

MEE 05:04

ABB



Förbättrad resistansmätning för grova aluminiumledare

Patrik Petermann

Examensarbete

Teknologie magisterexamen i elektroteknik - inriktning signalbehandling

Blekinge Tekniska Högskola

Februari 2005

Blekinge Tekniska Högskola

Sektion för Teknik

Avdelning för Telekommunikation och Signalbehandling

Examinator: Ingvar Gustavsson, Blekinge Tekniska Högskola

Handledare: Tommy Johansson, ABB Power Technologies AB, High Voltage Cables

Abstract

The goal with this master thesis has been to evaluate and to examine the stationary resistance bridge. The resistance bridge uses a 4-point measuring to determinate the resistance, which is used in the manufacturing of the conductor. It is then used when the resistance is to be decided for coarser aluminium conductors. A conductor has to fulfil certain demands to be able to move forward in the process. One of these demands is the resistance in ohm/km, which has demands that the measure values of the resistance bridge are as true and precise as possible.

The stationary resistance bridge had been examined through various kinds of measurements to be able to see how stable the system is and how to obtain a measure value as optimized as possible. The measurements were carried out in different dimensions and types of aluminium conductors, and in each measurement a various different tests were carried out for the aluminium conductor. The result of the measurements shows that the system is not stable for aluminium conductors with a cross-section area more than $\sim 1000 \text{ mm}^2$. This depends on that current in the resistance bridge does not distribute it self even in the whole conductors cross-section area. The distribution of the power has improved by using contact pressing and brings a more stable measure value. Another method will however be necessary to be able to decide the resistance in ohm/km for the aluminium conductors with swelling powder and swelling tape.

Sammanfattning

Målet med examensarbetet har varit att utvärdera och undersöka den stationära mätbryggan. Mätbryggan använder en 4-punktsmätning för bestämning av resistansen som används i ledartillverkningen, och används för grövre aluminiumledare. En ledare ska uppfylla vissa krav för att gå vidare i processen, ett av dessa är resistansen i ohm/km. Vilket ställer krav på att mätbryggans mätvärde är så sant och noggrant som möjligt.

Den stationära mätbryggan har undersökts genom olika mätningar för att se hur stabilt systemet är och hur ett så bra mätvärde ska tillhandahållas. Mätningarna utfördes på olika dimensioner och typer av aluminiumledare, i varje mätning utfördes ett antal olika test för aluminiumledaren. Resultat av mätningarna visar att systemet inte är stabilt för aluminiumledare med tvärsnittsarea över $\sim 1000 \text{ mm}^2$. Detta beror på att strömmen i mätbryggan inte fördelar sig jämnt i hela ledaren tvärsnitt. Men genom att använda sig av kontaktpressning har strömfördelning förbättrats och medför ett stabilare mätvärde. Men för aluminiumledare med svällpulver och svällband kommer det att behövas en annan metod än kontaktpressning för att bestämma resistansen i ohm/km

Innehållsförteckning

Figurförteckning.....	7
Tabellförteckning.....	10
1 Introduktion.....	11
1.1 ABB Power Technologies	11
1.2 ABB Automation Technologies	11
1.3 High Voltage Cables	11
1.3.1 Kablar.....	13
1.3.1.1 Massakabel	14
1.3.1.2 Oljekabel.....	14
1.3.1.3 PEX-kabel.....	14
1.3.2 Ledare.....	14
1.3.3 Ledartillverkning, KA.....	15
1.4 Bakgrund.....	16
1.5 Problem.....	17
2 Förstudie/Definition/Systembeskrivning	17
2.1 Ellära.....	17
2.1.1 Elektrisk ström och spänning.....	17
2.1.1.1 Likström.....	18
2.1.1.1.1 Serieresistans	18
2.1.1.1.2 Parallellresistans	19
2.1.2 Ledarresistans	20
2.2 Stora mätbryggan.....	22
2.2.1 4-trådskoppling	23
2.2.2 Schuetz Messtechnik mikroohmmeter MR 300 C	24
2.2.3 Kontaktanslutning i ändarna på ledaren.....	24
2.2.3.1 Kontaktpressning	24
3 Problem och möjlig lösning	25
3.1 Fördela strömmen jämnt i ledaren.....	25
3.1.1 Mätbryggans befintliga spännbackar	25
3.1.2 Pressa kopparhylsa i ändarna på ledaren.....	26
4 Praktiska mätningar	27
4.1 Mekanisk pressning	27
4.1.1 Test 1.....	27
4.1.2 Test 2.....	28
4.1.3 Resultat.....	28
4.2 Resistansmätning av aluminiumledare	29
4.2.1 Mätningar med stationär brygga	29
4.2.1.1 Beräkningar av mätnoggrannhet.....	30
4.2.2 Mätningar genom att uppskatta tvärsnittsarean	31
5 Mätningar och resultat.....	31
5.1.1 Mätningar och resultat av 1600 mm ² aluminiumledare	32
5.1.1.1 Test 1 i mätbryggan	32
5.1.1.2 Test 2 i mätbryggan	33
5.1.1.3 Test 3 i mätbryggan	35

5.1.1.4	Resistans bestämning genom att uppskattar tvärsnittsarea	35
5.1.2	Mätningar och resultat av 1000 mm ² aluminiumledare	36
5.1.2.1	Test 1 i mätbryggan	36
5.1.2.2	Test 2 i mätbryggan	37
5.1.2.3	Test 3 i mätbryggan	38
5.1.2.4	Test 4 i mätbryggan	39
5.1.2.5	Resistans bestämning genom att uppskattar tvärsnittsarea	40
5.1.3	Mätningar och resultat av 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver	41
5.1.3.1	Test 1 i mätbryggan	41
5.1.3.2	Test 2 i mätbryggan	42
5.1.3.3	Test 3 i mätbryggan	43
5.1.3.4	Test 4 i mätbryggan	44
5.1.3.5	Resistans bestämning genom att uppskattar tvärsnittsarea	45
5.1.4	Mätningar och resultat av 1000 mm ² aluminiumledare med svällband	45
5.1.4.1	Test 1 i mätbryggan	46
5.1.4.2	Test 2 i mätbryggan	46
6	Slutsats och framåtblick	47
6.1	Slutsats av mätningar på aluminiumledarna	47
6.2	Framåtblick	48
7	Referenser	49

Figurförteckning

Figur 1:	Bild över ABB HVC:s fabrik på Verkö	12
Figur 2:	1 Oljekabel för AC och DC. 2 Massakabel för DC. 3 PEX-kabel för AC med en ledare. 4 PEX-kabel för AC med tre ledare. 5 PEX-kabel, HVDC light för DC.....	13
Figur 3:	Figuren visar en komprimerad ledare där man har skärt bort lager efter lager till centrumtråden.	16
Figur 4:	Bild på korgar som används vid kabling.	16
Figur 5:	Här visas hur de fria elektronerna rör sig i en och samma riktning i en ledare. Strömriktningen beror på den gamla teorin om att strömmen riktning var från den positiva polen till den negativa polen.	17
Figur 6:	Figuren visar en serieresistanskoppling med N resistorer.	18
Figur 7:	Kretskoppling med tvåseriekopplade resistorer R_1 och R_2 . U är spänningen över kretsen och I är strömmen genom kretsen. U_1 är spänningen över resistorn R_1	19
Figur 8:	Figuren visar en parallellresistanskoppling med N resistorer.	19
Figur 9:	Figuren visar en parallellkopplad resistor krets med N st. resistorer. U är spänningen för kretsen och I är den totala strömmen genom kretsen.	20
Figur 10:	Bilden visar den stationära mätbryggan. Den bortre delen av mätbryggan är rörlig och kan ställas in tre lägen, 1, 2 och 3 meter mellan mätbackarna. ..	22
Figur 11:	Figuren visar en 4-trådkoppling. Voltmetern (V) mäter potentialskillnaden mellan V_A och V_B . Strömkällan ger en konstant ström (I) som leds genom kretsen, eftersom voltmetern är höghögmig kommer strömmen att förflyttas genom $R_{Mätobjekt}$	23
Figur 12:	Bild på Schuetz mikroohmmeter som används i den stationära mätbryggan.	24
Figur 13:	Bilden visar mätbryggans spännback där strömmen ansluts.	26
Figur 14:	Figuren visar en pressad hylsa runt änden på ledaren där strömmen ansluts.	26
Figur 15:	Figuren visar den pressade aluminiumledarens tvärsnitt i test 1.	28
Figur 16:	Figuren visar den pressade aluminiumledarens tvärsnitt i test 2.	28
Figur 17:	Figuren visar ett tvärsnitt på en komprimerad ledare.	29
Figur 18:	Figuren visar ledaren som är uppspänd i mätbryggan. A och D är strömbackarna, B och C är mätbackarna. Efter varje mätning flyttas B och C 50 mm utåt och ny mätning görs osv. tills avståndet mellan B och C är 3300 mm.	32
Figur 19:	Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	33
Figur 20:	Figuren visar hur strömmen ansluts på hylsan som är pressade runt ledaren.	34

Figur 21: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	34
Figur 22: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	35
Figur 23: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1600 mm ² aluminiumledare.	36
Figur 24: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	37
Figur 25: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	38
Figur 26: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	39
Figur 27 Figuren visar den uppspända ledaren i mätbryggan och hur mätbackarna placeras och förflyttas. Den ena mätbacken (B) är stationär och mätbacken (C) förflyttas 100 mm bortåt mot spännbacken (D).	39
Figur 28: Resultatet av Test 4 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	40
Figur 29: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1000 mm ² aluminiumledare.	41
Figur 30 Figuren visar den uppspända ledaren i mätbryggan och hur mätbackarna placeras och förflyttas. Efter varje mätning flyttas mätbackarna 50 mm utåt spännbackarna.	42
Figur 31: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	42
Figur 32: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	43
Figur 33: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	44

Figur 34: Resultatet av Test 4 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	45
Figur 35: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1200 mm ² aluminiumledare med svällpulver.	45
Figur 36: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare med svällband. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	46
Figur 37: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm ² aluminiumledare med svällband. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.	47

Tabellförteckning

Tabell 1: Antal spolar i varje korg för KA22 och KA20	15
Tabell 2: Densiteten för aluminium vid 20 °C.....	21
Tabell 3: Resistiviteten för koppar och aluminium vid 20°C.....	21
Tabell 4: Temperaturkoefficienter för koppar och aluminium.	21
Tabell 5: Instrumentets mätnoggrannhet för olika mätområden.	24
Tabell 6: Tabellen visar det uppskattade felet för olika mätområde.....	30

1 Introduktion

ABB¹ bildas den 5 januari 1988 då en fusion genomfördes av svenska ASEA² och schweiziska BBC³. ABB blir nu ett av de största elektrotekniska företagen i världen. Man fortsätter att utöka sin verksamhet genom flera nya förvärv och stärker sin position. Tyngdpunkten läggs på tre regioner Europa⁴, Amerika och Asien [9].

ABB:s största förvärv är Eltag Bailey Process Automation som gjordes 1998 för att bli marknadsledande inom den globala automationsmarknaden [9].

Under året 1999 avyttras verksamhet inom områden som kärnkraft, kraftgenerering och tåg [9].

Under år 2002 koncentrerar sig ABB på två kärnverksamheter kraftteknik (*Power Technologies*) och automationsteknik (*Automation Technologies*). Större delen av *Finacial Servies* säljs ut, verksamheterna *Oil, Gas and Petrochemicals* och affärsområdet *Building System* bjuds ut till försäljning [9].

Idag är ABB-koncernens bolag verksamma i omkring 100 länder och har ungefär 105 000 medarbetare [8].

1.1 ABB Power Technologies

ABB:s division Power Technologies erbjuder energibolag, gas- och vattenverk samt kunder inom industri och handel ett brett sortiment av produkter, system och tjänster för kraftöverföring, kraftdistribution samt styrning och övervakning av kraftverk.

1.2 ABB Automation Technologies

ABB:s division Automation Technologies kombinerar en heltäckande portfölj av produkter och tjänster med stort branschkunskande och global närvaro för leverans av lösningar för styrning, drivning, skydd, automation och integration för anläggningar inom industrier och kraftföretag.

1.3 High Voltage Cables

ABB Power Technologies AB High Voltage Cables (HVC) är en av världens modernaste kabelfabriker och har ungefär 290 anställda, enheten är en del i divisionen Power Technologies. HVC tillverkar och installerar land- och

¹ ASEA Brown Boveri Ltd (ABB)

² Ludvig Fridholm grundare av Elektriska Aktiebolaget går samman med Wenströms & Granströms Elektriska kraftbolag och grundar 1890 Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA)

³ 1891 grundar Charles E.L Brown och Walter Boveri Brown, Boveri & Cie (BBC)

⁴ Inklusiv det forna Sovjetunionen

sjökablar för högspänd kraftöverföring som standard eller som avancerade kundprodukter med hela världen som marknad. Fabriken är strategiskt bra placerad med egen hamn på Verkö som ligger utanför Karlskrona.

Detta gör det möjligt att producera och frakta långa kabellängder med båt. En bild över fabriken och hamnen visas i Figur 1.



Figur 1: Bild över ABB HVC:s fabrik på Verkö

1.3.1 Kablar

Kablar har många användningsområden men vanligaste är kraftöverföring och informationöverföring. HVC tillverkar sjökablar och landkablar för kraftöverföring med tre typer av isolering, olje-, massa- och PEX⁵-kabel för spänningar upp till 500 kV respektive 400 kV. Kablarna isoleras antingen med papper eller med PEX och för både AC⁶ och DC⁷. Figur 2 är en bild av kabelprodukter som tillverkas av HVC.



Figur 2: 1 Oljekabel för AC och DC. 2 Massakabel för DC. 3 PEX-kabel för AC med en ledare. 4 PEX-kabel för AC med tre ledare. 5 PEX-kabel, HVDC⁸ light för DC.

Vid uppbyggnad av kabel finns en del faktorer att ta hänsyn till, några är:

- förläggingsmiljö, land eller sjö
- isolering, papper eller PEX
- ström, växel- eller likström
- ledare, aluminium eller koppar

De flesta kablar är uppbyggda på samma sätt, ledare, inre ledande skikt, isolering, yttre ledande skikt men skiljer sig gällande skärm⁹, blymantel¹⁰, armering¹¹ och yttermantel¹².

⁵ PEX-kabeln har en isolering av tvärbunden polyeten

⁶ Växelström

⁷ Likström

⁸ High Voltage Direct Current, högspänd likström

⁹ Skärmen fungerar som störningsavskärmare och ledare för noll- och felströmmar. Skärmen omsluter isolering och ledare och består av metall t.ex. runda koppartrådar.

1.3.1.1 Massakabel

Massakabeln är isolerad av vakuumtorkat papper som impregneras med en trögflyttande olja som kallas för massa, som har gett dess namn.

Massakabeln används som sjökabel för att transportera likström längre sträckor, HVDC. Fördel med likström är att överföringsförlusterna är små vid längre transmissionssträckor. Men för att det skall vara lönsamt att överföra likström krävs det att avståndet är tillräckligt stort p.g.a. dyra omvandlingsutrustningar från växel- till likström och vice versa.

Ett av de senaste HVDC projektet är SwePol¹³ år 2000, en 450 kV kabel med en längd på 260 km.

1.3.1.2 Oljekabel

Oljekabeln är som massakabeln isolerad med vakuumtorkat papper men istället för impregnering med trögflyttande olja används en tunn olja. Oljekablar tillverkas i alla varianter, sjökabel, landkabel, AC och DC.

1.3.1.3 PEX-kabel

PEX-kablar består av tre skikt, inre ledande skikt, PEX-isolering och yttre ledande skikt, som samtidigt läggs på ledaren. PEX-isoleringen är en polyetenplast som tvärbinds. PEX-kablar tillverkas i alla varianter, sjökabel, landkabel, AC och DC.

1.3.2 Ledare

En ledares uppgift är att transportera elektrisk ström. När elektrisk ström förflyttas genom ledarens material sker det en värmeutveckling. Värmeutvecklingen är beroende av materialets ledningsförmåga och strömstyrkan. Ledare är oftast av aluminium eller koppar eftersom dessa metaller har en god ledningsförmåga. Genom att bygga upp ledare med att tvätta trådar ökas ledarens böjlighet.

¹⁰ Skydda isolering och ledare från yttre påfrestningar så som vatten, behålla oljan i oljekabel och i vissa fall fungerar som skärm.

¹¹ Genom armering förbättras kablens mekaniska egenskaper så som fysisk påkänning och inre tryck.

¹² Mantling ger ett mekaniskt och elektriskt skydd och är vanligen av polyeten eller polyvinylklorid.

¹³ Kabel förbindelse mellan Sverige och Polen

De olika ledartyper som finns är.

- Solidledare
- Profiltrådsledare
- Komprimerad ledare
- Okomprimerad ledare
- Sektorledare
- Segmentledare

Segmentledare används för stora växelströmmar, genom segmenteringen minskas skin-effekten¹⁴.

1.3.3 Ledartillverkning, KA¹⁵

För att tillverka ledare finns det olika typer av kablingsmaskiner, hopvridare, tubulära snabbkablare och korgmaskiner. Uppbyggnaden av ledaren görs på ungefär samma sätt i de olika maskinerna.

HVC har två kablingsmaskiner för att tillverka ledare, KA20 och KA22, som är av typen korgmaskiner.

Kablingsmaskinerna består av roterande korgar och maskinerna har plats för ett max antal trådar, KA22 54 stycken och KA20 120 stycken. Trådarna är upprullade på spolar och varje korg har plats för ett antal spolar enligt Tabell 1.

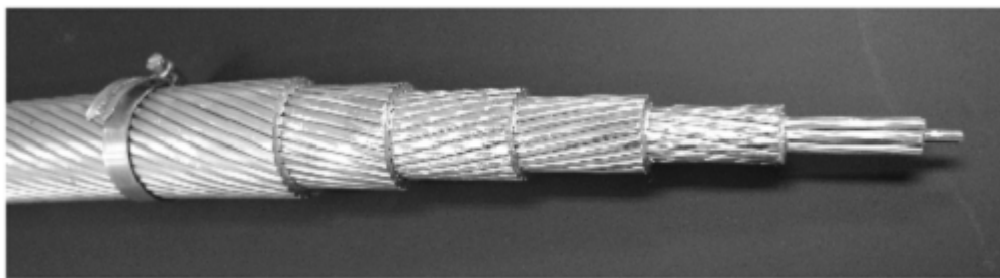
	Korg 1	Korg 2	Korg 3	Korg 4	Korg 5
KA22	12	18	24	-----	-----
KA20	12	18	24	30	36

Tabell 1: Antal spolar i varje korg för KA22 och KA20

Antal korgar som används beror på hur stor tvärsnittsarean ska bli på ledaren. Linjen börjar med att 7-8 parallella trådar kallade aktertrådar körs genom centrumröret, korg 1 roterar runt och lägger till ytterligare trådar, korg 2 roterar runt och lägger till ytterligare trådar osv., tills rätt diameter av ledaren har uppfyllts. Figur 3 visar hur ledaren är uppbyggd.

¹⁴ Strömmen rör sig i ledarens yta

¹⁵ KA står för kabling



Figur 3: Figuren visar en komprimerad ledare där man har skärt bort lager efter lager till centrumtråden.

Vid kabligen roterar korgarna som drivs av en huvudaxel, se Figur 4. Korgarnas rotationshastighet styrs av en växellåda som är ansluten via huvudaxeln. Efter varje korg sitter ett komprimeringsvalsverk som komprimerar ledaren.

Vid komprimering av ledaren används antingen komprimeringsvalsar eller komprimeringsskiva. För runda ledare med liten tvärsnittsarea används komprimeringsskiva och för alla ledare med grövre tvärsnittsarea används komprimeringsvalsar. Komprimeringsvalsar används också för alla sektorformade ledare.



Figur 4: Bild på korgar som används vid kabligen.

Komprimeringsvalsarna är uppbyggda med ingångsvalsar, sidovalsar och utgångsvalsar. Valsarna har antingen sektorformade eller runda spår beroende av vilken typ av ledare som skall tillverkas. Ledaren dras genom valsarna med hjälp av ett stort hjul kallat capstan. Capstan drivs av linjens huvudaxel.

1.4 Bakgrund

Vid tillverkning av ledare för kabeltillverkning ska en del konstruktionskrav uppfyllas innan ledaren godkänns. Ett viktigt konstruktionskrav är ledarens resistans. Idag används två metoder för mätningar av resistansen i ledare, ”stora mätbryggan” och ”lilla mätbryggan”. ”Stora mätbryggan” är stationär och ansluter en konstant likström, mätbryggan utför en 4-punktsmätning med

mätinstrumentet MR 300 C Figur 12. "Lilla mätbryggan" är mobil och inducerar lågfrekvent växelström.

1.5 Problem

Resistansmätning på stora aluminiumledare som tillverkas i KA20 ger vid flera mätningar på samma ledare ett varierat mätresultat, trots att inga nya ändringar gjorts i processen. Detta gör det svårt för operatörerna att veta när resistanskravet är uppfyllt.

2 Förstudie/Definition/Systembeskrivning

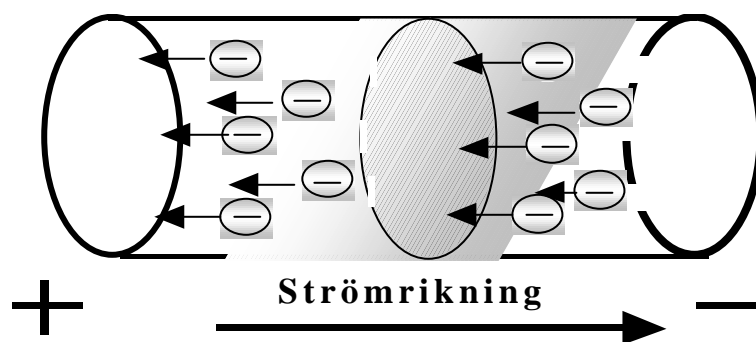
2.1 Ellära

Då ellära är ett omfattande område kommer endast de begrepp tas upp som har med detta arbete att göra.

2.1.1 Elektrisk ström och spänning

Elektroner är elektriskt negativt laddade, när de fria elektronerna rör sig i en och samma riktning i en ledare uppstår elektrisk ström. För att de fria elektronerna ska förflyttas behövs en spänningskälla.

Spänningskällan har en positiv och en negativ pol. Den positiva polen har ett underskott av fria elektroner och den negativa polen har ett överskott av elektroner.



Figur 5: Här visas hur de fria elektronerna rör sig i en och samma riktning i en ledare. Strömriktningen beror på den gamla teorin om att strömmen riktning var från den positiva polen till den negativa polen.

Strömmens storlek är ett mått på hur många fria elektroner, elektriska laddningar som passerar genom ett tvärsnitt av ledaren per sekund.

Elektrisk ström:

Formel 1: $i = \frac{dq}{dt}$

i ström [A]

dq laddning [C]

dt tid [s]

Strömmen kan förändras med tiden, därför benämns strömmen med liten bokstav. Genom att integrerar strömmen med avseende av tiden ges den elektriska laddningen:

Formel 2: $q = \int i(t) dt$ [C, As]

2.1.1.1 Likström

För likström i en ledare förflyttar sig strömmen i en och samma riktning. För att bestämma likströmmen i ledaren kan man dividera spänningen över ledaren med resistansen i ledaren och få fram strömmen som passerar genom ledaren, enligt ohms lag se Formel 3:

Formel 3: $I = \frac{U}{R}$

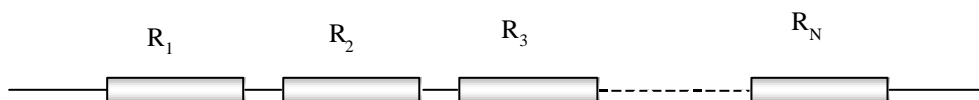
I likström [A]

U likspänning [V]

R resistans [ohm]

2.1.1.1.1 Serieresistans

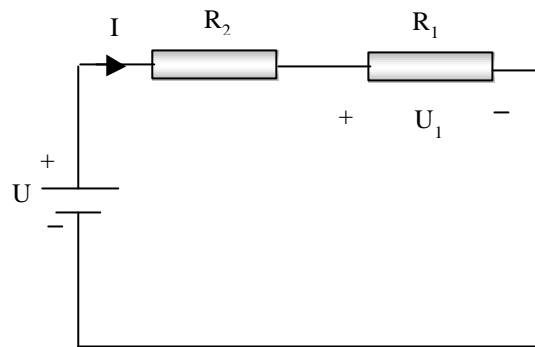
Serieresistanskoppling är när flera resistorer kopplas ihop, se Figur 6. Genom att addera ihop alla resistorer vid serieresistanskoppling kan dessa ersättas med en resistor, se Formel 4.



Figur 6: Figuren visar en serieresistanskoppling med N resistorer.

Formel 4: $R_{TOT} = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n$

När man kopplar ihop flera resistorer efter varandra och ansluter en spänningskälla skapas en ström genom kretsen, strömmens storlek är lika stor genom kretsen. Som i Figur 7 flyter samma ström genom varje resistor och ger oss möjlighet att använda spänningsdelning, enligt formel



Figur 7: Kretskoppling med tvåseriekopplade resistorer R_1 och R_2 . U är spänningen över kretsen och I är strömmen genom kretsen. U_1 är spänningen över resistorn R_1 .

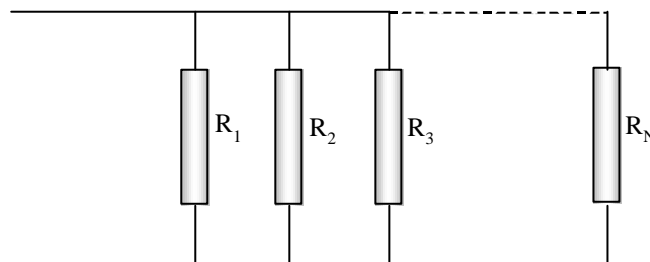
Formel 5:
$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Spänningsdelning för N stycken seriekopplade resistorer, enligt Formel 6.

Formel 6:
$$U_k = U \frac{R_k}{\sum_{n=1}^N R_n}$$

2.1.1.1.2 Parallellresistans

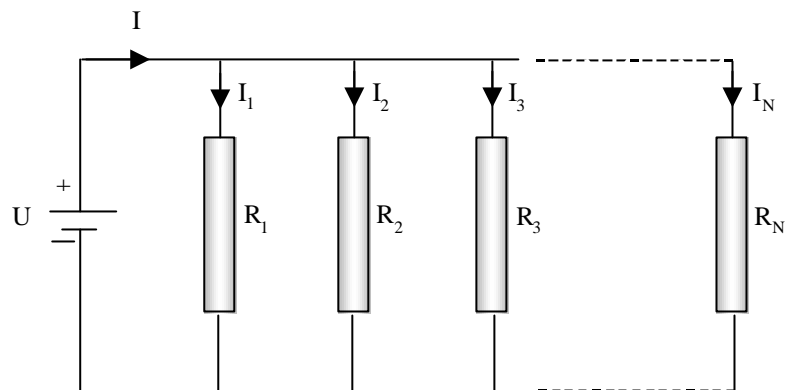
Parallellkopplade resistorer ger följande utseende som Figur 8, dessa resistorer kan ersättas med en resistor enligt Formel 7.



Figur 8: Figuren visar en parallellresistanskoppling med N resistorer.

Formel 7:
$$\frac{I}{R_{TOT}} = \sum_{n=1}^N \frac{I}{R_n}$$

När man kopplar samman flera parallellkopplade resistorer med varandra och ansluter kretsen till en spänningskälla skapas en ström som delar upp sig i varje resistor se Figur 9.



Figur 9: Figuren visar en parallellkopplad resistor krets med N st. resistorer. U är spänningen för kretsen och I är den totala strömmen genom kretsen.

Storleken av strömmen som går igenom en viss resistor kan beräknas med hjälp av Formel 8.

Formel 8:

$$I_k = \frac{I}{R_k \sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n}}$$

2.1.2 Ledarresistans

Metaller tillhör gruppen ledare och har många fria elektroner som leder elektrisk ström. Ska elektrisk energi överföras längre sträckor används företrädesvis två metaller koppar och aluminium, dessa metaller har låg resistivitet. Material, tvärsnittsarea, temperatur och längd har stor betydelse för en ledares resistans [1].

Tvärsnittsarean kan bestämmas genom materialets densitet, längd och massa enligt Formel 9:

Formel 9:

$$A = \frac{m \cdot d}{l}$$

A tvärsnittsarean [m^2]
 m massan [kg]
 d densiteten [kg/m^3]
 l längden [m]

Densiteten för aluminium visas i Tabell 2.

Material	Densitet (d) [kg/m^3] vid 20 °C
Aluminium	2705

Tabell 2: Densiteten för aluminium vid 20 °C [6].

En ledares resistans beskrivs med Formel 10:

Formel 10: $R = r(L/A)$

- R ledarens resistans [ohm]
- r materialets resistivitet [$\Omega\text{m}^2/\text{m}$]
- L ledarens längd [m]
- A ledarens tvärsnittarea [m^2]

Resistiviteten för koppar och aluminium vid 20 °C visas i Tabell 3.

Material	Resistivitet (?) [ohm m] vid 20 °C
Koppar	$1,7241 \cdot 10^{-8}$
Aluminium	$2,8264 \cdot 10^{-8}$

Tabell 3: Resistiviteten för koppar och aluminium vid 20°C [5].

Eftersom resistiviteten i metaller är temperaturberoende så kommer ledarens resistans att förändras enligt Formel 11:

Formel 11: $R_T = R_{T_{ref}} (1 + a(T - T_{ref}))$

- R_T resistansen vid temperaturen T
- $R_{T_{ref}}$ resistansen vid referenstemperaturen
- a temperaturkoefficienten
- T ledarens temperatur
- T_{ref} referenstemperaturen

Temperaturkoefficienten brukar avrundas till $0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ för rena metaller. En mer exakt temperaturkoefficient för aluminium och koppar enligt Tabell 4.

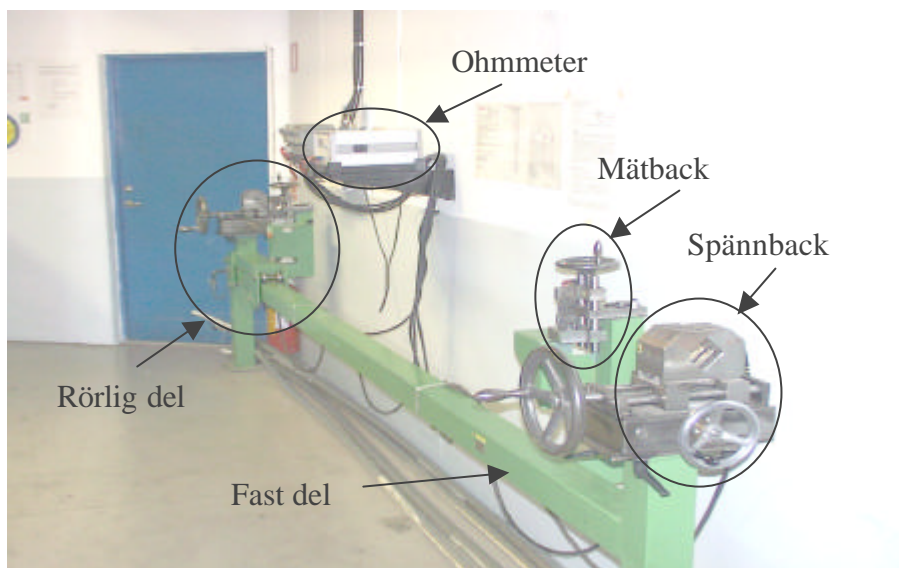
Material	Temperaturkoefficient (a) [$^\circ\text{C}^{-1}$]
Koppar	0,00393
Aluminium	0,00403

Tabell 4: Temperaturkoefficienter för koppar och aluminium [4].

För varje grad Celsius som ledartemperaturen ökar, ökar ledarens resistans med 0,393 % för koppar och 0,403 % för aluminium.

2.2 Stora mätbryggan

Mätbryggan har en fast del och en rörlig del, varje del på mätbryggan har en spännback och en mätback. Den rörliga delen gör det möjligt att ändra avståndet i tre lägen, 1, 2 och 3 meter mellan mätbackarna. Figur 10 visar hur mätbryggan ser ut.



Figur 10: Bilden visar den stationära mätbryggan. Den borte delen av mätbryggan är rörlig och kan ställas in tre lägen, 1, 2 och 3 meter mellan mätbackarna.

Spännbackarna har två funktioner, klämma ihop och sträcka upp ledaren. Mätbackarna skruvas ihop så att kontakt ges mellan ledare och mätbackar. Spännbackar och mätbackar ansluts till mätinstrumentet MR 300 C se avsnitt 2.2.2. MR 300 C mätresultat ger ledarens resistans vid den temperaturen som instrumentet är inställt på och för det avstånd som är mellan mätbackarna, så därför krävs det att man mäter temperaturen och avståndet mellan mätbackarna. Beräkning av ledarens resistans per kilometer görs enligt Formel 12:

$$\text{Formel 12: } R_{20} = R_{MR} \cdot k_t \cdot \frac{1000}{l_{A-B}}$$

R_{20} ledarresistansen vid 20 °C [Ω /km]

R_{MR} mätresultatet ledar resistans [Ω]

L_{A-B} längden mellan mätbackarna [m]

k_t temperaturens korrektionsfaktor

Korrektionsfaktorn beräknas enligt

Formel 13 för koppar och Formel 14 för aluminium [4].

Formel 13:
$$k_{t,Cu} = \frac{254,5}{234,5 + t} \approx \frac{1}{1 + 0,00393(t - 20)}$$

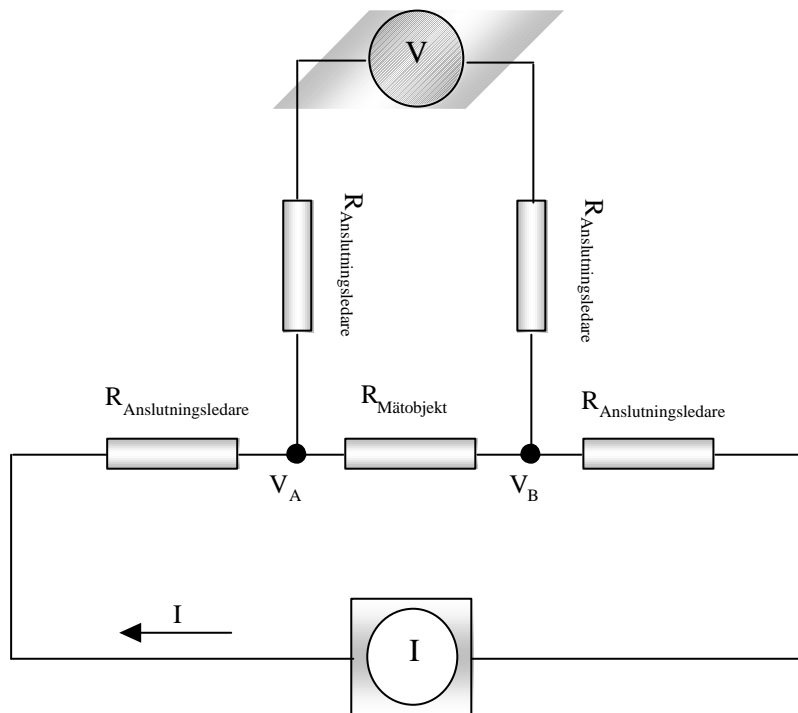
t temperaturen i ledaren då resistans mätningen görs [°C]

Formel 14:
$$k_{t,Al} = \frac{248}{228 + t} \approx \frac{1}{1 + 0,00403(t - 20)}$$

t temperaturen i ledaren då resistans mätningen görs [°C]

2.2.1 4-trådskoppling

För att bestämma ledarens resistans använder man sig av en 4-trådskoppling, se Figur 11. 4-trådskopplingen gör det möjligt att bestämma mycket små resistanser.



Figur 11: Figuren visar en 4-trådskoppling. Voltmtern (V) mäter potentialskillnaden mellan V_A och V_B. Strömkällan ger en konstant ström (I) som leds genom kretsen, eftersom voltmtern är höghögig kommer strömmen att förflyttas genom R_{Mätobjekt}.

Principen är den att man kopplar en konstant strömförande del i ändarna på mätobjektet (ledaren) och ytterligare två anslutningar på mätobjektet, de sistnämnda anslutningarna kopplas till en voltmeter som mäter spänningsfallet. Genom att använda ohms lag kan resistansen bestämmas på mätobjektet. Eftersom voltmtern är mycket höghögig så kommer ingen ström att flyta genom voltmterns spänningsledning, spänningsledningarnas resistans kan därmed försummas.

2.2.2 Schuetz Messtechnik mikroohmmeter MR 300 C

En digital mikroohmmeter som ger hög precision och klarar mätning av mycket låg resistans, 10 nohm i det lägsta mätområdet. 9 olika mätområden kan väljas mellan 100 μ ohm till 10 kohm. Instrumentet har en konstant strömkälla upp till 10 A, beroende på mätområde. Den använder sig av 4-trådskoppling för mätning av resistansen [7].

Instrumentets mätnoggrannhet beror på vilket mätområde som används se Tabell 5.

Mätområde	Mätnoggrannhet
100 μ ohm	0,03 % \pm 3 siffror
1 mohm - 10 kohm	0,02 % \pm 2 siffror

Tabell 5: Instrumentets mätnoggrannhet för olika mätområden [7]. Mätnoggrannheten anges som en procentsiffra plus ett antal siffrors avvikelse på den sista siffran i det uppmätta värdet.



Figur 12: Bild på Schuetz mikroohmmeter som används i den stationära mätbryggan.

2.2.3 Kontaktanslutning i ändarna på ledaren

För att strömmen skall fördela sig så bra som möjligt i ledaren som består av många trådar, måste en elektrisk förbindelse skapas mellan trådarna i ledaren. Det finns flera alternativ för att skapa en god elektrisk förbindelse. Termiska metoder såsom svetsning och lödning eller mekaniska metoder såsom kontaktpressning, skruvklämning, virning slitskontaktering m.fl.

2.2.3.1 Kontaktpressning

Vid kontaktpressning pressas en hylsa runt ledaren, som ger goda elektriska och mekaniska egenskaper. För att uppnå så god elektriskförbindelse som möjligt med kontaktpressning ställs det en del krav på pressverktyget och hylsan. De

väljs så att de passar ledarens diameter för att pressa ihop hylsa och ledare tillräckligt.

Fördela med att använda kontaktpressning är snabbhet, tillförlitlighet, enkelhet, ingen värme och inga kemikalier mm.

3 Problem och möjlig lösning

3.1 Fördela strömmen jämnt i ledaren

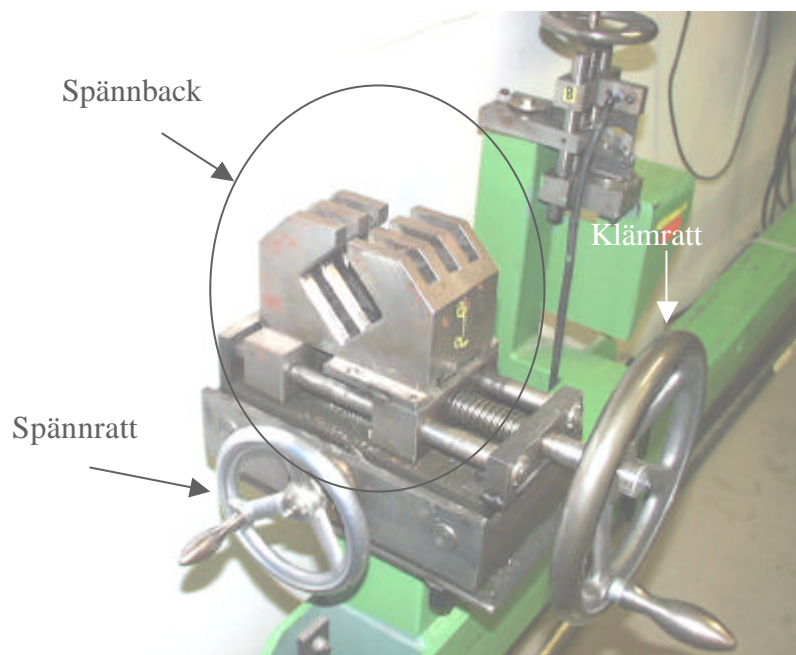
Mätning av större aluminiumledares resistans i den ”stora mätbryggan” misstänks avvika och inte ge ett bra resultat. De undersökningar som gjorts på ett och samma provobjekt i ”stora mätbryggan” ser ut att bekräfta dessa misstankar. Tommy Johansson och Ola Hansson genomförde den 16 februari 2004 en rad mätningar på en 2000 mm² aluminiumledare, detta resultat visar att strömmen inte fördelas jämnt i ledaren [2]. Genom att strömmen inte fördelas jämnt kommer mätresultaten variera med avståndet mellan spänningsmätningens kontakter.

Amer Omanovic utförde mätningar av ledarresistansen på en 800 mm² aluminiumledare under 2004 vecka 29-31 med hypotes att strömmen inte fördelats jämnt. Amers mätningar visade att genom att svetsa ändarna på aluminiumledaren resulterade detta till en bra strömfördelning genom ledarens tvärsnitt [3].

3.1.1 Mätbryggans befintliga spännbackar

Spännbackarna som idag används i mätbryggan har tre funktioner, strömanslutning, klämma ihop och spänna upp ledaren i mätbryggan. I Figur 13 visas mätbryggans ena spännback, klämringen används för att pressa ihop varje tråd i ledaren och spännbacken för att sträcka upp ledaren.

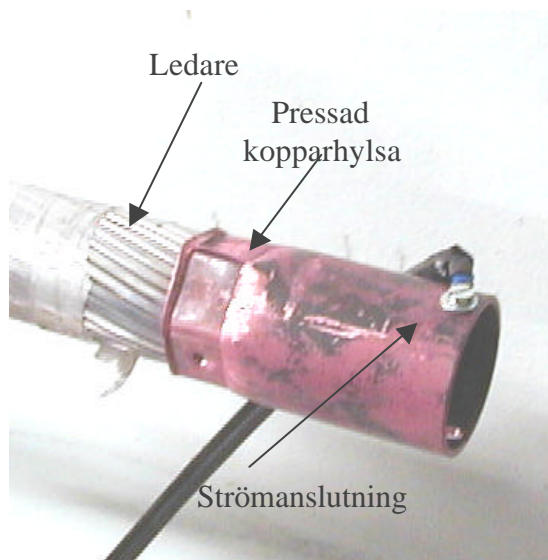
Klämratten ger inte tillräckligt med kraft för att pressa ihop grövre aluminiumledare så att en jämn strömfördelning sker i ledaren.



Figur 13: Bilden visar mätbryggans spännback där strömmen ansluts.

3.1.2 Pressa kopparhylsa i ändarna på ledaren

En möjlig metod för att fördela strömmen jämt i ledaren är att pressa en hylsa i varje ände på ledaren och ansluta strömmen där, se Figur 14. När ledaren pressas ihop så pass mycket att varje ledningstråd är förbunden i en och samma punkt så bör strömmen fördelas jämt i ledaren.



Figur 14: Figuren visar en pressad hylsa runt änden på ledaren där strömmen ansluts.

Detta medför att det inte spela någon roll i vilka punkter spänningsfallet mäts, viktigt är dock avståndet mellan mätpunkterna och temperaturen på ledaren.

4 Praktiska mätningar

Mina teoretiska tankar skall bevitnas genom praktiska mätningar. Genom att mekaniskt pressa en hylsa runt ledaren skall varje lager, varje tråd förbindas i en och samma punkt. Lyckas detta ska en jämn strömfördelning ske. Tanken med att göra dessa praktiska mätningar är att ge en bild hur det är möjligt att fördela strömmen genom att mekaniskt pressa en hylsa. Mätningarna skall genomföras i en liknande serie som *Amer:s* mätningar [3].

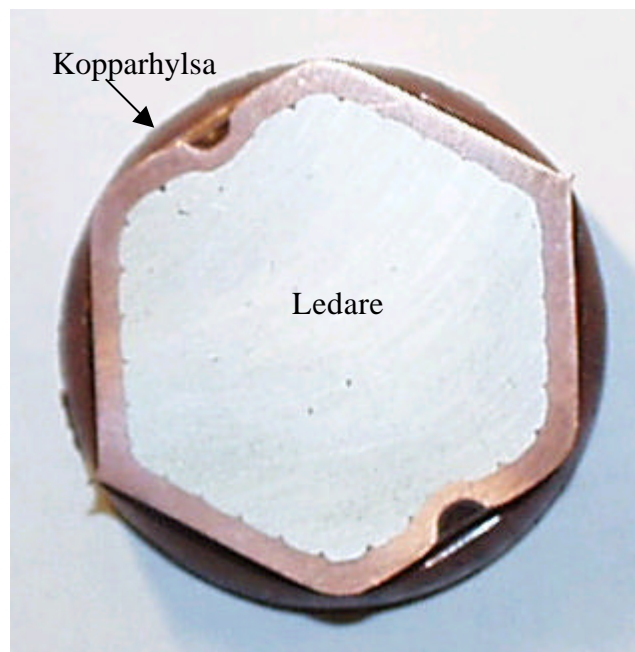
4.1 Mekanisk pressning

Genom att pressa en koppar hylsa runt aluminiumledarens ände ska förhoppningsvis alla trådarna förbindas med varandra i en gemensam punkt. Som verktyg har ett hydrauliskt presssystem använts som har möjligheten att kombineras med olika storlekar på presshuvud. För varje presshuvud kan olika pressbackar väljas efter ytterdiametern på kopparhylsan. Pressbackarn är utformad med tre sidor, så när pressbackarna är ihop klämda bildas en hexagon. Verktuget använd för att skarvar ledare.

Två tester har utförts på två olika aluminiumledare med olika diameter.

4.1.1 Test 1

Aluminiumledarens diameter är 47,6 mm och koppar hylsan som valdes hade en innerdiameter på 49 mm och ytterdiameter på 55 mm. Koppar hylsan pressades ihop med pressbackar nr 56.



Figur 15: Figuren visar den pressade aluminiumledarens tvärsnitt i test 1.

4.1.2 Test 2

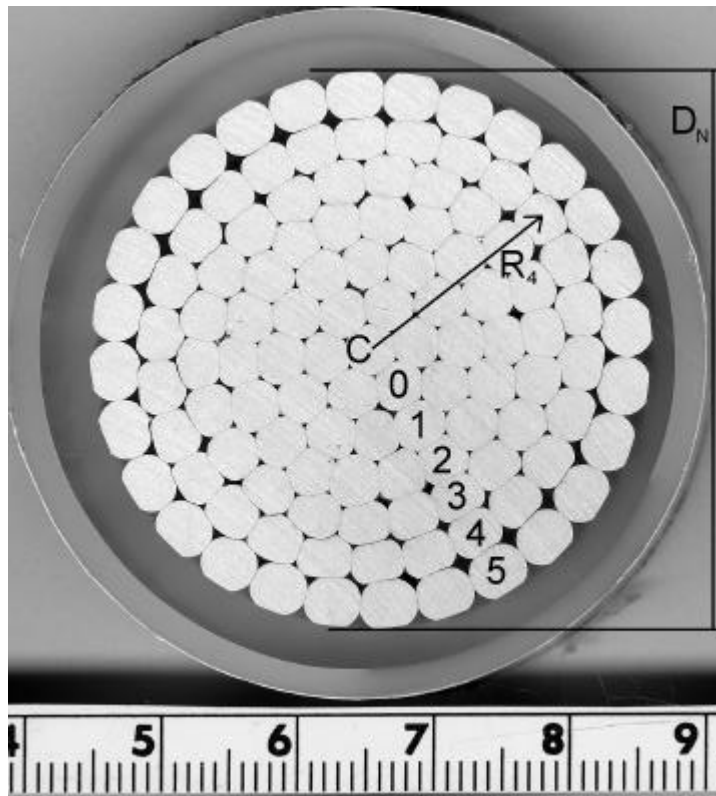
Aluminiumledarens diameter är 40,6 mm och koppar hylsan som valdes hade en innerdiameter på 42 mm och yttre diameter på 49 mm. Koppar hylsan pressades ihop med pressbackar nr 53.



Figur 16: Figuren visar den pressade aluminiumledarens tvärsnitt i test 2.

4.1.3 Resultat

Varje mätning av diametern har gjorts med ett skjutmått. Tvärsnitt i objektets pressade del visar att varje tråd ser ut att vara i kontakt med varandra. Testen på de två olika dimensioner gav ett visuellt bra resultat, se Figur 15 och Figur 16 och jämför med den komprimerade ledaren i Figur 17.



Figur 17: Figuren visar ett tvärsnitt på en komprimerad ledare.

4.2 Resistansmätning av aluminiumledare

Provobjekten består av aluminiumledare med olika dimensioner, 1600 mm^2 , 1000 mm^2 och 1200 mm^2 . Ledarna är tillverkade i KA20 och har en längd på ungefär 5 meter. För bestämning av aluminiumledarens resistans skall två olika mätmetoder användas, 4-punktsmätning med stationär mätbrygga och genom att uppskatta tvärsnittsarean.

4.2.1 Mätningar med stationär brygga

För mätningar i den stationära mätbryggan ska provobjekt genomgå ett antal tester i flera olika steg. För varje test ska flera mätningar göras på provobjektet. Principen är den samma för alla testerna, det som skiljer dem åt är hur strömmen ansluts till provobjektet. För varje test kommer mätbackarna, som mäter spänningsfallet, att flyttas längs provobjektet. Vid varje mätning noteras resistansen, temperaturen och avståndet mellan mätbackarna. Temperaturen mäts på tre ställen längs provobjektet.

Mätverktyg som kommer att användas är talmeter, måttband, temperaturgivare och ohmmeter (MR 300 C). Dessa verktyg har en viss onoggrannhet tillsammans med en mänsklig onoggrannhet.

4.2.1.1 Beräkningar av mätnoggrannhet

För varje mätpunkt kommer det att beräknas ett maximum respektive minimum som visar hur stor mätnoggrannheten är i den aktuella mätpunkten.

Mätnoggrannhetens storlek beror på följande tre variabler, avstånd, mätinstrumentet och temperatur. Mätnoggrannheten beräkna för alla tre variablerna, dessa summeras ihop och ger den totala mätnoggrannheten i mätpunkten.

Mätnoggrannheten för avståndet beräknas enligt Formel 15.

$$\text{Formel 15: } Mn_a = R_{20} - \left(\frac{R_{MR} \cdot k_t}{(l_{A-B} + l_{fel})} \cdot 1000 \right)$$

Mn_a mätnoggrannheten för avståndet vid 20 °C [Ω/km]

R_{20} ledarresistansen vid 20 °C [Ω/km]

R_{MR} mätresultatet ledarresistans [Ω]

l_{A-B} längden mellan mätbackarna [m]

l_{fel} ett uppskattade mätfel mellan mätbackarna [m]

k_t temperaturens korrektionsfaktor

Ett rimligt uppskattat mätfel på avståndet mellan mätbackarna är enligt Tabell 6.

Mätområde mellan mätbackar [m]	Uppskattat mätfel (l_{fel}) [m]
0-1,000	0,005
1,001-2,000	0,010
2,001-3,000	0,015
3,001-4,000	0,020

Tabell 6: Tabellen visar det uppskattade felet för olika mätområde.

Mätnoggrannheten för mätinstrumentet beräknas enligt Formel 16.

$$\text{Formel 16: } Mn_i = \frac{(R_{fel} \cdot k_t)}{l_{A-B}} \cdot 1000$$

Mn_i mätnoggrannheten för mätinstrumentet vid 20 °C [Ω/km]

R_{fel} mätinstrumentets mätfel av ledar resistans [Ω]

l_{A-B} längden mellan mätbackarna [m]

k_t temperaturens korrektionsfaktor

Mätinstrumentets mätfel beräknas enligt

$$\text{Formel 17: } R_{fel} = (R_{MR} \cdot Fel_{\%}) + Fel_{av}$$

R_{fel}	mätinstrumentets mätfel av ledar resistans [Ω]
R_{MR}	mätresultatets ledar resistans [Ω]
$Fel_{\%}$	det procentuella mätfelet
Fel_{av}	avvikelse i antal siffror

Instrumentets mätnoggrannhets procentuella samt antal siffrors avvikelse visas i Tabell 5.

Mätnoggrannheten för temperaturen beräknas enligt Formel 18.

Formel 18:
$$Mn_t = \frac{R_{MR} \cdot k_{t,fel}}{l_{A-B}} \cdot 1000 - R_{20}$$

Mn_t	mätnoggrannheten för temperaturen vid 20 °C [Ω/km]
R_{20}	ledarresistansen vid 20 °C [Ω/km]
R_{MR}	mätresultatet ledarresistans [Ω]
L_{A-B}	längden mellan mätbackarna [m]
$k_{t,fel}$	temperaturens fel korrektionsfaktor

Fel korrektionsfaktorn beräknas enligt

Formel 19:
$$k_{t,fel} = \frac{1}{1 + 0,00403((t - t_{fel}) - 20)}$$

$k_{t,fel}$	temperaturens fel korrektionsfaktor
t	temperaturen i ledaren då resistans mätningen görs [$^{\circ}\text{C}$]
t_{fel}	uppskattad fel temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Ett rimligt uppskattat temperaturfel är ungefär 0,5 °C.

4.2.2 Mätningar genom att uppskatta tvärsnittsarean

För att uppskatta tvärsnittsarean sågas en bit ut av provobjektet. För att bestämma trådarnas tvärsnitts area frigörs trådarna i respektive lager och rätas ut. Genom att väga och mäta trådarnas längd beräknas tvärsnittsareans medelvärde med hjälp av materialets densitet enligt Formel 9. Varje lagers resistans beräknas och provobjektets resistans bestäms genom att parallellkoppla varje lagers resistans.

5 Mätningar och resultat

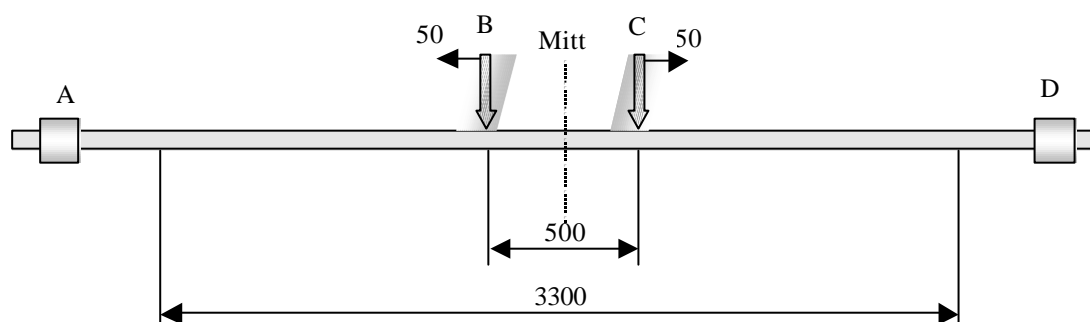
De mätningar och tester som gjorts på aluminiumledarna är presenterade i grafer som visar aluminiumledarens resistans i ohm/km i förhållande till avståndet mellan mätbackarna.

5.1.1 Mätningar och resultat av 1600 mm² aluminiumledare

För en 1600 mm² aluminiumledare är resistanskravet 0,0186 Ω/km [4] som är den ritade konstanta räta linjen i graferna nedan.

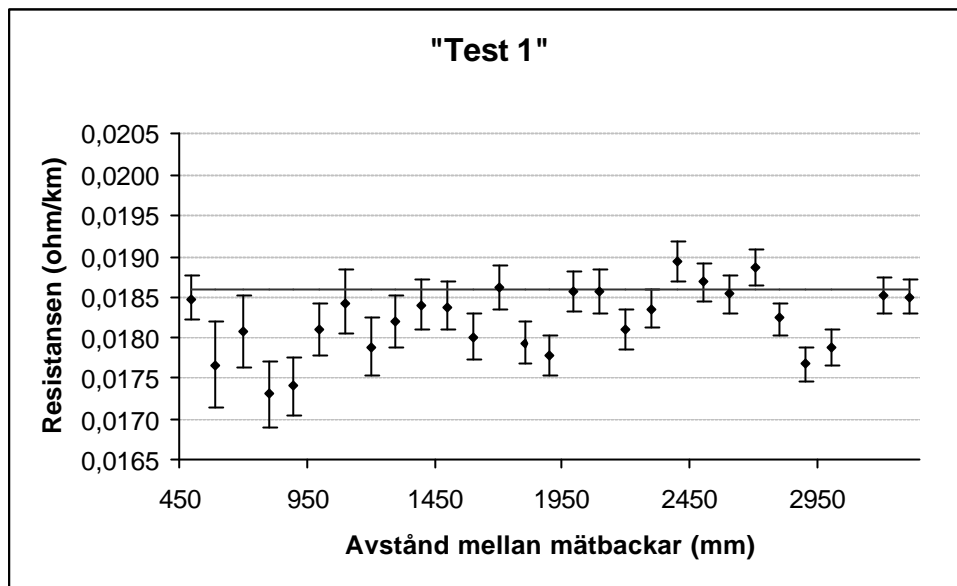
5.1.1.1 Test 1 i mätbryggan

Mätbryggan ställs i sitt yttersta läge och ledaren spänns upp mellan spännbackarna, avståndet mellan spännbackarna vid uppspänd ledare mäts till 3930 mm. Viktigt är att ledaren spänns upp så pass mycket att inte ledaren hänger i en båge. Mitten på ledaren mellan spännbackarna mäts ut och 250 mm märks upp på båda sidor. Mätbackarna skruvas bort ur sitt stationära läge och fixeras på de uppmätta punkterna runt ledaren mitt, avståndet mellan mätbackarna är ungefär 500 mm. När den uppmätta resistansen har noterats mäts avståndet mellan mätbackarna och temperaturen på ledaren. Vid nästa mätning flyttas mätbackarna 50 mm från föregående mätpunkter ut från mitten och fixeras, resistans, avstånd och temperatur noteras, osv. Mätningarna fortsätter tills avståndet mellan mätbackarna är ungefär 3300 mm. En överskådlig bild på testet visas i Figur 18.



Figur 18: Figuren visar ledaren som är uppspänd i mätbryggan. A och D är strömbackarna, B och C är mätbackarna. Efter varje mätning flyttas B och C 50 mm utåt och ny mätning görs osv. tills avståndet mellan B och C är 3300 mm.

Under mätningarna var strömmen ansluten i mätbryggans spännbackar och testets resultat visas i Figur 19.



Figur 19: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

Varje punkt i grafen visar den uppmätta resistansen i ohm/km vid ett visst avstånd mellan mätbackarna med mätvärdets noggrannhet. Resultatet visar tydligt att strömmen inte fördelas jämt i ledaren. Vid några av mättillfällena hamnar ledarens resistans i ohm/km över resistanskravet och spridningen är ungefär 8,7 % från max till min.

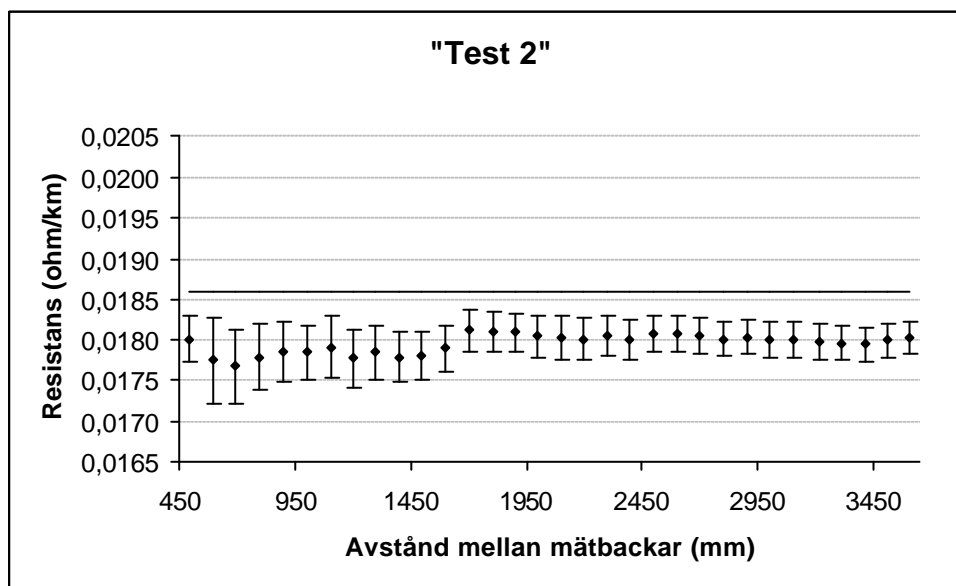
5.1.1.2 Test 2 i mätbryggan

Ledaren spänns upp med hjälp av spännbackarna och testet utförs på samma sätt som test 1 men istället för att ansluta strömmen i spännbackarna pressas en hylsa i ändarna på ledaren där strömmen ansluts, se Figur 20.



Figur 20: Figuren visar hur strömmen ansluts på hylsan som är pressade runt ledaren.

Testets resultat är presenterat i Figur 21. I grafen visas att spridningen mellan mätvärdena inte varierar lika mycket som när strömmen ansluts genom spännbackarna. Den procentuella skillnaden mellan mätpunkternas max och min är ungefär 2,5 % och intressant är att inget mätvärde är över resistanskravet. Resultatet visar att strömfördelningen genom ledaren är relativt jämn efter det att avstånd mellan mätbackarna uppnått ungefär 2000 mm. Från 2000 mm till det sista mätvärdet är den procentuella skillnaden mellan max och min 0,7 %.

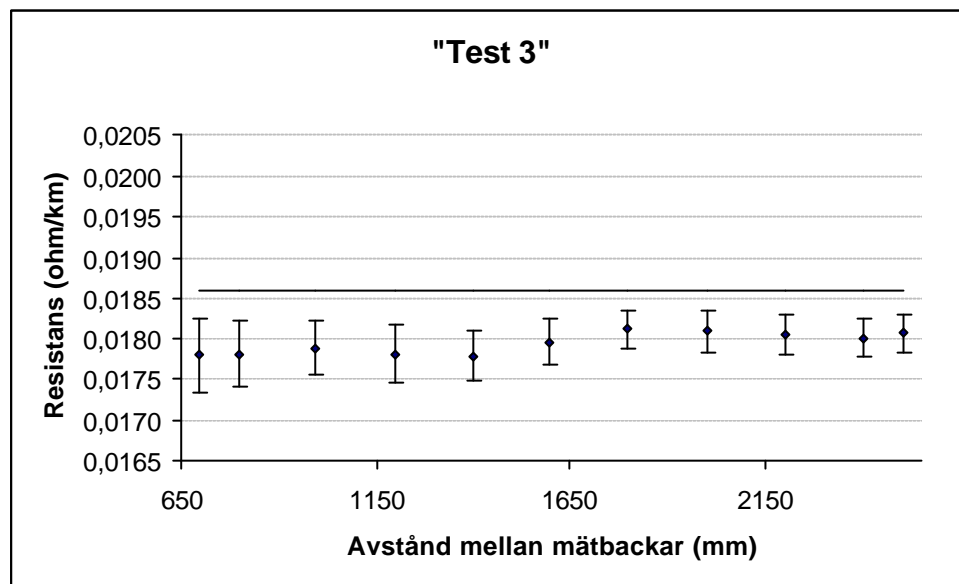


Figur 21: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.1.3 Test 3 i mätbryggan

Strömmen är ansluten via kopparhylsan som i test 2. Mätningarna genomförs som i test 1 och test 2 genom att flytta mätbackarna längs ledaren men nu flyttas mätbackarna 100 mm åt gången istället för 50 mm och med ett mindre antal mätpunkter. I detta test används enbart mätbackarnas övre del för att se om strömmen fördelas jämt i varje tråd i ledaren.

Resultat visas i Figur 22 och ger en liknande resultat som i test 2. Skillnaden mellan mätvärdenas max och min i procent är ungefär 1,8 %. Alla mätpunkter ligger under resistanskravet och resultatet visar relativt jämn strömfördelning genom aluminiumledaren.

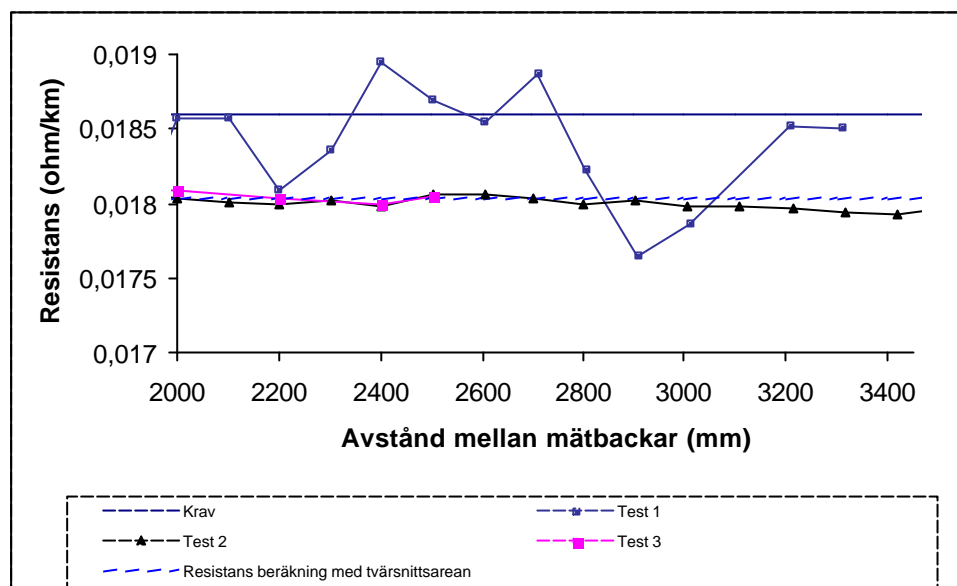


Figur 22: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1600 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.1.4 Resistansbestämning genom att uppskatta tvärsnittsarea

Efter att mätningarna med den stationära mätbryggan var klar klipptes en del aluminiumledaren av och sågades jämt i ändarna. Trådarna i varje lager frigörs och rätas ut, längd och vikt noteras för att beräkna ledarens resistans i ohm/km.

Mätningens resultat blev $0,0180 \text{ ohm/km}$ vilket är ca 3,2 % under resistanskravet. Resultatet kan ses som ett riktvärde för aluminiumledarens resistans i ohm/km. I Figur 23 visas det beräknade resultatet som en streckad rak linje tillsammans med testens resultat då avståndet är större eller lika med 2000 mm.



Figur 23: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1600 mm² aluminiumledare.

5.1.2 Mätningar och resultat av 1000 mm² aluminiumledare

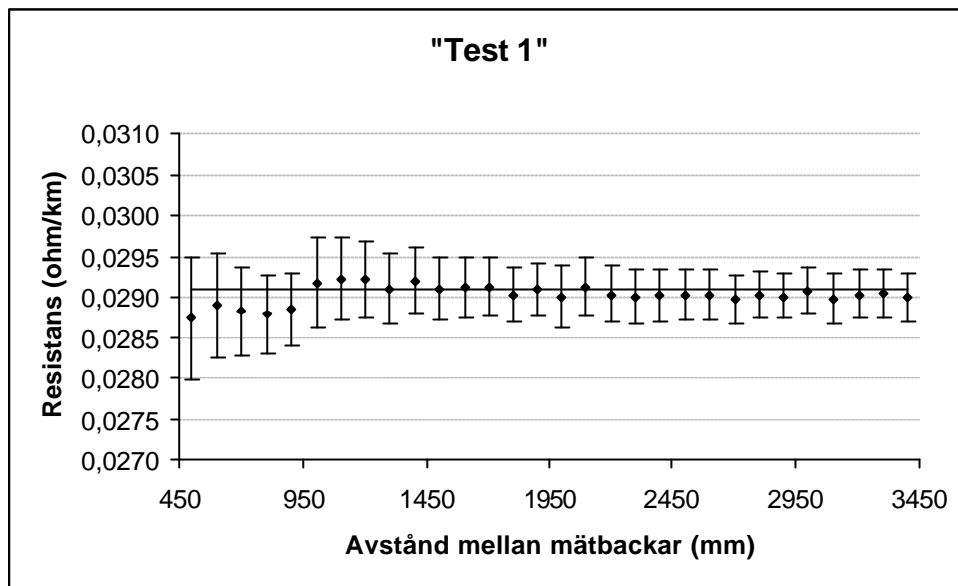
För en 1000 mm² aluminiumledare är resistanskravet 0,0291 Ω/km [4] som är den ritade konstanta räta linjen i graferna nedan.

5.1.2.1 Test 1 i mätbryggan

Mätbryggan är ställd i sitt yttersta läge och ledaren spänns upp med hjälp av mätbryggans spännbackar. Ledarens mitt markeras mellan spännbackarna och mätpunkterna markeras längs ledaren, de första mätpunkterna närmast ledarens mitt är på ett ungefärligt avstånd på 250 mm.

Efter varje mätning förflyttas varje mätback ca 50 mm ut mot spännbackarna tills avståndet mellan mätbackarna är ca 3400 mm. Strömmen ansluts och leds genom spännbackarna.

Resultat visas i Figur 24, som visar att några mätpunkter ligger utanför resistanskravet. Den procentuella skillnaden mellan max och min är 1,6 %, vilket visar att strömmen fördelar sig relativt jämt genom ledaren då strömmen ansluts via de befintliga spännbackarna. Den procentuella skillnaden mellan max och min är ca 0,5 % på de mätvärden som innefattas, då avståndet mellan mätbackarna är mer än 2000 mm och t o m 3450 mm.

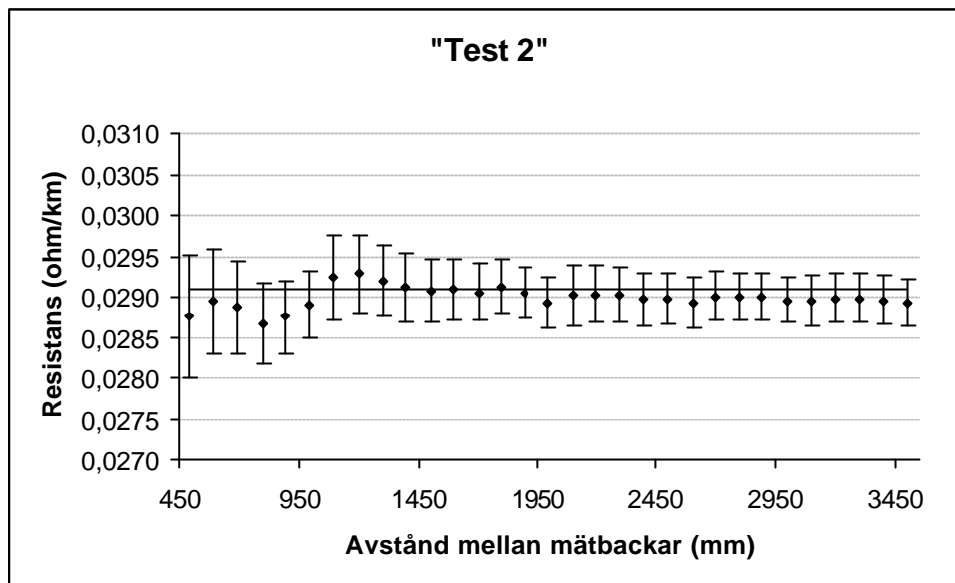


Figur 24: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.2.2 Test 2 i mätbryggan

Liknande test som ovan men strömmen ansluts via pressad kopparhylsa istället.

Resultat presenteras i Figur 25. Resultatet visar att skillnaden i mätpunkterna mellan max och min är 2,1 %. Men den procentuella skillnaden mellan max och min i mätpunkter då avståndet mellan mätbackarna är större än 2000 mm och t o m 3450 mm är 0,4 %.

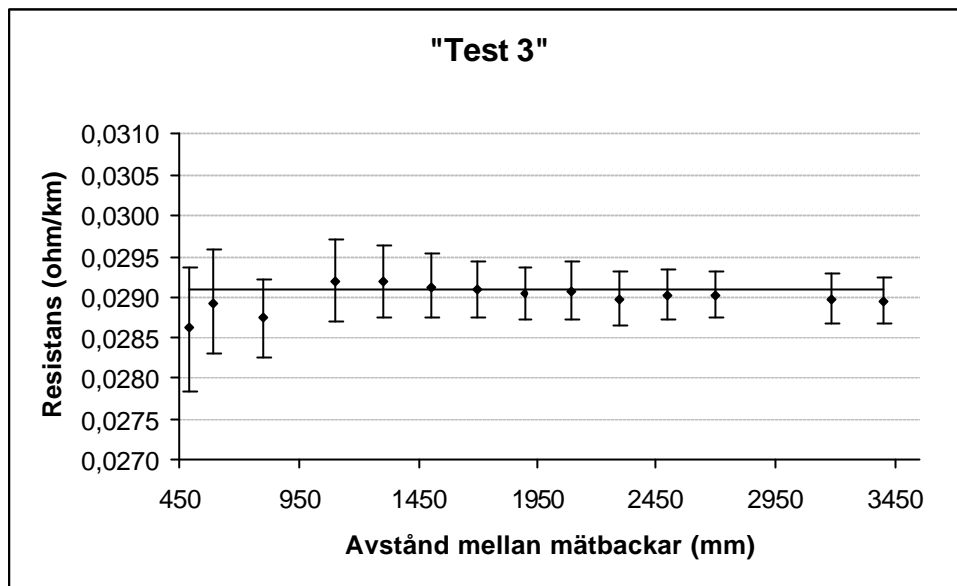


Figur 25: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.2.3 Test 3 i mätbryggan

Strömmen ansluts via de pressade kopparhylsorna och mätningarna görs på ett liknat sätt som i test 1 och test 2, men endast ovansidan av mätbackarna används och flyttas ungefär 100 mm åt gången efter varje mätning.

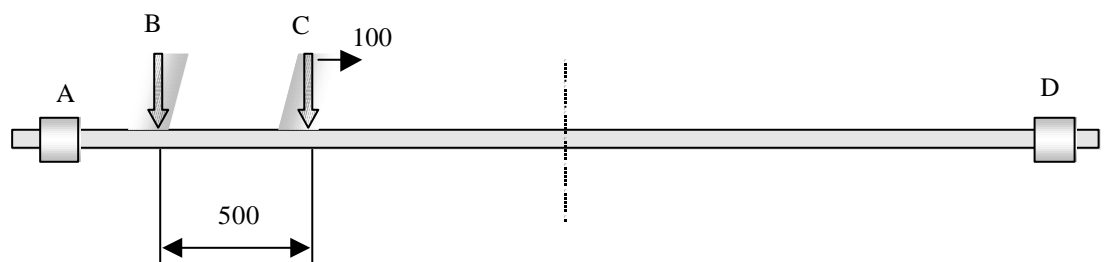
Resultat av mätningarna visas i Figur 26. Den procentuella skillnaden mellan max och min över mätpunkter i resultatet är 2 %. Om man begränsar området för mätbackarna vid ungefär 2000 mm och 3450 mm ges den procentuella skillnaden för mätpunkterna i max och min 0,5 %.



Figur 26: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

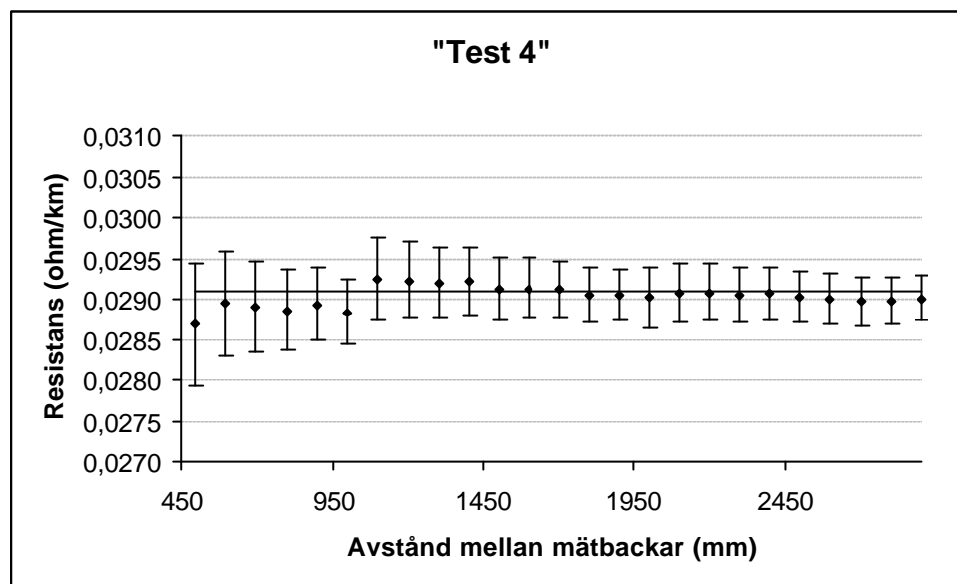
5.1.2.4 Test 4 i mätbryggan

Strömmen ansluts via de pressade kopparhylsorna och vänster mätback är stationär ungefär 270 mm från vänster spännback. Den högra mätbacken flyttas ca 100 mm efter varje mätning mot den högra spännbacken, avståndet mellan mätbackarna är ca 500 mm i den första mätningen. Figur 27 illustrera hur mätbackarna flyttas testet.



Figur 27 Figuren visar den uppspända ledaren i mätbryggan och hur mätbackarna placeras och förflyttas. Den ena mätbacken (B) är stationär och mätbacken (C) förflyttas 100 mm bortåt mot spännbacken (D).

Resultat för mätningarna presenteras i Figur 28. Mätningarna ger ett liknande resultat som i testen ovanför på aluminiumledare. Resultatet visar att strömmen fördelar sig jämt i ledaren eftersom mätbackarna inte är beroende av var dessa placeras längs ledaren för mätning av resistansen. Resultatet av de mätpunkter som har utförts gav en procentuell skillnad mellan max och min på 2 %. När man väljer de mätpunkter mellan 2000 mm till 3000 mm och bestämmer den procentuella skillnaden mellan max och min är den 0,4 %.

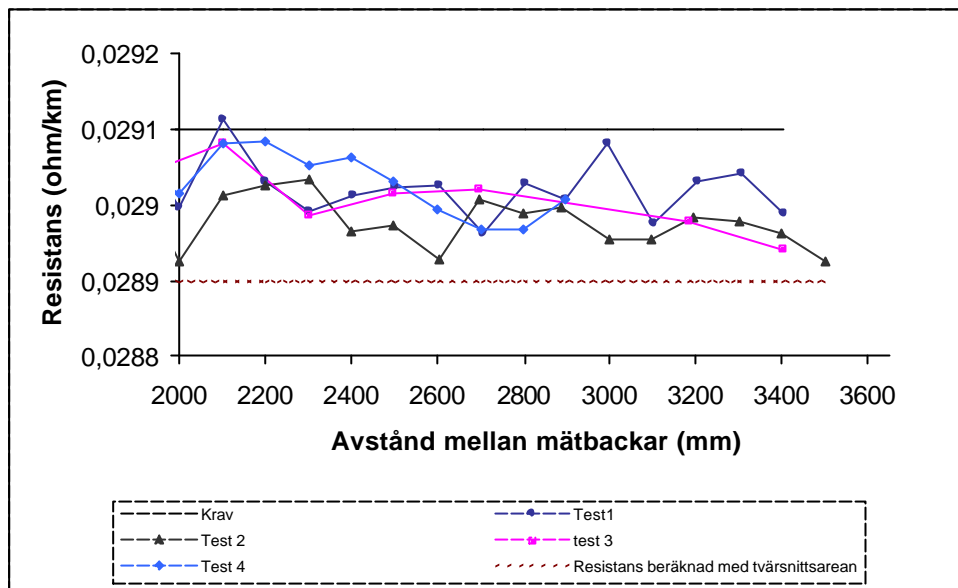


Figur 28: Resultatet av Test 4 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm^2 aluminiumledare. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.2.5 Resistansbestämning genom att uppskattar tvärsnittsarea

Efter testen i mätbryggan klipptes en bit ledaren av och sågades jämt i ändarna. På den avklippta aluminiumledaren uppskattades tvärsnittsarean och resistansen beräknades i ohm/km.

Mätningens resultat blev 0,0289 ohm/km vilket är ca 0,7 % under resistanskravet. Resultatet kan ses som ett riktvärde för aluminiumledaren resistans i ohm/km. I Figur 29 visas det beräknade resultatet som en rak streckad linje tillsammans med testens resultat då avståndet är större eller lika med 2000 mm.



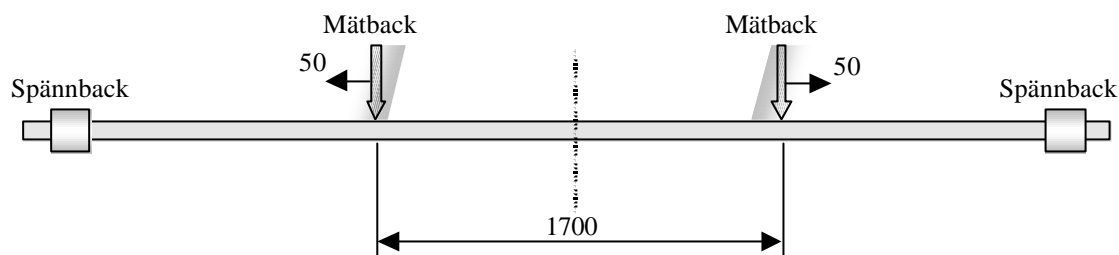
Figur 29: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1000 mm² aluminiumledare.

5.1.3 Mätningar och resultat av 1200 mm² aluminiumledare med svällpulver

För en 1200 mm² aluminiumledare är resistanskravet 0,0247 Ω/km [4] som är den ritade konstanta räta linjen i graferna nedan.

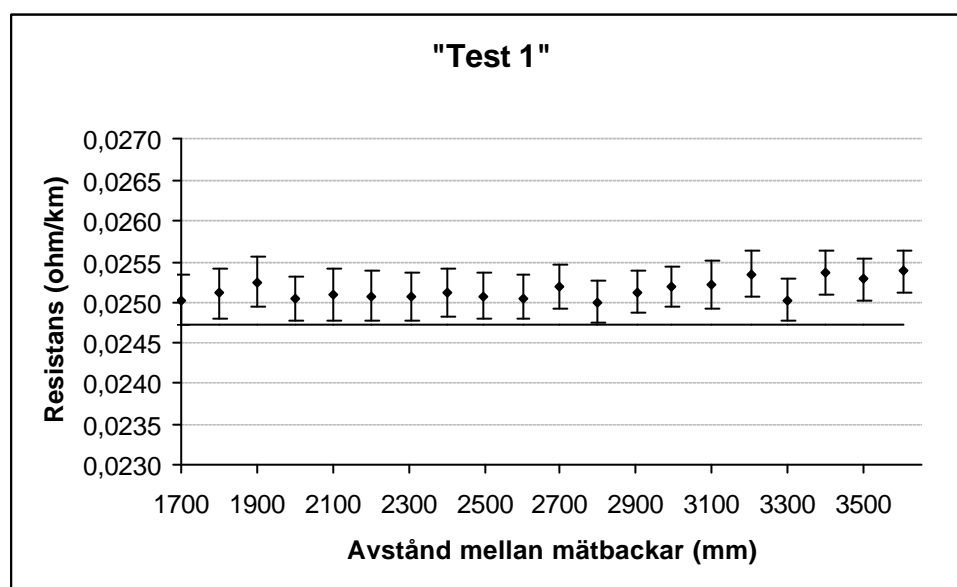
5.1.3.1 Test 1 i mätbryggan

Aluminiumledaren spänns upp i mätbryggan och strömmen ansluts via spännbackarna. Testet utförs på samma sätt som de föregående mätningarnas test 1, men nu är avståndet för första mätningen ca 1700 mm mellan mätbackarna, se figur nedan. Efter varje mätning flyttas mätbackarna ca 50 mm vardera och resistans, avstånd och temperatur noteras.



Figur 30 Figuren visar den uppspända ledaren i mätbryggan och hur mätbackarna placeras och förflyttas. Efter varje mätning flyttas mätbackarna 50 mm utåt spännbackarna.

Resultatet visas och presenteras i Figur 31. Mätningarnas resultat visar att ingen mätpunkt klarar resistanskravet och den procentuella skillnaden mellan mätpunkternas max och min är ca 1,5 %.

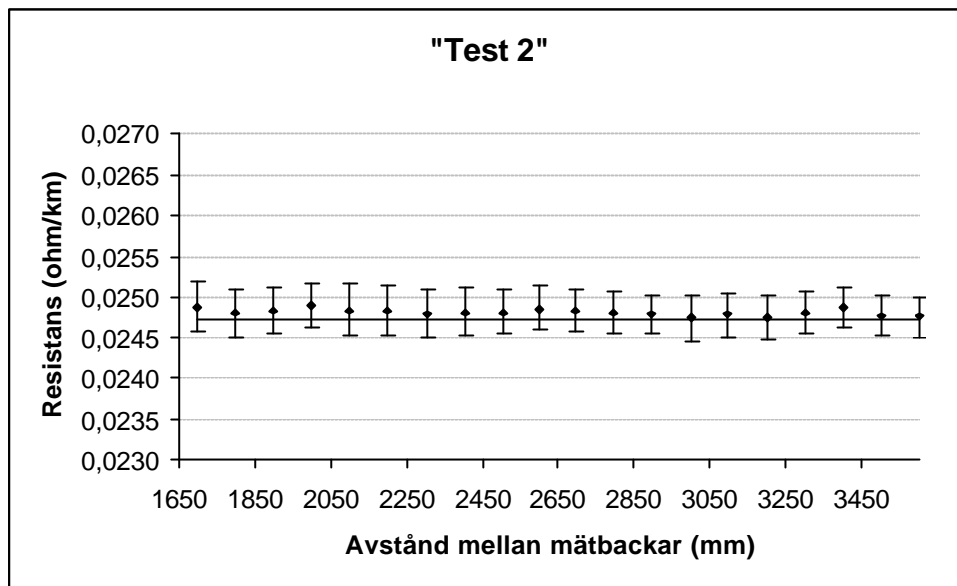


Figur 31: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm^2 aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.3.2 Test 2 i mätbryggan

Strömmen ansluts via de pressade kopparhylsorna, avståndet mellan mätbackarna är ca 1700 mm i första mätningen med mittpunkten i mätbryggans mitt, varje mätback flyttas ca 50 mm efter varje mätning tills avståndet blir ca 3600 mm mellan mätbackarna.

Resultatet visas och presenteras i Figur 32. Mätningarnas resultat visar att några mätpunkter klarar resistanskravet och den procentuella skillnaden mellan mätpunkternas max och min är ca 0,6 %.

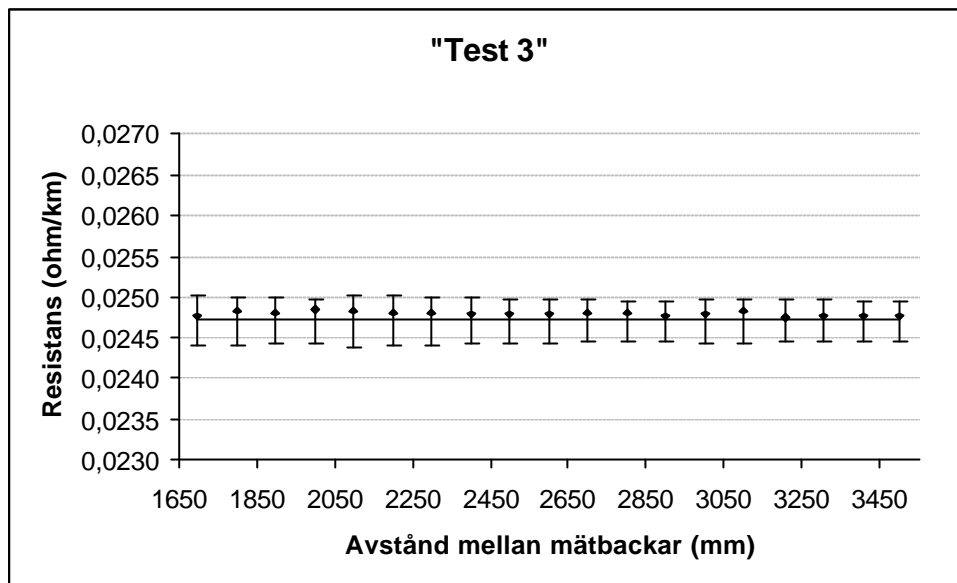


Figur 32: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm^2 aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.3.3 Test 3 i mätbryggan

Strömmen ansluts via pressade kopparhylsor, avståndet mellan mätbackarna för första mätningen är ca 1700 mm som i test 1 och test 2 ovan. Mätningarna görs så att vänster mätback är stationär och höger mätback flyttas ca 100 mm efter varje mätning tills avståndet mellan mätbackarna är ca 2600 mm. Därefter flyttas vänster mätback 100 mm åt gången och höger mätback är stationär. Mätningarna fortsätter tills avståndet är ca 3500 mm mellan mätbackarna.

Resultatet visas och presenteras i Figur 33. Mätningarnas resultat visar sig ge ett liknande resultat som i test 2, vilket visar att strömmen fördelas relativt jämt oberoende av mätbackarnas placering längs ledaren. Den procentuella skillnaden mellan mätpunkternas max och min är ca 0,5 %.

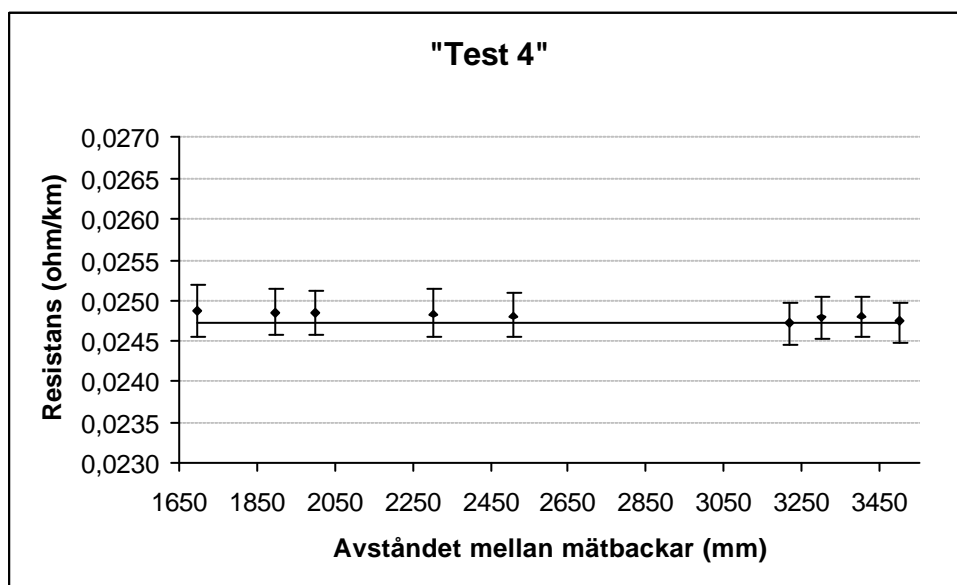


Figur 33: Resultatet av Test 3 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1200 mm^2 aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den rätta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.3.4 Test 4 i mätbryggan

För testet används endast ovansidan av mätbackarna och strömmen ansluts via kopparhylsorna. Testet utförs på samma sätt som test 1 och test 2 men med ett mindre antal testpunkter.

Resultatet av testet presenteras i Figur 34. Mätningarnas visar ett liknande resultat av test 2 och test 3. Detta visar att strömmen fördelar sig någorlunda jämt i varje tråd i ledaren.

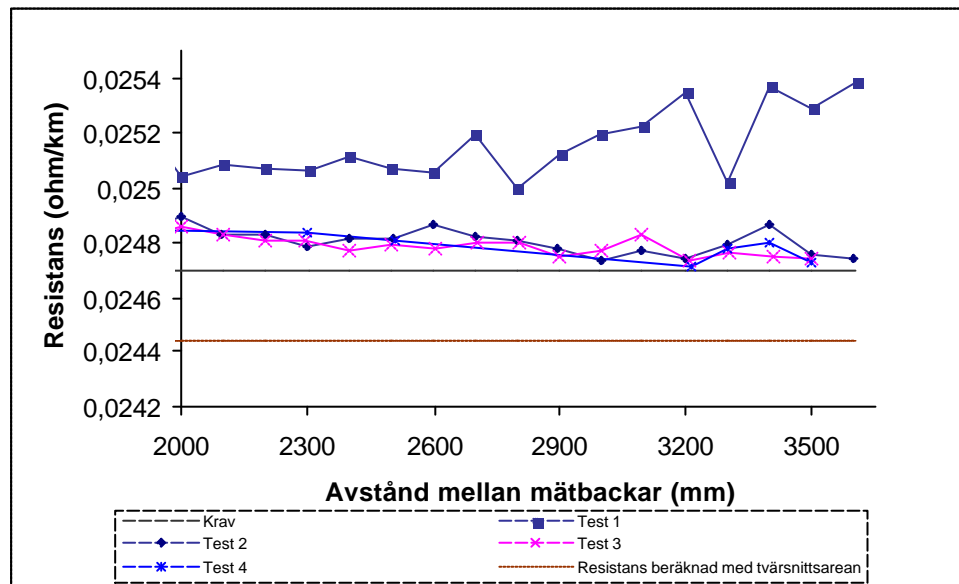


Figur 34: Resultatet av Test 4 för resistans mätningarna i den stora mätbryggen på en 1200 mm^2 aluminiumledare med svällpulver. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.3.5 Resistansbestämning genom att uppskattar tvärsnittsarea

Efter att mätningarna med den stationära mätbryggen var klar klipptes en del aluminiumledaren av och sågades jämt i ändarna. Trådarna i varje lager frigörs och rätas ut, längd och vikt noteras och ledarens resistans beräknades.

Mätningens resultat blev $0,0244 \text{ ohm/km}$ vilket är ca 1,7 % under resistanskravet. Resultatet kan ses som ett riktvärde för aluminiumledarens resistans i ohm/km . I Figur 35 visas det beräknade resultatet som en rak streckad linje tillsammans med testens resultat då avståndet är större eller lika med 2000 mm.



Figur 35: I figuren presenteras testens resistansmätningar i ohm/km för en 1200 mm^2 aluminiumledare med svällpulver.

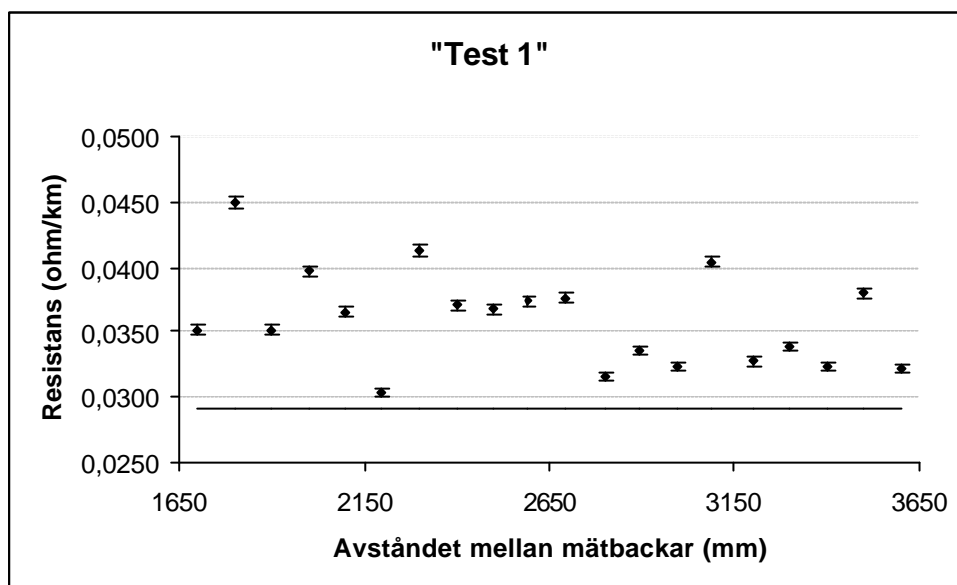
5.1.4 Mätningar och resultat av 1000 mm^2 aluminiumledare med svällband

För en 1000 mm^2 aluminiumledare är resistanskravet $0,0291 \text{ } \Omega/\text{km}$ [4], som är den ritade konstanta räta linjen i graferna nedan.

5.1.4.1 Test 1 i mätbryggan

I testet ansluts strömmen via mätbryggans spännbackar, avståndet mellan mätbackar är vid första mätpunkten ca 1700 mm och med mittpunkten i mätbryggans mitt. Efter varje mätning flyttas varje mätback ca 50 mm ut mot respektive spännback.

För testet blev spridningen mellan mätpunkterna stor vilket visas i Figur 36. Resultatet visar också att inte resistanskravet uppfylls och att den procentuella skillnaden mellan mätvärdenas max respektive min är 32,6 %.

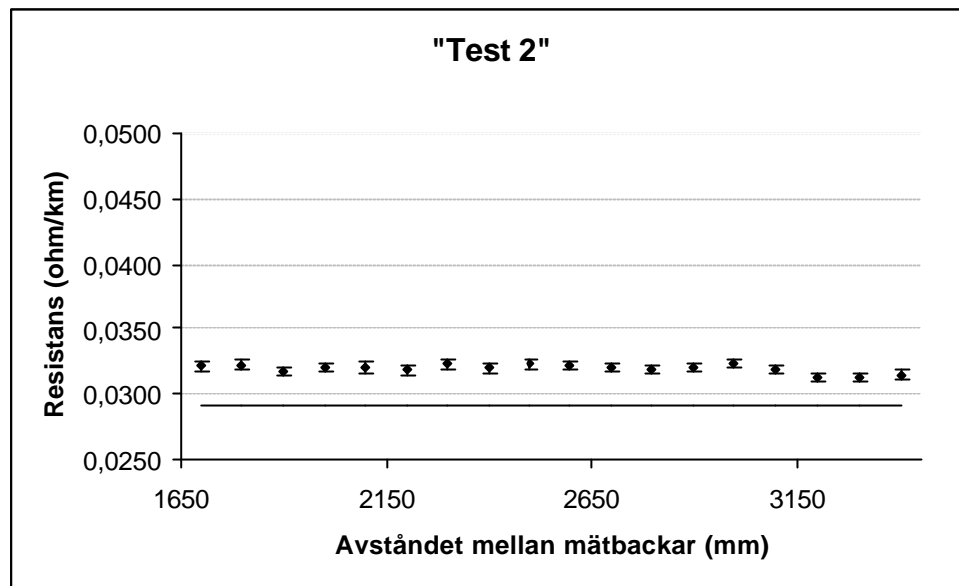


Figur 36: Resultatet av Test 1 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm² aluminiumledare med svällband. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

5.1.4.2 Test 2 i mätbryggan

För test 2 ansluts strömmen via pressade kopparhylsor. Mätningarna utförs på ett liknat sätt som i test 1, den första mätningen vid ca 1700 mm mellan mätbackarna osv.

Testets resultat visas i Figur 37, här syns tydligt att variationen mellan mätpunkterna har minskat jämfört med test 1 men dock är spridningen fortfarande stor mellan mätpunkterna. Den procentuella skillnaden mellan mätpunkternas max respektive min är 3,6 %. Det visar sig också att alla mätvärden ligger över resistanskravet.



Figur 37: Resultatet av Test 2 för resistans mätningarna i den stora mätbryggan på en 1000 mm² aluminiumledare med svällband. Punkterna är den uppmätta resistansen och den räta linjen är resistanskravet. Staplarna runt varje punkt visar mätvärdets noggrannhet.

6 Slutsats och framåtblick

6.1 Slutsats av mätningar på aluminiumledarna

Mina resultat på de olika aluminiumledarna visar att en relativt jämn strömfördelning har lyckats att uppnå genom att använda sig av kontaktpressning.

För 1600 mm² aluminiumledaren ser man den största skillnaden på att inte spännbackarnas klämmor lyckas att klämma ihop ledaren så pass mycket att varje tråd i ledaren är förbunden i en gemensam punkt. Testen som har genomförts på ledaren visar att strömmen fördela sig relativt jämt genom att pressa kopparhylsor i ändarna och ansluta strömmen via dem. Detta medför att mätning av resistansen i ohm/km är oberoende av avståndet mellan mätbackarna bortsett från mätvärdets noggrannhet.

Resultatet av mätningarna för 1000 mm² visar sig inte ge så stor skillnad på strömfördelningen i ledaren genom att ansluta strömmen via spännbackarna eller kopparhylsorna. Möjligen kan det vara så att mätbryggans begränsning på aluminiumledare ligger vid dimensioner runt 1000 mm².

För 1200 mm² aluminiumledare med svällpulver visar det sig att genom att pressa kopparhylsor i ändarna ges en jämn strömfördelning i ledaren. Men dock visar resultatets resistans i ohm/km ligger högre än den resistansen i ohm/km

som beräknas genom att uppskatta tvärsnittsarean. Detta beror förmodligen på svällpulvret som ligger mellan trådarna i ledaren. När kontaktpressningen gör lyckas inte alla tråda i ledaren bli förbundena i en gemensam punkt. Vilket medför en högre resistans pga att inte strömmen fördelas i alla trådar i ledaren.

Resultatet av mätningarna på 1000 mm² aluminiumledare med svällband visar sig ge en relativt jämn strömfördelning genom ledaren då strömmen ansluts via kopparhylsorna. Men här ser man också att resistansen är alldeles för hög jämfört med resistanskravet. Detta beror på att kontaktpressningen i ändarna på ledaren inte förbinder varje tråd i en gemensam punkt. Detta medför att resistansen är högre pga att inte strömmen fördelas i alla trådar i ledaren.

Vid resistansmätning i stora mätbryggan för rena aluminiumledare med dimension ~ 1000 mm² och uppåt bör kontaktpressning tillämpas för att ge ett så noggrant mätvärde som möjligt. Mellan mätbackarna bör avståndet vara så maximalt som möjligt för att minimera avståndets inverkan på mätnoggrannheten.

För icke rena aluminiumledare såsom ledare med svällpulver eller svällband, borde kanske lödning av ändarna tillämpas för att förbinda alla trådar i en gemensam punkt där strömmen ansluts. Förmodligen skulle strömmen fördelas jämt i ledaren och svällpulvret eller svällbanden skulle inte påverka resistansmätningen av ledaren i ohm/km. Ett annat möjligt sätt för en ledare med svällpulver är att försöka rengöra mellan trådarna i ändarna på ledaren. Detta genom att skölja vatten på ändarna i ledaren och sedan pressa en hylsa där strömmen ansluts för resistansmätning. För ledare med svällband skulle man kanske försöka att ta bort svällbandet mellan trådarna i ändarna på ledaren innan kontaktpressning.

6.2 Framåtblick

Det finns en del saker som bör förändras i mätbryggan för att uppnå ett så noggrant mätvärde som möjligt vid resistansmätning. Som experimenten har visat bör spännbackarna där strömmen ansluts konstrueras om för grövre rena aluminiumledare eller så pressas en hylsa i ändarna på ledaren där strömmen ansluts. Mätbackarna bör justeras så att över- och undersida mäter i samma punkt i ledarenstvärsnitt, vilket gör att avståndet blir lika stort mellan mätbackarna oberoende om avståndet bestäms på över- eller undersidan. En annan sak är att utveckla mätbryggan med en hög och sänkbar isolerad plattform mellan mätbackarna, denna skulle reducera ledarens båge mellan mätbackarna och avståndsfelet minska.

7 Referenser

- [1] Persson, Karl O (1992) Ellära, Stockholm: Almqvist & Wiksell Förlag AB, ISBN 91-21-10635-5
- [2] Johansson Tommy, Hansson Ola (2004) Test av stora mätbryggan för ledarresistansmätning, 2GM04604-042
- [3] Omanovic Amer (2004) Resistansmätning i stora mätbryggan, 2GM04604-121
- [4] International standard, Third edition (2004-11), Conductors of insulated cables, IEC 60228 (*International Electrotechnical Commission*)
- [5] International standard, Edition 1.2 (2001-11), Electric cables, IEC 62287-1-1 (*International Electrotechnical Commission*)
- [6] Annual book of ASTM standards (2004), Section 2 Nonferrous Metal Products, Volume 02.03 Electrical Conductors, ISBN 0-8031-3698-6 (volume)
- [7] Schuetz Messtechnik, Instruction and Operating Manual Micro-Ohm Meter MR 300 C.
- [8] <http://inside.abb.com/sehvc>
- [9] www.abb.se