6A, dersom det var god kontakt mellom lederne. Ved dårligere kontaktforbindelse avgis mer effekt i kontaktpunktet, hvilket resulterer i lavere strøm i kretsen.

For å framskynde prosessen som var ment å lede til lysbuer, ble det påsatt vibrasjoner. Intensjonen var at lysbuene skulle være detekterbare for lysbuevernet, og det ble derfor forsøkt å oppnå relativt intense lysbuer. De mest intense lysbuene ble laget ved å løsne så mye på kontaktkraften, at det bare akkurat var forbindelse mellom lederne. Vibrasjonene ble også skrudd opp i intensitet.

9.3.2 Lysbuegenerator

Strøm og spenningsforløpet ved stabile lysbuer generert av lysbuegeneratoren ble overvåket ved bruk av et oscilloskop. Et tangamperemeter ble benyttet for å måle lysbuestrømmen. Lysbuespenningen ble målt via måleprober tilkoblet oscilloskopet. Det som var interessant å måle var brytetiden til lysbuevernene. Dersom lysbuen som oppstod var en stabil lysbue, altså en lysbue som gjentente etter strømmens nullgjennomgang, skulle lysbuevernet bryte strømmen i kretsen innenfor et gitt tidsrom. Dette tidsrommet er spesifisert Tabell 2, som er en gjengivelse av Tabell 2 i lysbuestandarder, IEC 62606[53]. De maksimale brytetidene gitt i Tabell 2 multipliseres med 2,5 for testene med lysbuegeneratoren. Alle lysbuevernene ble testet. Stabile lysbuer ble laget på tre ulike måter:

1. Elektrodene var i kontakt med hverandre og det gikk en strøm i kretsen. Deretter ble elektrodene forsiktig trukket fra hverandre. I det kontaktforbindelsen mellom elektrodene ble brutt oppstod en lysbue.
2. Elektrodene var opprinnelig ikke i kontakt med hverandre, og det gikk derfor ikke noe strøm gjennom kretsen. Litt etter litt ble elektrodene forflyttet nærmere hverandre, og i det avstanden ble liten nok oppstod en lysbue.
3. Etter at en lysbue var laget ved metode 1 eller 2 og vernet hadde brutt strømmen i kretsen, var avstanden mellom elektrodene ofte meget gunstig for at en ny og stabil lysbue ville oppstå bare ved å koble inn strømmen i kretsen igjen.

Test av lysbuevern

Det ble gjort målinger av brytetiden til vernene ved ulike strømnivåer:

- Ved den minste strømmen som standarden krever deteksjon av lysbuer ved, 2,5A.
- Ved lysbuevernernes og automatsikringens merkestrøm, 16A.
- Ved strømnivåer innenfor ytterpunktene, 3A og 6A.
- Ved et strømnivå utenfor lysbuevernets merkestrøm, 20A.

Brytetidene ble også målt ved 5A og 7A. Det ble utført mellom 41 til 49 målinger for hvert av vernene for hvert strømnivå.

9.3.3 Karboniserte kabelprøver

Testene fra standarden for lysbuevern er beskrevet i kapittel 7.1. En gjennomgang av prosedyrene som blir benyttet under testen blir presentert i korte trekk.

1. Plutselig lysbue i kretsen

Alle brytere var i lukket posisjon da kretsen, vist i Figur 52, ble tilkoblet nettspenning via en vanlig stikkontakt. Etter at strømmen hadde stabilisert seg ble testbryter S2 åpnet. Deretter ble en lysbue over den karboniserte veien laget ved å åpne testbryter S4, slik at det gikk strøm gjennom kabelprøven. Dette tilsvarer den allerede forklarte Test 1 i kapittel 7.1.1.

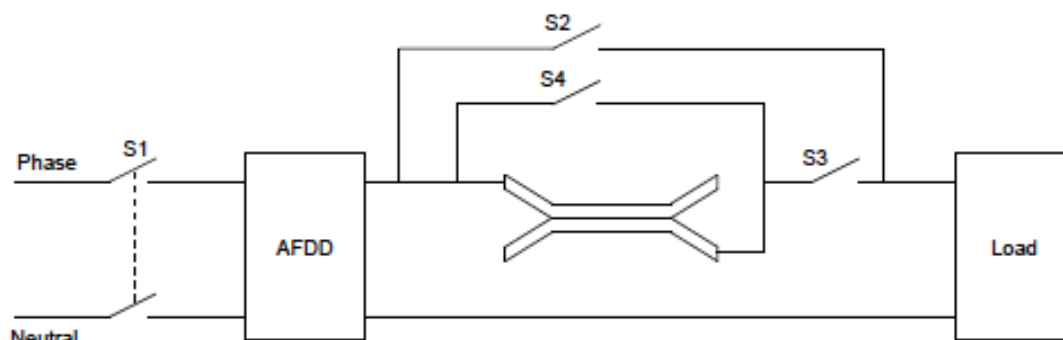
2. En last med serielysbuefeil settes inn i kretsen

Testbryter S1, S2 og lysbuevernet ble satt i lukket posisjon, samtidig som testbryter S3 og S4 ble satt i åpen posisjon. Riktig strømnivå ble stilt inn ved å tilpasse motstandsverdien på motstandene, og så snart strømmen hadde stabilisert seg ble testbryter S2 åpnet. Det ble innført en last med lysbuefeil ved å lukke testbryter S3.

3. Lysbuevernet settes inn i en krets med en allerede lysbuefeil

Testbryter S1, S2, S3 og lysbuevernet ble satt i lukket posisjon, og testbryter S4 i åpen posisjon. Strømmen ble tilpasset til de strømnivåene som skulle testes ved å endre på motstandene. Da strømmen stabiliserte seg, ble testbryter S1 åpnet. Deretter ble testbryter S2 åpnet. Kretsen, som det ved dette punktet ikke gikk strøm gjennom, hadde en serielysbuefeil. Nettspenning ble tilkoblet kretsen ved å lukke testbryter S1. Lysbuevernet var allerede i lukket posisjon, og skulle oppdage lysbuen umiddelbart etter at testbryter S1 ble lukket.

Test av lysbuevern



Figur 52 - Testkrets ved serielysbue gjennom en karbonisert kabelprøve[53]

For å kompensere for strømreduksjonen i det en lysbue oppstår, krever lysbuestandarder at spenningen i kretsen reduseres med 50V [53]. I stedet for å ta i bruk en transformator for å redusere spenningsnivået, ble det benyttet vanlig nettspenning. Kravet om 50V reduksjon av spenningsnivået ble møtt ved å redusere motstandsverdien, slik at en høyere strøm gikk gjennom kretsen i forkant av en stabil lysbue. Eksempelvis ble lysbuevernene testet ved den nedre grensen som lysbuestandarder krever deteksjon av lysbue ved, 2,5A. Motstandsverdien som da måtte benyttes ble regnet ut ved Formel 7, og tilsvarte 72Ω. Strømmen som gikk gjennom kretsen var dermed 3,19A. I det en lysbue oppstod, var det forventet at lysbuestrømmen ble redusert til omtrent 2,5A.

$$R = \frac{U_{\text{nettspenning}} - 50V}{I_{\text{teststrøm}}} \quad \text{Formel 7}$$

Vernene ble testet med teststrømmer fra 2A og opp til omtrent 12A. Motstandene som ble benyttet tillot ikke å utføre forsøk med teststrømmer omkring vernenes merkestrøm, 16A og 25A. Dette ville tilsvart strømmer på henholdsvis 20A og 32A. Av den grunn ble ikke vernene testet omkring merkestrømmen. Alle vernene ble utsatt for de tre testene beskrevet.

9.3.4 Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater

Alle lysbuevernene fra de ulike leverandørene ble testet etter tur. Hver test ble gjentatt fem ganger for hvert vern. To serier med tester for hvert vern ble utført. Den ene serien skulle teste hvorvidt lysbuevernene feildetekterte lysbuer ved normalsituasjoner. Den andre serien skulle avsløre om lysbuevernene var i stand til å oppdage lysbuer som oppstod i en krets med forstyrrelser fra en rekke andre laster.

For ikke å overgå den maksimale effekten som kretsen kunne tåle, ble alle apparatene startet etter tur, ved laveste effekt dersom det var mulig å variere. Etter fem sekunder ble effekten ved ett av apparatene stilt opp. Dette ble gjentatt for alle apparater med varierbar intensitet. Da alle apparatene var testet ved de ulike intensitetene, ble strømmen i kretsen brutt ved at bryteren på sikringen ble åpnet. Strømmen ble deretter

Test av lysbuevern

koblet inn igjen ved å koble inn sikringen. Det var forventet at lysbuevernene ikke skulle bryte strømmen i kretsen under testen beskrevet.

Testserie nummer to, der det ble innført en serielysbue i kretsen, ble utført på eksakt samme måte som testserie nummer en. Forskjellen var at lysbuegeneratoren var satt inn i kretsen ved stikkkontakten lengst unna lysbuevernet, med vifteovnen som last. Kobber- og karbonstiften ble ført i en posisjon der det oppstod lysbuer mellom stiftene. Det var forventet at lysbuevernene ville oppdage denne lysbuen og bryte strømmen.

Ved noen av testene ble strømmen og spenningen i kretsen overvåket med et tangamperemeter og differensialprober tilkoblet et oscilloskop. Grunnen til det var at det var interessant å se hvordan de ulike lastene påvirket strømmen i kretsen, samt at det var interessant å se hvordan strømmen i kretsen endret seg da det ble innført lysbuer. Hvor tydelige sporene etter lysbuestrømmen var i kretsens totale strøm, var ukjent, da det var tilkoblet en rekke laster som kunne dempe de karakteristiske kjennetegnene på lysbuestrøm.

9.4 Resultater

9.4.1 Dårlig kontaktforbindelse, fremprovosert ved vibrasjon

Før det ble innført vibrasjoner i kretsen, så det ut til at kontaktforbindelsen var tilstrekkelig. Det ble ikke observert noe betydelig spenningsfall over kontaktpunktet. Umiddelbart etter vibrasjoner ble påført den ene lederen, kunne det observeres små, blå gnister rundt omkring i kontaktpunktet. Denne gnistringen kunne vare fra et par sekunder og opp til et par minutter.

I kontaktpunktet mellom lederne kunne det observeres at lederne skiftet farge og ble sort. Lederne ble deformerte i det lille området hvor gnistringen foregikk. Deformeringen viste seg i form av en sort utvekst av kobberoksid, som i midtpunktet hadde en fordypning. Lederne ble altså tykkere i noen områder, mens de akkurat i kontaktpunktet ble tynnere. Isolasjonen viste også tegn på oppvarming, da det i noen tilfeller kunne utvikles røyk fra isolasjonen. Isolasjonen smeltet også litt på enden mot kontaktpunktet ved enkelte forsøk. Da isolasjonen ble utsatt for varme, trakk den seg vekk fra det varme området.

Lysbuevernene klarte i noen tilfeller å detektere denne gnistringen som en lysbue, og strømmen ble dermed brutt. I alle tilfellene hadde gnistringen pågått i mer enn 10 sekunder. Langt oftere stoppet gnistringen. Etter at gnistringen opphørte viste oscilloskopet strøm og spenninger uten forstyrrelser.

I noen tilfeller detekterte Siemensvernet gnistringen som en lysbue, og strømmen ble brutt. Det skjedde etter at gnistringen hadde pågått i mer enn 10 sekunder i alle tilfellene. Langt oftere stoppet gnistringen. Etter at gnistringen opphørte viste oscilloskopet strøm og spenninger uten forstyrrelser.

Lederne og isolasjonen derimot, bar tydelig preg av varmeutvikling i kontaktpunktet. Et større område av lederne skiftet farge, som følge av oksideringen som pågikk da det ble

Test av lysbuevern

utviklet varme i kontaktpunktet. Isolasjonen omkring lederne var fjernet et par cm fra koblingspunktet. Likevel trakk lederisolasjonen seg enda lengre unna kontaktpunktet med varmeutvikling. Det oppstod røykutvikling fra isolasjonen da den ble varmet opp.

Kontaktpunktet mellom de to lederne ble etterhvert sammenhengende. Dette skyldtes at det sorte oksidbelegget vokste mellom lederne og skapte en sammenhengende forbindelse. I noen tilfeller kunne det observeres et glødende punkt i sammengroingen. Et slikt glødende punkt vokste seg større og større. Til å begynne med kunne det glødende punktet forflytte seg rundt i sammengroingen. Da glødingen vokste seg større, holdt det seg i økende grad ved samme sted. Denne glødingen kunne pågå over lengre tid. Samtidig som denne glødingen pågikk, sprutet det av og til glødende metallbiter fra kontaktpunktet. Dersom strømmen ble koblet ut, slukket det glødende punktet å gløde umiddelbart. Med det samme det ble koblet inn strøm igjen begynte det det å gløde i det samme punktet.

Isolasjonen ble videre degradert da det oppstod gløding i kontaktpunktet. Røykutviklingen fra isolasjonen ble mer intens, og smeltingen av isolasjonen foregikk i et hurtigere tempo. Også karbonisering av isolasjonen forekom. I flere tilfeller løsnet isolasjonen helt fra lederen i området nærmest kontaktpunktet. I området nærmest kontaktpunktet, hvor isolasjonen var utsatt for mest varme, begynte isolasjonen å boble. Innsiden av isolasjonen, altså den delen av isolasjonen som skal befinne seg nærmest lederen, fikk et grønnaktig belegg. Et bilde av noen av lederne er vist i Figur 53.



Figur 53 - Ledere utsatt for varmgang og lysbuer.

Glødende kontaktforbindelse resulterte før eller siden i lysbue. Det hendte at lederne ble brent av i glødepunktet. Det oppstod da en lysbue mellom lederne. Denne lysbuen ble av og til detektert av lysbuevernet, mens den andre ganger slukket av seg selv da avstanden mellom lederne ble for stor. Det var ikke alltid at lederne brente av, og en gjentennende lysbue kunne brenne over lengre tid mellom lederne. Denne lysbuen ble enten detektert

Test av lysbuevern

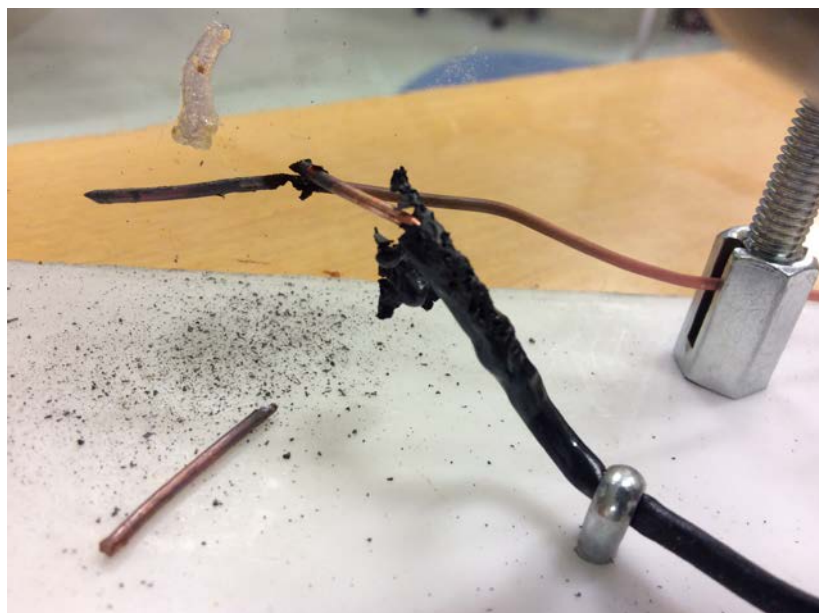
av lysbuevernet, eller lysbuen slukket utviklet seg i stedet til en glødende kontaktforbindelse. Ved lysbue kunne forstyrrelser i strøm og spenning tydelig sees på oscilloskopet. Lysbuen kunne sees som blinkende blått lys i kontaktpunktet. Grunnen til at lysbuen blinket er at lysbuen slukket i strømmens nullgjennomgang, og gjentente etter hver nullgjennomgang. Den gjentennende lysbuen kunne ha meget variabel varighet. Et bilde av en slik gjentennende lysbue er vist i Figur 54.



Figur 54 - Lysbue mellom to ledere utsatt for vibrasjoner

I ett tilfelle varte den gjentennende lysbuen så lenge som 45 sekunder. Lederne hadde i forkant av de gjentennende lysbuene fått hard medfart av glødende kontaktforbindelser. Det kunne observeres steder på lederne som var betydelig smalere enn resten av lederne. Lysbuen slukket etterhvert som følge av at den ene lederen ble delt i to ved kontaktpunktet, og strømmen i kretsen ble dermed brutt. Lysbuevernet detekterte ingen lysbue som fikk vernet til å bryte strømmen i dette tilfellet. Figur 55 viser den avbrente lederen.

Test av lysbuevern

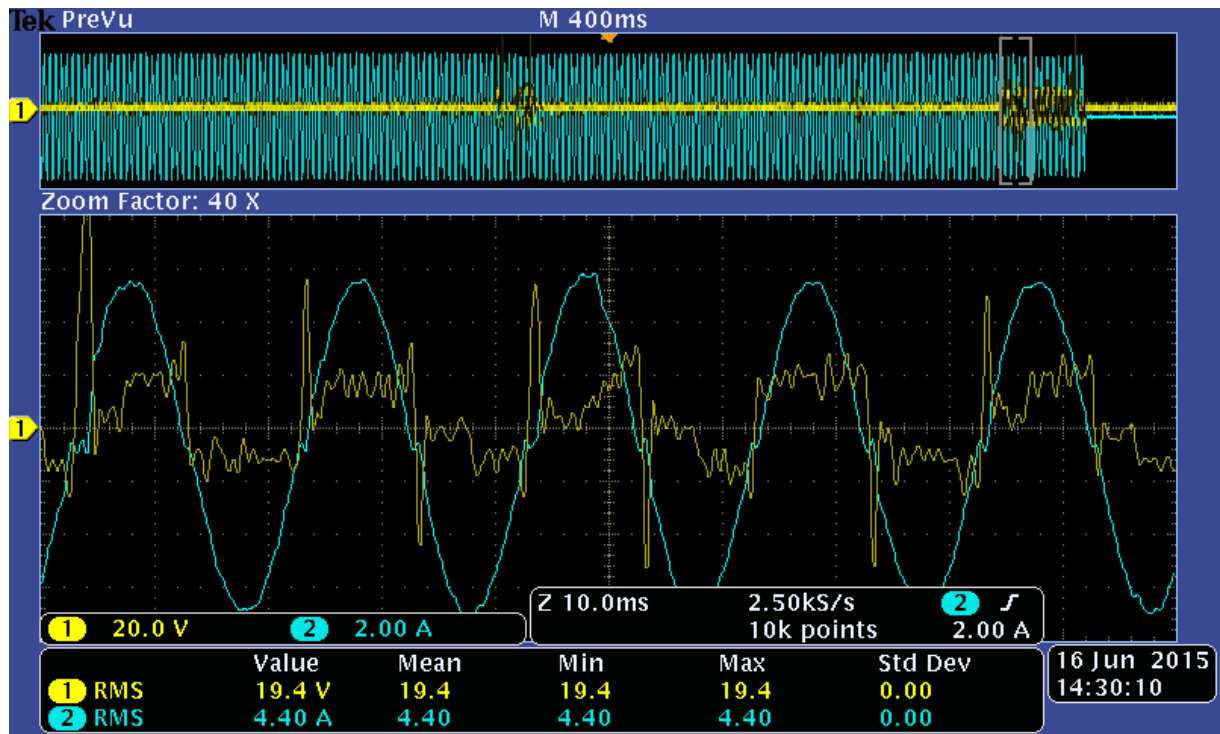


Figur 55 - Leder brent av på grunn av lysbue

I et annet tilfelle varte lysbuen i ett minutt og to sekunder. Heller ikke i dette tilfellet løste lysbuevernet ut. Lysbuen slukket da avstanden var blitt så stor mellom lederne at lysbuen ikke klarte å gjentenne. Det kunne sees tydelige forstyrrelser i strømmen og spenningen på oscilloskopet under den gjentennende lysbuen. I det siste tilfellet var den ene lederen utsatt for betydelig mer vibrasjon enn tidligere tester. Isolasjonen forkullet helt nærmest kontaktpunktet, og løsnet fra lederen. Begge de nevnte tilfellene er dokumentert på film.

Det må likevel poengteres at lysbuevernene som regel brøt strømmen i kretsen før eller siden. Når i hendelsesforløpet dette skjedde varierte, og lederne var blitt utsatt for varierende påkjenninger ved tidspunktet vernene løste ut. De kraftigste lysbuene oppstod vanligvis etter at lederne var blitt betydelig karbonisert. Ofte ble slike lysbuer detektert av lysbuevernet, selv om det kunne ta flere titalls sekunder før lysbuevernet brøt strømmen i kretsen. Strøm og spenning i et tilfelle der lysbuevernet løste ut vises i Figur 56. Det var likevel ingen regel at lysbuevernet brøt strømmen i kretsen ved de kraftigste lysbuene. De kraftigste lysbuene oppstod da lederne var så ødelagte at de brente av under påvirkning av lysbuene, og det hendte at lysbuevernet ikke detekterte lysbuene. Det var tilfeller der lysbuene slukket som følge av at avstanden mellom lederne ble for stor til at en lysbue kunne opprettholdes.

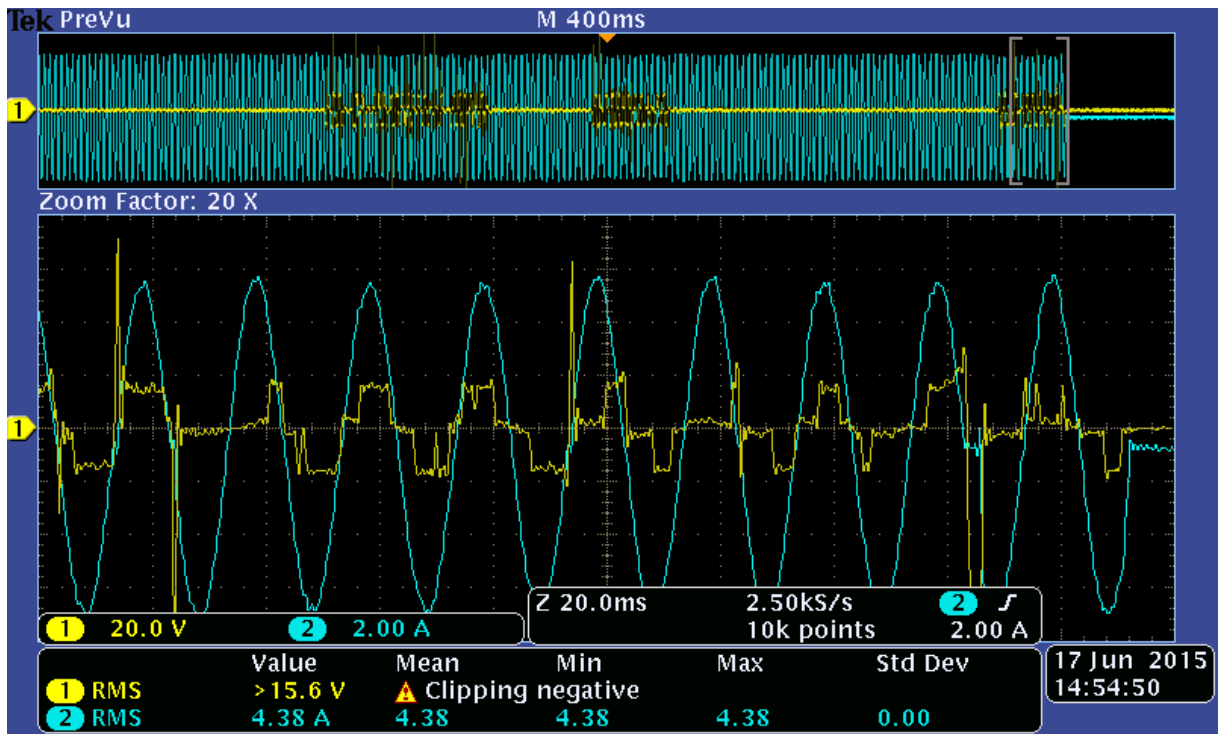
Test av lysbuevern



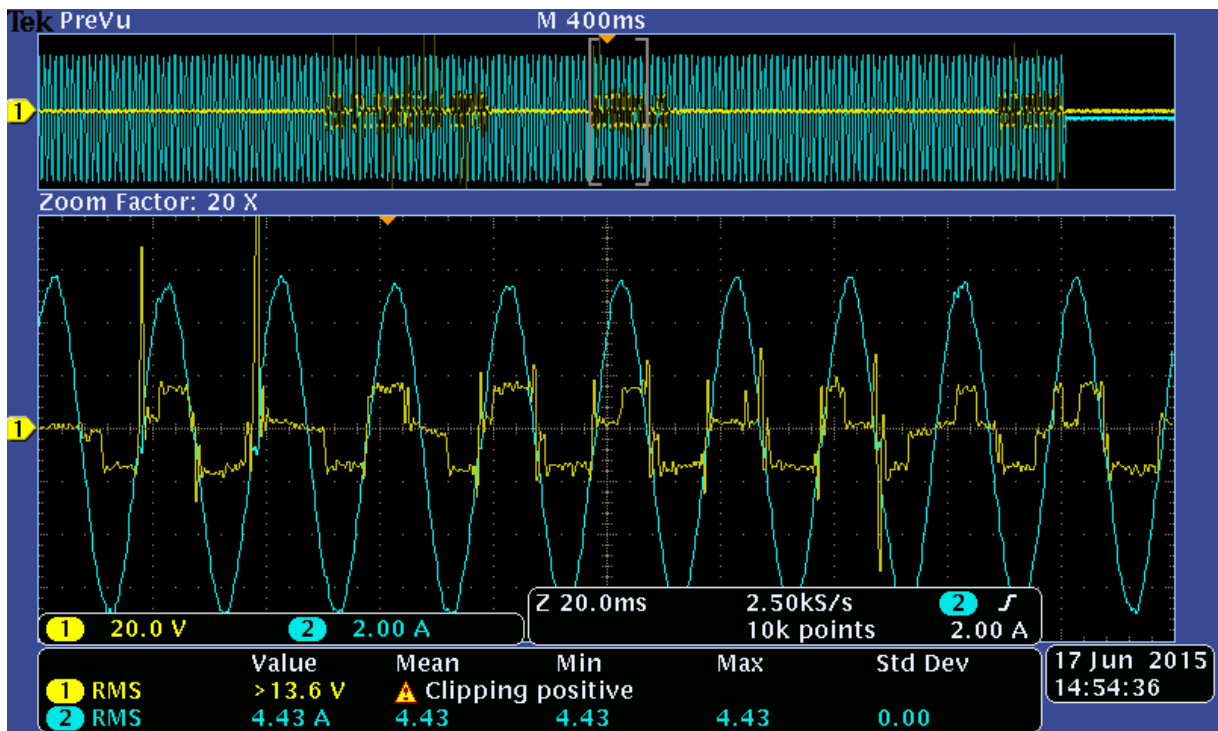
Figur 56 – Strøm og spenning i et tilfelle der lysbuevernet løste ut.

Figur 57 og Figur 58 viser strøm- og spenningsforløp fra den samme hendelsen. Forskjellen er at de to figurene har forstørret strøm- og spenningskurvene ved ulike tidspunkt. Figur 57 viser strøm- og spenningsforløpet i det lysbuevernet detekterer en skadelig lysbue, og dermed bryter strømmen. Tidligere, ved den samme hendelsen, oppstod det lysbuer mellom lederne. Lysbuene som da oppstod førte ikke til noen deteksjon av lysbue med strømbrudd. Figur 58 har forstørret strøm- og spenningsforløpet da det oppstod lysbuer som ikke ble detektert av lysbuevernet.

Test av lysbuevern



Figur 57 – Strøm og spenning i et tilfelle der lysbuevernet oppdaget lysbuen, og dermed brøt strømmen i kretsen.

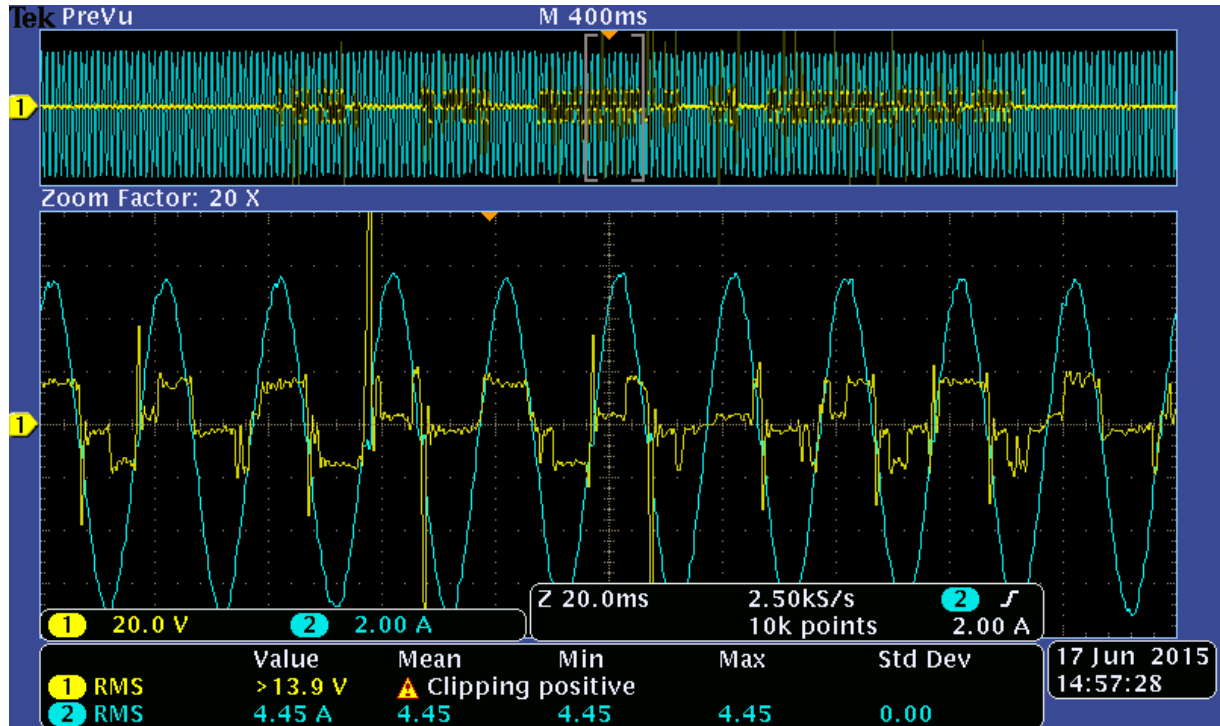


Figur 58 – Strøm og spenning i det samme tilfellet som vist i Figur 57. En hendelse som opptrådte før lysbuene som førte til deteksjon inntraff er vist i denne figuren. Lysbuene denne figuren har forstørret førte ikke til noen deteksjon av lysbue.

Figur 59 viser et tilfelle med lysbuer der lysbuevernet aldri brøt strømmen. Spenningen har den gjenkjennelige forhøyningen etter strømmens nullgjennomgang. Til forskjell fra tilfeller med god kontaktforbindelse, gir lysbuen et spenningsfall over kontaktpunktet.

Test av lysbuevern

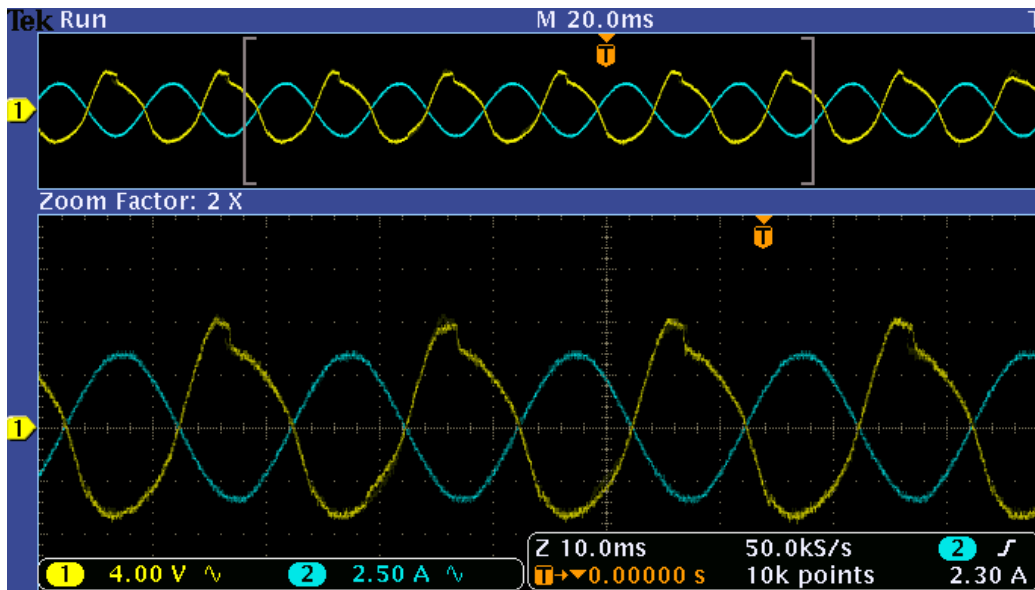
Dette sees som økt spenningsamplitude i den midterste delen av måleperioden, vist i figurens øverste rute. Ved begynnelsen og slutten av måleperioden er spenningsfallet over kontaktpunktet tilnærmet null. Lysbuestrømmens betegnende skuldre ved strømmens nullgjennomgang er lett gjenkjennelige. Lysbuen gjentinner etter hver eneste nullgjennomgang.



Figur 59 – Strøm og spenningsforløp ved lysbuer i et tilfelle der lysbuevernet ikke klarte å detektere lysbuer. Strømmen ble dermed aldri brutt.

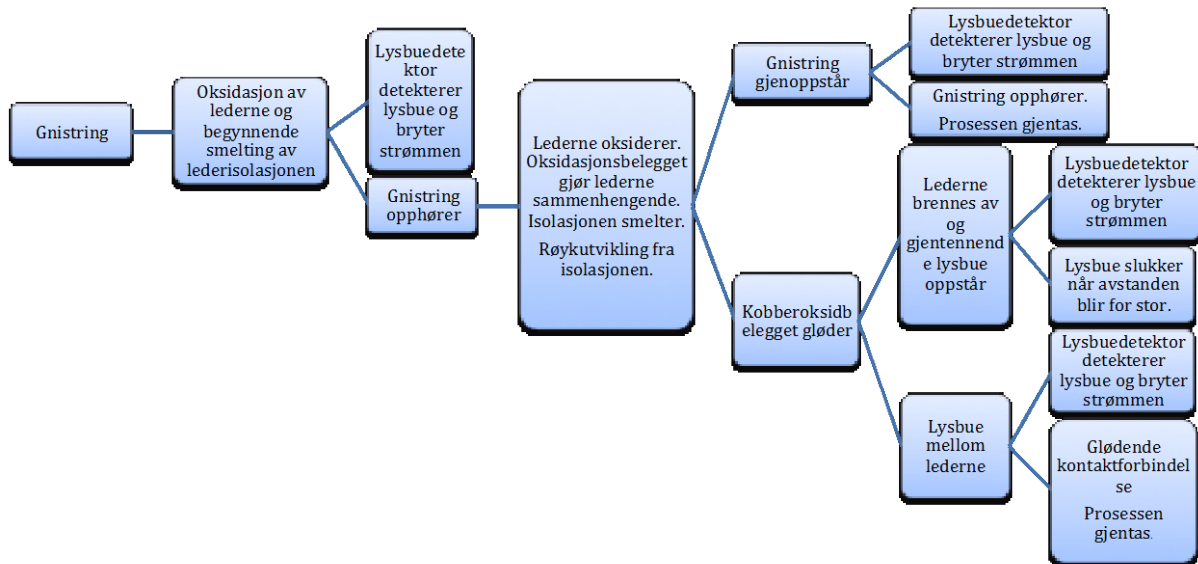
Figur 60 viser strøm- og spenningsforløpet ved et tilfelle med glødende kontaktforbindelse. Ved dette tilfellet ble vibrasjonene stoppet i det gløding oppstod, og glødingen fortsatte å vokse uten vibrasjoner.

Test av lysbuevern



Figur 60 - Strøm og spenning ved glødende kontaktforbindelse fremprovosert ved vibrasjoner. Vibrasjonene ble fjernet da glødende kontaktforbindelse var oppnådd, og glødingen fortsatte uten vibrasjoner.

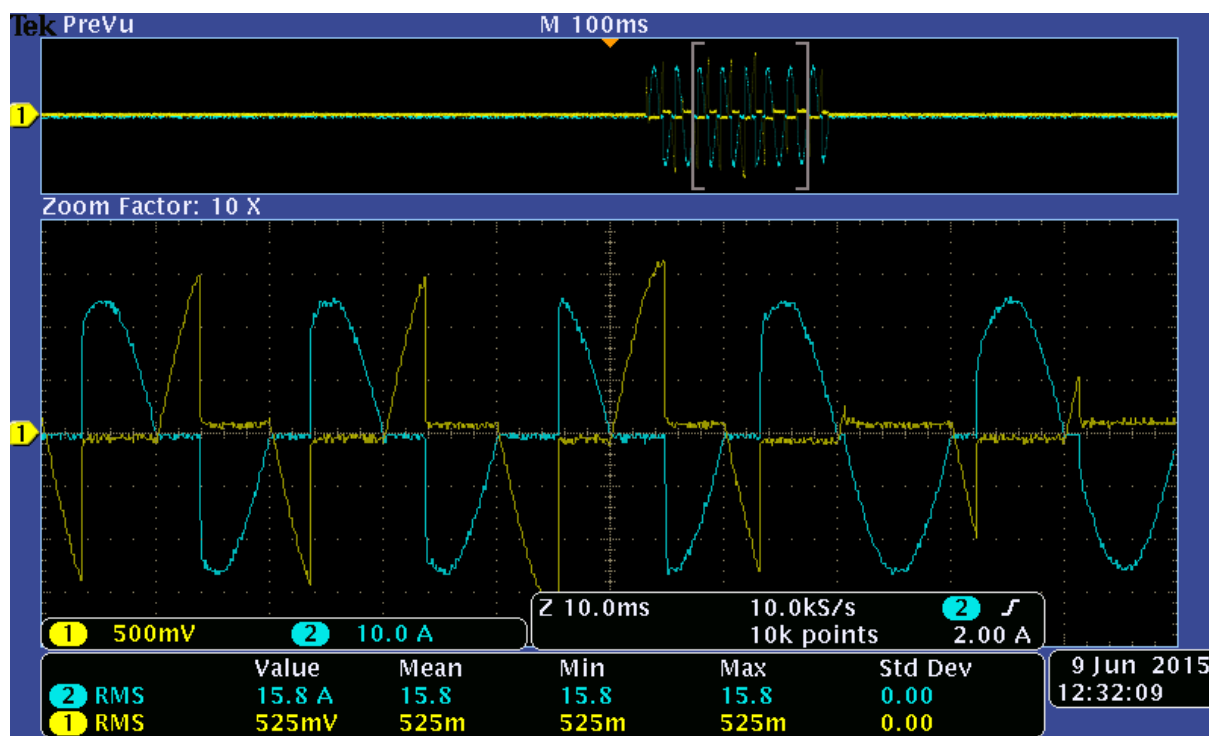
Hendelsesforløpet fra testene er oppsummert i Figur 61. Hendelser gjentok seg helt til enten lederne brente av og strømmen ble brutt som følge av for stor avstand mellom lederne eller lysbuevernet detekterte lysbue, og dermed brøt strømmen i kretsen. Dette er det samme hendelsesforløpet som testene i den forberedende prosjektoppgaven resulterte i. [22]



Figur 61 - Hendelsesforløp ved fremprovosert lysbue i dårlig kontaktforbindelse[22].

9.4.2 Lysbuegenerator

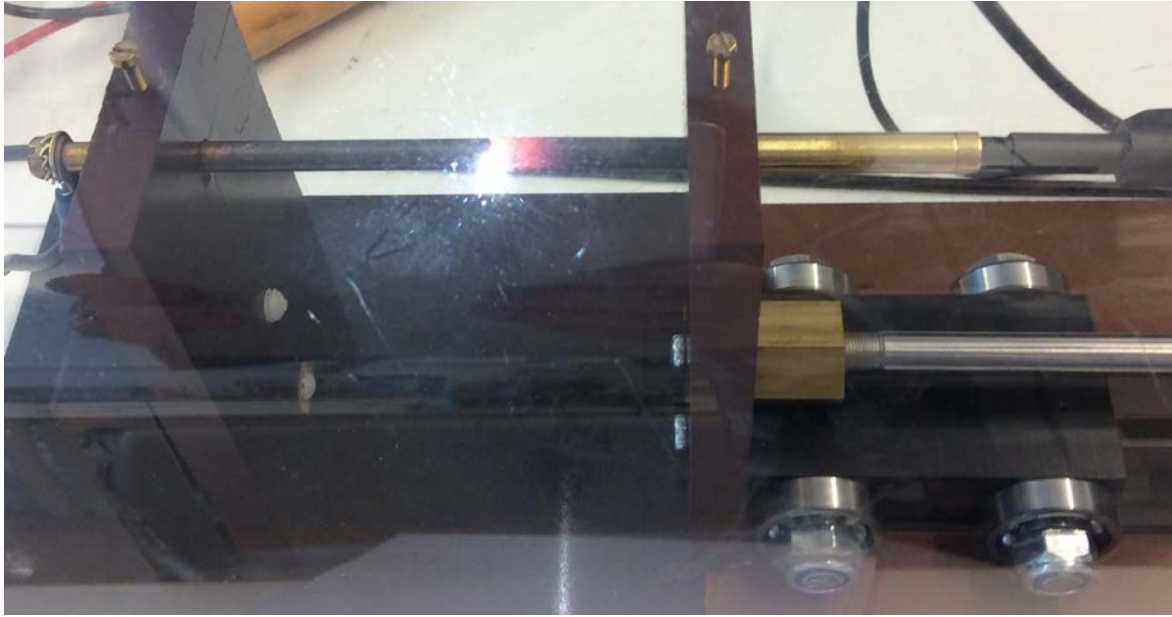
Testene med lysbuegeneratoren resulterte i deteksjon av lysbue innenfor lysbuestandardens krav til brytetid i 61 av 78 forsøk. Dette tilsvarer korrekt operasjon av lysbuevernene ved 78,2 % av tilfellene. Figur 62 viser et skjermbilde fra oscilloskopet som overvåket strøm og spenningsforløpet til en lysbue skapt av lysbuegeneratoren. I dette tilfellet ble strømmen brutt etter 0,16 sekunder. Denne brytetiden var godt innenfor den maksimale brytetiden spesifisert i lysbuestandarden, 0,36 sekunder [53]. I bare ett tilfelle var brytetiden for lang; 0,53 sekunder i stedet for mindre enn 0,43 sekunder.



Figur 62 - Skjermbilde fra oscilloskopet som overvåket strøm og spenningsforløpet til en lysbue som ble brutt etter 158ms. Dette var godt innenfor maksimum brytetid på 357ms.

I de resterende 16 forsøkene som ikke innfridde kravene, brøt ikke vernet strømmen ved noe tidspunkt. Lysbuen slukket av seg selv etter et par titalls sekunder, eller strømmen ble med hensikt brutt da karbonstiften ble rødglødende på grunn av mye røykutvikling i stiftenes festepunkt til lysbuegeneratoren. Et bilde av glødingen av karbonstiften kan sees i Figur 63.

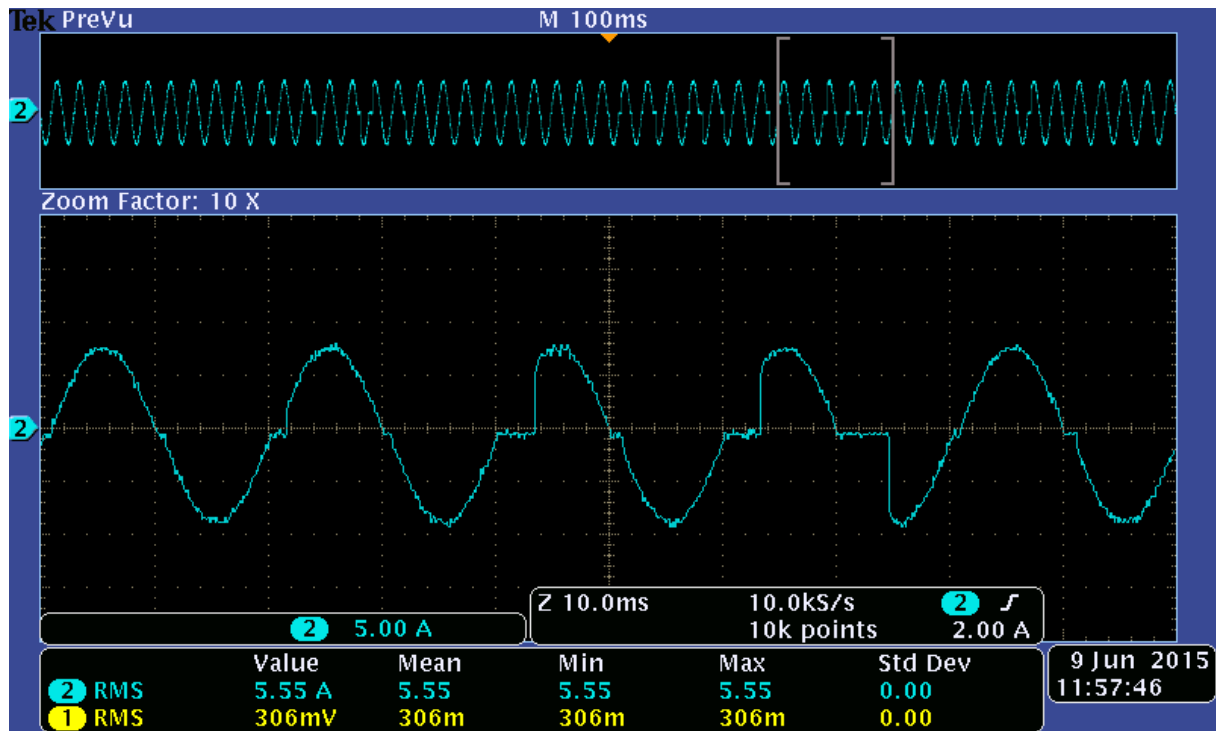
Test av lysbuevern



Figur 63 - Kobberstaven på lysbuegeneratoren ble rødgldende i tilfeller der lysbuevernet aldri brøt strømmen, og det oppstod en stabil lysbue som varte flere titalls sekunder.

Resultatet fra målingene kan sees i Figur 64. Den blå linja viser brytetiden til alle de utførte målingene ved ulike strømnivåer. Den røde linja viser grenseverdien til lysbuevernenes brytetid gitt i standarden; IEC 62606 [53]. I vedlegg V5 finnes en tabell med verdiene fra hver enkelt måling.

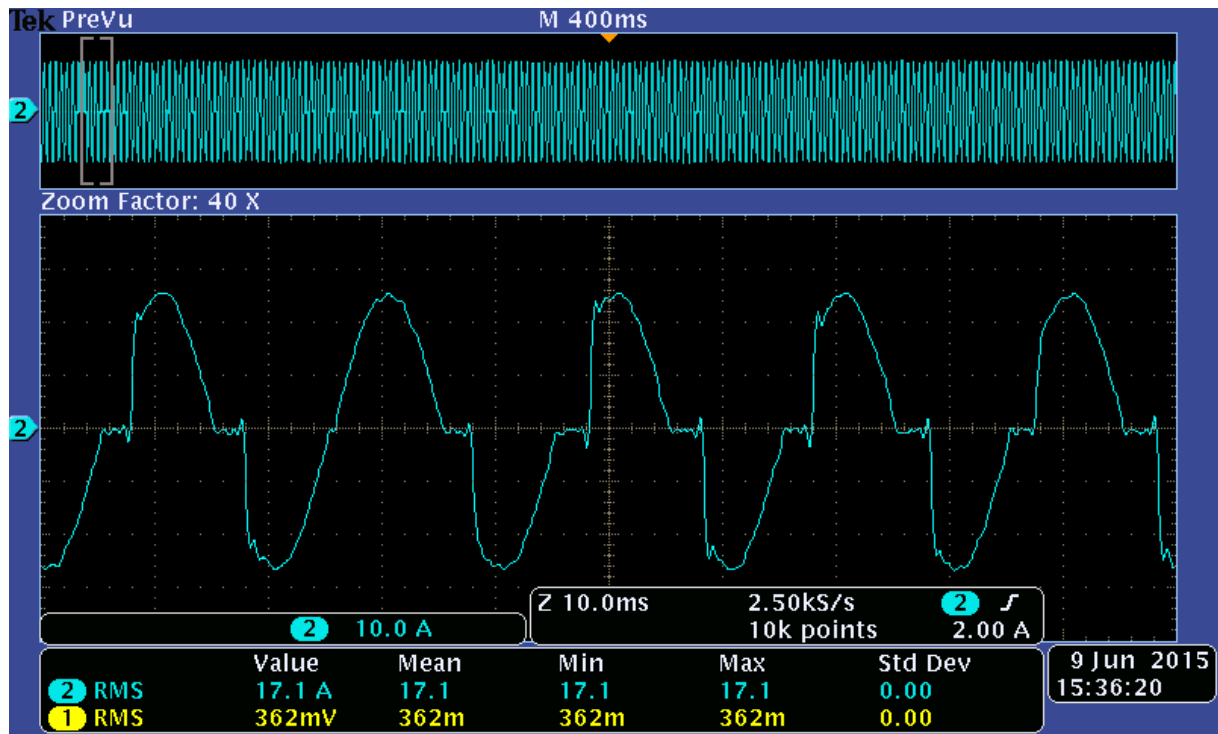
Test av lysbuevern



Figur 65 - Skjerm bilde fra oscilloskop i et tilfelle der lysbue skapt med lysbuegeneratoren ikke ble detektert som lysbue slik at strømmen ble brutt. I dette tilfellet testes vernet med en strømverdi på 6,3A. Lysbuevernet burde brutt strømmen innen 1,089 sekunder for å tilfredsstillе lysbuestandard[53].

Det ble også utført tester utenfor vernenes merkestrøm. Vernene var i stand til å detektere lysbuer i 13 av de 19 forsøkene, til tross for at strømnivået var utenfor merkestrømmen til lysbuevernene og automatsikringene. I 2 av forsøkene med strømnivå over merkestrømmen til vernene var deteksjonstiden for lang, ut fra kravene i lysbuestandarden. I de 4 resterende forsøkene ble lysbue aldri detektert. Lysbuen brant i titalls sekunder før den enten slukket av seg selv, eller strømmen ble brutt ved at kobber- og karbonstiften ble dratt fra hverandre. Et eksempel på et slikt tilfelle er vist i Figur 66. Figur 66 viser et skjerm bilde av strømforløpet da en lysbue brant mellom kobber- og karbonstiften til lysbuegeneratoren. De karakteristiske skuldrene til strømkurven ved lysbue er lett gjenkjennelig. I to av tilfellene var deteksjonstiden for lang, ut fra kravene i lysbuestandarden.

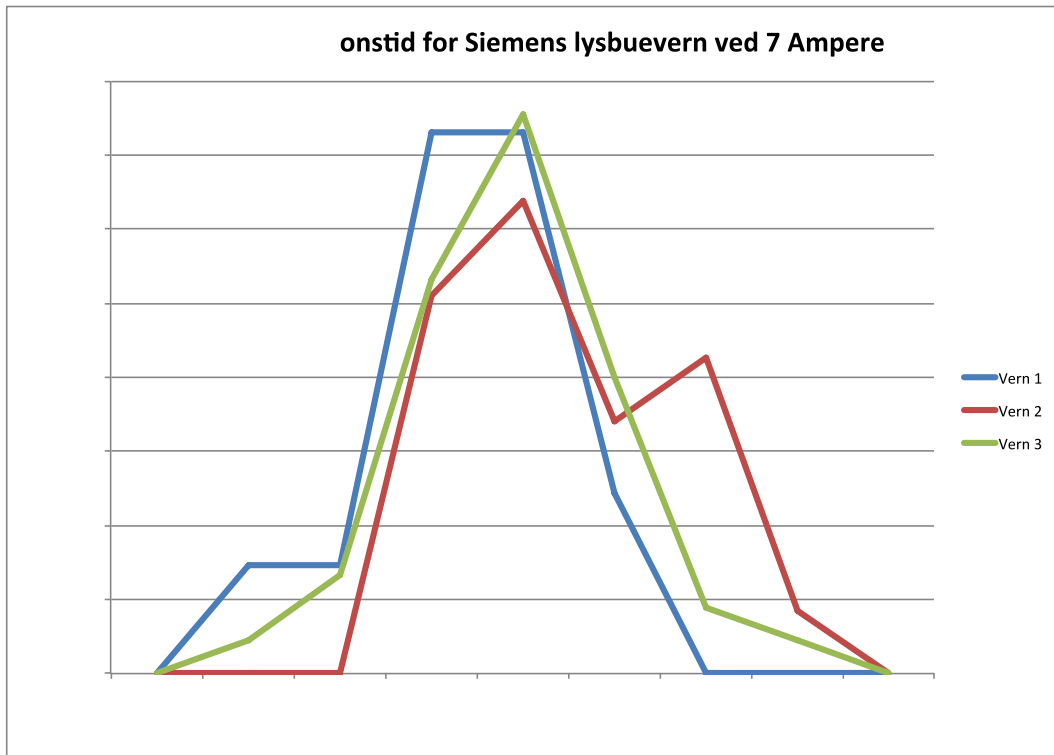
Test av lysbuevern



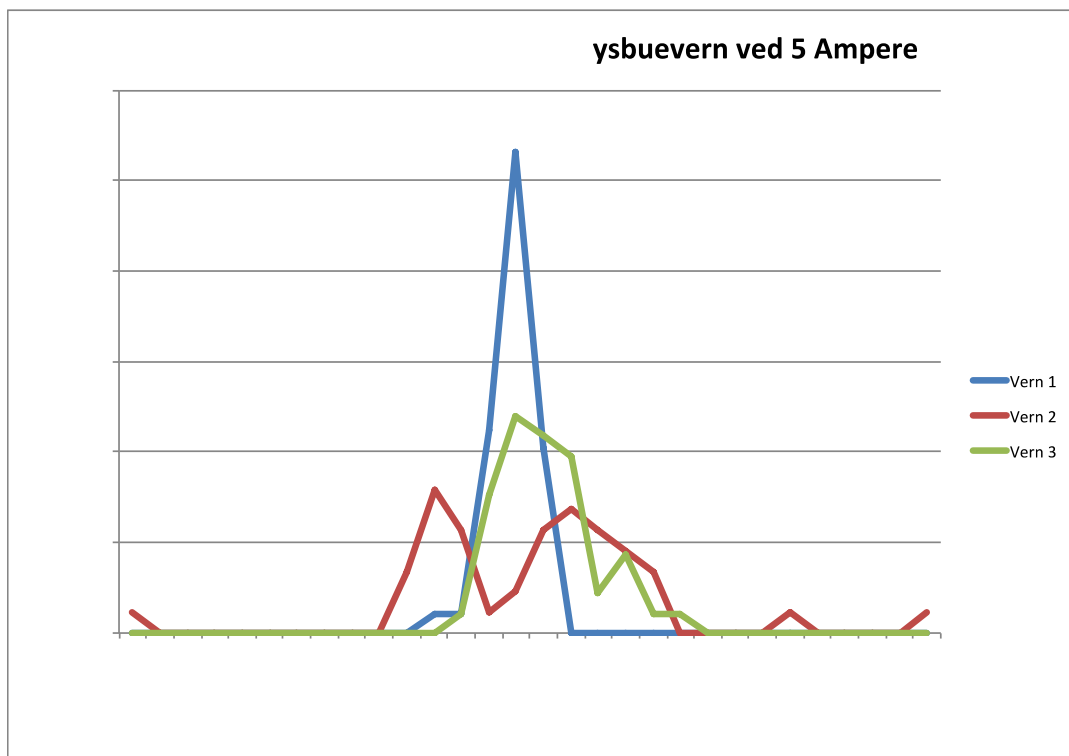
Figur 66 - Skjerm bilde fra oscilloskop i et tilfelle der lysbue skapt med lysbuegeneratoren ikke ble detektert som lysbue slik at strømmen ble brutt. I dette tilfellet testes vernet med en strømverdi over merkestrømmen til lysbuevernet, 16A.

I tillegg til test 9.9.2.7 fra IEC 62606[53] ble det utført målinger av deteksjonstidene ved 5A og ved 7A. Målingene er presentert i Figur 67 og i Figur 68. Deteksjonstidene er i figuren delt opp i intervaller. Det ble utført mellom 41 og 49 målinger for hvert av de tre lysbuevernene som ble testet. Antallet deteksjoner innenfor et gitt tidsrom er gitt i prosent av det totale antallet målinger utført av det aktuelle vernet. Det betyr at eksempelvis 38 % av lysbuene detektert av Vern 3 ved 7 Ampere ble detektert i tidsrommet 290ms -299ms. Figurene gir et bilde av den forventede deteksjonstiden til lysbuevernene ved det aktuelle strømnivået.

Test av lysbuevern



Figur 67 - Prosentandel av lysbuedeteksjoner for 3 ulike lysbuevern fra Siemens presentert etter deteksjonstid. Deteksjonstiden er tiden fra en lysbue oppstod til vernet hadde brutt strømmen i kretsen. Strømmen i kretsen er 7 Ampere.



Figur 68 - Prosentandel av lysbuedeteksjoner for 3 ulike lysbuevern fra Siemens presentert etter deteksjonstid. Deteksjonstiden er tiden fra en lysbue oppstod til vernet hadde brutt strømmen i kretsen. Strømmen i kretsen er 5 Ampere.

Test av lysbuevern

Samtlige lysbuedeteksjoner skal, i følge standarden for lysbuevern, detekteres innenfor en gitt tid. For lysbuegeneratoren gjelder en øvre grense for deteksjonstid på 2,5 ganger tiden gitt i Tabell 2. En interpolasjon av verdiene i tabellen gir grenseverdier på deteksjonstid som vist i Tabell 7. 100 % av målingene ved 5A og 7A var for de tre testede vernene godt innenfor grenseverdien. Den forventede deteksjonstiden ved de aktuelle strømmene er langt innenfor kravene til deteksjonstid, vist i tabellen.

Tabell 7 - Grenseverdier for deteksjonstiden til lysbuevern ved 5A og 7A.

Teststrøm (r.m.s. verdi)	5A	7A
Maksimal brytetid	1,25s	1s

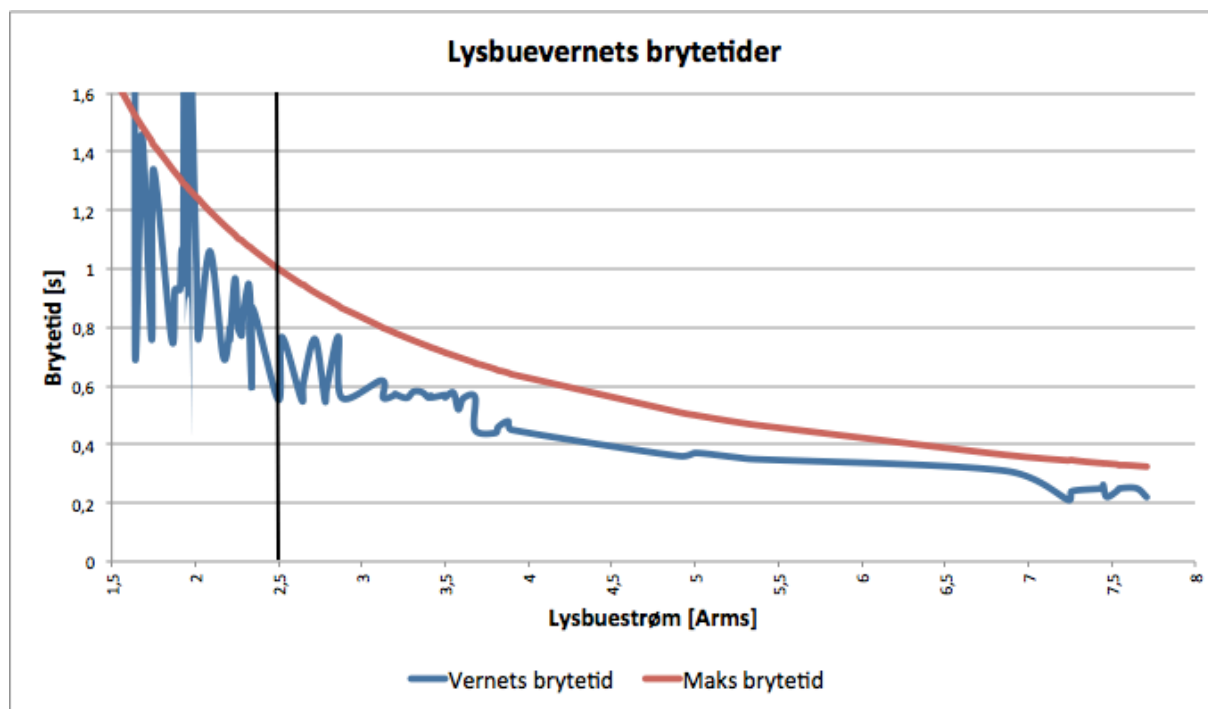
Til forskjell fra lysbuene observert da de ble skapt ved hjelp av vibrasjon, var lysbuene fra lysbuegeneratoren hvite. Lysbuene som ble skapt ved vibrasjon var blå.

9.4.3 Karboniserte kabelprøver

Resultatet av målingene av brytetidene ved de tre testene med karboniserte kabelprøver finnes i vedlegg V4. For ikke å vurdere lysbuevern av ulike produsenter opp mot hverandre, gjengis resultatene av målingene blandet. Hensikten er å bli bedre kjent med lysbueverns potensiale.

Ved ulike strømmer ble det laget lysbuer gjennom karboniserte kabelprøver. Brytetiden, tiden fra lysbuen oppstod til lysbuevernet brøt strømmen, ble registrert. De målte brytetidene ble sammenliknet med kravene til brytetid gitt i standarden for lysbuevern[53]. I Figur 69 er de målte brytetidene og de maksimale brytetidene gitt i standarden tegnet inn. Den blå linja i figuren viser deteksjonstidene ved ulike strømnivåer. Den røde linja viser hva som er den maksimale brytetiden ved de ulike strømnivåene. Ved $2,5A_{rms}$ er det tegnet inn en sort strek. Alt som foregår til venstre for den sorte streken, altså ved lavere strømmer enn $2,5A_{rms}$, er utenfor området som standarden setter krav til. I følge standarden vil en lysbuestrøm på $2,5A_{rms}$ være så liten at den ikke utgjør noen reell trussel.

Test av lysbuevern



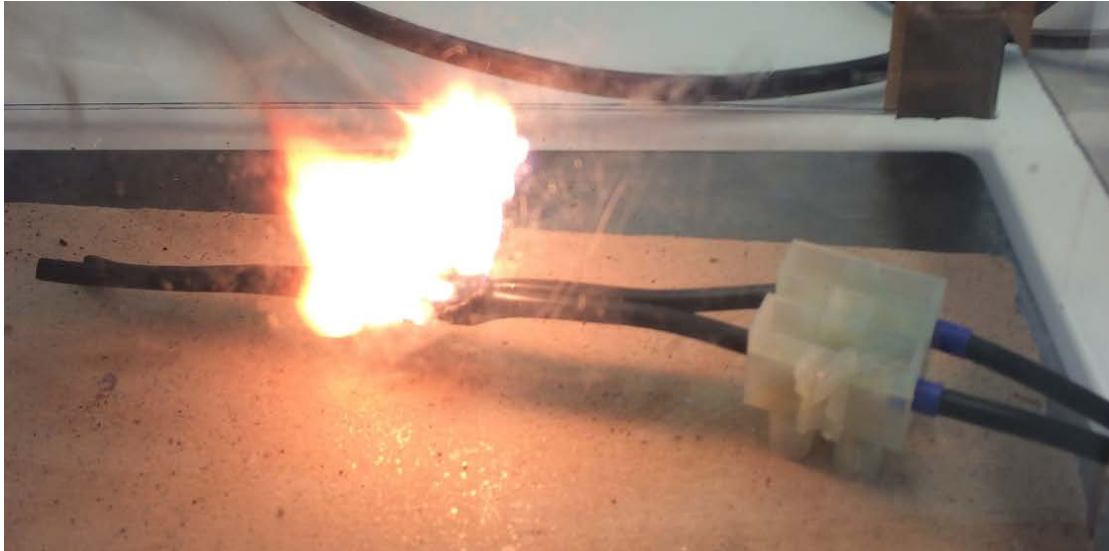
Figur 69 - Lysbuevernets brytetider ved lysbuer gjennom karboniserte kabelprøver. Den blå linja viser målte brytetider ved ulike verdier av lysbuestrømmen. Den røde linja viser maksimale brytetider ved de samme strømnivåene.

Av Figur 69 kan det sees at 100 % av målingene resulterte i brytetider som var godt innenfor kravene i standarden for lysbuevern. Til venstre for den sorte linja er den røde linja en fortsatt interpolering av de maksimale brytetidene spesifisert i standarden. At vernets brytetid krysser denne linja strider ikke mot kravene, da lysbuestrømmen er mindre enn 2,5A. De høyeste toppene representerer tilfeller der vernet aldri brøt strømmen.

I de tilfellene der vernet aldri brøt strømmen var det noen hendelser som gjentok seg. Enten slukket lysbuen etter hvert, og kontakten mellom lederne ble brutt. Et annet utfall var at lysbuen slukket og det oppstod en glødende kontaktforbindelse. Den glødende kontaktforbindelsen utviklet seg, og kabelisolasjonen antente. I forkant av at kabelisolasjonen antente, ble det observert lysbuer. En tredje mulighet var at serielysbuen direkte antente kabelisolasjonen, uten noe mellomstadium med glødende kontaktforbindelse. Ved ett tilfelle slukket lysbuen, og det fortsatte å gå strøm gjennom kretsen. Det som hadde skjedd var at lysbuen hadde smeltet sammen metallet, og på den måten laget en kontaktforbindelse som strømmen kunne flyte gjennom.

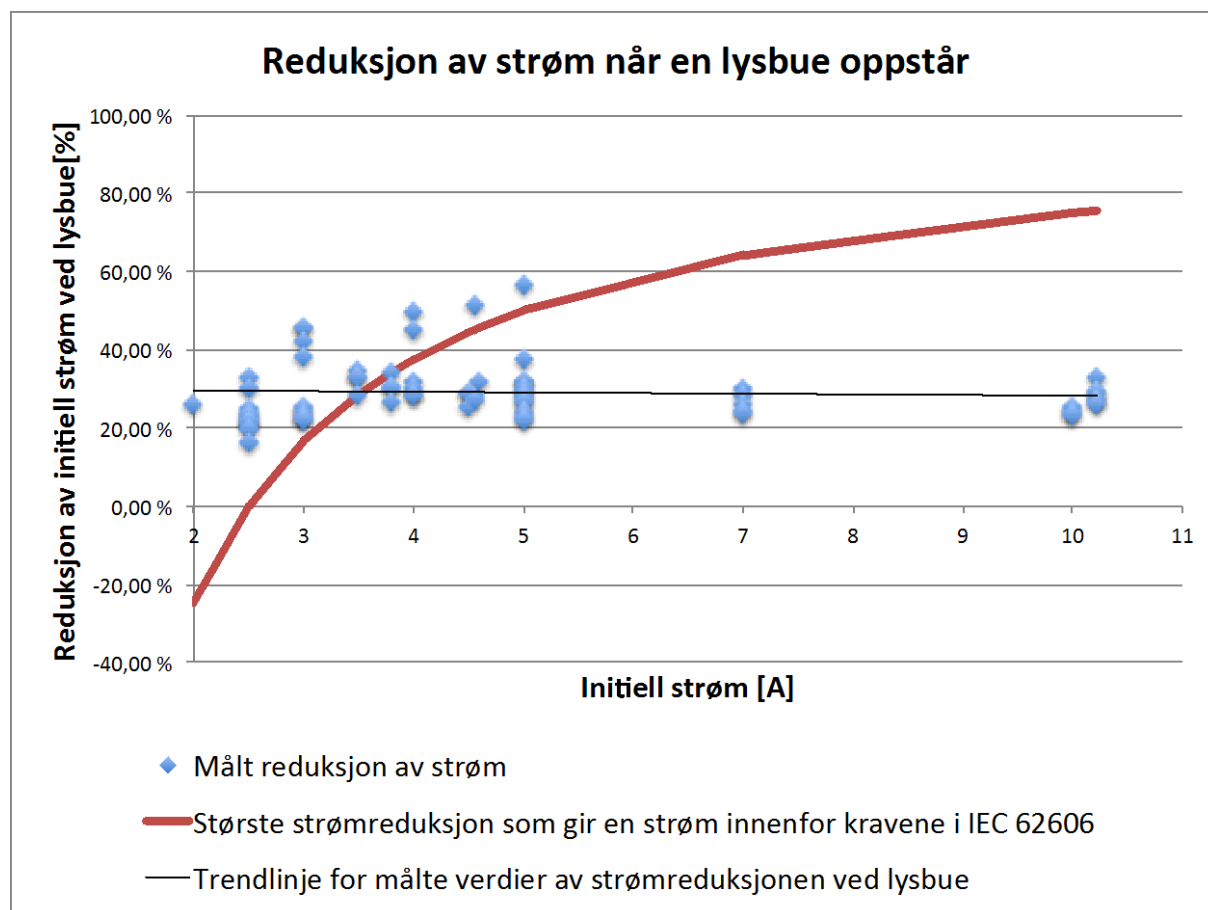
Ved alle hendelser hvor vernet aldri brøt strømmen, var den initielle strømmen mindre eller lik 2A. I alle tilfeller av antennelse av kabelen, slukket flammene like etter at strømmen i kretsen ble brutt. Dersom det på ny gikk en strøm gjennom kretsen, gjenopptok glødingen seg eller stabile lysbuer gjenoppstod. Figur 70 viser et av tilfellene hvor en kabelprøve antente, direkte som følge av stabile lysbuer.

Test av lysbuevern



Figur 70 - Antennelse av kabelprøve ved initiell strøm lik 2,5A.

Figur 71 viser målinger av hvor mye strømmen ble redusert i det en stabil lysbue oppstod. Den horisontale aksene viser hvor mye strøm som opprinnelig gikk i kretsen før lysbuen tente. Den vertikale aksene viser den prosentvise reduksjonen av den initielle strømmen i det en stabil lysbue oppstod. De blå punktene representerer målinger som er utført. Den sorte linja er en trendlinje for de utførte målingene. Trendlinja viser at strømmen hadde en tendens til å bli redusert med 25-30 % i det en stabil lysbue tente. Den røde linja viser grenseverdien for hvor mye den initielle strømmen kan reduseres før lysbuestrømmen er så lav standarden for lysbuevern ikke lengre stiller krav til deteksjon av lysbuer.



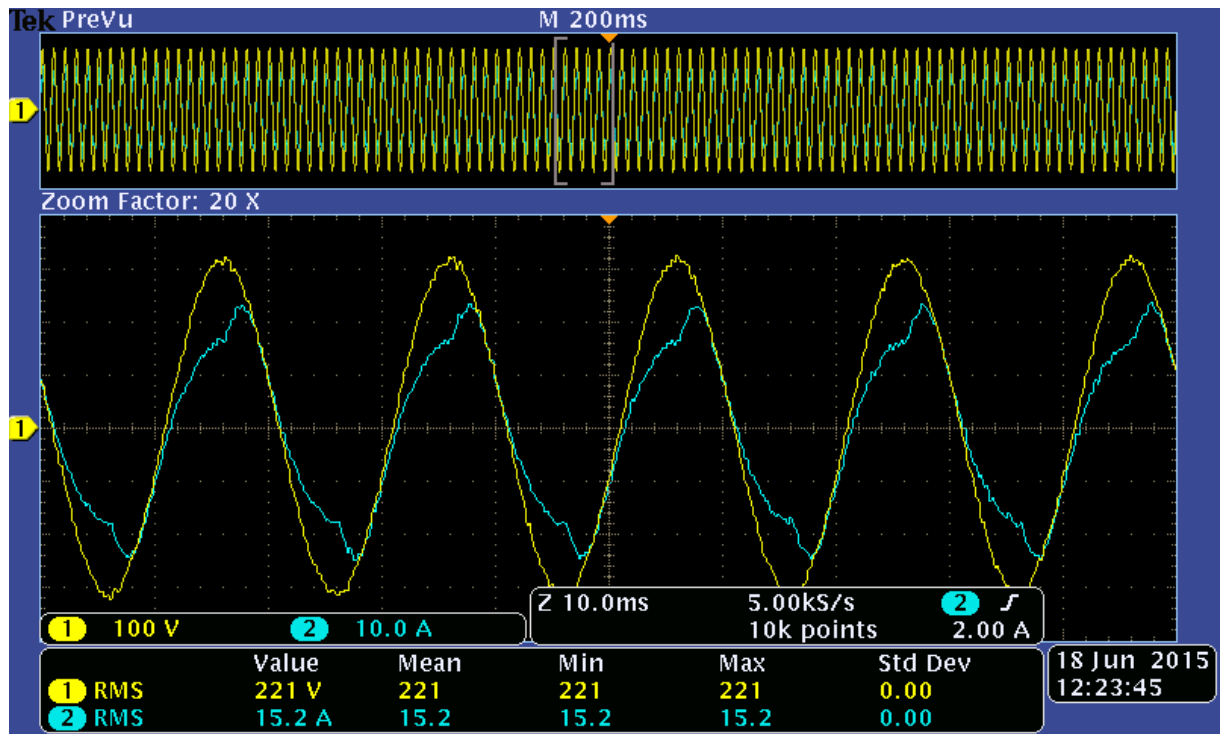
Figur 71 - Reduksjon av strøm i det en stabil lysbue oppstår. De blå punktene er verdiene som ble målt. Den sorte linja er en trendlinje som viser at strømmen hadde en tendens til å bli redusert med 25-30 % i det en lysbue oppstod. Den røde linja viser den øvre grensen for hvor mye strømmen kan reduseres, før lysbuestrømmen er så lav at det ikke lengre stilles krav til deteksjon ved lysbue i standarden for lysbuevern[53].

En sammenlikning av strømnivåene i kretsen før en lysbue oppstod og samtidig med en stabil lysbue, viste en reduksjon av strømnivå i det en lysbue tente. Strømmen ble i 62 % av målingene redusert med 20-29 %. 90 % av alle målingene hadde en strømreduksjon innenfor intervallet 20-39 %.

9.4.4 Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater

Figur 72 viser et skjermbilde fra oscilloskopet fra et tilfelle der alle apparatene var tilkoblet kretsen samtidig. Lysbuevernet som beskyttet kretsen gjorde ingen feildeteksjoner av lysbuer ved dette tilfellet.

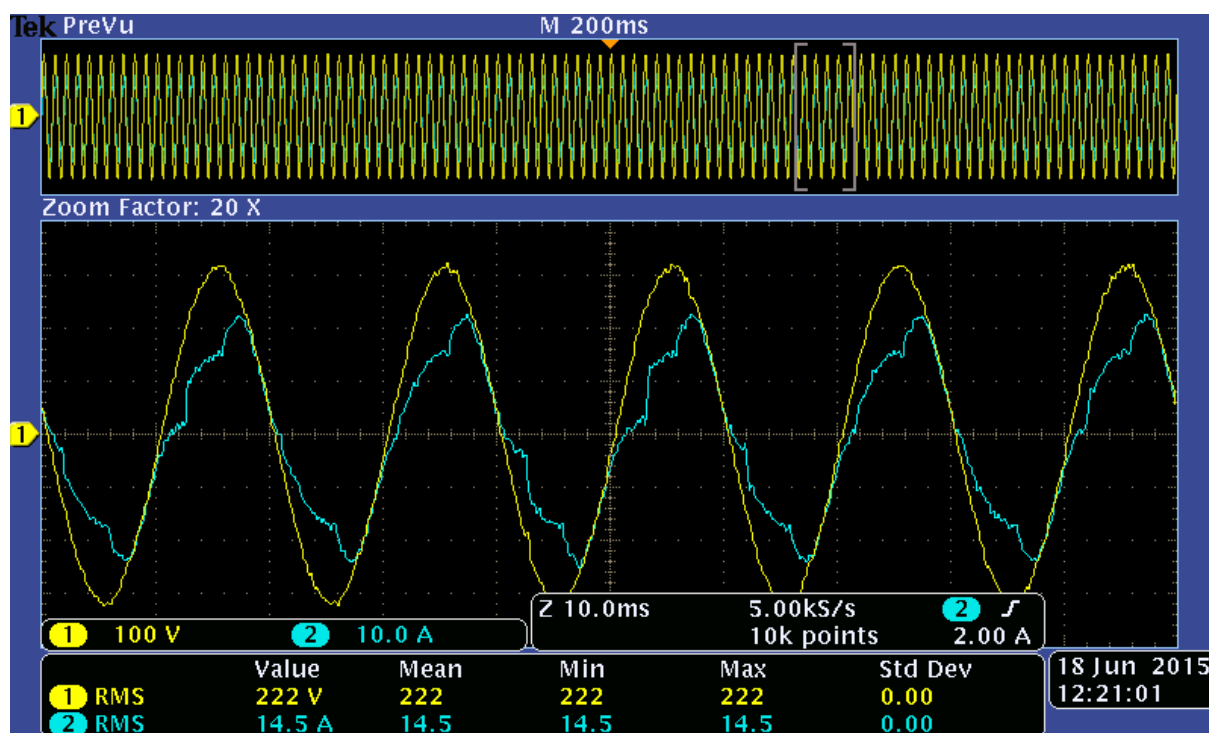
Test av lysbuevern



Figur 72 - Strøm- og spenningsforløp da alle laster var koblet inn.

Figur 73 viser et skjermbilde fra oscilloskopet fra et tilfelle der alle apparatene var tilkoblet kretsen samtidig. Lysbuegeneratoren var brukt til å lage lysbuer, og da dette skjermbildet ble lagret, brant gjentennende lysbuer kontinuerlig mellom kobber- og karbonstiften. De karakteristiske skuldrene til lysbuestrømmen er gjenkjennelige på dette skjermbildet. Lysbuevernet oppfattet ikke denne situasjonen som en skadelig lysbue, og strømmen i kretsen ble aldri brutt.

Test av lysbuevern



Figur 73 - Strøm og spenningsforløp da alle laster var koblet inn, og det ble laget lysbuer med lysbuegeneratoren.

Tabell 8 viser resultatene fra alle testene med alle vernene, både i situasjonen der lysbuevernene ble testet for uønskede utkoblinger og i situasjonen der lysbuevernene ble testet for ønskede utkoblinger. Det var ingen lysbuegenerator tilkoblet i testserien for uønskede utkoblinger, bare de ulike apparatene som ble testet ved ulike effekter. Det forekom ingen tilfeller med uønskede utkoblinger.

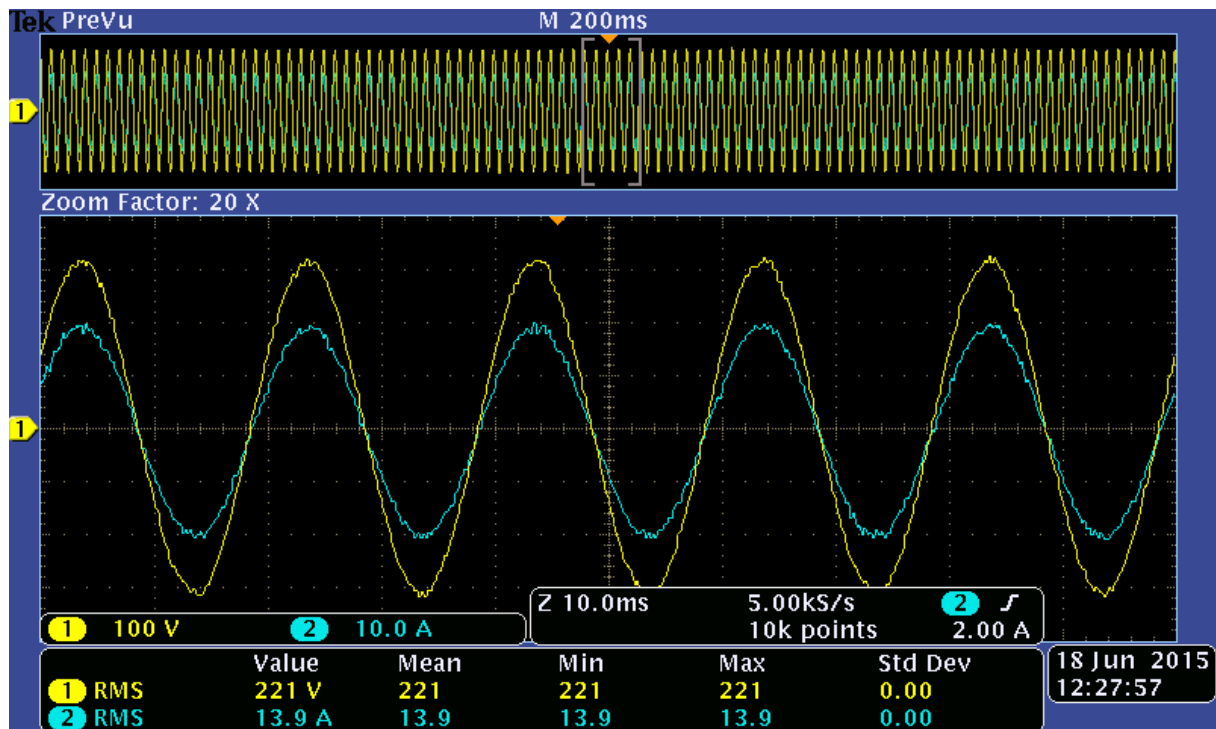
Da det ble innført lysbuer i kretsen skapt av lysbuegeneratoren, var det forventet at lysbuevernene skulle detektere lysbuene og dermed bryte strømmen i kretsen. Dette skjedde ikke ved noen av testene. Ingen av de fem lysbuevernene oppdaget de kontinuerlig brennende lysbuene som ble laget med lysbuegeneratoren ved noen av de fem testene i testserien.

Tabell 8 - Resultat fra tester av uønskede og ønskede utkoblinger av strømmen som følge av at lysbuevernene detekterte eller ikke detekterte en eventuell lysbue.

	Uønskede utkoblinger					Ønskede utkoblinger				
Vern 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vern 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vern 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vern 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vern 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Test av lysbuevern

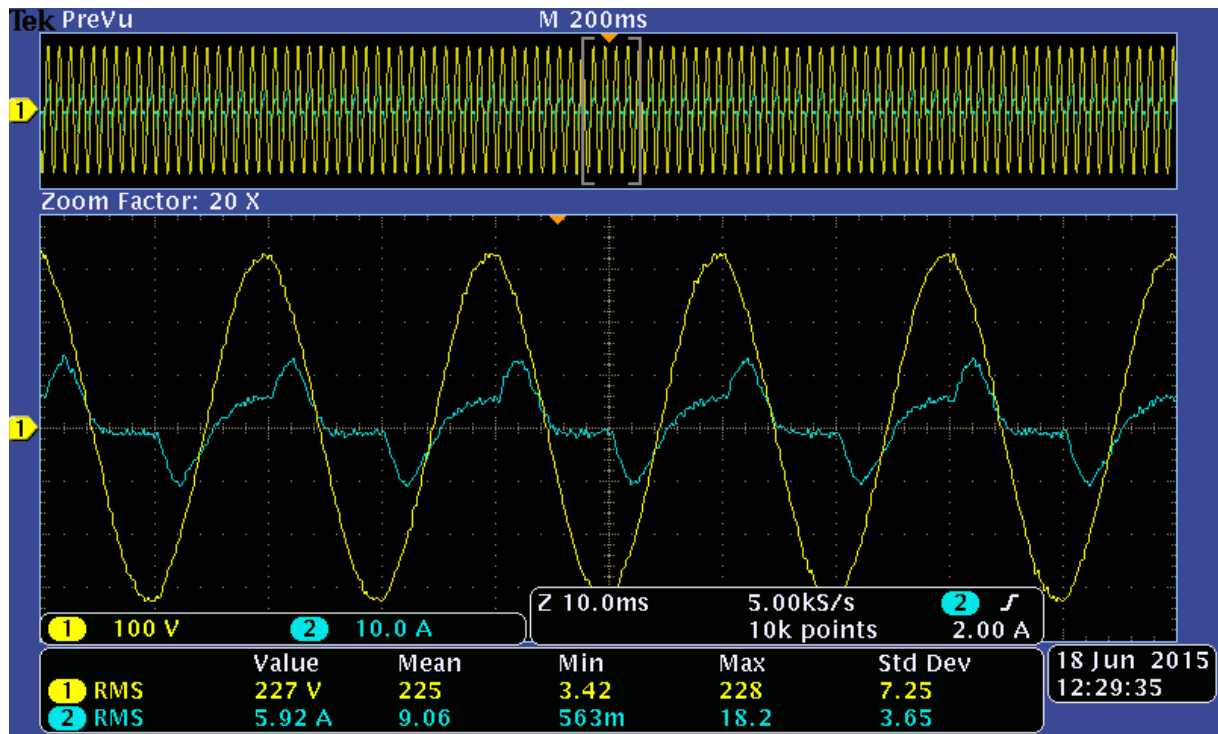
Det ble forsøkt å koble ut enkelte av lastene for å se om dette gjorde vernet i bedre stand til å oppdage lysbuer. Figur 74 viser et skjermbilde fra oscilloskopet i et tilfelle der støvsugeren var koblet ut. Kurven ble tydelig mer sinusformet da støvsugeren ble koblet ut. I dette tilfellet brant kontinuerlig gjentennende lysbuer i kretsen. De karakteristiske strømskuldrene til lysbuestrømmen er ikke mulig å skjelve på dette skjermbildet. Lysbuevernet oppdaget aldri lysbuene, og brøt derfor aldri strømmen i kretsen.



Figur 74 - Strøm- og spenningsforløp i et tilfelle der støvsugeren var fjernet fra kretsen og lysbuer ble laget med lysbuegeneratoren.

Dersom vifteovnen og lysbuegeneratoren ble fullstendig fjernet fra kretsen, oppførte strøm og spenning seg som vist i Figur 75. Støvsugeren var en del av kretsen igjen. Denne situasjonen har noe som kan minne om skuldrene til lysbuestrømmer, da strømkurven flater litt ut omkring strømmens nullgjennomgang. Lysbuevernet detekterte aldri noen lysbue ved dette tilfellet.

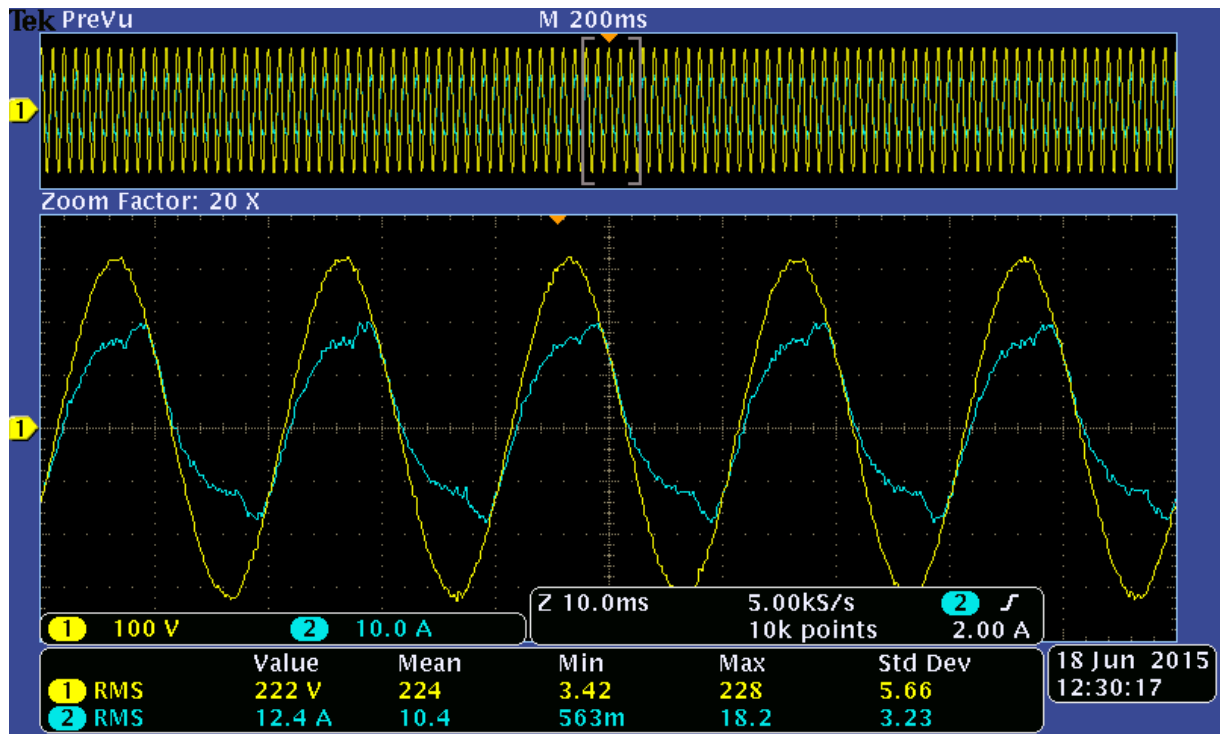
Test av lysbuevern



Figur 75 - Strøm- og spenningsforløp i et tilfelle der lysbuegeneratoren og vifteovnen ikke var en del av kretsen.

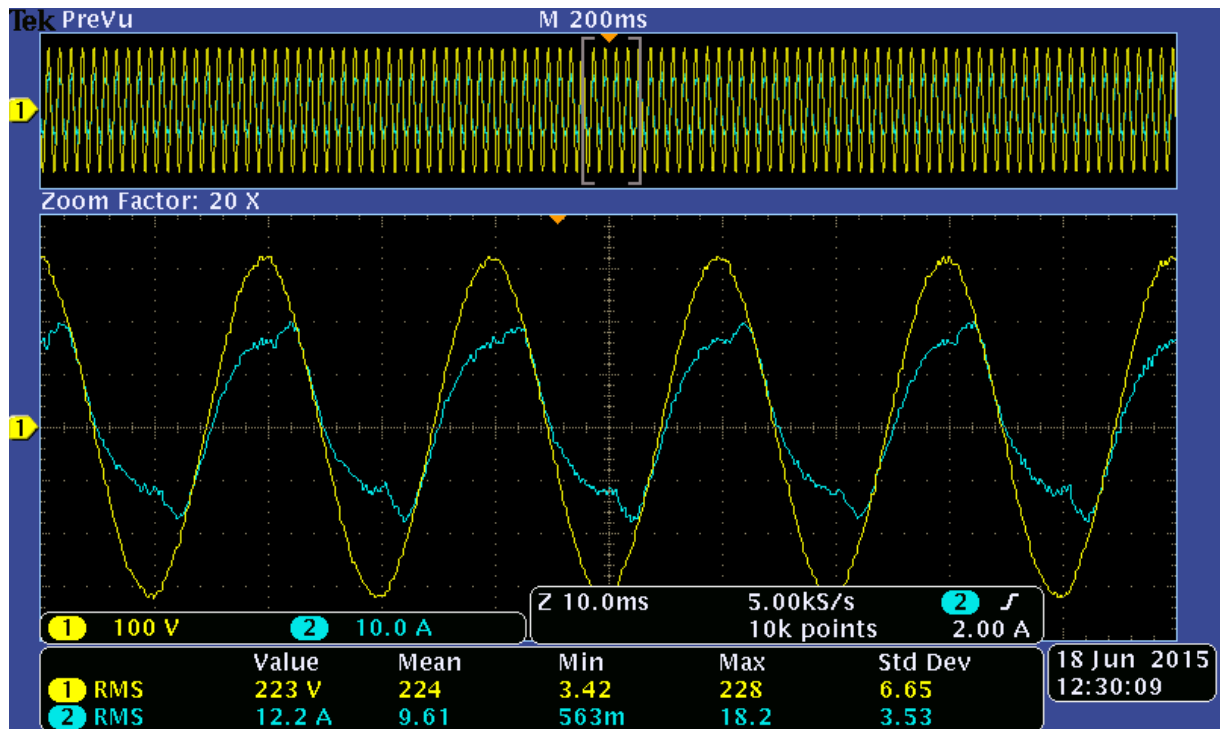
Figur 76 viser strøm og spenningsforløpet ved den samme situasjonen som Figur 75 viser. Forskjellen er at vifteovnen ble koblet inn. Lysbuegeneratoren var ikke en del av kretsen i dette tilfellet, dermed var det ingen lysbuer skapt med intensjon i kretsen.

Test av lysbuevern



Figur 76 - Strøm- og spenningsforløp i et tilfelle der vifteovnen var en del av kretsen. Ved dette tilfellet ble det ikke laget lysbuer med lysbuegeneratoren.

Da lysbuegeneratoren ble satt inn i kretsen, og gjentennende lysbuer ble laget, oppførte strøm og spenning seg som vist i Figur 77. Ingen store endringer fra tilfellet uten lysbuer kan sees av strømkurvene. Lysbuevernet detekterte ikke lysbuene som ble skapt.



Figur 77 - Strøm- og spenningsforløp ved et tilfelle der vifteovnen og lysbuegeneratoren var en del av kretsen. Lysbuer ble laget med lysbuegeneratoren.

10 Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

10.1 Bakgrunn

Det er ønskelig å teste hvorvidt det er mulig å antenne isolasjon ved bare glødende kontaktforbindelse, uten at det er en lysbue tilstede i det antennelse finner sted. Martel antente isolasjon ved glødende kontaktforbindelse, men ved alle tilfeller med antennelse ble det observert en lysbue i forkant [12].

Det ansees som viktig å finne svar på hvorvidt det er mulig å antenne isolasjonsmaterialer bare ved glødende kontaktforbindelser. Grunnen til det er at det er utviklet vern som skal beskytte mot seriefeil, men de ulike vernene baserer seg på forskjellige deteksjonsprinsipper. Et lysbuevern vil derfor ikke detektere varmgang og glødende kontaktforbindelse.

I den forberedende prosjektoppgaven ble det funnet at lysbuer ikke førte til en rask temperaturstigning i stikkkontakten. Konsekvensen av det var at det temperaturdetekterende vernet fra ETIM ikke oppfattet noen seriefeil, til tross for at det gnistret i lysbuer. Det ble observert en liten økning i temperatur, men lysbuevernet brøt strømmen lenge før dette eventuelt kunne utviklet seg til en temperaturverdi de temperaturdetekterende vernene ville oppfattet som kritisk.

Konklusjonen var derfor at lysbuevern detekterer lysbuer, men ikke varmgang og glødende kontaktforbindelser. Temperaturdetekterende vern kan måle temperaturer i stikkkontakten over en grenseverdi, men oppfatter ikke lysbuer [22]. Det er uvisst hvorvidt pågående lysbuer etter hvert vil varme opp en stikkontakt tilstrekkelig til at temperaturen overstiger en verdi som blir ansett som kritisk av produsentene av temperaturdetekterende vern, eller om lysbuer innen den tid vil antenne omkringliggende materialer.

Det er ukjent om lysbuevernet vil detektere lysbuene som oppstår i det isolasjon antennes som følge av glødende kontaktforbindelse. Det vil derfor være interessant å finne ut av om lysbuene som oppstår ved slike tilfeller er stabile nok til at et lysbuevern vil detektere lysbuene, og dermed bryte strømmen.

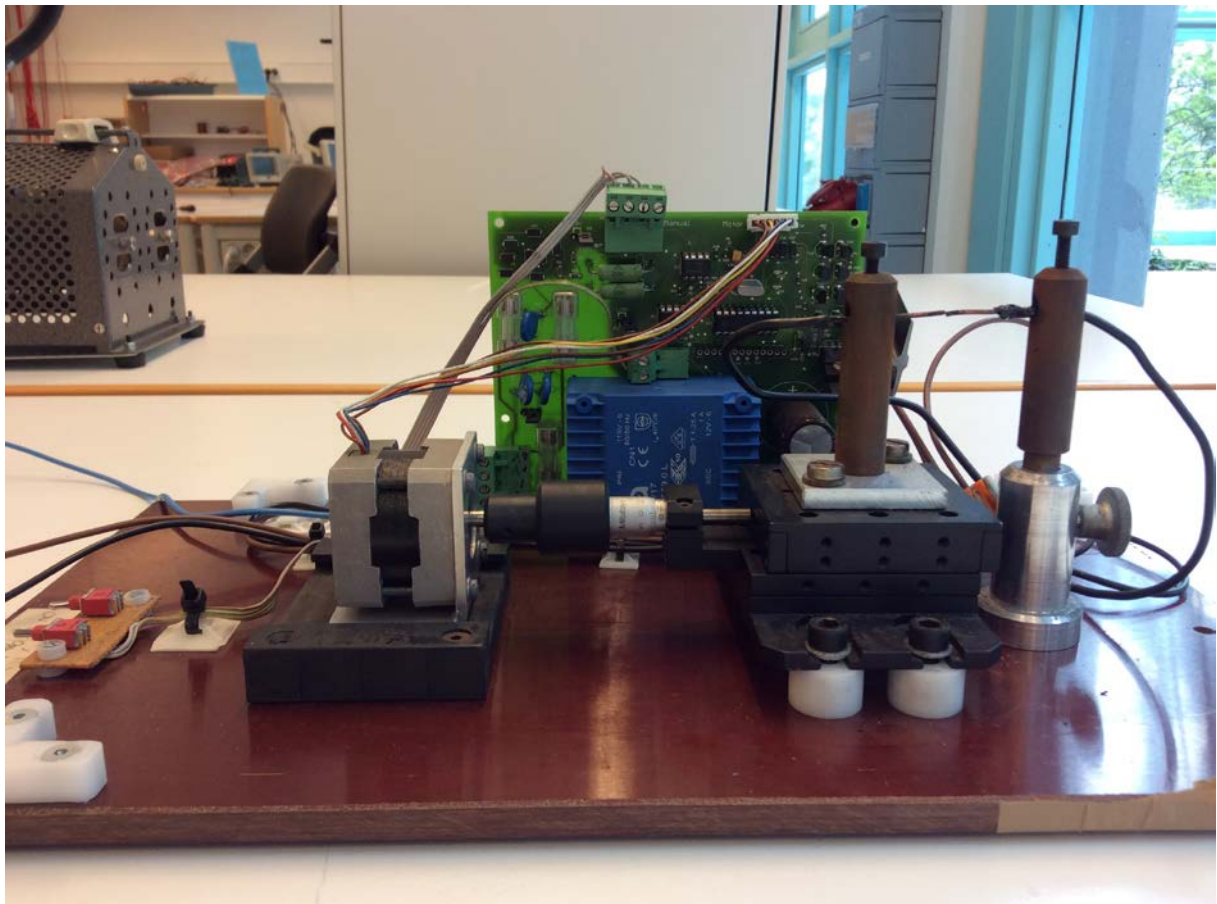
Målet med denne testen er å kartlegge hvor brannfarlig en glødende kontaktforbindelse er, og om et lysbuevern vil redusere brannfaren også ved glødende kontaktforbindelser.

Martel har allerede gjort forsøk med å antenne ny PVC med glødende kontakt mellom to kobberledere. PVC vil med tiden degraderes på grunn av temperaturpåkjenninger, mekaniske påkjenninger, fuktighet og andre forurensninger. I rapporten "Elektriske kabler og brannrisiko" fastslås det at eldre elektriske installasjoner er betydelig mer brannfarlig enn nyere installasjoner, dersom den nye installasjonen ikke viser seg å være brannfarlig innen det første året [18]. Av den grunn er det ønskelig å forsøke å antenne degradert PVC med glødende kontaktforbindelse. Mengden stoffer i PVC som avgis som flammehemmende gasser kan reduseres ved å på forhånd utsette PVC for høye temperaturer [24].

10.2 Måleoppsett og – utstyr

Utstyret i denne testen var det samme som Jean-Mary Martel brukte i sin doktorgradsavhandling [12]. Prinsippet er det samme som for lysbuegeneratoren, beskrevet i kapitlet som omhandler standarden for lysbuevern, kapittel 7. Forskjellen er at det i innretningen som ble benyttet i denne testen var to kobberledere som ble ført mot hverandre, ikke en kobberstav og en karbonstav. Isolasjonen ble fjernet nærmest kontaktpunktet mellom lederne.

Problemet med at kobberet smelter under påvirkning av en lysbue, var løst ved automatisk regulering av avstanden mellom lederne. Spenningen over kontaktpunktet mellom lederne måles, og dersom den er i intervallet for hva som kan forventes av lysbuespenning holdes avstanden konstant. Er spenningen for høy, reduseres avstanden. Dersom kontakten mellom lederne er for god til at det kan oppstå noen lysbue, er spenningsfallet for lavt og avstanden økes. Spenningsmålinger utføres med bare få millisekunders pause mellom hver måling. Det er dermed mulig å få en stabil lysbue mellom to 2,5mm kobberledere. Innretningen er vist i Figur 78.



Figur 78 - Automatisk lysbuegenerator som lager lysbue mellom to kobberledere. Innretningen måler spenningen over lysbuegapet, og tilpasser avstanden mellom kobberlederne slik at spenningen er innenfor intervallet for lysbuer.

Det ble benyttet en motstandsvogn med trinnvis regulerbarhet av motstanden. Strøm gjennom kontaktpunktet og spenning over kontaktpunktet ble målt med ei strømtang og differensialprober tilkoblet et oscilloskop.

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

PVC ble på forhånd degradert ved å utsette plastmaterialet for høye temperaturer. Til dette formålet ble en vanlig stekeovn benyttet. I stekeovnen var det også plassert et termoelement, da det ble antatt at termostaten til stekeovnen ikke var nøyaktig nok. Prøver av isolasjonsmaterialet var plassert i midterste rille i stekeovnen. Gassene som ble avgitt ved degraderingen av PVC ble sluppet ut i fri luft for å unngå å få den korrosive gassen HCl i avtrekksystemene.

10.3 Måleprosedyrer

Forberedelsene til testen innebar å degradere PVC, som senere skulle forsøkes antent med glødende kontaktforbindelse. En stekeovn ble forhåndsoppvarmet til 260 °C, og en del av isolasjonsmaterialet ble utsatt for denne temperaturen i ti minutter. Den resterende delen av isolasjonsmaterialet ble satt inn i ovnen da termoelementet inne i ovnen målte en temperatur på 50 °C. Temperaturen ble gradvis økt frem til 255 °C. Deretter ble isolasjonsmaterialene kjølt ned.

Den automatiske lysbuegeneratoren ble tilkoblet nettspenning, 230VAC med 50Hz. Strømmen gjennom feilstedet ble valgt å være 4,6A. Dermed ble den regulerbare motstandsvognen stilt inn til en motstandsverdi på 50Ω. Ei strømtang tilkoblet oscilloskopet målte lysbuestrømmen, og differensialprober tilkoblet oscilloskopet målte spenningen over kontaktpunktet mellom lederne. Strøm- og spenningsforløpet lot seg dermed antenne.

Ved å sette den automatiske lysbuegeneratoren i lysbuemodus, ble avstanden automatisk justert slik at det alltid var lysbuer mellom kobberlederne. I det en glødende kontaktforbindelse ble observert, ble den automatiske justeringen slått av og lederne beholdt posisjonen sin i forhold til hverandre. På den måten var det mulig å opprettholde den glødende kontaktforbindelsen mellom lederne. Det glødende filamentet vokste seg større dersom glødingen fikk pågå en tid. Da glødingen hadde fått en viss størrelse, ble prøver med degradert og ny PVC plassert inntil den glødende kobberoksidbroen. Målet var å finne ut av om det er mulig at glødende kontaktforbindelse alene kan antenne kabelisolasjon.

10.4 Resultater

Under degraderingen av isolasjonsmaterialet, oppstod det ved 250 °C en betydelig røykutvikling. Isolasjonsmaterialet var smeltet ved denne temperaturen. Dette var forventet, da ren PVC har en smeltetemperatur på 180 °C. I tilfellet der isolasjonen gradvis ble varmet opp, så det ut til at isolasjonsmaterialet, i tillegg til å ha smeltet, også var blitt delvis karbonisert. Isolasjonsmaterialet som ble utsatt for 260 °C i ti minutter bar mindre preg av karbonisering.

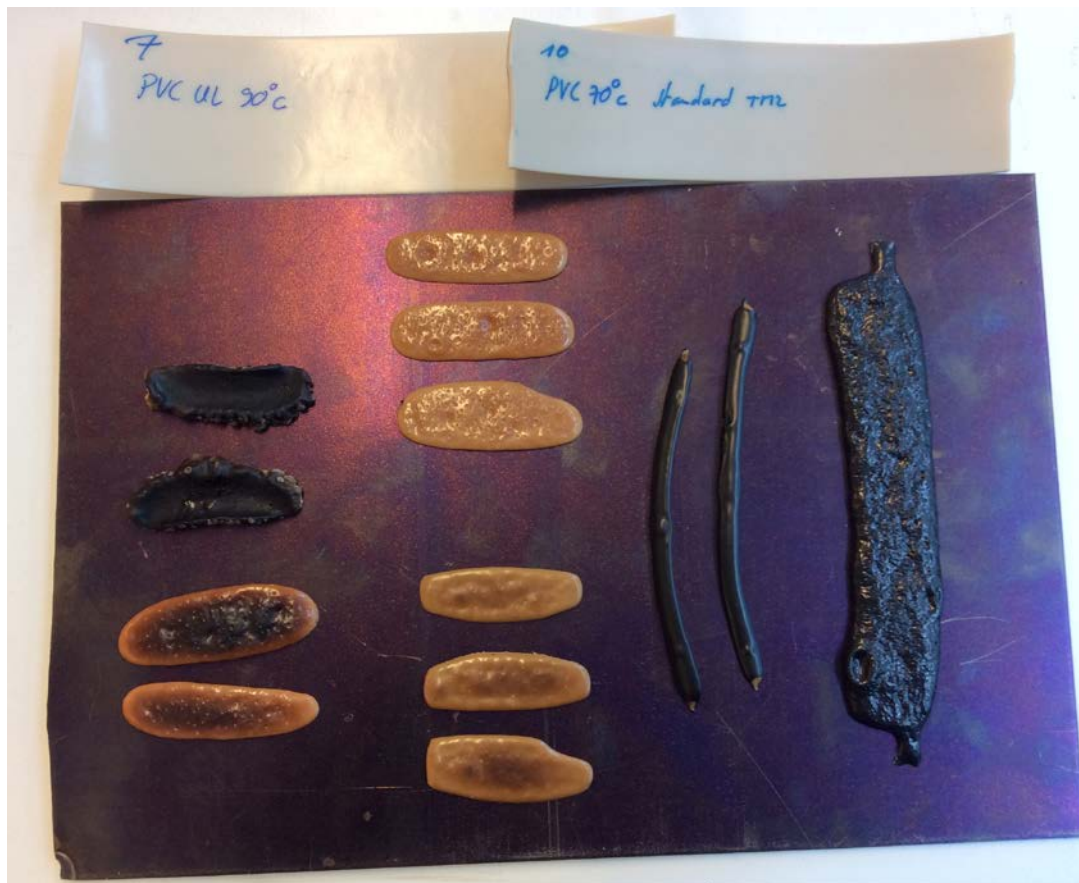
Figur 79 viser prøvene av isolasjonsmaterialene etter degradering. De fire prøvene til venstre er de fire prøvene som gradvis ble oppvarmet til 255 °C. De er tydelig de mest karboniserte prøvene. Det skilte seg mellom PVC som var ment å tåle en kontinuerlig brukstemperatur på 90 °C og på 70 °C. Øverst til venstre ligger prøver fra PVC som var

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

ment å tåle 70 °C. De er betydelig mer karbonisert enn prøvene fra PVC som var ment å tåle en kontinuerlig brukstemperatur på 90 °C.

Foruten de nye prøvene av PVC øverst i bildet, var alle de resterende kabelprøvene i Figur 79 degradert ved å utsette de for 260 °C i ti minutter. Også her kan det sees at kabelprøvene med PVC som skal tåle kontinuerlig brukstemperatur på 70 °C ble mer karbonisert enn kabelprøver beregnet for 90 °C kontinuerlig brukstemperatur.

Kabelprøvene for kontinuerlig brukstemperatur på 70 °C er de tre nederste kabelprøvene ved siden av de sorte, lange prøvene av isolasjonsmateriale. De sorte, lange kabelprøvene til høyre i figuren ble også utsatt for 260 °C i ti minutter. Kabelprøvene er kabelisolasjon, der kabelen er fjernet. Isolasjonsmaterialet er PVC beregnet for 70 °C. Det er vanskelig å si hvor karbonisert prøvene er i forhold til de andre prøvene bare ved å se på materialet, da sortfargen som indikerer karbonisering ikke skiller seg fra isolasjonsmaterialets opprinnelige farge.

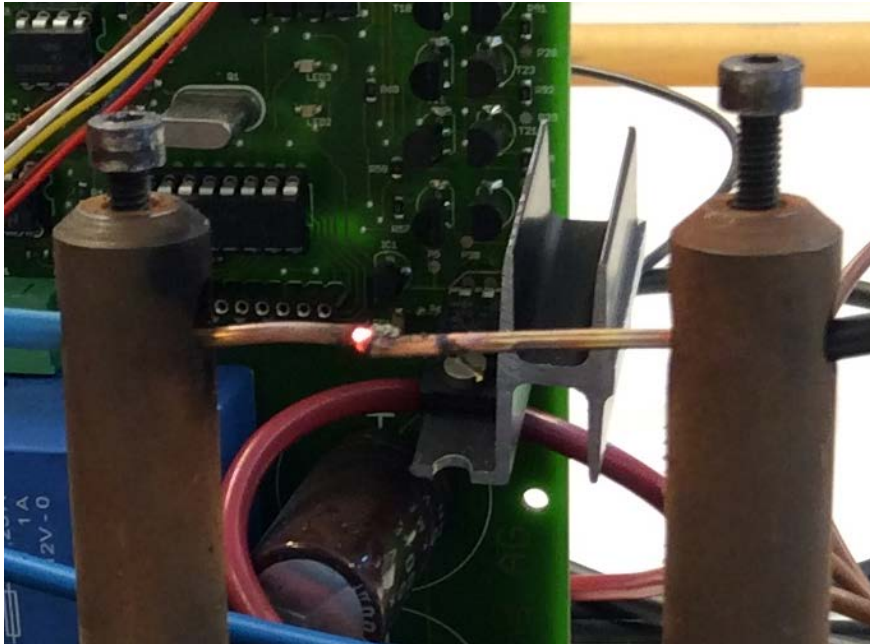


Figur 79 - PVC som har blitt degradert ved å utsette plasten for høye temperaturer i en stekeovn. De fire prøvene til venstre på platen ble gradvis varmet opp fra 50 °C til 255 °C. Foruten de nye prøvene øverst i bildet, ble de resterende kabelprøvene utsatt for 260 °C i ti minutter.

Glødende kontaktforbindelse mellom kobberlederne oppstod etter få sekunder med lysbuer. Det var aldri mulig å skape glødende kontaktforbindelse mellom kobberlederne uten forutgående lysbuer. Det betyr at ved alle tilfeller oppstod glødende kontaktforbindelse i etterkant av lysbuer. Etter at glødende kontaktforbindelse hadde

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

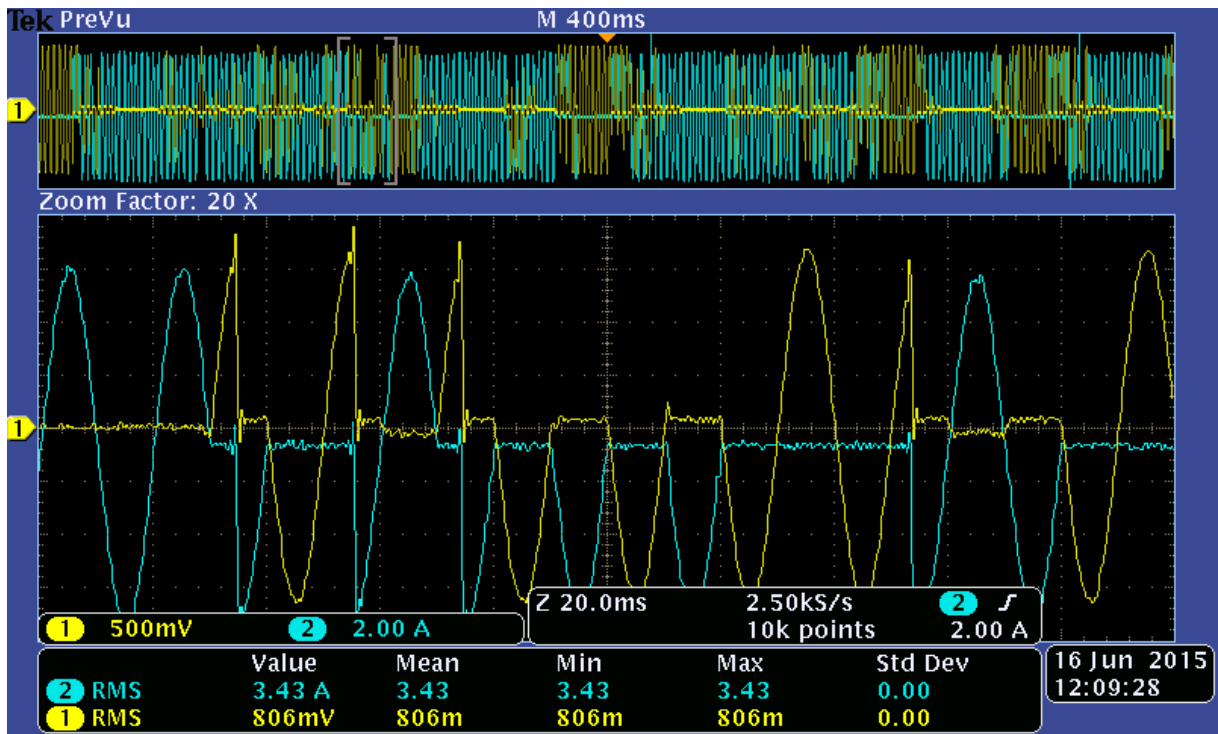
oppstått, og det var dannet en kobberoksidbro mellom lederne, kunne glødingen slukke. Av og til ble kobberoksidbroen brutt. Det oppstod en lysbue mellom lederne i det kobberoksidbroen ble brutt. Av og til slukket lysbuen, og av og til oppstod det stabile lysbuer mellom lederne. Det hendte også at kobberoksidbroen begynte å gløde igjen. Kobberoksidbroen vokste seg større da den fikk gløde en tid, men aldri større enn omkring 1-1,5mm i diameter. Figur 80 viser et bilde av en glødende kobberoksidbro mellom kobberlederne.



Figur 80 - Glødende kontaktforbindelse mellom to 2,5mm² kobberledere, skapt av den automatiske lysbuegeneratoren.

Lysbuer resulterte ikke alltid i glødende kontaktforbindelse. Det var spesielt vanskelig å oppnå glødende kontaktforbindelse da lederne var blitt tilstrekkelig oksidert ved kontaktpunktet. Da var stabile lysbuer desto enklere å skape. Figur 81 viser strøm og spenningsforløpet ved en slik situasjon. De karakteristiske skuldrene til lysbuestrømmen er lett gjenkjennelige, og er vist i blått. Det kan også sees tilfeller av at strømmen ikke har gjentent ved strømmens nullgjennomgang, samt tilfeller av at gjenvenning ikke har forekommet før spenningen over kontaktpunktet har blitt tilstrekkelig høy.

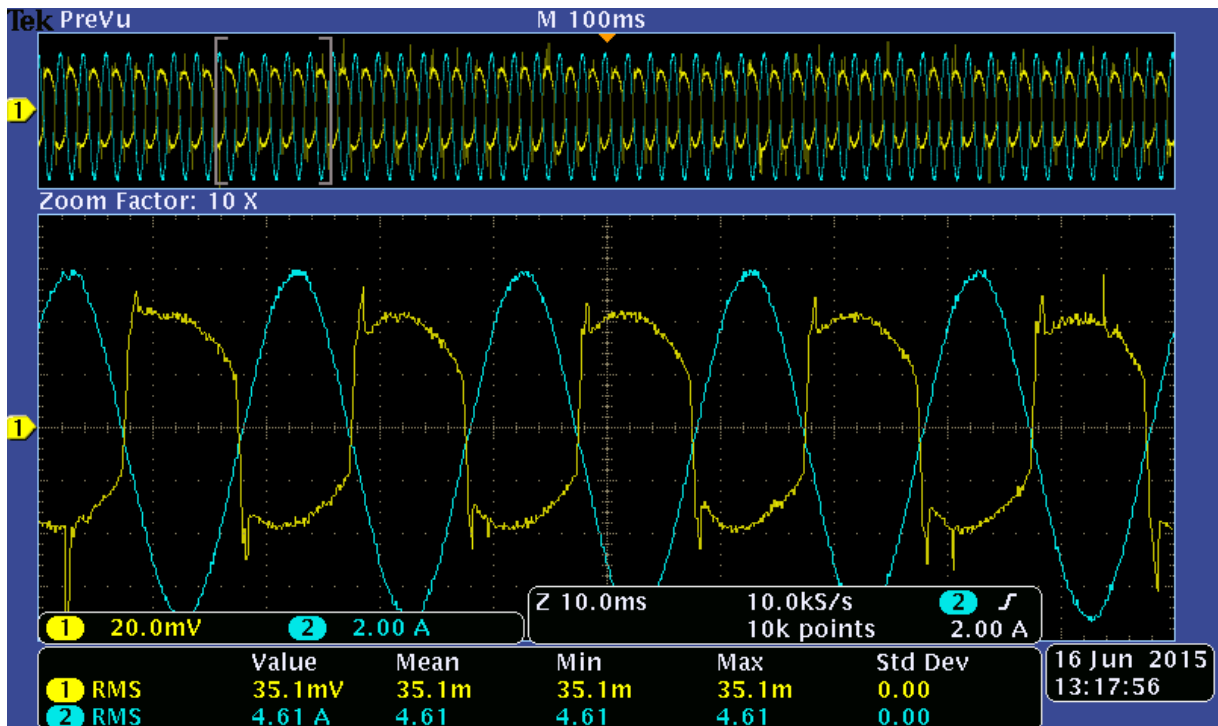
Antennelse ved glødende kontaktforbindelse



Figur 81 - Skjerm bilde fra oscilloskopet som overvåket strøm og spenning da det ble laget lysbuer mellom kobberlederne ved den automatiske lysbuegeneratoren.

Figur 82 viser et skjermbilde fra oscilloskopet av strøm og spenningsforløpet ved glødende kontaktforbindelse mellom to 2,5mm² kobberledere. Skjerm bildet viser strømmen gjennom kobberoksidbroen og spenningen over kobberoksidbroen.

Figur 82



Figur 82 - Skjerm bilde fra oscilloskopet, som målte strøm og spenningsforløpet ved glødende kontaktforbindelse mellom to 2,5mm² kobberledere.

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

Materialene som ble forsøkt antent er listet opp i Tabell 9. Tabellen inneholder informasjon om resultatet av testene. Ikke ved noen tilfeller var det mulig å antenne isolasjonsmaterialene uten at lysbuer var involvert. I tilfellene der en lysbue var involvert derimot, antente de fleste isolasjonsmaterialene. Bare den mest karboniserte prøven, som var PVC beregnet for 70 °C, utsatt for en gradvis oppvarming fra 50 °C til 255 °C, lot seg ikke antenne.

Antennelse av prøvene som lot seg antenne ble gjentatt fem ganger. Prøvene ble holdt inntil lysbuepunktet og glødepunktet frem til antennelse fremtrådte. For de prøvene som ikke lot seg antenne, var prøvene forsøkt antent i fem minutter per forøk. Hvert forsøk ble gjentatt fem ganger. Dersom det ikke var antydning til antennelse i noen av de fem forsøkene, ble det antatt at prøvene ikke lot seg antenne under de gitte forhold.

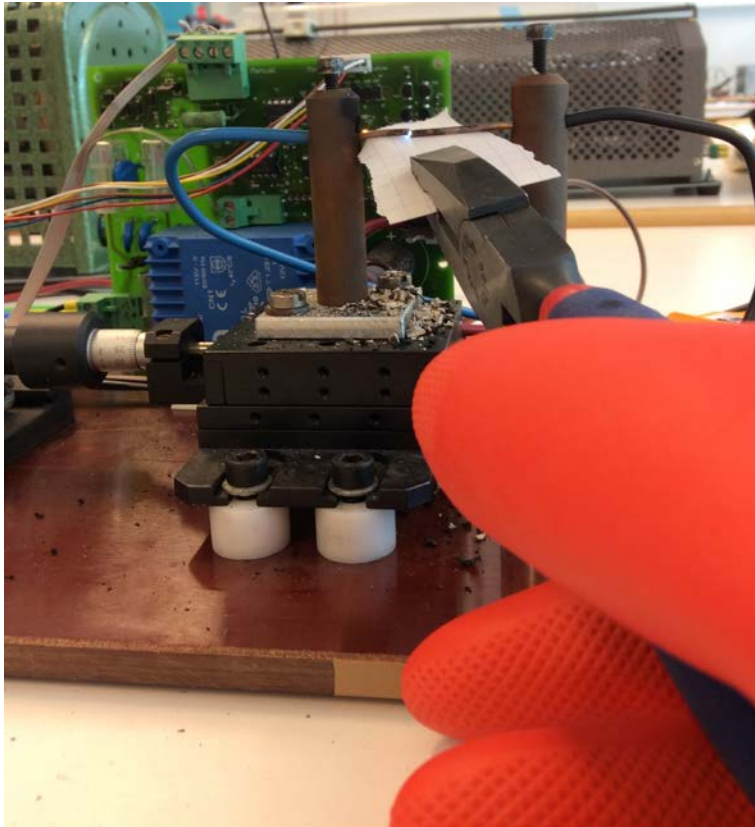
Tabell 9 - Resultat av forsøk med å antenne ulike materialer med glødende kontaktforbindelse og lysbue.

PVC	Lysbue		Gløding	
	Gradvis til 255 °C	10 min ved 260 °C	Gradvis til 255 °C	10 min ved 260 °C
70 °C	(Smeltet) karboniserte	Smeltet, karboniserte, antente	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte
90 °C	Smeltet, karboniserte, antente	Smeltet, karboniserte, antente	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte
2,5mm ² 70 °C	Smeltet, karboniserte, antente	Smeltet, karboniserte, antente	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte
RK25mm ² 70 °C	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte	Smeltet, karboniserte
Ny, 70 °C	Smeltet, karboniserte, antente		Smeltet, karboniserte	
Ny, 90 °C	Smeltet, karboniserte, antente		Smeltet, karboniserte,	
Skrivepapir	Forbrente med gløding, Forbrente med flammer		Forbrente med gløding	
Bobleplast	Smeltet		Smeltet	

Skrivepapirbitten lot seg antenne av lysbuer, da kontakten av og til vekslet mellom lysbuer og gløding, og det oppstod flammer under forbrenningsprosessen. Da skrivepapirbitten ble satt inntil glødende kontaktforbindelse, startet en forbrenningsprosess av papirbitten uten flammer. Forbrenning av materiale i fast fase uten flamme, men med utsendelse av lys fra forbrenningssonen er en glødebrann [29, 60]. Et tilfelle der skrivepapirbitten ble lagt inntil små lysbuer, uten at kontakten mellom

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

lederne var av den art at den vekslet mellom lysbuer og glødende kontaktforbindelse kan sees i Figur 83.

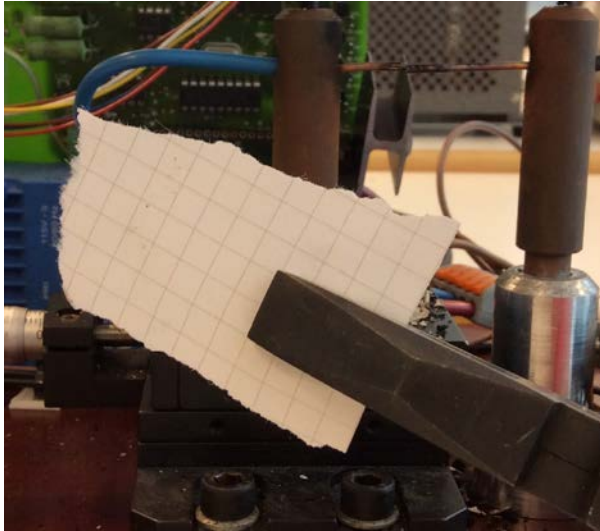


Figur 83 – Skrivepapirbiten ble lagt inntil lederne da det oppstod små lysbuer. Kontakten mellom lederne var kun i form av lysbuer ved dette tilfellet.

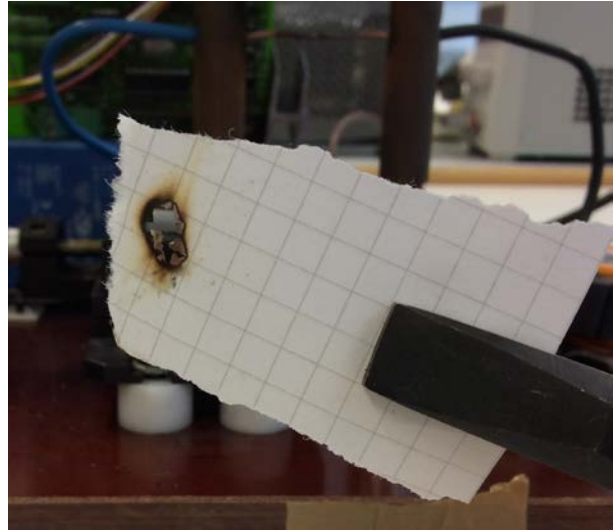
Det kunne ikke sees spor etter oppvarming etter at papirbiten hadde vært utsatt for små lysbuer, som ikke vekslet mellom å være glødende kontaktforbindelser og lysbuer. Den samme papirbiten som er vist i Figur 83 er vist i Figur 84 etter at den ble utsatt for lysbuer.

Kontakten mellom lederne utviklet seg etter hvert til å veksle mellom gløding og lysbuer. Den automatiske lysbuegeneratoren ble stoppet i en posisjon der en glødende kobberoksidbro kunne opprettholdes og det glødende filamentet vokse. Da glødingen var stabil, ble papirbiten lagt inntil den glødende kontaktforbindelsen. Umiddelbart begynte papiret å forkulle, og en forbrenningsprosess i form av en glødebrann startet. Dersom papiret ble fjernet fra lederne, slukket glødingen etter en tid. Glødebrannen var i stand til å brenne opp hele papirbiten da den var i kontakt med lederne. Figur 85 viser den samme papirbiten etter at den ble plassert inntil den glødende kontaktforbindelsen i 3-4 sekunder.

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse



Figur 84 – Papirbit som ble plassert inntil lysbuer mellom to kobberledere.

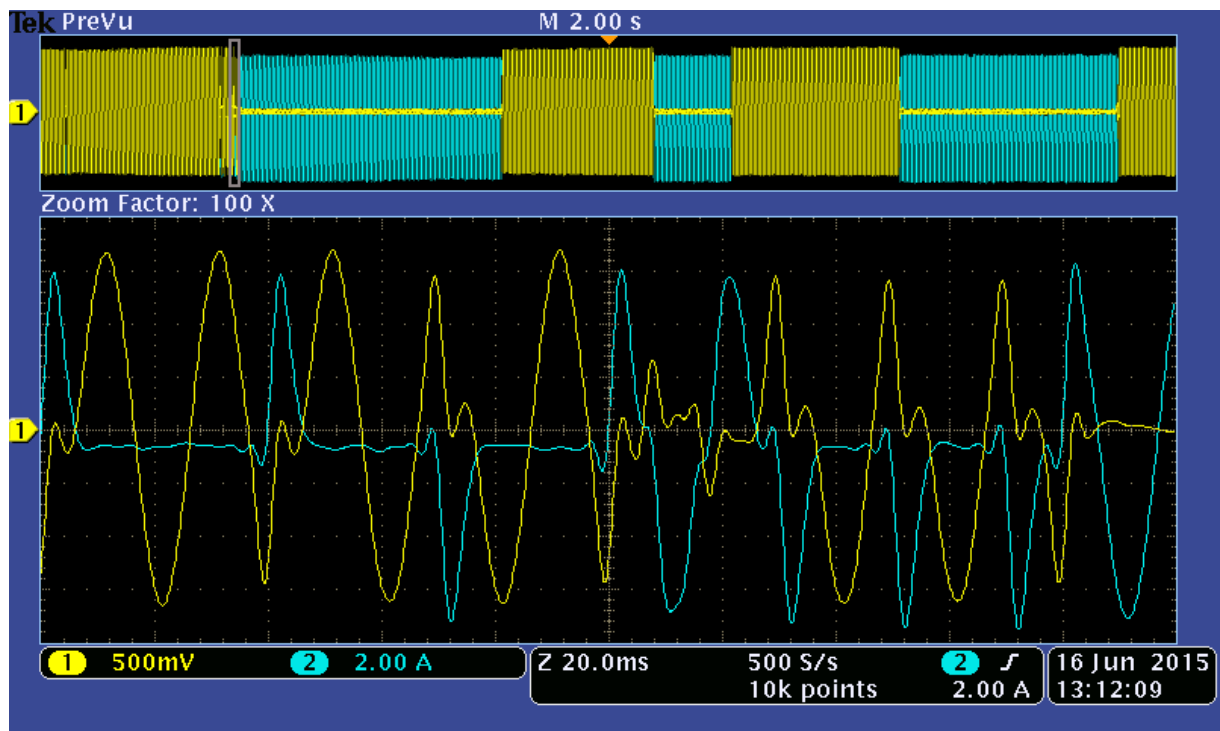


Figur 85 – Papirbit som ble plassert inntil glødende kontaktforbindelse mellom to kobberledere.

Isolasjonsmaterialene som ble holdt inntil kontaktforbindelsen med enten lysbuer, glødende kontaktforbindelse, eller en kombinasjon av gløding og lysbuer, begynte først å smelte da det ble utsatt for varmepåvirkningen. Etter hvert begynte også isolasjonsmaterialene å karbonisere. De isolasjonsmaterialene som allerede var karbonisert, fortsatte å karbonisere i enda større grad. Dersom det oppstod litt kraftigere lysbuer, resulterte dette ofte i antennelse. Før eller siden antente alle isolasjonsmaterialene, utenom PVC beregnet for 70 °C, som på forhånd var utsatt for en gradvis oppvarming fra 50 °C til 255 °C. Dette var det isolasjonsmaterialet som på forhånd var mest karbonisert. Dette var også det eneste isolasjonsmaterialet hvor det ble observert en svært liten grad av smelting, bare videre karbonisering.

Forløpet til lysbuestrømmen og spenningen over lysbuen i det lysbuen antenner en prøve av degradert PVC er vist i Figur 86. Lysbuestrømmen er vist i blått. De karakteristiske skuldrene kan anes. Det kan også sees at lysbuen ikke har gjentent etter strømmens nullgjennomgang ved alle tilfeller. Det nederste bildet er en forstørrelse av det øverste bildet. På det øverste bildet vil gul dominans vise høy spenning over kontaktpunktet. Dette tolkes som at det ikke er kontakt mellom lederne. Ved blå dominans går det en strøm mellom lederne, og spenningen er betydelig redusert. Resistansen i kontaktpunktet er avgjørende for spenningsfallet over kontaktpunktet.

Antennelse ved glødende kontaktforbindelse



Figur 86 - Skjerm-bilde fra oscilloskopet som overvåket strøm- og spenningsforløpet. Dette bildet viser lysbuestrøm og lysbuespenning i det lysbuen antenner en prøve av PVC.

11 Diskusjon

11.1 Alle vern testet sammen

Alle de ulike seriefeilvernene ble testet på en dårlig kontaktforbindelse i en stikkontakt. Det oppstod en betydelig varmeutvikling. Ved ett tilfelle kunne det observeres en meget tydelig røykutvikling fra stikkontakten med feil. Under alle forsøkene var det mulig å kjenne lukten av smeltet plast. Da stikkontakten ble åpnet etter endt forsøk, var det tydelig at stikkontakten bar preg av smelting. Stikkontaktdekslet så uberørt ut av feilen, bare en svak brunfarge kunne skjelnes på innsiden av dekslet. Stikkontakten var laget av plasten polykarbonat [57]. Polykarbonat er en selvslukkende plast, med maksimal kontinuerlig brukstemperatur på 135 °C [58].

Ved flere av forsøkene målte termoelementene ved feilstedet på stikkontakten temperaturer over brukstemperaturen til polykarbonat; 135 °C. Polykarbonat er et plastmateriale som ved høye temperaturer ikke danner noen ekte smelte, men det kan likevel bli tilnærmet flytende. En omtrentlig verdi for temperaturen som gjør polykarbonat flytende er 240 °C [61]. Også lederisolasjonen var både smeltet og karbonisert. Isolasjonsmaterialet til lederne bestod av PVC, som har en smeltetemperatur på 180 °C [28]. Ingen av termoelementene eller temperatursensorene målte temperaturer over smeltetemperaturene til plastene. Sporene etter betydelig smelting og karbonisering i nærheten av metallforbindelsene ved feilstedet kan likevel tyde på temperaturer over 240 °C.

Tross sporene på metallet og plastmaterialene i nærheten av feilstedet, var temperaturene målt av termoelementene og temperatursensorene betydelig lavere. Temperaturen varierte også stort mellom målepunktene inne i veggboxen og elrøret. Mye av temperaturstigningen i elrøret skyldtes trolig at selve lederen ble oppvarmet som følge av den høye strømmen. Det gikk mer strøm gjennom lederne i selve vegg enn hva lederne var dimensjonert for. 1,5mm² kobberledere i termisk isolert vegg har en strømføringssevne på maksimalt 14,5A [62]. Strømmen som gikk gjennom lederne under forsøkene var mellom 15,8 og 17,4A. For å unngå temperaturøkningen på grunn av høy strømgjennomgang gjennom lederne, burde lederne vært byttet til 2,5mm². Maksimal strømføringssevne ville da vært 19,5A [62]. Grunnen til at dette anses som en god ide, er at en større andel av temperaturstigningen ved de ulike målepunktene da ville skyldtes den innførte seriefeilen. Likevel bør ikke dette ha noen betydning for resultatene som fremkommer ved testene av vernenes funksjonalitet.

Den store temperaturforskjellen mellom målepunktene under korttidsforsøkene viser tydelig at det kan oppstå en betydelig temperatur ved et feilsted, uten at omgivelsene få centimeter fra feilstedet opplever den samme temperaturøkningen. Dette forstås som en viktig faktor å ta hensyn til for de seriefeilvernene som baserer seg på å oppdage en forhøyet temperatur. Et seriefeilvern som baserer seg på å oppdage forhøyet temperatur som skyldes seriefeil, må være plassert nær nok feilen til at vernet oppdager en unormal høy temperatur. Problemet er at det kan være vanskelig å vite hvor en slik feil vil oppstå.

Ved alle tilfeller ble feilen oppdaget av ett eller flere av seriefeilvernene. I tilfellene der feilen utviklet seg over lengre tid, steg temperaturen betydelig i hele veggboxen. ETIM-vernene var da det første vernet som oppdaget feilen, og ga alarm i det temperaturen

Diskusjon

oversteget 51 °C. Ved de forsøkene som var av kortere varighet, rakk ikke temperaturen i hele veggboxen å stige nok til at ETIM-vernet oppdaget feilen før seriefeilvernet hadde laget jordfeil og strømmen ble brutt.

Forsøkene med kortere varighet skilte seg fra de lengre forsøkene ved at kablene på forhånd var oksidert av et forutgående forsøk. Kobberoksid, CuO og Cu₂O, har halvlederegenskaper, og fører til en temperaturøkning på grunn av økt motstand i kretsen [8, 14, 18, 63]. Den progressive feilen hvor temperaturen igjen øker som følge av økt motstand, er sannsynligvis årsaken til den hurtige temperaturøkningen. Med temperaturøkningen øker også mengden oksidert kobber. Dette gir en ytterligere økning av motstanden, og dermed også temperaturen.

I forsøkene av lengre varighet startet forsøket med helt nye ledere. Det antas likevel at det har vært en del kobberoksid tilstede i den dårlige kontaktforbindelsen, da koblingspunktet i stikkontakten ble degradert for hvert forsøk, uten at den noen gang ble byttet. Kobberoksidet i koblingspunktet på stikkontakten har trolig framskyndet oppvarmingsprosessen og den videre oksideringen av lederne.

Lysbuevernet detekterte ikke stabile lysbuer og brøt ikke strømmen under noen av forsøkene. Lysbuevernet beskyttet derfor ikke mot denne feilen. Det er mulig at lysbuevernet ville beskyttet mot denne feilen dersom feilen fikk videreutvikle seg. Det lot seg ikke gjøre å finne ut av dette, da det ville vært uforsvarlig å risikere å starte en brann i laboratoriet som ble benyttet. Det var bare i dette laboratoriet at det var tilgang på en tilstrekkelig stor motstand, slik at strømmer over 10A kunne testes over lengre tid.

I ettertid ble kablene og stikkontakten undersøkt av politioverbetjent Finn Rottem og spesialletterforsker Johnny P. Olsen ved KRIPOS, Kriminalteknisk avdeling, seksjon for brann og kjemi. Grunnen til at KRIPOS ble kontaktet, var at det var ønskelig å få en indikasjon på om det hadde vært lysbuer tilstede, uten at lysbuevernet hadde detektert lysbuene, eller om seriefeilen kun hadde vært varmgang og det dermed ikke kunne forventes noen operasjon av lysbuevernet. Undersøkelsene viste at ikke kunne finnes spor etter lysbuer, verken på stikkontakten eller på lederne. Tilliten til lysbuevernet ble ikke ødelagt av denne testen, da det aldri oppstod noen situasjon som lysbuevernet burde tolket som en skadelig lysbue.

Rottem informerte om at det ble funnet små "perler" på den ene av kordelene til den ene lederen. "Perlene" hadde blitt dannet som følge av "koking" av kobberet. Dette bekrefter mistanken om at det i kontaktpunktet hadde vært betydelig varmere enn temperaturen målt av termoelementene og temperatursensorene. Smeltetemperaturen til kobber er 1083 °C. Kobberoksidet Cu₂O smelter ved 1235 °C og CuO smelter ved 1326 °C [17, 19]. På grunn av perlene med smeltet kobber, er det mulig at temperaturen, akkurat i dette konsentrerte området, har vært i overkant av 1000 °C. Glødetemperaturen til kobber ligger i området 1200-1300 °C. Rottem mente klart at det ikke hadde vært gløding til stede i kontaktpunktet. Det er derfor mulig at temperaturen har vært akkurat høy nok til at en liten del av kobberet smeltet. Temperaturen målt av termoelementene og temperatursensorene var aldri ved de høyeste målte temperaturene over lengre tid. En sannsynlig mulighet er at smeltingen av kobberet ble stoppet på grunn av strømbrydd forårsaket av seriefeilvernet som skaper jordfeil.

Diskusjon

Temperaturverdien som ETIM-vernet ga alarm ved var 51 °C. ETIM-vernet var det første vernet som oppdaget feilen i langtidsforsøkene. I forsøkene av kortere varighet rakk ikke ETIM-vernet å oppdage feilen før strømmen ble brutt som følge av jordfeilen skapt av seriefeilvernet. 51 °C er lavere enn vanlig lederisolasjons kontinuerlige brukstemperatur; 70 °C [16]. Begrunnet i de store temperaturforskjellene målt inne i selve veggboxen, kan det likevel virke fornuftig med en temperaturgrense for alarm langt lavere enn antennestemperaturen til de fleste omkringliggende materialer. På grunn av at det tok en viss tid før temperaturen i veggboxen steg betydelig, kan en lav temperaturgrense være avgjørende for at plutselige seriefeil som oppstår og avgir mye varme blir oppdaget innen brannen bryter ut.

ETIM-vernet skal gi alarm også dersom temperaturen stiger mer enn 5 °C innen et minutt. Det ble aldri målt mer enn 1 °C økning i løpet av et minutt, selv ikke i tilfellet da temperaturen ved feilstedet steg fra 21 °C til 107,2 °C i løpet av 5 minutter. I løpet av denne tiden hadde temperaturen som temperatursensorene til ETIM-vernet målte steget fra 21 °C til 25 °C. Det er ikke kjent hvordan temperaturen i koblingsboxen ville utartet seg dersom seriefeilen fikk utvikle seg videre. Uten dette grunnlaget kan det vanskelig sies noe om hvorvidt en alarm ved fem graders stigning innen et minutt virker tilfredsstillende. Basert på de utførte testene kan det virke som at dette kravet for at alarm skal utløses ikke innfris før seriefeilen er så utviklet at det er en betydelig fare for brann.

Seriefeilvernet som skaper jordfeil dersom vernet blir utsatt for høye temperaturer førte til strømbrudd ved alle forsøk. Smeltelegemet benyttet i prototypen av vernet skulle tåle en brukstemperatur på 90 °C. Smeltelegemet var i kontakt med det ledende metallet i stikkontakten. Det er sannsynlig at smeltelegemet var blitt utsatt for temperaturer godt over 100 °C da det smeltet. Begrunnelsen for denne påstanden er at smeltetemperaturen til smeltelegemet sannsynligvis er en del høyere enn brukstemperaturen. I tillegg målte termoelementet på utsiden av plastdekselet like ved feilstedet temperaturer over hundre grader Celsius. Termoelementet var i metallisk kontakt med seriefeilen, og det forventes at metallet ledet varmen fra feilstedet i større grad enn plastmaterialet. Det påpekes igjen at dette seriefeilvernet bare er en prototyp, og det er kun selve deteksjonsprinsippet som testes i forsøkene. Såfremt seriefeilvernet plasseres i nærheten av feilstedet, beskytter dette seriefeilvernet mot seriefeilen.

Det ble forsøkt å utvikle tester som involverte lysbuer, slik at seriefeilvernet som skaper kunstig jordfeil kunne testes mot også denne seriefeilen. Det viste seg å være vanskelig å få til testene på en fornuftig måte innen den begrensede tiden til rådighet. Dette er noe som i fremtiden bør testes for å kartlegge hvordan seriefeilvernet beskytter mot lysbuer. Å finne svar på dette er viktig i vurderingen av hvilket deteksjonsprinsipp som vil gi den beste beskyttelsen mot seriefeil.

11.2 Verifikasjon av korrekt operasjon av lysbuevern

Denne testen ble utført på grunn av at lysbuevernet aldri detekterte lysbue da alle vernene ble testet sammen. Det var uklart hvorvidt det hadde vært en lysbue tilstede, som vernet ikke hadde vært i stand til å detektere. Eksempelvis dersom lysbuen ikke hadde vært stabil nok. For å finne ut av om vernet var i stand til å oppdage en lysbue i

kretsen med en dårlig kontaktforbindelse, ble lysbuegeneratoren satt inn i kretsen like etter stikkkontakten med den dårlige kontakten.

Tre av lysbuevernene brøt strømmen i alle tilfeller da en lysbue ble introdusert i kretsen. For to av vernene var resultatet av antallet lysbuedeteksjoner i kretsen nedslående; bare i tre av femten tilfeller klarte hvert av de to vernene å detektere lysbue. Innenfor strømnivåene som er satt som krav i lysbuestandard og merkestrømmen til lysbuevernet, klarte det ene lysbuevernet å detektere bare to tilfeller med lysbue.

Konsekvensen av at to av vernene ikke klarte å detektere mer enn 20 % av lysbuene de ble utsatt for, er mistillit til lysbuevernene. De tre lysbuevernene som detekterte 100 % av lysbuene de ble utsatt for, viser på den andre siden potensialet til lysbuevern. Det er mulig at det finnes aspekter ved testen som ble utført, som gjør at de skapte lysbuene ikke etterlikner en reell situasjon, og at lysbuevernene ikke er ment å detektere denne type lysbue. Likevel ansees det som usannsynlig, da lysbuene ble skapt ved en metode som lysbuestandard krever deteksjon ved. Kretsen er annerledes enn kretsen beskrevet i lysbuestandard, men lysbuene er skapt på eksakt samme måte.

11.3 Dårlig kontaktforbindelse

Den samme testen som ble utført på lysbuevernet i den forberedende prosjektoppgaven, ble gjentatt med et større antall vern. I prosjektoppgaven detekterte ikke lysbuevernet lysbuene i den grad det var forventet. Hvorfor dette ikke skjedde var uklart. En mulighet var at det var en svakhet med akkurat dette vernet. Resultatene fra testene med flere vern, også fra andre produsenter, avkrefter dette som en mulig forklaring. Alle vernene, uavhengig av produsent, oppførte seg på samme måte.

Hendelsesforløpet gjentok seg fra den forberedende prosjektoppgaven, og er vist i Figur 61. Det oppstod gnister mellom lederne. Denne gnistringen ble ikke detektert som skadelige lysbuer av lysbuevernene. Ikke før gnistringen utviklet seg til et mer konsentrert sted i kontaktpunktet og gnistringen ble kraftigere og hyppigere, kunne lysbuevernene detektere lysbuer. Gnistene kunne ved dette tilfellet karakteriseres som lysbuer, da lysbuene hadde en viss varighet [9]. I det gnistene gikk over til å være lysbuer, var det mulig å gjenkjenne de karakteristiske skuldrene til lysbuestrømmen.

Dersom lysbuevernet ikke brøt strømmen på grunn av lysbuene, kunne lysbuene slukke og i stedet danne en glødende kontaktforbindelse. Glødende kontaktforbindelse er en seriefeil som lysbuevern ikke kan beskytte mot. Ikke før kontakten mellom lederne ble brutt, ofte som følge av at kobberet smeltet, oppstod det på ny lysbuer som kunne detekteres av lysbuevernet. En slik situasjon førte ikke alltid til deteksjon av lysbue, lysbuene kunne slukke som følge av at avstanden mellom lederne var blitt for stor til at nye lysbuer kunne gjenntennes. Hvorfor lysbuevernene ikke detekterte kraftige lysbuer som brant i flere titalls sekunder var ikke klart.

I kontakt med noen av produsentene av lysbuevern ble det gitt en mulig forklaring på hvorfor lysbuevernene ofte ikke detekterte lysbuene som ble skapt ved vibrasjoner. Det ble forklart at den type lysbue som ble skapt, er den samme type lysbue som kan oppstå i en normalsituasjon, eksempelvis i brytere. Konsekvensen av det er at lysbuen som blir skapt er en type lysbue som lysbuevernet ikke er ment å detektere.

Diskusjon

En av produsentene av lysbuevern forklarer i en mail, 23. mars 2015, at lysbuene skapt ved vibrasjoner etterlikner lysbuer som oppstår når kontakt mellom ledende materialer brytes. Dette er tilfellet i brytere. Dersom denne type lysbue gjentas hver syklus, vil omgivelsene varmes opp og karboniseres. Forholdene ligger da til rette for at en brann kan bryte ut. Produsenten av det ene vernet forklarer i den samme mailen at det er denne situasjonen med gjentakende lysbuer som lysbuegeneratoren prøver å etterlikne.

Vibrasjonene tilført kontaktpunktet i denne testen skapte en lysbue mellom lederne hver gang kontakten mellom lederne ble brutt. Denne type lysbue vil ikke være i stand til å antenne omkringliggende materialer, i følge en av produsentene. For at antenne av omkringliggende materiale, som følge av en serielysbue, skal forekomme, må det omkringliggende materialet først bli karbonisert. Når materialet har karbonisert i tilstrekkelig grad kan det oppstå en lysbue gjennom det karboniserte materialet, som antenner som følge av lysbuen. Lysbuevern er laget for å detektere denne type lysbuer.

Dette kan forklare hvorfor lysbuevernene av og til detekterte lysbuene laget i testen. Det ble poengtert under presentasjonen av resultatene i kapittel 9.4.1 at de kraftigste lysbuene ofte ble detektert av lysbuevernene. Da de kraftigste lysbuene oppstod var lederne og lederisolasjonen allerede blitt betydelig karbonisert. De kraftige lysbuene akselererte også oksideringen av lederne og karboniseringen av lederisolasjonen.

Lysbuevernene krever flere påfølgende sykluser med typiske forstyrrelser fra lysbuer for at situasjonen skal bli oppfattet som en skadelig lysbue, og ikke én ufarlig gnist som oppstår i det en bryter åpnes [4]. Vibrasjonene tilført kontaktpunktet skapte lysbuer. Det var trolig meget tilfeldig hvor stabile lysbuene var. Dersom lysbuene ikke gjentente for hver nullgjennomgang og dannet en ny lysbue, kan dette være blant årsakene til at lysbuevernet ikke detekterte lysbuene. Av og til kunne kanskje vibreringen føre til tilstrekkelig stabile lysbuer, slik at situasjonen ble oppfattet som skadelig, og strømmen dermed brutt.

Figur 59 viser strøm og spenningsforløpet i et tilfelle der lysbuevernet ikke oppdaget lysbuene som oppstod. Det kan sees av denne strømkurven at lysbuene ikke hadde resultert i de karakteristiske skuldrene for lysbuer ved hver syklus. Strømkurven hadde et par tilsynelatende sinusformede strømsykluser mellom 1-3 påfølgende nullgjennomganger av strømmen der kurven viste de karakteristiske skuldrene som kjennetegner lysbuestrøm. Figuren viser også et lite spenningsfall over kontaktpunktet mellom hver eneste syklus.

I vedlegg V2 viser Figur 100 og Figur 101 et tilfelle der det først oppstod lysbuer som lysbuevernet ikke brøt strømmen ved. Like etter oppstod det nye lysbuer som lysbuevernet brøt strømmen ved. Figur 100 viser strøm og spenning like før lysbue ble detektert. Skuldrene ved strømmens nullgjennomgang kan observeres ved hver eneste strømsyklus. Lysbuene som lysbuevernet ikke detekterte er vist i Figur 101. Denne figuren viser tydelig at det mellom sykluser med de karakteristiske skuldrene til lysbuestrømmer fantes tilnærmet sinusformede strømsykluser. Det var ikke noe betydelig spenningsfall over kontaktpunktet foruten ved de syklusene som resulterte i strømskuldre ved strømmens nullgjennomgang. Dette impliserer at lysbuene som ble observert ved dette tidspunktet ikke var stabile lysbuer. Figurene, som viser tilfeller

Diskusjon

som ofte gjentok seg, støtter opp om forklaringen at stabiliteten til lysbuene har vært blant de avgjørende faktorene for hvorvidt lysbuene lot seg detektere.

På grunn av denne testens tilfeldige egenskaper, er ikke dette en test som vil gi et godt bilde av lysbuevernens funksjonalitet. Dens reproduserbarhet i like strøm- og spenningsforløp er ikke tilfredsstillende. Testen bør derfor ikke benyttes for å vurdere beskyttelseevnen til lysbuevern.

Hvorvidt feilsituasjonen som skapes ved denne testen er reell, er foreløpig uklart. I svært få situasjoner i en vanlig boliginstallasjon kan det forventes vibrasjoner av en slik art. Det kan tenkes at det kan oppstå en del vibrasjoner av betydelighet i nærheten av høyttalere. I industri er det mer aktuelt å tenke at vesentlige vibrasjoner kan oppstå. Lysbuer som oppstår i et kontaktpunkt utsatt for vibrasjoner vil kunne oppføre seg mer tilfeldig. Dermed er det lavere sannsynlighet for at lysbuevernet skal kunne oppdage en slik lysbue.

11.4 Lysbuegenerator

Dersom resultatene fra vernet som utmerket seg som spesielt dårlig fjernes fra resten av resultatene, detekterte lysbuevernene lysbuer i 81 % av tilfellene der den testede strømverdien var innenfor kravene. Grunnen til at det er ønskelig å fjerne resultatene fra dette ene vernet, er at andre vern fra samme leverandør ga langt bedre resultater. Det mistenkes derfor at det er en svakhet med akkurat dette lysbuevernet.

At lysbuevernet detekterte lysbuer i 81 % av tilfellene innenfor kravene gitt i lysbuestandarden, kan ikke regnes som tilfredsstillende. Grunnen til det er at dette er en test fra lysbuestandarden, som krever 100 % deteksjon av lysbuer. Lysbuestandarden beskriver en testmetode som skal gi tilnærmet identiske lysbuestrømmer og spenninger ved samtlige tester. Testene beskrevet i lysbuestandarden skal ikke være tester der tilfeldigheter rår over når lysbuer oppstår, og hvor stabile lysbuene er. Dette er tilfellet med testene der lysbuer ble skapt ved vibrasjon.

Det betyr at lysbuer som lages med lysbuegeneratoren skal lage lysbuestrømmer av en slik art at de detekteres av lysbuevernene. I en slik konstruert situasjon bør det ikke være rom for en så stor andel manglende deteksjon av lysbuer; hele 19 %. Blant testene som ikke ga resultater som tilfredstilte standarden, var det én hendelse som gjentok seg i seks av syv tilfeller. Lysbuevernet detekterte aldri noen lysbue, og lysbuene fikk brenne kontinuerlig frem til lysbuen enten slukket av seg selv på grunn av for lang avstand mellom kobber- og karbonstiften, eller på grunn av at strømmen ble brutt med hensikt på grunn av mye røykutvikling. Bare ved ett tilfelle ble lysbuen detektert med for lang deteksjonstid.

Hvorfor lysbuevernene ikke klarte å detektere lysbuene som ble laget med lysbuegeneratoren ved enkelte forsøk er ikke klart. En mulighet er at det finnes en feilkilde et sted i testoppsettet. Lysbuegeneratoren er en enkel innretning, og lysbuestandarden beskriver hvordan denne innretningen skal lages. Karbonstiften som ble benyttet er den samme karbonstiften som Siemens benytter ved egne tester. Testoppsettet består kun av en motstand i tillegg til lysbuegeneratoren, og kretsen er beskyttet av lysbuevern. På grunn av det enkle testoppsettet vurderes sannsynligheten for at det finnes en feilkilde i testoppsettet som liten.

Diskusjon

Resultatene viser tydelig at dersom lysbuevernene detekterer lysbuer, gjør de det mest sannsynlig innenfor den maksimale brytetiden satt av lysbuestandarden. I de tilfellene de ikke umiddelbart detekterer lysbuene, blir lysbuene stående å brenne over lengre tid. Figur 65 viser strømforløpet ved et tilfelle der lysbuene ikke ble detektert av lysbuevernet. Uten lysbuer i kretsen var strømmen 6,3A. I det lysbuer ble innført i kretsen, ble strømnivået redusert. Av figuren kan det sees at det er stor forskjell mellom hvor store skuldrene som skapes av lysbuestrømmen er for hver nullgjennomgang. I figuren er den delen av strømforløpet med de største strømskuldrene forstørret. Det er likevel mulig å se antydninger til strømskuldre ved nesten hver strømsyklus i det lille bildet over det forstørrede i Figur 65. Dermed slås det fast at lysbuene er tilstrekkelig stabile til at lysbuevernet burde oppdaget lysbuene.

En forklaring på hvorfor lysbuevernet ikke detekterte en så stor andel av lysbuene skapt, kan være at lysbuene tilfredsstillter kriterier for at lysbuene skal bli oppfattet som en ufarlig normalsituasjon. Bare Siemens har delt litt informasjon om hvordan lysbuevernene detekterer lysbuer og skiller ufarlige normalsituasjoner fra skadelige lysbuer. Lysbuevernet til Siemens analyserer strømmen i frekvensområdet 22-24MHz, da dette ser ut til å være et frekvensområde med spesielt lite bakgrunnsstøy. Lysbuer gir høyfrekvent bredbåndsstøy, og dermed vil det kunne finnes spor etter lysbuer i dette frekvensområdet. [4]

Ett av kravene som må tilfredsstilles er at energien til lysbuen er av en viss størrelse. Dersom energien til lysbuen i frekvensområdet 22-24MHz ikke er stabil nok, vil situasjonen bli oppfattet som en ufarlig normalsituasjon, og lysbuevernet bryter dermed aldri strømmen i kretsen [4]. Dette kan være en forklaring på hvorfor lysbuevernene ikke brøt strømmen ved de stabile lysbuene som ble skapt. Det ble aldri målt, da det ikke var måleutstyr tilgjengelig som kunne måle høyfrekvente strømsignaler. Forklaringen gjelder Siemensvernet, og de andre leverandørene av lysbuevern må ha liknende kriterier for ønskede utkoblinger dersom forklaringen stemmer.

Siemens sine lysbuevern ble mottatt lenge før lysbuevernene fra noen av de andre leverandørene ble mottatt. Det ble derfor utført tester med bare lysbuevernene fra Siemens for å kartlegge forventet deteksjonstid ved 5A og ved 7A. Tre lysbuevern ble testet, og resultatene fra testene er presentert hver for seg. På den måten ble det mulig å se hvorvidt det var forskjeller på de ulike vernene også. Figur 67 viser at vernene hadde meget lik forventet deteksjonstid for alle tre lysbuevernene som ble testet. I Figur 68 kan det anes litt større sprik i forventet deteksjonstid. Den forventede deteksjonstiden var for begge strømnivåene langt lavere enn hva lysbuestandarden har satt som maksimal brytetid.

Resultatet av testene ga ikke én eneste deteksjon av lysbuer over maksimal brytetid. Det var heller ikke ett eneste tilfelle av lysbuer som ikke ble detektert. Under testene var det utført mellom 41 og 49 målinger for hvert enkelt lysbuevern ved hvert av de to strømnivåene. Resultatene av testene tilfredsstillter dermed lysbuestandarden fullt og helt. I forkant av testene ble det utført en del introduksjonstester, for å bli kjent med utstyret. I forbindelse med de forberedende testene var det flere tilfeller av manglende deteksjoner. Data fra introduksjonstestene ble ikke tatt vare på. Hvorfor lysbuevernene ikke detekterte alle lysbuer i de forberedende forsøkene og 100 % av lysbuene i de virkelige testene, er uklart. Testoppsettet var likt som testoppsettet der lysbuevern fra

flere ulike leverandører ble testet. Det antas derfor at forklaringen på hvorfor lysbuevernet av og til ikke detekterte lysbuer er den samme for de to testene.

Det må poengteres at lysbuevern fra samtlige produsenter bidro til statistikken over manglende deteksjoner av lysbuer.

11.5 Karboniserte kabelprøver

Resultatene fra testene der lysbuer ble skapt gjennom en karbonisert vei mellom to kabler, var tilfredsstillende for alle lysbuevern som ble testet. Alle tester innenfor lysbuestandardens krav resulterte i deteksjon innenfor den maksimale brytetiden bestemt i lysbuestandarden. Figur 69 viser de målte brytetidene for alle lysbuevernene. Lysbuestandarden krever deteksjon av lysbuer innenfor den maksimale brytetiden i 100 % av testene.

Figuren viser også tilfeller der lysbuevernene aldri brøt strømmen. De tilfellene er imidlertid utenfor lysbuestandardens krav. Hendelsene som gjentok seg, kan minne om hendelsene som ble observert da lysbuer ble skapt med vibrasjoner. Forskjellen var at det denne gangen var antennebart materiale i nærheten av lysbuene. Lysbuer gikk fra å være mindre lysbuer til å bli glødende kontaktforbindelser. Hver gang det oppstod en glødende kontaktforbindelse, resulterte glødingen etter en tid i lysbuer. Lysbuene antente kabelisolasjonen. Dette ble ved flere tilfeller filmet, og det var mulig å se lysbuene i forkant av antennelsen av kabelisolasjonen. Det hendte også at lysbuene direkte antente kabelisolasjonen.

Aldri ble det observert antennelse av kabelisolasjonen kun som følge av glødende kontaktforbindelse. Hvorvidt det faktisk er mulig at kabelisolasjon eller andre omkringliggende materialer antenner som følge av glødende kontaktforbindelse er foreløpig ukjent. Resultatene av testene peker i retning av at lysbuer er involvert i en stor andel av antennelsene som forekommer på grunn av seriefeil. Det må likevel nevnes at testen er en konstruert situasjon. Situasjonen skal være svært lik mellom forsøkene, og tilfeldigheter skal i stor grad være unngått. Det betyr at selv om denne situasjonen resulterer i lysbuer før antennelse hver gang, er resultatene fra testene ikke tilstrekkelig til å bygge en konklusjon på om hvorvidt det må være en lysbue tilstede for at omkringliggende materialer skal antenne.

Dersom det faktisk er reelt at lysbuer er involvert i alle, eller i en overveiende andel antennelser på grunn av seriefeil, vil lysbuevern muligens kunne tilføre en betydelig beskyttelse mot seriefeil. Hvis det er slik at varmgang og glødende kontaktforbindelser resulterer i lysbuer før en antennelse finner sted, bør lysbuene være av en slik art at lysbuevernet oppdager feilen. I testene antente kabelisolasjonen som følge av lysbuene. Det betyr at antennelse av omkringliggende materialer trolig kan skje innen lysbuevernet rekker å bryte strømmen. Omkringliggende materialer er ofte isolerende plastmaterialer. De isolerende plastmaterialene har selvslukkende stoffer i seg, og et strømbrydd skal fjerne tilført energi, slik at flammene slukker av seg selv. Da strømmen ble fjernet fra kretsen under testene, slukket kabelisolasjonen.

Kabelisolasjonen som hadde antent, slukket i alle tilfeller da strømmen i kretsen ble brutt. Dersom kabelprøvene på nytt ble tilført strøm, startet ofte nye lysbuer å brenne. Gløding forekom også. Dersom det i en boliginstallasjon oppstår lysbuer som får

Diskusjon

lysbuevernet til å bryte strømmen i kretsen, og feilstedet ikke blir lokalisert, viser resultatet av testene at feilen har stor sannsynlighet for å vedvare. Omkringliggende materialer har sannsynligvis blitt enda mer karbonisert og degradert, og vil muligens kunne antenne lettere under påkjenningene fra seriefeilen.

I det en lysbue oppstår, reduseres strømmen i kretsen. Det ble utført målinger av strømmen i kretsen før og etter lysbuer ble innført. Resultatet av målingene viste at nesten alle målingene ga en strømreduksjon mellom 20-39 %. I 62 % av målingene var strømreduksjonen innenfor intervallet 20-29 %. Dersom strømmen blir redusert med 20 %, vil en strøm på mindre enn 3,125A resultere i en lysbuestrøm som er lavere enn strømmen som lysbuestandarden krever deteksjon ved; mindre enn 2,5A. En strøm i kretsen på 3,125A tilsvarer en effekt på 718,75W. En rekke husholdningsapparater opererer med effekter omkring denne verdien, og det er reelt at en kurs kan være belastet slik at effekter ligger i området omkring 700W. Dersom en lysbue da oppstår, er det stor sannsynlighet for at lysbuestrømmen er av en så lav verdi, at det ikke kreves deteksjon av lysbuen.

Lysbuestandarden tar hensyn til strømreduksjonen ved å redusere spenningen i kretsen med 50V. Dette skal kompensere for strømreduksjonen i det en lysbue oppstår. Kompenseringen tilsvarer en forventet strømreduksjon på 22 %. Det faktum at 90 % av målingene hadde en strømreduksjon i intervallet 20-39 %, indikerer at kompenseringen gir et realistisk bilde av forventet lysbuestrøm, med en sikkerhetsmargin.

11.6 Ønskede og uønskede utkoblinger ved beskyttelse av husholdningsapparater

Lysbuevernene gjorde aldri noen feildeteksjoner av lysbuer da de ble testet med ulike kjøkkenapparater. En svært liten sannsynlighet for feildeteksjoner er et kriterium som bør innfris dersom lysbuevern i fremtiden skal bli et krav i boliginstallasjoner. I et telefonmøte med sjefingeniør Jostein Ween Grav ved DSBs avdeling Elektriske anlegg, 7. februar 2015, uttrykker han klart at feildeteksjoner som fører til at forbrukerne får mistillit til produktet er meget uheldig. Dette vil skape en ekstra terskel for å få lysbuevern til å være en del av boliginstallasjonen. Grav påpeker at teknologien bak lysbuevern sannsynligvis vil forbedres betydelig de kommende årene, og at en større andel skadelige lysbuer dermed vil bli oppdaget. Av den grunn sees uønskede deteksjoner på som det viktigste problemet å løse i første omgang.

Da lysbuer ble innført i den samme kretsen som ble benyttet for å teste uønskede utkoblinger av strømmen, var det ønskelig at lysbuevernet skulle oppdage lysbuer ved alle tilfeller. Resultatet av testene var stikk i strid mot de ønskede resultatene; det forekom ikke ett eneste tilfelle med deteksjon av lysbuene som ble skapt. Resultatene var ikke forventet, og det er ikke klart hvorfor lysbuevernene ikke oppdaget lysbuene som ble skapt.

Da alle laster var koblet inn og lysbuer ble skapt med lysbuegeneratoren, kunne de karakteristiske skuldrene til lysbuestrømmen anes. Figur 73 viser et slikt tilfelle. Ved nesten hver eneste strømsyklus var det mulig å se antydninger til lysbuens strømskuldre. Lysbuegeneratoren var stilt i en posisjon som tillot meget stabile lysbuer å brenne. Kravet som ikke ble innfridd i testen med lysbuer skapt med vibrasjon, er

Diskusjon

dermed innfridd i denne testen; lysbuene må være stabile lysbuer for at de skal bli oppfattet som skadelige av lysbuevernene.

Da det ble eksperimentert litt med utkobling av de ulike lastene for å finne ut av om det var noen av lastene som ødela for lysbuevernernes deteksjonsevne førte heller ikke dette frem til noen lysbuedeteksjon. I tilfellet der støvsugeren ble fjernet fra kretsen ble strømkurven betydelig mer sinusformet. Dette tilfellet er vist i Figur 74. Da dette skjermbildet ble tatt, var lysbuegeneratoren stilt i en posisjon med kontinuerlig gjentennende lysbuer. På skjermbildet er det ikke mulig å se noen tydelige spor etter lysbuene som ble skapt. Hvorfor det ikke kan sees spor etter lysbuestrømmen i dette tilfellet er ikke kjent. Forskjellen i strømkurvene med og uten lysbuer i en identisk krets kunne tydelig sees i Figur 72 og i Figur 73.

Da støvsugeren ble satt inn i kretsen igjen, og lysbuegenerator og vifteovn ble fjernet fra kretsen, kunne strømkurvene tydelig minne om lysbuestrømmens nullgjennomgang. Selv om det har vært skapt stabile lysbuer under lysbueforsøk, har lysbuer ikke ved noen forsøk gitt tilnærmet identiske strømkurver for hver syklus. Dette er tilfellet med strømforløpet i kretsen uten vifteovn og lysbuegenerator; strømkurvene er tilnærmet identiske for hver strømsyklus. Det er ikke kjent hvorvidt lysbuevernene benytter dette som en måte å skille skadelige lysbuer fra ufarlige normalsituasjoner på.

I strøm og spenningsforløpene da vifteovnen atter ble en del av kretsen, vist i Figur 76 og i Figur 77, kunne det ikke observeres noen klare ulikheter mellom kurvene. Det var ikke mulig å se av strømkurven i Figur 77 at det var lysbuer tilstede. Den eneste forskjellen som ble lagt merke til ved de to tilfellene, var at strømmen i kretsen ble litt redusert. Denne strømreduksjonen var alltid i størrelsesorden et par mA ved alle tester som ble utført der de samme apparatene ble testet med og uten lysbuer. At strømmen i kretsen ble redusert da det ble laget lysbuer var forventet, da lysbuer innfører en ekstra impedans i kretsen[9].

Lysbuevernene detekterte ingen lysbuer da det ble laget lysbuer. Av den grunn kan det tenkes at det har vært noe med testoppsettet som gjorde det umulig for lysbuevernene å gjøre deteksjoner av lysbuer. Hva dette "noe" er, er ukjent, men det bør vurderes hvorvidt det kan være en feilkilde et sted i testoppsettet. Testoppsettet er svært enkelt, og det er foreløpig ikke funnet noe som kan forklare de manglende deteksjonene. På grunn av denne usikkerheten kan det ikke antas at testene med uønskede utkoblinger gir et riktig bilde av lysbuevernernes evne til å skille ufarlige normalsituasjoner fra skadelige lysbuer.

Siemens er den eneste produsenten som foreløpig har lysbuevern på markedet. Dette er den eneste produsenten som har delt litt informasjon om hvordan lysbuevernet oppdager lysbuer og skiller skadelige lysbuer fra andre normalsituasjoner. Lysbuevernet gjør deteksjoner av lysbuer basert på høyfrekvent bredbåndsstøy som skapes av lysbuene. Høyfrekvent bredbåndsstøy må skapes ved et ukjent antall etterfølgende strømsykluser for at feilen skal integreres opp til en grenseverdi som gir lysbuedeteksjon. Dette er forklart nærmere i kapittel 6.3, Lysbuedeteksjon Siemens. [4]

Dersom det skapes støy fra apparatene, er denne støyen trolig ikke bredbåndsstøy i frekvensområdet som lysbuevernet analyserer. Denne påstanden baseres på det faktum

Diskusjon

at lysbuevernet aldri gjorde noen feildeteksjoner da lysbuevernet ble testet med en rekke vanlige husholdningsapparater.

Siemens gir et eksempel på hvordan en transformator, som transformerer spenning fra 230V til 12V, gir strømmer som minner om lysbuestrømmer[4]. Det kan se ut til at grunnen til at dette ikke blir detektert som en skadelig situasjon er at RSSI-verdien, "Received Signal Strength Indication", er for lav til at den kommer over grenseverdien for at situasjonen skal bli oppfattet som en lysbue. I tillegg er strømkurven kontinuerlig ved strømmens nullgjennomgang. Det oppstår derfor aldri en plutselig økning i strømværdien, og den deriverte av strømmen når aldri grenseverdien for at situasjonen blir oppfattet som en lysbue. En mulig forklaring på hvorfor lysbuene ikke ble detektert, kan være at de høyfrekvente strømsignalene var for svake til at de ble detektert som lysbuer.

Lysbuevernet skiller også mellom bakgrunnsstøy og høyfrekvente strømmer skapt av lysbuer. Figur 33 viser hvilke erfaringer Siemens har gjort seg med tanke på bakgrunnsstøy og signaler fra lysbuer. Det har vist seg å være vesentlig mindre bakgrunnsstøy ved frekvenser over 18MHz. Av den grunn blir høyfrekvente strømsignaler mellom 22MHz og 24MHz brukt som deteksjonskriterium for lysbuer. Det er innenfor dette frekvensintervallet at RSSI-verdien blir målt. Dersom signaler som er utypiske for lysbuer oppstår, nullstilles feilintegratoren med det samme. Et eksempel på et signal utypisk for lysbuer, er forstyrrelser på signalkurven til RSSI-signalet.[4]

Det kan tenkes at noen av apparatene som ble testet gir strømsignaler med forstyrrende elementer som er utypiske for lysbuer innenfor dette frekvensintervallet. En børstemotor er en last som kan gi forstyrrelser på signalene innenfor frekvensintervaller 22-24MHz[4, 59]. Blant de testede apparatene hadde både drillen, stavmikseren og håndmikseren børstemotor. Det er derfor en mulighet at lysbuer aldri ble oppdaget på grunn av at feilintegratoren ble nullstilt som følge av signalene fra apparatene med børstemotor.

Testene som skulle teste vernet for feildeteksjoner er langt fra tilstrekkelige til å gi en konklusjon på lysbuevernetenes evne til ikke å gjøre lysbuedeteksjoner. Grunnen til det er blant annet at for få ulike apparater ble testet. Det burde også testes apparater av samme type, men av ulike produsenter. Testene bør da bestå av både gamle og nye produkter. Det ble også utført for få tester per lysbuevern til at resultatene kan regnes som pålitelige.

11.7 Antennelse ved glødende kontaktforbindelse

Hensikten med dette forsøket var å finne ut av om det er mulig å antenne kabelisolasjon med glødende kontaktforbindelse, uten at en lysbue er tilstede i det isolasjonen antenner. Martel hadde allerede gjort forsøk som innebar å forsøke å antenne isolasjonsmaterialer med glødende kontaktforbindelser. Ved alle tilfeller der antennelse forekom, var en lysbue involvert [12]. Martel gjorde imidlertid forsøk kun med nye isolasjonsmaterialer.

En glødende kontaktforbindelse er gjerne en seriefeil som utvikler seg over lengre tid. Feilstedet og feilstedets nære omgivelser vil da være utsatt for varmpåkjenninger i løpet av denne tiden. Konsekvensen er degradert isolasjon. Kabelisolasjon utsatt for

Diskusjon

varme avgir gasser. Blant de første gassene som avgis er hydrogenkloridgass, som er en flammehemmende gass. Tanken bak forsøkene var å gjenta de samme testene som Martel gjorde, bare denne gangen med isolasjonsmaterialer som var degradert på forhånd. Forhåpentligvis ville mindre flammehemmende gasser avgis, og de antennbare materialene kunne da muligens lettere antenne. Fordi isolasjonsmaterialer i en vanlig boliginstallasjon ofte kan være utsatt for ulike påkjenninger, ble dette regnet å være en passende måte å etterlikne situasjoner som kan oppstå i en vanlig installasjon på, innenfor et kortere tidsrom.

I tråd med resultatene som fremkom i artikkelen skrevet av Sletbak m.fl., gnistet det i kontaktpunktet mellom lederne før en glødende kontaktforbindelse oppstod [19]. Gnister og lysbuer førte til oksidasjon av lederne. Etter en periode med gnister og eventuelle lysbuer, kunne glødende kontaktforbindelse oppstå i form av en oksidbro mellom lederne med et glødende filament som en del av denne oksidbroen. Det glødende filamentet kunne slukke, eller oksidbroen ble brutt og det oppstod lysbuer mellom lederne. Kontaktpunktet vekslet mellom å være preget av lysbuer og glødende kontaktforbindelser. Dersom oksidlaget ble for tykt, ble det vanskelig å lage gløding mellom lederne. Kraftige lysbuer ble desto enklere å lage. Dette hendelsesforløpet minner mye om hendelsesforløpet som ble kartlagt under testene der lysbuer ble skapt med vibrasjon. Forskjellen er at det i denne testen ikke var noe lysbuevern tilstede som kunne bryte strømmen ved deteksjon av lysbuer.

Lysbuestrømmen i Figur 81 viser hvordan strøm og spenning oppførte seg da det ble laget lysbuer mellom kobberlederne. Figuren viser hvordan strømmen slukket ved nullgjennomgang. I de tilfellene lysbuen gjentente etter nullgjennomgang, gjentente lysbuen som følge av at spenningen ble tilstrekkelig høy.

Figur 82 viser strøm og spenningsforløpet da forbindelsen mellom lederne var en kobberoksidbro med glødende filament. Ved strømmens nullgjennomgang kan det tydelig observeres en spiss i spenningsforløpet. Dette er karakteristisk for spenningsforløpet ved glødende kontaktforbindelser. Figur 9 viser sammenhengen mellom den dynamiske resistansen, strømmen og spenningen ved en glødende kontaktforbindelse. Det målte forløpet bærer preg av nøyaktig det samme prinsippet som er vist i Figur 9.

Resultatet av forsøkene var at ingen av de testede materialene lot seg antenne av glødende kontaktforbindelse. Hver gang et materiale antente, oppstod det en lysbue i forbindelse med antennelsen. Selv ikke en skrivepapirbit lot seg antenne av glødende kontaktforbindelse. Dette er i tråd med erfaringene som Martel gjorde seg [12].

Hvorfor plastmaterialene og papirbiten ikke lot seg antenne ved glødende kontaktforbindelse er vanskelig å forstå. Under besøket i Tyskland, 21. april 2015, forsøkte Martel å gi en mulig forklaring på hvorfor det er så vanskelig å antenne ved glødende kontaktforbindelse. Da isolasjonsmaterialet ble plassert inntil det varme kontaktpunktet, begynte isolasjonsmaterialet å avgi gasser, blant annet den flammehemmende gassen HCl. Denne gassen blandet seg med andre antennelige gasser som også ble avgitt på grunn av temperaturen materialet ble utsatt for. Dette førte til at tettheten til de antennelige materialene ble for lav til at antennelse kunne finne sted.

Diskusjon

For at en antennelse og en videre forbrenning skal kunne forekomme, kreves det både oksygen, varme og brensel[33]. I dette tilfellet var det både oksygen og varme tilstede. Den begrensende faktoren var brensel. Ved en stabil gløding er effekten som avgis per tid for lav til at tilstrekkelig av de brennbare gassene avgis og blander seg med oksygen, slik at de brennbare stoffene kan antennes.

Til tross for at det ble forsøkt å redusere mengden flammehemmende gasser ved å på forhånd degradere materialet, var det ikke mulig å antenne isolasjonen ved glødende kontaktforbindelse. Ved alle tilfeller av antennelse, oppstod det en lysbue i forkant. Grunnen til at materialene antente da en lysbue oppstod, var den høye effekten avgitt per tid.

Ikke alle materialene lot seg antenne ved lysbuer. Prøven med isolasjonsmateriale som var mest preget av varmen den var blitt utsatt for under degraderingen lot seg ikke antenne. Dette var en prøve med isolasjonsmateriale som skulle tåle en kontinuerlig brukstemperatur på 70 °C. Trolig lot ikke denne kabelprøven seg antenne på grunn av at store deler av de antennelige stoffene var avgitt under degraderingen. Stoffene som var igjen i kabelprøven var sannsynligvis karbon og fyllstoffer som ikke lar seg antenne. Dette er også den mest nærliggende forklaringen på hvorfor isolasjonen til en XXX-leder ikke antente. Denne isolasjonen var sort, og det var derfor vanskelig å se hvor karbonisert denne isolasjonen var i forhold til de andre isolasjonsmaterialene som ble testet.

Testene som ble utført var av kortere varighet, og varmen som ble utviklet ble avgitt i rommet. I en installasjon vil en seriefeil gjerne kunne varme opp temperaturen i en koblingsboks. En forhøyet omgivelsestemperatur vil muligens kunne føre til at omkringliggende materialer antenner lettere. Det vil derfor være interessant med forsøk med glødende kontaktforbindelser av lengre varighet og med en forhøyet omgivelsestemperatur. Dette vil være interessant fordi testene som er utført ikke er tilstrekkelig til å basere en konklusjon på om hvorvidt det er mulig å antenne materialer med glødende kontaktforbindelser.

Dersom situasjonen med antennelse på grunn av glødende kontaktforbindelse sammenliknes med andre situasjoner der antennelse forekommer, virker det realistisk å tenke at en antennelse kan forekomme på grunn av glødende kontaktforbindelse. Eksempelvis et bål der flammene har slukket. Tilføres det enten mer oksygen eller mer brensel, vil flammene kunne gjenoppstå. I denne situasjonen er det kun gløding tilstede, og ingen lysbue. Forklaringen kan muligens ligge i materialene som er involvert. Dersom isolasjonsmaterialene som avgir flammehemmende gasser byttes ut med eksempelvis støv eller sagflis, kan det tenkes at antennelse finner sted som følge av gløding. Dette vil være interessant å teste videre.

Akkurat som Martel også erfarte, flyttet det glødende filamentet seg vekk fra isolasjonen som ble forsøkt plassert inntil glødingen[12]. En forklaring på dette kan være at fordi hoveddelen av strømmen går gjennom det glødende filamentet, tar det glødende filamentet laveste motstands vei. Når det da plasseres antennbart materiale i nærheten av det glødende punktet, vil det glødende punktet forflytte seg fordi det nye materialet kjøler ned det glødende området, og dermed øker motstanden. Figur 9 viser hvordan kontaktpunktets resistans økes nær strømmens nullgjennomgang, når kontaktpunktet kjøles ned[17].

En papirbit ble plassert inntil glødende kontaktforbindelse og lysbuer. Papirbiten antente ikke da den ble plassert inntil lysbuer, og det var ikke mulig å se spor etter lysbuene på papirbiten. Da papirbiten ble plassert inntil glødende kontaktforbindelse derimot, begynte papiret å gløde nesten med det samme. Forbrenningen av papiret ble stoppet ved å fjerne papirbiten fra glødingen, fordi det var ønskelig at papirbiten var gjenkjennelig på bildene, vist i Figur 84 og i Figur 85. Grunnen til at papirbiten ikke hadde spor etter lysbuene, forstås som at effekten som avgis ved lysbuer, avgis i et meget konsentrert område. Lysbuer er av kort varighet, og rakk derfor ikke å varme opp papirbiten tilstrekkelig mellom hver nullgjennomgang av strømmen. Den glødende kontaktforbindelsen derimot, glødet kontinuerlig. Den utviklede effekten ble avgitt til omgivelsene, og forbrenningen av papirbiten foregikk som en glødebrann.

Det faktum at papirbiten forbrant i form av en glødebrann, indikerer at det trolig er mulig å starte en brann med flammer som følge av glødende kontaktforbindelse. En glødebrann vil kunne utvikle seg til en brann der flammer inngår. Glødebrannen kan spre seg videre fra kontaktpunktet, og muligens føre til antennelse av andre materialer som ikke er i glødepunktets umiddelbare nærhet.

Når lysbuevern skal vurderes som en mulig beskyttelse mot seriefeil, bør dette tas i betraktning. Forsøkene har likevel vist at det i forbindelse med elektriske kontaktpunkter, ofte oppstår en lysbue i det materialer antenner. Dersom denne lysbuen er detekterbar for lysbuevernet, vil lysbuevernet trolig beskytte mot en stor andel av seriefeilene som kan oppstå i en boliginstallasjon.

11.8 IEC 62606

11.8.1 Lysbuegenerator

Lysbuegeneratoren er en av metodene som standarden beskriver. Trolig er grunnen til at standarden beskriver denne testen, at den er lett å gjennomføre. Stabile lysbuer vil enkelt kunne lages, og testforholdene er ukompliserte.

Denne metoden å lage lysbuer på kan videre brukes i en større krets, eksempelvis en kurs i en boliginstallasjon. Dersom det er montert et lysbuevern i en slik installasjon, kan en lysbuegenerator benyttes til å teste hvorvidt lysbuevernet klarer å detektere lysbue i de aktuelle omgivelsene. Noe utstyr i en boliginstallasjon kan gi forstyrrende signaler for lysbuedetektoren, som da kan ha problemer med å oppdage en lysbue dersom den oppstår. Eventuelt kan utsyr avgi høyfrekvente signaler som minner om en skadelig lysbue, slik at vernet bryter strømmen som følge av en feilaktig deteksjon. Dette er et argument for å teste lysbuevernet ved å innføre en lysbue i kretsen.

Et argument for at lysbuen bør lages på denne måtes når det testes i en boliginstallasjon, er at det produseres betydelig mindre røyk og gasser ved å benytte denne metoden til å lage lysbuer. En annen reproduserbar metode for å skape stabile lysbuer er også beskrevet i standarden. Dette er en metode som baserer seg på å lage lysbuer gjennom en karbonisert vei mellom to ledere. Denne metoden egner seg ikke i lik grad til å utføre tester i boliginstallasjoner på grunn av røykutvikling.

Lysbuegeneratoren vil ikke lage lysbue av identisk art av det som kan forventes å oppstå i en boliginstallasjon. Grunnen til det er at grafittelektroden oppfører seg annerledes enn hva en kobberелеktrode gjør. Gassene som utvikles når en grafittelektrode blir utsatt for varmen fra en lysbue vil ikke være de samme gassene som utvikles fra en kobberелеktrode. En kobberелеktrode vil komme til å smelte under påvirkningen av en lysbue. Det at grafittelektroden ikke smelter er fordelaktig når en lysbue skal produseres. Fordi avstanden mellom elektrodene ikke økes like hurtig når en grafittelektrode er involvert, vil det være betydelig enklere å lage en stabil lysbue.

Måten lysbuen oppfører seg på mellom en kobberелеktrode og en karbonelektrode er også forskjellig fra hvordan lysbuen oppfører seg mellom to kobberелеktroder. Når kobber i kontakt med lysbuen smelter, vil lysbuen forflytte seg omkring på kontaktflaten. Denne oppførselen til lysbuen resulterer i høyfrekvent bredbåndsstøy. Det høyfrekvente bredbåndsstøyet som skapes av en lysbue mellom to kobberелеktroder, er støy som lysbuedektoren kan fange opp og benytte til deteksjon av lysbuer.

Lysbuegeneratoren vil ikke kunne avgi samme type støy, da grafittelektroden ikke smelter. Det at det ikke skapes høyfrekvent bredbåndsstøy av samme grad, gjør det vanskeligere for lysbuevernet å detektere lysbue dersom lysbuen stammer fra en lysbuegenerator med grafittelektrode. Denne forklaringen på hvordan et lysbuevern kan oppdage lysbuer ble gitt av Jean Mary Martel under et besøk i Regensburg i Tyskland 21. April 2015.

Den maksimale deteksjonstiden, definert i IEC-standarden for lysbuevern, er 2,5 ganger lengre ved bruk av lysbuegenerator enn ved testene med karboniserte kabelprøver. Grunnen til at tiden er 2,5 ganger lengre er trolig at det kompenseres for strømreduksjonen som medfølger en lysbue. I testene med karboniserte kabelprøver kompenseres det for strømreduksjonen som medfølger lysbuer ved at spenningen reduseres med 50V. [53]

11.8.2 Karboniserte kabelprøver

En lysbue gjennom en karbonisert vei mellom to kabler gir en mer realistisk feilsituasjon enn lysbuegeneratoren. Den representerer den type serielysbue som av Martel blir ansett for å være den mest skadelige [12]. Lysbuen er en lysbue på karbonisert isolasjon, uten direkte kontakt mellom lederne. Dette er en stabil lysbue, som ofte gjentener etter strømmens nullgjennomgang. En slik gjentennede lysbue vil gi en betydelig varmeutvikling. Denne type lysbue kan skyldes flere forhold, eksempelvis gløding eller lysbuer som oppstår på grunn av direkte kontakt mellom lederne.

Lysbuevernene tilfredsstilte alle krav som var tilknyttet testen som ble utført. Deteksjonstidene var godt innenfor største brytetid gitt i standarden. Samtidig med at brytetiden ble registrert, ble også strømreduksjonen da en lysbue oppstod målt. Det ble funnet at strømmen ble redusert med 20-39 % i 90 % av tilfellene. Av Figur 71 kan det sees at flere av målingene hadde strømnivåer ved lysbuer som var lavere enn det minste deteksjonskravet i standarden. Dersom strømmen reduseres med 20 %, vil en initiell strøm på mindre enn 3A gi en lysbuestrøm mindre enn deteksjonskravet på 2,5A.

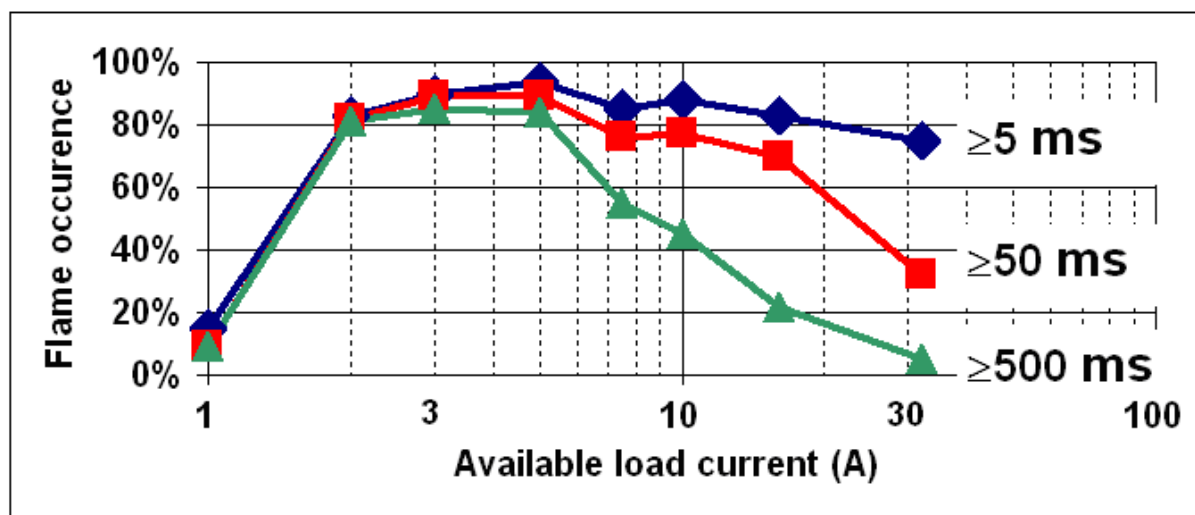
Diskusjon

Reduseres strømmen med 39 %, vil en initiell strøm på mindre enn 3,5A resultere i en lysbuestrøm mindre enn deteksjonskravet.

Standarden for lysbuevern krever ikke noen deteksjon av lysbue for strømmer under 2,5A. Likevel er det mulig å antenne kabelisolasjonen med stabile lysbuer som har lavere lysbuestrømmer enn 2,5A. Shea viste at en serielysbue over en karbonisert vei kan starte en brann ved strømmer så lave som $1,7A_{rms}$ [28]. Shea poengterer også at det trolig er mulig å starte en brann ved enda lavere strømmer, men dette ble ikke bevist. En av testene med karboniserte kabelprøver resulterte i antennelse av kabelisolasjonen ved en lysbuestrøm på $1,96A_{rms}$. Da var strømmen i kretsen initielt 2,5A, og strømreduksjonen 22 %.

Det faktum at det er mulig å antenne kabelisolasjonen ved strømmer mindre enn minstekravet satt i standarden, gjør spørsmålet om hvorvidt standarden er dekkende nok aktuelt. Grunnen til at dette er den minste verdien lysbuevernet må kunne detektere en lysbue ved er at vernet ikke skal gi feilaktige deteksjoner av ufarlige lysbuer. Et annet argument som støtter dette valget av minste deteksjonskrav er forsøk med lavere lysbuestrømmer. Martel har vist at stabile lysbuer med lysbuestrømmer under 2A har så lite energi at sannsynligheten for antennelse av kabelisolasjonen er betydelig redusert [24].

Martel antente ny kabelisolasjon av PVC ved å lage et kutt i kabelen slik at det oppstod en lysbue mellom endene av den avkuttede lederen. Figur 87 viser hyppigheten av flammer ved ulike strømnivåer. Det skilles mellom ulike typer flammer, da ikke alle flammene som oppstod var av vedvarende art. Den blå linja viser hyppigheten av første flamme, en flamme som varer i mer enn 5ms, ved ulike strømnivåer. Den røde linja viser hyppigheten av flammer som varte i mer enn 50ms, signifikante flammer. Den grønne linja viser hyppigheten av stabile flammer som varer i mer enn 500ms. [24]



Figur 87 - Hyppighet av flammer ved ulike strømnivåer. Den blå linja viser forekomst av første flamme som varer i mer enn 5ms. Den røde linja viser forekomsten av signifikante flammer ved ulike strømnivåer. Signifikante flammer er flammer som varer i mer enn 50ms. Den grønne linja viser forekomsten av stabile flammer, som varer i mer enn 500ms. [24]

Diskusjon

Som det kan sees av figuren øker hyppigheten av flammer signifikant fra 1A til 2A; fra under 20 % til over 80 % flammehyppighet. Av figuren kan det også forstås at nesten alle tilfellene av antennelse førte til stabile flammer ved strømmer mindre enn 3A. Testen ble utført ved 240VAC, 50Hz. Det ble utført 100 tester for hvert strømnivå fra 1A til og med 32A.

Martels undersøkelser viser at den dramatiske reduksjonen i antall forsøk som antente kablet reduserer sannsynligheten for antennelse betydelig ved laststrømmer under 2A. Det vil derfor kunne øke beskyttelsen mot serielysbuer signifikant dersom standardens minste deteksjonsgrense reduseres. Hvorvidt dette gjør det til en umulig oppgave for vernene å unngå feildeteksjoner bør kartlegges. En uakseptabel økning i antall feildeteksjoner kan forsvare hvorfor minste deteksjonskrav er satt ved en lysbuestrøm på 2,5A. Er det derimot mulig å unngå feildeteksjoner i tilstrekkelig grad, bør denne grenseverdien reduseres så mye som mulig.

11.8.3 Ønskede og uønskede utkoblinger

Testene der lysbuevern blir testet for feildeteksjoner og for ønskede deteksjoner blir vurdert ikke å være dekkende nok. Grunnen til det er at bare noen få laster som kan gi liknende strømmer som lysbuestrømmer må testes. Også andre typer laster kan gi strømmer som kan minne om lysbuestrømmer. Eksempelvis strykejern eller ulike typer sager.

Standarden krever også bare test av en type av hver last. Det kunne være et poeng i å teste ulike typer last av forskjellige leverandører. Også laster av ulik alder burde testes. Et gammelt strykejern fra en produsent vil kunne gi helt andre strømmer enn et nytt strykejern fra en annen produsent.

De ulike lastene blir aldri testet sammen. Flere typer laster er ofte tilkoblet en og samme kurs i en boliginstallasjon. Det anses derfor fornuftig å teste ulike typer vanskelige laster i en og samme krets. Lysbuevern burde være i stand til å oppdage lysbuer som oppstår i en kurs som er belastet av forskjellige laster. Det bør også verifiseres at lysbuevernene ikke gjør feildeteksjoner når laster som gir strømmer som kan minne om lysbuestrømmer tilkobles samme kurs.

11.9 Beste beskyttelse mot seriefeil

Hvilket seriefeilvern som kan tilføre boliginstallasjoner den beste beskyttelsen mot seriefeil, er vanskelig å konkludere med. De ulike vernene har sine styrker, men også svakheter. Ingen av seriefeilvernene kan beskytte mot alle seriefeil som kan oppstå i en boliginstallasjon. Et seriefeilvern som fungerer som det er ment, vil kunne redusere antall branner som skyldes seriefeil. Dette vil kunne spare samfunnet for store summer, men også redde liv. Videre diskuteres fordeler og ulemper ved de ulike seriefeilvernene.

11.9.1 ETIM

Det temperaturovervåkende vernet fra ETIM har allerede blitt testet i en masteroppgave skrevet av Carl Olav Larsson og i den forberedende prosjektoppgaven [13, 22]. Det ble i begge oppgavene dokumentert at vernet var i stand til å oppdage forhøyede temperaturer som oppstod på grunn av seriefeil i god tid før en brann brøt ut. Den

største ulempen med dette vernet, er at det må plasseres en temperatursensor i nærheten av stedet der det oppdages feil. Deler av installasjonen som ikke blir temperaturovervåket av vernet, står ubeskyttet. Likevel er det slik at syndebukken for brann ofte er gjengangere. Stikkontakter er en slik gjenganger som er delaktig i mange branner. Ved å plassere temperatursensorer i nærheten av områder av den elektriske installasjonen hvor det har vist seg å være større sannsynlighet for brann, kan trolig en betydelig andel branner som skyldes seriefeil forhindres.

I en boliginstallasjon er det mange koblingspunkter, og skal alle koblingspunkter beskyttes, krever dette et betydelig antall temperatursensorer. Mange koblingsbokser er allerede fulle nok, og det kan derfor by på problemer å få plass til temperatursensoren. Temperatursensorene benyttet under testene er prototyper. Der er derfor mulig at det ferdige produktet er mindre i størrelse.

Temperatursensorene som ble benyttet i testene gikk på batteri. Hvor ofte batteriene må skiftes er uvisst. Fordi sensorene plasseres inne i koblingsbokser, kreves det elektriker for å bytte batteri på sensorene. ETIM har også utviklet en annen måte å tilføre sensorene energi på. Det benyttes en spole som tres på den ene faselederen. I det strøm går gjennom faselederen, vil induksjon kunne tilføre sensoren nok energi til at temperaturmålingene kan sendes til sentralen. Dersom denne løsningen tas i bruk, trengs det elektriker kun da sensorene installeres første gang.

I en installasjon som beskyttes av det temperaturovervåkende vernet, vil elektrikeren som installerer vernet med stor sannsynlighet huske å stramme skruene godt nok. En seriefeil grunnet dårlig tilskrudde skruer vil av den grunn trolig ha betydelig mindre sannsynlighet for å oppstå. Tiltaket vil virke preventivt, og branner på grunn av seriefeil kan unngås.

Testene viser at seriefeilvernet er i stand til å oppdage seriefeilen lenge før en brann bryter ut, såfremt feilen oppstår et sted i nærheten av sensoren og varmeutviklingen varmer opp omgivelsene omkring sensoren. En klar fordel med dette vernet er at det er mulig å lokalisere feilstedet raskt og enkelt, ved å avlese hvilken sensor som har målt temperaturer over alarmgrensen.

Dette seriefeilvernet oppdager varmgang. I de fleste seriefeil som fører til brann, inngår trolig oppvarming før antennelse finner sted. Det antas derfor at vernet vil beskytte mot nesten alle seriefeil som kan oppstå i nærheten av sensoren. I prosjektoppgaven ble det forsøkt å lage lysbuer i kontaktpunktet. Lysbuene varmet ikke opp omgivelsene av noen betydelig grad. Hvor stor brannfaren var på grunn av lysbuene, er ikke kjent. Det antas at faren var liten, da omkringliggende materialer må tilføres varme for at de skal antenne [33]. Lysbuene som ble skapt, uten at det ble målt noen betydelig varmgang, ble ikke oppdaget av vernet.

11.9.2 Seriefeilvern som skaper jordfeil

Seriefeilvernet som skaper jordfeil ble testet i testveggen der det var laget en dårlig kontaktforbindelse som ledet til varmgang. Ved alle forsøk var lysbuevernet i stand til å oppdage seriefeilen som ble skapt i den dårlige kontaktforbindelsen. Feilen var imidlertid kun varmgang, og vernet ble aldri testet med lysbuer. Grunnen til det var at utstyret som ble benyttet til å lage lysbuer, var blitt ødelagt som følge av påkjenningene

Diskusjon

det var blitt utsatt for under lysbueforsøk. Det lyktes ikke å lage en ny test av holdbar kvalitet med lysbuer i testveggen. Det bør testes hvordan dette vernet håndterer lysbuer.

Prinsippet bak virkemåten til dette seriefeilvernet er enkelt. Varmgang smelter et smeltelegeme. Dersom smeltelegemet smelter, skapes det en forbindelse til jord, som resulterer i at jordfeilautomaten bryter strømmen i kursen. Det ukompliserte prinsippet bak virkemåten seriefeilvernet, bør gjøre det mulig å lage et pålitelig seriefeilvern. Den testede versjonen av seriefeilvernet var en prototyp. I prototypen var vernet en del av selve stikkontakten.

Å installere et slikt vern ville krevd en elektriker til å gjøre monteringsjobben. I den ferdige versjonen av dette vernet, er det meningen at vernet skal være plassert i dekselet til stikkontakten. Dekselet til en stikkontakt har en ufaglært lov til å skifte. Dermed vil det være mulig for forbrukeren selv å sette inn seriefeilvernet. Dette vil gjøre innføringen av seriefeilvern betydelig rimeligere for forbrukeren enn om en elektriker måtte gjort jobben, og anses dermed som en fordel av betydning.

I første rekke er det planlagt å innføre dette vernet i stikkontakter. Dermed vil andre kontaktpunkter og utsatte områder av den elektriske installasjonen stå ubeskyttet. Dette er en klar begrensning av seriefeilvernet. Seriefeilvernet kan ikke beskytte hele den elektriske installasjonen, kun stikkontaktene der seriefeilvernet monteres.

Dersom det oppstår en seriefeil i nærheten av seriefeilvernet, og strømmen brytes som følge av jordfeilen som blir skapt, må seriefeilen lokaliseres ved å sjekke alle stikkontaktene for å finne ut hvilken som har et smeltet smeltelegeme, og dermed er skyld i seriefeilen. Det anses som en god ide å prøve å utvikle en måte det kan oppstå et synlig tegn på utsiden av stikkontakten dersom seriefeilvernet har skapt en jordfeil. Dette vil lette lokaliseringsarbeidet betydelig.

Feilstedet må lokaliseres, og seriefeilvernet byttes ut, før det kan gå strøm gjennom stikkontakten igjen, fordi den etablerte jordfeilen vil løse ut jordfeilvernet. Dette er en sikkerhet som bare seriefeilvernet som skaper jordfeil har, blant de testede vernene. Tidligere var det et problem at jordfeilvern var utsatt for en del feil. Dette har de senere år blitt langt bedre [16]. Dersom jordfeilvernet mot formodning ikke skulle fungere, vil løsningen med overgangsmotstanden som brenner av fjerne den skapte jordfeilen. Dette er en sikkerhet med vernet. Tilstanden som da oppstår er at det finnes en seriefeil i den elektriske installasjonen, som ikke er beskyttet av noe vern. Dersom jordfeilvernet ikke skulle fungere, vil seriefeilvernet ikke utgjøre noen økt trussel for sikkerheten. Tilstanden er slik tilstanden ville vært uten noe seriefeilvern i installasjonen.

Testene av seriefeilvernet viste at det ved alle tilfeller av den innførte seriefeilen, var i stand til å oppdage feilen innen en brann brøt ut. Dette er en av de store fordelene med seriefeilvern som baserer seg på å oppdage varmeutvikling; dersom en feil utvikler seg i nærheten av vernene, vil vernene kunne være i stand til å oppdage seriefeilen innen en brann oppstår.

Plasseringen av smeltelegemet vurderes som meget gunstig, da det var helt i nærheten av seriefeilen, og i metallisk kontakt med seriefeilen. Dermed ville varmen som seriefeilvernet ble utsatt for til en viss grad følge varmeutviklingen ved feilstedet.

Temperaturmålingene inne i veggboksen viste større temperaturforskjeller. Dette tyder i retning av at plasseringen av smeltelegemet i den endelige versjonen av seriefeilvernet vil være viktig. Plassering og smeltetemperatur må vurderes opp mot hverandre.

Dersom smeltelegemet plasseres i stikkontaktens deksel, forventes det at mer varme avgis til omgivelser utenfor veggboksen og stikkontakten.

11.9.3 Lysbuevern

Et lysbuevern skal være i stand til å oppdage stabile lysbuer. Stabile lysbuer gjentinner ved strømmens nullgjennomgang ved en rekke påfølgende strømsykluser. Nøyaktig hva som kreves for at de ulike lysbuevernene skal være i stand til å oppdage lysbuer, er ukjent da dette er informasjon produsentene ikke har ønsket å dele.

De ulike testene har gitt variable resultater. Testen fra IEC-standarden som av produsentene av lysbuevern vurderes å være mest pålitelig, er testen med de karboniserte kabelprøvene. De karboniserte kabelprøvene gir en lysbue gjennom en karbonisert vei. Dette er den formen for lysbuer som av Martel vurderes å være mest skadelig. Grunnen til det er at denne type lysbue ofte fører til en betydelig varmeutvikling [12]. Forsøkene med de karboniserte kabelprøvene ga gode resultater for alle vern. Ikke ett eneste forsøk ga resultater som ikke tilfredsstilte lysbuestandarden. Fordi dette er det forsøket fra lysbuestandarden som vurderes å gi den mest realistiske formen for lysbue, er resultatene fra testene en tydelig indikasjon på at lysbuevernene er i stand til å beskytte mot skadelige lysbuer som kan oppstå i en installasjon.

Testene der lysbuevernene ble testet for uønskede utkoblinger, samt ønskede utkoblinger i en krets med en rekke vanlige husholdningsapparater, ga motstridende resultater. Ingen uønskede utkoblinger av strømmen forekom, men resultatet av denne testen vurderes å ikke være pålitelig. Grunnen til det er resultatene som fremkom fra testen der de samme husholdningsapparatene ble testet samtidig som en lysbue ble laget i kretsen. Lysbuene ble ikke detektert. De manglende deteksjonene av lysbuene gjør at det må stilles spørsmålstegn til hvorvidt testoppsettet inneholder feilkilder, som gjør det vanskelig for lysbuevernet å oppdage lysbuene. Testoppsettet er ukomplisert, og det er ikke funnet noen form for en slik feilkilde. Av den grunn stilles det spørsmålstegn ved funksjonaliteten til lysbuevernene.

Testene med lysbuegeneratoren ga utilfredsstillende resultater. Kravene i lysbuestandarden ble ikke innfridd. Lysbuene som skapes med lysbuegeneratoren er av en litt annen art enn hva som kan forventes å oppstå i en boliginstallasjon. Hvorfor tester med lysbuegeneratoren er en del av testene i lysbuestandarden, er et diskuterbart tema. Likevel, lysbuene som skapes med lysbuegeneratoren kreves detektert av lysbuestandarden. Av den grunn forventes det at lysbuene skal oppdages innen en bestemt tid.

Lysbuene som ble skapt i en krets med en rekke husholdningsapparater, ble laget med lysbuegeneratoren. Det at lysbuer laget med lysbuegeneratoren ikke er av den arten som ofte oppstår i boliginstallasjoner, kan være en del av forklaringen på hvorfor lysbuene i kretsen med husholdningsapparater ikke ble detektert av lysbuevernene. Testen burde derfor vært gjentatt der lysbuer ble skapt av karboniserte kabelprøver.

Diskusjon

Grunnen til at dette ikke ble gjort, var at kabelprøvene var brukt opp under testene av lysbuevernens tilfredsstillende av lysbuestandardens krav.

Testene av lysbuevernene indikerer et forbedringspotensiale for lysbuevernene. Uønskede utkoblinger på grunn av at en ufarlig normalsituasjon feiltolkes av lysbuevernene, bør unngås i størst mulig grad. Flere tester med ulike krevende laster bør utføres før det kan gis noen konklusjon på lysbuevernens funksjonalitet i forhold til uønskede utkoblinger.

Lysbuevern detekterer kun stabile lysbuer, og ingen form for varmgang eller glødende kontaktforbindelse. Testene har vist at en seriefeil kan være et sammensatt fenomen. Varmgang utvikler seg til gnister som oksiderer kontaktpunktet. Kontaktpunktet kan begynne å gløde. Metallet i kontaktpunktet smelter, og i det kontaktforbindelsen brytes, oppstår det lysbuer mellom de ledende materialene. Et lysbuevern vil ikke kunne oppdage feilen før lysbuer oppstår. De små gnistene som oppstår i forkant av gløding er ikke stabile lysbuer. Lysbuevernet vil derfor ikke tolke situasjonen som skadelig og bryter ikke strømmen i kretsen. I stedet for at gnistene går over til å bli en glødende kontaktforbindelse, kan gnistene utvikle seg til stabile lysbuer. De stabile lysbuene kan detekteres av lysbuevernene.

Vurderingen av hvilke deteksjonsprinsipper av seriefeil som tilbyr den beste beskyttelsen, reiser spørsmålet om hvorvidt det er mulig at omkringliggende materialer antenner som følge av glødende kontaktforbindelse. Forsøk ble utført for å kartlegge dette. Det viste seg at isolasjonsmaterialene ikke lot seg antenne uten at en lysbue var tilstede. Glødende kontaktforbindelse var derimot i stand til å starte en forbrenning av en skrivepapirbit i form av en glødebrann. Dette tolkes i retning av at det er mulig at en brann utvikler seg som følge av glødende kontaktforbindelser, dersom forholdene ligger til rette for det. Det betyr at materialer som antenner og forbrennes lett må være tilstede. En antennelse krever også oksygen og temperatur. Oksygen vil være tilstede i lufta omkring. Temperaturen tilføres av den glødende kontaktforbindelsen. Trolig vil ikke materialene være i direkte kontakt med glødingen, fordi glødingen forflytter seg vekk fra kjøligere materialer da de kjøligere materialene gir en økt motstand [12]. Uten gnister tilstede vil antennelse skje i form av spontanantennelse.

Sannsynligheten for at en slik optimal situasjon for antennelse som følge av glødende kontaktforbindelse skal oppstå i en boliginstallasjon vurderes å være meget liten. Grunnen til det er at de ledende materialene som kan skape glødende kontaktforbindelser er omgitt av isolasjonsmaterialer som avgir flammehemmende gasser. De flammehemmende gassene blander seg med antennebare gasser, og dette fører til en for lav tetthet av de antennebare gassene til at antennelse kan skje ved den effekten som avgis per tid ved en glødende kontaktforbindelse.

Ikke før en gnist eller en lysbue oppstår, vil effekten som avgis per tid være tilstrekkelig til at de antennelige gassene som er blandet med flammehemmende gasser antenner. Forsøkene med karboniserte kabelprøver viste at antennelse av kabelisolasjonen kunne skje dersom det oppstod en lysbue. Forsøkene viste også at lysbuen som antenne kabelisolasjonen kunne være av meget kort varighet. En lysbue som ikke er stabil vil ikke detekteres av lysbuevernet. Det forstås som sannsynlig at en kortvarig eller ustabil lysbue kan være i stand til å antenne isolasjonsmaterialer, og at en slik lysbue ikke vil bli detektert av lysbuevern.

Diskusjon

Flammer vil ionisere luften. Ionisert luft muliggjør lysbuer ved en lavere spenning enn ved luftens gjennomslagsspenning. Dette gjør at det er svært vanlig å finne lysbueødeleggelse ved brannsteder [8, 11]. Det faktum at lysbuer lettere oppstår når det er flammer i nærheten, øker sannsynligheten for at det skal oppstå stabile lysbuer som lysbuevern kan detektere. Lysbuevernene skal være i stand til å bryte strømmen ved både serie- og parallelllysuer, og vil derfor kunne beskytte mot lysbuer som oppstår i etterkant av en allerede antennelse.

Materialene som gjerne befinner seg i nærheten av en lysbue, er ofte selvslukkende isolasjonsmaterialer. Dersom energitilførselen stoppes, i form av at strømmen brytes, kan dette føre til at branntilløpet slukker av seg selv på grunn av de selvslukkende materialene. Hvis det er folk i nærheten når strømmen brytes, kan dette gjøre personene oppmerksomme på at det kan være noe galt med den elektriske installasjonen. Dette er ingen garanti, men alle branner som blir forhindret eller stoppet i tide, kan spare samfunnet for betydelige summer og det kan spare liv. For å øke sannsynligheten for at et branntilløp skal bli stoppet ved et tidlig stadium, kan det være en idé å innføre en form for varsling når lysbuevern detekterer lysbue og bryter strømmen.

Både vibrasjoner og den automatiske lysbuegeneratoren ble benyttet til å lage lysbuer og glødende kontaktforbindelser mellom to kobberledere. Under forsøkene ble det observert tilfeller av at kobberet smeltet og dannet en kontakt mellom lederne som var så god at det ikke oppstod verken nye lysbuer eller gløding. Dersom dette skjer i en boliginstallasjon, vil det over tid trolig oppstå varmgang av en truende art fordi oksidert kobber leder strøm dårligere. Den nye kontakten mellom lederne vil formodentlig ha et mindre strømførende tverrsnitt, hvilket også vil bidra til videre temperaturøkning. Dersom lysbuevernet ikke oppdaget lysbuen, eller feilstedet aldri ble lokalisert, vil en slik feil ha et stort potensiale for å videreutvikles til en skadelig seriefeil, som kan antenne omkringliggende materialer. Lysbuevernet kan da igjen detektere eventuelle nye lysbuer.

En klar fordel med lysbuevern er at lysbuevernene beskytter hele kursen det er forankoblet. Det betyr at dersom det oppstår en lysbue som følge av for eksempel skadet kabel, vil lysbuevernet kunne beskytte mot også denne feilen. Dermed er det ikke bare seriefeil som oppstår i stikkontakter og koblingsbokser vernet beskytter mot. Husholdningsapparater er også skyld i en betydelig andel branner. Serielysbuer som oppstår i husholdningsapparater skal kunne bli oppdaget av lysbuevern.

Basert på de presenterte argumentene vurderes det til at lysbuevern vil kunne tilføre boliginstallasjoner en betydelig beskyttelse mot seriefeil. En seriefeil blir vurdert å kunne utvikle seg til en detekterbar situasjon for lysbuevernene i svært mange tilfeller. Forutsatt denne vurderingen er at lysbuevern fungerer som de er ment å fungere, med få utkoblinger og deteksjoner av en større andel seriefeil. Hvert år fra 2009 til og med 2013 har DSB registrert i gjennomsnitt 92,4 boligbranner som skyldes dårlig kontaktforbindelse med påfølgende serielysbue. Dette tallet viser viktigheten av å innføre vern som kan beskytte mot seriefeil. Basert på resultatet av testene, ser det ut til at det er rom for forbedringer av lysbuevernene. Forbedringene av lysbuevernene bør skje innen lysbuevern blir en del av hva som kreves av en boliginstallasjon.

11.10 Forslag til videre arbeid

Målet med videre arbeid bør være å komme frem til hvordan det på best mulig måte kan beskyttes mot skadelige seriefeil. For at dette skal la seg gjøre, bør det gjøres omfattende undersøkelser av hvordan antennelse i en elektrisk installasjon foregår. I tillegg bør ulike seriefeilvern testes når ulike feil fremprovoseres. Det bør kartlegges hvor i utviklingsforløpet de ulike seriefeilvernene beskytter mot feilen. Hyppigheten av hvor ofte de ulike skadelige seirefeilene fører til brann bør også tas hensyn til under vurderingen av det mest formålstjenlige lysbuevernet.

Det foreslås å gjøre tester av hvordan seriefeilvernet som skaper jordfeil håndterer lysbuer. Dette gjelder både lysbuer som oppstår sammen med varmgang og gløding og lysbuer som oppstår som følge av brutt kontakt.

Lysbuevern oppdager stabile lysbuer, og bryter strømmen i kretsen når dette oppdages. Hvor stabile lysbuene som kan forventes å oppstå i en boliginstallasjon er, vil være et viktig spørsmål å besvare. Det vil også spørsmålet om hva som skjer dersom omkringliggende materialer antenner som følge av lysbuen som ble detektert av vernet; vil strømburddet og selvsløkkende materialer gjøre at brannen slukker av seg selv, eller vil brannen kunne utvikle seg videre? Vil en ekstra varsling om lysbuedeteksjon kunne tilføre en større brannsikkerhet?

Det vurderes også nyttig å finne ut av hvor kritisk en kontakt er, som er et resultat av at lysbuer har smeltet sammen kobber til å bli en ny kontaktforbindelse uten gløding. Vil denne kontakten la seg lokalisere, eller er det en viss sannsynlighet for at det blir antatt at det har vært en feildeteksjon av lysbuer og strømmen blir koblet inn igjen uten at feilstedet blir rettet?

Testene viste at det var mulig å starte en forbrenning i form av en glødebrann som følge av glødende kontaktforbindelse. Flere tester der det kartlegges hvordan ulike materialer kan antenne som følge av gløding, vil kunne tilføre viktig kunnskap i vurderingen av beste måte å beskytte seg mot seriefeil på. Det vil være interessant å se på om en brann kan startes som følge av gløding i en elektrisk installasjon, der flammehemmende materialer befinner seg i nærheten.

Hva som regnes som tilfredsstillende beskyttelse mot seriefeil bør bestemmes. Seriefeilvernenes grad av beskyttelse bør vurderes opp mot pris og installeringsmetode. Det er ønskelig at videre arbeid fører frem til en anbefaling av hvordan det best mulig kan beskyttes mot skadelige seriefeil.

12 Konklusjon

Lysbuevern fra ulike produsenter ble testet etter standarden for lysbuevern, IEC 62606 [53]. Testene, samt en vurdering av lysbuestandarden har resultert i følgende:

Tester med karboniserte kabelprøver

- Lysbuer som lages med karboniserte kabelprøver er den testmetoden i lysbuestandarden som i størst grad etterlikner lysbuer som kan oppstå i en boliginstallasjon. Standardens krav var tilfredsstillt ved alle tester av alle lysbuevern med denne metoden.
- Ved lysbuestrømmer lavere enn standardens minstekrav, var det mulig å antenne kabelprøven. Lysbuevernene brøt ikke strømmen i kretsen, og kabelprøven som brant fikk dermed kontinuerlig tilført energi.
- Martels undersøkelser [24] og egne resultater, tyder på at en reduksjon av laveste strøm som lysbuestandarden krever deteksjon ved, vil kunne øke beskyttelsen mot skadelige lysbuer betraktelig. Av den grunn bør det vurderes om det er mulig å redusere den minste lysbuestrømmen det kreves deteksjon ved, uten at dette fører til en uakseptabel økning i feildeteksjoner.
- Ved alle antenner av kabelprøven ble det observert lysbuer i forbindelse med antennen.
- Resultatet fra målingene indikerer at kompenseringen for strømreduksjon ved lysbuer, som standarden for lysbuevern gjør, gir et realistisk bilde av forventet lysbuestrøm, med en sikkerhetsmargin.

Tester med lysbuegenerator

- Lysbuevernene tilfredsstilte standarden i bare 81 % av forsøkene. Deteksjonstidene var da godt innenfor kravene.
- De tilfellene som ikke tilfredsstilte lysbuestandarden, resulterte ved nesten alle tilfeller i ingen deteksjon av lysbuer. Årsaken til dette kan være at lysbuene blir tolket som en ufarlig normalsituasjon av lysbuevernet.

Ønskede og uønskede utkoblinger

- Lysbuestandarden krever ikke at flere husholdningsapparater som kan gi liknende strømmer som en lysbue testes sammen. Det anses som en klar svakhet av lysbuestandarden at lysbuevernene ikke testes slik de forventes brukt i en boliginstallasjon.
- For å fastslå hvor godt lysbuevern er i stand til å unngå uønskede utkoblinger, bør standarden kreve at ulike typer laster fra ulike produsenter og av ulik alder testes sammen.
- Flere tester med slike krevende laster bør også gjøres med lysbuer. Dette for å kartlegge lysbuevernenes evne til å oppdage lysbuer når strømmer som skal tolkes som en ufarlig normalsituasjon er tilstede.

Seriefeil

Seriefeil er et sammensatt fenomen.

- Kan gå fra å være lysbuer til å bli glødende kontaktforbindelse.
- Hvis kontakten mellom lederne i en glødende kobberoksidbro brytes, oppstår det lysbuer.

Konklusjon

- Glødende kontaktforbindelser laget med vibrasjoner eller automatisk lysbuegenerator viste at det oppstår gnister i forkant av en glødende kontaktforbindelse.
- Dersom lysbuer smelter sammen det dårlige kontaktpunktet, kan kontaktforbindelsen bli så god at det ikke oppstår lysbuer eller gløding.

Antenningsforsøk på isolasjonsmaterialer og papir

Forsøkene viste følgende:

- En lysbue var involvert i alle tilfeller der isolasjonsmaterialer antente.
- Det var mulig å starte en glødebrann på en skrivepapirbit uten at noen lysbue var involvert ved noe stadium av forbrenningsprosessen. Dette indikerer at en brann kan starte som følge av glødende kontaktforbindelse, forutsatt at forholdene ligger til rette for det.
- En seriefeil som gjennomgår ulike stadier med både lysbuer og gløding, er mer skadelig enn en seriefeil av bare lysbuer eller bare glødende kontaktforbindelser.

Konklusjon for anvendelse av ulike typer seriefeilvern

- Seriefeilvernene som baserer seg på å oppdage forhøyede temperaturer detekterte varmgang ved alle forsøk med dårlig kontaktforbindelse.
- Begge vernene vil med stor sannsynlighet beskytte mot en skadelig seriefeil dersom feilstedet er i nærheten av vernene.
- Feil som ikke er i umiddelbar nærhet av vernene, vil vernene ikke være i stand til å beskytte mot.

- Lysbuevern virker å ha et stort potensiale for å beskytte mot en betydelig andel av skadelige seriefeil som kan forekomme i en boliginstallasjon, begrunnet i at seriefeil som varierer mellom å være lysbuer og glødende kontaktforbindelser ser ut til å være de mest skadelige.
- Lysbuevern detekterer kun stabile lysbuer, og vil ikke bryte strømmen i kretsen som følge av gnistene som oppstår i forkant av en glødende kontaktforbindelse.
- Lysbuer som blir detektert av lysbuevernet kan føre til antennelse i det de oppstår. Dersom flammene ikke slukker av seg selv når lysbuevernet bryter strømmen i kretsen, kan en form for varsling i det lysbuevernet detekterer lysbuer øke sannsynligheten for at brannen blir oppdaget og slukket ved et tidligere stadium.
- Det må forutsettes at lysbuevern ikke gir en uakseptabelt stor andel feildeteksjoner. Ingen feildeteksjoner forekom under testene. Imidlertid løste vernene heller ikke ut da krevende laster ble kombinert med lysbuer, slik de burde ha gjort.

Ingen av seriefeilvernene er i stand til å beskytte mot alle seriefeil som kan oppstå i en boliginstallasjon. Flere tester av de ulike vernene må utføres før det er mulig å avgjøre hvilket deteksjonsprinsipp som tilfører den beste beskyttelsen mot skadelige seriefeil.

Referanser

- [1] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. Statistikkbase [Online]. Available: http://stat.dsb.no//Database/DSB/1_Brann/4_Arsaker/2_Fom2009/2_Fom2009.asp
- [2] J. Shea, "Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring," in *Electrical Contacts, 2005. Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on*, 2005, pp. 167-175.
- [3] J. Shea, "Glowing contact physics," in *Electrical contacts-2006, proceedings of the fifty-second ieee holm conference on*, 2006, pp. 48-57.
- [4] Siemens AG, "5SM6 AFD Unit," Siemens AG Infrastructure & Cities Sector Low and Medium Voltage Division Low Voltage & Products, Ed., ed, 2012.
- [5] *Lov om rettergangsmåten i straffesaker*, §224 1. og 4. ledd, 1986.
- [6] *Forskrift om ordningen av påtalemyndigheten*, § 7-4, 5. ledd, 1986.
- [7] *Rundskriv fra Riksadvokaten*, Mål og prioriteringer for straffesaksbehandlingen i 2015 - politiet og statsadvokatene, 2015.
- [8] J. P. Stensaas, "Branner på grunn av elektrisk installasjonsmateriell," Sintef NBL as NBL A06121, 2007.
- [9] P. D. Vytienis Babrauskas, *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering*. USA: Fire Science Publishers, 2003.
- [10] T. Kuroyanagi, S. Inoue, and H. Suzuki, "Electrical connectability for growing and Cu₂O breeding phenomena of copper and its alloy," *JPN copper brass res assoc*, vol. 20, pp. 198-204, 1981.
- [11] V. Babrauskas, "How do electrical wiring faults lead to structure ignitions," in *Proc. Fire and Materials 2001 Conf*, 2001, pp. 39-51.
- [12] PhD Jean-Mary Martel, "Title," unpublished |.
- [13] C. O. Larsson, "Seriefeilvern i elektriske installasjoner," 2012.
- [14] R. Kristensen, "Serielysbuer og korrosjon i løse kontakter som brannårsak," Hovedoppgave, Norges Tekniske Høgskole.
- [15] M. Runde, "Current Interruption in Power Grids," ed: Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [16] E. Hansen, "Elektroinstallasjoner," ed: Classica, Trondheim, 2010.
- [17] J. Shea and X. Zhou, "Material effect on glowing contact properties," in *Electrical contacts-2007, the 53rd ieee holm conference on*, 2007, pp. 90-97.
- [18] A. Steen-Hansen, J. P. Stensaas, S. Fjær, and K. Storesund, "Elektriske kabler og brannrisiko. Branntekniske egenskaper til kabler, ledningssystemer og kapslinger.," Sintef2012-09-06 2012.
- [19] J. Sletbak, R. Kristensen, H. Sundklakk, G. Navik, and M. Runde, "Glowing contact areas in loose copper wire connections," *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 322-327, 1992.
- [20] J. Urbas, "Glowing Connection Experiments With Alternating Currents Below 1," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 777-783, 2010.
- [21] P. Müller, S. Tenbohlen, R. Maier, and M. Anheuser, "Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain," *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, pp. 1-7, 2010.
- [22] M. Bjørnbakk, "Seriefeilvern for beskyttelse mot brann," 2014.

Vedlegg

- [23] (14. Februar, 2009, 20. Oktober). *Elektrisk Lysbue*. Available: https://snl.no/elektrisk_lysue
- [24] J. Martel, M. Anheuser, and F. Berger, "A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation," in *Proceeding of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Charleston, South-Carolina, USA, 2010*, pp. 1-11.
- [25] M. Guttormsen, "Termionisk effekt," in *Store norske leksikon*, ed. https://snl.no/termionisk_effekt, 2009.
- [26] J.-T. Kasbo, "Termoelektriske materialer: Schottky barriere i Cu/ZnSb-overgang," 2013.
- [27] (15. Februar, 2009, 21. Oktober). *Støtionisasjon*. Available: <https://snl.no/st%C3%B8tionisasjon>
- [28] J. J. Shea, "Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits," *Fire and Materials*, vol. 35, pp. 19-42, 2011.
- [29] K. S. Pedersen, Ed., *Håndbok i brannetterforskning*. Norsk brannvernforening, 2012, p.^pp. Pages.
- [30] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, and G. Privitera, "Experimental characterization of series arc faults in AC and DC electrical circuits," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, 2014, pp. 1015-1020.
- [31] C.-J. Wu and Y.-W. Liu, "Smart detection technology of serial arc fault on low-voltage indoor power lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 69, pp. 391-398, 7// 2015.
- [32] D. Li, Z. Song, J. Wang, Y. Geng, H. Chen, L. Yu, *et al.*, "A method for residential series arc fault detection and identification," in *2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2009, pp. 8-14.
- [33] D. Widlund, *Elektricitet och bränder med inriktning på brannutredning*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2009.
- [34] R. Karlstrøm, Ed., *Håndbok i brannetterforskning. Innføring i aktuelle emneområder*. Oslo: Villco Trykkeri A/S, 1988, p.^pp. Pages.
- [35] PVC Forum Norge v/Helge Stiksrud. (08.12.04, 14. Mai 2015). PVC Fakta Brann. Available: http://www.vindex.no/wp-content/uploads/2012/09/Faktaark_Brann.pdf
- [36] V. Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products," *Fire and Materials*, vol. 30, pp. 151-174, Mar-Apr 2006.
- [37] V. Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC wires, cables and cords," in *Fire & Materials*, ed London: Interscience Communications Ltd., 2005, pp. 291-309.
- [38] S. Ore, "Ureaplast," in *Store norske leksikon*, ed. <https://snl.no/ureaplast>, 2009, 15. februar.
- [39] AS Elektrisk. (13. Desember). *El-tips Monteringsveiledning*. Available: <http://www.aselektrisk.no/krs/el-tips>
- [40] J. P. Stensaas, "Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennkilde i bygninger," SINTEF2007.
- [41] J. L. Ferrino-McAllister, R. J. Roby, and J. A. Milke, "Heating at electrical contacts: Characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles," *Fire Technology*, vol. 42, pp. 49-74, 2006.
- [42] E. Røed, "Informasjon fra produkt- og elsikkerhetstilsynet," *Elsikkerhet*, vol. 31, p. 17, 2/01 2001.

Vedlegg

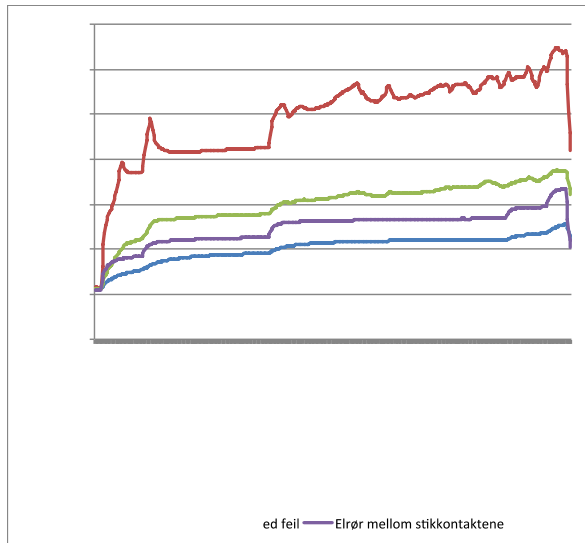
- [43] ETIM - Electric Temperature Increase Monitoring. (2014, 23. November). *Produkt og konsept*. Available: <http://etim.no/ETIM - KONSEPT og PRODUKT.pdf>
- [44] A. Sande and S. W. Brusveen, "Temperaturvarslere for bruk i elektriske installasjoner," 2006.01.05, 2006.
- [45] T. Folckersahm. (2007). *Gassdetektor i el-skap redder liv*. Available: <http://www.tu.no/kraft/2007/11/23/gassdetektor-i-el-skap-redder-liv>
- [46] EFP System and Global Sourcing and Logistics AS. (2009, 21. Oktober). *Neste generasjons brannsikringssystem*. Available: <http://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.moss-automation.no%2Ffiles%2Fmossa.no%2FDocuments%2FPresentasjon%2FPresentasjon%20av%20EFP%20Systemet%20041209.ppt&ei=TnWNVJzkBKipywPY-YHIDQ&usq=AFQjCNEs50FwRczD1RG5T35mhvMB368-dA&sig2=mcWqAXnfRNOI-MLLUVVpnQ&bvm=bv.81828268,d.bGQ>
- [47] H. C. Færden. (2008, Stopper brannen før den begynner. *Eliaden*. Available: http://www.gsl-as.com/images/aktuelt/Ingeniornytt_artikkel.pdf
- [48] "Beskrivelse av EFP Systemet," GSL, Ed., ed, 2008.
- [49] A. Amundsen, "Fremgangsmåte og system for seriefeilvern," 307727, 2000.
- [50] E. Leirset. (2006, Reodorløsning hindrer brann. *Teknisk ukeblad*. Available: <http://www.tu.no/nyheter/energi/2006/02/03/reodorlosning-hindrer-brann>
- [51] P. Hopsø, "Vi introduserer et patent innen; Elsikkerhet," HomeControl, Ed., ed, 2014.
- [52] Dagens Næringsliv. (2014, 10. Desember). *Kan tjene 20 millioner på skoleoppgaven sin*. Available: <http://www.dn.no/talent/2014/10/24/0830/kan-tjene-20-millioner-p-skoleoppgaven-sin>
- [53] "General requirements for arc fault detection devices," vol. 62606, ed: IEC 62606, 2013.
- [54] V. Babrauskas, "'Pyrophoric Carbon' and Long-term, Low-temperature Ignition of Wood."
- [55] B. A. Mostue, "Brannskadeutviklingen i Norge - Tiltak for å redusere brannskadene," NBL A08111, 2008-06-11 2008.
- [56] *Forskrift om tekniske krav til byggverk*, 2010.
- [57] ETM Electrical Co. (5. Juni 2015). *Product information: Etman*. Available: http://efobasen.efo.no/ProductResources/988/FDV/15_FDV_EN_Stikkontakter_innfelt_SCALA_ETM.pdf
- [58] S. Ore and A. Stori, "Plast," in *Store Norske Leksikon*, ed. <https://snl.no/plast>, 2009.
- [59] J. P. S. o. K. Nygård, "Brann på grunn av elektrisk feil i installasjonsmaterieell og lavtemperatur varmepåvirkning fra belysning," Sintef NBL F08120, 2008-09-28 2008.
- [60] Kollegiet for brannfaglig terminologi(KBT). *Faguttrykk*. Available: <http://kbt.no/faguttrykk.asp>
- [61] H. Johansen. (2010). *Materiallære, Plastmaterialer*. Available: <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/plastmaterialer/Materiallaere-plast-kompendium.pdf>
- [62] NEK/NK64, "Elektriske lavspenningsinstallasjoner," vol. NEK 400, ed, 2010.
- [63] E. H. Hansen, *Elektroinstallasjoner: Classica*, Trondheim, 2010.

Vedlegg

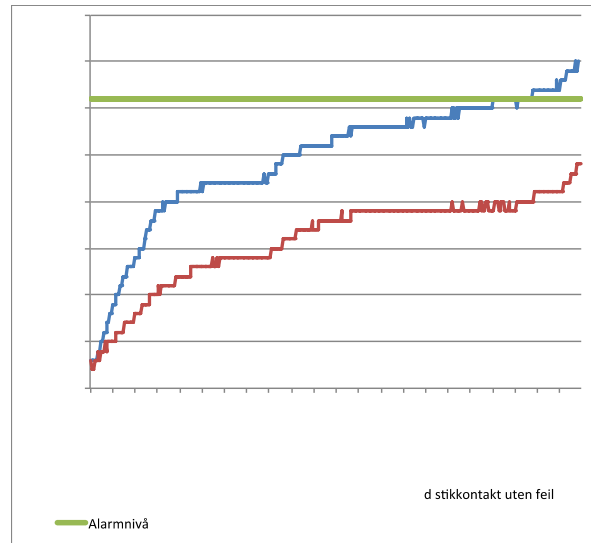
V.1 Utstysrliste

Reg.nr.	Enhet	Produsent	Type
	Lysbuedetektor	Siemens	5SM6021-1
	Lysbuedetektor	X	X
	Automatsikring	Siemens	5SY45 C10
	Automatsikring	X	X
P07-1828	PC	Acer	Aspire 3830T
P07-1877	PC	Dell	Latitude E6430
G04-0363	Oscilloskop	Tektronix	MSO 3014
I06-0357	Differensialprobe	Metrix	MX9002
I04-0519	Tangamperemeter	Fluke	i30s
I04-0514	Tangamperemeter	Amprobe	AC50A
B02-0656	Power supply	Aim	EX355R
A1-013	12V DC motor	Parvalux	242255/8M
K1-147	Motstandsvogn		
S03-0431	Multimeter	Agilent	U1241B
S03-0424	Multimeter	Fluke	177 true RMS multimeter
K01-0363	Skyvemotstand		
K01-0369	Skyvemotstand		
K01-0108	Skyvemotstand		
	Momentskruejern	Belzer	6976 CN
	Hårføner		
	Hårføner		
P02-0190	Støvsuger	Siemens	SUPER XS dino e
P02-0270	Vifteovn	Calor	
	Boremaskin	Dremel	Model 398
	Strykejern	Philips	GC 2510
	Handmikser		
	Stavmikser		
G05-0127	Datalogger	Agilent	34970A Data aquisition/Switch unit
	Temperatursensorer		T-type
	Seriefeilvern	ETIM	
	Seriefeilvern	Home Control	
P07-1827	PC	Acer	Aspire 3830T
P07-1539	PC	Asus	Eee
8120-1689	Datalogger	Agilent	34970A Data aquisition/Switch unit

V.2 Temperaturmålinger ved test av seriefeilvern i testvegg



Figur 88 - Termoelementer.



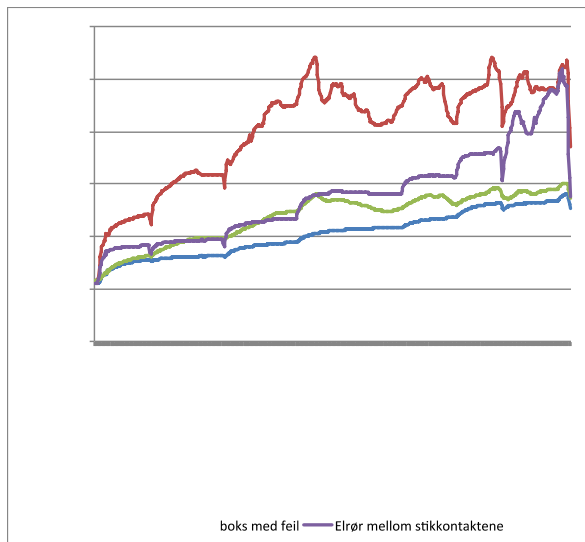
Figur 89 - ETIM-vern.

Skruen er løsnet: 2,5 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

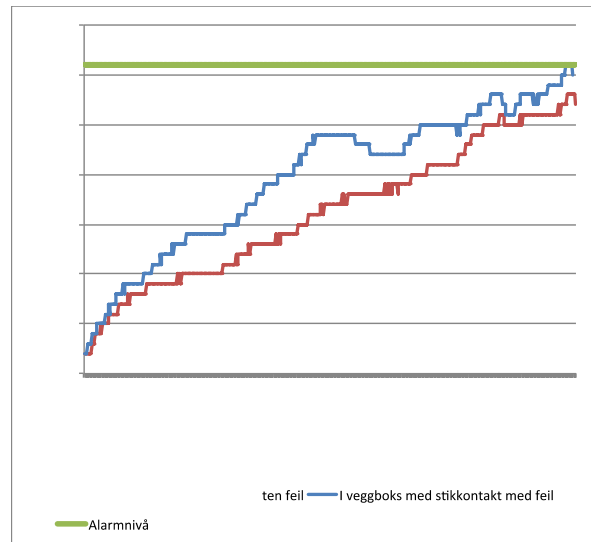
Strømmen i kretsen er 17,24 Ampere

Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

Klokken 19.55 registrerer ETIM-vernet temperaturer over grenseverdien.



Figur 90 - Termoelementer



Figur 91 - ETIM-vern

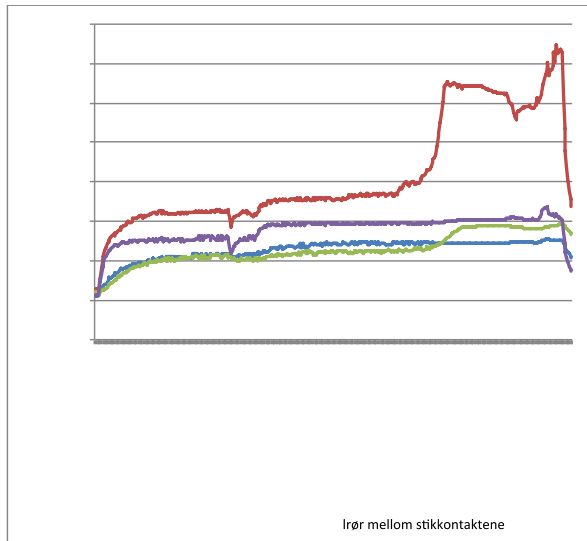
Skruen er løsnet: 3 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

Strømmen i kretsen er 17,4 Ampere

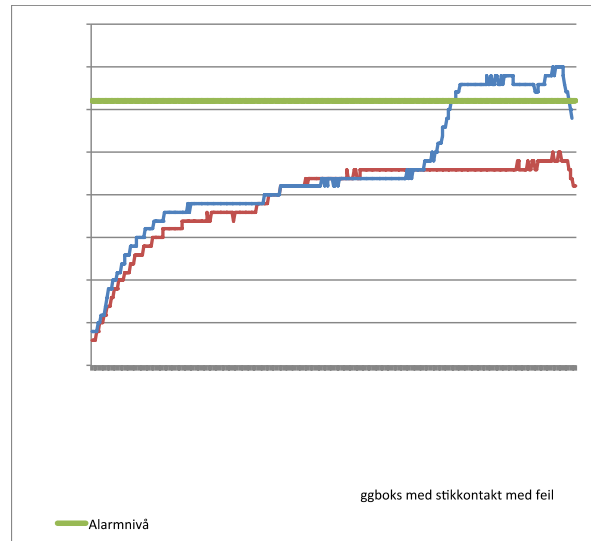
Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

Klokken 21.03 registrerer ETIM-vernet temperaturer over grenseverdien.

Vedlegg



Figur 92 - Termoelementer



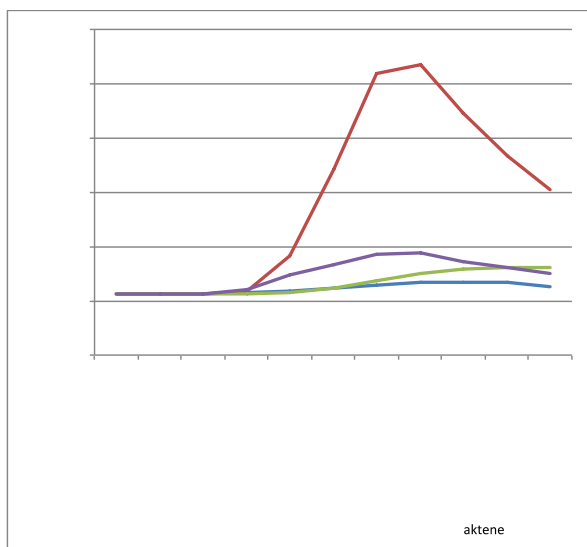
Figur 93 - ETIM-vern

Skruen er løsnet: 2,5 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

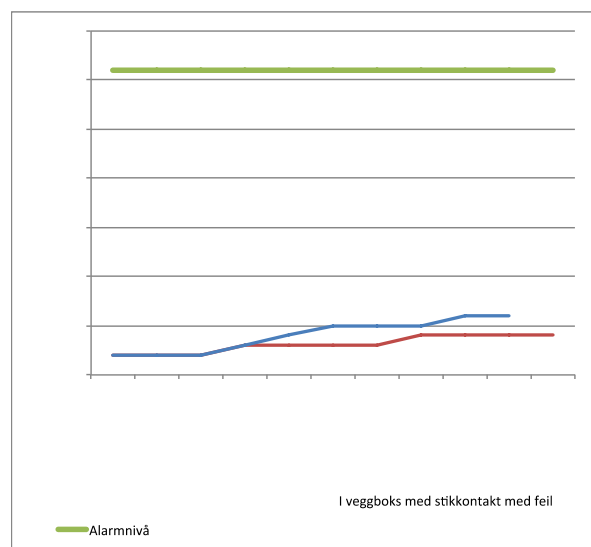
Strømmen i kretsen er 17,4 Ampere

Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

Klokken 20.08 registrerer ETIM-vernet temperaturer over grenseverdien.



Figur 94 - Termoelementer



Figur 95 - ETIM-vern

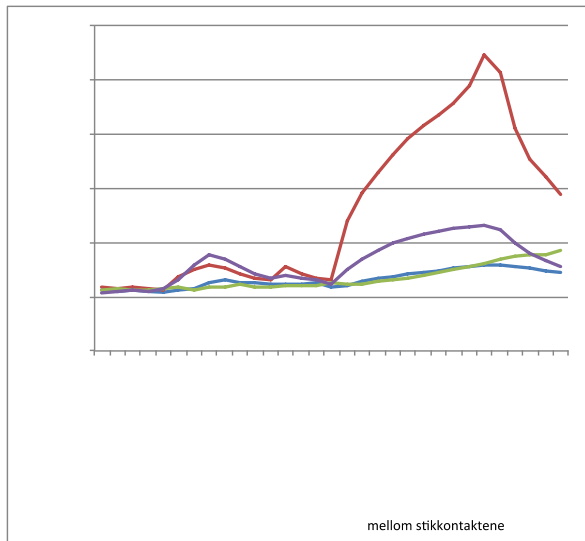
Skruen er løsnet: 2 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

Strømmen i kretsen er 15,8 Ampere

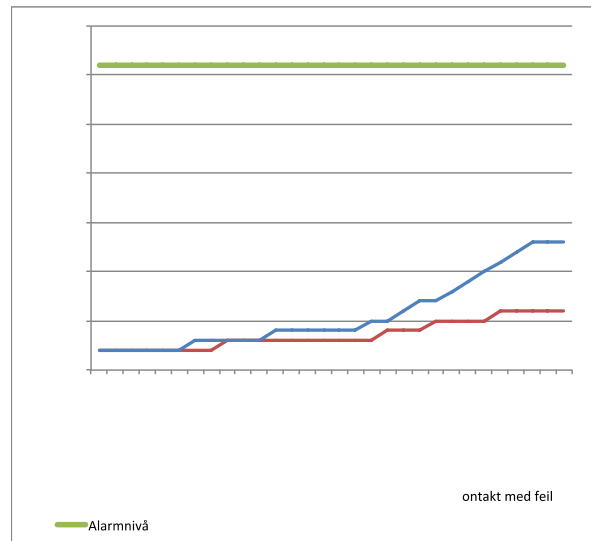
Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

ETIM-vernet måler aldri temperaturer over grenseverdien.

Vedlegg



Figur 96 - Termoelementer



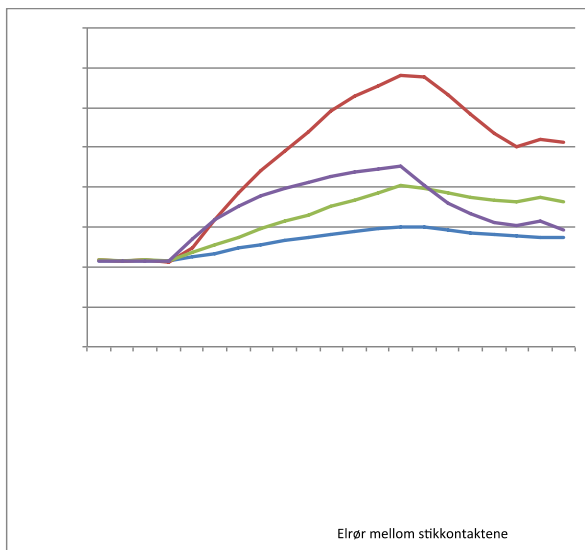
Figur 97 - ETIM-vern

Skruen er løsnet: 2 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

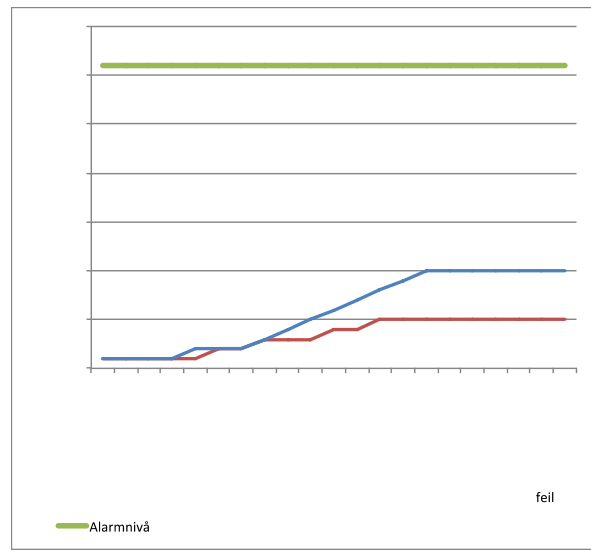
Strømmen i kretsen er 17,4 Ampere

Temperaturen synker drastisk på slutten på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

ETIM-vernet måler aldri temperaturer over grenseverdien på 51 °C.



Figur 98 - Termoelementer



Figur 99 - ETIM-vern

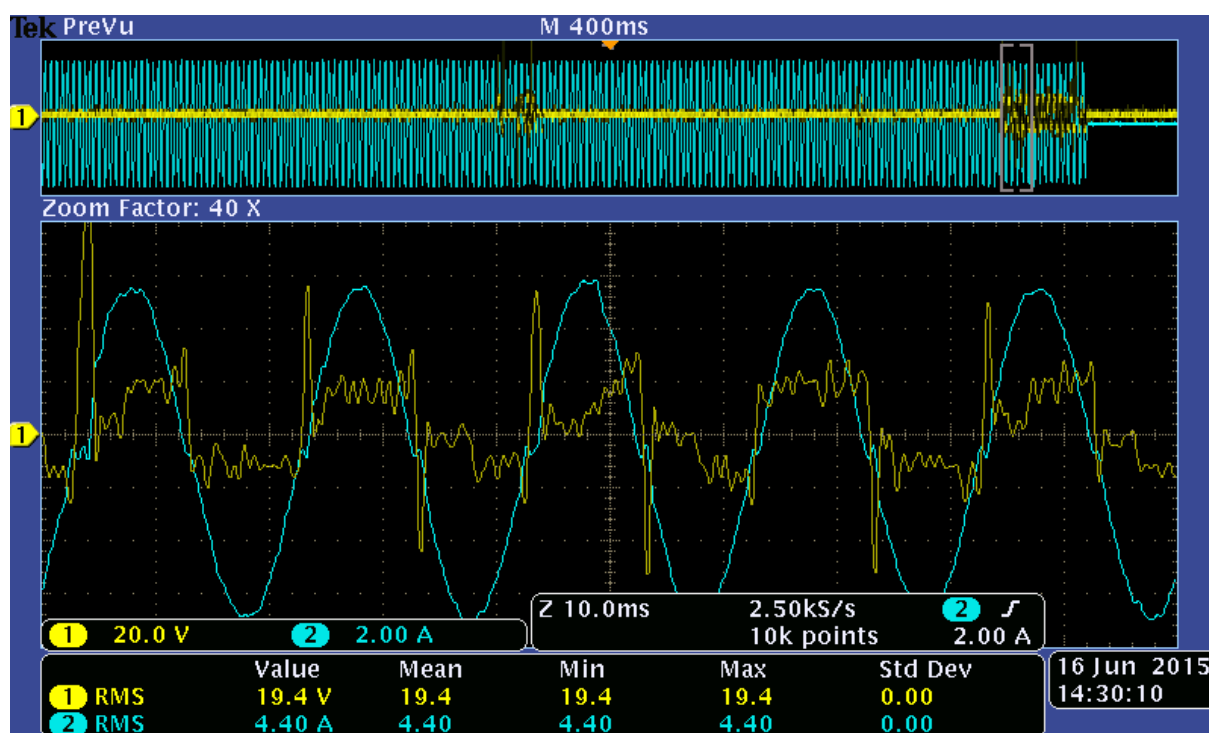
Skruen er løsnet: 2,5 runder etter 1,4Nm tiltrekking.

Strømmen i kretsen er 17,4 Ampere

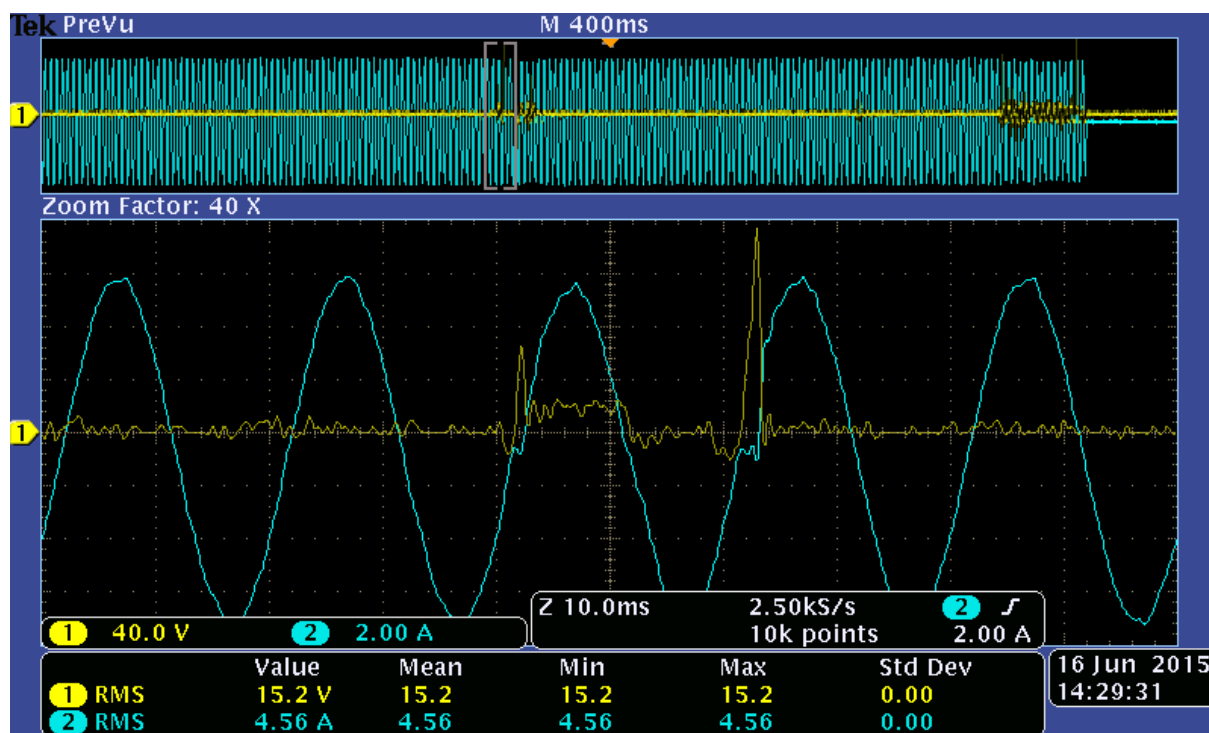
Temperaturen synker etter ti minutter på grunn av jordfeil skapt av seriefeilvernet som lager jordfeil.

ETIM-vernet måler aldri temperaturer over grenseverdien på 51 °C.

V.3 Strøm- og spenningsforløp til lysbuer skapt av vibrasjoner



Figur 100 - Strøm- og spenningsforløp ved lysbue laget med vibrasjoner, like før lysbuevernet detekterer lysbue.



Figur 101 - Strøm- og spenningsforløp ved lysbue laget med vibrasjoner. Lysbuevernet detekterte ingen lysbue ved dette tilfellet.

Vedlegg

V.4 Målinger av lysbuevern testet med kabelprøver etter testmetode fra IEC62606

Test 9.2.2

Arms	Motstand	Teststrøm	Lysbuestrøm(rms)	Maks. brytetid(test)	Maks. brytetid(lysue)	Brytetid	Krav	Krav(%)	Innenfor grenseverdi	Innenfor grenseverdi(%)
16	14,4	12,5	12,7	0,200	0,197	0,058	Ja	Ja	Ja	Ja
15,9	14,5	12,4	12,5	0,201	0,200	0,058	Ja	Ja	Ja	Ja
14,8	15,5	11,6	10,4	0,216	0,240	0,090	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0	7,55	0,313	0,331	0,250	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0	6,86	0,313	0,364	0,310	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0		0,313			Brant opp	Nei		
10,22	22,5	8,0	7,45	0,313	0,336	0,260	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0	7,24	0,313	0,345	0,210	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0	7,45	0,313	0,336	0,250	Ja	Ja	Ja	Ja
10,22	22,5	8,0	7,26	0,313	0,344	0,240	Ja	Ja	Ja	Ja
10	23,0	7,8	7,47	0,319	0,335	0,221	Ja	Ja	Ja	Ja
10	23,0	7,8	7,71	0,319	0,324	0,220	Ja	Ja	Ja	Ja
10	23,0	7,8	7,65	0,319	0,327	0,250	Ja	Ja	Ja	Ja
10	23,0	7,8	7,53	0,319	0,332	0,240	Ja	Ja	Ja	Ja
7	32,9	5,5	5,2	0,456	0,481	0,359	Ja	Ja	Ja	Ja
7	32,9	5,5	5,34	0,456	0,468	0,350	Ja	Ja	Ja	Ja
7	32,9	5,5	4,91	0,456	0,509	0,360	Ja	Ja	Ja	Ja
7	32,9	5,5	5,3	0,456	0,472	0,352	Ja	Ja	Ja	Ja
7	32,9	5,5	5	0,456	0,500	0,371	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,41	0,639	0,733	0,560	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,41	0,639	0,733	0,569	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,41	0,639	0,733	0,559	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	2,17	0,639	1,152	0,698	Nei	Ja	Ja	Nei
5	46,0	3,9	3,12	0,639	0,801	0,618	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,8	0,639	0,658	0,439	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,9	0,639	0,641	0,450	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,82	0,639	0,654	0,460	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,58	0,639	0,698	0,520	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,68	0,639	0,679	0,450	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,88	0,639	0,644	0,479	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,4	0,639	0,735	0,560	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,5	0,639	0,714	0,560	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,55	0,639	0,704	0,577	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,68	0,639	0,679	0,562	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,61	0,639	0,693	0,558	Ja	Ja	Ja	Ja
5	46,0	3,9	3,5	0,639	0,714	0,569	Ja	Ja	Ja	Ja
4,6	50,0	3,6	3,13	0,694	0,799	0,559	Ja	Ja	Ja	Ja
4,55	50,5	3,6	3,27	0,702	0,765	0,559	Ja	Ja	Ja	Ja
4,55	50,5	3,6	3,31	0,702	0,755	0,580	Ja	Ja	Ja	Ja
4,55	50,5	3,6	2,21	0,702	1,131	0,799	Nei	Ja	Ja	Nei
4,5	51,1	3,5	3,2	0,710	0,781	0,569	Ja	Ja	Ja	Ja
4,5	51,1	3,5	3,2	0,710	0,781	0,571	Ja	Ja	Ja	Ja
4,5	51,1	3,5	3,36	0,710	0,744	0,579	Ja	Ja	Ja	Ja
4,19	54,9	3,3	3,47	0,762	0,720	0,089	Ja	Ja	Ja	Ja
4,19	54,9	3,3		0,762			Brant opp	Nei		
4,13	55,7	3,2	3,35	0,773	0,746	0,109	Ja	Ja	Ja	Ja
4,1	56,1	3,2	2,89	0,779	0,865	0,089	Ja	Ja	Ja	Ja
4,1	56,1	3,2	3	0,779	0,833	0,101	Ja	Ja	Ja	Ja
4,1	56,1	3,2	3,37	0,779	0,742	Brant opp	Nei	Ja	Ja	Ja
4	57,5	3,1	2,02	0,799	1,238	0,759	Ja	Ja	Ja	Nei
4	57,5	3,1	2,21	0,799	1,131	0,760	Ja	Ja	Ja	Nei
4	57,5	3,1	2,72	0,799	0,919	0,760	Ja	Ja	Ja	Ja
4	57,5	3,1	2,88	0,799	0,868	0,560	Ja	Ja	Ja	Ja
4	57,5	3,1	2,79	0,799	0,896	0,590	Ja	Ja	Ja	Ja
4	57,5	3,1	2,86	0,799	0,874	0,768	Ja	Ja	Ja	Ja
3,8	60,5	3,0	2,6	0,841	0,962	0,553	Ja	Ja	Ja	Ja
3,8	60,5	3,0	2,64	0,841	0,947	0,552	Ja	Ja	Ja	Ja
3,8	60,5	3,0	2,78	0,841	0,899	0,549	Ja	Ja	Ja	Ja
3,8	60,5	3,0	2,65	0,841	0,943	0,610	Ja	Ja	Ja	Ja
3,5	65,7	2,7	2,34	0,913	1,068	0,600	Ja	Ja	Ja	Nei
3,5	65,7	2,7	2,34	0,913	1,068	0,751	Ja	Ja	Ja	Nei
3,5	65,7	2,7	2,28	0,913	1,096	0,772	Ja	Ja	Ja	Nei
3,5	65,7	2,7	2,52	0,913	0,992	0,767	Ja	Ja	Ja	Ja
3,28	70,1	2,6	1,52	0,974	1,645	0,099	Ja	Ja	Ja	Nei
3,28	70,1	2,6		0,974			Brant opp	Nei	Ja	
3,28	70,1	2,6		0,974			Brant opp	Nei	Ja	
3,28	70,1	2,6	1,83	0,974	1,366	0,990	Nei	Ja	Ja	Nei
3	76,7	2,3	1,64	1,065	1,524	0,760	Ja	Ja	Nei	Nei
3	76,7	2,3	1,74	1,065	1,437	0,758	Ja	Ja	Nei	Nei
3	76,7	2,3	1,64	1,065	1,524	Brant opp	Nei	Nei	Nei	Nei
3	76,7	2,3	1,86	1,065	1,344	0,759	Ja	Ja	Nei	Nei
2,86	80,4	2,2	1,36	1,117	1,838	Brant opp	Nei	Nei	Nei	Nei
2,85	80,7	2,2	1,66	1,121	1,506	0,158	Ja	Ja	Nei	Nei
2,85	80,7	2,2	1,64	1,121	1,524	Brant opp	Nei	Nei	Nei	Nei
2,5	92,0	2,0		1,278			Brant opp	Nei	Nei	
2	115,0	1,6		1,597			Brant opp	Nei	Nei	

Brant opp lødning lysbue

12 Tilfeller av 76

10 Brant opp

Vedlegg

Test 9.9.2.3
Arms Motstand Teststrøm

,9	1,7	1,315	1,497	0,857	Ja	Ja	Nei	Nei	1 tilfeller
----	-----	-------	-------	-------	----	----	-----	-----	-------------

Vedlegg

V.5 Deteksjonstider – lysbuevern testet med lysbuegenerator

Motstand	Strøm	Lysbuestrøm	Lysbuespenning[mVrms]	Målt brytetid	Brytetid	Krav tilfredsstillt
91,5	2,5	2,5	83,7	0,793	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	82,2	0,814	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	82,3	0,816	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	82,4	0,820	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	89,8	0,827	2,486	Ja
91,5	2,5	2,4	174,0	0,776	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	80,3	0,855	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	79,4	0,812	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	82,5	0,802	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	83,0	0,817	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	82,3	0,813	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	81,7	0,808	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	97,1		2,486	Nei
91,5	2,5	2,5	94,4		2,486	Nei
91,5	2,5	2,5	96,8		2,486	Nei
91,5	2,5	2,5	114,0		2,486	Nei
91,5	2,5	2,5	82,0	0,582	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	81,3	0,608	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	81,1	0,449	2,486	Ja
91,5	2,5	2,5	81,1	0,517	2,486	Ja
73,6	3,1	3,0	83,2		2,188	Nei
73,6	3,1	3,0	97,5		2,188	Nei
73,6	3,1	3,0	91,6		2,188	Nei
73,6	3,1	2,9	78,5	0,282	2,188	Ja
73,6	3,1	3,0	81,9	0,178	2,188	Ja
73,6	3,1	2,5	70,3	0,187	2,188	Ja
73,6	3,1	3,0	86,2	0,181	2,188	Ja
73,1	3,2	3,0	84,2	0,695	2,175	Ja
73,1	3,2	3,0	77,2	0,380	2,175	Ja
73,1	3,2	3,0	86,7	0,648	2,175	Ja
72,7	3,2	3,0	84,7	0,615	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	84,7	0,594	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	84,7	0,619	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	84,7	0,600	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	101,0	0,593	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	98,3	0,603	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	106,0	0,592	2,168	Ja
72,7	3,2	3,0	104,0	0,587	2,168	Ja
36,9	6,2	5,8	92,0		1,096	Nei
36,9	6,2	5,8	73,3		1,096	Nei
36,9	6,2	5,8	88,2		1,096	Nei
36,8	6,3				1,094	Nei
36,8	6,3				1,094	Nei
36,8	6,3				1,094	Nei
36,8	6,3	5,7	79,9		1,094	Nei
36,6	6,3	5,8	84,7		1,089	Nei
36,6	6,3	5,6	84,7		1,089	Nei
36,6	6,3	6,8	84,7	0,304	1,089	Ja
36,6	6,3	5,0	84,7	0,368	1,089	Ja
36,5	6,3	5,8	110,0	0,333	1,087	Ja
36,5	6,3	5,8	99,6	0,339	1,087	Ja
36,5	6,3	5,8	104,0	0,338	1,087	Ja
36,5	6,3	5,8	81,0	0,376	1,087	Ja
36,1	6,4	5,9	84,6	0,480	1,079	Ja
36,1	6,4	5,8	87,0	0,339	1,079	Ja
36,1	6,4	5,2	79,4	0,333	1,079	Ja
14,4	16,0	14,8	70,2	0,185	0,375	Ja
14,4	16,0	14,7	70,2	0,117	0,375	Ja
14,4	16,0	13,2	524,0	0,135	0,375	Ja
14,4	16,0	14,8	72,7	0,203	0,375	Ja
14,4	16,0	10,9	39,7	0,165	0,375	Ja
14,4	16,0	14,6	168,0	0,203	0,375	Ja
14,4	16,0	14,8	76,0	0,234	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	105,0	0,366	0,375	Ja
14,4	16,0	14,7	141,0	0,526	0,375	Nei
14,4	16,0	12,3	641,0	0,164	0,375	Ja
14,4	16,0	14,8	66,5	0,097	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	62,3	0,136	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	60,4	0,102	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	77,2	0,104	0,375	Ja
14,4	16,0	17,7	97,0	0,115	0,375	Ja
14,4	16,0	14,0	366,0	0,151	0,375	Ja
14,4	16,0	14,8	73,6	0,104	0,375	Ja
14,4	16,0	14,7	108,0	0,107	0,375	Ja
14,4	16,0	13,9	378,0	0,104	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	62,4	0,135	0,375	Ja
14,4	16,0	14,9	60,4	0,196	0,375	Ja
14,4	16,0	14,8	61,1	0,185	0,375	Ja