

Seriefeilvern i elektriske installasjoner

Carl Olav Larsson

Master of Science in Electric Power EngineeringInnlevert:Juni 2012Hovedveileder:Eilif Hugo Hansen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Institutt for elkraftteknikk



Oppgavetekst

Elektriske anlegg forårsaker årlig mange branner og medfører årlig store brannskader i Norge. Seriefeil, dvs. overgangsmotstand i kontaktpunkter, anses å være en av de hyppigste brannårsakene. Gjeldende regelverk (FEL/NEK 400) stiller ved hver revisjon strengere krav spesielt for å forhindre branner, men det har hittil ikke blitt stilt krav til seriefeilvern i Norge. Dette skyldes begrensninger i tilgjengelige løsninger for deteksjon av seriefeil på det norske markedet. Andre land har imidlertid begynt å stille krav om seriefeilvern.

Kandidaten skal:

- Undersøke ulike prinsipper for deteksjon av seriefeil
- Undersøke om det finnes løsninger for deteksjon av seriefeil på det norske markedet
- Undersøke løsninger for deteksjon av seriefeil i de land som stiller krav til seriefeilvern
- Gjennomføre laboratorieforsøk som simulerer de forhold som kan oppstå ved seriefeil i elektriske anlegg. Forsøkene bør også undersøke hvor mye den termiske isolasjonen i veggen innvirker på temperaturutviklingen i koblingspunkter i en elektrisk installasjon med skjult installasjonsmetode.

Oppgaven gitt:16. januar 2012Hovedveileder:Eilif Hugo Hansen

FORORD

Denne rapporten utgjør vurderingsgrunnlaget i emnet TET4910 Masteroppgave ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet vårsemesteret 2012. Hovedveileder for denne masteroppgaven var Eilif Hugo Hansen ved Institutt for elkraftteknikk. Arbeidet startet 16. januar og ble avsluttet 11. juni 2012.

Normal praksis ved NTNU er å skrive om samme problemstilling ved både fordypningsprosjekt og masteroppgave, hvor fordypningsprosjektet fungerer som en forstudie til masteroppgaven. Etter fordypningsprosjektet ble det imidlertid konkludert med at den daværende problemstillingen ikke gav grunnlag for en hel masteroppgave. Problemstillingen som presenteres i denne rapporten baseres derfor kun på undersøkelser utført etter 16. januar.

Laboratorieforsøkene som ble utført under arbeidet med denne rapporten bestod av mange måleserier, og alle resultatene presenteres derfor ikke i selve rapporten. Alle diagrammer med fullstendig informasjon presenteres imidlertid i vedlegg, i tillegg til at alle måledataene er tilgjengelig elektronisk.

Jeg ønsker å takke bedrifter og kontaktpersoner for at de velvillig har stilt opp med opplysninger jeg har søkt. Jeg ønsker spesielt å takke følgende personer for veiledning under arbeidet med denne rapporten:

Eilif Hugo Hansen, hovedveileder

Otto K. Sønju ved Electric Temperature Increase Monitoring (ETIM)

Bård Almås, avdelingsingeniør ved NTNU

Frank Mauseth, førsteamanuensis ved NTNU

Magne Runde, professor II ved NTNU

Trondheim, 11. juni 2012

Carl Olav Larsson

SAMMENDRAG

Seriefeil, dvs. overgangsmotstand i kontaktpunkter, har i lang tid vært en fremtredende brannårsak i norske bygninger, og er en av de hyppigste brannårsakene i elektriske anlegg. 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. Hovedmålet med denne oppgaven var derfor å undersøke om det finnes løsninger for deteksjon av seriefeil på markedet, hvilke krav andre land stiller til slike vern og hvilke løsninger for deteksjon av seriefeil som finnes i de land som stiller til krav seriefeilvern.

Denne rapporten presenterer flere løsninger for deteksjon av seriefeil, som enten allerede finnes på det norske markedet eller gjøres tilgjengelig innen kort tid. Det er derfor ikke mangelen på tilgjengelige løsninger som begrenser muligheten for å installere disse produktene i norske elektriske anlegg. Det foreslås derfor at tilsynsmyndighetene vurderer å anbefale installasjon av seriefeilvern i norske elektriske installasjoner, slik det gjøres i bl.a. USA, for å redusere antall branner med elektrisk årsak.

Rapporten presenterer laboratorieforsøk hvor det ble undersøkt hvilke temperaturer som kan oppstå i reelle elektriske installasjoner med skjult installasjonsmetode, under både normale forhold og ved elektriske feil. Forsøkene undersøkte også funksjonaliteten til et seriefeilvern, kalt Electric Temperature Increase Monitoring, og hvor mye den termiske isolasjonen i veggen influerer temperaturutviklingen i koblingspunktene. Seriefeilvernet var kun en prototype på det tidspunktet det ble testet. Resultatene fra forsøkene gav følgende konklusjoner:

- Hovedproblemet med seriefeil i elektriske installasjoner er sannsynligvis hovedsakelig glødende kontaktforbindelser, og ikke serielysbue. Begrunnelsen for dette ble basert på observasjoner foretatt under forsøk med regulerbare gap, hvor det var vanskelig å opprettholde en strømbegrenset lysbue over lang tid ved 230 V AC.
- Ved forskriftsmessig utførelse kan det oppstå temperaturer på 55,3 °C i koblingspunkt i løpet av 5 timer. Ledertemperaturen var sannsynligvis noe høyere, og dermed nær lederisolasjonens temperaturgrense på 70 °C.
- Ved kontaktsvikt ble det for alle forsøkene registrert temperaturer over lederisolasjonens temperaturgrense. Forsøk på 2,5 mm² ledertverrsnitt medførte temperaturer på 94,3 °C ved 15,5 A, og 131,9 °C ved 17,5 A belastningsstrøm.
- Høye belastningsstrømmer i kombinasjon med dårlig kontaktforbindelse medførte større skader på installasjonsmateriellet, og det konkluderes derfor med at denne typen elektrisk feil i høyeste grad kan være brannfarlig.
- Det ble kun observert mindre temperaturforskjeller ved ulik grad av termisk isolasjon.
- Seriefeilvernet som ble undersøkt fungerte hensiktsmessig, både under normale forhold og ved elektriske feilkilder i kretsen.

ABSTRACT

Series faults, i.e. transition resistance in contact spots, is a prominent cause of fire in Norwegian buildings, and is one of the most frequent causes of fires in electrical installations. Due to limitations in available solutions for detection of series faults on the Norwegian market, there has not been made requirements for installation of series fault protection in Norway yet. Other countries have however begun to require such protection. The main objective of this study was to examine whether there are solutions for detection of series faults on the Norwegian market, which requirements other countries have for installation of series fault protection, and which solutions for series fault detection exist in these countries.

This report presents several solutions for detection of series faults, which are either already on the Norwegian market or will be made available shortly. Thus, it is not the lack of available solutions that limit the ability to install these products in Norwegian buildings. It is therefore suggested that the authorities starts to consider recommending the installation of series fault protection in Norwegian electric installations, as it is done in the United States, to reduce the number of fires caused by electrical installations.

The report presents laboratory experiments which examine temperatures that can occur in real electrical installations, under both normal conditions and electrical faults. The experiments also examined the functionality of a series fault protection device, called Electric Temperature Increase Monitoring, and how much the thermal insulation in the wall influences the temperature development in junction points. The results of these experiments yielded the following conclusions:

- The main problem with series faults in electrical installations is probably mainly glowing contacts, and not series arcs. This conclusion was based on observations made during tests with an adjustable gap, where it was found difficult to maintain a current limited arc at 230 V AC.
- An installation in accordance with regulations can cause temperatures of 55.3 °C in junction points during 5 hours. The conductor temperature was likely somewhat higher, and thus closer to the insulation temperature limit of 70 °C.
- In experiments with low contact force, all the experiments showed temperatures above the temperature limit for the cable insulation. Experiments with 2.5 mm² cross-section caused temperatures of 94.3 °C at 15.5 A, and 131.9 °C at 17.5 A load current.
- High load currents in combination with low contact force resulted in major damage to the installation equipment, and it is therefore concluded that this type of electrical fault in the highest degree can be flammable.
- It was observed only minor temperature differences at different levels of thermal insulation.
- The series fault protection device which was examined acted appropriately, both under normal conditions and during electrical faults in the circuit.

INNHOLDSFORTEGNELSE

Fo	orordi
Sa	nmmendragiii
A	bstractv
In	nholdsfortegnelsevi
1	Introduksjon1
2	Teori2
	2.1 Branner i elektriske anlegg
	2.1.1 Feil bruk av elektrisk utstyr
	2.1.2 Elektrisk årsak
	2.2 Stasjonære kontaktpunkter
	2.2.1 Kontaktflate
	2.2.2 Innsnevringsmotstand
	2.2.3 Temperaturutvikling
	2.3 Lysbuer
	2.3.1 Paschens lov
	2.3.2 Potensialfordelingen i en lysbue10
	2.3.3 Former for lysbuer10
	2.4 Seriefeil
	2.4.1 Serielysbue
	2.4.2 Glødende kontaktforbindelse12
	2.5 Krav til beskyttelse mot termiske virkninger
	2.5.1 Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (FEL)13
	2.5.2 NEK 400
	2.6 Krav til termisk isolasjon i bygninger
3	Deteksjonsprinsipper17
	3.1 Analyse av strømkarakteristikk17
	3.1.1 Lysbuefeilbryter (AFCI)
	3.1.2 Lysbuevakt
	3.2 Analyse av temperaturutvikling
	3.2.1 Electric Temperature Increase Monitoring21
	3.2.2 Deteksjon via kunstig jordfeil22
	3.2.3 Electric Fire Prevention
4	Forberedende laboratorieforsøk
	4.1 Bakgrunn
	4.2 Måleoppsett og -utstyr
	4.3 Måleprosedyrer
	4.4 Resultater
5	Laboratorieforsøk med seriefeilvern

	5.1 Bakgrunn	32	
	5.2 Testobjektet	33	
	5.3 Prøvevegg	34	
	5.3.1 Konstruksjon	. 34	
	5.3.2 Installasjonsmetode	.35	
	5.3.3 Installasjonsmateriell	.36	
	5.4 Forsøksparametere	37	
	5.4.1 Belastningsstrøm	.37	
	5.4.2 Endring av ledertverrsnitt	. 38	
	5.4.3 Kontaktkraft	. 38	
	5.5 Måleoppsett og -utstyr	39	
	5.6 Måleprosedyrer	41	
	5.6.1 God kontaktforbindelse	. 42	
	5.6.2 Dårlig kontaktforbindelse	. 43	
	5.6.3 Kontrollert lysbue	. 43	
	5.7 Resultater	45	
	5.7.1 God kontaktforbindelse	. 45	
	5.7.2 Dårlig kontaktforbindelse	.47	
	5.7.3 Kontrollert lysbue	.51	
6	Diskusjon	54	
	6.1 Generelt	54	
	6.2 Deteksjonsprinsipper	54	
	6.3 Forberedende forsøk	55	
	6.4 Laboratorieforsøk med seriefeilvern	56	
	6.4.1 Generelt	. 56	
	6.4.2 Resultater	.57	
	6.4.3 Feilkilder	.60	
	6.4.4 Seriefeilvern	.61	
	6.4.5 Termiske skader på materiell	.61	
	6.5 Henstilling til tilsynsmyndighetene	62	
	6.6 Forslag til videre arbeid	63	
7	Konklusjon	.64	
Referanser			
V	edlegg	.67	

1 INTRODUKSJON

Elektriske anlegg forårsaker mange branner og medfører årlig store brannskader i Norge.

"Elektrisk årsak" og "feil bruk av elektrisk utstyr" ble registrert som brannårsak på 50 % av alle boligbranner med kjent årsak og på 25 % av dødsbrannene i perioden 2002-2010, i følge DSBs brannårsaksstatistikk [1]. En av de hyppigste årsakene til disse brannene er seriefeil, og det er ønskelig med en nærmere kartlegging av emnet for å kunne redusere antallet branner forårsaket av denne typen elektrisk feil.

Seriefeil i en belastet elektrisk krets finnes der det av en eller annen grunn oppstår stor overgangsmotstand. Seriefeil oppstår oftest i koblingspunkter, og kan skyldes ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmer, brudd i ledere og lignende. Når overgangsmotstanden øker vil det ved strømgjennomgang utvikles varme, som videre kan føre til brann. Intensjonen med å installere et seriefeilvern vil derfor være å begrense skadene hvis en seriefeil skulle oppstå, ved å detektere seriefeilen før varmeutviklingen blir så høy at det oppstår brann.

Gjeldende regelverk (FEL/NEK 400) stiller ved hver revisjon strengere krav spesielt for å forhindre branner, men det har hittil ikke blitt stilt krav til seriefeilvern i Norge. Dette skyldes begrensninger i tilgjengelige løsninger for deteksjon av seriefeil på det norske markedet. Andre land har imidlertid begynt å stille krav om seriefeilvern. Med utgangspunkt i dette vil oppgaven som blir beskrevet i denne rapporten gå ut på å undersøke om det finnes løsninger for deteksjon av seriefeil på det norske markedet, hvilke krav andre land stiller til seriefeilvern, og hvilke løsninger for deteksjon av seriefeil som finnes i de land som stiller til krav seriefeilvern. Ut fra kartleggingen skal det også utføres laboratorieforsøk som simulerer de forhold som kan oppstå når en seriefeil utvikles i et reelt elektrisk anlegg. Disse forsøkene vil også undersøke hvor mye den termiske isolasjonen i veggen innvirker på temperaturutviklingen i koblingspunkter i en elektrisk installasjon med skjult installasjonsmetode.

Rapporten vil inneholde et kapittel som beskriver det teoretiske grunnlaget for oppgaven, et kapittel som gjør rede for ulike deteksjonsprinsipper for deteksjon av seriefeil, før det vil bli presentert forberedende laboratorieforsøk, hvor det blir undersøkt hvilken effektutvikling en seriefeil kan forårsake. Deretter vil det bli presentert laboratorieforsøk hvor det blir undersøkt hvilke temperaturer som kan oppstå i en elektrisk installasjon med skjult installasjonsmetode. Dette kapittelet beskriver også det eksperimentelle oppsettet, testprosedyrene og resultatene fra forsøkene. Rapporten avsluttes med en diskusjonsdel som leder til en konklusjon.

2 TEORI

Dette kapittelet beskriver det teoretiske grunnlaget for oppgaven, og innebærer teori knyttet til branner i elektriske anlegg, lysbuer, stasjonære kontaktpunkter, seriefeil, krav til beskyttelse mot termiske virkninger og krav til termisk isolasjon i bygninger.

2.1 Branner i elektriske anlegg

Den nasjonale brannstatistikken føres av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), og blir basert på rapporter om brannårsak fra både brannvesen og politi- og lensmannsetaten. Da mange mindre branner og branntilløp, som slokkes av beboerne selv, ikke blir meldt til brannvesen eller politi, vil brannstatistikken ikke inneholde informasjon fra absolutt alle branner og branntilløp i Norge. I den sammenheng kan det nevnes at det blir registrert om lag 15-20 ganger flere branner i beboelse i forsikringsselskapenes statistikk, sammenlignet med antall boligbranner i DSBs statistikk. Brannårsaksstatistikken inneholder opplysninger om bl.a. brannårsaker, arnested og bygningstype, og gir derfor et bilde av brannskadeutviklingen i Norge.[2][3]

Rundt 3000 av brannvesenets årlige utrykninger gjelder bygningsbranner, og om lag halvparten av disse er boligbranner. Hvert år omkommer mellom 50 og 70 mennesker av branner i Norge, hvor rundt 25 % skyldes branner som oppstår i elektriske anlegg. Av disse er seriefeil en fremtredende årsak. Den største dødsårsaken i elektriske anlegg er tørrkoking.[1][3]

Figur 2-1 illustrerer årsaksfordelingen til alle boligbranner i brannstatistikken med kjent årsak fra 2002 til 2010 [1].





I brannårsaksstatistikken inkluderer branner som oppstår i elektriske anlegg både branner forårsaket av feil bruk av elektrisk utstyr og branner på grunn av teknisk svikt. Figur 2-1 viser at

elektriske anlegg forårsaker en stor andel av norske boligbranner, ved at branner med elektrisk årsak og feil bruk av elektrisk utstyr utgjorde 50 % av alle boligbranner med kjent årsak i perioden 2002-2010 (31 % av alle registrerte boligbranner). Det var omtrent like mange branner innenfor de to nevnte årsakskategoriene.

En av grunnene til at Norge har så stor andel branner som oppstår i elektriske anlegg kan skyldes at Norge i stor grad bruker elektrisitet som energikilde i boliger.[2]

2.1.1 Feil bruk av elektrisk utstyr

Feil bruk av elektrisk utstyr innebærer for eksempel tørrkoking eller tildekking av elektrisk varmeavgivende utstyr. Bortsett fra advarsler på selve utstyret, blir det vanskelig for myndighetene å hindre denne typen branntilløp. Figur 2-2 viser at tørrkoking er den brannårsaken ved feil bruk av elektrisk utstyr som opptrer hyppigst, med over 50 % i perioden 2002-2010.[1]



Figur 2-2: Fordeling av branner ved feil bruk av elektrisk utstyr i perioden 2002-2010

Siden denne brannårsaken er så dominerende ble det i siste utgave av NEK 400 [4] derfor innført krav til komfyrvakt i norske boliger. Kravet, som fremgår i pkt. 823.421.01 i NEK 400, beskriver at: "For å redusere risiko for brann ved bruk av komfyr/platetopp, skal det anordnes beskyttelsestiltak som sørger for utkobling av strømtilførselen til komfyren/platetoppen dersom det oppstår fare for overoppheting."

2.1.2 Elektrisk årsak

Brannårsakskategorien "elektrisk årsak" omfatter hovedsakelig branner i installasjonsmateriell, dvs. i den faste installasjonen. Disse brannene skyldes bl.a.: [5]

- Varmgang på grunn av overgangsmotstand i koblingspunkter (kontaktsvikt)
- Isolasjonsfeil eller isolasjonssvikt som resulterer i feilstrømmer eller lekkasjestrømmer
- Brudd i en leder
- Antennelse av omgivelsene på grunn av lysbue ved kortslutning
- Overspenninger (lynoverspenning, koblingsoverspenning eller temporære overspenninger)

En gjennomgang av elektriske brannårsaker viser at koblingspunkter er det svakeste leddet i et elektrisk anlegg. Et koblingspunkt er det punktet hvor to ledere er koblet sammen eller koblet til annet installasjonsmateriell. Slike koblingspunkt kan finnes i hulrom i en vegg, hvor de nærmeste brennbare materialer kan være relativt lett antennelige materialer som for eksempel rester av gammel papir- eller tekstiltapet. En problemstilling er også at hvor elektriske feil tidligere medførte at brannen stoppet i koblingspunktet, erfares det nå at brannen sprer seg videre. Dette kan trolig skyldes at det benyttes plastprodukter som antenner for lett. Dette medfører at slike feil, som for eksempel seriefeil, kan forårsake store brannskader. *Figur 2-3* og *Figur 2-4* illustrerer branntilløp som følge av kontaktsvikt.[6]





Figur 2-3: Branntilløp i stikkontakt [6]

Figur 2-4: Branntilløp i stikkontakt [7]



Figur 2-5: Fordeling av branner med elektrisk årsak i perioden 2002-2010

Figur 2-5 viser prosentvis fordeling av boligbranner med elektrisk årsak i perioden 2002-2010 [1]. Dette diagrammet viser at serielysbue var den hyppigste brannårsaken i elektrisk installasjonsmateriell i Norge i tillegg til "annet", og utgjorde gjennomsnittlig 32 % av boligbrannene med elektrisk årsak. Til sammen utgjorde disse årsakene 90 % av boligbrannene.

Brannårsaker registrert som serielysbue virker imidlertid ikke å være en like hyppig brannårsak i andre land som det er naturlig å sammenligne seg med, som i Norge. Serielysbue i brannårsakssammenheng er derfor høyst sannsynlig samme fenomen som det andre land registrerer som glødende kontaktforbindelse. Ettersom både serielysbue og glødende kontaktforbindelse er typiske seriefeil, og begge skyldes kontaktsvikt, tyder mye på at de registreres som samme feil. Dette indikerer at brannetterforskere tolker elektriske feil forskjellig, sannsynligvis på grunn av at årsaken til elektriske branner enda ikke er forstått skikkelig. Det påpekes imidlertid at forskjellene mellom fenomenene etter et brannforløp kan være vanskelig å skille, selv om definisjonen er noe ulik.[6]

En rapport fra NTNU/SINTEF (1991) [8] basert på flere forsøk med glødende kontaktforbindelser støtter påstanden om at branner som skyldes seriefeil ikke nødvendigvis skyldes serielysbue. Denne rapporten beskriver at: "Det er svært sannsynlig at prosessene som ble demonstrert i modellforsøkene også vil finne sted i løse kontakter under reelle forhold. Det antas at de representerer en mer sannsynlig forklaring enn lysbuer for det store antallet branner forårsaket av seriefeil." Forskjellen mellom disse to feilkildene beskrives ytterligere i kapittel 2.4.1 og 2.4.2.

Plastmaterialer som blir anvendt i elektrisk materiell og utstyr godkjennes i henhold til den europeiske standarden IEC 60695, "Glow wire test method". Etter denne standarden utsettes plastmateriellet for temperaturer som kan oppstå ved glødende kontaktforbindelser (1200-1300 °C), da dette er den dominerende seriefeilen i resten av Europa og USA. Da serielysbuer kan forårsake temperaturer langt høyere enn dette, vil plastmateriellet ikke kunne opptre hensiktsmessig ved denne feilkilden.[6]

Det er ikke ut fra statistikken mulig å finne ut hvor stor andel av brannene som skyldes installasjonsfeil, utførelse som svekkes over tid, uheldig materialvalg osv. Med stor byggeaktivitet og hardt press på byggemarkedet er det mulig at det gjøres feil ved installasjonsarbeid.[2]

2.2 Stasjonære kontaktpunkter

2.2.1 Kontaktflate

En elektrisk kontakt skal kunne holde lav motstand for å unngå å skape overflødig varmgang til omgivelsene når den fører en elektrisk strøm. Størrelsen på kontaktmotstanden er derfor avgjørende for hvor mye strøm som kan gå gjennom koblingen. De fysiske fenomenene som oppstår i stasjonære kontakter, dvs. stillestående kontakter, er tilnærmet like uansett spennings- og strømnivå, og bestemmes hovedsakelig av prosessene som oppstår på og i den umiddelbare nærhet av overflaten mellom to elektroder.[9]



Figur 2-6: Kontaktflaten mellom stasjonære kontakter [9]

Når to elektroder føres sammen, vil kontakten først kun bestå av et begrenset antall veldig små punkter, som vist i Figur 2-6. Når trykket på kontaktflatene øker, vil materialet i kontaktpunktene deformeres, og punktene blir større og nye kontaktpunkter dannes. Summen av områdene med metallisk kontakt utgjør det lastbærende areal, som utgjør kun en liten del av den tilsynelatende kontaktflaten. Da kontaktpunktene ofte ikke er større enn promille av den tilsynelatende kontaktflaten, vil mesteparten av kontaktflaten derfor være et luftgap. Selv på en kontaktflate mellom to tilsynelatende flate elektroder, vil ujevnheter på overflatene føre til at elektrodene kun berører hverandre på svært små områder.[9]

Siden kontaktpunktene som danner overgang for strømmen er så små, vil strømtettheten i disse punktene være stor. Størrelse og antall kontaktpunkter mellom to ledere har derfor stor innvirkning på overgangsmotstanden, og ved forbindelse mellom to ledere vil derfor overflaten til elektrodene være spesielt viktig for at det dannes et tilstrekkelig antall kontaktpunkter. Erfaringsmessig vil en ru overflate gi mange kontaktpunkter, mens en glatt overflate vanligvis gir færre kontaktpunkter.[10]

Kontaktkraften og hardheten til materialet har også betydning for å opprettholde kontaktarealet. Ved lavt kontakttrykk vil kontaktarealet bli lite, og strømtettheten blir dermed ekstra stor i kontaktpunktene. Dette kan for eksempel være tilfelle i en dårlig tiltrukket skrueforbindelse. Lavt kontakttrykk fører lett til at det oppstår varmgang i kontakten som fremskynder aldringen, og dermed øker kontaktmotstanden ytterligere. Hvis strømmen gjennom kontakten er tilstrekkelig stor, kan dette føre til at kontakten blir så varm at isolasjonen skades og at eventuelle andre materialer i nærheten antenner.[9][10]

2.2.2 Innsnevringsmotstand

Grunnen til at kun kontaktpunktene, og ikke hele det lastbærende arealet, fører strøm, er at de fleste metaller danner en isolerende oksidfilm på overflaten når metallet er i kontakt med luft. Direkte metallisk kontakt dannes derfor først når dette oksidbelegget fjernes.[9]



Figur 2-7: Sterkt forstørret del av en kontaktflate [9]

Figur 2-7 viser en forstørret del av kontaktflaten mellom to elektroder. Siden strømmen begrenses til å gå gjennom kontaktflaten gjennom veldig små kontaktpunkt, vil strømlinjene avvike fra den rette linjen de normalt sett følger. Innsnevringen av strømlinjene reduserer volumet av materialet som benyttes til elektrisk overføring, og medfører derfor økt motstand. Dette betegnes innsnevringsmotstand, og denne motstanden kommer i tillegg til den ohmske motstanden i lederen. Innsnevringsmotstanden i ett sirkulært kontaktpunkt bestemmes av lederens spesifikke resistans (ρ) og kontaktpunktets radius (a), som vist i formel 2.1.[9]

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot a} \tag{2.1}$$

Denne motstanden er den mest betydelige delen av den totale kontaktmotstanden.

Tilstanden til en kontakt kan karakteriseres ved å måle kontaktspenningen som funksjon av strømmen. I en god kontakt vil motstanden være tilnærmet konstant innenfor det strømområdet den er beregnet for, men dersom motstanden øker med strømmen vil dette være et tegn på at kontakten begynner å bli dårlig.[9]

2.2.3 Temperaturutvikling

De fleste gode kontaktforbindelser har veldig lav motstand. Disse små motstandene kan imidlertid lede til vesentlig lokal temperaturøkning, siden mengden av metall som varmes opp er veldig liten og varmeledningen i lederen er veldig effektiv. Dette medfører at den termiske responstiden er veldig kort, og at temperaturen derfor vil stige og avta i takt med vekselstrømmen (50 Hz). Kontaktpunktområder som fører vekselstrøm vil derfor bli utsatt for 100 varmesvingninger hvert sekund.[9]

Når begge elektrodene består av samme metall, vil temperaturfordelingen være symmetrisk over kontaktflaten. Den høyeste temperaturen oppstår i kontaktflaten, og bestemmes av spenningsfallet som genereres over kontaktflaten (U), ledertemperaturen (T₀) og en konstant (L) som for de fleste metaller er $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$, som vist i formel 2.2.[9]

$$T_{max} = \sqrt{\frac{U^2}{4 \cdot L} + T_0^2}$$
(2.2)

Temperaturen i kontaktflaten vil også være avgjørende for kontaktmotstanden, som vist i formel 2.3. $R(T_0)$ representerer kontaktmotstanden før oppvarming.[9]

$$R = R(T_0)[1 + \frac{2}{3}\alpha(T_{max} - T_0)]$$
(2.3)

Temperaturkoeffisienten (α) er positiv for metaller, som betyr at motstanden øker med økende temperatur. Ved å sette inn verdier for kobber kan det vises at et spenningsfall på 150 mV fører til en dobling av kontaktmotstanden, som følge av dårligere elektrisk ledningsevne i varme kontaktpunkter.[9] Ved at kontaktmotstanden øker med økende temperatur, vil det oppstå økt spenningsfall over kontaktflaten. Dette vil igjen medføre økt oppvarming av kontaktpunktet. Dette fører til en såkalt progressiv feil, hvor kontaktmotstanden fortsetter å øke. Oppvarmingen vil føre til at det utvikles et oksidbelegg på kontaktflatene. Dette oksidbelegget leder strøm, men motstanden er vesentlig høyere enn i metallet i lederen.[6]



Figur 2-8: Spenningsfall (heltrukket) over en dårlig kontaktforbindelse når påført vekselstrøm (stiplet linje) [9]

For kontaktpunkter som fører vekselstrøm vil den ulineære sammenhengen mellom strøm og kontaktspenning være som vist i Figur 2-8. Nær strømmens nullgjennomgang vil temperaturøkningen i kontaktpunktene være liten, og motstanden vil derfor være den samme som i resten av lederen. Når strømmen øker, vil også kontaktspenningen øke. I starten øker strøm og spenning proporsjonalt, men ved en gitt kontaktspenning blir temperaturen i kontaktpunktet så høy at motstanden øker betydelig, og strøm- og spenningskurven skilles. Når strømmen når sin maksimalverdi vil kontaktmotstanden være mer enn doblet sammenlignet med verdien ved nullgjennomgang.[9]

I aldrende kontakter vil kontaktmotstanden gå betydelig opp pga. forskjellige oksidasjons- og korrosjonsprosesser. Dette medfører større varmeutvikling enn det som står nevnt over, slik at kontakten ikke lenger rekker å kjøle seg ned ved strømmens nullgjennomgang. Varmen vil da forplante seg videre utover i lederen, og i verste fall resultere i brann. Av de faktorene som aldrer en kontakt nevnes 50 Hz vibrasjoner, termisk utvidelse og sammentrekning pga. temperaturendringer, og andre ytre påvirkninger. Dette kan føre til brudd og serielysbuer som videre fører til dannelse av dårlig ledende oksidbelegg på elektrodeoverflaten.[10]

2.3 Lysbuer

En lysbue er en lysende elektrisk utladning mellom elektrisk ledende materialer over et isolerende medium. Det isolerende mediet vil i de fleste tilfeller være luft i elektriske installasjoner. Dette fenomenet oppstår når den elektriske spenningen over to elektroder blir høyere enn det mellomliggende materialets gjennomslagsspenning.

Sammenhengen mellom den elektriske feltstyrken (E) inne i det isolerende laget, spenningen (U) over elektrodene og avstanden (d) mellom elektrodene beskrives av formel 2.4.[11]

$$E = \frac{U}{d} \tag{2.4}$$

2.3.1 Paschens lov

Paschenkurven benyttes for å finne gjennomslagsspenning for luft. Denne kurven blir basert på Paschens lov, som beskriver at gjennomslagsspenningen (U_{gj}) kan utrykkes som en funksjon av produktet av gapsavstand (d) og lufttrykk (p), som vist i formel 2.5.[11]

$$U_{gj} = f(p \cdot d) \tag{2.5}$$

Som det kommer frem av Figur 2-9 må spenningen være over 327 V for å kunne generere partielle utladninger (lysbue). Dette medfører at det ikke kan forekomme lysbuer i et gap, samme hvor lite det er, hvis spenningen er lavere enn 327 V. Ved spenninger lavere enn dette kan lysbuer derimot initieres ved at elektrodene først er i kontakt og deretter separeres.[12]



Figur 2-9: Paschenkurven for luft ved 20 °C [11]

Siden maksimal amplitudespenning ved nominell effektiv spenning på 230 V er 230 V $\cdot \sqrt{3} = 398,4$ V, vil lysbuer ved dette spenningsnivået kun vare i svært korte perioder. Da lufttrykket under normale forhold i elektriske installasjoner vil være 1 atm (1 bar = 0,987 atm), vil 327 V gjennomslagsspenning tilsvare en avstand på ca. 0,006 mm mellom elektrodene.[11]



2.3.2 Potensialfordelingen i en lysbue

Figur 2-10: Elektrisk potensial som funksjon av avstand fra katoden [9]

Som vist i Figur 2-10 kan spenningsfallet i en lysbue deles opp i et elektrodespenningsfall i nærheten av elektrodene, og et spenningsfall langs lysbuesøylen. Lysbuesøylen kan betraktes som et sylindrisk område med tilnærmet like mange positive og negative ladningsbærere.[9]

I luft eksisterer relativt få ladningsbærere ved lav temperatur. Når temperaturen øker vil imidlertid konsentrasjonen av frie ladningsbærere øke sterkt med temperaturen, noe som resulterer i en sterkt økende ledningsevne. Siden en lysbue må opprettholdes ved tilførsel av energi fra spenningskilden for å holde høy temperatur, vil det oppstå et spenningsfall langs lysbuesøylen som er avhengig av varmetapet fra lysbuen. Dette gjør at det er rimelig å anta at diameteren på lysbuesøylen øker når strømmen i kretsen øker, og at spenningsfallet derfor endrer seg lite med strømmen. Siden lysbuen kan ha en relativt høy spenning som vil være lite avhengig av strømmen, kan det oppstå svært høy energi i et lite volum og temperaturen kan bli meget høy.[9][12] Når den elektriske energien fra lysbuen omformes til termisk energi kan varmen som genereres bli overført til et brennbart materiale som antennes.[6]

Varigheten av en lysbue vil være avhengig av den tilbakevendende spenningen over bruddstedet, og lysbuen vil slukke ved strømmens nullgjennomgang dersom den tilbakevendende spenningen ikke er høy nok. I tilfeller med resistiv last vil strøm og spenning være i fase, og spenningen vil følgelig være lik null ved strømnullgjennomgang, og lysbuen vil da slukke.[12]

2.3.3 Former for lysbuer

Lysbuer i ledninger oppstår i to grunnleggende former, parallellysbue og serielysbue, som illustrert i Figur 2-11.



Figur 2-11: Lysbuetyper [6]

Parallellysbue er en elektrisk utladning som oppstår mellom to ledere (kortslutningslysbue) eller mellom en leder og jord (jordfeillysbue), og som medfører lysbue. Et eksempel på dette er hvis en metallgjenstand trenger inn i kabelisolasjonen og kortslutter faselederne. Ved dannelse av parallellysbue vil vanligvis overstrømvernet løse ut. Temperaturen i parallellysbuer kan bli vesentlig høyere enn i serielysbuer.[6]

Serielysbue er en elektrisk utladning som oppstår på en enkelt leder, når det oppstår et brudd i leder og en lysbue etableres mellom lederens ødelagte ender. En serielysbue kan, i motsetning til parallellysbue, ikke eksistere uten at det er strømbelastning, og vil derfor opphøre dersom strømmen slås av. [6] Serielysbuer vil beskrives ytterligere i kapittel 2.4.1.

2.4 Seriefeil

Seriefeil i en belastet elektrisk krets finnes der det av en eller annen grunn oppstår stor overgangsmotstand. Årsaker til dette kan være at det oppstår feil i en av fasene ved at det blir brudd, eller at impedansen i en av fasene blir ulik de andre fasenes impedans. På steder i den elektriske installasjonen hvor det oppstår økt overgangsmotstand, vil det ved strømgjennomgang (I) utvikles en varmeeffekt (P) uttrykt ved formel 2.6.[13]

$$P = R \cdot I^2 \tag{2.6}$$

For å unngå høy varmeutvikling må derfor overgangsmotstanden være lav, men siden effektutviklingen er proporsjonal med kvadratet av strømmen vil høye strømmer kunne gi stor effektutvikling, selv ved lav overgangsmotstand. Siden Norge i stor grad benytter elektrisk varmeavgivende utstyr, som ofte medfører høy og langvarig belastning av kurser, vil seriefeil gi stor effektutvikling og kan derfor utgjøre større brannfare her enn i andre land.

Stor effektutvikling vil også føre til gradvis nedbryting av isolasjonsmaterialet rundt lederen. Når isolasjonen blir hard og sprø kan det medføre at isolasjonen blir en halvleder, som kan medføre lekkasjestrømmer og lysbueoverslag, og til slutt antennelse av isolasjonen.[6]

Seriefeil oppstår vanligvis i koblingspunkter som følge av ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmene, men dårlig kontaktforbindelse kan også oppstå over tid ved gjentatt, røff

bruk eller på grunn av bevegelser/rystelser.[7] Dårlig kontaktforbindelse betyr at kontaktkraften mellom to elektroder er forsvunnet eller betydelig redusert.

Siden en seriefeil hverken vil føre til økning av strømmen eller dannelse av jordfeil, vil hverken overstrømsvern eller jordfeilvern beskytte mot denne typen feil. Selv om en seriefeil oppstår i den elektriske installasjonen, vil strømmen fortsatt gå gjennom kursen tilsynelatende som normalt. Seriefeil kan derfor være vanskelig å oppdage, men kan oppdages ved at en kjenner varme eller ser varme med et varmesøkende kamera. En uoppdaget seriefeil vil uforstyrret kunne utvikle seg videre, og føre til oppvarming og eventuell antenning av brennbare materialer i nærheten av feilstedet.[2]

Sannsynligheten for seriefeil er størst når installasjonen er helt ny, og når installasjonen er gammel. Når installasjonen er helt ny kan det oppstå dårlig kontakt, som følge av ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmene. Når disse oppstartsfeilene er rettet opp kan installasjonen stå i mange år uten at det skjer noe. Sannsynligheten for feil eller skade øker med installasjonens alder, hvor også installasjonen blir mindre og mindre egnet for de oppgaver den blir pålagt. Dette kan skyldes endringer i brukerens behov, og at de tekniske krav endres.[12]

Som nevnt i kapittel 2.1.2 omfatter seriefeil både serielysbue og glødende kontaktforbindelse, hvor begge feilkilder skyldes kontaktsvikt. Kapittel 2.4.1 og 2.4.2 beskriver forskjellen mellom disse to feilkildene.

2.4.1 Serielysbue

En serielysbue er en elektrisk utladning mellom elektrisk ledende materialer i serie med en belastning. Denne feilen oppstår når det utvikles et lite gap mellom to ledere som skulle vært sammenkoblet, og det etableres en lysbue mellom lederens ødelagte ender. Da spenningen må være over 327 V for å kunne danne en serielysbue, må elektrodene være i kontakt før kretsen deretter brytes. Strømmen vil da først flyte i en lysbue som vanligvis er ustabil, slik at strømmen vil slukke av seg selv før naturlig nullgjennomgang.[10]

En serielysbue kan ikke eksistere uten strømbelastning, og vil derfor opphøre dersom strømmen slås av. Lysbuestrømmen kan derfor ikke bli høyere enn belastningsstrømmen som lederen fører, og vil derfor ofte være for lav til at overstrømsvernet løser ut. En stående serielysbue vil ofte være en mer intens tennkilde enn en glødende kontaktforbindelse, og kan oppnå temperaturer på flere tusen grader. Det vil derfor være stor fare for brann i tilknytning til serielysbuer.[6][7]

2.4.2 Glødende kontaktforbindelse

Glødende kontaktforbindelser oppstår som følge av lavt kontakttrykk i koblingspunkt, og representerer et punkt med økt motstand i serie med en belastning. Lavt kontakttrykk medfører lite kontaktareal, som dermed fører til ekstra stor strømtetthet i kontaktpunktene. Dette forårsaker en relativt intens varmeutvikling, oksidering av metall, økt motstand i kontaktpunktet,

ytterligere varmgang og vil til slutt føre til at kobberet begynner å gløde. Derav navnet glødende kontaktforbindelser. Ved dannelse av sjiktet av kobberoksid kan varmeutviklingen føre til at kontaktpunktet begynner å gløde i løpet av få minutter.[7]

Glødende kontaktforbindelser utgjør vanligvis en betydelig mindre intens tennkilde enn en lysbue, men når denne energien slippes ut i et lite kontaktpunkt kan det forårsake temperaturer på 1200-1300 °C som videre kan antenne brennbart materiale.[8]

2.5 Krav til beskyttelse mot termiske virkninger

Siden elektrisitet kan innebære ulike faremomenter vil alle forskriftsmessige og normerte beskyttelsestiltak i første rekke gjelde beskyttelse av mennesker og husdyr. De tiltakene som blir beskrevet i dette underkapittelet vil hovedsakelig omfatte brannsikkerhet, men dette medfører også indirekte personsikkerhet og driftsikkerhet.

Da kapittel 2.5 innholder utdrag fra forskrifter og normer er det viktig å vite hva som er formelle krav. Forskrifter er krav som er bestemt av lovgivende myndigheter, mens normer i seg selv ikke er krav en ma tilfredsstille. Forskrifter kan derimot ha henvisninger til normer som et virkemiddel for å tilfredsstille kravene.[5]

2.5.1 Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (FEL)

Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (FEL) [14] er gjeldende forskrift for elektriske lavspenningsinstallasjoner i Norge, og er fastsatt av Produkt- og elektrisitetstilsynet (nå Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap).

I veiledningen til § 1 blir det beskrevet at:

"Elsikkerhet omfatter de faremomenter som elektrisiteten representerer i seg selv, som berøringsfare og brann, til sikkerhetsmessige forhold knyttet til bruk av elektrisitet og elektrisk utstyr. Elsikkerhet omfatter bl.a. beskyttelse mot lysbue/varmgang (personskade, brannfare, eksplosjoner)."

Dette bekrefter dermed at et sikkert elektrisk anlegg skal kunne gi beskyttelse mot lysbue og varmgang.

I forskriftens § 22 "Beskyttelse mot skadelige termiske virkninger" blir det videre beskrevet at:

"Elektriske anlegg skal være slik utført at det ikke er noen fare for antennelse av brennbare materialer på grunn av for høy temperatur eller elektrisk lysbue."

Gjennom forskriften blir derfor karakteristiske trekk ved seriefeil (høye temperaturer og elektrisk lysbue) nevnt som feilsituasjoner som det skal beskyttes mot. Det bør derfor være grunnlag i forskriften for å innføre krav til seriefeilvern, så snart det kommer produkter på markedet som kan detektere seriefeil. Da forskriften kun gir grunnleggende sikkerhetskrav, og ikke detaljerte tekniske krav for utførelse av elektriske anlegg, vil forskriften ikke spesifisere seriefeilvern spesielt.

2.5.2 NEK 400

NEK 400 [4] er den norske normsamlingen for elektriske lavspenningsinstallasjoner, og er utarbeidet av Norsk Elektroteknisk Komité/NK64. NEK 400 er det sentrale henvisningsgrunnlag i FEL (omtalt i kapittel 2.5.1).

Som det ble påpekt i kapittel 2.5.1, vil trolig krav til seriefeilvern på sikt kunne inkluderes som beskyttelsestiltak mot skadelige termiske virkninger. Da FEL henviser til NEK 400 for utførelse av ulike beskyttelsestiltak, er det normen som må spesifisere et eventuelt krav til seriefeilvern.

I NEK 400 beskrives emnet i kapittel 42 "Beskyttelse mot termiske virkninger". I avsnitt 421 "Beskyttelse mot brann forårsaket av elektrisk utstyr" er det beskrevet at:

"Personer, husdyr og eiendom skal være beskyttet mot skade eller ødeleggelse som følge av varme eller brann frembrakt av eller forplantet seg via elektrisk utstyr [...]. Varmeutvikling fra elektrisk utstyr skal ikke forårsake fare eller skadelige virkninger på nærliggende materiale eller materiale som med en viss forutsigbarhet kan være i nærheten av slikt utstyr. Elektrisk utstyr skal ikke representere risiko for brann i nærliggende gjenstander og materialer."

I dette avsnittet kan det med fordel inkluderes en anbefaling om installasjon av seriefeilvern når det finnes produkter som detekterer denne typen feil på markedet.

NEK 400 beskriver også krav til dimensjonering av ledertverrsnitt for kabler i elektriske installasjoner. Valget av ledertverrsnitt blir basert på den maksimale ledertemperaturen som skal kunne oppstå ved forskriftsmessig utførelse av installasjonen. Den maksimale ledertemperaturen bestemmes av den maksimale driftstemperaturen til isolasjonsmaterialet, som blir beskrevet i tabell 52A. Den maksimale tillatte ledertemperatur for utstyr isolert med polyvinylklorid (PVC) gitt av denne tabellen er 70 °C. Da det elektriske utstyret i lavspenningsinstallasjoner i stor grad er utført med PVC, dimensjoneres de fleste elektriske anlegg etter denne ledertemperaturen.

Ved dimensjonering av en elektrisk installasjon velges ledertverrsnittet for en kabel slik at belastningsstrømmen ved normal drift ikke overstiger lederens strømsføringsevne, og slik at ikke noe sted på lederen oppnår temperaturer over den maksimale ledertemperaturen. Dette gjøres ved at ledertverrsnittet på kabelen velges i henhold til Tabell 52B-1, hvor oppgitt strømføringsevne er basert på temperaturbegrensningene ved ulike ledertverrsnitt. Strømføringsevnen er en kalkulert verdi, som bl.a. baseres på isolasjonsmateriale, ledermateriale, antall belastede ledere, installasjonsmetode, omgivelsestemperatur og sammenlagringsfaktor. Ved oppgitt strømføringsevne er referanseverdien for omgivelsestemperatur 30 °C. Ved omgivelsestemperaturer forskjellig fra dette skal det legges til en korreksjonsfaktor til strømføringsevnen til kabelen.[15]

2.6 Krav til termisk isolasjon i bygninger

Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK) [16] er gjeldende byggtekniske forskrift i Norge, og har som formål å sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi. Forskriften revideres med jevne mellomrom, og gjeldende utgave trådde i kraft 2010 (TEK10). De siste revisjoner har hatt som hovedformål å fremme lavt energibehov og energieffektivitet, noe som har ført til at det nå er strengere krav til varmetap i bygningskroppen. Disse kravene har ført til at isolasjonstykkelsen i bygningene har økt, noe som påvirker den elektriske installasjonen ved at den i økende grad hindrer varmeavgivelse til omgivelsene. Dette kan føre til økt omgivelsestemperatur i koblingspunkt, spesielt i installasjoner med skjult installasjonsmetode. Derfor er krav til varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi) for yttervegger interessant, også med elektroteknisk perspektiv.[17]

Taball ? 1. Kray ti	1 transmision suarmata	n for hygninger	wad ulika utaawa	r a TEV
1 <i>uven 2-1</i> . K <i>iuv n</i>	i iransmisionsvarmeia	D IOI DVYNINYEI	veu unke uiguve	uv i L'
	,	r J		

	TEK-69	TEK-87	TEK-97	TEK-07	ТЕК-10
U-verdi, yttervegg	0,46 W/m ² K	0,30 W/m ² K	$0,22 \text{ W/m}^2\text{K},$	$0,18 \text{ W/m}^2\text{K},$	$0,18 \text{ W/m}^2\text{K},$
			20 cm isolasjon	25 cm isolasjon	25 cm isolasjon

Tabell 2-1 viser krav til transmisjonsvarmetap for en bygning ved ulike utgaver av TEK. I TEK10 blir det presisert at en yttervegg som oppfyller minstekravet til U-verdi på 0,22 W/m²K, noe som tilsvarer 20 cm isolasjon, kan benyttes dersom det kompenseres på annen måte for det økte varmetapet som en dårligere isolert vegg representerer.



Figur 2-12: Yttervegg med innvendig horisontal påfôring og inntrukket dampsperre [18]

For å tilfredsstille kravene til fukt anbefales det alltid å bygge isolerte yttervegger med dampsperre (diffusjons- og lufttett sjikt) på innvendig side. For å sikre tettheten til dampsperren ved installering av skjult elektrisk anlegg anbefales inntrukket dampsperre. Dampsperren legges da 5 cm inn i veggen, som vist i Figur 2-12. Av hensyn til kondensfare på innsiden av

dampsperren, bør da maksimalt 25 % av all isolasjon i ytterveggen monteres på innsiden av dampsperren. For å begrense konveksjon i hulrom presiseres det at isolasjonen bør ligge tett rundt rørinstallasjoner og lignende, slik at ikke deler av veggen får redusert varmemotstand.[18]

3 DETEKSJONSPRINSIPPER

Deteksjon av seriefeil deles i denne rapporten i to hovedprinsipper; deteksjon ved analyse av strømkarakteristikk og deteksjon ved analyse av temperaturutvikling. Dette kapittelet vil beskrive disse to deteksjonsprinsippene, samt beskrive ulike produkter som benytter disse prinsippene for å detektere seriefeil. De løsningene som blir beskrevet i dette kapittelet omfatter både norske patenter og produkter fra land med krav til seriefeilvern.

3.1 Analyse av strømkarakteristikk

Vernene som benytter dette deteksjonsprinsippet monteres i sikringsskapet, hvor det kontinuerlig overvåker strømflyten gjennom vernet, og gjenkjenner spesifikke bølgekarakteristikker som kjennetegner lysbuefeil. Disse vernene vil derfor kun detektere seriefeil som er forårsaket av (serie)lysbue, og vil ikke detektere glødende kontaktforbindelse eller varmgang ut over dette. Da disse vernene blir montert foran kursen, vil de imidlertid ha mulighet til å detektere lysbuefeil som oppstår også utenfor koblingspunktene.

Det første vernet som presenteres er beregnet på det amerikanske markedet, og blir kalt Arc-Fault Circuit Interrupter (AFCI). Da det ble funnet krav til installasjon av slike vern i USA, vil det også bli beskrevet hvilke krav som stilles til installasjon av vernet. Det ble i tillegg funnet et vern som bygger på det samme prinsippet, men som er beregnet på det europeiske markedet. Dette vernet presenteres i kapittel 3.1.1.2. Til slutt presenteres en prototype for et vern som utvikles i samarbeid med Gjensidige forsikring i kapittel 3.1.2.

3.1.1 Lysbuefeilbryter (AFCI)

Arc-Fault Circuit Interrupter (AFCI), eller lysbuefeilbryter som det kan kalles på norsk, er konstruert for å detektere utilsiktede lysbuer, og bryte kretsen før lysbuen forårsaker brann. Vernet inneholder en krets som kontinuerlig overvåker strømflyten gjennom vernet, der en integrert chip gjenkjenner spesifikke bølgekarakteristikker som kjennetegner feil som skyldes lysbue. Kontrollkretsen skiller mellom harmløse lysbuer, som for eksempel kan forekomme i støvsugere, ved betjening av en lysbryter eller innsetting/fjerning av et støpsel i en stikkontakt, og de utilsiktede lysbuene som oppstår ved brudd i en leder eller i et koblingspunkt med dårlig kontaktforbindelse. Harmløse lysbuer vil derfor ikke føre til at kretsen brytes. Når vernet gjenkjenner en lysbuefeil i den elektriske installasjonen får den mekaniske delen av vernet beskjed om å åpne kretsen, og vernet løser ut momentant, slik at kretsen blir strømløs. Siden en serielysbue slukker når det ikke går strøm i kretsen, vil lysbuen da slukke, noe som reduserer den potensielle faren for at brann kan oppstå.[19]

Vernet er, i likhet med jordfeilvernet, utstyrt med en testknapp som må betjenes med jevne mellomrom for å sikre optimal drift. Forskjellen mellom disse to vernene er at lysbuefeilbryteren primært er beregnet for å redusere sannsynligheten for at brann skal oppstå, mens jordfeilbryteren primært er beregnet for å hindre elektrisk sjokk. Det finnes derimot produkter som kombinerer dette i samme vern, da AFCI-vern finnes i mange ulike utførelser ettersom teknologien har utviklet seg siden kravet ble innført i 2002.

De ulike hovedtypene lysbuefeilbrytere kalles Branch/Feeder, Combination og Outlet/Branch circuit, og beskytter ulike aspekter av kursen de er tilkoblet.[20][21]

- Branch/Feeder vil i følge UL ikke kunne gi beskyttelse mot serielysbuer, og beskytter kun mot parallellysbue. Dette vernet møter ikke lenger kravene i den amerikanske normen.
- Combination gir beskyttelse mot både parallell- og serielysbue, samt jordfeil, overbelastning og kortslutning. Denne typen monteres i sikringsskap, foran hver kurs som skal beskyttes, og beskytter hele kursen.
- Outlet/Branch circuit er et pluggbart vern som monteres i et av kursens uttak. Vernet skaffer beskyttelse mot både parallell- og serielysbue for skjøteledninger og strømforsyningsenheter som er plugget i dette uttaket.

Siden AFCI-enheter er så utbredt i USA, finnes det flere produsenter som leverer slike vern. Blant disse er General Electric, Schneider Electric og Siemens. Da alle AFCI-enheter skal sikkerhetsgodkjennes gjennom samme standard, antas det at forskjellen mellom produktene er minimale.

3.1.1.1 Krav til seriefeilvernet

National Electrical Code (NEC)

National Electrical Code (NEC) [19] er en regional standard for elektriske installasjoner og elektrisk utstyr i USA. NEC utgis av National Fire Protection Association (NFPA), og er godkjent som en amerikansk nasjonal standard av American National Standards Institute (ANSI). Standarden har imidlertid ingen juridisk bindende regulering, men er vedtatt av de fleste stater, kommuner og byer i et forsøk på å standardisere håndheving av trygge elektriske anlegg i sitt område. [21]

Denne standarden innførte i 1999 krav til AFCI i amerikanske boliger fra 1. januar 2002. Kravet, som blir beskrevet i avsnitt 210.12, gjaldt da for kurser som forsyner soverom. Kravene til omfang har gradvis utviklet seg, og i 2005-utgaven spesifiserte kravet at AFCI-vernet skulle være av type Combination innen 1. januar 2008. Det er derfor kun dette vernet som møter dagens krav. I 2008-utgaven ble dette kravet utvidet til også å gjelde alle 15 A og 20 A (120 V) kurser som forsyner stikkontakter og belysning i boligen, unntatt vaskerom, kjøkken, baderom, garasje og uinnredede kjellere.[21][22]

<u>UL 1699</u>

Underwriters Laboratories (UL) er en selvstendig amerikansk organisasjon som bl.a. utfører sertifisering og utvikler standarder og testprosedyrer av produkter, med hovedvekt på sikkerhet. Organisasjonen har utviklet UL 1699, som er en produktstandard som stiller krav til testprosedyrer for sikkerhetsgodkjenning av ulike AFCI-vern. Vern som har gjennomgått sikkerhetsgodkjenning skal være merket med UL-logoen.[22][23]

Testprosedyrene for de ulike lysbuefeilbryterne simulerer ulike reelle forhold som kan oppstå i elektriske installasjoner. Ved de ulike testene blir det plassert et stykke bomull i nærheten av feilstedet, der vernet må løse ut kretsen før bomullsdotten antenner for å bestå testen. For å forsikre seg mot at AFCI-vernene løser ut unødig, krever standarden også flere tilleggstester, som simulerer forhold som gir harmløse lysbuer. For å bestå testen kan ikke vernet løse ut kretsen ved noen av testene.[23]

3.1.1.2 Produkter for det europeiske markedet

Siden lysbuefeilbryterne beskrevet i kapittel 3.1.1 er laget for amerikanske nettsystemer og dermed beregnet for 125 V/60 Hz, kan disse ikke installeres direkte i europeiske nettsystemer da det her blir benyttet 230 V/50 Hz. Det ble derfor undersøkt om General Electric, Schneider Electric og Siemens, som tilbyr denne typen vern i USA, planlegger å produsere enheter beregnet på det europeiske markedet.

Det lykkes ikke å komme i kontakt med General Electric angående deres fremtidsutsikter for slike vern til det europeiske markedet.

Kjell Magne Nordnes ved Schneider Electric Norge AS bekrefter [24] at vernet er beregnet på det amerikanske markedet, og ikke er tilpasset europeiske eller nordiske nettsystemer. Han oppgir at det ikke foreligger planer fra deres side om å konvertere dette vernet til europeiske nettsystemer. Han tror det ville ført til mye uønsket støy fra Schneider Electric i USA og Frankrike om Schneider Norge forsøkte å tilpasse vernet til europeiske eller nordiske nettsystemer. Med bakgrunn i patentet må dette i så fall gjøres i regi av Schneider Electric and Business Unit i Frankrike. Han utelukker ikke at dette kan være eller er et produkt som vil bli utviklet hvis markedet er klart for det, men mener at dette også vil bety at det må arbeides inn i en internasjonal standardiseringskomité for å gjøre dette produktet kommersielt.

Geir Roald Braathen ved Siemens AS Norge oppgir [25] at de i løpet av våren 2012 kommer til å offentliggjøre et lysbuevern beregnet på det europeiske markedet, kalt Arc Fault Detector (AFD). Siemens vil da være den første produsenten som lanserer en lysbuedetektor for det europeiske markedet etter IEC-standarder. Enheten kan ettermonteres, og er tilpasset bygningsinstallasjoner som en supplerende enhet til automatsikringen.

Lysbuedetektoren bygger på det samme prinsippet som det amerikanske vernet, og overvåker kontinuerlig intensiteten og varigheten av sekvenser med høyfrekvent støy på strømkurvene. Integrerte filtre med intelligent programvare analyserer disse signalene og kobler ut den tilkoblede kretsen momentant ved deteksjon av unormale tilstander. AFD-enheten vil derfor, i likhet med det amerikanske AFCI-vernet, være i stand til å skille mellom harmløse lysbuer og utilsiktede lysbuedannelser. Figur 3-1 viser AFD-enheten, som vil bli tilgjengelig i to versjoner, som kan kobles til en automatsikring. Ved å kombinere dette vernet med en hjelpebryter kan den også kobles til et høyere nivå styringssystem.[26]



Figur 3-1: Arc Fault Detector fra Siemens [26]

Da Siemens vil lansere et produkt for det europeiske markedet i år, er det rimelig å anta at andre leverandører som benytter lignende deteksjonsprinsipper i USA vil gjøre det samme innen kort tid.

3.1.2 Lysbuevakt

Gjensidige forsikring innehar et patent for deteksjon av lysbuer. Grunnlaget for dette patentet ble dannet etter at forskningsprosjekter ved SINTEF indikerte løsninger som bygger på analyse av støy på nettet når seriefeil oppstår. I følge forskningsrapporten kan en lysbue karakteriseres av ikke-periodisk støy på strømkurven. Strategien for å oppdage en lysbue er å sammenligne to påfølgende perioder av signalet ved å beregne differansen mellom de to signalene. Signaler med periodisitet vil dermed bli filtrert bort, inkludert periodisk støy. Dette medfører at apparater som genererer harmløse lysbuer ikke vil føre til at alarmen utløses. En virkelig lysbue, som medfører ikke-periodisk støy, vil imidlertid bli detektert ved å analysere irregulariteten mellom

Den første prototypen av seriefeilvernet ble utviklet av firmaet PowerCraft.Net. Denne prototypen, kalt lysbuevakt, var beregnet på montering i sikringsskap (Figur 3-2). Vernet skulle ved hjelp av algoritmer gi alarm dersom det forekom deteksjon av lysbue i det elektriske anlegget. Når en feil ble oppdaget, utløstes alarm ved en lysindikator på enheten, samt et lydsignal på et eksternt betjeningspanel. Dette produktet ble testet av SINTEF NBL i 2007, men umiddelbart etter at lysbuevakten ble satt i drift i anlegget gikk den i alarm ved at den hele tiden stod og blinket. Ifølge PowerCraft.Net skyldtes dette sannsynligvis at den ikke var kalibrert eller innstilt riktig. PowerCraft.Net var ved SINTEF NBL for å gjennomføre kalibreringen av lysbuevakten, men det ble oppdaget at lysbuevakten hadde feil. Den ble tatt med tilbake for reparasjon, men ble etter dette ikke montert igjen i prøvekretsen.[7]



Figur 3-2: Lysbuevakt

Odd A. Rød fra Gjensidige forsikring oppgir at etter at prosjektet med PowerCraft.Net ikke førte frem til tilfredsstillende resultat, har Gjensidige innledet samarbeid med en annen produsent for videre utvikling og produksjon av vernet. Han vil ikke offentliggjøre hvem som nå er samarbeidspartner på dette prosjektet, grunnet konkurransesituasjon.[27]

3.2 Analyse av temperaturutvikling

Dette deteksjonsprinsippet innebærer å analysere temperaturutvikling i den elektriske installasjonen. Vernene som benytter dette deteksjonsprinsippet består av ulike sensorer som reagerer ved utvikling av varme, og siden de fleste feil oppstår i koblingspunkt, monteres sensorene i eller nær koblingspunkt. Dette medfører at vernet kun detekter seriefeil som oppstår i nærheten av sensoren, og at det ofte må monteres flere sensorer pr. kurs. Dette deteksjonsprinsippet vil derfor ikke ha mulighet til å detektere seriefeil som oppstår utenfor koblingspunkt. Fordelen med dette deteksjonsprinsippet er imidlertid at siden vernene reagerer på temperaturutvikling, og vil de også kunne detektere andre former for elektriske feil som forårsaker varmgang.

De to første produktene som presenteres må monteres i alle koblingspunkt i den elektriske installasjonen som skal overvåkes. Det siste vernet som presenteres detekterer temperaturutvikling i den elektriske installasjonen ved hjelp av detektorer som bygges på samme prinsipp som røykvarslere.

3.2.1 Electric Temperature Increase Monitoring

I Teknisk Ukeblad 33/09 [28] blir det beskrevet en innrettning med en temperaturføler som varsler ved varmgang i elektriske koblingspunkter. Systemet heter Electric Temperature Increase Monitoring (ETIM), og består av sensorer som via et lite kretskort sender et trådløst signal om temperatur til en sentralenhet. Sensoren, som består av både temperaturføler og sender, er ca. 3 cm lang og 1 cm bred og monteres i koblingspunkter i den elektriske installasjonen. Temperaturovervåkningen utføres av en termistor (temperaturavhengig motstand), som er innstilt på et hensiktsmessig temperaturnivå. Ved temperaturøkning over innstilt nivå aktiveres en

varslingsenhet som sender et trådløst signal til sentralenheten. Sentralenheten kan bestå av et eget dedikert kontrollpanel, men kan også være tilknyttet en eksisterende alarminstallasjon. Varsling kan da utføres både internt i bygningen og til ekstern mottaker som for eksempel vaktselskap, brannvesen eller lignende, samt mot mobiltelefon på SMS. Ved alarm kan kontrollpanelet indikere hvor feilen har oppstått, via beskrivelse på displayet, i tillegg til å gi lydvarsel. I tillegg til varsling, kan utkobling av aktuell strømkurs integreres i systemet ved at signalet også sendes til et relé i sikringsskapet. Dette vil derimot kreve installasjon av relé(er) på aktuelle strømkurser.

Sentralenheten sender ut kontrollsignal til alle sensorene for eksempel én gang i døgnet. Dersom en av enhetene ikke svarer (systemfeil) registrerer panelet feilen og angir dette på displayet (og evt. med lydsignal). Temperaturføleren registrerer temperaturen regelmessig, men for å spare energibruken til sensoren er det også mulig for sensoren å gå i hvilemodus, slik at den "våkner" når temperaturen nærmer seg alarmnivå. Måledataene kan lagres i en logg der feil kan avleses.

Prototypen pr. 2009 inkluderer et batteri som strømforsyning for sensoren, men intensjonen er at dette skal bort på den endelige utgaven. Sensoren skal da forsynes via induksjon fra de strømførende lederne i koblingspunktet. Målet er at hele enheten skal bli så liten at den kan plasseres i stikkontakter og brytere med dagens mål.[29][30]

Produktet er fortsatt i utviklingsfasen, og firmaet oppgir at de ikke er sikre på når produktet vil komme på markedet, men de håper å ha klar 100 prototyper i løpet av 2012. Da produktet ikke er helt klart enda, vil de ikke anslå en pris.[31]

3.2.2 Deteksjon via kunstig jordfeil

I Teknisk Ukeblad 03/06 [32] blir det beskrevet en oppfinnelse som fungerer som vern mot seriefeil, utviklet av Aage Amundsen. Oppfinnelsen forutsetter imidlertid at det finnes jordfeilvern i anlegget. Seriefeilvernet kobles mellom fase og jord, og er konstruert slik at det vil dannes en kunstig jordfeil med lav feilstrøm om temperaturen i koblingspunktet overstiger en gitt verdi. Jordfeilstrømmen vil være tilstrekkelig til at jordfeilbryteren i anlegget vil koble ut strømmen, og hindre videre oppvarming. Vernet vil reagere på temperaturer over maksimal driftstemperatur (80 °C), men som fortsatt ligger under antennelsestemperatur for materialer i nærheten, som ofte vil være trematerialer. En reaksjonstemperatur på omkring 120 °C kan være en aktuell verdi.



Figur 3-3: Prinsipiell oppbygning av seriefeilvernet [33]

Når det oppstår temperaturer over 80 °C i et koblingspunkt, vil en fjær trenge gjennom et smeltelegeme og danne forbindelse til jord over en motstand slik at jordfeilstrømmen er høy nok

til å koble ut en jordfeilbryter; altså mer enn 30 mA. Seriefeilvernet vil derfor være et "engangsvern", og hele komponenten må byttes om det har løst ut. Ved reparasjon søker man etter feilstedet på samme måte som om man søker etter en jordfeil. Seriefeilvernet skal være en integrert del i komponenter som av erfaring er kritiske med hensyn til slike feil, og det gjelder i første rekke stikkontakter og støpsler. Selve seriefeilvernet er en sylinder med diameter på 4,5 mm og lengde 20 mm, som vist i Figur 3-3.[33]

Patentrettighetene innehas av firmaet SICOM i Trondheim (som nå er oppkjøpt av Weatherford Petroleum Consultants AS), men i følge Atle Hjertenæs er det for tiden ingen utvikling av patentet.[34]

3.2.3 Electric Fire Prevention

I Teknisk Ukeblad 36/07 [35] blir det beskrevet et system som detekterer branntilløp i den elektriske installasjonen ved hjelp av ionedetektorer. Ionedetektorene bygges på samme prinsipp som i røykvarslere, og vil reagere på endringer i ioneflyten i luften som følge av bl.a. klorgass og røyk som utvikles når en brann er i ferd med å bryte ut. Når det oppstår lysbuer eller varmgang vil det utvikles gasser allerede ved en temperatur på 70 °C. Detektoren er derfor laget for å avdekke gasser som frigis fra utstyr ved denne temperaturen, og vil på denne måten avdekke branntilløp før temperaturen har nådd antenningspunkt. Oppbygningen av EFP-systemet vises i Figur 3-4.



Figur 3-4: Oppbygning av et EFP-system [36]

Detektorene kobles til en sentralenhet, som er montert i sikringsskapet. Når detektorene avdekker branntilløp vil detektoren sende et signal til sentralenheten, som vil gå i alarm og aktivere bryterenheten i systemet, samtidig som det sendes ut et potensialfritt alarmsignal. Bryterenheten er en shunttrip (arbeidsstrømsutløser) som er koblet mot hovedsikring, kurssikring og lignende. Når shunttrip aktiveres av sentralenhet vil den trigge aktuelt vern som bryter strømmen til hele, eller deler av, anlegget og hindrer strømtilførselen og branntilløpet. Det er også mulig å få en alarm før strømmen brytes med tidsforsinket utslagning. EFP-sentralens potensialfrie alarmutgang kan sende et signal til eventuelle eksterne varslingssystemer når

sentralen går i alarm og/eller mister strømmen. Detektorene er utformet for å kunne passe inn i sikringsskap og tavler, og er justert for å reagere på svært små gassforekomster. Systemet kan monteres i alle sikringsskap/tavler opp til 6300 A (boliger, landbruk, næringsbygg, etc.).

I Teknisk Ukeblad blir systemet beskrevet av Per Erik Lie, som har utviklet systemet. Systemet distribueres i dag av Eaton Electrics AS (tidligere Moeller Electrics AS), og er allerede installert i en rekke norske bygninger. Prismessig vil et komplett sett med bryterenhet, to detektorer og sentralenhet koste rundt 2500–3000 kroner eksklusiv monteringskostnader.[36]
4 FORBEREDENDE LABORATORIEFORSØK

4.1 Bakgrunn

Dette laboratorieforsøket bestod av å generere glødende kontaktforbindelser og lysbuer. Bakgrunnen for dette forsøket var å undersøke hvilke effekter som kan oppstå i kontaktpunkter ved slike elektriske feil, og hvilken innflytelse belastningsstrømmen har på effektutviklingen. Den målte effektutviklingen vil videre kunne sammenlignes med effekter som oppstår i laboratorieforsøk med seriefeilvern. Forsøkene vil også undersøke muligheten for å opprettholde en kontrollert lysbue over lenger tid ved en spenning på 230 V AC, da lysbuen i følge teorien vil slukke ved strømmens nullgjennomgang.

Som det ble beskrevet i kapittel 2.3.1 er 230 V AC er et forholdsvis lavt spenningsnivå for å generere lysbuer. Derfor må lysbuen initieres ved at kretsen blir påtrykt spenning mens elektrodene er i god kontakt med hverandre, for så å øke avstanden mellom elektrodene når kretsen er spenningssatt. Når avstanden mellom elektrodene økes oppstår det et inhomogent felt, hvor en lysbue formes over den delen av gapet hvor den elektriske feltstyrken har sin høyeste verdi. Siden elektrisk feltstyrke i dette tilfellet har høyest verdi på det ytterste punktet av elektroden, vil lysbuen oppstå her.

For å kunne undersøke hvilken innflytelse belastningsstrømmen har på effektutviklingen mellom elektrodene ble det benyttet fire ulike belastningsstrømmer under forsøkene. De ulike belastningsstrømmene som ble benyttet var: 3,5 A, 7 A, 10,3 A og 15,5 A.



4.2 Måleoppsett og -utstyr

Figur 4-1: Måleoppstilling for forberedende forsøk

Figur 4-1 viser måleoppsettet for laboratorieforsøket. Under forsøkene ble det av sikkerhetsmessige årsaker benyttet en skilletransformator som strømkilde, slik at eventuelle feil i målekretsen ikke skulle innvirke på det elektriske anlegget ut over målekretsen.

Belastningen som ble benyttet under forsøkene var panelovner og vannmotstander, som begge er rent resistive belastninger.

Måleinstrumentene som ble benyttet under forsøkene var to wattmeter og ett oscilloskop. Det ble tilkoblet ett wattmeter på hver side av lysbueriggen. Hvilke wattmeter som ble benyttet varierte etter belastningsstrømmen, da den ene typen wattmeter ikke kunne benyttes ved belastningsstrømmer over 10 A og derfor ikke kunne benyttes til alle forsøkene. Oscilloskopet, som ble benyttet til å måle spenningen over det regulerbare gapet, ble koblet i parallell med lysbuegapet. Dette hadde også mulighet for å logge målingene automatisk og overføre disse til en PC, noe wattmetrene ikke hadde. Målingene fra wattmetrene ble derfor avlest manuelt.



For å kunne simulere kontrollerte lysbuer på en sikker måte, ble det benyttet en lysbuerigg. Lysbueriggen, som er avbildet i Figur 4-2, bestod av to elektroder som var er laget av vanlig stål, dvs. hovedsakelig jern. Den ene elektroden var i låst posisjon, mens den andre var festet til en justeringsskrue, slik at avstanden mellom elektrodene kunne reguleres ved å betjene et hjul. Figur 4-3 viser prinsippet til lysbueriggen, hvor spenningen over gapet (ΔU) øker ved økende avstand (d) når strømmen (I) er konstant. For å simulere seriefeil ble lysbueriggen tilkoblet slik at det regulerbare gapet var i serie med belastningen. Av sikkerhetsmessige grunner ble det montert en gjennomsiktig skjerm over anordningen.

Alt av ledningsforbindelser var så korte at motstand i måleledninger antas å være tilnærmet null. Fullstendig utstyrsliste for laboratorieforsøket finnes i vedlegg A.

4.3 Måleprosedyrer

Siden bakgrunnen for forsøket var å undersøke hvilke effekter som kan oppstå ved seriefeil i reelle elektriske installasjoner, var spenning (230 V) og frekvens (50 Hz) konstant under forsøkene. Parametrene som ble endret under forsøkene var belastningsstrømmen, og kontaktkraften på elektrodene i lysbueriggen.

Det ble utført målinger ved fire ulike belastningsstrømmer; 3,5 A, 7 A, 10,3 A og 15,5 A. Det ble utført fire måleserier på hver belastning, for å avdekke om alle målingene for hver belastning oppnådde tilnærmet samme effektutvikling. Det ble derfor gjennomført totalt 16 forsøk. Belastningen var i de to første tilfellene panelovn, og i de to siste vannmotstander.

Effektutviklingen i det regulerbare gapet ble målt på to måter; effektmåling på hver side av gapet, og spenningsmåling over gapet. Grunnen til at effektutviklingen ble målt på to måter, var for å øke sikkerheten rundt måleresultatene. Ved å koble til to wattmeter, én på hver side av vil differansen mellom målingene utgjøre effektutviklingen til seriefeilen. gapet, Spenningsmålingen, som var i parallell med gapet, ble utført ved hjelp av et bærbart oscilloskop som også gjorde det mulig å logge spenningsdifferansen over gapet. Effektutviklingen i det regulerbare gapet ble på denne måten både kalkulert ved å bruke spenningsdifferansen over gapet multiplisert med belastningsstrøm, og ved å finne differansen mellom målt effekt på hver side av gapet. Siden spenningsmålingene ble logget under hele forløpet anses disse målingene som mer nøyaktige enn de avleste målingene fra wattmetrene. Begge målingene ble imidlertid brukt, da den registrerte effektdifferansen med wattmetrene ble sammenlignet med den kalkulerte effektutviklingen for å kontrollere om verdiene fra begge målemetodene gav tilnærmet lik verdi. Da dette viste seg å være tilfelle, anses måleresultatene som ganske sikre.

Fremgangsmåten var lik for alle måleseriene. Når spenningen ble påtrykt kretsen var elektrodene i det regulerbare gapet i god kontakt med hverandre. Kontaktkraften på elektrodene ble deretter gradvis redusert, slik at de ble trukket kontrollert fra hverandre. Dette førte til økende spenning over gapet, og det ble observert gløding mellom elektrodene (Figur 4-4). Gapet ble deretter økt ytterligere, og intensiteten til glødingen økte inntil en lysbue oppstod (Figur 4-5). I det lysbuen oppstod opphørte strømmen gjennom kretsen, lysbuen slukket og hele spenningen lå da over gapet. Varigheten til lysbuen var kun et kort glimt, og det lykkes ikke å opprettholde en strømbegrenset lysbue over lang tid ved dette spenningsnivået. Forsøket ble gjennomført flere ganger, og forløpet var tilnærmet det samme hver gang.



Målingene varte kun et par minutter pr. forsøk, der varigheten varierte etter hvor lang tid det tok før avstanden mellom elektrodene ble stor nok til at strømmen gjennom kretsen ble brutt. Avstanden mellom elektrodene etter strømbrudd var veldig liten, men den ble ikke målt ut over at det var mindre enn én millimeter mellom elektrodene.

Det må presiseres at reguleringen av den justerbare elektroden ikke var friksjonsfri, noe som førte til at avstandsreguleringen ble noe ujevn. Dette var noe ufordelaktig, siden avstandene som fører til lysbue er så små, men siden det ble utført flere forsøk antas det at resultatene likevel vil gi et reelt bilde av effektutviklingen i et lysbuegap ved 230 V AC.

4.4 Resultater

Dette underkapittelet presenterer en oppsummering resultatene fra målingene beskrevet i kapittel 4.3. Alle diagrammer med fullstendig informasjon presenteres i vedlegg B. Disse diagrammene viser spenningsforløpene fra forsøkene. Måledataene vil i tillegg presenteres elektronisk i vedlegg F. Resultatene vil kun i liten grad diskutert i dette kapittelet, men vil bli diskutert ytterligere i kapittel 6.3.

Som beskrevet i kapittel 4.3 ble målingene utført ved å undersøke både effektdifferansen og spenningsdifferansen over gapet. Siden måleseriene utført med oscilloskopet dokumenterte hele forløpene, mens effektmålingene kun ble registrert noen ganger i løpet av forsøkene, blir målingene som presenteres i dette kapittelet basert på måledataene fra oscilloskopet. Målingene blir presentert som grafer, der fire måleserier fra hver tilkoblede belastning inngår i samme diagram. Siden bakgrunnen for forsøket var å undersøke effektutvikling ved seriefeil, presenteres dette i diagrammene.

Siden spenningen måles over gapet mellom elektrodene vil det ved brudd i kretsen ligge 230 V over gapet, og noen få volt når det er kontakt. Lysbueoverslag vises derfor godt igjen i diagrammene, da brudd i strømflyten fører til et stort sprang i spenningen. Siden belastningsstrømmen var konstant under forsøkene, fulgte effektutviklingen spenningen over gapet. Den høyeste oppnådde effektutvikling ved hver belastning vil også bli spesifisert under hvert diagram.



Figur 4-6: Effektutvikling ved 3,5 A, $P_{max} = 10,3$ W

Figur 4-6 viser at effektutviklingen ved 3,5 A var hovedsakelig mellom 6 og 10 W.



Figur 4-7: Effektutvikling ved 7 A, $P_{max} = 20 W$

Figur 4-7 viser at effektutviklingen ved 7 A var hovedsakelig mellom 13 og 17 W.



Figur 4-8: Effektutvikling ved 10,3 A, $P_{max} = 26,3$ W

Figur 4-8 viser at effektutviklingen ved 10,3 A var hovedsakelig mellom 17 og 22 W.

Da forsøkene med 2300 W belastning medførte mange lysbueoverslag, ble noen redigert bort i dette diagrammet for å bedre leservennligheten. De faktiske spenningsforløpene fremgår av vedlegg B-1.3.



Figur 4-9: Effektutvikling ved 15,5 A, $P_{max} = 44,2$ W

Figur 4-9 viser at effektutviklingen ved 15,5 A var hovedsakelig mellom 31 og 38 W.

Siden lengden på målekablene som ble brukt under forsøkene var så korte at motstanden regnes som minimal, ble all spenning som lå over gapet tilskrevet kontaktmotstanden. Som det kommer frem av diagrammene var ikke spenningen over gapet 0 V, selv ved oppstart når elektrodene var i god kontakt med hverandre. Dette betyr at det var noe kontaktmotstand i gapet, selv om kontaktforbindelsen mellom elektrodene var god. Dette skyldes trolig at endene på elektrodene var noe deformerte (skyldes trolig varmeutvikling etter tidligere bruk). Effektdifferansen som ble målt før gløding oppstod, mens kontaktforbindelsen mellom elektrodene var god, var fortsatt mye lavere enn når kontaktkraften ble redusert og avstanden mellom elektrodene økte. Siden oscilloskopet målte direkte over gapet, ble det konkludert med at hele spenningen over gapet kunne tilskrives motstanden i gapet alene når kontaktkraften mellom elektrodene var lav, dvs. kontaktmotstanden under glødende kontaktforbindelse. Denne kontaktmotstanden vil føre til effektutvikling i et koblingspunkt i en elektrisk installasjon.

Siden forholdet mellom belastningsstrøm og effekt kan beskrives ved at effektutviklingen i en motstand endres med kvadratet av belastningsstrømmen (som vist i formel 2.6), var det interessant å undersøke dette forholdet ved å sammenligne måledataene fra forsøkene.



Figur 4-10: Forhold mellom belastningsstrøm og maksimal effekt

Figur 4-10 viser at forholdet mellom belastningsstrømmen og maksimal effekt var tilnærmet proporsjonalt, noe som betyr at motstanden i gapet ikke var konstant. Det presiseres her at effektverdien som ble benyttet for å illustrere dette forholdet var en toppverdi, og ikke en vedvarende effekt.

Som det kommer frem av diagrammene i vedlegg B var spenningsfallet over det regulerbare gapet lite avhengig av belastningsstrømmen. Spenningsfallet lå mellom 1,5 V og 3 V under alle forsøkene, og økningen i effektutviklingen skyldes hovedsakelig økning i belastningsstrøm.

5 LABORATORIEFORSØK MED SERIEFEILVERN

5.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for dette laboratorieforsøket var hovedsakelig å undersøke hvilke temperaturer som kan oppstå i elektriske installasjoner under både normale forhold og ved feilkilder i kretsen. Forsøkene skulle også undersøke hvor mye den termiske isolasjonen i veggen influerer temperaturutviklingen i koblingspunktene i en elektrisk installasjon med skjult installasjonsmetode. Det ble derfor lagt vekt på at laboratorieoppsettet i størst mulig grad skulle simulere en reell elektrisk installasjon. Siden det ble funnet produkter som oppga at de kunne detektere seriefeil, ble også funksjonaliteten til et seriefeilvern undersøkt.

For å undersøke hvilke temperaturer som oppstår ved elektriske feilkilder, og om seriefeilvernet detekterer dette, ble slike feil i høy grad fremprovosert. Begrunnelsen for dette var at elektriske feil vanligvis vil oppstå over tid, og at sannsynligheten for at det skulle oppstå betydelig varmgang i den elektriske kretsen på naturlig måte var temmelig lav.

For å undersøke funksjonaliteten til seriefeilvernet ble følgende punkter undersøkt:

1. Temperaturfølsomhet

Seriefeilvernets temperaturmålinger sammenlignes med målinger fra termoelementer, for å undersøke nøyaktigheten til systemets temperaturmålinger. Det undersøkes også om vernet varsler når temperaturen overstiger alarmnivå.

2. Varmeutvikling ved underdimensjonering av leder

Undersøke temperaturforløp i koblingspunkt ved underdimensjonering av leder. Varmeutviklingen simuleres ved å redusere ledertverrsnitt fra normert krav. Denne varmeutviklingen vil også kunne oppstå ved mekanisk skade på leder. Seriefeilvernet plasseres i koblingspunktet, for å undersøke om vernet varsler om temperaturen overstiger alarmnivå.

3. Varmeutvikling ved dårlig kontaktforbindelse

Undersøke temperaturforløp i koblingspunkt ved kontaktsvikt på grunn av ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmene. Seriefeilvernet plasseres i koblingspunktet, for å undersøke om vernet varsler om temperaturen overstiger alarmnivå.

Da et seriefeilvern skal være tilkoblet en fast elektrisk installasjon over lenger tid, vil de i store deler av tiden operere under normale forhold. For forbrukeren er det derfor viktig at vernet ikke løser ut, med mindre det er fare for at det kan oppstå branntilløp. Under laboratorieforsøkene ble derfor vernet også testet under normale forhold. Undersøkelsen av funksjonaliteten til seriefeilvernet bestod derfor både av å undersøke om vernet varsler når det oppstår elektriske feil, og at det ikke varsler under normale forhold.

Det ble ikke funnet tilgjengelige laboratorier ved NTNU for forsøk som innbar utvikling av høye temperaturer og potensielle branntilløp, og det ble derfor besluttet at kretsen ikke kunne være spenningssatt med mindre det var folk til stede. Dette utelukket muligheten for å utføre langtidsforsøk, og forsøkene bestod derfor av korttidsforsøk. Tidsbegrensningen for ett forsøk ble på forhånd satt til 5 timer, hvor begrenset tid til å utføre forsøkene var en avgjørende faktor.

5.2 Testobjektet

Seriefeilvernet som ble testet under laboratorieforsøket var varmedeteksjonssystemet fra ETIM, som ble beskrevet i kapittel 3.2.1. Systemet består av en sensor (Figur 5-1), som monteres i koblingspunktet, og et kontrollpanel (Figur 5-2), som mottar signaler trådløst fra sensoren. Kontrollpanelet varsler når temperaturen i et koblingspunkt i den elektriske installasjonen overstiger en gitt verdi. Siden dette vernet detekterer feil i den elektriske installasjonen ved å reagere på varmeutvikling, vil det vil også reagere på flere feilkilder enn kun lysbuer.



Sensoren ble levert med batteri som strømforsyning, og var innstilt til å sende informasjon om målt temperatur til kontrollpanelet hvert 10. sekund. Temperaturnøyaktigheten til den termiske detektoren ble kontrollert i forkant av forsøkene, og temperaturavviket lå da innenfor $\pm 1-2$ °C. Kontrollpanelet var innstilt til å gi alarm ved temperaturer over 70 °C. Før forsøkene ble det undersøkt om systemet gav alarm ved temperaturer over denne verdien, noe det da gjorde. Kontrollpanelet hadde ikke mulighet for tilkobling av PC, og det var dermed ingen mulighet til å logge temperatur automatisk. Registrert temperatur fra ETIM ble derfor avlest manuelt fra displayet på kontrollpanelet. Denne temperaturen fremkom kun som hele grader.



Figur 5-3: Plassering av termisk detektor i koblingspunkt

Figur 5-3 viser plasseringen av den termiske detektoren øverst i koblingspunktet. Siden den ble flyttet mellom to koblingspunkt kunne den ikke limes fast, og ble derfor festet ved hjelp av et løstsittende strips. Siden det kun ble bevilget én prototype til forsøkene, ble det lagt stor vekt på forsiktighet ved montering av sensoren. Det var derfor kun den termiske detektoren som ble plassert inne i koblingspunktet, mens sender og batterienhet ble plassert utenfor. Dette medførte at det ble laget et lite hakk i stikkontaktdekselet hvor ledningsforbindelsen fra den termiske detektoren til senderen kunne gå uten å bli klemt. Dette hakket var imidlertid så lite at det antageligvis ikke vil påvirke varmeutviklingen i koblingspunktet.

Det ble gjort forsøk på å skaffe en lysbuefeildetektor fra leverandøren Siemens, som ble beskrevet i kapittel 3.1.1.2, for forsøk på laboratoriet. Geir Roald Braathen ved Siemens Norge var svært samarbeidsvillig, men oppga at det dessverre ikke var mulig å skaffe produktet klar for testing i Norge før etter at arbeidet med denne rapporten var ferdig.

5.3 Prøvevegg

For å simulere forhold i en reell elektrisk installasjon ble det konstruert en vegg, hvor det elektriske anlegget ble utført med skjult installasjonsmetode. Dette underkapittelet beskriver valg av dimensjoner på prøveveggen, og plassering av utstyr i denne.



5.3.1 Konstruksjon

Figur 5-4: Skisse av termisk prøvevegg

Figur 5-4 viser en målsatt skisse av den termiske prøveveggen, som simulerer en norsk fullisolert yttervegg. Prøveveggen bestod av to gipsplater som ble festet på et 2"-10" rammeverk av tre (2"-8" stenderverk og 2"-2" lekter). Veggen ble plassert i vertikal stilling, hvor den nederste enden hvilte mot gulvet. Isolasjonstykkelsen ble valgt til å tilfredsstille dagens krav til bygging, TEK10, der mistekravet til isolasjon i yttervegg er 20 cm, som beskrevet i kapittel 2.6. I dette kapittelet ble det også beskrevet at det ved installasjon av skjult elektrisk anlegg er en stor fordel med inntrukket dampsperre, for å sikre tettheten til dampsperren, og at denne da legges 5 cm inn

i veggen. Da dampsperren ikke har noen isolerende effekt når omgivelsestemperaturen er lik på begge sider av prøveveggen, ble denne ikke montert. Det var derimot interessant å undersøke hvilken effekt isolasjon på innsiden av dampsperren har for temperaturutviklingen i koblingspunktene. Prøveveggen ble derfor delt horisontalt på midten, hvor den øverste delen hadde 5 cm isolasjon i tillegg til minstekravet, mens den nederste delen ikke hadde isolasjon i denne spalten. Siden eldre bygninger ikke praktiserte inntrukket dampsperre, vil øverste delen også simulere temperaturutviklingen i eldre installasjoner.

5.3.2 Installasjonsmetode

Begrunnelsen av valget om kun å simulere skjult installasjonsmetode var at denne installasjonsmetoden mest sannsynlig gir dårligere varmeavledning enn åpen installasjonsmetode, i tillegg til at dagens byggeskikk for elektriske installasjoner i nye boliger hovedsakelig benytter skjult installasjonsmetode. Ved å benytte skjult installasjonsmetode vil materiellet mest sannsynlig bli utsatt for større varmebelastning enn ved åpen installasjonsmetode med samme belastningsstrøm, og forsøkene vil da også simulere verste tilfelle. Siden anlegget utføres så reelt som mulig vil også varmeavledningen i koblingspunktene bli reell.



Figur 5-5: Prøvevegg før montering av stikkontakter

Som vist i Figur 5-5 innebærer skjult installasjonsmetode at kabelforbindelsene mellom koblingspunkt blir forlagt i rør i en termisk isolert vegg, og at installasjonsmateriell innebærer innfelt montasje i veggboks. Røranlegget ble lagt rett bak kledningen, slik at all isolasjonen var plassert bak det elektriske materiellet. Til røranlegget ble det benyttet 16 mm korrugert rør. Kabelforbindelsene ble for alle forsøkene utført med isolerte ledere (enlederkabel), som tilsvarer installasjonsmetode A1 i NEK 400.

5.3.3 Installasjonsmateriell



Figur 5-6: Ferdig prøvevegg med nummerering av stikkontakter

Som det fremgår av Figur 5-6 ble det montert fire stikkontakter på prøveveggen. Begrunnelsen for de valgte avstandene var for å sikre at varmeutviklingen i et koblingspunkt ikke influerer varmeutviklingen i annet koblingspunkt. Lengden på benyttede målekabler var ca. 2 m, slik at eventuell varmeutvikling i de eksterne koblingspunktene, tilførsel og last, ikke skulle influere på varmeutviklingen i koblingspunktene. Figur 5-6 viser også senderen til seriefeilvernet ved stikkontakt 3.

Av stikkontaktene som ble montert på prøveveggen var to fysisk tilkoblet kursen (stikkontakt 3 og 4), mens to ikke var tilkoblet (stikkontakt 1 og 2). Det presiseres at kablene gikk gjennom alle koblingspunktene, selv om de ikke var tilkoblet alle stikkontaktene. I koblingspunktene med stikkontakter som ikke var tilkoblet, vil det derfor oppstå temperaturøkning som følge av ledertemperaturen på kablene. Grunnen til at det ble satt opp to stikkontakter som ikke ble tilkoblet, var å bruke temperaturen i disse koblingspunktene som referansetemperatur. Differansetemperaturen vil da være temperaturøkning i strømførende stikkontakt i forhold til den nærliggende tilsvarende strømløse stikkontakt. Ved å måle temperaturen i begge stikkontaktene, vil differansetemperaturen mellom de strømførende stikkontaktene og de strømløse stikkontaktene med stor sannsynlighet skyldes effektutvikling på grunn av elektrisk feil. Hensikten med å måle temperaturdifferanse på denne måten var å få mer nøyaktige målinger.

Alle stikkontaktene som ble benyttet var doble stikkontakter fra produsenten Elko, som var beregnet for belastningsstrømmer på 16 A og dermed ledertverrsnitt til og med 2,5 mm². Siden stikkontaktene var fra samme produsent, vil det ikke være forskjeller i metallegeringene og størrelsen på de strømførende delene på tilkoblingsklemmene. Overflatemotstanden vil derfor i utgangspunktet være tilnærmet lik på alle stikkontaktene.

Enlederkablene som ble benyttet i forsøket hadde kobber som ledermateriale, og PVC-isolasjon. Dette er den vanligste kabelkonfigurasjonen i elektriske lavspenningsinstallasjoner.

Ved tilkobling av ledere i koblingspunkt ble det ikke benyttet fast moment (momentnøkkel), hverken ved forskriftsmessig utførelse eller ved ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmene, selv om dette ville gitt mer nøyaktige måleresultat. Begrunnelsen for dette var at det i reelle elektriske installasjoner ikke benyttes slikt verktøy for tilkobling på installasjonsmateriell beregnet for belastningsstrømmer på 16 A eller lavere.

5.4 Forsøksparametere

Siden bakgrunnen for dette laboratorieforsøket var å undersøke forhold som kan oppstå i reelle elektriske installasjoner, var spenning (230 V) og frekvens (50 Hz) konstant under forsøkene. Parametrene som ble endret var belastningsstrømmen, ledertverrsnittet for tilkobling i koblingspunkt og kontaktkraften på tilkoblingsklemmene.

5.4.1 Belastningsstrøm

For å kunne undersøke hvilken innflytelse belastningsstrømmen har på effektutviklingen, og dermed temperaturutviklingen, ble det benyttet to ulike belastningsstrømmer under forsøkene. Det ble valgt å benytte høye belastningsstrømmer, som vil medføre naturlig varmgang i kontaktpunktene selv ved god kontaktforbindelse. Forsøkene vil derfor simulere høyt effektuttak, og illustrerer verste tilfelle.

De valgte belastningsstrømmene tok utgangspunkt i at installasjonsmateriellet som benyttes i dette laboratorieforsøket var beregnet for belastningsstrømmer på 16 A, og at det hovedsakelig benyttes 2,5 mm² ledertverrsnitt på kablene. Ved ledningssystemer med ledertverrsnitt på 2,5 mm² skal det forankoblede overstrømsvernets merkestrøm være 16 A eller mindre, i følge NEK 400-5-533.2.1. Overstrømsvernet som beskyttet målekretsen var derfor en automatsikring med merkestrøm 16 A, og det var naturlig at størrelsen på den ene belastningsstrømmen ble valgt til å samsvare med denne verdien.

Den andre belastningsstrømmen ble valgt for å simulere overbelastning. Størrelsen på den andre belastningsstrømmen ble derfor valgt ut i fra vernets utløsekarakteristikk, som tilsier at overstrømsvernet skal tåle belastningsstrømmer inntil 13 % over merkestrøm i *minst* én time uten at vernet løser ut. Et overstrømsvern på 16 A skal derfor kunne føre belastningsstrømmer inntil 16 A \cdot 1,13 = 18,1 A i *minst* én time før overstrømsvernet løser ut. Siden forsøkene sannsynligvis ville vare lenger enn én time, ble størrelsen på denne belastningsstrømmen valgt til å være noe lavere enn 18,1 A. Da et overstrømsvern er beregnet på å koble ut en kurs når lederstrømmen i kursen overstiger en valgt verdi med en gitt varighet, var det også interessant å undersøke hvor lenge denne belastningsstrømmen kunne stå uten at overstrømsvernet løste ut.

Den maksimale dimensjonerende strømføringsevnen for enlederkabler med 2 belastede ledere, 2,5 mm² ledertverrsnitt og PVC-isolasjon forlagt i rør i en termisk isolert vegg er 19,5 A (Tabell 52B-2 i NEK 400). Ved å velge belastningsstrømmer under kabelens strømføringsevne skal ledertemperaturen bli under 70 °C ved forskriftsmessig utførelse.

5.4.2 Endring av ledertverrsnitt

For å undersøke temperaturforløp i koblingspunkt ved varmgang og underdimensjonering av leder, ble ledertverrsnittet på kablene som var tilkoblet stikkontaktene endret. Ledertverrsnittene som ble benyttet var 2,5 mm² (ingen endring fra tilførsel), 1,5 mm² og 0,75 mm².

Ved belastningsstrømmer på 16 A er 2,5 mm² dimensjonerende ledertverrsnitt, og forsøkene på dette ledertverrsnittet vil derfor ikke simulere underdimensjonering.

Minste ledertverrsnitt for faste installasjoner med kabler av ledermateriale kobber er 1,5 mm², i følge Tabell 52B i NEK 400. En underdimensjonering til 1,5 mm² vil simulere temperaturutvikling ved bruk av dette tverrsnittet på en kurs som er sikret med et 16 A overstrømsvern. Bruk av dette ledertverrsnittet vil også simulere temperaturforløp ved mekanisk skade på leder, som kan oppstå ved at elektromontør reduserer ledertverrsnittet ved avmantling av kabel under installasjon.

Ledertverrsnitt på 0,75 mm² blir ikke benyttet i faste elektriske installasjoner, men er tillatt i bevegelige forbindelser som for eksempel i lampettledninger. Forsøkene med 0,75 mm² ledertverrsnitt simulerer derfor temperaturer som kan oppstå ved at store belastninger, som for eksempel oljeovner, kobles til skjøteledninger med dette ledertverrsnittet. Forsøkene med 0,75 mm² ledertverrsnitt vil også simulere temperaturforløp ved større mekanisk skade på leder, som kan oppstå ved at elektromontør reduserer ledertverrsnittet ved avmantling av kabel under installasjon.

5.4.3 Kontaktkraft

For å undersøke temperaturforløp i koblingspunkt ved kontaktsvikt, ble kontaktkraften på den ene tilkoblingsklemmen på den strømførende stikkontakten endret.

Under forsøkene med god kontaktforbindelse var alle tilkoblinger forskriftsmessig utført. Siden det ble besluttet å ikke benytte momentnøkkel for tilkobling av ledere, ble alle tilkoblinger kontrollert ved å trekke i leder etter tilstramming.

Under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse ble kontaktkraften på den ene tilkoblingsklemmen på stikkontakten redusert. Det var alltid kun faselederen fra tilførselen som hadde dårlig kontaktforbindelse, alle andre tilkoblinger hadde god kontaktforbindelse. Betingelsen for dårlig kontaktforbindelse var at lederen uten mye makt kunne trekkes ut av tilkoblingsklemmen, for så å puttes inn igjen. Dette medførte at de ulike ledertverrsnittene også hadde ulik avstand mellom kontaktflatene. Prosedyren bestod av å først sikre at alle tilkoblingsklemmene var tilstrammet godt, før den valgte tilkoblingsklemmen ble løsnet. Avstandene mellom kontaktflatene på stikkontakten ble da:

- 2,5 mm² ledertverrsnitt: 2,5 omdreininger (ca. 2,0 mm)
- 1,5 mm² ledertverrsnitt: 2 omdreininger (ca. 1,6 mm)
- 0,75 mm² ledertverrsnitt: 1,5 omdreininger (ca. 1,2 mm)

Ved forsøkene på kontrollert lysbue ble det innført et regulerbart gap på tilkoblingsklemmen for faselederen fra tilførselen, hvor kontaktkraften gradvis ble redusert. Avstanden mellom kontaktflatene på stikkontakten ble ikke målt etter endt forsøk.



5.5 Måleoppsett og -utstyr

Figur 5-7: Måleoppstilling for laboratorieforsøk med seriefeilvern

Figur 5-7 viser måleoppsettet for laboratorieforsøket. Belastningen som ble benyttet under forsøkene var vannmotstander, som er en ren resistiv belastning. Belastningen kunne endres trinnvis, etter ønsket belastningsstrøm, men dette medførte at den belastningsstrømmen som faktisk ble brukt var noe ulik den som ble beskrevet i kapittel 5.4.1. Belastningsstrømmen som ble benyttet var 15,5 A og 17,5 A. Overbelastningen vil dermed tilsvare 9,4 % over vernets merkestrøm.

Målesystemet ble inndelt i to deler, fellesmålinger og objektspesifikke målinger. Fellesmålingene bestod av måling av belastningsstrøm, tilførselsspenning og romtemperatur, mens de objektspesifikke målingene bestod av måling av spenning over strømførende stikkontakter og temperaturen i hvert koblingspunkt.

Måleinstrumentet som ble benyttet til fellesmålingene av belastningsstrøm og tilførselsspenning var et wattmeter, som kunne måle strømmer opp til 30 A. Da belastningsstrømmen var konstant under hvert forsøk, ble denne kun kontrollert med jevne mellomrom og ikke logget kontinuerlig.

Måleinstrumentet som ble benyttet til å måle spenningen over strømførende stikkontakter var et oscilloskop. Instrumentet var tilkoblet en PC, som gav mulighet for å konvertere måleverdier til

elektronisk form. Måleverdiene på elektronisk form ble benyttet til å visualisere spenningsdifferansen over måleobjektene. Loggeintervallet for spenning ble satt til 15 sekunder.

Temperaturmåling ble utført av termoelementer, som består av to ledere av forskjellige metaller. Når disse to lederne blir føyd sammen, vil det genereres en spenning i sammenkoblingspunktet. Denne spenningen er en funksjon av temperaturen i sammenkoblingspunktet og ledernes metaller. Siden temperaturkarakteristikkene til ulike metaller er kjent, kan den genererte spenningen i sammenkoblingspunktet konverteres til temperatur.

Termoelementene som ble benyttet i dette laboratorieforsøket var type T, som består av kobber og konstantan (kobber-nikkel legering). Type T-elementene er beregnet for temperaturområdet -75 til +260 °C, og har en nøyaktighet på \pm 0,5-1 °C. Denne nøyaktigheten ble også kontrollert i forkant av måleseriene, og det maksimale temperaturavviket ble da funnet til \pm 0,9 °C.



Termoelementene ble limt fast på baksiden av stikkontaktene ca. 7 mm fra tilkoblingsklemmene for faselederne på stikkontaktene, og var ikke i direkte kontakt med metallet, som vist i Figur 5-8. Grunnen til dette var at det ble opplyst at termoelementene ikke kunne være i direkte kontakt med 230 V. Termoelementene ble plassert i øvre halvdel av stikkontakten, siden temperaturen sannsynligvis ville bli høyest her. I hver av de to strømførende stikkontaktene ble det plassert to termoelementer, for å undersøke om det var temperaturforskjeller rundt feilstedet. Analyse av temperaturforskjeller internt i koblingspunktet var også viktig for bestemmelse av plassering for den termiske detektoren til seriefeilvernet. Bestemmelse av hvor i koblingspunktet som gir best informasjon om temperatur, uavhengig av hvor feilen oppstår, var derfor ønskelig. Termoelementene ble ført inn til koblingspunktene gjennom rørene i veggen sammen med kablene, som vist i Figur 5-9.

Termoelementene ble tilkoblet en datalogger, som igjen var tilkoblet et PC. Dette gav mulighet for å konvertere måleverdier til elektronisk form, og bestemme med hvilket intervall temperaturen fra termoelementene skulle registreres. Måleverdiene på elektronisk form ble benyttet til å visualisere temperaturforløp i måleobjektene. Loggeintervallet for temperatur ble satt til 15 sekunder.

Fullstendig utstyrsliste for laboratorieforsøket finnes i vedlegg C.

5.6 Måleprosedyrer

Det ble totalt gjennomført 24 forsøk med måling av temperatur i koblingspunkter under ulike forhold. Da måleprosedyrene var noe ulike for de forskjellige forsøkene presenteres først prosedyrene som var like for alle forsøkene, og deretter blir de konfigurasjonsspesifikke prosedyrene presentert under aktuell konfigurasjon.

Som beskrevet i kapittel 5.5 var belastningsstrømmene som ble benyttet under forsøkene 15,5 A og 17,5 A.

For å undersøke temperaturforløp i koblingspunkt ved underdimensjonering av leder ble det laget en overgang inne i koblingspunktet. Dette ble gjort ved å avslutte fase- og nøytrallederne som kom inn i boksen i en koblingsklemme (Wago), og koble til en leder fra koblingsklemmen til stikkontakten, som vist i Figur 5-10. Ledertverrsnittet på kabelen mellom koblingsklemmen og den strømførende stikkontakten kunne deretter endres. Dette ble gjort på begge sider av stikkontakten, slik at belastningsstrømmen gikk gjennom begge kablene og stikkontakten. Lederen mellom koblingsklemmen og tilkoblingsklemmen på stikkontakten var i alle tilfeller 15 cm, dvs. at total kabellengde oscilloskopet måler over var 30 cm. Ledertverrsnittene som ble benyttet var 2,5 mm² (ingen endring fra tilførsel), 1,5 mm² og 0,75 mm².



Figur 5-10: Tilkobling av stikkontakt og oscilloskop

Spenningen over koblingspunktet ble målt under alle forsøkene, og ble koblet som vist i Figur 5-10. Den målte spenningsdifferansen inkluderer alle tap mellom de to koblingsklemmene. Selve måleledningene var ca. 2 m, og overføringstapet i disse ledningene regnes som minimalt. Spenningen som måles vil derfor hovedsakelig skyldes kontaktmotstand i tilkoblingsklemmene på stikkontakten, og ledermotstand i kablene mellom koblingsklemmen og stikkontakten.

Koblingsklemmene som ble benyttet under forsøket hadde åpne/lukke mulighet, og var godkjent for alle ledertyper fra 0,08 mm² til 4 mm². De ble ansett som velegnet for forsøkene, siden

kabelforbindelsene skulle endres flere ganger. Alle tilkoblingene ble kontrollert før hvert forsøk, og det antas derfor at temperaturutviklingen på grunn av koblingsklemmene kan regnes som minimal.

5.6.1 God kontaktforbindelse

Forsøkene bestod av å undersøke temperaturutviklingen i koblingspunktene når tilkoblingene var utført på forskriftsmessig måte, med god kontaktforbindelse. Forsøkene med ledertverrsnitt 2,5 mm² simulerte derfor temperaturutviklingen under normale driftstilstander, mens forsøkene med ledertverrsnitt 1,5 mm² og 0,75 mm² simulerte temperaturutviklingen ved underdimensjonering. Målet med disse forsøkene var å undersøke hvilke temperaturnivå som kan forventes å oppstå i forskriftsmessige og underdimensjonerte elektriske anlegg, hvordan seriefeilvernet opererer under normale forhold, avdekke temperaturforskjeller ved ulik grad av isolering, samt å finne referansetemperaturer som var sammenligningsgrunnlag for måleresultater med dårlig kontaktforbindelse.

Under forsøkene med god kontaktforbindelse ble alle koblingspunktene simulert samtidig, da det på forhånd ble antatt at det ikke ville oppstå betydelig varmgang ved disse målseriene. Det ble utført 6 forsøk med god kontaktforbindelse:

- 1 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 2,5 mm² ledertverrsnitt
- 1 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 1,5 mm² ledertverrsnitt
- 1 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 0,75 mm² ledertverrsnitt
- 1 stk. 17,5 A belastningsstrøm, 2,5 mm² ledertverrsnitt
- 1 stk. 17,5 A belastningsstrøm, 1,5 mm² ledertverrsnitt
- 1 stk. 17,5 A belastningsstrøm, 0,75 mm² ledertverrsnitt

For å undersøke hvordan seriefeilvernet opererte under normale forhold ble den termiske detektoren plassert i det koblingspunktet hvor det mest sannsynlig ville bli høyest temperatur, dvs. den strømførende stikkontakten i den mest isolerte delen av veggen. Mens forsøkene pågikk ble temperaturmålingene fra seriefeilvernet kontrollert mot verdiene fra termoelementene, for å undersøke om disse registrerte tilnærmet samme verdi. På denne måten ble det også kontrollert at seriefeilvernet ikke varsler ved verdier under alarmnivået, og at vernet da også opererer hensiktsmessig under normale forhold.

Lengden på forsøkene ble bestemt av tiden fra belastningsstrømmen ble påført til temperaturen i koblingspunktet nådde en grenseverdi, dvs. at temperaturkurven flatet ut, innenfor en tidsbegrensning på 5 timer. Tidsbegrensningen ble bestemt på forhånd, hvor begrenset tid til å utføre forsøkene var en avgjørende faktor.

5.6.2 Dårlig kontaktforbindelse

Forsøkene bestod av å undersøke temperaturutviklingen i koblingspunktene ved kontaktsvikt på grunn av ufullstendig tilstramming av tilkoblingsklemmene. Forsøkene med ledertverrsnitt 2,5 mm² simulerte derfor temperaturutviklingen ved dårlig kontaktforbindelse, mens forsøkene med ledertverrsnitt 1,5 mm² og 0,75 mm² simulerte temperaturutviklingen ved både underdimensjonering og dårlig kontaktforbindelse. Kriterier for dårlig kontaktforbindelse ble beskrevet i kapittel 5.4.3. Målet med disse forsøkene var å undersøke hvilke temperaturnivå som kan forventes å oppstå ved slike feilkilder i elektriske anlegg, hvordan seriefeilvernet opererer ved feil i kretsen og med dette avdekke om det detekterer elektriske feilkilder, samt avdekke temperaturforskjeller ved ulik grad av isolering.

Under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse ble kun halve veggen, dvs. kun én strømførende stikkontakt, simulert om gangen. Grunnen til dette var at det på forhånd ble antatt at disse måleseriene ville medføre betydelig varmgang. Det ble utført 14 forsøk med dårlig kontaktforbindelse:

- 2 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 2,5 mm² ledertverrsnitt, for begge deler av veggen
- 1 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 1,5 mm² ledertverrsnitt, for begge deler av veggen
- 1 stk. 15,5 A belastningsstrøm, 0,75 mm² ledertverrsnitt, for begge deler av veggen
- 2 stk. 17,5 A belastningsstrøm, 2,5 mm² ledertverrsnitt, for begge deler av veggen
- 1 stk. 17,5 A belastningsstrøm, 1,5 mm² ledertverrsnitt, for begge deler av veggen

Etter forsøkene med 15,5 A belastningsstrøm på 0,75 mm² ledertverrsnitt ble det besluttet å ikke gjennomføre forsøk med 17,5 A belastningsstrøm på 0,75 mm² ledertverrsnitt. Dette skyldes at det oppstod veldig høye temperaturer under forsøkene med 15,5 A belastningsstrøm på 0,75 mm² ledertverrsnitt, som også vil fremgå av kapittel 5.7.2.

Lengden på forsøkene ble bestemt etter lengden på forsøket for tilsvarende konfigurasjon med god kontaktforbindelse, men forsøkene ble avsluttet tidligere hvis temperaturen nådde en grenseverdi.

5.6.3 Kontrollert lysbue

Forsøkene bestod av å undersøke temperaturutviklingen i koblingspunktene ved en kontrollert lysbue på en tilkoblingsklemme i en stikkontakt. Forsøkene simulerer ikke varmgang ut over dette ved å endre ledertverrsnitt. For å kunne utføre disse forsøkene ble tilkoblingsklemmen på en stikkontakt modifisert, slik at den fungerte som et regulerbart stang-plate gap, som vist på Figur 5-11 og Figur 5-12.





Figur 5-11: Modifisert stikkontakt

Dette ble gjort ved å file bort noe av overflaten på mutteren, slik at en bestemt del av mutteren var høyere enn resten, og på denne måten "tvinge" strømmen til å gå her. Til denne mutteren ble det loddet fast en leder med 1,5 mm² ledertverrsnitt, for å unngå løse deler. Dette medførte at disse forsøkene kun ble utført med ett ledertverrsnitt. Den fastmonterte lederen ble tilkoblet faselederen fra tilførselen, og alle andre tilkoblinger hadde god kontaktforbindelse. Skruen som regulerer avstanden mellom mutter og metallforbindelse var av ikke-ledende materiale (plast). For å kunne regulere avstanden mellom elektrodene under forsøkene ble det laget et hull på 5 mm i stikkontaktdekselet rett over plastskruen, slik at det var mulig å justere avstanden fra utsiden med et skrujern. Siden størrelsen på hullet var så lite, vil det antageligvis ikke påvirke varmeutviklingen i koblingspunktet.

Siden ledningssystemer med ledertverrsnitt 1,5 mm² med skjult installasjonsmetode skal beskyttes av overstrømsvern med merkestrøm 10 A (i følge NEK 400-5-533.2.1), ble det bestemt å benytte belastningsstrøm nærliggende denne verdien under forsøkene. Da belastningsstrømmen kun kunne endres trinnvis, ble det benyttet belastningsstrøm på 10,3 A.

Det ble først utført et referanseforsøk, der elektrodene var i god kontakt under hele forsøket. Verdiene fra dette forsøket skulle danne sammenligningsgrunnlag for senere forsøk. Deretter ble det utført 3 forsøk hvor avstanden mellom elektrodene (tilkoblingsklemmen) ble justert.

Forsøkene ble gjennomført som under forberedende laboratorieforsøk, ved at elektrodene var i god kontakt når kretsen ble påtrykt spenning, for så å redusere kontaktkraften og øke avstanden mellom dem over tid. Siden plastskruen hadde finere gjenger enn metallskruen som vanligvis benyttes, behøvdes flere omdreininger for å oppnå samme avstander som beskrevet i kapittel 5.4.3. For at ikke strømmen i kretsen skulle brytes for raskt, ble plastskruen kun justert ca. en kvart omdreining hver gang. Den ble deretter ikke justert igjen før spenningen hadde stabilisert seg.

Lengden på forsøkene ble bestemt av hvor lang tid det tok før temperaturkurven flatet ut, og hvor lang tid det tok før overslag inntraff, innenfor en tidsbegrensning på 3 timer.

5.7 Resultater

Dette underkapittelet presenterer en oppsummering av resultatene fra målingene beskrevet i kapittel 5.6. Resultatene presenteres i sin helhet som diagrammer i vedlegg D. Tabeller med fullstendige måledata finnes elektronisk i vedlegg G. Det ble i tillegg laget diagrammer med temperaturutviklingen fra både god og dårlig kontaktforbindelse ved de ulike konfigurasjonene, slik at det ble enklere å sammenligne. Disse diagrammene finnes i vedlegg E. Resultatene vil kun i liten grad diskutert i dette kapittelet, men vil bli diskutert ytterligere i kapittel 6.4.

Diagrammene som presenteres i dette underkapittelet viser sammenheng mellom spenning og temperatur i koblingspunktene som funksjon av tiden. Siden belastningsstrømmen var konstant under hvert forsøk vil effektutviklingen i koblingspunktet følge spenningen over objektet. Diagrammene som presenteres vil også vise temperaturforskjeller ved ulik grad av isolering, og sammenligninger mellom god og dårlig kontaktforbindelse. Det blir også presentert tabeller med maksimalverdier fra forsøkene.

5.7.1 God kontaktforbindelse

Resultatene etter forsøkene med god kontaktforbindelse viser jevne temperaturkurver, og at spenningsfallet over tilkoblingene var tilnærmet konstant for hvert forsøk, som vist i vedlegg D-1.1. Spenningsfallet varierte fra 36 mV ved 2,5 mm² ledertverrsnitt til 240 mV ved 0,75 mm² ledertverrsnitt. Siden spenningsfallet ved 0,75 mm² ledertverrsnitt var stabilt høyt antas det at dette spenningsfallet hovedsakelig skyldes ledermotstand i kablene, og ikke kontaktmotstand. Siden spenningsfallet var tilnærmet konstant, kan kontakten betegnes som god.

Figur 5-13 viser temperaturutviklingen som funksjon av tiden ved 15,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt etter at kretsen ble påtrykt spenning.



Figur 5-13: Temperaturforløp ved 15,5 A/2,5 mm² ledertverrsnitt med god kontaktforbindelse

Figur 5-13 viser at temperaturen i koblingspunkt i en elektrisk installasjon med forskriftsmessig utførelse stiger relativt hurtig, og at den vil kunne komme opp i 55,3 °C ved en belastningsstrøm på 15,5 A. Resulterende temperaturer ved 2,5 mm² ledertverrsnitt stemte godt med forventede verdier, da andre rapporter som beskriver lignende forsøk på 2,5 mm² ledertverrsnitt oppnådde 53,4 °C ved 19,2 A [15] og 50 °C ved 16 A [7] ved skjult installasjonsmetode. Disse forsøkene hadde mindre termisk isolasjon enn dette forsøket.

Ved å sammenligne temperaturkurvene for stikkontakt 1 og 3 (mest isolert) med temperaturkurvene for stikkontakt 2 og 4 (minst isolert), kommer det frem at temperaturen i koblingspunktene med mindre isolasjon (nedre) rundt det elektriske materiellet når sin grenseverdi hurtigere, og at disse koblingspunktene ikke oppnår like høye temperaturer som koblingspunktene i den delen av veggen med mest isolasjon (øvre). Temperaturforskjellen under dette forsøket var maksimalt 6,2 °C. Det ble observert temperaturforskjeller ved ulik grad av isolering under alle forsøkene, men differansen var hovedsakelig under 10 °C. Maksimal temperaturforskjell var 30 °C ved 0,75 mm² ledertverrsnitt.

Ved å sammenligne temperaturkurvene for de to strømførende stikkontaktene (3 og 4), kan det observeres temperaturforskjeller internt i koblingspunktene. Temperaturforskjellene internt i koblingspunktet var imidlertid maksimalt 3 °C ved god kontaktforbindelse, og anses derfor ikke som utslagsgivende. Målepunktet som målte høyest temperatur var i alle tilfeller det som var nærmest tilkoblingsklemmen for tilførselskabelen.

Under forsøkene med god kontaktforbindelse ble alle koblingspunktene simulert samtidig, og den termiske detektoren til seriefeilvernet ble derfor plassert bak stikkontakt 3. Som det kommer frem av Figur 5-13 registrerte denne sensoren temperaturverdier noe under verdiene fra termoelementene. Siden avviket var lite, og vernet ikke varslet feil ved temperaturer under 70 °C, vil det likevel konkluderes med at seriefeilvernet fungerer hensiktsmessig under normale forhold. Under forsøkene som simulerte underdimensjonering oppstod temperaturer over 70 °C, som også ble varslet av vernet. Det kan dermed konkluderes med at seriefeilvernet fungerer hensiktsmessig også ved elektrisk feil.

Tabell 5-1 presenterer en oversikt over maksimalverdiene for temperatur og effekt i koblingspunktene ved ulike belastningsstrømmer og ledertverrsnitt.

Ledertverrsnitt	Belastningsstrøm	T _{referanse,øvre}	referanse,øvre T _{max,øvre}		Γ _{referanse,nedre} Τ _{max,nedre}	
2,5 mm ²	15,5 A	41,1 °C	55,3 °C	34,7 °C	49,1 °C	0,62 W
2,5 mm ²	17,5 A	46,9 °C	64,9 °C	38,1 °C	56,0 °C	0,81 W
1,5 mm ²	15,5 A	42,3 °C	68,9 °C	35,3 °C	59,6 °C	1,35 W
1,5 mm ²	17,5 A	50,6 °C	83,1 °C	39,6 °C	70,3 °C	1,80 W
0,75 mm ²	15,5 A	43,6 °C	96,7 °C	35,2 °C	69,4 °C	3,04 W
0,75 mm ²	17,5 A	50,9 °C	120,5 °C	34,5 °C	90,5 °C	4,18 W

 Tabell 5-1: Maksimale temperaturer ved god kontaktforbindelse

Som det fremgår av Tabell 5-1 vil det utvikles betydelig varmgang i koblingspunktene ved underdimensjonering av ledertverrsnitt eller mekanisk skade på leder. Ved å påføre en belastningsstrøm på 17,5 A på 0,75 mm² ledertverrsnitt ble det registrert temperaturer over 120 °C. Det understrekes at dette tverrsnittet ikke benyttes i faste installasjoner, men at det simulerer en mekanisk skade på leder. Det var derimot ikke forventet at temperaturen skulle bli så høy med god kontaktforbindelse.

Det påpekes også at ved belastningsstrøm på 9,4 % over vernets merkestrøm kan det, selv med god kontaktforbindelse og 2,5 mm² ledertverrsnitt, oppstå temperaturer på 64,9 °C på under 5 timer. Da denne belastningsstrømmen er lavere enn kabelens strømføringsevne, og installasjonen er forskriftsmessig utført, skal ledertemperaturen bli under 70 °C. Det er imidlertid stor sannsynlighet for at ledertemperaturen var over 70 °C i dette forsøket. Vernet løste ikke ut i løpet av tiden forsøket pågikk, og det er derfor grunn til å anta at vernet heller ikke vil gjøre dette i andre elektriske installasjoner.

5.7.2 Dårlig kontaktforbindelse

Resultatene etter forsøkene med dårlig kontaktforbindelse viser at spenningsfallet over tilkoblingene var mer ustabil, og nådde høyere verdier enn ved god kontaktforbindelse. Dette medførte også at temperaturkurvene var mer ujevne enn ved god kontaktforbindelse, noe som også var forventet.

Figur 5-14 viser en sammenligning av temperaturkurvene for god og dårlig kontaktforbindelse ved 15,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt på den mest isolerte delen av veggen. Siden det ble utført to forsøk med dårlig kontaktforbindelse ved denne konfigurasjonen (Forsøk 7 (1) og Forsøk 7 (2)), vises disse med separate grafer.



Figur 5-14: Temperaturforløp ved 15,5 A/2,5 mm² ledertverrsnitt ved både god (F1) og dårlig (F7) kontaktforbindelse

Som det fremgår av Figur 5-14 var temperaturutviklingen ved dårlig kontaktforbindelse mye hurtigere, og nådde mye høyere temperaturer, enn ved god kontaktforbindelse. Siden forsøkene som presenteres i denne figuren hadde 15,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt, vil temperaturene som oppnås skyldes dårlig kontaktforbindelse alene. Den høyeste oppnådde temperaturen ved denne konfigurasjonen var 94,3 °C. Andre rapporter som beskriver lignende forsøk på 2,5 mm² ledertverrsnitt registrerte temperaturer på ca. 100 °C ved 16 A ved skjult installasjonsmetode [7].

Figur 5-14 viser også at temperaturutviklingen i referansestikkontakten (stikk 1) var høyere under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse enn med god kontaktforbindelse, til tross for at forholdene i dette koblingspunktet var uendret. Dette kan skyldes økt temperatur i hele veggen, og/eller at ledertemperaturen i hele kabelen har økt og forplantet seg som en følge av varmeutviklingen ved kontaktsvikt i kretsen.

Ved å sammenligne temperaturkurvene for stikkontakt 3 ved forsøk 7 (2), kan det observeres temperaturforskjell internt i koblingspunktet. Temperaturforskjellen internt i koblingspunktet var imidlertid maksimalt 4 °C. Årsaken til temperaturforskjellen er mest sannsynlig at det var størst temperatur nær tilkoblingsklemmen som var ufullstendig tilstrammet. Grunnen til at temperaturkurvene fra forsøk 7 (1) ikke viser samme temperaturforskjell var, som det kommer frem av Figur 5-15, at spenningsfallet over tilkoblingsklemmen var lavere ved det første forsøket med denne konfigurasjonen. Det ble registrert lignende verdier av temperaturdifferanse i koblingspunktene med to målepunkt ved flere av forsøkene. Målepunktet som målte høyest temperatur var i alle tilfeller det som var nærmest tilkoblingsklemmen for tilførselskabelen, som under disse forsøkene hadde dårlig kontaktforbindelse. Ved å sammenligne spenningskurvene i Figur 5-15 for disse to forsøkene med temperaturkurvene i Figur 5-14, kommer det frem at spenningsendringer medfører umiddelbar endring i temperaturen i koblingspunktet.



*Figur 5-15: Sammenligning av spenning over koblingspunkt ved 15,5 A/2,5 mm*²

Figur 5-15 viser at spenningen over koblingspunktet varierer mye ved dårlig kontaktforbindelse, og at spenningsfallet over koblingspunktet ved god kontaktforbindelse var tilnærmet konstant i forhold. Spenningsvariasjonene ved dårlig kontaktforbindelse vil derfor skyldes lav kontaktkraft. Spenningsvariasjonene indikerer endring i kontaktmotstand og kommer trolig av at temperaturutviklingen gjør at metallet utvider seg, som gjør det mulig for lederen å gjøre mikroskopiske endringer i posisjon. Da motstanden i kontaktpunktene er temperaturavhengig vil dette også medføre økt kontaktmotstand.

Figur 5-16 viser en sammenligning av temperaturkurvene for god og dårlig kontaktforbindelse ved 17,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt på den mest isolerte delen av veggen. Siden det ble utført to forsøk med dårlig kontaktforbindelse ved denne konfigurasjonen (Forsøk 13 (1) og Forsøk 13 (2)), vises disse med separate grafer.



Figur 5-16: Temperaturforløp ved 17,5 A/2,5 mm² ledertverrsnitt ved både god (F4) og dårlig (F13) kontaktforbindelse

Som det fremgår av Figur 5-16 gav kombinasjonen dårlig kontaktforbindelse og 17,5 A belastningsstrøm veldig høye temperaturer, med 131,9 °C som høyeste verdi. Grunnen til at disse høye temperaturene oppstod var mest trolig det høye spenningsfallet over tilkoblingsklemmene, som også skyldes dårlig kontaktforbindelse. Figur 5-17 viser en sammenligning av spenningskurvene for god og dårlig kontaktforbindelse ved 17,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt på den mest isolerte delen av veggen.



*Figur 5-17: Sammenligning av spenning over koblingspunkt ved 17,5 A/2,5 mm*²

Figur 5-17 viser at forsøk 13 (2) oppnådde et spenningsfall på 0,51 V over feilstedet, noe som gav en effektutvikling på 8,86 W. Dette er en høy effekt som oppstår i et lite kontaktpunkt, som resulterte i betydelig varmgang i koblingspunktet. Dette kommer også frem av temperaturutviklingen, som vises i Figur 5-16. Temperaturutviklingen under dette forsøket ble så høy at PVC-isolasjonen på lederen med dårlig kontaktforbindelse smeltet, og at lederen ble "sveiset" sammen med tilkoblingsklemmen. Da dette først ble oppdaget etter at forsøket var ferdig, kan det ikke anslås nøyaktig når sammengroingen skjedde, men siden spenningsfallet falt, og ble mer stabilt, etter ca. én time antas det at det skjedde rundt dette tidspunktet. Sammengroingen vil trolig ha medført at kontaktmotstanden ble redusert, og at spenningsfallet derfor avtok. Dette skjedde også under flere av forsøkene, og vises spesielt godt i forsøk 11 (vedlegg D-1.2.7) og forsøk 12 (vedlegg D-1.2.8). Grunnen til at PVC-isolasjonen smeltet skyldes trolig at kobber har veldig god varmeledningsevne, og at varmen i lederen derfor raskt spredte seg til isolasjonen. Når isolasjonen smelter vil lederen være ubeskyttet, og kan forårsake kortslutning eller jordfeil, men dette kan ikke skje med mindre den kommer i kontakt med andre ledere. Temperaturøkningen og skadene på materiellet illustrerer at dårlige kontaktforbindelser vil utgjøre brannfare. Det må også nevnes at overstrømsvernet ikke løste ut under disse forsøkene, og at disse temperaturene vil kunne oppstå uten at overstrømsvernet beskytter mot det. Når synlige skader ble observert på materiellet i etterkant av et forsøk, ble materiellet byttet før neste forsøk begynte.

Siden termoelementene som ble benyttet under forsøkene ikke kunne være i direkte kontakt med 230 V, ble ikke ledertemperaturen målt under forsøkene. Temperaturene som presenteres i disse diagrammene ble målt ca. 7 mm fra lederen, og temperaturen på selve lederen vil sannsynligvis være enda høyere, men det er ikke grunnlag for å anslå noen konkret verdi.

Under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse ble den termiske detektoren til seriefeilvernet plassert i koblingspunktet med den strømførende stikkontakten. Temperaturmålingene fra sensoren fulgte i alle tilfellene temperaturmålingene fra termoelementene i samme koblingspunkt, og temperaturavviket var i de fleste tilfeller lite. Siden temperaturen i alle forsøkene med kontaktforbindelse medførte temperaturer godt over 70 °C, og seriefeilvernet i alle tilfeller varslet i det den målte temperaturen var 70 °C eller mer, kan det konkluderes med at seriefeilvernet fungerer hensiktsmessig ved elektriske feil.

Alle forsøkene som ble utført med dårlig kontaktforbindelse medførte temperaturer godt over 70 °C, hvor 86,8 °C ved 15,5 A belastningsstrøm og 2,5 mm² ledertverrsnitt på den minst isolerte delen av veggen var den laveste verdien. Under forsøkene som simulerte underdimensjonering ble temperaturene naturligvis også veldig høye. Tabell 5-2 presenterer en oversikt over maksimalverdiene for temperatur og effekt i koblingspunktene ved ulike belastningsstrømmer og ledertverrsnitt.

Ledertverrsnitt	Belastningsstrøm	T _{referanse,øvre}	T _{max,øvre}	P _{max,øvre}	T _{referanse,nedre}	T _{max,nedre}	P _{max,nedre}
2,5 mm ²	15,5 A	45,8 °C	94,3 °C	4,79 W	46,2 °C	86,8 °C	4,60 W
2,5 mm ²	17,5 A	53,6 °C	131,9 °C	8,86 W	40,8 °C	124,4 °C	8,79 W
1,5 mm ²	15,5 A	56,6 °C	97,4 °C	2,79 W	44,1 °C	92,8 °C	3,35 W
1,5 mm ²	17,5 A	64,3 °C	126,7 °C	5,51 W	50,1 °C	120,0 °C	6,16 W
0,75 mm ²	15,5 A	44,1 °C	139,7 °C	9,33 W	36,8 °C	114,0 °C	6,31 W

 Tabell 5-2: Maksimale temperaturer ved dårlig kontaktforbindelse

Som det fremgår av Tabell 5-2, ble temperaturen ved 0,75 mm² ledertverrsnitt og 15,5 A belastningsstrøm nesten 140 °C. Denne temperaturverdien ble ansett til å være så høy at forsøk med 17,5 A på dette ledertverrsnittet ikke ble gjennomført. Tabellen viser også at koblingspunktet i delen med mest isolasjon (øvre) oppnår høyere temperatur, selv med lavere effektutvikling i koblingspunktet.

5.7.3 Kontrollert lysbue

Resultatene etter forsøkene med kontrollert lysbue viser at spenningsfallet over tilkoblingene var meget ustabil. Siden forsøkene med kontrollert lysbue innebar å endre avstanden mellom elektrodene gradvis, vil endringene også vise igjen i diagrammene for spenningen over koblingspunktet. Dette medførte også at temperaturforløpene var noe ujevne.

Siden forsøkene med kontrollert lysbue benyttet den samme konfigurasjonen for alle forsøkene, blir alle temperaturkurvene presentert i samme diagram. Figur 5-18 viser temperaturutviklingen i løpet av én time for alle forsøkene som funksjon av tiden etter at kretsen ble påtrykt spenning.



Figur 5-18: Temperaturutviklingen i løpet av én time for forsøkene med kontrollert lysbue

Som det kommer frem av Figur 5-18, ble temperaturen rundt 70 °C for alle forsøkene. Da seriefeilvernet målte noe lavere temperaturverdier enn termoelementene, målte dette aldri temperaturer over 70 °C. Dette førte til at vernet ikke varslet under noen av forsøkene med kontrollert lysbue, før det oppstod brudd i kretsen.

For å illustrere hvor ustabil spenningen over koblingspunktet var under disse forsøkene, viser Figur 5-19 spenningen som funksjon av tiden etter at kretsen ble påtrykt spenning for det ene forsøket. Som det fremgår av tidsaksen varte dette forsøket lenger enn de andre, da det tok lenger tid før det oppstod brudd i kretsen.



Figur 5-19: Spenning over koblingspunkt ved det første forsøket med kontrollert lysbue

Tabell 5-3 presenterer en oversikt over maksimalverdiene for temperatur og effekt i koblingspunktene under forsøkene med kontrollert lysbue.

Forsøk	T _{ref}	T _{max}	P _{max}
Referanse	32,5 °C	46,6 °C	0,76 W
1	32,0 °C	76,4 °C	3,76 W
2	31,4 °C	71,1 °C	3,09 W
3	31,7 °C	74,3 °C	3,82 W

Tabell 5-3: Maksimale temperaturer ved forsøk med kontrollert lysbue

Det må understrekes at denne forsøksserien ble utført ved en belastningsstrøm på 10,3 A, og at resultatene derfor ikke kan sammenlignes direkte med resultatene som ble presentert i kapittel 5.7.1 og 5.7.2. Temperaturverdiene som kommer frem av Tabell 5-3 viser likevel at varmeutviklingen som ble utviklet under disse forsøkene kan regnes som betydelige, ettersom maksimaltemperaturene for forsøk 1-3 var 25-30 °C høyere enn referanseforsøket.

6 DISKUSJON

6.1 Generelt

Seriefeil i elektriske installasjoner skyldes hovedsakelig kontaktsvikt i koblingspunkter. De to typiske feilkildene som beskrives i denne rapporten er serielysbue og glødende kontaktforbindelse. I den nasjonale brannårsaksstatistikken beskrives kun feilkilder under benevnelsen serielysbue, og det er derfor grunn til å tro at dette dekker begge feilkildene. Dette vil være noe misvisende, og denne feilkilden burde eventuelt bli endret til seriefeil. Det må presiseres at selv om seriefeil er en fremtredende brannårsak i Norge, er prosentandelen seriefeil i forhold til antall koblingspunkt i norske installasjoner ganske lav. Problemet er imidlertid at branntilløp i ett av boligens koblingspunkt i verste tilfelle kan være nok til å antenne hele boligen.

Plastmaterialene som anvendes i elektrisk materiell og utstyr i dag testes i henhold til temperaturer som kan opptre ved glødende kontaktforbindelser. Dette utføres etter en standard som er utviklet med bakgrunn i at glødende kontaktforbindelse er den dominerende seriefeilen i resten av Europa og USA. Dette gir grunn til å tro at glødende kontaktforbindelser er den dominerende seriefeilen også i Norge. Men ettersom serielysbuer kan forårsake mye høyere temperaturer enn glødende kontaktforbindelser, bør det vurderes om installasjonsmateriellet skal designes etter disse temperaturene. Spørsmålet er hvilken seriefeil som er den dominerende brannårsaken i Norge, og om materiellet i så fall skal designes etter temperaturer som kan opptre hvis denne feilen inntreffer. Det hjelper lite om plastmateriellet i elektrisk installasjonsmateriell blir godkjent i henhold til standarden for glødende kontaktforbindelser dersom feilkilden som inntreffer oppnår vesentlig høyere temperaturer.

Ut fra brannstatistikken er det ikke mulig å undersøke hvor stor andel av brannene som skyldes installasjonsfeil eller utførelse som svekkes over tid. Stor byggeaktivitet og hardt press på byggemarkedet kan være en medvirkende faktor til at det gjøres feil ved installasjonsarbeid.

6.2 Deteksjonsprinsipper

Deteksjon av seriefeil ble i denne rapporten inndelt i to hovedprinsipper; analyse av strømkarakteristikk og analyse av temperaturutvikling. Prinsippene er ganske forskjellige, og begge har sine fordeler og ulemper.

Deteksjonsprinsippet som benytter analyse av strømkarakteristikk plasseres i sikringsskapet, og bryter strømtilførselen om det gjenkjenner spesifikke bølgekarakteristikker som kjennetegner lysbuefeil. Siden vernet monteres foran kursen, vil den ha mulighet til å detektere seriefeil som oppstår også utenfor koblingspunkt. Ulempen med dette deteksjonsprinsippet er derimot at det kun vil detektere lysbuefeil, og at det derfor ikke detekterer elektriske feil ut over dette.

Deteksjonsprinsippet som benytter analyse av temperaturutvikling baseres på informasjon fra ulike sensorer. Dette medfører at noen av systemene bestod av flere termiske sensorer pr. kurs, som ble plassert i eller nær koblingspunktene i den elektriske installasjonen. Når sensorene plasseres i koblingspunkter vil de kun detektere seriefeil som oppstår i nærheten av sensoren, og vil derfor ikke ha mulighet til å detektere seriefeil som oppstår utenfor koblingspunkt. Fordelen med dette vernet er imidlertid at den detekterer alle elektriske feil som forårsaker varmgang, og vil derfor beskytte mot flere feilkilder enn bare lysbuefeil. Vernene som benyttet dette deteksjonsprinsippet gav hovedsakelig kun varsling ved feil, og behøvde installasjon av tilleggsmoduler i sikringsskapet for å kunne bryte kretsen ved deteksjon av elektrisk feil.

Det ble funnet krav til installasjon av seriefeilvern på utvalgte kurser i den amerikanske normen for elektriske installasjoner. Dette kravet har eksistert i flere år, og har medført at det finnes flere produkter for deteksjon av seriefeil på det amerikanske markedet. Etter å ha kontaktet det norske avdelingskontoret for noen av produsentene som lager de amerikanske vernene, kom det frem at Siemens nå har laget et vern som er bygget på samme prinsipp beregnet på europeiske nettsystemer. Dette vernet vil innen kort tid være tilgjengelig i Norge.

Det ble funnet flere løsninger for deteksjon av seriefeil, men de fleste norske patentene er fortsatt i utviklingsfasen. Det systemet som er mest utbredt på det norske markedet i dag er Electric Fire Prevention, som detekterer branntilløp i den elektriske installasjonen ved hjelp av ionedetektorer. Da det ble funnet produkter for deteksjon av seriefeil, som enten allerede finnes på det norske markedet eller gjøres tilgjengelig innen kort tid, vil ikke mangelen på tilgjengelige løsninger lenger begrense muligheten for å installere disse produktene i norske elektriske anlegg.

6.3 Forberedende forsøk

De forberedende forsøkene bestod av å generere seriefeil, for å undersøke hvilke effekter som kan oppstå i kontaktpunkter ved slike elektriske feil på 230 V AC. Under disse forsøkene ble det avdekket at effektutviklingen var sterkt avhengig av belastningsstrømmen, og at forholdet mellom belastningsstrøm og maksimal effekt var tilnærmet proporsjonalt. Den høyeste registrerte effekten var 44,2 W, ved en belastningsstrøm på 15,5 A.

Under forsøkene ble det hovedsakelig observert glødende kontaktforbindelser. Det ble her observert hvordan all strømmen kun gikk gjennom et par punkter, og at antallet punkter avtok når kontaktkraften ble redusert. Lysbuen oppstod kun som et glimt i det strømmen i kretsen ble brutt, på grunn av at avstanden mellom elektrodene ble for stor. Under forsøkene lyktes det derfor ikke å opprettholde en strømbegrenset lysbue over lang tid ved 230 V AC, og det kan konkluderes med at praksis stemmer godt med teorien. Siden det samme forløpet skjedde hver gang, kan det tyde på at hovedproblemet med seriefeil i elektriske lavspenningsinstallasjoner hovedsakelig skyldes glødende kontaktforbindelser, og ikke serielysbue. Denne oppfatningen deles også av Magne Runde ved NTNU/SINTEF [37], som har utført forsøk på glødende kontaktforbindelser vil derimot kunne forårsake betydelig varmeutvikling før lysbuen inntreffer.

6.4 Laboratorieforsøk med seriefeilvern

6.4.1 Generelt

Bakgrunnen for laboratorieforsøket var hovedsakelig å undersøke hvilke temperaturer som kan oppstå i elektriske installasjoner under både normale forhold og ved feilkilder i kretsen. Det ble derfor lagt vekt på at laboratorieoppsettet i størst mulig grad skulle simulere en reell elektrisk installasjon. Siden forsøkene også skulle undersøke hvor mye den termiske isolasjonen i veggen influerer temperaturutviklingen i koblingspunktene i en elektrisk installasjon, ble laboratorieoppsettet laget slik at det simulerte en elektrisk installasjon med skjult installasjonsmetode. Denne oppgaven undersøker derfor ikke hvilke temperaturer som kan oppstå ved åpen installasjonsmetode. Da åpen installasjonsmetode sannsynligvis vil oppnå bedre varmeavledning til omgivelsene, er det imidlertid grunn til å anta at temperaturutviklingen i koblingspunkt ved denne installasjonsmetoden vil være noe lavere enn ved skjult installasjonsmetode.

Siden det ble funnet flere produkter for deteksjon av seriefeil, ble det også undersøkt funksjonaliteten til et seriefeilvern. Seriefeilvernet som ble undersøkt under forsøkene detekterte feil i den elektriske kretsen ved å analysere temperaturutvikling i koblingspunkt, og var kalt Electric Temperature Increase Monitoring.

Kablene som ble benyttet under forsøkene var i alle tilfeller isolerte ledere (enlederkabler). Det ble derfor ikke undersøkt om temperaturutviklingen i koblingspunktene vil bli annerledes hvis det benyttes flerlederkabler (PR eller PFXP).

Belastningen som ble tilkoblet kretsen ble i alle tilfeller fast tilkoblet, dvs. at belastningen ikke ble tilkoblet via støpsel i stikkontaktene. Det ble derfor ikke undersøkt om temperaturutviklingen i koblingspunktene ble forskjellig etter hvordan belastningen ble tilkoblet.

Det ble valgt å benytte to ulike belastningsstrømmer, hvor den ene simulerte overbelastning. Under disse forsøkene ble det benyttet en belastningsstrøm på 17,5 A, noe som tilsvarer 9,4 % over vernets merkestrøm. Denne belastningsstrømmen stod uavbrutt under hele forsøkene, som varte i nesten 5 timer, før forsøket ble avsluttet manuelt. Dette vil si at overstrømsvernet vil føre denne strømmen uten å løse ut også i andre elektriske installasjoner, og de temperaturer som oppstod i koblingspunkter under disse forsøkene vil også kunne oppstå i reelle installasjoner. Overstrømsvernet vil derfor ikke hindre at temperaturen når de verdier som oppnås i dette forsøket, selv med overlast på rundt 10 %. Belastningsstrømmen var konstant under hvert forsøk. Det ble derfor ikke undersøkt om temperaturutviklingen og skadene på materiellet vil bli annerledes ved varierende belastning, som vil være typisk for bl.a. termostatregulert utstyr.

Det ble hovedsakelig kun gjennomført ett forsøk pr. måleoppsett. Det antas at forsøkene med god kontaktforbindelse vil gi tilnærmet like resultater ved flere gjennomføringer, men det er usikkert om forløpene ved dårlig kontaktforbindelse vil gi like resultater ved flere gjennomføringer. Dette bekreftes også av de forsøkene hvor måleoppsettet ble gjennomført to ganger, hvor forløpene i mange tilfeller var ulike. Det er derfor uvisst om de samme resultatene vil inntreffe gjentatte ganger, selv med samme oppsett.

6.4.2 Resultater

Resultatene fra laboratorieforsøkene viste store temperaturforskjeller fra normale forhold til feilsituasjoner i elektriske installasjoner med skjult installasjonsmetode. Det ble også observert at termisk isolasjon rundt installasjonsmateriellet i veggen influerer temperaturutviklingen, ved at det ble målt temperaturforskjeller mellom ulike deler av veggen.

6.4.2.1 Temperaturforløp under normale forhold

Karakteristiske trekk ved temperaturforløpene var små tidskonstanter, dvs. at temperaturen stiger hurtig når kretsen blir påsatt spenning. Under normale forhold, med 2,5 mm² ledertverrsnitt, 15,5 A belastningsstrøm og god kontaktforbindelse, økte temperaturen i koblingspunktet i den mest isolerte delen av veggen fra 22,7 °C ved oppstart til 55,3 °C på under 5 timer. Til sammenligning ble temperaturen i den minst isolerte delen av veggen 49,1 °C i løpet av samme tidsperiode. Romtemperaturen under dette forsøket var maksimalt 24 °C, noe som er lavere enn dimensjonerende omgivelsestemperatur på 30 °C, og medfører at temperaturen i koblingspunktet trolig vil bli høyere ved høyere omgivelsestemperatur. Siden målingene ble foretatt ca. 7 mm fra tilkoblingsklemmen vil sannsynligvis ledertemperaturen være noe høyere enn resultatene som presenteres her, og kan være i nærheten av grensetemperaturen på 70 °C for PVC-isolasjon. Forsøkene gir ikke svar på temperaturforskjellen mellom lederen og målepunktet. Disse resultatene kan derimot tyde på at den dimensjonerende strømføringsevnen er noe høy.

6.4.2.2 Temperaturforskjeller ved ulik grad av termisk isolasjon

Ved undersøkelsen av hvor mye den termiske isolasjonen i veggen influerer temperaturutviklingen i koblingspunktene i en elektrisk installasjon, ble laboratorieoppsettet laget med to forskjellige isolasjonstykkelser. Prøveveggen var delt horisontalt på midten, hvor den øverste delen ble isolert med 25 cm isolasjon og den nederste delen ble isolert med 20 cm. I den nederste delen bestod de resterende 5 cm mellom isolasjonen og kledningen av en luftspalte.

Ved å sammenligne temperaturforskjellene mellom øvre og nedre del av veggen, kommer det klart frem at den delen med mest isolasjon medfører høyere temperatur i koblingspunktene. Det var derimot antatt på forhånd at temperaturdifferansen skulle bli større enn resultatene i etterkant viser. Ved forsøket med god kontaktforbindelse, 2,5 mm² ledertverrsnitt og 15,5 A var temperaturforskjellen kun 6,2 °C etter ca. 5 timer, men som det kommer frem av grafen er temperaturen i øvre del fortsatt stigende, mens temperaturen i nedre del har flatet ut. Ved forsøk over lenger tid antas det derfor at temperaturdifferansen vil være mye høyere enn 6 °C. Under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse med 2,5 mm² ledertverrsnitt var temperaturforskjellen

7,5 °C ved både 15,5 A og 17,5 A. Det ble observert temperaturforskjeller ved ulik grad av isolering under alle forsøkene, men differansen var hovedsakelig under 10 °C.

Årsaken til temperaturforskjellen er at isolasjonen ligger helt inntil installasjonsmateriellet, og at den delen med minst isolasjon kan avgi varme til luftspalten rundt koblingspunktene. Det presiseres at den delen med mest isolasjon hadde all isolasjonen bak rørene, slik at rørene ligger helt inntil kledningen. Ved en temperaturøkning i installasjonsmateriellet vil varmen transporteres til de omgivelsene med lavest temperatur [17], og siden den termiske isolasjonen har lav varmeledningsevne vil sannsynligvis varmen gå inn i rommet og ikke mot resten av veggen. Det antas derfor at isolasjonstykkelsen, når all isolasjonen ligger bak rørene, ikke har stor innvirkningskraft. Hvis isolasjonen på innsiden av dampsperren derimot legges på fremsiden av rørene, slik at de har isolasjon på alle sider, antas det at temperaturutviklingen i koblingspunktene vil bli enda høyere.

6.4.2.3 Temperaturforløp ved elektriske feilkilder

Under forsøkene som simulerte elektriske feilkilder ble det observert at temperaturen stiger enda hurtigere enn ved god kontaktforbindelse. Dette gav høye temperaturer i koblingspunktene i løpet av veldig kort tid.

Under forsøkene som simulerte underdimensjonering av ledertverrsnitt eller mekanisk skade på leder ved god kontaktforbindelse ble det registrert temperaturer over 120 °C ved belastningsstrøm på 17,5 A på 0,75 mm² ledertverrsnitt. Dette tverrsnittet benyttes ikke i faste installasjoner.

Under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse ble temperaturene mye høyere enn med god kontaktforbindelse. Forsøkene med 2,5 mm² ledertverrsnitt resulterte i 131,9 °C i den mest isolerte delen ved 17,5 A belastningsstrøm. Under dette forsøket var temperaturstigningen veldig hurtig, og temperaturen i koblingspunktet var over 70 °C allerede etter 10 minutter. Dette medførte også at lederen med lav kontaktkraft ble "sveiset" fast til tilkoblingsklemmen på stikkontakten. Ved å sammenligne temperaturkurvene mellom god og dårlig kontaktforbindelse kommer det frem at temperaturforskjellene var store. Ved 2,5 mm² ledertverrsnitt og 15,5 A var temperaturforskjellen mellom god og dårlig kontaktforbindelse 39 °C.

Forsøkene som simulerte både underdimensjonering og dårlig kontaktforbindelse gav også veldig høye temperaturer. De høyeste temperaturene ble oppnådd ved kombinasjonen 0,75 mm² ledertverrsnitt og dårlig kontaktforbindelse, med 139,7 °C etter 2 ½ time som høyeste verdi. Da denne temperaturen ble nådd ved 15,5 A belastningsstrøm ble det valgt å ikke teste denne konfigurasjonen ved 17,5 A. Temperaturforskjellen mellom god og dårlig kontaktforbindelse ved 15,5 A på 0,75 mm² ledertverrsnitt var 43 °C. Dette illustrerer at underdimensjonering og mekanisk skade på ledere vil medføre ytterligere varmgang i koblingspunktene, og at dette i høy grad vil medføre brannfare.

Ved å sammenligne temperaturutviklingen i stikkontaktene som ikke var tilkoblet ved god og dårlig kontaktforbindelse, kan det observeres høyere temperaturer under forsøkene med dårlig kontaktforbindelse. Dette til tross for at forholdene i dette koblingspunktet var uendret. Siden strømførende ledere avgir varme også under normale forhold, vil det alltid være noe varmeavgivelse fra elektrisk utstyr, også inne i rørene. Siden kobber også er en god termisk leder, vil en temperaturøkning i ett punkt kunne forplante seg langs lederen. Temperaturforskjellen kan derfor skyldes økt temperatur i hele veggen, og/eller at den økte ledertemperaturen har forplantet seg i hele kabelen som en følge av at varmeutviklingen ved kontaktsvikt.

6.4.2.4 Spenningsforløp

Ved å sammenligne spenningen over stikkontakten med temperaturen i koblingspunktet kommer det frem at kurvene følger hverandre. Dette skyldes at strømmen gjennom kretsen er konstant, og når spenningen over stikkontakten da øker, vil også effektutviklingen øke. Siden spenningen over tilkoblingsklemmene ved god kontaktforbindelse var tilnærmet konstant, gav dette et forutsigbart temperaturforløp. Ved innføring av dårlig kontaktforbindelse ble spenningen over tilkoblingsklemmene mer uforutsigbar. Dette gjenspeiles også på temperaturforløpene, som er mer ujevne enn hva tilfellet var ved god kontaktforbindelse. Ved å sammenligne temperaturutviklingen i koblingspunktene med effektutviklingen over feilstedet kan det konkluderes at temperaturutviklingen var veldig høy i forhold til registrert effekt. Da den maksimale effekten som ble målt under disse forsøkene var mye lavere enn ved samme belastningsstrøm under de forberedende forsøkene, vil temperaturutviklingen ved de effektene som ble målt under de forberedende forsøkene føre til at temperaturen i koblingspunktene blir mye høyere.

Ved å undersøke spenningsforløpene fra forsøkene ved dårlig kontaktforbindelse observeres plutselige variasjoner, som indikerer endring i kontaktmotstand. Grunnen til at det plutselig oppstår spenningsvariasjoner etter en viss tid kan skyldes ulik termisk utvidelseskoeffisient på leder og tilkoblingsklemmene, da disse består av ulike metaller. Dette forsterkes også av at kontaktkraften i utgangspunktet var lav. Denne forskjellen kan føre til at det oppstår mikroskopiske posisjonsendringer mellom elektrodene, som igjen fører til at elektrodene blir forskjøvet i forhold til hverandre. Dette fenomenet kalles "fretting" [10]. Som det fremgår av teorikapittelet vil også motstanden i kontaktpunktene være avhengig av temperaturen. Magne Runde [37] opplyser at spenningsforløpene over feilstedet hadde likheter med forløp han har sett i lignende konfigurasjoner tidligere [8]. Han påpeker at det er veldig karakteristisk at spenningen plutselig endrer verdi ved denne typen feil.

Spenningsforløpene viser også tilfeller med store spenningsvariasjoner som plutselig opphører, og synker til en mye lavere verdi. Årsaken til dette er sannsynligvis at temperaturen i kontaktpunktet har blitt så høy at lederen ble "sveiset" fast til kontakten, slik at det har blitt en god metallisk forbindelse. Etter noen av forsøkene måtte det også brukes kraft for å bryte forbindelsen, og elektrodene som var løst tilkoblet hverandre før forsøket, var da fast forbundet. Denne sammengroingen er trolig forårsaket av at det har blitt dannet en bro av kobberoksid-belegg mellom lederen og tilkoblingsklemmen.

Siden belastningsstrømmen under disse forsøkene var konstant var trolig de relative posisjonsendringene mellom elektrodene veldig små. Hadde forsøksseriene derimot påført strømmen i intervaller, som simulerer en belastning som skrus av og på, slik at materialene hadde blitt nedkjølt mellom hvert intervall, ville trolig de relative bevegelsene mellom festeskruen og lederen blitt større. Varmeutviklingen i kontaktflatene ville da bli veldig høy, men strømmen vil fortsatt gå gjennom kontakten tilsynelatende som normalt.

6.4.3 Feilkilder

Da seriefeil som regel utvikler seg over lenger tid, var sannsynligheten for at det skulle oppstå betydelig varmgang i den elektriske kretsen på naturlig måte innen tidsbegrensningen temmelig lav. Feilkildene som ble introdusert i det elektriske anlegget ble derfor i høy grad fremprovosert.

På forhånd ble det bestemt at skrutilkoblingene på stikkontakten ikke skulle trekkes til med momentnøkkel, da dette ikke blir gjort i reelle elektriske installasjoner. Da momentet sannsynligvis vil variere noe, vil det kunne betegnes som en kilde til variasjon i måleresultatene.

Ved forsøkene med dårlig kontaktforbindelse ble tilkoblingsklemmene løsnet med et bestemt antall omdreininger, men siden dette ble utført manuelt vil dette også kunne betegnes som en kilde til variasjon i måleresultatene. Graden av dårlig kontakt viste seg å være vanskelig å kontrollere, som det også fremgår av spenningsdifferansen over feilstedet, selv om det ble utført på samme måte av samme person. Da montasje av stikkontaktdekselet etter fratrekking av tilkoblingsskruene også medførte vibrasjoner i selve stikkontakten, som igjen fører til at den løsnede lederen mest sannsynlig beveger seg noe, er det ikke mulig å bestemme hvordan lederen er plassert under stikkontaktens tilkoblingsklemme i det kretsen blir strømsatt. Når dekselet er montert på stikkontakten er det ikke mulig å endre dette, og det er heller ikke mulig å undersøke i etterkant. Dette fikk konsekvenser for temperaturutviklingen, og forskjellen mellom god og dårlig kontaktforbindelse ble ikke i alle tilfeller like stor som antatt. Dette punktet understreker imidlertid hvor liten kontroll en boligeier har på forholdene bak stikkontakten.

Temperaturavviket til termoelementene ble på forhånd kontrollert til ± 0.9 °C. Det er derimot ikke mulig å stadfeste hvilken betydning plasseringen av termoelementene har, men det påpekes at dette kan ha en potensiell betydning. I kontaktpunktene hvor det ble plassert to termoelementer varierte avviket fra tilnærmet 0 til 5 % for stikkontakt 3, og 11,4 % for stikkontakt 4. Det blir derfor vanskelig å anslå måleusikkerheten. I alle tilfeller hvor det er registrert temperaturforskjeller internt i koblingspunktet, ble den høyeste temperaturen registrert på den siden hvor tilførselen var tilkoblet. Dette var også tilkoblingsklemmen som hadde dårlig kontaktforbindelse ved noen av forsøkene. Det er derfor grunn til å tro at bakgrunnen for at den registrerte temperaturen er høyere, er at temperaturen faktisk var høyere i dette punktet. I de fleste tilfeller var temperaturforskjellen lav, noe som tilsier at temperaturen sannsynligvis var ganske lik over alt inne i koblingspunktet. Ved å sammenligne temperaturutviklingen med
spenningen over koblingspunktet, observeres en tydelig sammenheng mellom kurvene. Dette skulle også tilsi at temperaturendringene ikke skyldes feil i termoelementene.

6.4.4 Seriefeilvern

Undersøkelsen av funksjonaliteten til seriefeilvernet, kalt Electric Temperature Increase Monitoring, bestod både av å undersøke om vernet varsler når det oppstår elektriske feil, og at det ikke varsler under normale forhold.

I forkant av forsøkene ble temperaturnøyaktigheten kontrollert, der temperaturavviket var \pm 1-2 °C. Det ble også bekreftet at systemet gav alarm ved temperaturer over 70 °C, som var innstilt alarmnivå.

Det ble montert to termoelementer i koblingspunktene med strømførende stikkontakter for å avdekke om det var temperaturforskjeller internt i koblingspunktet. Da temperaturforskjellene internt i koblingspunktene var lave, ble det konkludert med at den termiske detektoren vil kunne gi et bilde av temperaturen i koblingspunktet uansett hvor feilen måtte oppstå i boksen, og uansett hvor den plasseres.

Temperaturmålingene fra den termiske detektoren viste seg å være ganske sammenfallende med temperaturmålingene fra termoelementene, og enheten responderte bra på temperaturendringer. Det ble ikke varslet alarm ved temperaturer under 70 °C, og gjengav da kun temperaturverdien i koblingspunktet. Denne temperaturen fremkom bare som hele grader, og derfor ble grafen med registrert temperatur noe mer hakkete enn temperaturregistreringen fra termoelementene, men dette er av praktisk liten relevans. Ved temperaturer over 70 °C ble dette signalisert både ved lydsignal og med teksten "ALARM fra sensor" på displayet. Det vil derfor konkluderes med at enheten fungerer etter hensikten, både under normale forhold og ved elektriske feil i kretsen.

Enheten viste seg å være veldig robust, da den ble flyttet flere ganger uten at funksjonaliteten ble redusert. Temperatursensoren fungerte under alle forsøkene, og viste tilnærmet lik verdi som termoelementene hele tiden. Temperatursensoren fungerte selv om den ble utsatt for temperaturer på opp mot 140 °C.

6.4.5 Termiske skader på materiell

Ved undersøkelsen av hvilke temperaturer som kan oppstå i elektriske installasjoner ble temperaturen i koblingspunktene så høy at noe av koblingsmateriellet måtte byttes ut underveis. Varmeutviklingen ved dårlig kontaktforbindelse medførte at både kabler, koblingsklemmer (Wago) og stikkontakter ble skiftet.

Temperaturutviklingen i kontaktpunktet ved dårlig kontaktforbindelse ble så stor at lederisolasjonen hadde svi- og smelteskader, samt at metallet var misfarget, noe som gir grunnlag for å anta at isolasjonsevnen til materialet er betydelig redusert. I noen tilfeller var isolasjonen smeltet helt ned til metallet, slik at lederen var delvis uisolert. Misfargingen av kobberet er sannsynligvis et kobberoksidbelegg, som har blitt dannet mens temperaturen i kontaktpunktet har vært svært høy. Ved noen av forsøkene satt lederen fast i tilkoblingsklemmen på stikkontakten, selv om den var løs før forsøket startet. Dette innebærer trolig at temperaturen har blitt så høy at lederen ble "sveiset" fast. Årsaken er trolig at det har blitt dannet en bro av kobberoksidbelegg mellom lederen og tilkoblingsklemmen. Etter disse forsøkene var også tilkoblingsklemmene på stikkontakten med dårlig kontaktforbindelse sterkt misfarget. Koblingsklemmene (Wago) ble også misfarget, men i noe mindre grad siden de var lenger unna feilstedet.

De materielle skadene kunne imidlertid ikke synes fra utsiden, bortsett fra at stikkontaktene var veldig varme ved berøring. Skadene på koblingsmateriellet ble først avdekket ved å løsne hele stikkontakten fra koblingsboksen. Dette har personer uten fagbrev ikke lov til å gjøre, noe som medfører at boligeiere i dag ikke har kunnskap om tilstanden i koblingspunktene. Ved å installere et seriefeilvern, som det som ble testet under disse forsøkene, kan brukeren få informasjon om tilstanden til den elektriske installasjonen, og dermed kontakte fagpersonell ved alarm. Et slikt vern vil derfor medføre økt trygghet for brukeren.

De materielle skadene ved disse forsøkene illustrerer hvor alvorlig seriefeil er, og at det åpenbart kan oppstå branntilløp som følge av slike feil. Da forsøkene som ble gjennomført kun var korttidsforsøk, med maksimal varighet på 5 timer, vil det være naturlig å anta at langtidseffektene også vil være mye mer omfattende. Figurene under viser eksempler på materielle skader som oppstod under forsøkene.



6.5 Henstilling til tilsynsmyndighetene

Ved at denne rapporten presenterer opptil flere produkter for deteksjon av seriefeil, som enten allerede finnes på det norske markedet eller gjøres tilgjengelig innen kort tid, er det ikke lenger mangelen på tilgjengelige løsninger som begrenser muligheten for å installere disse produktene i norske elektriske anlegg. Det foreslås derfor at tilsynsmyndighetene vurderer å anbefale installasjon av slike produkter i norske elektriske installasjoner, da disse feilkildene åpenbart er en dominerende brannårsak i elektriske installasjoner. Dette kan gjøres ved innledningsvis å komme med en anbefaling til installasjon av seriefeilvern, for så å gjøre det til et krav på lenger sikt (som det ble gjort med jordfeilvern). Dette vil sannsynligvis medføre at norske elektriske installasjoner vil være bedre rustet i forhold til branner forårsaket av elektriske feil, og det vil sannsynligvis også føre til en reduksjon i antall branner med elektrisk årsak. Da noen av produktene vil bli tilgjengelig i hele Europa, vil trolig en anbefaling om installasjon av seriefeilvern på sikt komme også i andre land.

Siden temperaturene som ble oppnådd ved laboratorieforsøkene nådde de temperaturnivå som presenteres i denne oppgaven, selv innenfor kravene, er det også grunn til å anta at strømføringsevnene som fremgår av ulike tabeller i NEK 400 er noe høyere enn de burde være. Det foreslås derfor en grundigere gjennomgang av verdiene for strømføringsevne i NEK 400. Det kan eventuelt opprettes en korreksjonsfaktor for installasjon i termisk isolerte vegger.

6.6 Forslag til videre arbeid

Ved forberedelsene før laboratorieforsøkene med seriefeilvern, ble det undersøkt mulighetene for å teste lysbuefeilvernet fra Siemens. Siden Siemens Norge ikke hadde mulighet til å skaffe lysbuefeilvernet til testing i laboratoriet innen ferdigstillelse av rapporten, anbefales det å utføre forsøk med dette vernet ved en senere anledning. Forsøkene bør inkludere både serielysbuer og glødende kontaktforbindelser, for å avdekke om vernet detekterer begge feilkilder.

Måleresultatene ved dårlig kontaktforbindelse viser at spenningsforløpene varierer ved flere gjennomføringer. Det bør derfor gjennomføres flere måleserier med det samme oppsettet for å finne en gjennomsnittsverdi.

Siden undersøkelsen av temperaturutvikling i koblingspunkter resulterte i veldig høye temperaturer, var det grunn til å anta at dimensjonerende strømføringsevne for kablene er høyere enn de burde være. Det bør derfor undersøkes nærmere om det er grunnlag for å redusere strømføringsevnen for lederdimensjonering, eventuelt om det bør opprettes en korreksjonsfaktor ved installasjon i termisk isolerte vegger. Disse forsøkene bør også undersøke hvordan temperaturutviklingen i koblingspunktene blir om det benyttes flerlederkabler (PR eller PFXP).

Laboratorieforsøkene som presenteres i denne rapporten bestod kun av korttidsforsøk. Det bør derfor også undersøkes hvilke temperaturer som kan oppstå ved langtidsforsøk. Det kan videre også utføres forsøk hvor belastningsstrømmen er forskjellig fra 16 A, for å undersøke hvordan temperaturutviklingen ved andre belastningsstrømmer er i forhold.

7 KONKLUSJON

Denne rapporten presenterer flere løsninger for deteksjon av seriefeil, som enten allerede finnes på det norske markedet eller gjøres tilgjengelig innen kort tid. Det er derfor ikke mangelen på tilgjengelige løsninger som begrenser muligheten for å installere disse produktene i norske elektriske anlegg. Det foreslås derfor at tilsynsmyndighetene vurderer å anbefale installasjon av seriefeilvern i norske elektriske installasjoner, slik det gjøres bl.a. i USA, for å redusere antall branner med elektrisk årsak.

Rapporten presenterer laboratorieforsøk hvor det ble undersøkt hvilke temperaturer som kan oppstå i reelle elektriske installasjoner med skjult installasjonsmetode, under både normale forhold og ved elektriske feil. Funksjonaliteten til et seriefeilvern og hvor mye den termiske isolasjonen i veggen influerer temperaturutviklingen i koblingspunktene ble også undersøkt. Resultatene fra forsøkene gav følgende konklusjoner:

- Hovedproblemet med seriefeil i elektriske installasjoner er sannsynligvis hovedsakelig glødende kontaktforbindelser, og ikke serielysbue. Begrunnelsen for dette ble basert på observasjoner foretatt under forsøk med regulerbare gap, hvor det var vanskelig å opprettholde en strømbegrenset lysbue over lang tid ved 230 V AC.
- Ved forskriftsmessig utførelse (15,5 A belastningsstrøm, 2,5 mm² ledertverrsnitt og god kontaktforbindelse) kan det oppstå temperaturer på 55,3 °C i løpet av 5 timer. Siden målepunktet var 7 mm fra tilkoblingsklemmen vil sannsynligvis ledertemperaturen være noe høyere, og dermed nær lederisolasjonens temperaturgrense på 70 °C.
- Ved dårlig kontaktforbindelse ble det for alle forsøkene registrert temperaturer over lederisolasjonens temperaturgrense. Forsøk på 2,5 mm² ledertverrsnitt medførte temperaturer på 94,3 °C ved 15,5 A, og 131,9 °C ved 17,5 A belastningsstrøm.
- Høye belastningsstrømmer i kombinasjon med dårlig kontaktforbindelse medførte større skader på installasjonsmateriellet, og det konkluderes derfor med at denne typen elektrisk feil i høyeste grad kan være brannfarlig.
- Det ble kun observert mindre temperaturforskjeller ved ulik grad av termisk isolasjon.
 Ved forsøk på 2,5 mm² ledertverrsnitt med god kontaktforbindelse var temperaturforskjellen ca. 6 °C.
- Seriefeilvernet som ble undersøkt fungerte hensiktsmessig, både under normale forhold og ved elektriske feilkilder i kretsen.

REFERANSER

- [1] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, *Statistikkbase*, http://stat.dsb.no//Database/DSB/databasetree.asp, funnet 19.03.12
- [2] Mostue B.A., *Brannskadeutviklingen i Norge Tiltak for å redusere brannskadene*, SINTEF NBL as, Trondheim, 2008
- [3] Justis- og beredskapsdepartementet, *Trygg hjemme Brannsikkerhet for utsatte grupper*, http://www.regjeringen.no/nb/dep/jd/dok/nouer/2012/nou-2012-4/4.html?id=670727, funnet 15.03.12
- [4] Norsk Elektroteknisk Komité, *Norsk elektroteknisk norm Elektriske lavspenningsinstallasjoner*, 4. Utg., Oslo, 2010
- [5] Hansen E.H., *Elektroinstallasjoner*, Classica, Trondheim, 2010
- [6] Stensaas J.P., *Branner på grunn av elektrisk installasjonsmateriell*, SINTEF NBL as, Trondheim, 2007
- [7] Stensaas J.P., Nygård K., *Brann på grunn av elektrisk feil i installasjonsmateriell og lavtemperatur varmepåvirkning fra belysning*, SINTEF NBL as, Trondheim, 2008
- [8] Sletbak J. mfl., *Glowing contact areas in loose copper wire connections*, IEEE, http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=170830, funnet 20.03.12
- [9] Runde M., *Current interruption in power grids*, NTNU, Trondheim, 2011
- [10] Kristensen, R., *Serielysbuer og korrosjon i løse kontakter som brannårsak*, NTNU, Trondheim, 1990
- [11] Hagen S.T., Kompendium i Høgspenningsteknikk, HiT, Porsgrunn, 2010
- [12] Brekke T.J., Holten P., Forbedret vern av husinstallasjoner, NTH, Trondheim, 1990
- [13] Langeland J., Øyvang T., Kompendium i elektriske anlegg, HiT, Porsgrunn, 2009
- [14] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg*
- [15] Borgersen R.A., Varmgang i kabler og isolasjonsmateriell, NTNU, Trondheim, 1999
- [16] Statens bygningstekniske etat, Veiledning om tekniske krav til byggverk, 2011
- [17] NTNU/SINTEF, *Enøk i bygninger Effektiv energibruk*, 3. Utg., Gyldendal, Trondheim, 2007
- [18] SINTEF Byggforsk, 523.255 Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting, Oslo,2007
- [19] McPartland, B.J. mfl., *National Electrical Code 2008 handbook*, 26. Utg., McGraw-Hill, New York, 2009
- [20] Electrical Construction & Maintenance (EC&M), *The Basics of Arc-Fault Protection*, http://ecmweb.com/mag/electric_basics_arcfault_protection/, funnet 24.02.12

- [21] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), *Arc Fault Breaker Safety*, http://afcisafety.org/, funnet 23.01.12
- [22] American National Standards Institute (ANSI), Stopping Fires Before They Start: The Arc Fault Circuit Interrupter Standard, http://www.standardslearn.org/documents/Arc_Fault_Circuit_Interrupter_Standard_AFC I.pdf, funnet 08.02.12
- [23] International Association of Electrical Inspectors (IAEI), AFCIS: Emerging Technology Solutions for Fires Resulting from Electrical Arcing, http://www.iaei.org/magazine/2000/09/afcis-emerging-technology-solutions-for-firesresulting-from-electrical-arcing/, funnet 24.02.12
- [24] Kjell Magne Nordnes, Schneider Electric Norge AS, E-post, 24.02.12
- [25] Geir Roald Braathen, Siemens AS Norge, E-post/telefonsamtale, 27.02.12
- [26] Siemens AG, Siemens arcing fault detection unit reacts to arcing faults in electrical installations, http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2012 /infrastructure-cities/low-medium-voltage/ICLMV201203003.htm, funnet 20.03.12
- [27] Odd A. Rød, Gjensidige forsikring, E-post, 27.02.12
- [28] Teknisk Ukeblad, utg. 33/2009
- [29] Electric Temperature Increase Monitoring Wireless Warning System, http://www.standard.no/Global/PDF/Elektro-NEK/Lavspenning/Seksjon3-4-Danielsen-Electric%20Temperature%20Increase%20Monitoring%20(ETIM).pdf, funnet 07.03.12
- [30] Patentstyret, Temperaturvarsler for bruk i elektriske installasjoner, https://dbsearch2.patentstyret.no/Patent/DetailNewWindow.aspx?idappl=20060052&cult ure=nb-NO, funnet 29.03.12
- [31] Otto K. Sønju, Electric Temperature Increase Monitoring, personlig kommunikasjon
- [32] Teknisk Ukeblad, utg. 3/2006
- [33] Aage Amundsen, E-post, 09.02.12
- [34] Atle Hjertenæs, Weatherford Petroleum Consultants AS, E-post, 04.02.12
- [35] Teknisk Ukeblad, utg. 36/2007
- [36] EFP Nordic AS, *EFP Systemet for eltavler*, http://www.efpnordic.no/c-200-Eltavle.aspx, funnet 12.03.12
- [37] Magne Runde, NTNU, personlig kommunikasjon, 11.05.12

VEDLEGG

- Vedlegg A: Utstyrsliste fra forberedende forsøk
- Vedlegg B: Måleresultater fra forberedende forsøk
- Vedlegg C: Utstyrsliste fra seriefeilvernforsøk
- Vedlegg D: Måleresultater fra seriefeilvernforsøk
- Vedlegg E: Sammenligninger fra seriefeilvernforsøk
- Vedlegg F: Måledata fra forberedende forsøk (elektronisk)
- Vedlegg G: Måledata fra seriefeilvernforsøk (elektronisk)

VEDLEGG A: UTSTYRSLISTE FORBEREDENDE FORSØK

Antall	Reg.nr.	Enhet	Produsent	Туре	Kommentar
1	B01-0760	Skilletransformator	Elinduktra Sundberg AB	380/220 V	
1	G04-0243	Scopemeter	Fluke	200MHz - 2.GS/s	
1	P07-1574	PC	Asus	EeePC 1101 HA	
2	E01-0385 E01-0387	Wattmeter	Metrix	PX120 – Power meter	Max. 10 A
2	F03-0007 F03-0008	Wattmeter	Elcontrol	VIPD-3 – 3-Phase Energy Meter	Max. 30 A
1		Automatsikring	Siemens	5SX22 – B/10 A	
1		Automatsikring	Siemens	5SX2 – C/16 A	
2		Panelovn	Siemens	800 W	

VEDLEGG B: MÅLERESULTATER FORBEREDENDE FORSØK



1.1 800 W Belastning

I = 3,5 A Maksimal effektutvikling = 10,3 W

1.2 1600 W Belastning



I = 7 A Maksimal effektutvikling = 20 W

1.3 2300 W Belastning



I = 10,3 A Maksimal effektutvikling = 26,3 W

1.4 3600 W Belastning



I = 15,5 A Maksimal effektutvikling = 44,2 W

VEDLEGG C: UTSTYRSLISTE SERIEFEILVERNFORSØK

Antall	Reg.nr.	Enhet	Produsent	Туре	Kommentar
1	G05-0184	Datalogger	Agilent	34972A – LXI Data Aquisition/Switch Unit	
1	P07-0951	PC	Dell	Latitude D505	
7		Temperatursensorer	Farnell	T-Type, PTFE	$L \approx 6 m$
1	N02-0076	Temperaturkalibrator	Scan-Sense	TC60M	1600 W
1	G04-0243	Scopemeter	Fluke	200MHz - 2.GS/s	
1	P07-1574	PC	Asus	EeePC 1101 HA	
2	F03-0007 F03-0008	Wattmeter	Elcontrol	VIPD-3 – 3-Phase Energy Meter	Max. 30 A
1	E01-0385	Wattmeter	Metrix	PX120 – Power meter	Max. 10 A
4		Stikkontakt	Elko	Innfelt vegguttak dobbel m/jord (skruklemmer)	
4		Veggboks	Elko		
12		Koblingsklemme	Wago	Med åpnefunksjon	
1		Automatsikring	Siemens	5SX2 – C16 A	

VEDLEGG D: MÅLERESULTATER SERIEFEILVERNFORSØK

1.1 Forsøk med god kontaktforbindelse

1.1.1 Forsøk 1 – 15,5 A/2,5 mm^2



Maksimaltemperatur = 55,3 °C



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,04 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 0,62 \text{ W}$

$1.1.2 \text{ Forsøk } 2 - 15,5 \text{ A}/1,5 \text{ mm}^2$



Maksimaltemperatur = $68,9 \degree C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,087 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 1,35 \text{ W}$

$1.1.3 \text{ Forsøk } 3 - 15,5 \text{ A}/0,75 \text{ mm}^2$



Maksimaltemperatur = $96,7 \degree C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,196 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 3,04 \text{ W}$

1.1.4 Forsøk 4 – 17,5 A/2,5 mm^2



Maksimaltemperatur = $64.9 \degree C$



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,046 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 0,81 \text{ W}$

1.1.5 Forsøk 5 – 17,5 A/1,5 mm^2



Maksimaltemperatur = $83,1 \degree C$



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,103 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 1,8 \text{ W}$

1.1.6 Forsøk 6 – 17,5 A/0,75 mm^2



Maksimaltemperatur = 120,5 °C



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,239 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 4,18 \text{ W}$

1.2 Forsøk med dårlig kontaktforbindelse





Maksimaltemperatur = 79,2 °C



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,141 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 2,19 \text{ W}$

1.2.2 Forsøk 7 (2) – 15,5 A/2,5 mm², mest isolert del



Maksimaltemperatur = $94,3 \degree C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,309 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 4,79 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = $78,0 \degree C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,232 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 3,6 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = $86.8 \degree C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,297 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 4,6 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = 97,4 °C



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,18 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 2,79 \text{ W}$

1.2.6 Forsøk 10 – 15,5 A/1,5 mm², minst isolert del



Maksimaltemperatur = 92,8 °C



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,216 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 3,35 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = $139,7 \,^{\circ}C$



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,602 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 9,33 \text{ W}$



1.2.8 Forsøk 12 – 15,5 A/0,75 mm², minst isolert del

Maksimaltemperatur = 114,0 °C



I = 15,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,407 \text{ V} \cdot 15,5 \text{ A} = 6,31 \text{ W}$

1.2.9 Forsøk 13 (1) – 17,5 A/2,5 mm², mest isolert del



Maksimaltemperatur = 115,2 °C



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,355 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 6,21 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = 131,9 °C



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,506 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 8,86 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = $115.8 \ ^{\circ}C$



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,45 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 7,87 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = 124,4 °C



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,502 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 8,79 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = $126,7 \ ^{\circ}C$



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,315 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 5,51 \text{ W}$





Maksimaltemperatur = 120,0 °C



I = 17,5 A

Maksimal effektutvikling = $0,352 \text{ V} \cdot 17,5 \text{ A} = 6,16 \text{ W}$

1.2.15 Forsøk 17 – 17,5 A/0,75 mm², mest isolert del Dette forsøket ble ikke gjennomført grunnet høye temperaturer ved 15,5 A

1.2.16 Forsøk 18 – 17,5 A/0,75 mm^2 , minst isolert del

Dette forsøket ble ikke gjennomført grunnet høye temperaturer ved 15,5 A

1.3 Forsøk med kontrollert lysbue



1.3.1 Referanseforsøk – 10,3 A/1,5 mm²





I = 10,3 A

Maksimal effektutvikling = $0,074 \text{ V} \cdot 10,3 \text{ A} = 0,76 \text{ W}$
1.3.2 Forsøk 1 – 10,3 A/1,5 mm^2



Maksimaltemperatur = 76,4 °C



I = 10,3 A

Maksimal effektutvikling = $0,365 \text{ V} \cdot 10,3 \text{ A} = 3,76 \text{ W}$

1.3.3 Forsøk 2 – 10,3 A/1,5 mm^2



Maksimaltemperatur = 71,1 °C



I = 10,3 A



Grunnen til at spenningsdiagrammet ikke viser spenningsvariasjoner er at det oppstod problemer med skaleringen under forsøket.

$1.3.4 \text{ Forsøk } 3 - 10,3 \text{ A}/1,5 \text{ mm}^2$



Maksimaltemperatur = $74,3 \ ^{\circ}C$



I = 10,3 A

Maksimal effektutvikling = $0,371 \text{ V} \cdot 10,3 \text{ A} = 3,82 \text{ W}$

VEDLEGG E: SAMMENLIGNINGER SERIEFEILVERNFORSØK

1.1 Mest isolert del av vegg

1.1.1 15,5 A/2,5 mm²



1.1.2 15,5 A/1,5 mm²



1.1.3 15,5 A/0,75 mm²



1.1.4 17,5 A/2,5 mm²



1.1.5 17,5 A/1,5 mm²



1.2 Minst isolert del av vegg

1.2.1 15,5 A/2,5 mm²



1.2.2 15,5 A/1,5 mm²



1.2.3 15,5 A/0,75 mm²



1.2.4 17,5 A/2,5 mm²



1.2.5 17,5 A/1,5 mm²



1.3 Kontrollert lysbue

