

Mätsystem till test av material för släpkontakt på konduktiva elvägar



Henrik Elmér

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Mätsystem till test av material för släpkontakt på konduktiva elvägar

Författare: Henrik Elmér
Handledare: Mats Alaküla, IEA
Biträdande handledare: David Wenander, IEA
Biträdande handledare: Philip Abrahamsson, IEA

2021

Sammanfattning

Teknikutveckling för elvägar är högaktuell i dagens samhälle. Flertalet olika tekniker och infrastruktur för laddning under körning av elfordon testas i Sverige idag. En möjlig elvägslösning är laddning konduktivt från ett spår eller skena placerad på vägen under elfordonet. Vid sådan konduktiv laddning släpar en kontakt i spår eller på skena och laddar elfordonet. Detta sätter stora krav på kontaktmaterialet som släpas.

På institutionen för elektroteknik och automation vid Lunds tekniska högskola pågår forskning kring just sådan elvägsteknik. Här finns en testrigg byggd med syftet att testa konduktiv laddning på elväg. I denna rapport beskrivs ett mätsystem som designas och byggs för att testa elektriska kontakter som släpas på denna testrigg. Även begränsade tester på två kontaktmaterial, koppar och aluminium, körs och mäts på testriggen.

Resultatet påvisar ett fungerande mätsystem som i största allmänhet uppfyller kraven som ställs på det.

De begränsade materialmätningarna visar några generella samband. De påvisar också några delvis oväntade resultat såsom asymmetrisk uppvärmning av kontakter beroende på elektrisk pol, och effekter på grund av kemiska reaktioner såsom oxidering.

Abstract - English

The development of technology for electric road systems is highly relevant today. Plenty of technologies and infrastructure for charging while driving electric vehicles are being tested in Sweden today. One possible solution for an electric road system is conductive charging from a rail on top of, or milled into, the road below the electric vehicle. In this type of conductive charging an electric connector is sliding on top of the rail keeping an electric connection for charging the vehicle. This puts immense requirements on the sliding contact material.

At the division for industrial electric engineering and automation at the Faculty of engineering at Lund University, research is being conducted in this type of electric road systems. Here a test rig is built for assessing contact materials in conductive charging on electric roads. In this report a measurement system is designed and built for testing contact materials which are slid on this test rig. Also limited testing and measuring of two contact materials, copper and aluminium, are conducted on this test rig.

The results show a fully functioning measurement system that in general meets the set criteria.

The limited testing of contact materials slid on the test rig shows some general correlations. It also highlights some unexpected occurrences such as asymmetric heating of contact material depending on the electric polarity of the contact, and effects due to chemical reactions such as oxidation.

Innehållsförteckning

1 Inledning	6
1.1 Utveckling av elvägar	6
1.1.1 Induktiv laddning via elektromagnetiska fält från väg . . .	7
1.1.2 Konduktiv laddning via luftledning	7
1.1.3 Konduktiv laddning via spår eller ledare i väg	8
1.2 Målförklaring	10
1.2.1 Testtrigg - Karusellen	10
1.2.2 Problembeskrivning - spänningsmätning	13
2 Metodik	14
2.1 Mätsensorer	14
2.1.1 Ström	15
2.1.2 Spänning	16
2.1.3 Temperatur	18
2.1.4 Friktionskraft	19
2.1.5 Varvtal	21
2.2 Dataloggning - CompactRIO	21
2.2.1 Labview	22
2.3 Systemutformning	22
2.3.1 Gränssnitt och kontakter	24
3 Resultat	25
3.1 Verifiering av mätsystem	25
3.1.1 Mätstörningar	25
3.1.2 Spänning	29
3.1.3 Ström	32
3.2 Materialmätningar	33
3.2.1 Koppar	33
3.2.2 Aluminium	40
4 Diskussion av resultat och slutsatser	45
4.1 Verifiering av mätsystem	45
4.1.1 Mätstörningar	45
4.1.2 Spänning	45
4.1.3 Ström	46
4.2 Materialmätningar	47
4.2.1 Koppar	47
4.2.2 Aluminium	48
4.2.3 Materialjämförelse	49
4.3 Framtida arbete	54

1 Inledning

1.1 Utveckling av elvägar

Omställningen i dagens trafik från fossila till förnybara bränslen är högaktuell där elektrifiering av både fordon och möjligen även vägbana är en viktig komponent och i full gång. För en lyckad omställning krävs utveckling av elfordon, förnyelsebar elproduktion, samt en effektiv energiöverföring hela vägen från kraftverk till fordon.

Som komplement till laddning när fordonet står stilla vid hemmet, arbetsplatsen eller liknande, är flera tekniker under utveckling för effektiv energiöverföring från väg till fordon i rörelse, en elväg helt enkelt. En elektrifierad vägbana som kan ladda fordon kontinuerligt under körning möjliggör färre stopp och längre räckvidd för elfordon. I en rapport om elvägar från 2017 beskriver Trafikverket tre huvudspår gällande ”(...) kontinuerlig fordonsnära överföring av el från infrastrukturen till de elektriska vägfordonen:

- konduktiv överföring via luftledning
- konduktiv överföring via någon form av spår eller ledare i vägen
- induktiv överföring, via elektromagnetiska fält, från väggroppen” [1]

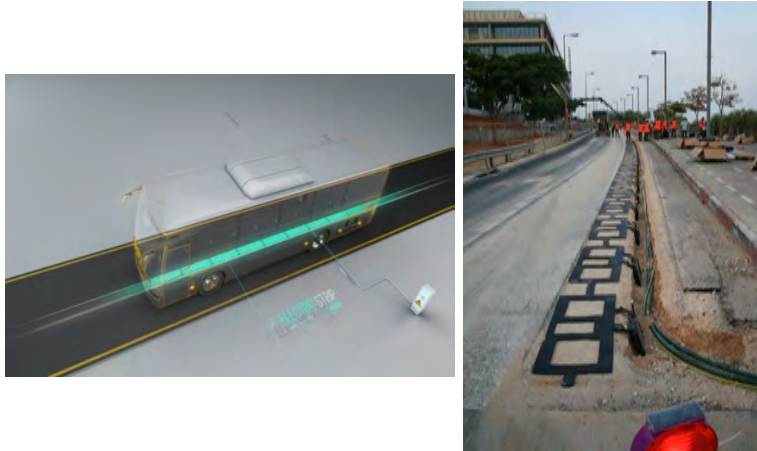
Det finns flera tekniker för att ladda ett elfordon under körning som vidare beskrivs i följande avsnitt.

I en senare rapport från 2021 bedömer Trafikverket ” (...) att elektrifieringen av transportsektorn är en viktig pusselbit på längre sikt om klimatmålen ska kunna uppnås”. Men att det är möjligt att det finns flera olika alternativ för att uppnå detta såsom elväg, bränsleceller eller endast stationär laddning. De konstaterar att det behövs mer kunskapsunderlag och forskning för att kunna göra ett välinformerat beslut inför en infrastruktursatsning av sådan storlek. [2]

Således, att undersöka, testa och mäta elvägsteknik är alltså ett högst relevant och aktuellt ämne.

1.1.1 Induktiv laddning via elektromagnetiska fält från väg

Teknik för induktiv överföring via elektromagnetiska fält från väggroppen är under utveckling på bland annat Gotland av företaget ElectReon. De integrerar kopparspolar i väggroppen för att ”trådlöst” ladda elfordonet som kör på vägen med induktionsteknik. Se bild i figur 1. [3]



Figur 1: Konceptbild och verklig bild av ElectReons induktiva elväg. Bilder hämtade från ElectReons webbplats. [3]

1.1.2 Konduktiv laddning via luftledning

I tåg och spårvagnar laddas ofta fordonet genom luftledningar hängades över spåret. Till exempel i staden Lund valdes nyligen att investera i en spårväg med luftledningar som byggdes och invigdes år 2020, då med motiveringen att en sådan infrastruktur både bidrar till en hållbar utveckling av kollektivtrafiken samt ”(...) ökar intresset hos de som ska investera längs spåret vilket i sin tur påverkar förutsättningarna för en god och hållbar tillväxt.”. [4] Att lägga spår och bygga luftledningar i stadsmiljö är alltså en aktuell och befintlig lösning för elektriska fordon.

Tester med lastbilar som laddas genom upphängda luftledningar har även testats på motorväg i norra Sverige av Siemens. Där placeras pantografer på taket av lastbilen, se bild i figur 2, och leder ström ner i fordonet i hastigheter upp till 90 km/h. [5]



Figur 2: Grafik och bild av pantograf placerad på lastbils tak vid laddning på Siemens "eHighway". Bilder hämtad från Siemens webbplats. [5]

1.1.3 Konduktiv laddning via spår eller ledare i väg

Teknik för konduktiv överföring via någon form av spår eller ledare i vägen har i olika former utvecklats av bland annat företaget Alstom. I trafik finns idag system utvecklade av Alstom både för stationär laddning av bussar från ledning i marken vid hållplatser. [6] Även för kontinuerlig laddning vid körning av spårvagnar, som traditionellt sett laddas från ledningar hängandes över spåren, har teknik utvecklats av Alstom för att istället ladda genom spåren i marken. [7] Att konduktivt ladda personbilar, lastbilar och andra fordon som inte kör i nedlagda spår är under utveckling i Sverige av till exempel Elonroad och Elways. I dessa exempel släpar elektriska kontakter längs ett spår eller skena på vägen för att ladda elfordonet. [8] [9]

I denna rapport beskrivs ett mätsystem byggt för att testa och karakterisera kontaktmaterial i konduktiva elvägar. Det är materialet i kontakten som släpar mot elvägen och leder ström som är i fokus och testas, även kallat en "släpkontakt".

Släpkontakter är, till skillnad från en konventionell statisk elektrisk kontakt du trycker in i ett eluttag, en lösning för dynamisk överföring av elenergi till elfordon. Den används idag i till exempel spårvagnar och tåg. I dessa fall är ofta strömledningen satt ovanför fordonet i en luftledning. Att bibehålla en elektrisk

kontakt på detta sätt sätter stora krav på kontaktmaterialet som utsätts för stort slitage genom friktion och höga temperaturer. Vilket ytterligare har påvisats i bland annat en studie från 2018. [10]

En bild som visar en konduktiv elväg, konstruerad av elvägsföretaget ElonRoad i Lund, kan ses på bild i figur 3. Det är på just en sådan typ av konduktiv elväg som en släpkontakt ska släpas och ladda elfordonet som kör på elvägen.

Speciellt för elvägen från elvägsföretaget Elonroad är att elvägen är segmenterad med alternerande skenor av pluspol och minuspol. Där använder man tre släpkontakter på fordonet för att kontinuerligt ha kontakt med både plus- och minuspol på elvägen för att ha möjlighet att kontinuerligt ladda elfordonet. [8]



Figur 3: Elonroads elväg i Lund. Exempel på konduktiv elväg där en släpkontakt ska släpa på en skena för att skapa en elektrisk kontakt. Bild hämtad från ElonRoads hemsida. [8]

För detta mätsystem är det just släpkontaktens egenskaper som ska mätas beroende på olika materialval.

1.2 Målförklaring

Ett fullständigt mätsystem ska byggas där alla sensorer och givares signaler ska integreras i en mätlåda och läsas av ett CompactRIO-system. Sensorerna ska levereras matningsspänning och systemet ska testas, kalibreras och verifieras samt testköras med något/några kontaktmaterial.

Specifikt uppsatta mål för mätsystemet, för att möjliggöra test av kontaktmaterial för överföring av elektrisk effekt, ska utgöras av mätning av följande storheter (med villkor):

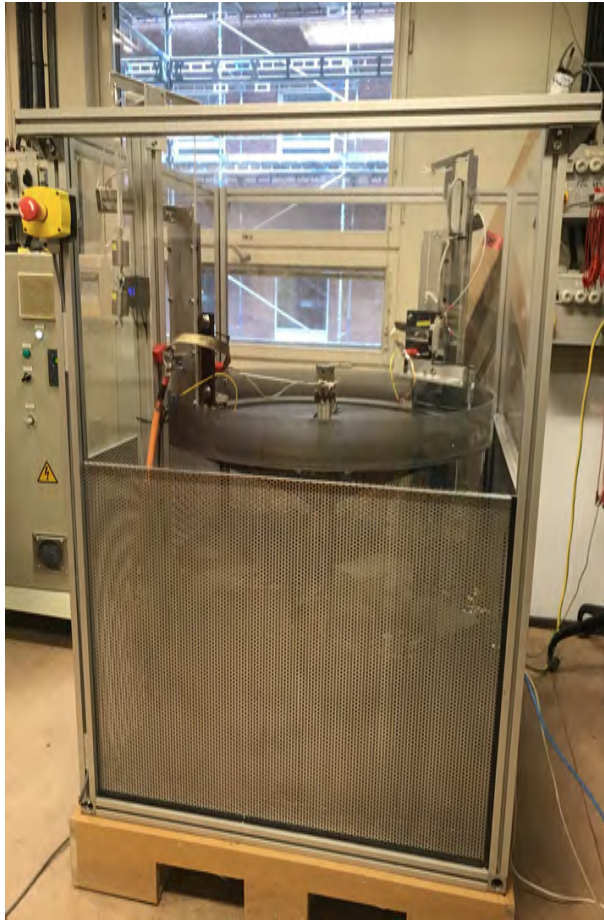
- Ström (max 300A noggrannhet på 1%, samplingsfrekvens 100kHz).
- Spänningsfall, mellan släpkontakt och skena (max 600V, noggrannhet på enstaka mV i mätområdet 0...10V, samplingsfrekvens 100kHz).
- Friktionskraft, logga signaler från lastcellsförstärkare (samplingsfrekvens minst 80Hz).
- Temperatur, så nära släpkontaktens kontaktpunkt mot skena som möjligt.
- Varvtal. (Hastighet)

Mätdata ska kunna loggas och sedan kunna presenteras på ett användarvänligt sätt.

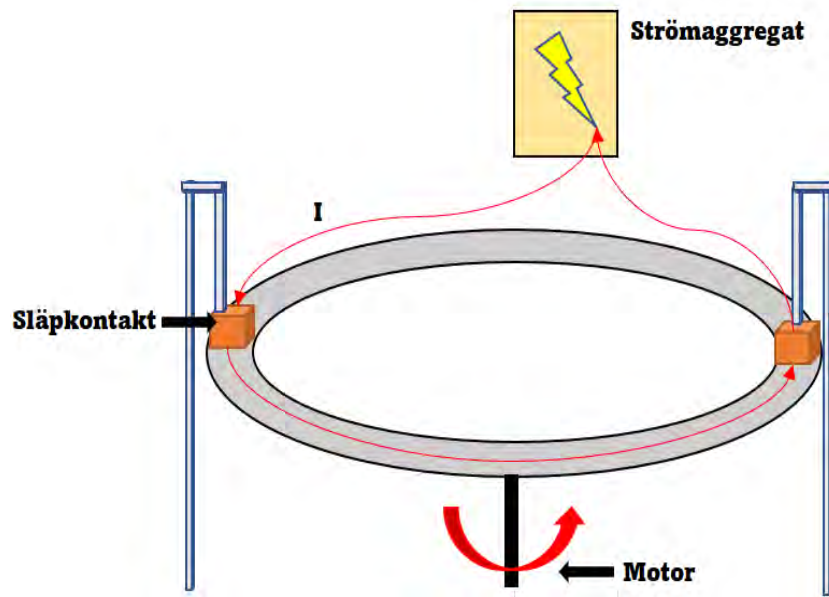
1.2.1 Testtrigg - Karusellen

På avdelningen för industriell elektroteknik och automation på Lunds tekniska högskola pågår forskning kring elvägsteknik. Här finns en testtrigg byggd för att kunna testa laddning på elväg och det är till denna testtrigg som mätsystemet byggs in i. Testtriggen kan ses på bild i figur 4 och en schematisk bild i figur 5.

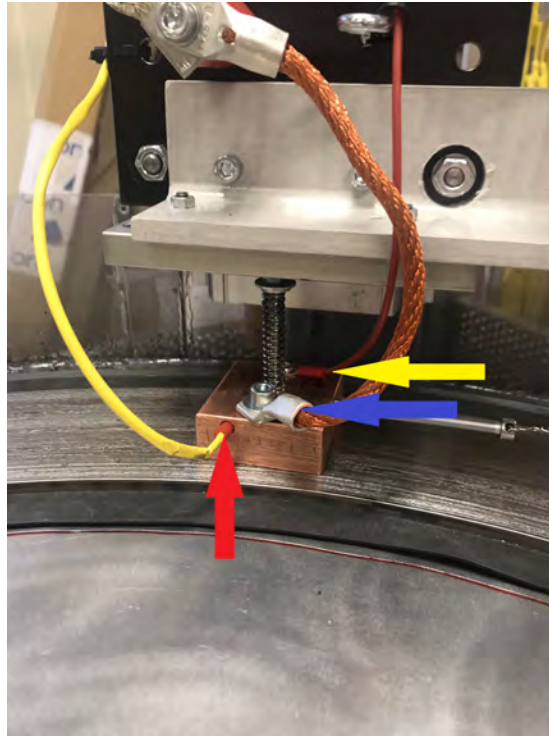
För att simulera körning på elväg i en labbmiljö används denna befintliga testtrigg som liknar en karusell till utseende. En elmotor roterar en skiva med en cirkulär stålring monterad ovanpå likt en "elväg". Två kontaktmaterial (släpkontakter) stationärt placerade på testtriggen trycks ner mot den roterande stålringen och ström leds igenom systemet. Som strömaggreat används en från institutionen egenbyggd enkadrantsomvandlare som kortsluts genom banan och kan leverera upp till och med 300A. Strömmen leds upp från stålringen genom den ena släpkontakten och leds ner i stålringen genom den andra. I figur 6 visas hur släpkontakten trycks ner mot den roterande banan.



Figur 4: Visar testrigg "Karusellen".



Figur 5: Visar schematisk grafik över testrigg "Karusellens" uppställning.



Figur 6: Visar kontaktmaterial nedtryckt mot bana i roterande testrigg. Gul pil visar mätpunkt för spänningsmätning. Röd pil visar mätpunkt för temperaturmätning. Blå pil visar kabel för ledning av ström igenom släpkontakt.

1.2.2 Problembeskrivning - spänningsmätning

En större utmaning med utformningen av mätsystemet är kravet på hög precision i spänningsmätningen samtidigt som intervallet över möjliga ingångsspänningar är stort. Det sätter stora krav på mätutrustning som är precis, men också robust.

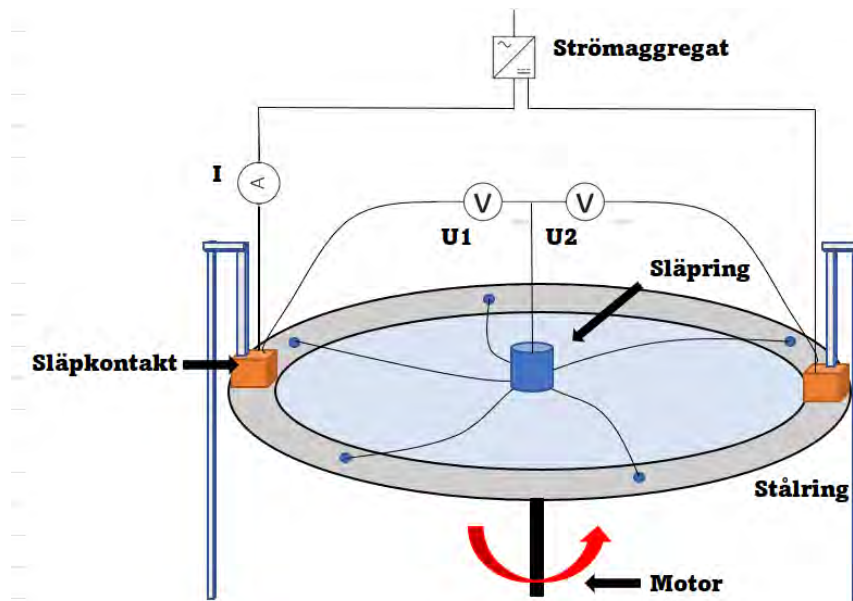
Då strömaggregatet reglerar strömmen till satt referens kommer spänningen stiga kraftigt om släpkontakten tillfälligt tappar kontakt med banan eftersom aggregatet reagerar på det ökade motståndet. Maximal spänning aggregatet ger ut är 600V och det är den spänning som mätsystemet måste dimensioneras för.

2 Metodik

I följande avsnitt beskrivs testade och valda sensorer och givare, mätsystemets utformning samt loggningens utförande och grafiskt användargränssnitt.

2.1 Mätsensorer

Strömmätningen och spänningsmätningarnas placering i krets kan beskådas i figur 7. Observera att stålringens potential mäts vid flera punkter på stålringen för att så mycket som möjligt undvika att mäta spänningsfallet i stålringen. En släpring i mitten av testringen används för att göra det möjligt att mäta potential på stålringen som roterar.



Figur 7: Visar grafik över mätpunkter för spänning och ström i kretsen.

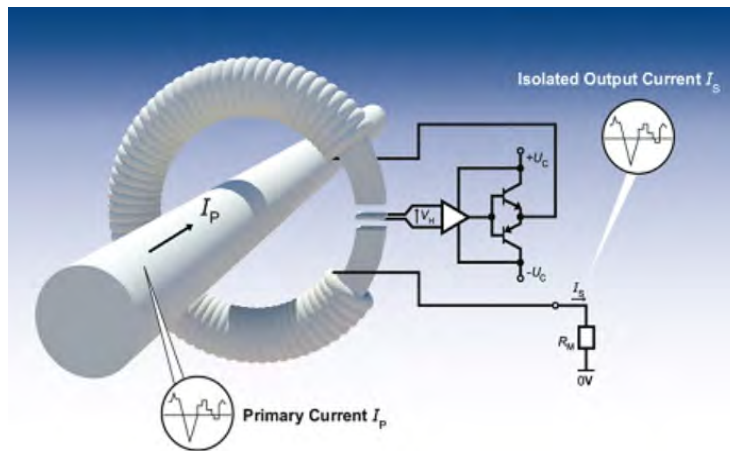
2.1.1 Ström

Halleffektsensorn "LEM 305-S" används för att isolerat mäta strömmen genom karusellen i förväntat intervall 0...300A. Sensorn är en kompenserad halleffekt-sensor och fungerar enligt följande;

1. Ett magnetfält uppkommer runt den primära strömmen som ska mätas.
2. En sekundär ström reproduceras av sensorn genom en sekundär lindning (Se figur 8).
3. Den sekundära strömmen reproducera ett likadant men motsatt riktat magnetfält.
4. Det primära magnetfältet tas ut av det reproducerade motriktade magnetfältet och kommer därför inte generera några störningar på den primära strömmen.
5. Den sekundära reproducerade strömmen leds genom ett fast bestämt mätmotstånd.
6. Spänningen över detta mätmotstånd är mätsignalen och motsvarar proportionellt och precist den primära strömmen som ska mätas. Mätmotståndet är dimensionerat för att begränsa mätsignalen till -10...10V. [11]

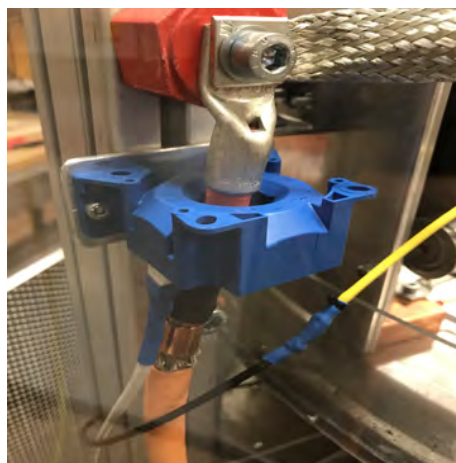
För att kunna exakt reproducera magnetfältet i punkt 2 mäts spänning uppkommen från ett "hallelement" med en op-förstärkare. Se figur 8.

Ett hallelement är en bit material där ström leds igenom vinkelrätt mot magnetfältet och på grund av lorentz-kraften på genomströmmande laddade partiklar utsätts elektronerna för en kraft mot ena sidan av elementet. Denna förskjutning av laddning i elementet skapar en spänning proportionell mot genomströlat magnetfältet. [12]



Figur 8: Visar bild schematisk bild av en kompenserad halleffekt-strömsensor. Hämtad från LEMs webbplats. [11]

Strömsensorn placerades vid ingången till karusellen vid en oskärmad bit av strömkabeln. Strömsensorns utseende och placering visas i figur 9.



Figur 9: Visar bild av strömsensor LEM 305-2 samt dess placering på testrigg.

2.1.2 Spänning

Spänningen mättes över kontaktmaterialen med kablar fästa över två spänningsfall; mellan släpkontakt 1 och ståring, och mellan släpkontakt 2 och ståring.

Halleffektsensorn "LEM LV25-P" används för att isolerat mäta spänningen över hela spannet 0...600V för att se en övergripande bild av spänningsdynamiken i karusellens släpkontakter. Den mätta spänningen bildar en primär mätt ström genom en resistans. Det magnetiska flödet denna primära mätta ström sedan på samma sätt som i strömsensorns som beskrivs ovan.. På samma sätt mäts spänning över ett bestämt mätmotstånd, dimensionerat för att begränsa mätsignalen till -10...10V.

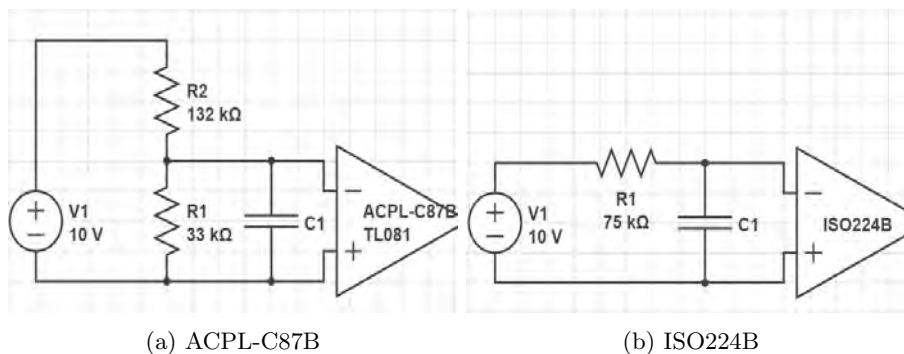
För att mäta det förväntade nominella spänningsfallet noggrannare i intervallet 0...10V testades två olika isolationsförstärkare för att elektriskt isolera och skydda mätningen från de höga strömmar och spänningar som genereras genom testriggen; Broadcoms "ACPL-C87B" och Texas Instruments "ISO-224B". Tabell 1 visar jämförande data över några nycklegenskaper mellan dessa två isolationsförstärkare.

Isolationsförstärkaren och LEM-sensorn kopplades parallellt på ett kretskort för spänningsmätning. De kombinerar LEM-sensorns stora ingångsspänning tillsammans med isolationsförstärkarens noggrannhet, och bildar tillsammans spänningsmätningen.

Tabell 1: Jämförande data mellan testade isolationsförstärkare. Data hämtad från respektive datablad. [13] [14]

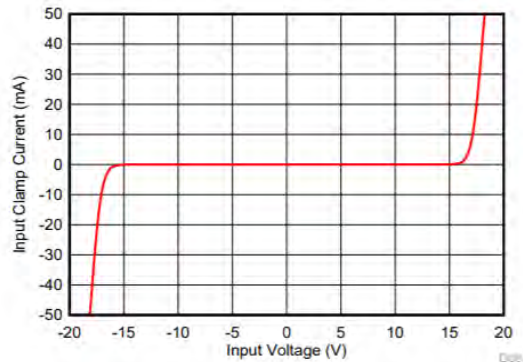
	ISO224B	ACPL-C87B
Bandbredd	275 kHz	100 kHz
Förstärkningsfel	+/- 0,3 %	+/- 0,5 %
Ingångsimpedans	1 MOhm	1 GOhm
Spänningsspann ingång	-12 V ... 12 V	0 ... 2 V
Spänningsspann utgång	-4 V ... 4V	0 ... 2 V
CMTI	80 kV/us	15 kV/us
Pris	15,91 €	6,57 €

För att använda Broadcoms ”ACPL-C87B” i hela intervallet 0...10V designades en spänningsdelare på kretsen i proportionerna 1:5. Detta för att utöka mätintervallet från 0...2V till 0...10V. På ingången till isolationsförstärkare ”ISO-224B” behövdes endast en resistans placeras för att begränsa ingångsströmmen. Se figur 10 för en principiell skiss över isolationskretsarnas designade ingångar. En kondensator, kallad C1 i figur 10, kan placeras på ingången för att lågpasfiltrera insignalen.



Figur 10: Principiell skiss över designad ingång till testade isolationsförstärkare

Isolationsförstärkaren ska mäta mellan 0...10V men inte skadas av spänningsnivåer på upp till och med +/- 600V. Även om de maximala tillåtna spänningsnivåerna ligger betydligt lägre än detta för både isolationsförstärkarna (ISO224B: -15V...15V, ACPL-C87B: -0,5...6,5V) kan kretsarnas interna överspänningsskydd användas, se figur 11, för att skydda kretsen genom att istället begränsa den högsta möjliga strömmen som går genom kretsen (ISO224B: -10...10mA, ACPL-C87B: 0...100mA). [14] [13]

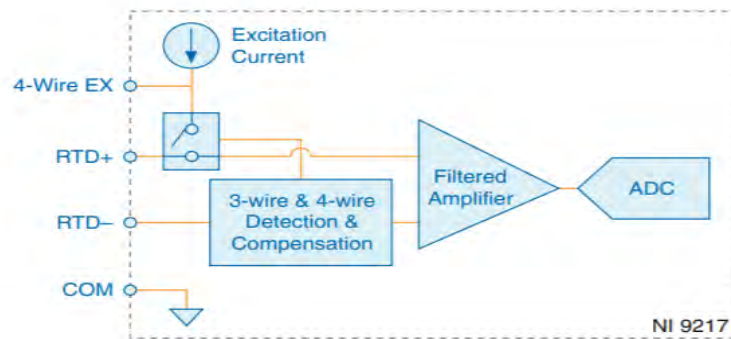


Figur 11: Graf för överspänningsskyddet i isolationsförstärkare ISO224. Hämtad från modulens datablad [14]

2.1.3 Temperatur

För mätning av temperatur valdes National Instruments temperaturmodul ”NI 9217” tillsammans med fyrtrådiga temperaturmotståndsgivare PT100. Sensorns resistans förändras beroende på ambient temperatur och på så vis kan temperaturen mätas. Modulen tillhandahåller en konstant känd ström (1mA) för att kunna kompensera för kabelns interna resistans. Se figur 12. Modulen är inte själv känslig för egna temperaturförändringar utan behåller en mät noggrannhet på 1°C över hela drifttemperaturen. [15]

Temperatursensorerna mätte släpkontaktens temperatur under körning av testriggen. På materialen som testades fanns det ett hål borrar där temperatursensorn kunde placeras för att mäta temperaturen i kontaktmaterialiet. Sensorplaceringen går att se i figur 6 (gul kabel in i kontaktmaterial).

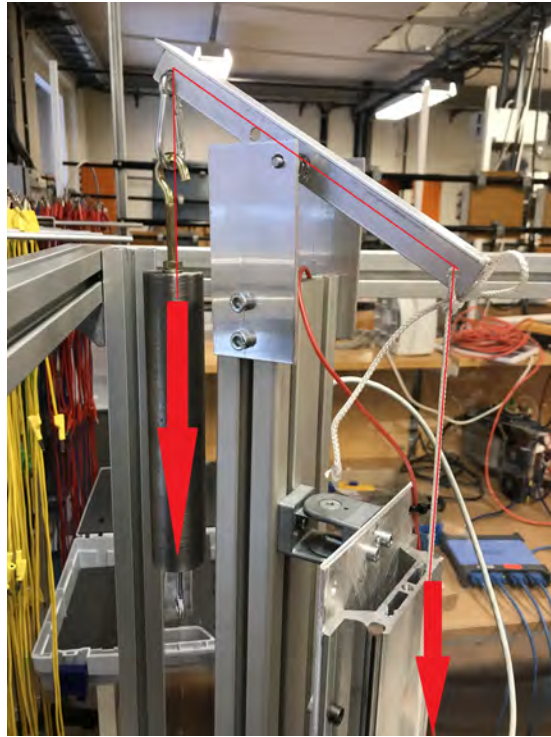


Figur 12: Schematisk bild över ingång till NI9217. Hämtad från modulens datablad. [15]

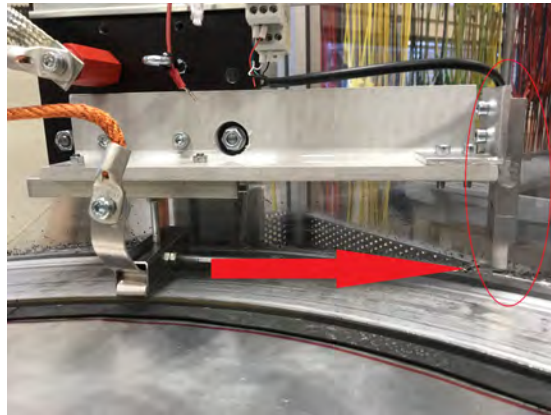
2.1.4 Friktionskraft

På testrigger användes den befintliga mekaniska konstruktionen där vikt lastas på armen för att bestämma kontaktryck för släpkontakt. Befintliga lastceller på testrigger användes för att mäta friktionskraft. Därför kommer dessa mätningar inte analyseras närmre i kommande kapitel. Lastcellerna tillsammans med signalförstärkare kan sampla i en frekvens på 80Hz och mätningarna har en noggrannhet på +/- 0,05% av mätintervallet enligt datablad. [16] [17]

I figur 13a visas hur släpkontaktens kontaktryck mot marken uppnås och i figur 13b visas hur friktionskraft mäts med lastcellen.



(a) Visar befintligt mekaniskt system på testrigg för att skapa ett kontaktryck mot banan. Skillnaden mellan vikter på hävstången båda sidor (pilar i bild) bestämmer kontaktkraften.



(b) Visar en av de befintliga lastcellerna på testriggen för att mäta friktionskraft. Friktionskraftens riktning visas med pil och lastcell inringad.

Figur 13: Visar befintlig friktion och normalkraftsmätning på testriggen.

2.1.5 Varvtal

På testtriggen användes den befintliga tachometern för att beräkna och logga karusellens varvtal. Därför kommer dessa mätningar inte analyseras närmre i kommande kapitel. Tachometern genererar internt en elektrisk fyrkantsvåg en gång per rotation och genom att leda in signalen i mätsystemet och mäta tiden mellan varje puls kan varvtalet beräknas.

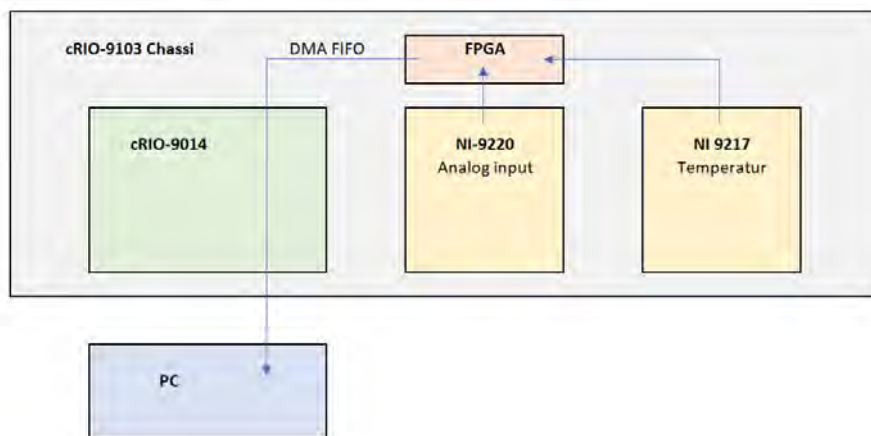
2.2 Dataloggning - CompactRIO

Mätsignalerna läses och hanteras av ett CompactRIO-system innehållandes en cRIO-9014 realtidskontroller, cRIO-9103 chassi med inbyggt FPGA-kort och två moduler för analoga input.

Den ena modulen NI 9220 hanterar de analoga signalerna från spänningsmätning, strömmätning, signaler från lastceller och tachometer. Modulen uppfyller mätsystemets krav. Den har en 16-bitars ADC och bandbredd på över 100kHz, typiskt förstärkningsfel på 0,010% och kan logga data med 100kHz. [18]

Den andra modulen NI 9217 hanterar temperatursensorer. Se figur 14 för schematisk bild över uppställningen.

FPGA-kortet hämtar data från analog input-modulen upp till 100kS/s och från temperatur-modulen med 1-2S/s. All data skrivs sedan till en FIFO-kö som verkar som buffer mellan cRIO och PC. Realtidskontrollern cRIO-9014, används endast för kommunikation mellan cRIO-block och PC då ingen egenskruven mjukvara körs på den. Datahantering, filskrivning och grafitande körs på PC. Datan skrivs sedan till fil och ritas på grafer i ett grafiskt gränssnitt på PC för användaren att se och styra.

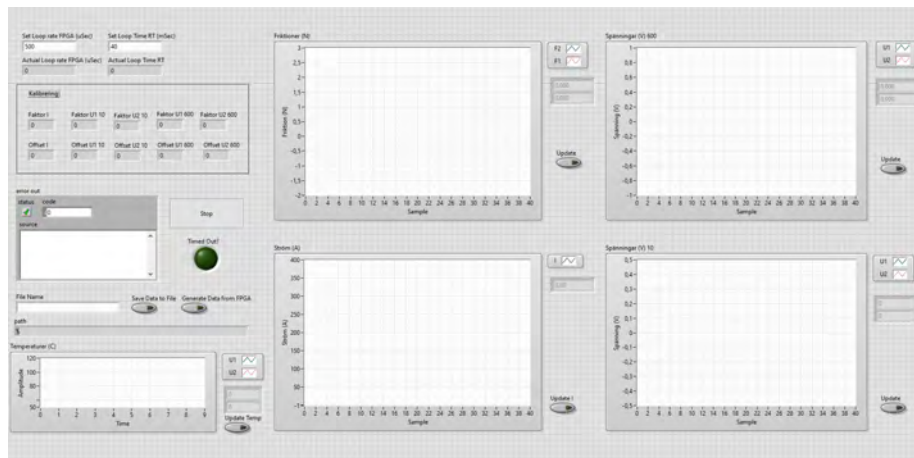


Figur 14: Visar schematisk bild av compactRIO-uppställning och mätsignalens väg genom systemet.

2.2.1 Labview

Det grafiska gränssnittet och datahantering på PC skrevs i Labview tillsammans med programmeringen för FPGA-kort och FIFO-kö. En bild av det grafiska gränssnittet kan ses i figur 15.

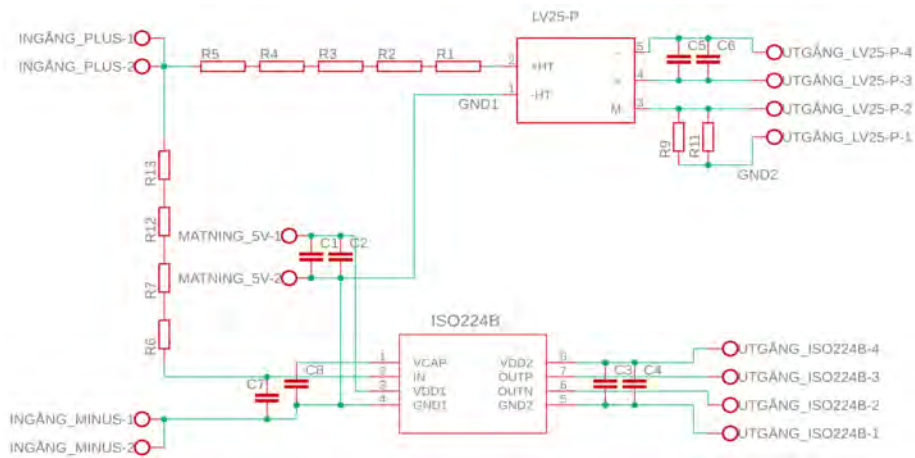
Programmet för datahantering kan också köras på realtidskontrollern i cRIO-9014 men på grund den långsamma filskrivningen kan då endast data loggas i 10kHz. Om det körs på en modern PC nås den maximala kapaciteten på 100kHz. Om data loggas i maxkapaciteten på 100kHz genereras cirka 20GB/h.



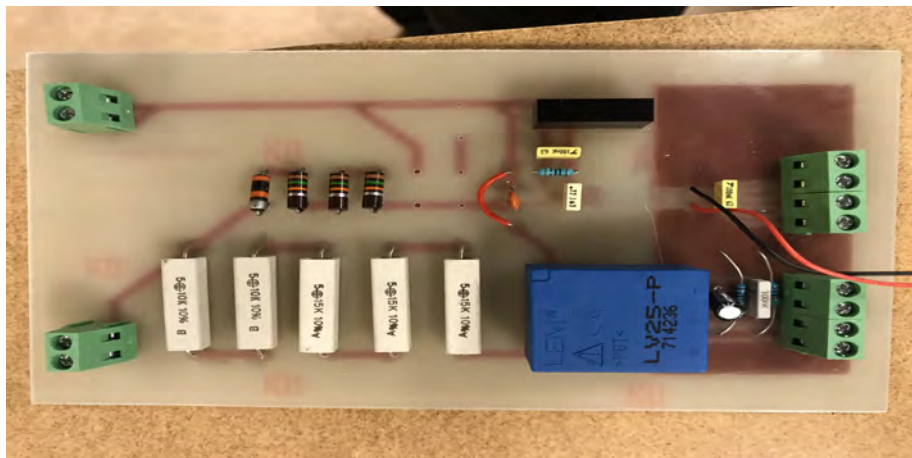
Figur 15: Visar grafiskt användargränssnitt programmerat i Labview.

2.3 Systemutformning

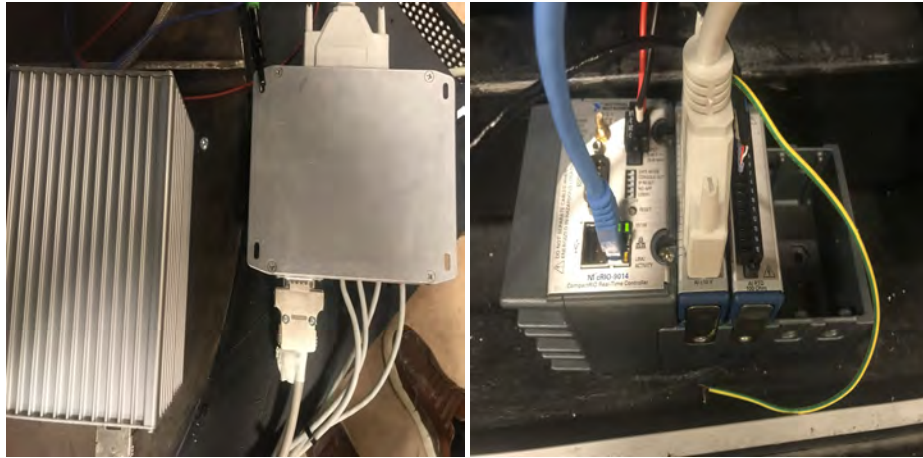
Slutlig utformning och design av spänningsmätningen visas i figur 16. Spänningen över hela intervallet 0...600V mäts med LEMs halleffektsensor LV25-P. För den noggranna spänningsmätningen valdes Texas Instruments ISO224B. Se avsnitt 4.1.2 för närmre beskrivning av orsaker till valet. I kombination kan hela spänningsdynamiken beskådas samtidigt som för det nominella intervallet 0...10V kan spänningen mätas noggrannt. I figur 17 går att se kretsens verkliga utseende. Vidare visas mätsystemet i sin helhet tillsammans med compactRIO inkopplat i figur 18.



Figur 16: Schematisk bild av designad krets för spänningsmätning. Till vänster är signalingången till spänningsmätningen och till höger leds mätsignaler vidare till mätlåda.



Figur 17: Bild av designad krets för spänningsmätning. Observera att isolationsförstärkare ISO224B sitter på undersidan av kortet och syns inte i bilden.



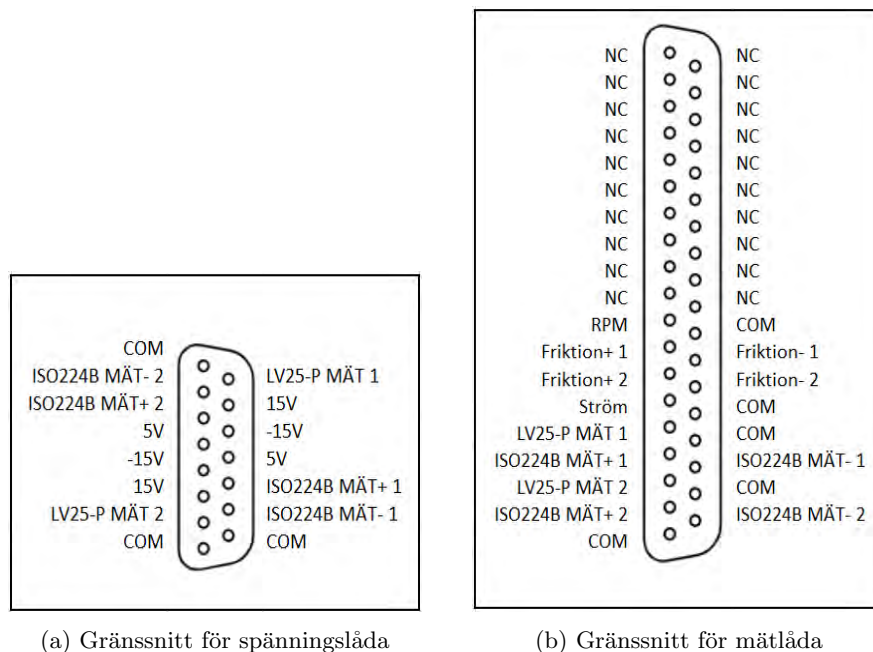
(a) Mätssystem inkopplat i testtrigg.

(b) CompactRIO inkopplat i testtrigg.

Figur 18: Bilder på Mätssystem och CompactRIO inkopplade i testtrigg.

2.3.1 Gränssnitt och kontakter

Mätssystemet utgörs av två metallådor. En låda för spänningsmätningar innehållande två designade kretskort (se figur 17) och fläkt. Den andra lådan innehåller spänningsaggregat för matningsspänningar och fungerar som knutpunkt för alla matningsspänningar ut till sensorer, samt alla mätsignaler från sensorer in till compactRIO. De två gränssnitten med ingående och utgående signaler för vardera låda med DSUB-kontakter visas i figur 19. Kontakten från mätlådan är anpassat för att kunna smidigt kopplas in i CompactRIO-modulen NI9220.



Figur 19: Visar kontaktgränssnitten för vardera låda i mätsystemet.

Spänningsmatning ges utav ett litet switchat spänningsaggregat som kopplas in till vanligt vägguttag 220V/50Hz. Det ger ut de nödvändiga matnings-spänningarna +/- 15V och + 5V till alla sensorer och givare.

3 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultaten av mätsystemets verifiering, uppkomna mätstörningar samt mätdata från två gjorda materialtester, koppar och aluminium.

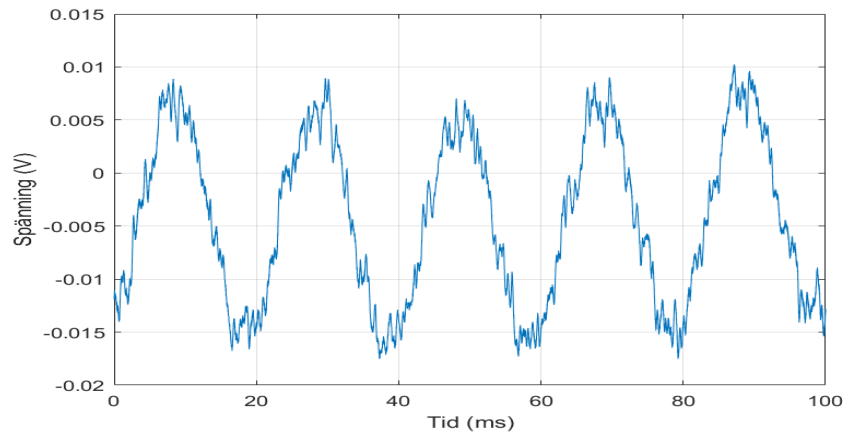
3.1 Verifiering av mätsystem

3.1.1 Mätstörningar

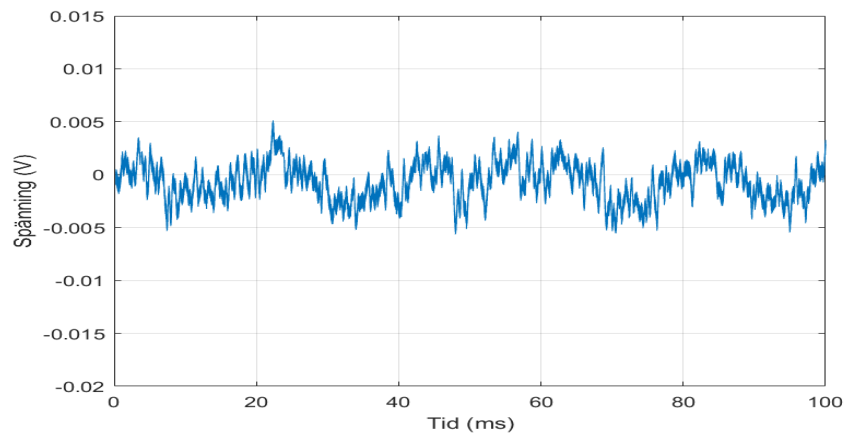
Under verifiering av spänningsmätningen upptäcktes och hanterades två betydande mätstörningar.

Den ena störningen var i frekvenserna 50Hz och 150Hz och antogs vara genererad av omkringliggande nätspänning, elapparater och en övertton av deras frekvens. Exempel på dessa skulle kunna vara strömaggregat, elmotor PC eller belysning i rummet. Störningen med 50Hz i frekvens går att se i figur 20 och hanterades genom att skärma och jorda kablar med metallstrumpa samt jorda mätlådor

ordentligt. Som jordpunkt användes testriggens chassi. Mät signal i skärmat och jordat system går att se i figur 21. Observera att i figur 20 och i figur 21 används olika isolationsförstärkare.



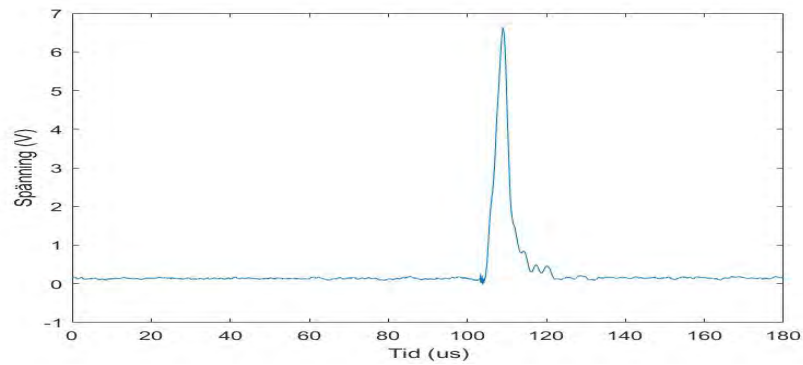
Figur 20: Visar mätsignal med 50Hz-störning från isolationsförstärkare ACPL-C87B från oskrämat mätsystem. Lågpas-filtrerat digitalt med cutoff 1kHz.



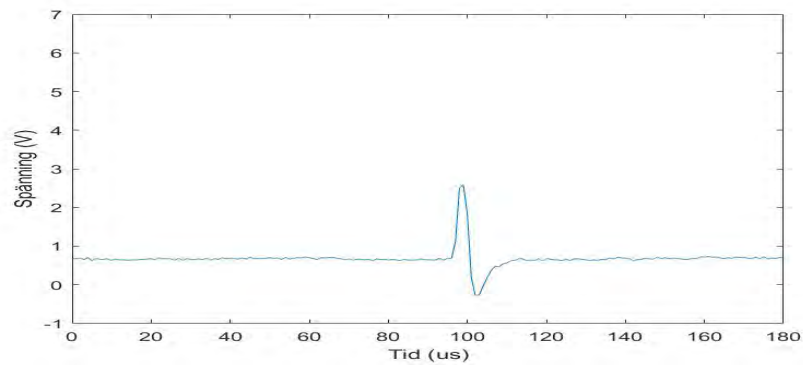
Figur 21: Visar mätsignal med 50Hz-störning från isolationsförstärkare ISO224B från skärmat mätsystem. Lågpas-filtrerat digitalt med cutoff 1kHz.

Den andra mätstörningen uppkom i varje switchögonblick för strömaggreatet som genererade strömmen genom testriggen och släpkontaktarna. Med strömmar upp till och med 300A kunde denna störning vara rejält stor. Det switchade med 1kHz eller 2kHz och genererade spänningsspikar i mätningen, se figur

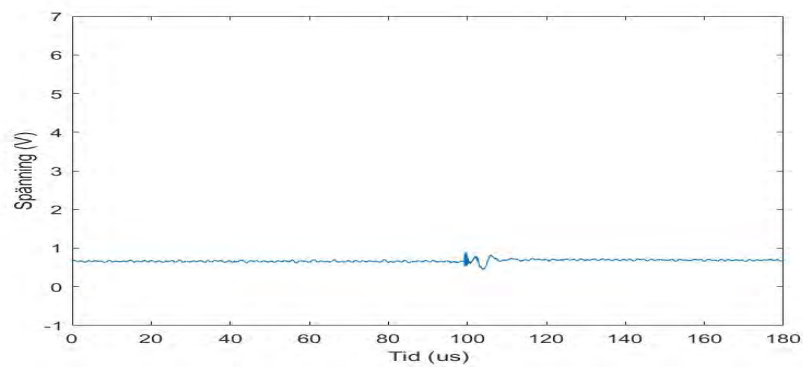
22. Denna störning hanterades genom att tillsätta och dimensionera en kapacitans (C1 i figur 10) på ingången till spänningsmätningen (kretskortet för spänningsmätning) för att lågpass-filtrera bort störningen. Två olika cutoff-frekvenser på lågpassfiltret testades tillsammans med testet utan något filter.



(a) utan ingångsfilter.



(b) med ingångsfilter (cutoff-frekvens: 100kHz).



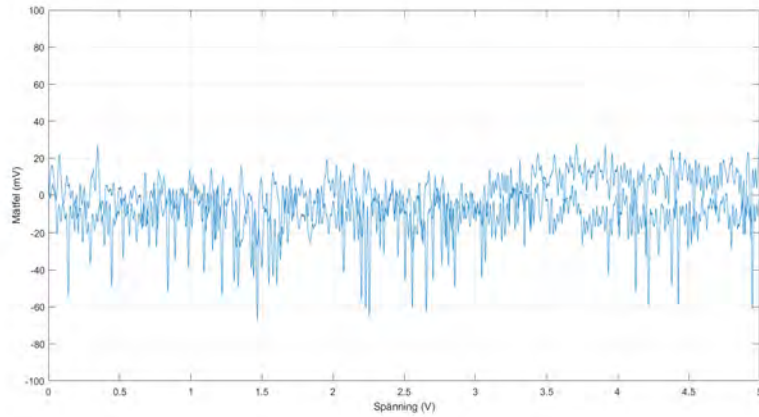
(c) med ingångsfilter (cutoff-frekvens: 10kHz).

Figur 22: Visar störning från strömaggregats switchning parerad utan och med två olika lågpasfilter. Uppmätt med "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442"

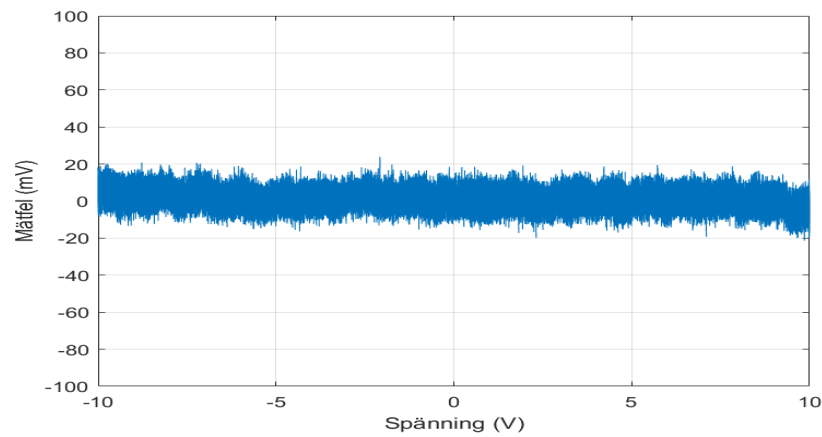
3.1.2 Spänning

De två isolationsförstärkarna "ISO224B" och "ACPL-C87B" testades insatta i mätsystemet med en signalgenerator som genererade en sinusvåg i varierande frekvenser. Signalgeneratoren kopplades direkt in på ingången på kretskortet för spänningsmätningen och karusellens sladdar kopplades av. Signalen mättes direkt på signalgeneratoren och även på utgången av mätsystemet med ett digitalt oscilloskop "Picoscope 4444" och probar "PicoConnect 442". I figur 23 visas uppmätt mätfel (mätfel definieras som uppmätt spänning direkt på signalgenerator minus uppmätt spänning på mätsystemets utgång) för både kretsarna i spannet 0...5V, respektive -10...10V, som uppmättes med 1Hz sinusvåg på ingången.

Mätnoggrannheten för det digitala oscilloskopet "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442" är, i värsta fall, +/- 3% av mätintervallet. Det har en bandbredd på 10MHz [19]



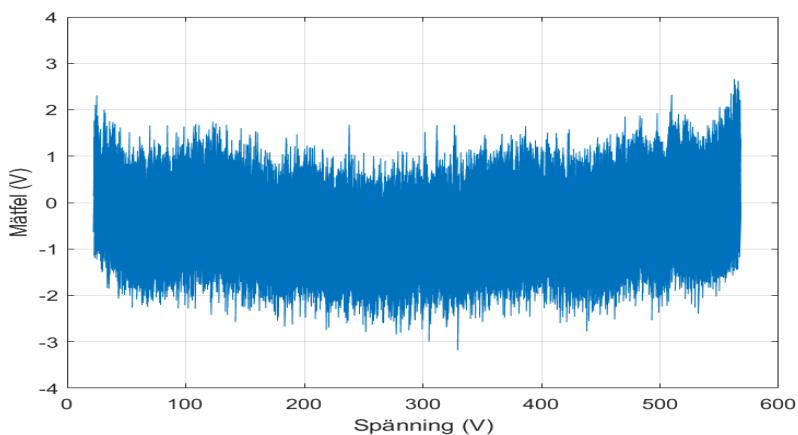
(a) ACPL-C87B.



(b) ISO224B.

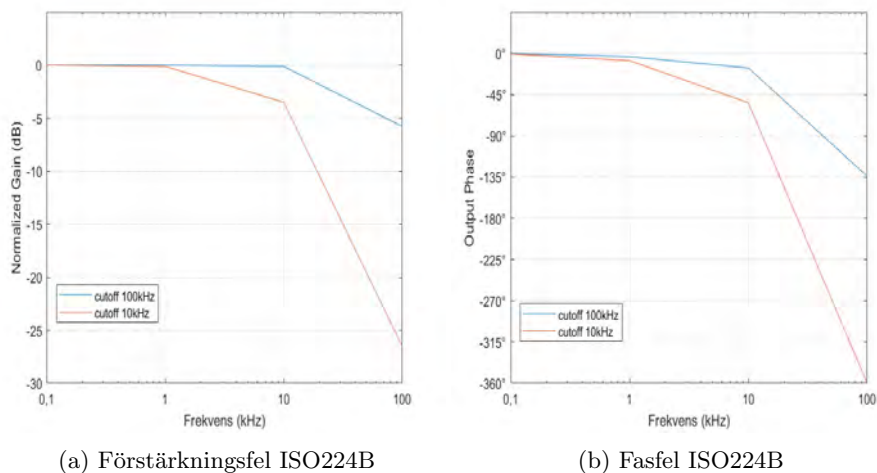
Figur 23: Visar uppmätt mätfel över ingångsspänning för de två testade isolationsförstärkarna med lågpasfilter, cutoff 10kHz. Uppmätt med "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442".

Spänningssensorn LEM LV25-P testades insatt i mätsystemet på samma sätt som isolationsförstärkarna men istället för signalgeneratoren användes huvudspänningen från elnätet som insignal. I figur 24 visas mätfel för denna spänningssensor i intervallet 0...565V/50Hz.



Figur 24: Visar mätfel över ingångsspänning för LEM LV25-P. Uppmätt med "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442".

Till den noggranna spänningsmätningen i intervallet 0...10V användes slutligen isolationsförstärkaren Texas Instruments "ISO224B". På den placerades ett lågpassfilter på ingången med cutoff-frekvens 10kHz. LEMs sensor "LV25-P" användes för att se spänningsdynamiken i hela möjliga intervallet 0...600V. Se avsnitt 4.1.2 för vidare förklaring av detta valet. Fasfel och förstärkningsfel verifierades också i figur 25.



(a) Förstärkningsfel ISO224B

(b) Fasfel ISO224B

Figur 25: Visar förstärkningsfel och fasfel för ISO224B med två olika cutoff-frekvenser på ingångens lågpassfilter. Uppmätt med "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442".

Den noggranna spänningsmätningen med ISO224B kalibrerades med en bänkmultimeter ”Rigol DM3068” för att verifiera isolationsförstärkarens förstärkningsfel insatt i mätsystemet. Stadiga spänningar genererades med hjälp av vanliga AA-batterier. Mätdata som jämfördes mot bänkmultimeter är medelvärden över tio sekunder med 50kHz sampling. Fem punkter testades och resultatet går att se i tabell 2.

Bänkmultimetern Rigol DM3068s noggrannhet anges vara 0,0035% noggrann vid spänningsmätningar runt 2V. [20]

Tabell 2: Verifiering av spänningsmätningar med två stycken isolationsförstärkare ISO224B placerade för mätning av respektive släpkontakt. Referens är bänkmultimeter Rigol DM3068. U1 och U2 refererar till figur 7.

Referens (mV)	U1 (mV)	FEL U1 (%)	FEL U1 (mV)
0	0	0,00%	0
-1497	-1496	-0,07%	1
1497	1496	-0,07%	-1
6835	6828	-0,10%	-7
-6800	-6798	-0,03%	2
Referens (mV)	U2 (mV)	FEL U2 (%)	FEL U2 (mV)
0	0	0,00%	0
-1497	-1497	0,00%	0
1497	1497	0,00%	0
6835	6830	-0,07%	-5
-6800	-6799	-0,01%	1

3.1.3 Ström

Strömmätningen med strömsensor ”LF 305-S” kalibrerades med en bänkmultimeter Rigol DM3068 för att verifiera strömsensorn insatt i mätsystemet. Det, för strömsensorn, uppgivna mät noggrannheten från databladet angav 1%. [21] Se tabell 3.

Strömsensorn lindades med först 20 varv och sedan 80 varv för att generera magnetfält motsvarande strömmar större än 10A då bänkmultimeter Rigol DM3068 endast mäter upp till 10A.

Bänkmultimeterns noggrannhet anges vara 0,100% noggrann vid strömmätningar runt 10A. [20]

Tabell 3: Verifiering av strömmätning med strömsensorn LEM LF 305-S. Referens är bänkmultimeter Rigol DM3068

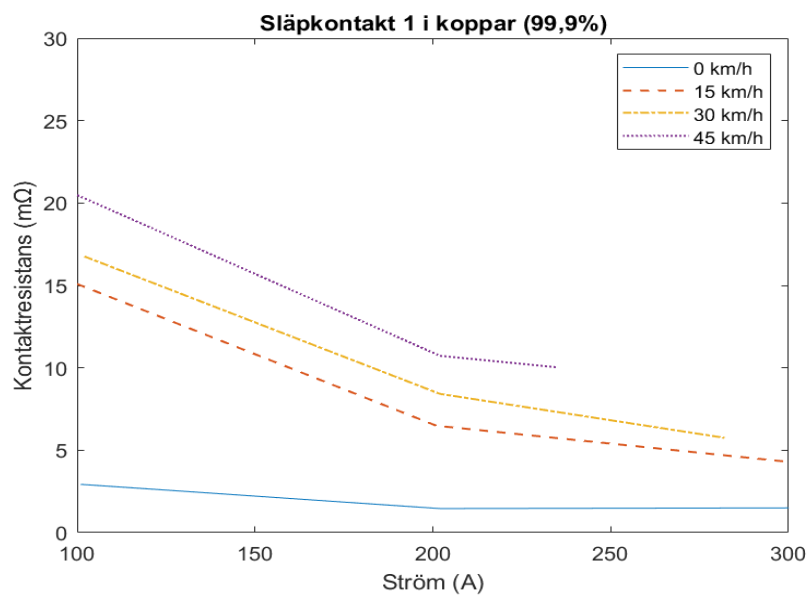
Referens (A)	I (A)	Fel I
10,13	10,03	-0,96%
30,36	30,40	0,14%
49,90	50,03	0,25%
99,8118	100,25379	0,44%
199,3893	200,76417	0,68%
259,4916	261,74722	0,86%
296,5005	299,52269	1,01%

3.2 Materialmätningar

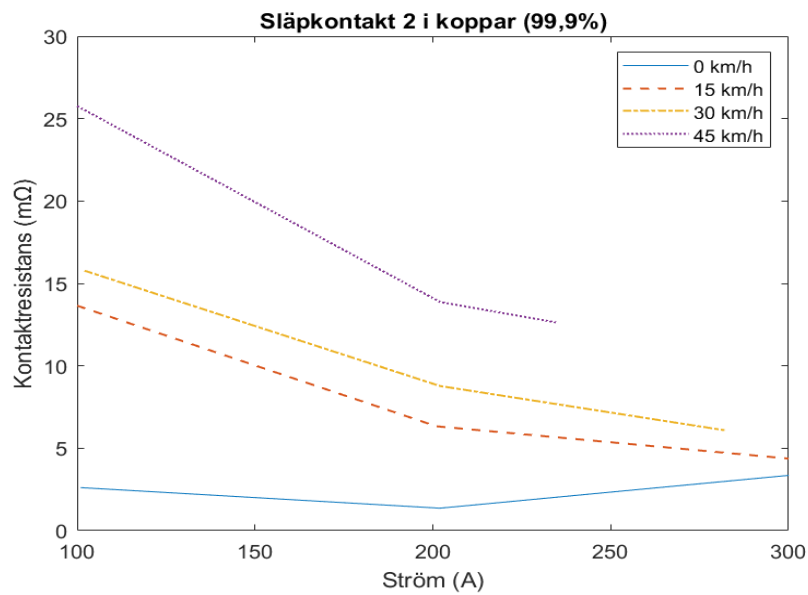
För att testa mätsystemet utfördes två testserier på släpkontaktmaterial; koppar (99,9%) och aluminium. De två materialen testades med ett flertal olika genomgående strömmar och ett flertal olika hastigheter.

3.2.1 Koppar

I figur 26, 27 och 28, visas mätresultaten för test av kontaktmaterialet koppar (99,9%). Kontakten utsattes för tre olika genomgående strömmar (100A, 200A och 300A) samt fyra hastigheter (0km/h, 15km/h, 30km/h och 45km/h) där kontaktresistans, friktionskoefficient samt temperatur uppmättes. Kontaktkraft ner mot banan var på samtliga tester 10N. Kontaktarea mellan släpkontakt och bana uppskattades till cirka 25 kvadratcentimeter. Varje mätpunkt kördes i 5min varav sista minuten loggades och medelvärdet presenteras i figurerna nedan.

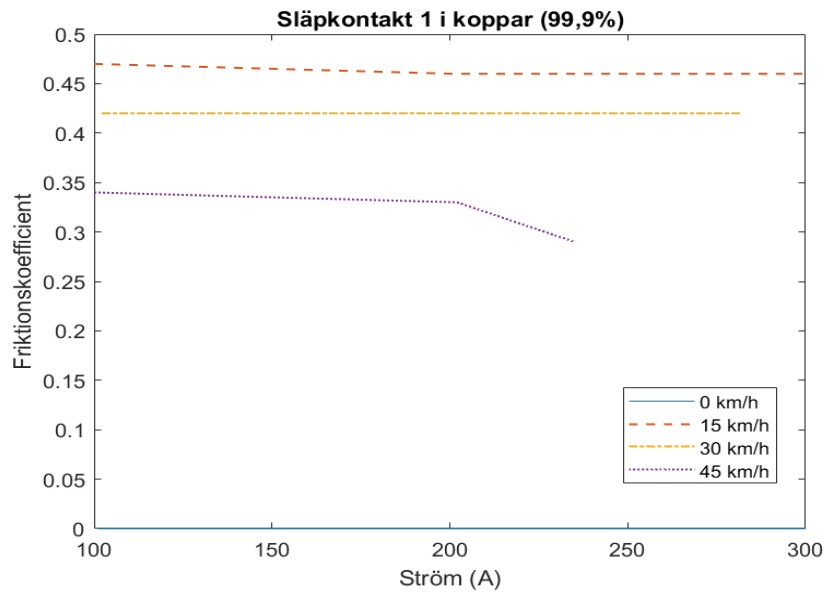


(a) Kontaktresistans i kontakt som leder ström upp från bana.

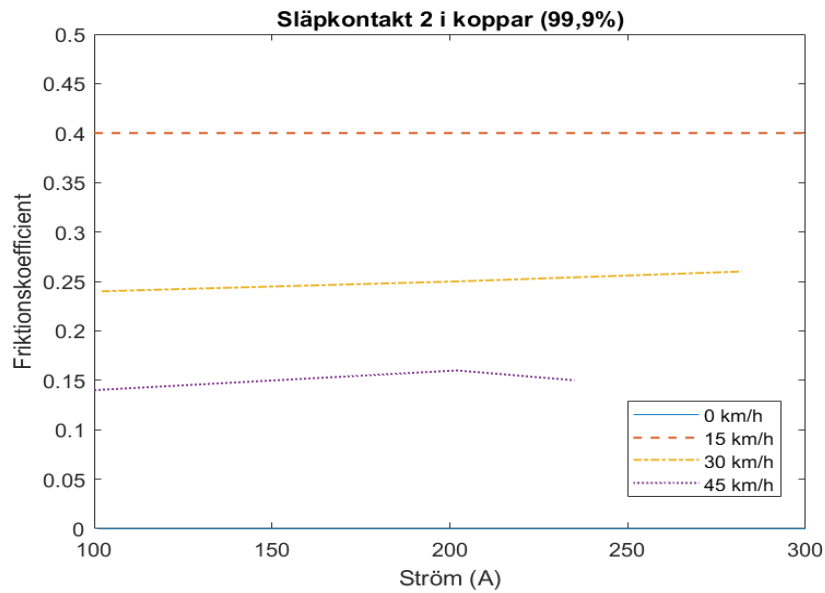


(b) Kontaktresistans i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 26: Visar uppmät kontaktresistans beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter.

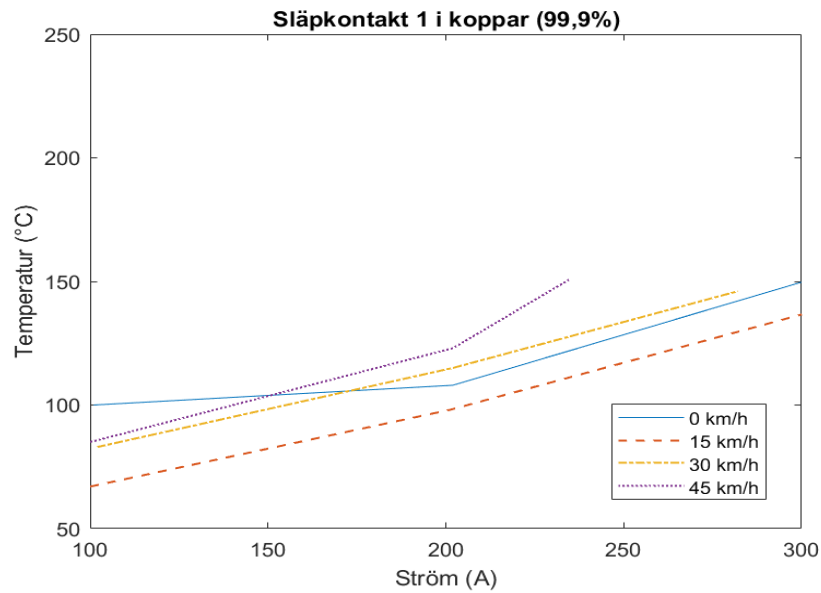


(a) Friktionskoefficient i kontakt som leder ström upp från bana.

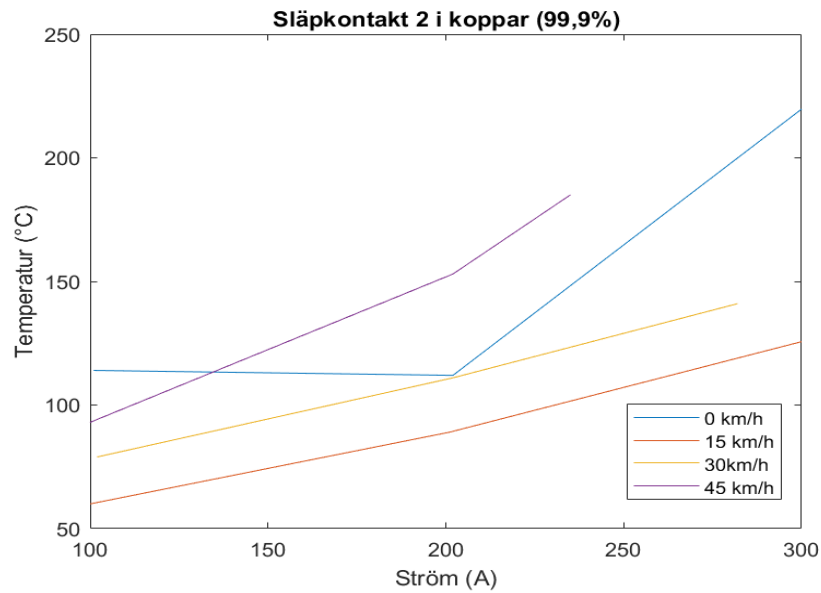


(b) Friktionskoefficient i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 27: Visar uppmät friktionskoefficient beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontaktkraft mot bana 10N.



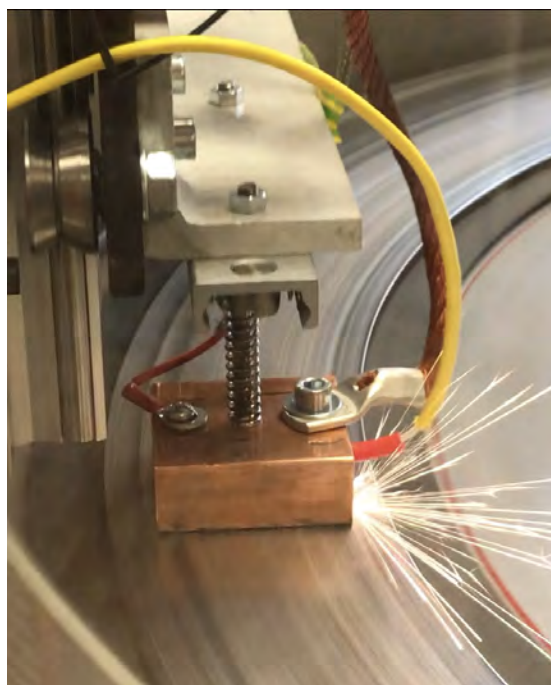
(a) Temperatur i kontakt som leder ström upp från bana.



(b) Temperatur i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 28: Visar uppmätt temperatur efter 5 minuters körning på punkten beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter.

Vid körning med höga (30 km/h, 45 km/h) hastigheter bildades ljusbågar och gnistor. Ett generellt mönster av mer gnistor och ljusbågar vid högre hastigheter och större strömmar bevitnades. På bilden i figur 29 visas en sådan gnistbildning.

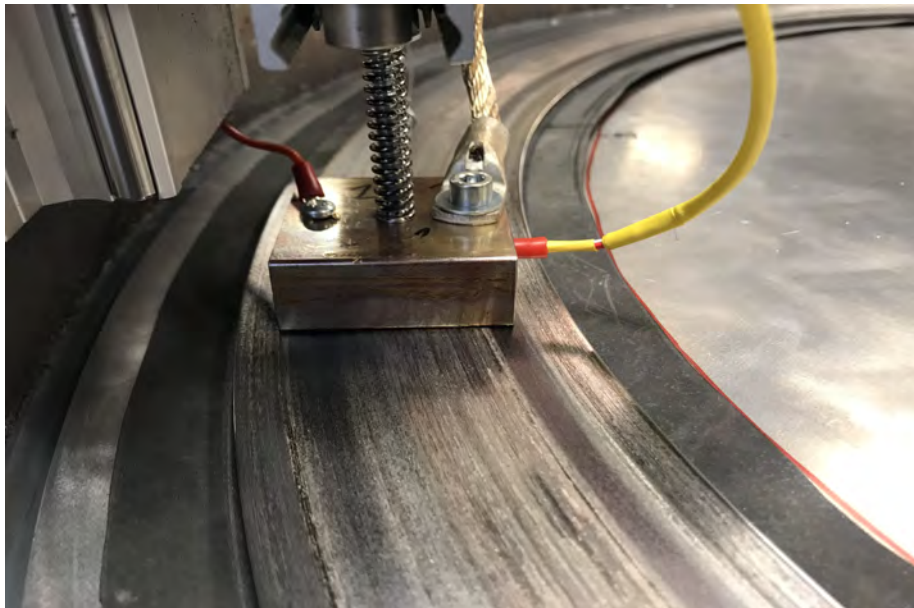


Figur 29: Visar bild på gnistbildning vid test av koppar som släpkontakt.

Efter körda tester uppvisar släpkontakten som leder ström ner i banan en färgskiftning som kan ses på bilden i figur 30. Båda kontakterna uppvisar en svart och röd yta i kontaktytan med banan som kan ses på bilden i figur 31. Banan visar spår av utsmörjda kopparrester i figur 32.



(a) Färg i kontakt som leder ström upp från bana efter körda tester.

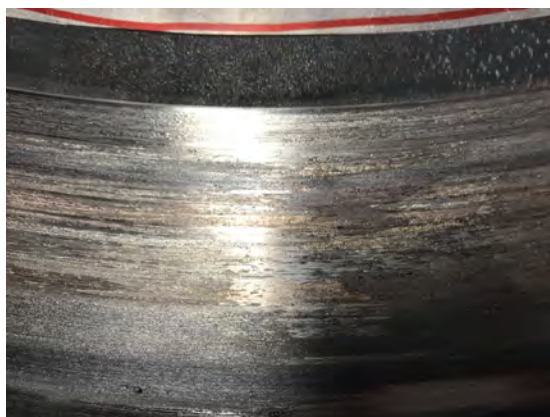


(b) Färg i kontakt som leder ström ner i bana efter körda tester.

Figur 30: Visar färgskiftning av släpkontakt i koppar (99,9%) efter körda tester.



Figur 31: Visar bild på undersida av släpkontakt i koppar efter körda tester. Till vänster kontakt som leder ström upp ur bana och till höger kontakt som leder ström ner i bana.



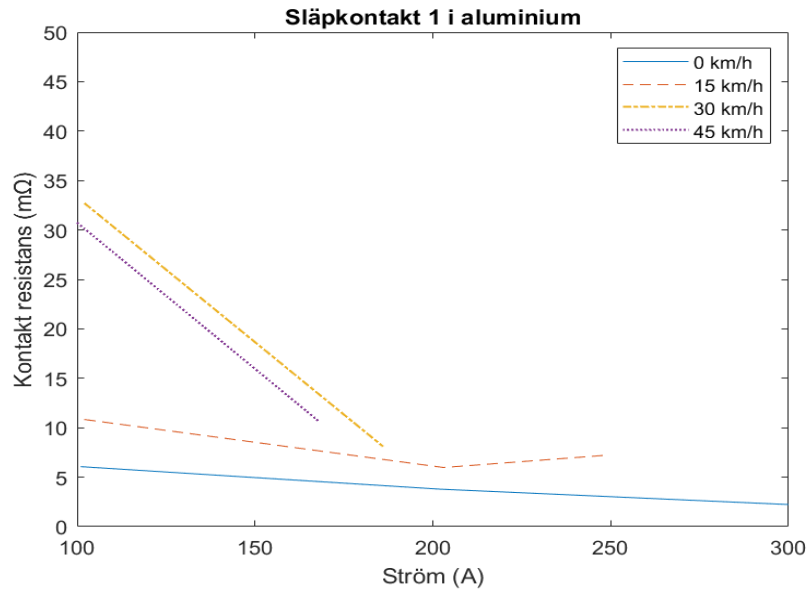
Figur 32: Visar bild på kopparrester på bana efter körda tester.

3.2.2 Aluminium

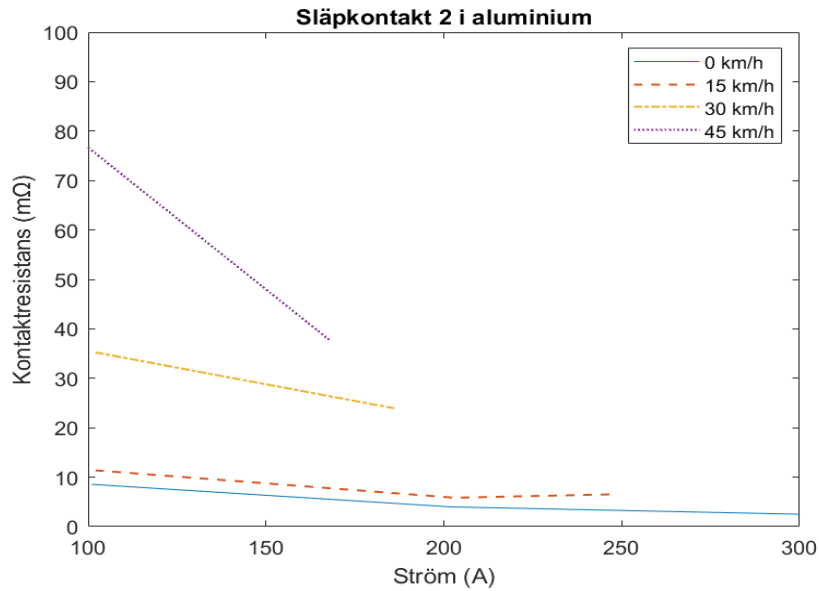
I figur 33, 34 och 35, visas mätresultaten för test av kontaktmaterialet aluminium. Kontakten utsattes för tre olika genomgående strömmar (100A, 200A och 300A) samt fyra hastigheter (0km/h, 15km/h, 30km/h och 45km/h) där kontaktresistans, friktionskoefficient samt temperatur uppmättes. Vid körning i 30 km/h och 45 km/h kunde test med 300A ej genomföras då effekten och temperaturen över kontaktresistansen blev för hög. Samma problem uppstod vid försök att köra 200A då endast runt 150-175A uppnåddes. Även vid körning i 15 km/h uppnåddes inte 300A utan endast 250A av samma anledning.

Kontaktkraft ner mot banan var på samtliga tester 10N. Kontaktarea mellan släpkontakt och bana uppskattades till cirka 25 kvadratcentimeter.

Varje mätpunkt kördes i 5min varav sista minuten loggades och medelvärdet presenteras i figurerna nedan.

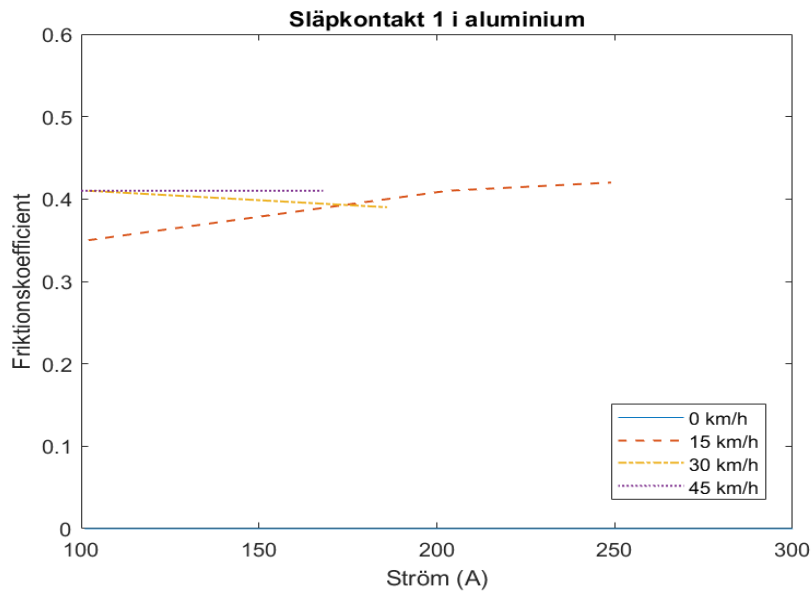


(a) Kontaktresistans i kontakt som leder ström upp från bana.

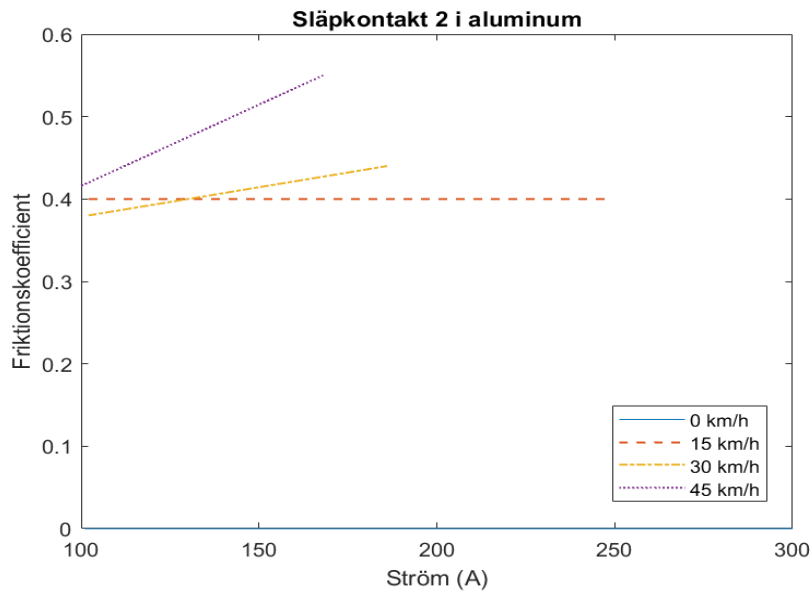


(b) Kontaktresistans i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 33: Visar uppmät kontaktresistans beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter.

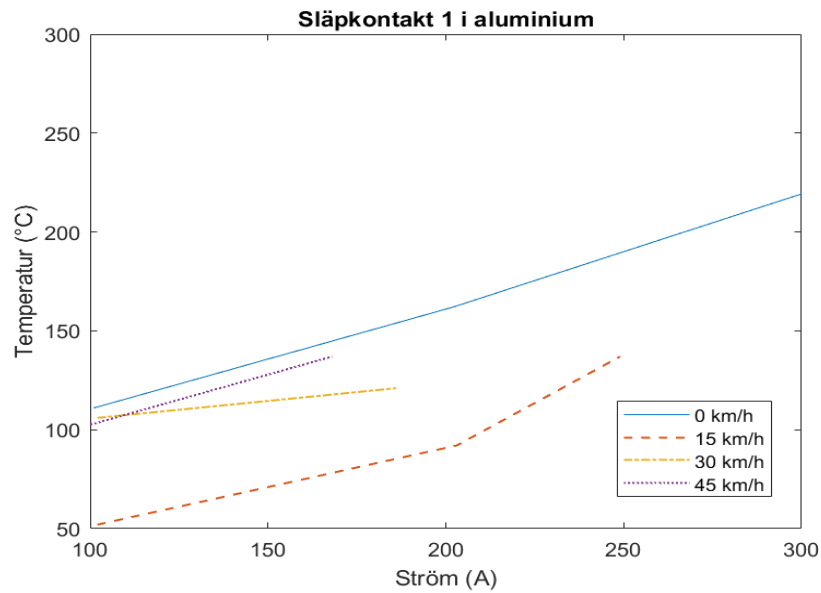


(a) Friktionskoefficient i kontakt som leder ström upp från bana.

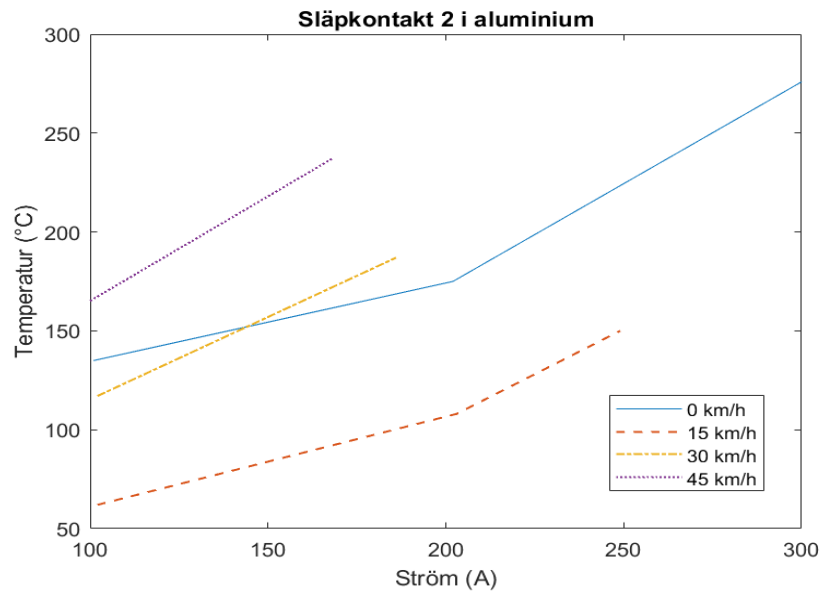


(b) Friktionskoefficient i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 34: Visar uppmät friktionskoefficient beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontaktkraft mot bana 10N.



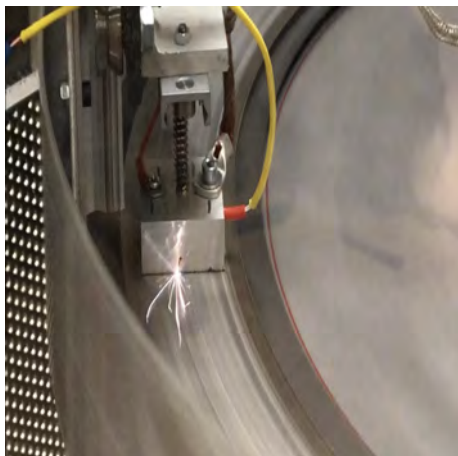
(a) Temperatur i kontakt som leder ström upp från bana.



(b) Temperatur i kontakt som leder ström ner i bana.

Figur 35: Visar uppmät temperatur efter 5 minuters körning på punkten beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontakt-tryck mot bana 10N.

Vid körning i alla hastigheter förutom stillastående (15 km/h, 30 km/h, 45 km/h) bildades ljusbågar och gnistor. Ett generellt mönster av mer gnistor och uppkomna ljusbågar vid högre hastigheter och strömmar bevittnades. På bilden i figur 36 visas en sådan gnistbildning. Ingen gnistbildning eller uppkomst av ljusbågar bevittnades i stillastående tester. I jämförelse med tester av koppar var ljusbågar och gnistbildning betydligt högre vid körning av aluminium.



Figur 36: Visar bild på gnistbildning vid test av aluminium som släpkontakt.

Efter körda tester uppvisar släpkontakten som leder ström ner i banan en färgskiftning i kontaktytan som kan ses på bild i figur 37.



Figur 37: Visar bild på undersida av släpkontakt i aluminium efter körda tester. Till vänster kontakt som leder ström upp ur bana och till höger kontakt som leder ström ner i bana.

4 Diskussion av resultat och slutsatser

I följande avsnitt diskuteras resultaten från både verifieringen av mätsystemet samt materialtester. Även förslag på framtida förbättringar och arbete presenteras.

4.1 Verifiering av mätsystem

Mätsystemet presterar i linje med uppsatta mål enligt gjorda verifieringstester med några förbehåll. I tabell 4 visas översikt över uppnådda mätnoggrannheter.

Tabell 4: Visar jämförelse över målsatta och uppnådda mätnoggrannheter.

Mätnoggrannhet	Målsatt	Uppnådd
Spänning intervall 10V	enstaka mV	enstaka mV för medelvärde, +/- 15mV för enskild punkt*
Spänning intervall 600V	Se dynamiken	+/- 2,5V för enskild punkt*
Ström	1 %	1 %

*kan vara bättre om den mäts med noggrannare mätverktyg än picoscope.

4.1.1 Mätstörningar

De upptäckta mätstörningarna undveks genom skärmning av kablar, jordning och filtrering. Det kan dock fortfarande förekomma oupptäckta mätfel.

Ett möjligt mätfel som ej undersöktes är sensorernas och mätmotståndens förändring med hög temperatur. Den fläkt i mätlådan som kylar mätmotstånden och spänningssensorerna antogs vara tillräcklig men temperatur i mätlåda samt i resistanser mättes inte.

Eftersom hela uppställningen av karusellen är utformad som en stor loop mellan strömaggregat och kontaktarmar finns det även en möjlighet för tillfälligt inducerade störningar från omkringliggande elektronisk utrustning även om just den konstanta störningen på 50Hz kunde pareras. Att 50Hz-störningen bevittnades och sedan parerades ger dock en antydning om att skärmning av kablage var tillräcklig.

Noggrannhet i temperaturgivare i släpkontaktarna testades inte heller eftersom det inte sattes krav på någon större noggrannhet i denna mätning.

4.1.2 Spänning

Det digitala oscilloskopet "Picoscope 4444" tillsammans probar "PicoConnect 442" har en bandbredd på 10MHz och är mer än tillräcklig för att mäta bandbredden i figur 25.

Mätnoggrannheten för det digitala oscilloskopet "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442" är, i värsta fall, +/- 3% av mätintervallet och är på gränsen till tillräckligt för resultaten för isolationsförstärkarna i figur 23. [19] Det kan alltså vara som så att precisionen i isolationsförstärkarna är något bättre än vad som visas, men eftersom en skillnad bevitnades med denna mätning så antogs den god nog för ändamålet.

I figur 23a ser vi att isolationsförstärkare ACPL-C87B har ett mätbrus på cirka -60...+20mV och således kan en enstaka punkt uppmättas med detta felet. Denna isolationsförstärkare valdes inte för mätsystemet av denna anledning, även om det fanns fördelar med isolationsförstärkaren såsom det lägre priset och högre ingångsimpedans vilka vidare visas i tabell 1. Även den högre common mode-transientimmuniteten för isolationsförstärkare ISO224B var en betydande faktor för att dämpa de inducerade störningarna i systemet.

I figur 23b ser vi att isolationsförstärkaren ISO224 har ett mätbrus på cirka +/- 15mV och således kan en enstaka punkt uppmättas med detta felet. Ett mätfel på +/- 15mV motsvarar ett maximalt mätfel av kontaktresistans med en ström på 100A på cirka +/- 0,15mOhm ($R=U/I$). Vid materialmätningar i avsnitt 6.2 kan vi se att denna mätnoggrannhet är tillfredställande för att särskilja kontaktresistanser i testriggen. Eftersom det digitala oscilloskopet "Picoscope 4444" tillsammans med probar "PicoConnect 442" endast garanterar +/- 3% i noggrannhet kan vi inte urskilja om vi ser mätfelet från isolationsförstärkaren eller från det digitala oscilloskopet. Isolationsförstärkaren kan prestera bättre än vad verifieringen visar.

För isolationsförstärkaren ISO224B uppmättes i tabell 2 ett förstärkningsfel på maximalt -0,1% och endast fel på enstaka mV. Detta var i linje med databladet som angav maximalt +/- 0,3% förstärkningsfel med typiskt värde +/- 0,05% [14].

För de uppsatta målen gällande bandbredd på 100kHz uppfyller både ström och spänningssensorer detta mål. Dock begränsades spänningsmätningen med ett lågpasfilter på ingången med en cutoff-frekvens på 10 kHz för att dämpa störningar från det strömaggreat som användes för att generera strömmen genom släpkontakter.

4.1.3 Ström

Som visas i tabell 3 presterar strömsensorn "LF 305-S" inom 1% mätfel vilket är inom ramen för uppsatt mål. I samma tabell går att se ett mönster i felet som vandrar från -1% vid låga strömmar till +1% vid höga vilket kan tyda på ett mindre kalibreringsfel och skulle förklara varför sensor inte uppfyller mätnoggrannhet på 0,5% som datablad utlovar. [21]

Bänkmultimeterns noggrannhet anges vara 0,100% noggrann vid strömmätningar runt 10A. Detta är tillräckligt noggrant för att verifiera strömmätningen i tabell 3. [20]

4.2 Materialmätningar

Materialmätningar i denna rapport ska inte ses som en fullgod analys utav egenskaper för material i släpkontakter, då huvudfokus i rapporten ligger i test av mätsystemet. Dock utfördes tester metodiskt och vetenskapligt för de två materialen och kan ge indikationer på fenomen och mönster för materials egenskaper som släpkontakter. Både generella mönster, men också specifika mönster för just aluminium eller koppar.

4.2.1 Koppar

I figur 26 kan vi se en fallande kontaktresistans då strömmen ökar. Vi kan även se att en högre hastighet för släpkontakten ökar kontaktresistansen. En markant skillnad påvisas mellan släpkontakt som leder ström ner i banan och släpkontakt som leder ström upp ur banan.

I liknande tester, på samma testrigg, med koppar som släpkontakt från 2020 uppnås samma dynamik av fallande kontaktresistans med ökande genomgående ström. En oförändrad friktionskoefficient vid ökad ström uppvisas även likt i dessa tester. Dock släpades material i lägre hastigheter vid dessa test. [22]

Den markanta skillnaden mellan släpkontakterna skulle kunna hänvisas till ett fenomen som är väl känt inom svetsning. I svetsning väljer man polaritet på svets elektroden beroende på tillämpning. En generell regel är att den positiva polen värms upp två tredjedelar av den totala ljusbågens värmeenergi och den negativa en tredjedel. [23] Eftersom resistans generellt varierar med förändringar i temperatur är en möjlig förklaring att kopparen i kontaktytan är betydligt varmare i släpkontakt två där släpkontakten är positiv pol och banan är negativ pol. Tesen stärks av att både ljusbågar och gnistor syntes i körningar.

Den stillastående testningen visar inte detta fenomen och i denna körning bevittnades heller inga ljusbågar eller gnistor. Samt kontaktresistansen var betydligt lägre.

Friktionskoefficienterna förändras inte nämnvärt med en ökande ström som bevittnas i figur 27. Undantag är vid 45 km/h där friktionen verkar vika neråt vid 200A. Vid liknande tester med en annan typ av uppställning från 2018 där andra material testades i högre hastighet visas samma fenomen och förklaras med att en högre temperatur delvis smälter kontaktmaterialet och då smörjer banan vilket minskar friktionen. [10] Detta fenomen verkar överensstämma med dessa tester sett till kopparen som syns på banan efter tester i figur 32.

Friktionskoefficienterna i figur 27 verkar skilja sig markant mellan kontakten som leder strömmen ner i banan och kontakten som leder ström upp från banan. Enligt samma logik från svetsning som vid kontaktresistanserna kan detta fenomen möjligen beskrivas av en högre temperatur i kontaktytan på släpkontakten som leder ström ner i banan. Även färgskiftningen på hela materialet i figur 30 indikerar att materialen har (kemiskt) reagerat olika.

Bild i figur 31 visar i kontaktytan av kontaktmaterialet lager av vad som med de röda och svarta färgerna indikerar att både röd och svart kopparoxid bildats (Cu_2O , CuO). Detta kan också ha en effekt på både kontaktresistans och friktionskoefficient samt indikera höga temperaturer i kontaktytan.

Temperaturen i kontaktorna stiger med ökad genomgående ström enligt figur 28. Detta antas rimligt då den elektriska effekten ($P=U \cdot I$) över kontaktresistansen också då ökar. Temperaturen ökar också om hastighet den släpas med ökar. Ljusbågar och gnistor och en generellt högre kontaktresistans vid högre hastigheter är en möjlig och rimlig förklaring till detta fenomen. Undantag gäller då släpkontakten står stilla, då värmen koncentreras på en punkt på banan och inte sprids ut och då ökar dramatiskt.

Att temperaturen (förutom vid stillastående körning) inte skiljer sig nämnvärt mellan kontaktorna kan bero på att koppar har en hög värmeledningsförmåga och snabbt sprider ut systemets totala värme.

I körningen med 200A stillastående avviker temperaturmätningen från resterande mätningars mönster vilket kan bero på att systemet inte nådde en stationär temperatur under de fem minuter testpunkten mättes.

4.2.2 Aluminium

I figur 33 kan vi se en generellt fallande kontaktresistans då strömmen ökar. Vid körning i 30 km/h och 45 km/h ökade kontaktresistansen kraftigt. Detta kan bero på bildning av aluminiumoxid som är elektriskt isolerande. Aluminiumoxid skulle också förklara varför den drastiska ökningen i kontaktresistansen sker då hastigheten är hög, eftersom det endast kan bildas oxid i kontaktytan om syre smiter in mellan kontakt och bana. Att syre smiter in mellan kontakt och bana antags vara rimligt vid högre hastigheter, att också gnistor och ljusbågar generellt bevittnas gör också detta till en resonabel förklaring.

Friktionskoefficienterna för aluminium verkar skilja sig en del mellan kontakten som leder strömmen ner i banan, och kontakten som leder ström upp från banan, likt som för koppar. Detta visas i figur 34. Enligt samma logik som resonades för koppar i föregående avsnitt kan detta fenomenet också möjligen härledas till vad som bevittnas i svetsning där pluspolen blir varmare än minuspolen när ljusbågar bildas.

Bild i figur 37 visar på undersidan av aluminiumkontaktorna en markant skillnad mellan kontakt som leder upp ström från bana och kontakt som leder ner ström från bana. Detta kan också vara en förklaring till skillnader i kontaktresistans och friktionskoefficient och indikerar höga temperaturer i kontaktytan framförallt på kontakt som leder ström ner i banan.

Temperaturen i kontaktorna stiger med ökad genomgående ström enligt figur 35 vilket antas rimligt då den elektriska effekten ($P=U \cdot I$) över kontaktresistansen också då ökar. Temperaturen ökar också då hastigheten den släpas med ökar.

Ljusbågar och gnistor och en generellt högre kontaktresistans vid högre hastigheter är också en möjlig och rimlig förklaring till detta fenomen. Undantag gäller då släpkontakten står stilla, då värmen koncentreras på en punkt på banan och inte sprids ut och då ökar dramatiskt.

4.2.3 Materialjämförelse

I detta korta avsnitt visas mätningarna av släpkontakt i koppar och aluminium brevid varandra för att enklare se likheter och skillnader samt få en bättre överblick. Se figur 38, 39 och 40. Observera att skalan på y-axel varierar mellan figurer.

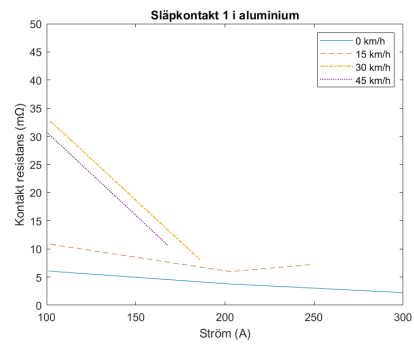
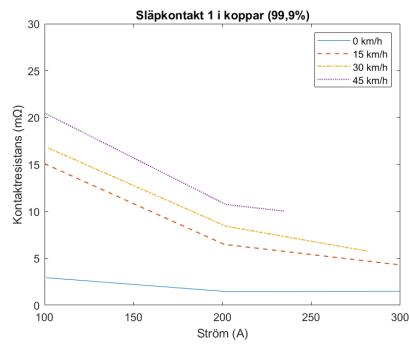
I tabell 5 och tabell 6 visas samma mätdata för båda materialen utskrivna i en överblick.

Tabell 5: Översiktlig tabell över mätdata från tester med släpkontakter i koppar. Kontakt 1 leder ström upp ur stålring och kontakt 2 leder ström ner i stålring

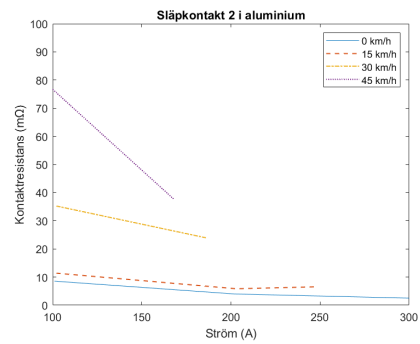
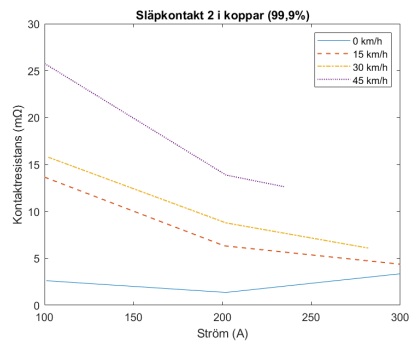
Kontaktresistans i koppar (mOhm) (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	3/3	15/14	17/16	20/26
200A	1/1	6/6	8/9	11/14
[300A, 300A, 282A, 235A]	2/3	4/4	6/6	10/13
Friktionskoefficient i koppar (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	0/0	0,47/0,40	0,42/0,24	0,34/0,14
200A	0/0	0,46/0,40	0,42/0,25	0,33/0,16
[300A, 300A, 282A, 235A]	0/0	0,46/0,40	0,42/0,26	0,29/0,15
Temperatur i koppar (C)° (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	100/114	67/60	83/79	85/93
200A	108/112	98/89	115/111	123/153
[300A, 300A, 282A, 235A]	151/223	137/126	146/141	151/185

Tabell 6: Översiktlig tabell över mätdata från tester med släpkontakter i aluminium. Kontakt 1 leder ström upp ur stålring och kontakt 2 leder ström ner i stålring

Kontaktresistans i aluminium (mOhm) (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	6/9	11/11	33/35	32/78
[200A, 200A, 186A, 168A]	4/4	6/6	8/24	11/38
[300A, 249A, -, -]	2/2	7/7	-	-
Friktionskoefficient i aluminium (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	0/0	0,35/0,40	0,41/0,38	0,41/0,41
[200A, 200A, 186A, 168A]	0/0	0,41/0,40	0,39/0,44	0,41/0,55
[300A, 249A, -, -]	0/0	0,42/0,40	-	-
Temperatur i aluminium (C)° (Kontakt 1/Kontakt 2)	0 km/h	15 km/h	30 km/h	45 km/h
100A	111/135	52/62	106/117	101/162
[200A, 200A, 186A, 168A]	162/175	92/108	121/187	137/237
[300A, 249A, -, -]	221/279	137/150	-	-

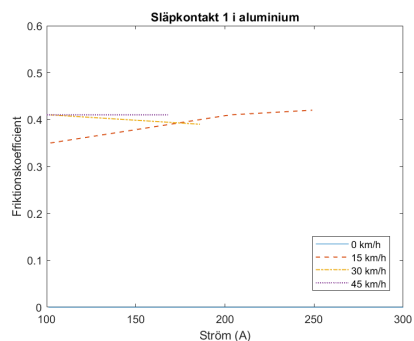
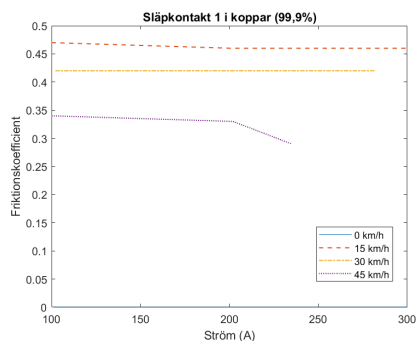


(a) Kontaktresistans i kopparkontakt som leder ström upp från bana. (b) Kontaktresistans i aluminiumkontakt som leder ström upp från bana.

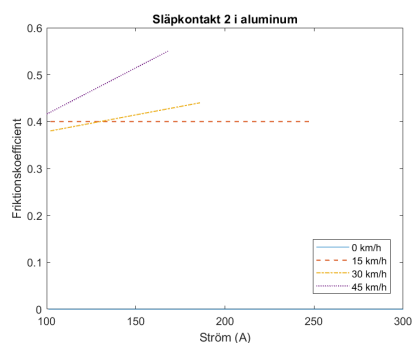
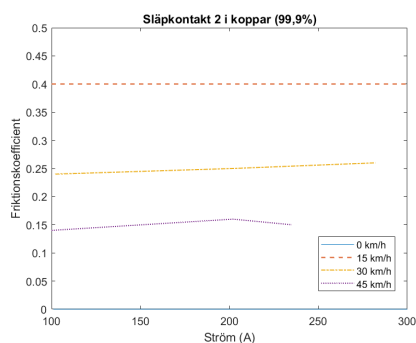


(c) Kontaktresistans i kopparkontakt som leder ström ner i bana. (d) Kontaktresistans i aluminiumkontakt som leder ström ner i bana.

Figur 38: Visar uppmät kontaktresistans beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontaktkraft mot bana 10N.

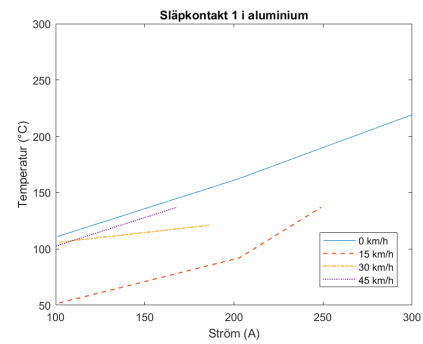
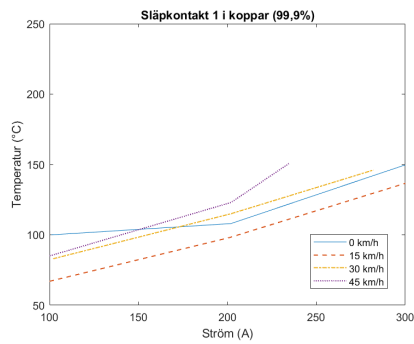


(a) Friktionskoefficient i kopparkontakt som leder ström upp från bana. (b) Friktionskoefficient i aluminiumkontakt som leder ström upp från bana.

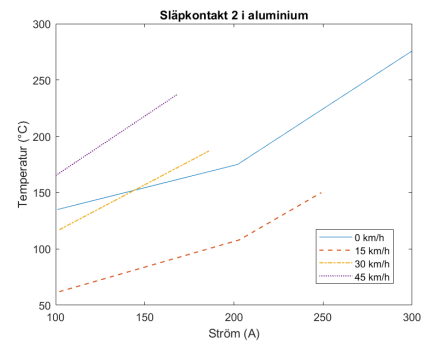
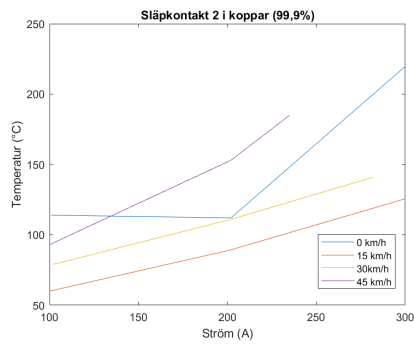


(c) Friktionskoefficient i kopparkontakt som leder ström ner i bana. (d) Friktionskoefficient i aluminiumkontakt som leder ström ner i bana.

Figur 39: Visar uppmät friktionskoefficient beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontaktkraft mot bana 10N.



(a) Temperatur i kopparkontakt som leder ström upp från bana. (b) Temperatur i aluminiumkontakt som leder ström upp från bana.



(c) Temperatur i kopparkontakt som leder ström ner i bana. (d) Temperatur i aluminiumkontakt som leder ström ner i bana.

Figur 40: Visar uppmät temperatur beroende på genomgående ström vid olika släphastigheter. Kontaktkraft mot bana 10N.

4.3 Framtida arbete

Det kan konstateras att det finns många aspekter att ta hänsyn till vid materialval i släpkontakter. Såsom kontaktresistans, friktionskoefficient och värmeledningsförmåga. I denna rapport antyds att det är fler faktorer som spelar in. Såsom materialets tendens att oxidera vid uppvärmning. Aluminium är en bra elektrisk ledare men aluminiumoxid är en elektrisk isolator. Det är något som möjligen bör tas hänsyn till vid materialval för släpkontakter.

Om kontakten är en plus eller minuspol antyds ha en markant betydelse. I elvägstekniker där släpkontakterna växlar poler under körning blir detta också intressant att undersöka närmre. För att vara säker på att det är detta fenomenet som uppstår är det möjligt att byta strömriktningen i testriggeren för att kontrollera att det inte är andra parametrar som påverkar.

Att drifttemperaturen för kontakten har stor betydelse antyds också på flera ställen i denna rapporters materialmätningar. Att till exempel sätta upp en IR-kamera för att se temperaturfördelningen på kontakten är en intressant fortsättning.

För att öka bandbredden från 10kHz i spänningsmätningen och ta bort lågpasfilter på ingången till spänningsmätningen bör switchstörningen från strömaggregatet undersökas noggrannare. Det är möjligt att en placering av strömaggregatet längre ifrån testriggeren hjälper.

En undersökning av spänningsmätningens noggrannhet med ett mer precist mätinstrument än det digitala oscilloskop som användes är också något som är värt att testa i framtiden.

Att installera en fläkt riktad mot varje släpkontakt hade kunnat simulera luftkonvektionen som ett vägfordon utsätts för i verkligheten. Att också mäta luftflödet och ha det som en parameter för framtida tester skulle öka realismen av tester ytterligare.

Slutligen ska nämnas att mätsystemet förhoppningsvis ska komma till användning och finnas behjälpligt för framtida, mer heltäckande, tester av material och utformningar på släpkontakter till konduktiva elvägar.

Referenser

- [1] Trafikverket. "Nationell färdplan för elvägar". I: (2017), s. 21–22.
- [2] Trafikverket. "Regeringsuppdrag - Analysera förutsättningar och planera för en utbyggnad av elvägar". I: (2021), s. 76–77.
- [3] ElectReon. *ElectReon*. URL: <https://www.electreon.com/>. (hämtad: 26.05.2021).
- [4] Lunds Kommun. *Varför ska Lund ha en spårväg?* URL: https://old-sparvaglund.lund.se/varfor-sparvag/sparvagen_en_del_av_kommunens_hallbarhetsmal/. (hämtad: 26.05.2021).
- [5] Siemens. *eHighway – Electrification of road freight transport*. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/ehighway.html>. (hämtad: 26.05.2021).
- [6] Alstom. *SRS: Innovative, safe and automatic charging for trams and electric buses*. URL: <https://www.alstom.com/our-solutions/infrastructure/srs-innovative-safe-and-automatic-charging-trams-and-electric-buses>. (hämtad: 25.05.2021).
- [7] Alstom. *APS: Service-proven catenary-free tramway operations*. URL: <https://www.alstom.com/our-solutions/infrastructure/aps-service-proven-catenary-free-tramway-operations>. (hämtad: 25.05.2021).
- [8] Elonroad. *Elonroad*. URL: <https://elonroad.com>. (hämtad: 23.05.2021).
- [9] Elways. *Elways*. URL: <https://elways.se/>. (hämtad: 26.05.2021).
- [10] Zhonghua Chen m.fl. "Study on Friction and Wear of Sliding Electrical Contact of Pantograph-catenary System under Fluctuating Compressive Load". I: (2018).
- [11] LEM. *Innovations*. URL: <https://www.lem.com/en/innovations>. (hämtad: 23.05.2021).
- [12] Britannica. *Hall effect*. URL: <https://www.britannica.com/science/Hall-effect>. (hämtad: 27.05.2021).
- [13] Broadcom. *ACPL-C87B, ACPL-C87A, ACPL-C870 Precision Optically Isolated Voltage Sensor*. URL: <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-3563EN>. (hämtad: 23.05.2021).
- [14] Texas Instruments. *ISO224 Reinforced Isolated Amplifier With Single-Ended Input of ± 12 V and Differential Output of ± 4 V*. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso224.pdf?ts=1621748353932>. (hämtad: 23.05.2021).
- [15] National Instruments. *NI 9217 Datasheet*. URL: https://www.ni.com/pdf/manuals/374187a_02.pdf. (hämtad: 23.05.2021).
- [16] Status Instruments Ltd. *SEM1600B Data Sheet*. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/2313350.pdf>. (hämtad: 21.06.2021).

- [17] HT SENSOR TECHNOLOGY CO. *TAL220 Data Sheet*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/TAL220M4M5Update.pdf>. (hämtad: 21.06.2021).
- [18] National Instruments. *NI 9220 Datasheet*. URL: https://www.ni.com/pdf/manuals/373920a_02.pdf. (hämtad: 24.05.2021).
- [19] Picotech. *PicoScope 4444 Datasheet*. URL: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope-4444-data-sheet.pdf>. (hämtad: 27.05.2021).
- [20] Rigol. *DM3068 Specifications*. URL: <https://www.rigolna.com/products/digital-multimeters/dm3000/>. (hämtad: 25.05.2021).
- [21] LEM. *Current Transducer LF 305-S*. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf_305-s.pdf. (hämtad: 24.05.2021).
- [22] Philip Abrahamsson. "Thermal Management of Conductive Electric Road Systems". I: (2020), s. 39–40.
- [23] Welding headquarters Pierre Young. *What Is Polarity in Welding?* URL: <https://weldingheadquarters.com/what-is-polarity-in-welding/>. (hämtad: 27.05.2021).