



Högskoleingenjörutbildning i elektroteknik

Grundnivå, 15 hp

# Identifiering av lagerströmmar i elmotorer för framdrivning av tunga fordon

**Utveckling av metod och programvara för att detektera lagerströmmar**

**JESSICA LINDSTRÖM**

Examensarbete inom Elektroteknik  
Grundnivå, 15 hp  
Handledare på KTH: Gunno von Zweigbergk och Lars-Olov Carlheim  
Examinator: Elias Said  
TRITA-CBH-GRU-2023:079

KTH  
Skolan för kemi, bioteknologi och hälsa  
141 52 Huddinge, Sverige



# **Identifiering av lagerströmmar i elmotorer för framdrivning av tunga fordon**

Utveckling av metod och programvara för att detektera lagerströmmar

# **Identification of Bearing Currents in Electric Motors for Heavy Vehicles**

Development of Methodology and Software to Detect Bearing Currents

JESSICA LINDSTRÖM

Examensarbete inom Elektroteknik  
Grundnivå, 15 hp  
Handledare på KTH: Gunno von Zweigbergk och Lars-Olov Carlheim  
Examinator: Elias Said  
TRITA-CBH-GRU-2023:079

KTH  
Skolan för kemi, bioteknologi och hälsa  
141 52 Huddinge, Sverige



## **Sammanfattning**

Klimatutmaningar, lagändringar och ett ökat miljötänk har tvingat transportsektorn att ställa om till eldrift. Batterier och elmotorer har utvecklats kraftigt och är nu ett alternativ även för tunga fordon. Ett vanligt förekommande problem med elmotorer i fordon är lagerströmmar, här kallat gnista eller blixthändelser. Dessa uppstår på grund av oönskade urladdningar i motorn och förorsakar skador på lagren i motorn. Syftet med motorlager är att avlasta och minska friktionen kring motoraxeln. För att förebygga problemet och se förbättringar eller försämringar av olika åtgärder som görs krävs att lagerströmmar kan identifieras utifrån mätdata.

Detta examensarbete analyserar relevant forskning inom området för att sedan introducera en metod och en algoritm för att identifiera lagerströmmar i samarbete med Scania CV. Algoritmen består av tre olika parametrar som påverkar identifieringen av de oönskade strömmarna på olika sätt. Verktøget lyckades identifierade lagerströmmar i olika mätdata, och hittade skillnader i antalet blixthändelser mellan olika körningar av provobjektet. Dock krävs vidare utveckling av verktøget och möjligheten att bearbeta annan typ av data som exempelvis spänningar i motorn för att hitta bättre samband.

### **Nyckelord**

Lagerström, elmotor, växelriktare, jordningsring, permanentmagnetsmotor, cirkulerande strömmar, fluting, frosting, pitting, strömmätning



## **Abstract**

A changing climate, changing laws and an increased environmental consciousness has forced the transport sector to transition to electric power. Batteries and electric motors have seen a quick and powerful development which means that they are now an alternative even for heavy vehicles. A common problem with electric motors for vehicles is bearing currents. The bearing currents occur as a result of electrical discharges in the motor and can damage the bearings inside the motor. The purpose of motor bearings is to offload and reduce friction for the motor shaft. To prevent the issue and to see improvements or deteriorations from different preventative measures it is critical to be able to identify bearing currents from data.

This thesis analyzes relevant research in the area before introducing a method and an algorithm for detecting bearing currents in cooperation with Scania CV. The algorithm is composed of three different parameters which affects the identification in different ways. The tool was able to identify bearing currents from various data and found differences between the number of bearing currents between different test runs of the motor. However, more development of the tool and the possibility to process different kinds of data like voltages inside the motor is needed to be able to find better patterns in the data.

## **Keywords**

Bearing current, electric motor, inverter, grounding ring, Permanent Magnet Synchronous Motor, circulating current, fluting, frosting, pitting, current measurement



## Förord

Detta examensarbete har genomförts under våren 2023 inom ramen för utbildningen för högskoleingenjörer inom elektroteknik på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) tillsammans med företaget Scania CV i Södertälje.

Jag vill rikta ett tack till Michael Waern och Jörgen Engström som gav mig möjligheten att skriva mitt examensarbete hos er. Jag vill också tacka min handledare på Scania, Daniel Norling som bidragit med vägledning, besvarat frågor och tillhandahållit mätdata under examensarbetets gång.

Stort tack till samtliga i teamet på UPCM som tog emot mig med ett varmt välkommande och alla givande samtal vi haft. Mycket lärorikt och intressant.

Jag skulle vilja tacka mina två handledare Gunno von Zweigbergk och Lars-Olov Carlheim på KTH för ert stöd och bollplank under rapportskrivandet. Jag vill även tacka min examinator Elias Said.

Slutligen vill jag också tacka min partner Martin som varit till mycket stor hjälp och stöd under hela arbetet.



# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Problemformulering.....	1
1.2	Målsättning.....	2
1.3	Avgränsningar.....	2
2	Teori och bakgrund.....	3
2.1	Elmotorn.....	3
2.1.1	Permanentmagnetsynkronmotor.....	4
2.1.2	Motorlager.....	5
2.2	Växelriktare.....	6
2.2.1	Komponenter.....	7
2.2.2	Pulsbreddsmodulering.....	8
2.2.3	Common mode-spänning.....	9
2.2.4	Motorkapacitanser.....	11
2.3	Lagerströmmar.....	13
2.3.1	Vanliga typer av lagerströmmar.....	14
2.3.2	Vanliga lagerskador.....	15
2.3.3	Förebyggande åtgärder.....	17
2.3.4	Metoder för att mäta lagerströmmar.....	18
2.4	Lagerströmsmätningar på Scania.....	19
2.4.1	Provobjekt.....	19
2.4.2	Mätutrustning.....	20
2.4.3	Mätning och insamling av mätdata.....	20
2.5	Signalbehandling.....	21
2.5.1	Brus.....	21
2.5.2	Nyquist-satsen.....	21
3	Metoder och resultat.....	23
3.1	Överblick.....	23
3.2	Val av mätdata.....	24
3.3	Identifiera lagerströmmar.....	24
3.3.1	Definition av blixthändelse.....	25
3.3.2	Variabeln K.....	25
3.3.3	Variabeln N.....	30
3.3.4	Variabeln M.....	36
3.3.5	Fallstudie för samband mellan trolig blixthändelse och varvtal.....	40
4	Analys och diskussion.....	41

5	Slutsatser.....	45
	Källförteckning.....	47
	Bilagor .....	51
	Bilaga A – Urklipp från algoritm .....	51

## 1 Inledning

Under de senaste 30 åren har utsläppen av växthusgaser inom transportsektorn ökat med över 30 procent [1]. Utifrån de totala koldioxidutsläppen för vägtransporter inom Europa svarar dieselmotorer för två tredjedelar och bensen en fjärdedel av de totala utsläppen under år 2019 [2]. Enligt information från Ekonomifakta har energianvändningen inom den svenska transportsektorn ökat från 56 TWh sedan år 1970 till 83 TWh år 2021 [3].

Sedan 2017 finns ett nationellt klimatpolitiskt ramverk innehållande bland annat en klimatlag och ett klimatmål, som pekar på att Sveriges utsläpp av växthusgaser ska utsläppen reduceras till i princip noll år 2045 [4]. För att uppfylla det omfattande målet av ramverket, presenterades bland annat delmålet för den svenska fordonsflottan och dess oberoende av fossila drivmedel år 2030 [4]. En global handlingsplan är Agenda 2030 [5], uppsatt och antagen av världens länder. Handlingsplanen består exempelvis av FN:s 17 globala mål som sattes upp under år 2015. Mål nummer nio ”Hållbar industri, innovationer och infrastruktur” förespråkar utbyggnad av en miljömässigt hållbar infrastruktur. Transportsektorn och fordonsindustrin är en del av detta.

Klimatutmaningar, lagändringar och ett ökat miljötänk har lett till en ökad efterfrågan på elfordon. Genom utvecklad teknologi av batterier har elmotorn blivit allt mer eftertraktad och ett alternativ även för tunga fordon [6]. Elektrifieringen av fordonsbranschen är därför mycket aktuell. Samtidigt ställs branschen inför både tekniska och samhällseliga utmaningar.

### 1.1 Problemformulering

Trots de elektriska framdrivningssystemens snabba utveckling finns fortfarande utmaningar. Ett vanligt förekommande problem med elmotorer i fordon är lagerströmmar, som varit känt under en längre tid [7]. I elmotorn sker oönskade elektriska urladdningar i motorlagren som kan förorsaka skador på lagren. Lagren är placerade mellan rotoraxeln och statorhuset, som är två grundkomponenter i en elmotor. Dessa skador visar sig framförallt på lagren i motorn, och kan även leda till vidare skador och i värsta fall motorhaveri.

En effekt av dessa lagerskador är till exempel en förkortad livslängd hos kullagren och motorn. En annan konsekvens kan bli ett försämrat förtroende för företaget. För att ett företag som utvecklar elfordon ska vara konkurrenskraftigt krävs därmed att en förbättrad motorkonstruktion kan tas fram.

Scania är ett globalt tillverkningsföretag av tunga fordon, exempelvis bussar, lastbilar och autonoma transporter [8]. Scania arbetar ständigt med nya tekniska innovationer, och är i full gång med utvecklandet av en ny generations elmotor. På Scantias elmotoravdelning i Södertälje arbetar man under våren 2023 med lagerströmsproblemet. I Scantias fall skulle lagerströmsproblemet kunna leda till att produktionen

av elektriska framdrivningsmotorer fördröjs. Om problemet inte löses, kan skador som uppstår i motorerna resultera i höga kostnader och garantiärenden. Scantias varumärke kan därmed skadas och leda till en lägre marknadsandel.

Detta examensarbete utgör en del av Scantias arbete med lagerströmmar. Idag saknar Scania en tillräckligt bra metod för att utvärdera karaktären och kvantiteten av lagerströmmar från olika testobjekt med en snabb, robust och kvalitetssäkrad metod. Med hjälp av fortlöpande insamling av mätdata från provobjekt genomförs utvecklingstester. Hypotesen är att en metod kan utvecklas för att identifiera oönskade lagerströmmar utifrån mätdata.

## 1.2 Målsättning

Målet med detta examensarbete är att ta fram en metod och ett verktyg för att bearbeta mätdata. Resultatet av bearbetningen ska kunna användas för att identifiera lagerströmmar och därmed identifiera skillnader mellan mätdata från Scantias olika elmotorer av motortypen permanentmagnetsynkronmotor. Syftet är att Scania ska kunna identifiera lagerströmmar som uppstår i olika typer av elmotorer.

Detta arbete är en del i kedjan för att komma ett steg närmare att förstå lagerströmsproblemet. Analys kommer ske av relevanta faktorer så som ström och varvtal. Vidare ska den utvecklade metoden implementeras och testas.

Fyra delmål har specificerats för att uppnå examensarbetets övergripande mål.

*D1:* Presentera olika typer av lagerströmmar.

*D2:* Presentera möjliga orsaker till att det sker skador på lagren.

*D3:* Utveckla en metod för att utvärdera lagerströmmar.

*D4:* Identifiera eventuella trender och mönster av lagerströmmar.

## 1.3 Avgränsningar

Arbetet har begränsats till att analysera befintlig mätdata från en specifik modell av Scantias elmotorer. Det fanns tillgång till en mycket stor mängd mätdata, men denna mängd avgränsades på grund av tidsramen för detta arbete.

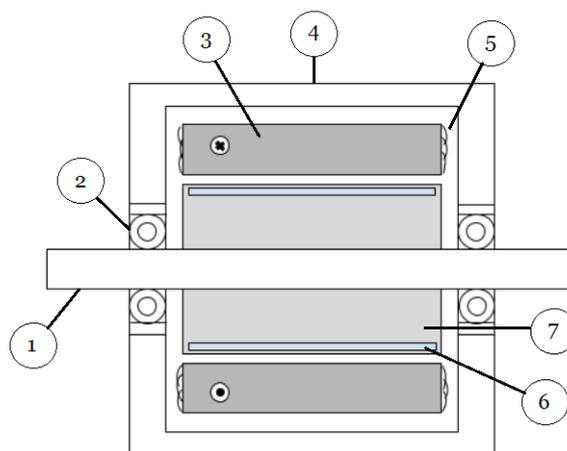
## 2 Teori och bakgrund

I detta kapitel presenteras elmotorns olika komponenter. Syftet är att beskriva uppbyggnad och huvudsaklig funktion hos relevanta komponenter i en specifik motortyp för att få en ökad förståelse av ämnet lagerströmmar.

### 2.1 Elmotorn

Elmotorns historia och huvudsakliga funktion baseras på forskning av Michael Faraday närmare 200 år tillbaka, år 1821 [7]. Vidare utvecklades den första elektriska likströmsmotorn på 1830-talet av William Sturgeon, och i slutet av 1830-talet konstruerade Robert Davidson det första loket, drivet av icke-uppladdningsbara batterier. Elmotorn och batterier utvecklades fortlöpande och tog fart efter millennieskiftet. Elmotorn omvandlar elektrisk energi från en extern energikälla till kinetisk energi och kan även fungera som en generator.

Det finns flera typer av elmotorer utvecklade för elfordon [9]. Inledningsvis presenteras i denna artikel en fördelning mellan likströms- och växelströmsmotorer. Bland annat presenteras motortyperna växlande reluktansmotor (eng. *switched reluctance motors (SRM)*), induktionsmotor (eng. *induction machines (IM)*) och borstlösa likströmsmotorer med permanentmagneter (eng. *permanent magnet brushless DC motors (BLDC)*). Vidare i rapporten presenteras även motortypen permanentmagnetsynkronmotor (eng. *Permanent Magnet Synchronus Motor (PMSM)*) som syns i figur 1. År 2021 var PMSM den vanligaste motortypen inom elbilsindustrin [9], eftersom motorn har hög verkningsgrad. Den höga verkningsgraden innebär att en stor del av den tillförda elektriska energin omvandlas till kinetisk energi. Dessutom tillhandahåller PMSM robusthet och pålitlig prestanda. Dessutom erhålls en låg energiförbrukning på grund av permanentmagneternas magnetfält. I eldrivna fordon används oftast trefasmotorer. [7], [9], [26] Det är motortypen PMSM som detta arbete kommer att studera, och som visas i figur 1.



Figur 1: Schematisk bild av PMSM: 1 – Motoraxel, 2 – Kullager, 3 – Stator, 4 – Motorhus, 5 – Statorlindningar, 6 – Permanentmagneter, 7 – Rotor.

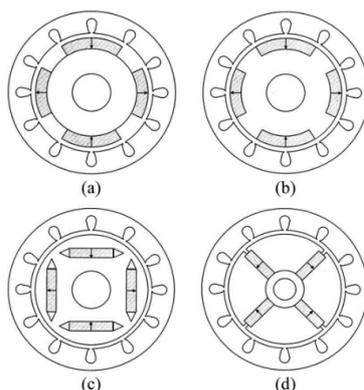
### 2.1.1 Permanentmagnetsynkronmotor

Tre beståndsdelar i motortypen PMSM är rotorn, permanentmagneterna (*PM*) och statorn [9]. Figur 1 visar statorn som nummer 3, rotorn är nummer 7 och permanentmagneterna som sitter i rotorn är markerade med siffran 6. Motorhuset är höljet runt dessa komponenter, och mellan motorhuset och motoraxeln sitter ett lager på vardera sida motoraxeln, se nummer 2 i figur 1. Det är också i anslutning till dessa lager en jordningsring kan placeras för att motverka oönskade strömmar (mer om jordningsringen i avsnitt 2.3.3).

Statorn är ett stationärt hölje som omsluter rotorn, medan rotorn är den roterande del som innehåller permanentmagneter [26]. Konstruktionen av en PMSM består av en rotor med permanentmagneter och statorlindningar med ett litet luftgap emellan. Statorn är uppbyggd av ett antal isolerade magnetlindningar med en omgivande järnkärna. Rotorn är monterad på motoraxeln eftersom det är rotorn som roterar vid drift. [7], [10], [26]

I statorn skapas ett roterande magnetfält när motorn är ansluten till trefassspänning [26]. Magnetfältet som driver PMSM skapas främst av statorn och statorlindningarna som förses med ström från en extern energikälla genom motors faslindningar. Rotorn och dess permanentmagneter ger ett statiskt magnetfält som följer statorns roterande magnetfält [26]. Tillsammans genererar de två magnetfälten ett vridmoment på rotorn och därmed är det magnetfältet från statorlindningarna som styr varvtalet hos en PMSM. [7], [10], [26]

Topologin för att placera permanentmagneterna i rotorn kan göras på flera olika sätt, vilket påverkar motorns prestanda [11]. Prestandan påverkas också av olika kombinationer av designparametrar, bland annat form och materialval. I figur 2 presenteras fyra olika exempel av magneternas montering i rotorn.



Figur 2: Olika topologier hos borstlösa permanentmagnetmotorer. (a) Ytmonterad PM på rotorn. (b) Inbyggd PM i rotor. (c) Inbyggd PM radially. (d) Inbyggd PM tvärgående rotor. Copyright © 2008, IEEE [11]

Olika positioner av PM är av betydelse vid utformning av elmotorn och avvägning mellan olika önskemål som exempelvis verkningsgrad görs. Figur 2(a) visar en modell där PM är monterade på utsidan av rotorn, medan figur 2(b) visar en illustration där PM är placerade på insidan av rotorn. I figur 2(c) är magneterna riktade längs radien hos rotorn, och synligt i figur 2(d) omsluter magneterna rotorn. [11]

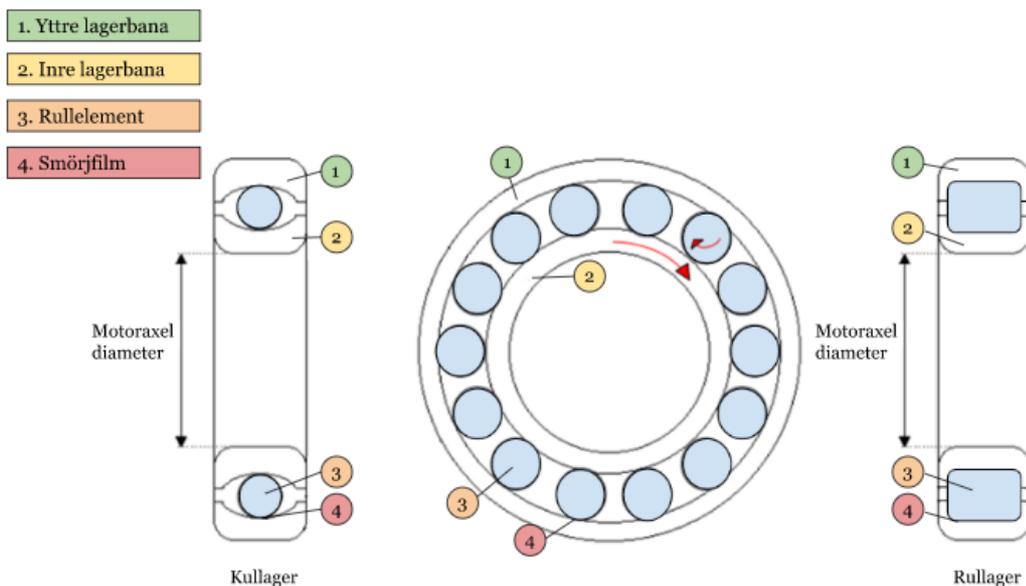
### 2.1.2 Motorlager

I en elmotor finns två lager, ett i vardera änden av motoraxeln. Deras syfte är att minimera friktionen mellan roterande delar i motorn genom avlastning längs motoraxeln [12]. Motorlager består av två lagerbanor, en inre och en yttre med någon typ av roterande rullelement däremellan, se figur 3.

Lager som används i elmotorer behöver smörjas, vilket kan göras med olika typer av smörjmedel [13]. Smörjmedlets typ kan variera, och olika sorter av varje smörjmedel finns för att uppfylla önskad funktion vid olika användningsområden. En viktig parameter vid val av smörjmedel är viskositet. Viskositeten på smörjmedlet anger hur trögflytande det är, och beror endast på temperatur. Ett annat syfte med smörjmedlet är att hålla lagrets metalliska ytor åtskilda vid rotation, detta kallas smörjfilm. Smörjfilmens tjocklek beror på både varvtal och viskositet, vid en högre temperatur är viskositeten lägre och tvärtom. Vid låga varvtal,  $\leq 100$  rpm är de isolerande egenskaperna hos smörjmedlet låga, eftersom rullelementet i lagret får kontakt med lagerbanan. Det medför att motorlagret kan betraktas som ett motstånd. Vid högre varvtal,  $\geq 100$  rpm är smörjmedlets isolerande egenskaper istället högre. [13], [14]

När smörjmedlet i ett lager har god isolerande förmåga kan lagret liknas vid en kondensator. Det betyder att så länge smörjmedlet inte är skadat eller kontaminerat fungerar det som en kapacitiv spänningsavledare där rotor och stator isoleras från varandra. Ett skadat eller kontaminerat smörjmedel kan innebära att små metallpartiklar från lagret lossnat och kontaminerat smörjfilmen, vilket skadar smörjfilmens funktionalitet. [14] En anledning till smörjmedel är att ge låg friktion och goda förutsättningar för ökad livslängd [15].

Motoraxeln är väl presspassad för att få plats inom den inre lagerbanans diameter. Följaktligen sätts den inre lagerbanan i rullning, vilket visas med den större röda pilen i figur 3. Som tidigare nämnt är friktionen mellan kulorna och lagerbanorna låg, detta resulterar i att rotation av rullelementet visas med den mindre röda pilen i figur 3.



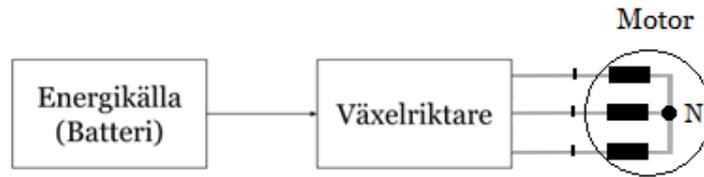
Figur 3: Ritning av motorlager, till vänster visas en genomsnitt av ett kullager och till höger är en genomsnitt av ett rullager synligt.

Det finns olika typer av lager, bland annat; kullager, rullager och hybridlager [12]. Varje sorts lager har unika egenskaper, och genom att välja rätt typ av lager finns möjligheten att motverka olika slags problem. Figur 3 visar en genomsnitt av ett kullager och ett rullager.

Vanligtvis är motorns lager konstruerade i stål, men lagertypen hybridlager är tillverkade i olika material av tekniska skäl [12]. Den vanligaste lagertypen av kullagret, specifikt spårkullager [16], se figur 3 (till vänster). Kullager förmår belastning i både radiell och axiell riktning, i jämförelse med rullkullagret i figur 3 (till höger) som framförallt kan motstå radiella belastningar [17], [18]. Hybridlager är en tredje typ av lager vars lagerbanor är tillverkade i lagerstål och det rullande beståndsdelarna består av kiselnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Kiselnitrid består av kisel och kväve, vilket isolerar motorlagret och är till synes mörkare än stål. Dessa lager leder till att lagren blir elektriskt isolerande och detta lämpar sig väl för att användas i elektriska motorer. [19]

## 2.2 Växelriktare

Växelriktaren (eng. *inverter*) är en komponent som fungerar med hjälp av halvledare (exempelvis transistorer och tyristorer) och är avsedd för att omvandla likström till växelström [20]. Växelriktare används bland annat för drift av trefasiga motorer, exempelvis i IM och BLDC [21], där växelriktaren placeras mellan energikälla och motor, se figur 4. Omvandlingen sker genom att skapa en fyrkantsvåg med varierande pulsbredd reglerad för att följa ursprungssignalen på ett så bra sätt som möjligt. Ut-signalen från en växelriktare blir således en icke ren sinusformad utsignal. [22] Denna teknik kallas för pulsbreddsmodulering (se avsnitt 2.2.2).



Figur 4: Blockschema för en växelriktares placering, i förhållande till energikälla och motor. Pilarna visar energiflödet mellan komponenterna.

Figur 4 är en förenklad översikt av var en växelriktare sitter i kedjan. Till vänster är en extern energikälla synlig, i detta fall ett batteri. Energiflödet från källan passerar växelriktaren, synlig i mitten där likström omväxlas till växelström. Detta för att motorn drivs med en trefassspänning där varje fas kopplas till olika statorlindningar [21].

### 2.2.1 Komponenter

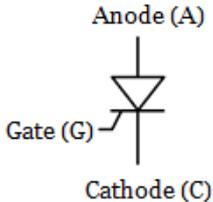
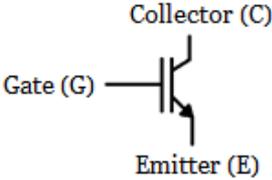
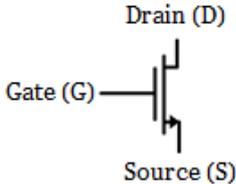
Halvledare är viktiga komponenter för växelriktare, eftersom dessa används för att ta fram sinusvågen [23]. Den vanligaste halvledarkomponenten som för närvarande används är av modellen metalloxidhalvledarfälteffekttransistor (eng. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)*), den bipolära transistorn med isolerat styre (eng. *insulated-gate bipolar transistor (IGBT)*) eller integrerad gate-kommuterande tyristor (eng. *integrated gate-commutated thyristor (IGCT)*) för låg respektive hög effekt som omkopplare i växelriktare [24].

Det finns även andra typer av halvledare som används, till exempel olika sorters tyristorer (eng. *thyristor*) [7]. Historiskt har behovet av att kunna hantera olika spänningar från olika elektriska källor varierat. Med tiden har behovet varierat angående komponenternas funktionalitet, faktorer som stigtid och strömtålighet är två exempel. Det är bland annat av stor vikt att växelriktarens komponenter har små förluster, samt tål hög spänning och ström [25].

Ur ett historiskt perspektiv är tyristorn en vanligt använd halvledarkomponent i växelriktare, som med tiden bytts ut i många sammanhang [7]. Tyristorns funktion är att leda ström vid en strömpuls på gate (G), och för att utföra denna omkoppling krävs relativt mycket energi. Det är därför av stor vikt att komponenten kan övergå från ledande till icke-ledande på kort tid. Vidare utvecklades IGBT-transistorn, en integrerad krets som används vid högre effekter. IGBT-transistorn kombinerar de goda egenskaperna hos den bipolära transistorn med MOSFET-transistorns egenskaper. IGBT-transistorn kräver en lägre spänning och försumbar ström för att aktiveras. Vidare uppvisar IGBT-transistorn god spänningstålighet. Slutligen presenteras MOSFET som kan hantera högre spänningar men används vanligtvis vid lägre effekter. I tabell 1 presenteras viktiga skillnader hos de tre vanligaste halvledarkomponenterna. [7], [22]

Genom att använda en växelriktare är det möjligt att uppnå förbättrad prestanda och en variabel drifhastighet för elmotorn. Användandet av dessa halvledare i växelriktaren där omkopplingen sker med korta stigtider (eng. *rise time*) kan dock resultera i oönskade strömmar [27]. Ett exempel är användningen av IGBT som är synlig i mitten av tabell 1, detta kan jämföras med tyristorn, till vänster i tabell 1 vars stigtid är längre.

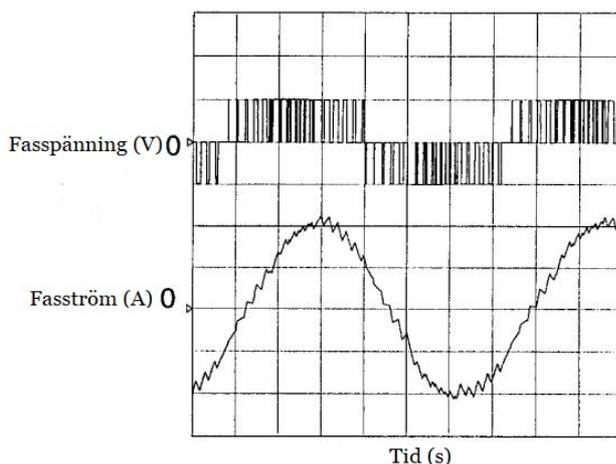
Tabell 1: Tydlig och viktig grundinformation rörande olika halvledarkomponenter

Namn	Tyristor	IGBT	MOSFET
Symbol			
Stigtid (eng. <i>rise time</i> ) [7]	10–25 $\mu$ s	1–4 $\mu$ s	0.3–0.5 $\mu$ s
Omkopplingsfrekvens [22]		25kHz	100 kHz

Växelriktaren är som beskriven uppbyggd av kraftelektronik som kan resultera i störningar vid matning av elmotorn. Störningarna kan ses som ett kraftigt brus i matningsströmmen och som vidare kan påverka elmotorns drift.

### 2.2.2 Pulsbreddsmodulering

Pulsbreddsmodulering (eng. *Pulse Width Modulation (PWM)*) tillämpar pulser med varierad bredd i syfte att representera den kontinuerliga insignalens amplitud [28]. Den diskreta representationen av insignalen skapas till följd av att en transistors utgång slås på och av i relation till signaler med hög och låg amplitud. Om signalen har hög amplitud är utgången påslagen under en längre tid, medan vid en signal med lägre amplitud är utgången påslagen under en kortare tid, se figur 5.

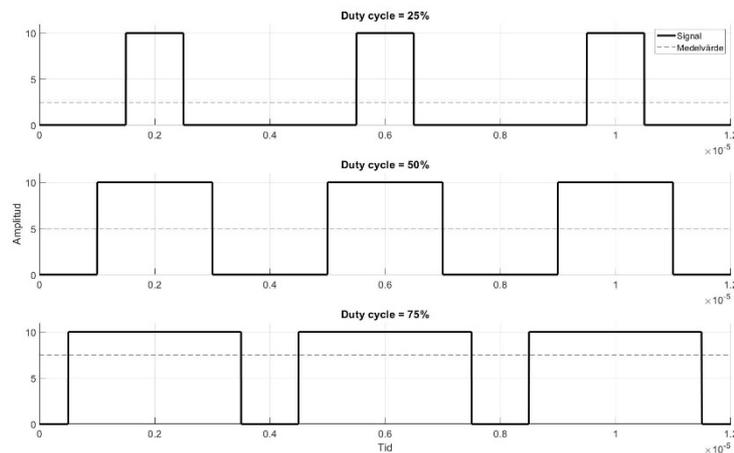


Figur 5: Samband mellan PWM-signalen och fasströmmen. Copyright © 1998, IEEE [29]

De två olika kurvrepresentationerna i figur 5, har ett samband. När sinusvågens amplitud växer, krävs att påslagstiden för PWM-signalen är längre, vilket kan beskrivas på samma sätt när amplituden hos sinusvågen minskar är avslagstiden för PWM-signalen längre istället. Det är därför sinusvågen som visas i den nedre delen

av figur 5, visar hur signalen ser ut när den lämnar växelriktaren för att driva elmotorn. Denna signal resulterar i sin tur i en viss störning vid drivning av elmotorn eftersom strömmen inte längre är en ren sinusvåg. Mer om hur detta påverkar elmotorn beskrivs under avsnittet 2.2.3, common mode-spänning.

PWM-signalens pulsbredd representeras således av en pulskvot där förhållandet mellan till- och frånpuls uttrycks i procent, se figur 6.



Figur 6: Tre olika pulskvoter: 25%, 50% och 75% (heldragen linje symboliserar PWM-signalen och den streckade linjen representerar medelvärdet av signalen)

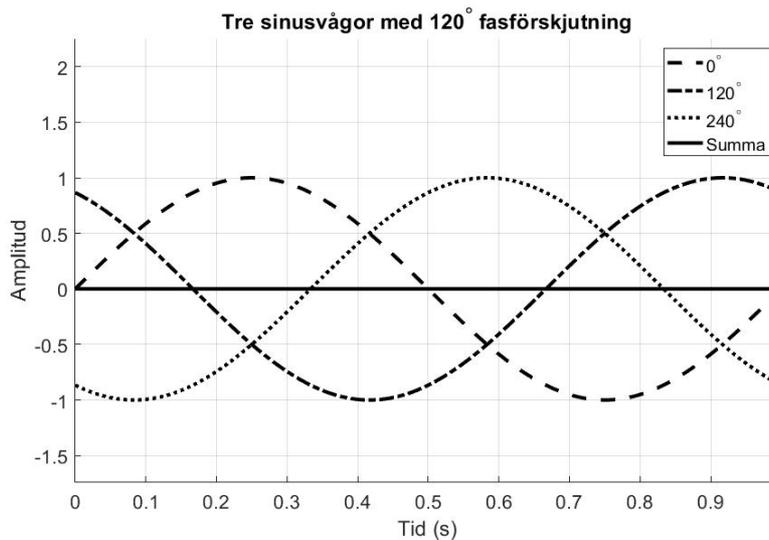
I figur 6 presenteras tre olika pulskvoter (eng. *duty cycle*) med syfte att symbolisera PWM-signalens påverkan på signalen och dess medelvärde. Genom att ändra pulskvoten kan olika DC-spänningar erhållas, en kortare pulsbredd ger ett lågt medelvärde och tvärt om, således påverkas även PWM-signalens utseende av pulskvoten. För PWM används medelvärdet av på- och avtiden, denna tid visas i figur 6 som den streckade linjen. Vid lika stor på- som avtid (pulsquot = 50%) representeras medelvärdet i mitten, på så sätt är det möjligt att påverka medelvärdet, därmed kan olika spänningar fås med hjälp av tillslagstid i förhållande till periodtiden [30].

### 2.2.3 Common mode-spänning

Definitionen av common mode-spänning (eng. *Common-mode Voltage (CMV)*) är medelvärdet av de trefas-spänningarna i en Y-anslutning [14]. Potentialskillnaden mellan dessa trefasspänningar är markerade som  $v_{uY}$ ,  $v_{vY}$  och  $v_{wY}$  i figur 7 blir common mode-spänningen noll för ett trefas-system med rena sinussignaler. Common mode-spänningen definieras av  $V_{com}$ . Formel 2.1 representerar hur common mode-spänningen beräknas.

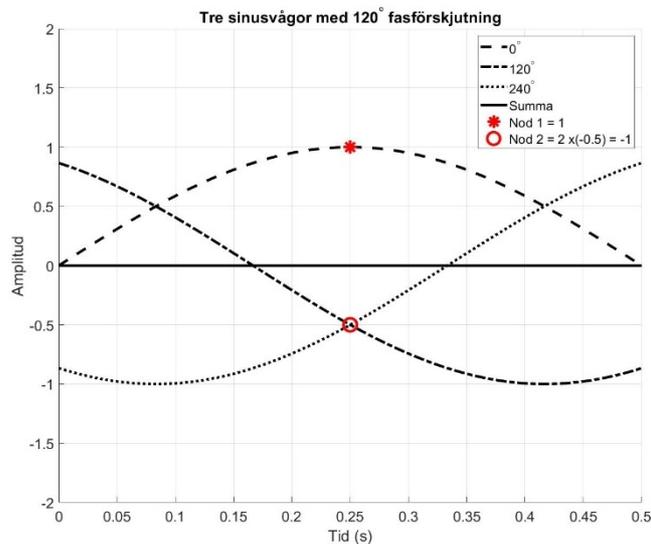
$$V_{com} = \frac{v_{ug} + v_{vg} + v_{wg}}{3} \quad (2.1)$$

Common mode-spänning för summan av tre balanserade sinusvågor, som är förskjutna med 120 grader relativt varandra blir alltid noll, se figur 7. Däremot kan växelriktarens omkoppling leda till att mindre spänningsskillnader uppstår i systemet. Detta resulterar i potentialskillnader i den gemensamma punkten i en y-kopplad motor och summan blir inte längre noll. [14]



Figur 7: Tre fasförskjutna rena sinusvågor.

I figur 7 ser man de tre sinuskurvor som är fasförskjutna 120 grader relativt varandra. Resultatet blir att summan av dessa tre förskjutna fasströmmar blir noll oavsett var på axeln strömmen studeras, i figur 7 syns en heldragen linje vid nollnivå som styrker att medelvärdet av de tre signalerna (enligt formel 2.1) stämmer.

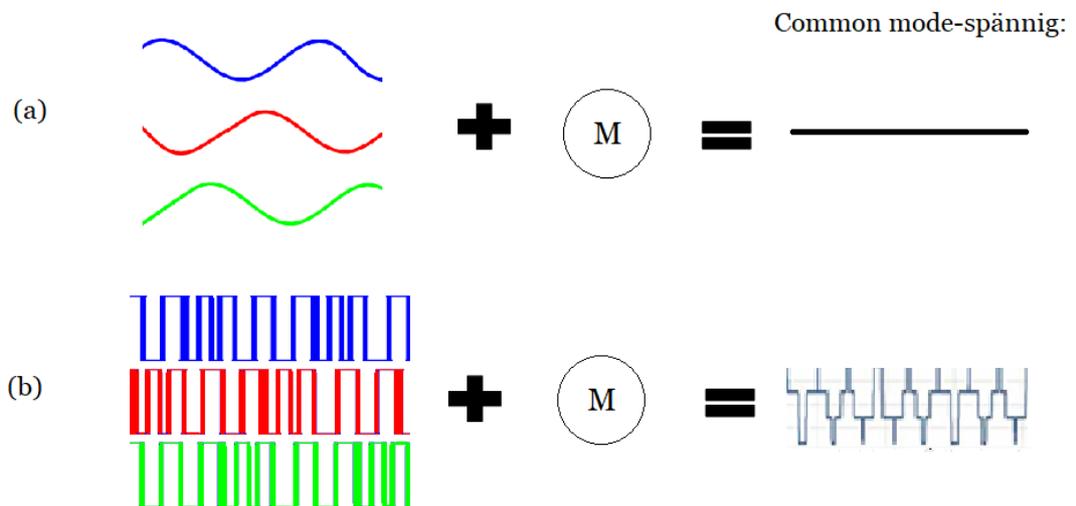


Figur 8: Närbild visar att common mode-spänning blir noll vid ren sinusform.

En närmare bild av figur 7, är synlig i figur 8. Vid ett momentanvärde i figuren, symboliserar nod nummer 1 med en röd asterisk på koordinaten (0.25, 1) och representerar även toppvärdet för fasen utan någon fasförskjutning. Nod nummer 2 är ett momentanvärde vid samma tillfälle, markerad med en röd cirkel i figur 8. Denna koordinat markerar var de två fasförskjutningarna gemensamt möts i punkten (0.25, -0.5). Resultatet av att addera strömmen vid den röda asterisken = 1 och den röda cirkeln =  $2 \times (-0.5) = -1$ , blir noll.

Växelriktaren ger som presenterat upphov till en hackig ström som motorn matas med (se avsnitt 2.2.2). Resultatet av den icke rena sinusformade matningen resulterar i att en störning uppstår. Denna hackiga strömmen stör matningen av motorn som i sin tur leder till att motorn inte drivs kontinuerligt med jämna strömmar.

Denna typ av representation av en sinusvåg är därför nödvändig eftersom likströmmen från elfordonets batteri först måste omvandlas till en trefas sinusvåg. Enligt representation av figur 4, visar figur 9 hur motorns matningsström påverkas vid varierad common mode-spänning. I figur 9(a) presenteras en common mode-spänning på noll, alltså ingen störning på matningsströmmen. I figur 9(b) presenteras däremot en oregelbunden common mode-spänning som påverkar motorns matningsström. Vidare leder denna störning, orsakad av växelriktaren till oönskade strömmar som huvudsakligen orsakas av att växelriktarens utgång har en ojämn elektrisk belastning (se avsnitt 2.2.1).



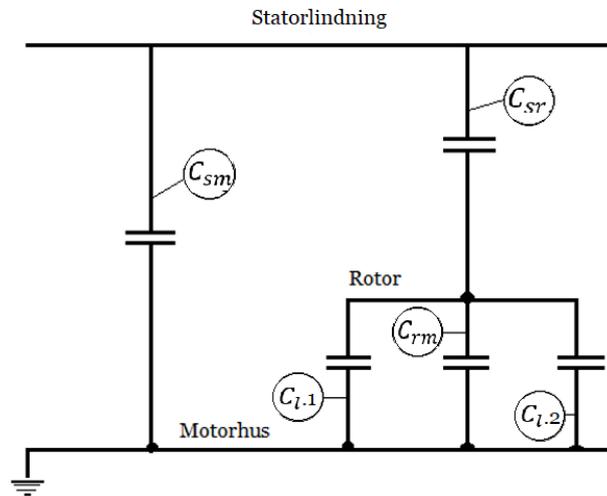
Figur 9: (a) Common mode-spänning av balanserad trefas sinusvåg, (b) Common mode-spänning av obalanserad PWM-signal

Växelriktaren skapar en utsignal vars vågform liknar rektangulära pulser med en varierade bredd. Den resulterande spänningen i neutralpunkten och jord blir inte noll av dessa pulser, som i en balanserad trefas. Resultatet är en trappfunktion som visas i nedre delen av figur 9. Common-mode spänningen kan orsaka en rad skador på motorlager och förkortad livslängd av motorsystemet. [27]

#### 2.2.4 Motorkapacitanser

För en elmotor som drivs av en obalanserad signal påverkad av växelriktaren och common mode-spänningen blir motorkapacitanser inuti motorn mellan olika beståndsdelar av intresse [14]. Anledningen är för att varje kapacitans behöver laddas om på nytt, vid varje trappsteg som common mode-spänningen genererat. Inuti motorn isoleras beståndsdelarna från varandra, likt en strömbrytare. Dessa motorkapacitanser är ofrånkomliga kapacitanser, kallas strökapacitanser och uppstår mellan isolationsgapet. I detta kapitel kommer därför fyra olika motorkapacitanser att presenteras övergripande.

Figur 10 visar en schematisk bild över hur en elmotor ser ut på insidan och huvudsakliga kapacitanser som är av vikt.



Figur 10: Vanliga kapacitanser representerade i motortypen PMSM.

Den första kapacitansen som i figur 10 är markerad med ( $C_{sm}$ ) uppstår mellan varje statorlindning per fas och motorhuset. Den brukar även kallas statorlindning-motorhuskapacitans och beräknas mellan det jordade motorhuset och statorlindningens höga spänning. Varje fas är isolerad via statorlindningen. Den andra kapacitansen som är markerad ( $C_{sr}$ ) i figur 10 skapas mellan statorlindning och rotor. Denna kapacitans kallas därför statorlindning-rotorkapacitans. Ytterligare en kapacitans mellan rotor och motorhuset, markeras med ( $C_{rm}$ ) i figur 10. Denna kapacitans uppstår i utrymmet mellan rotorn och motorhuset, därför brukar denna kapacitans även kallas rotor-motorhuskapacitans. [14]

Slutligen är det lagerkapacitanserna som byggs upp över motorns båda lager. Lagerkapacitansen i en motor påverkas av smörjmedlets isolerande förmåga i motorlagret, eftersom lagret kan liknas vid en kondensator om smörjmedlet inte är kontaminerat. Denna kapacitans kortsluts vid en stillastående motor på grund av metallisk kontakt inom lagren. Dessa kapacitanser är markerad med ( $C_{l.1}$ ) och ( $C_{l.2}$ ) i figur 10. ( $C_{l.1}$ ) representerar den drivande änden av motoraxeln medan ( $C_{l.2}$ ) representerar den icke drivande änden av motoraxeln, men antas vara av samma värde. [14]

I figur 10 fungerar kapacitanserna  $C_{sr}$ ,  $C_{rm}$  och  $C_l$  som en spänningsdelare. Detta i form av en ekvation mellan lagerspänningen över common mode-spänningen från statorlindning till motorhuset. [14] Förkortat betecknas formeln BVR (eng. *Bearing Voltage Ratio*) och beräknar motorkapacitansernas påverkan (formel 2.2). [14], [31]

$$BVR = \frac{\text{Lagerspänning}}{\text{CM-spänning statorlindning}} = \frac{V_b}{V_{com}} = \frac{C_{sr}}{C_{sr} + C_{rm} + 2C_l} \quad (2.2)$$

Lagerkapacitanserna som beskrivits påverkas av motorns varvtal och lagrets placering (drivande eller icke-drivande ände). Därför förenklas formel 2 till två lika stora lagerkapacitanser ( $2C_l$ ) i nämnaren.

### 2.3 Lagerströmmar

Lagerströmmar är ett fenomen som varit känt i över 100 år [32]. Lagerströmmar kan ses som strömmar som tar oönskade vägar och kan ha olika orsaker. I elmotorn finns bland annat cirkulerande strömmar som går genom motoraxeln. Denna ström medför ett spänningsfall mellan motoraxeln som kan mätas mellan dess båda ändar. I [14] förklaras att den förväntade axelspänningen också kan orsaka en typ av lagerström i motorn. För att dessa lagerströmmar ska kunna flyta krävs att spänningen över lagret överstiger det specifika smörjmedlets isolerande tröskelvärde. I sådana fall kommer smörjmedlets isolerande egenskaper att försämrats eftersom motoraxeln utsätts för en högre spänning och en gnista eller elektrisk urladdning uppstår i lagret. Smörjmedel där en blixtnedslag kan jämföras med en brännkada. Gnistan påverkar därför smörjmedlet kemiskt så att dess isolerande förmåga blir sämre. [14]

Smörjmedlets isolerande egenskap minskar eller upphör då motoraxeln utsätts för en spänning över tröskelspänningen. Lagret fungerar på grund av detta som en kapacitans [14], som vidare ger upphov till en elektrisk urladdning, även kallad gnista. Orsaken är att ström flödar genom lagret på oönskade sätt. Ytterligare kan detta slitage leda till att lager förstörs i förtid, vilket till slut kan resultera i ett tidigt haveri av motorn. [33] Motorlager är isolerade med någon typ av smörjmedel (fett eller olja). Vid en högre spänning mellan motorhus och rotor uppstår en blixtnedslag. Denna blixtnedslag orsakar i sin tur någon typ av skada på lagret [34].

De skadliga lagerströmmarna är elektriska urladdningar som resulterar i en gnista [34]. Dessa urladdningar kan bero på flera orsaker, som exempelvis elektrisk störning från externa källor. Vidare kan designen och konstruktionen av motorn påverka ursprunget av lagerströmmar. Om jordningen av motorn inte är korrekt eller om isoleringen är dålig i motorn kan lagerströmmar uppstå.

Lagerströmsproblemet kan visa sig genom skador på motorns lager eller omkringliggande mekaniska komponenter. Då dessa oönskade strömmar flyter genom motorns lager kan värme uppstå vilket kan leda till slitage på lagerbanorna och i värsta fall kan urladdningar i form av gnistor eller ljusbågar uppstå. Det mest typiska lager-skadorna kan leda till vibrationer i motorn och därmed en kortare livslängd hos maskinkomponenterna. Fortsättningsvis kan detta resultera i motorhaveri, ett ökat servicebehov och därmed ökade kostnader. I avsnitt 2.3.2 presenteras mer information om olika typer av lagerskador och hur de visar sig.

A. Muetze betonar i [14] att nya iakttagelser om lagerströmmar har gjorts under de senaste 20 till 30 åren. Lagerströmmar orsakas av växelriktare innehållande elektriska komponenter (till exempel IGBT-transistorer) med hög switchfrekvens.

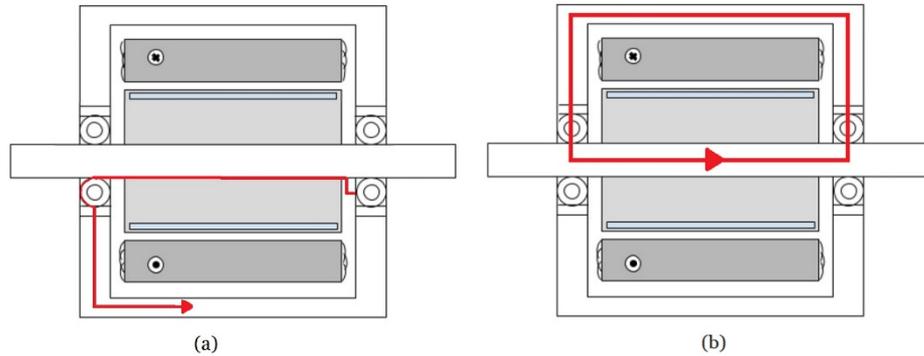
### 2.3.1 Vanliga typer av lagerströmmar

Lagerströmmar finns i olika typer, vanligt är att de kategoriseras i cirkulerande och icke-cirkulerande strömmar [35]. Lagerströmmar kan identifieras utifrån strömmens vågform men även faktorer som varvtal, temperatur och frekvensintervallet har betydelse [36].

Enligt [35] beskrivs icke-cirkulerande strömmar dels som små kapacitiva lagerströmmar samt de skärande elektrostatiska urladdningarna (eng. *electrostatic discharge machining (EDM)*). De små kapacitiva strömmarna uppstår på grund av omkopplingen orsakad av common mode-spänningen (se avsnitt 2.2.3). Strömmen cirkulerar mellan statorlindningen, rotorn, motorlagren och motorhuset.

EDM-strömmar uppstår när lagrets smörjmedel inte längre fungerar korrekt, till exempel om smörjmedlet förorenats av bland annat små metalliska partiklar [14], [35]. Dessa partiklar uppstår vid mekanisk förslitning när lagret utsätts för påfrestning. Resultatet blir ledande egenskaper i smörjmedlet som kan resultera i att tröskelspänningen för smörjmedlet i lagret överstigs och smörjfilmen bryts ned. I samband med detta uppkommer en gnista som leder till skada på lagret. Bland annat spelar kapacitansen mellan rotor och motorhus en stor roll för EDM-strömmarna och därmed förslitningarna, detta eftersom den elektrostatiska urladdningen frigörs när kortslutning i lagret uppstår och flyter mellan rotor, motorlager och motorhuset. EDM-strömmarnas cirkulerande strömslinga presenteras i figur 11(a). Om ett motorlager utsätts för EDM-strömmar, utsätts lagret för en påfrestande ström. Enligt [36] kan strömmamplituden variera mellan 100 mA till några A och uppstår inte över ett motorvarvtal på 2000 rpm.

Cirkulerande lagerströmmar (eng. *circulating bearing currents*) kommer in på en plats och ut på en annan. Strömmen passerar lagren via motorhuset från den ena änden av motoraxeln till den andra. Figur 11(b) visar de cirkulerande lagerströmmarna markerade med rött. Denna typ av lagerström uppkommer då varvtalet är lågt och temperaturen hos lagret är högt och den isolerande egenskapen i smörjmedlet är för liten och metallisk kontakt inom lagret uppstår. [14], [33], [35].

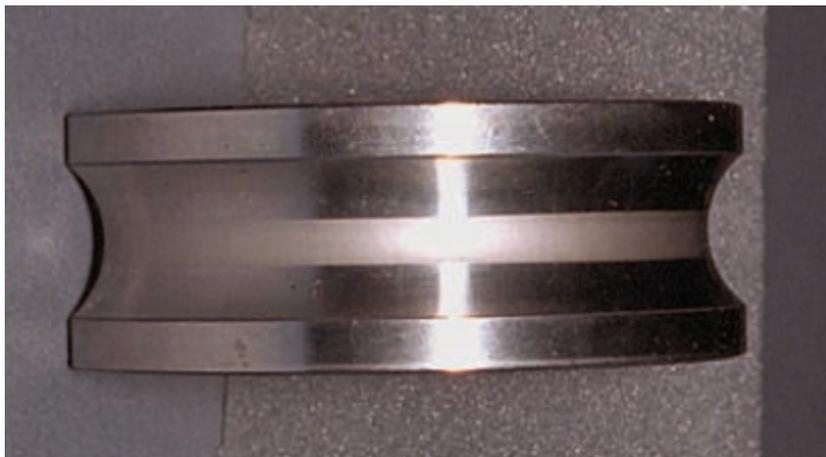


Figur 11: Illustrerad motor där EDM-strömmarna är synliga i rött i figur (a) och de cirkulerade strömmar är synliga i rött i figur (b).

### 2.3.2 Vanliga lagerskador

I elektriska motorer kan elektriska urladdningar uppstå i dess lager [34]. De lagerskador som då uppstår, beskrivna i exempelvis [37], rapporterades först när pappersmaskiner blev stillastående och underhållskostnaderna ökade [37]. Vidare beskrivs i [37] sambandet mellan tillämpningen av AC och DC. Grundprincipen är att kullagrets olika beståndsdelar hålls åtskilda av en mycket tunn smörjfilm med isolerande förmåga. Smörjmedlets isolerande egenskaper kallas dielektrisk styrka (eng. *dielectric strength*) med enheten V/m och beror på tjockleken och aktuell spänning över lagret. Detta är vad som kan resultera i en mycket liten ljusbåge eller blixthändelse, som skapar en mindre ojämnhet eller urgröpning på både lagerbana och kula. Fenomenet kan liknas med en sammansvetsning av dessa beståndsdelar och med anledning av motorlagrets hastighet slits loss. Uppkomsten av lagerskador uppstår framförallt vid de punkter smörjmedlet är som tunnast och lagret utsätts för störst påfrestning. Nedan beskrivs tre vanliga typer av lagerskador: *frosting*, *fluting* och *pitting*.

*Frosting* är den första och vanligaste lagerskadan. Det uppstår på grund av ofta återkommande elektriska urladdningar som skapar en beläggning på lagerkulan. Resultatet blir att kulornas ytskikhårdhet minskar och utsätts för mindre kratrar, något som för blotta ögat påminner om en tunn, jämn hinna. Hinnan blir synlig eftersom kulan blir matt och kan åtskiljas av en färgförändring, se figur 12. Följden blir en mekanisk förslitning eftersom formen på kulan deformeras och lagerytan mellan kula och lagerbanan blir mindre. [34]



Figur 12: Matt inre kullagerbana på grund av frosting-skada. Copyright © 2002, IEEE [37]

En annan typ av skada kallas *fluting*. *Fluting* är också en vanlig men allvarligare skada vid periodiska strömmar vars främsta orsak tros bero på kapacitiva kopplingar [37]. Ord som används för att beskriva detta fenomen är ”lagerräfflor” eller ”tvättbrädemönster”, som är synliga i figur 13.



Figur 13: Lagerbana med synlig fluting-skada. Skadan syns genom de små ovala räfflorna, som inte uppkommer i ett oskadat lager.

Jämmt fördelat över kullagret uppkommer ett skrapmönster över hela lagerbanan, se figur 13. En vanligt förekommande orsak till dessa räfflor i växelströmsmotorers lager beskrivs vara kapacitiva urladdningar. Samband mellan flutingskador och smörjmedlets isolerande förmåga har identifierats genom studier [37]. Omfattningen av lagerskador har korrelerats med kontaktytan hos kulorna och resultatet beror på lågt motstånd och kontaminerat smörjmedel vars isolerande förmåga vid elektriska urladdningar försämras.

Sambandet mellan varvtal och lagerskador presenterades enligt [37], där det framgår att *fluting* och *frosting* är två typer av lagerskador vanligt förekommande hos motorer som utsätts för olika körmönster. Vidare skriver de att *frosting* ofta uppstår vid elektriska urladdningar då motorvarvtalet är varierande.

Lagerskadan elektrisk *pitting* ger skador på metallytan och påminner om *frosting*. Gropbildningen är intensivare jämfört med *frosting* eftersom skadan uppstår på grund av en högre elektrisk strömamplitud under en längre tid via lagrens isolerande smörjmedel. Resultatet blir färre men större kratrar som uppenbaras i ett oregelbundet mönster. [34]

I [38] beskrivs att denna typ av lagerskada är en bidragande faktor till oönskade vibrationer i lagret hos elektrifierade fordon och i traktionsmotorer i lok. Orsaken beror på den deformerade ytan som genererar ljud och det isolerande smörjmedlet kontamineras av metallpartiklar från gropbildningar.

### 2.3.3 Förebyggande åtgärder

Flera olika åtgärder kan användas för att förebygga och kontrollera uppkomsten av elektriska lagerskador. Enligt ABB [39] är en åtgärd att montera ett isolerande lager på motoraxelns vardera änden. Viktigt är att båda lagren är isolerade, detta är dock inget som rekommenderas av ABB eftersom det kan leda till andra skador i systemet. Ett annat rekommenderat alternativ är hybridlager, som presenterats under avsnitt 2.1.2. Ytterligare en åtgärd är att ansluta en koppling mellan motoraxel och applikationen, vilket gör det möjligt att isolera lagerströmmarna. Detta kräver en kombinerad lösning med hybridlager. Kopplingen mellan motoraxeln och applikationen anses vara en säker lösning. [39]

Förutom användandet av ett isolerande lager, hybridlager och en isolerande koppling mellan motoraxel och kardanaxel är en ytterligare åtgärd att montera en jordningsring på motoraxeln. Jordningsringen används för att förflytta elektrisk ström från en extern energikälla till motorn, för att avleda lagerströmmar från lagren i motorn och istället till motorhuset. Till utseendet ser en jordningsring ut som en stor plan bricka med mindre borstar längs med hela insidan. Denna lösning påstås vara effektiv. [39] Jordningsringen har låg resistans, och principen är att montera den på exempelvis motoraxeln eller navet för att skapa en minsta motståndsväg. På så sätt avleds strömmen från att inte flyta genom lagret.

#### 2.3.4 Metoder för att mäta lagerströmmar

Lagerströmmar kan mätas på flera olika sätt. Under följande avsnitt kommer olika mätinstrument kort att presenteras. Det finns flera olika typer av strömtänger, vars konstruktion är en kombination av sensorer som mäter ström och en multimeter [40]. Nedan listas tre olika typer:

- *Strömtransformatorång*
- *Halleffektströmtång*
- *Flexibel strömtång (Rogowskispole)*

Strömtången innehållande en strömtransformator är en vanligt förekommande strömtång som används för att mäta växelström (AC). Denna strömtång har en klämma som kläms runt ledaren vars ström ska mätas. I vardera del av klammern sitter en kärna av magnetiskt material med koppartråd lindad runt kärnan. [41]

En annan typ av strömtång är den strömtång som innehåller en halleffektsensor. Denna typ av sensor känner av magnetfältet och sitter på ena sidan magnetbanan. Halleffektsensorer kan mäta både växelström och likström (AC och DC), till skillnad från föregående som endast fungerar vid växelström. Även denna typ av strömtång är uppbyggd av en kärna av magnetiskt ledande material. Sensorn är en halleffektgivare. [42]

Den tredje typen av strömtång, mäter endast växelström likt strömtransformator-tången som först presenterades. Till skillnad från de två tidigare presenterade strömtångerna består inte denna strömtång av någon klammer med järnkärna [43]. Istället är det en spole med lindningar över hela kärnan, vilket gör strömmätningen mer flexibel, eftersom den kan föras runt större ledningar och stora magnetfält. Som ett exempel kan Rogowskispolar placeras i motorhuset runt motoraxeln i närheten av motors båda lager [44], till skillnad från föregående mätinstrument där detta inte är möjligt.

Ström shunt är inom elektroniken ett lågt mätmotstånd som används för att mäta ström. Ström fås genom mätning av spänningsfallet, ett exempel på ström shunt är 60mV/200A. Syftet är att den elektriska strömmen ska kunna passera detta låga motstånd och på så sätt kan strömmen mätas över motståndet. Även mätning av spänningen är vanligt eftersom lagerströmmar framförallt framkallas av en elektrisk spänningsurladdning (se avsnitt 2.3.1). Principiellt sker mätning av spänning med en typ av glidande kontakt ansluten till motoraxeln.

## 2.4 Lagerströmsmätningar på Scania

I detta avsnitt kommer provobjektet och mätuppställningen för hur Scania genomfört mätningar av lagerströmmar presenteras.

### 2.4.1 Provobjekt

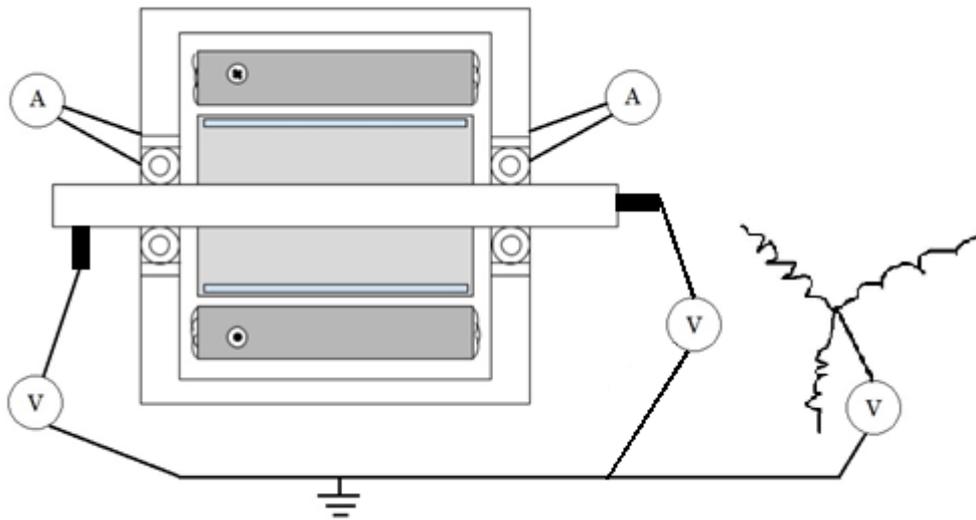
Detta projekt studerar Scantias senaste generation elmotor med hjälp av en testrigg. I arbetet användes både tidigare insamlad data men också ny datainsamling. Den första mätningen som används i detta utvecklingsprojekt utfördes under hösten 2022, men eftersom mätningar sker fortlöpande finns även senare mätningar från våren 2023. Mätdata sparas för att möjliggöra jämförelse olika mellan provobjekt.

Under produktutvecklingens gång har Scania upptäckt att det uppstår lagerströmmar i motorn. För att klargöra situationen om lagerströmmar har tre provobjekt undersökts. Det första provobjekt är en helt oskyddad motor med ställager där inga förebyggande åtgärder vidtagits. De andra två provobjekten är olika varianter av motorer med olika åtgärder mot lagerströmmar. På det första provobjektet identifierades lagerskador vid demontering och en jordningsring monterades i utbildnings-syfte, innan mätningarna genomfördes på nytt. Syftet var att förhoppningsvis kunna se en förbättring vad gäller lagerskador i äldre mätdata jämfört med ny mätdata från samma provobjekt.

Det är inte möjligt att genomföra utvecklingstester eller mäta lagerströmmar utan att modifiera motorn, eftersom mätningar sker i anslutning till lagren som är placerade innanför motorhuset. Mätningen på Scania sker med strömtång och spänningsmätare, ansluten till oscilloskop (se specifikation i tabell 3). Då provobjektet sitter i en motorprovcell är det inte helt komplett i förhållande till hur den slutgiltiga produkten i fordon ska bli.

Vid samtliga mätningar av lagerströmmar på Scania används fyra mätpunkter. Mät-punkterna på motorn visas i figur 14, där strömtången symboliseras av 'A' och spänningen mäts vid markeringarna 'V'. För att kunna mäta strömmen över lagret, är det isolerat. Genom att tvinga strömmen att flyta genom en mätkabel kan strömtången beskriven i tabell 2 klämmas runt kabeln. Vid mätning av axelspänningen används ett grafitstift och en spänningsmätare. Det tredje V:et är inritad i figur 14 i syfte att symbolisera mätning av common mode-spänningen.

Scantias elmotorer ska användas i syfte av framdrivning av tunga elfordon. I slutprodukt kommer fordonet att drivas av batteri, men vid mätningar av provobjektet används en batterisimulator för önskad batterispänning i syfte att efterlikna förväntad batterispänning. Elmotorns effekt uppges vara omkring 300–400 kW och av motortypen PMSM.



Figur 14: Bild som visar placering av mätpunkter på Scantias elmotor.

#### 2.4.2 Mätutrustning

Den mätutrustning som används vid mätning av lagerströmmar är strömtången i tabell 3. Data som samlas in kan förhoppningsvis indikera på något eller några samband som visar på en tendens till något fenomen eller beteende. Inställningarna på oscilloskopet är valda för att ge en bra upplösning av blixurladdning och presenteras i tabell 2.

Tabell 2: Inställningar på oscilloskop

Beteckning och namn	Samplingsfrekvens	Antal mätpunkter per fil
Tektronik 5 series B MSO Mixed Signal Oscilloscope	62.5 MHz	1 000 000

Tabell 3: Teknisk data för aktuell strömtång

Beteckning och namn	Strömintervall	Strömtyp	Antal mätområden
Kyoritsu Modell 8112	0.1 mA – 120 A	AC	3

#### 2.4.3 Mätning och insamling av mätdata

Mätdata samlas in och lagras med hjälp av ett oscilloskop. All mätdata som är insamlad sker under samma förutsättningar i motorprovcellen. Provobjektet som mätningarna görs på sitter i en stationär testrigg, vilket kan liknas med en hållare för motorn. Varje mätfälle styrs av ett program som sparar mätningen i en mapp som

ger information om vilket provobjekt det var, när mätningen utfördes och vilken önskad temperatur på oljan som efterfrågades. I varje mapp sparas 66 filer med mätdata i med tre olika batterispänningar till motorn och elva olika varvtal, i intervall om 500 varv per minut (rpm) mellan 0 – 5000 rpm. Varje varvtal mäts vid två tillfällen. Först vid upptrappning och sedan vid nedtrappning av varvtalet.

Med hjälp av ett mätsystem i provcellen för elmotorerna uppmäts ett ärvärde hos motorn under testning. Mätsystemet mäter blanda annat motorns ärvärde för varvtal och temperatur, och inte det förväntade börvärdet. På så sätt kan även samband jämföras om när en mätning togs hade betydelse. Från varje fil med mätdata kan metadata plockas fram, till exempel varvtal när mätningen gjordes, aktuell motor-spänning, index för mätvärdet och självaste mätvärdet.

Alla mätningar av lagerströmmar på Scania genomförs med strömtänger. Även mätning av spänning är vanligt i lagerströmssammanhang och aktuell motorspänning mäts och lagras. Sortering av mätdatafilerna är således möjlig att göra på olika parametrar som motorvarvtal, spänning och motorgeneration. Mätningen påbörjas inte innan motorn kommit upp i vald temperatur.

## 2.5 Signalbehandling

### 2.5.1 Brus

Karaktären av mättekniskt brus skiljer sig från olika mätare. På utsignalen kan högfrekventa störningar (även kallat mätbrus) uppstå. Ett tillvägagångssätt för att minska detta brus i en signal kan vara genom att använda ett lågpasfilter [45].

Begreppet mätstörning innebär oönskad avvikelse eller felaktighet vid mätning av signal. Detta är av stor vikt att vara uppmärksam kring eftersom mätstörningen kan påverka avläst resultat. Dessvärre är det mycket svårt att helt eliminera mätstörningar, eftersom dess karaktär kan variera beroende på störningens källa. Viss mätstörning hos mätinstrument kan förebyggas genom en ordentlig mätuppställning och inställning, genom att läsa manualen. [45]

Ibland är amplituden på det som eftersöks större än bruset. Vanligt brus är inte intressant, bara om dess amplitud är högre än något som anses vara intressant. (gränsen för intressant är tre standardavvikelser). Vanligt brus, som vanligtvis ligger inom normalfördelningen är inte intressant i detta examensarbete.

Genom att försöka identifiera toppvärdet kan en frekvens beräknas för signalen, dock finns en risk för att mätfel uppstår om lagringen av mätvärden görs för sällan. Detta innebär att toppvärdet kan missas även om mätningar görs regelbundet men inte tillräckligt ofta.

### 2.5.2 Nyquist-satsen

Den högsta frekvensen i mätdata som kan urskiljas begränsas av Nyquist-kriteriet, i syfte att inte gå miste om information (formel 2.3).

$$f_{\text{sampel}} \geq 2 * f_{\text{max}} \quad (2.3)$$

där  $f_{\text{sampel}}$  är samplingsfrekvens och  $f_{\text{max}}$  representerar maximal frekvens hos signalen. Nyquist-frekvensen bestäms av samma formel men omskriven med variabeln  $f_{\text{Nyquist}}$ , se formel 3:

$$f_{\text{Nyquist}} = f_{\text{max}} = \frac{f_{\text{sampel}}}{2} \quad (2.4)$$

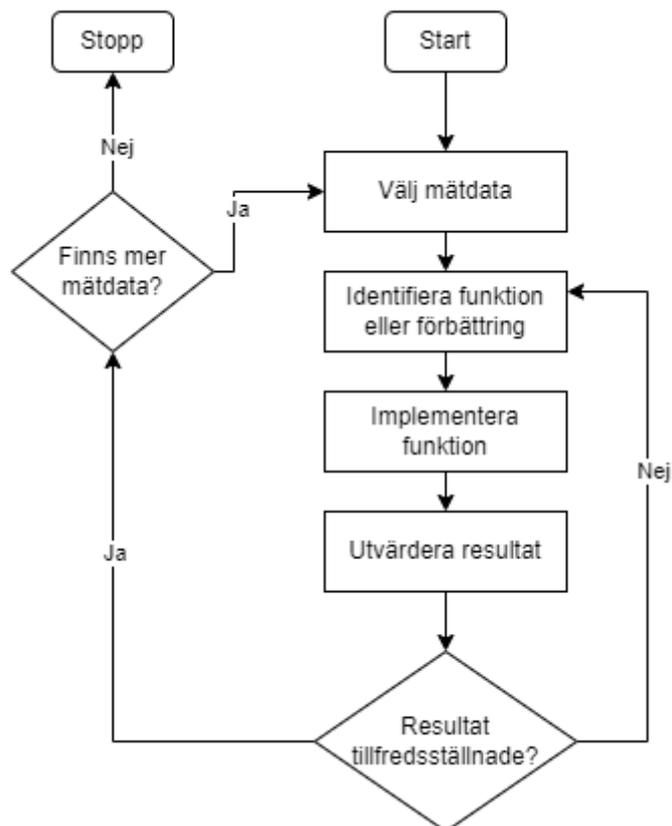
Med andra ord tyder formel 2 och 3 på att frekvenser över  $\frac{f_{\text{sampel}}}{2}$  inte kan urskiljas. Genom att begränsa mätbandbredden till halva samplingsfrekvensen är det möjligt att återskapa ursprungssignalen. [47], [48]

### 3 Metoder och resultat

Utifrån bakgrund och tidigare arbete kommer i detta kapitel en metod att introduceras för att kunna jämföra antalet lagerströmmar mellan olika motorgenerationer. Metoden utvecklades i samarbete med Scania CV i Södertälje. Först presenteras den generella metoden, därefter implementeras metoden i Matlab för att utveckla verktyget och resultaten redovisas.

#### 3.1 Överblick

Först genomfördes en litteraturstudie för att skapa en större förståelse av problemet. Därefter valdes lämplig testdata ut av de olika mätdata som tillhandahölls för projektet. Vidare kunde ett verktyg utvecklas för att bearbeta utvald data. Under arbetets gång lades flera funktioner till i verktyget, baserat på projektets behov och tidigare forskning. Verktyget testades och utvärderades kontinuerligt, och vid behov genomfördes finjusteringar av verktyget. Metodiken beskrivs även visuellt i figur 15.



Figur 15: Iterativ process av metod för att identifiera lagerströmmar utifrån mätdata.

För att identifiera lagerströmmar med den presenterade processen i figur 15, påbörjades processen vid start. Först behövde en avgränsning ske av vilket mätdata som skulle undersökas, när detta val hade gjorts uppstod behovet att identifiera en funktion. När funktionen hade identifierats ska den implementeras i valt program. Därefter utvärderades resultatet som blev av den implementerade funktionen innan frå-

gan ställdes om resultatet var tillfredställande. Om inte, skulle vidare funktioner eller förbättringar läggas till men om resultatet ansågs tillfredsställande kunde metoden beprövas med en ny avgränsad mängd mätdata, alternativt stoppas processen.

### 3.2 Val av mätdata

Examensarbetet bygger på befintliga inställningar av oscilloskopet och de redan valda mätpunkterna på motorn (se avsnitt 2.4.1). Syftet var för att arbetet inte skulle bli för omfattande. Även om ny mätdata samlades in kontinuerligt från provobjekten skedde analysen på specifik mätdata som redan var insamlad. Mätdata som valdes för detta projekt var strömmätningar vid olika varvtal.

För att utveckla verktyget användes två sorters data: En sorts data är exempeldata, det vill säga manuellt genererad testdata. Den andra sortens mätdata är strömmätningar från lagerströmmätningar på det första provobjektet (se avsnitt 2.4.1) med en batterispänning på 650 V. Tillvägagångssättet som användes för att utveckla en första version av verktyget var genom att använda den första sortens data, en mindre mängd godtyckligt valda värden där det förväntade beteendet och resultatet från verktyget var förutbestämt. När verktyget fungerade för dessa godtyckliga värden undersöktes riktiga mätdatafiler i större skala.

Algoritmens uppgift var att identifiera mönster i mätdata. Mönstren bestod av regelbundna men plötsliga och kortvariga förändringar i strömstyrka i relation till olika spänningar och varvtal på provobjektet. För att identifiera mönstren krävdes att någon typ av referenspunkt definierades för att utgå ifrån. Den första referenspunkten var i form av att mätutrustningen (strömtången) endast befann sig i närheten av elmotorn när den kördes. Strömtången var inte ansluten till provobjektet, utan endast till oscilloskopet. På så sätt kan denna mätdata användas för att jämföras mot data med brus i.

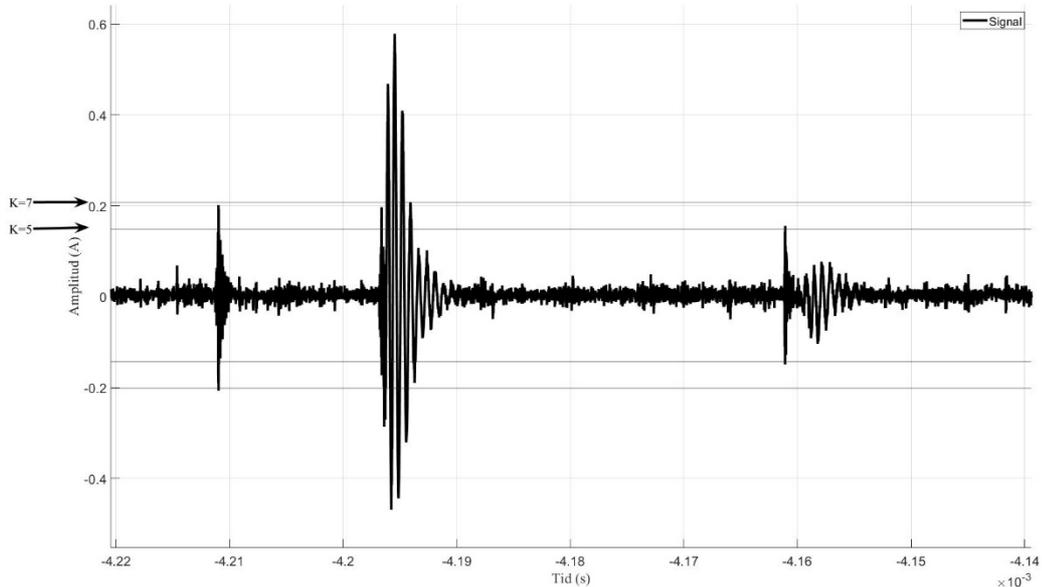
Innan arbetet av jämförelse och analys påbörjades beräknades en ny vektor i Matlab i syfte att filtrera den valda strömmätningen genom att lågpasfilter. Detta gjordes för att eliminera en del av det uppfångade bruset, i syfte att uppnå ett tydligare resultat när verktyget började användas.

### 3.3 Identifiera lagerströmmar

I detta avsnitt kommer stegen som togs vid utveckling av mjukvaran som identifierar lagerströmmar att presenteras (se bilaga A för ett urklipp av skriptet). Kapitlet börjar med att definiera vad det är som ska urskiljas ur mätdata, för att sedan presentera algoritmen och resultat av att bearbeta mätdata med det utvecklade verktyget.

### 3.3.1 Definition av blixthändelse

Definitionen av en blixthändelse i mätdata har i detta arbete valts att definieras som ett godtyckligt antal mätvärden som ligger utanför ett godtyckligt gränsvärde. I figur 16 ser vi ett exempel på mätdata från ett provobjekt.



Figur 16: Figuren visar en störning av ett exempel på verklig mätdata från ett av provobjekten.

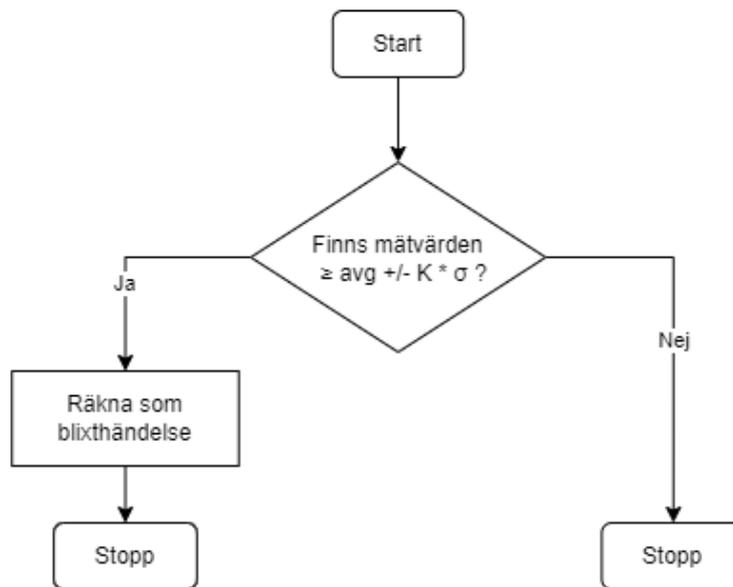
I figur 16 kan blixthändelserna urskiljas av en stor och plötslig oscillation i mätvärdena för strömmen. Om kullagret utsätts för en blixthändelse, tar det en stund innan svängningarna stabiliserats. Detta i sin tur innebär att även om det endast är en händelse kan flera svängningar uppstå. På grund av gränsvärdena har flera mätvärden utanför gränsvärdet kunnat räknas som endast en blixthändelse istället för ett större antal mindre händelser.

### 3.3.2 Variabeln K

Algoritmutvecklingen påbörjades när mätdata valts och en blixthändelse definierats. Mätdata som valdes var den senaste mätningen som gjorts av ström vid en viss spänning och ett visst varvtal. För att kunna urskilja mätpunkter som tillhörde blixthändelser behövdes ett gränsvärde definieras för vad som ska anses vara innanför eller utanför tillåtet område. Gränsvärdet definierades enligt formel 3.1, där medelvärdet ( $avg$ ) av alla mätpunkter plus eller minus ett antal standardavvikelser ( $\sigma$ ). Detta godtyckliga antal standardavvikelser beslutades för att definieras som variabeln K.

$$\text{Gränsvärde} = avg \pm K * \sigma \quad (3.1)$$

K bestämdes genom att en normalfördelning av filtrerat mätdata plottades i form av ett histogram. Visuellt var det möjligt att studera histogrammen med majoriteten av värdena i närheten av mitten och de lägre talen på x-axeln. I histogrammet sågs att majoriteten av värdena sker omkring eller under tre standardavvikelser. Vidare styrker det argumentet att inte sätta K lägre än tre, som utgångspunkt sattes därför ett minsta värde av K till tre. Anledningen är att för att data som ligger under denna gräns sannolikt fortfarande visar stora delar brus. Värden som däremot urskiljer sig är unika och därför av vikt att observera. Som förtydligande skulle ett K-värde lägre än tre inte vara dugligt. Metoden för att identifiera blixthändelser med hjälp av K-värdet beskrivs i flödesschemat nedan, figur 17.

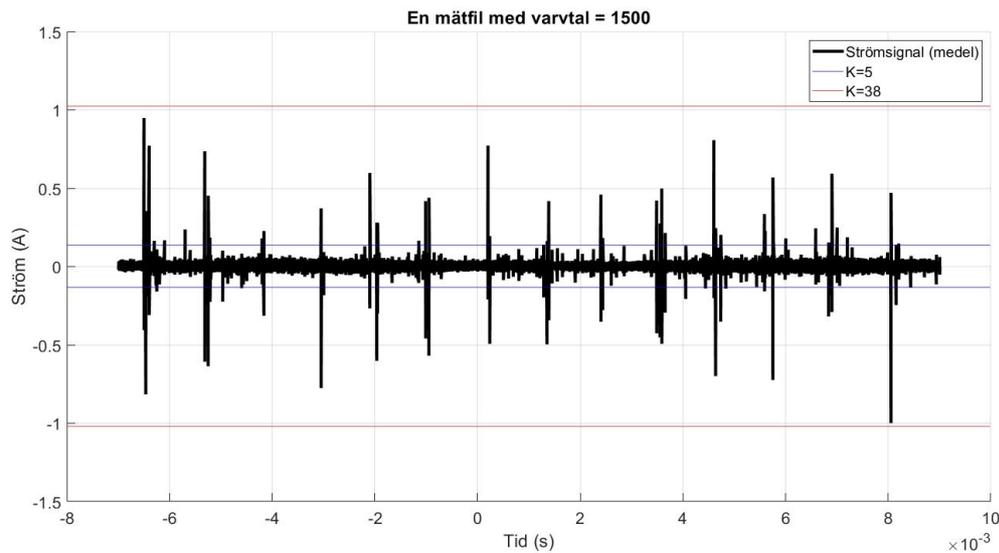


Figur 17: Metod för att identifiera blixthändelser med hjälp av ett godtyckligt antal standardavvikelser.

Figur 17 visar metoden för att hitta blixthändelser i mätdata med hjälp av variabeln K. Algoritmen som implementerades undersöker alla mätvärden och klassificerar värden som ligger utanför gränsvärdet, enligt formel 3.1 som en blixthändelse. Om mätvärdet däremot inte ligger utanför gränsvärdena avslutas processen.

Vidare undersöktes vilken påverkan K-värdet hade för valt testdata, genom att olika värden på K testades. Värden för K som testades med den utvecklade algoritmen var 3, 5 och 7. Genom att göra på detta sätt kunde ett större mätdataområde täckas.

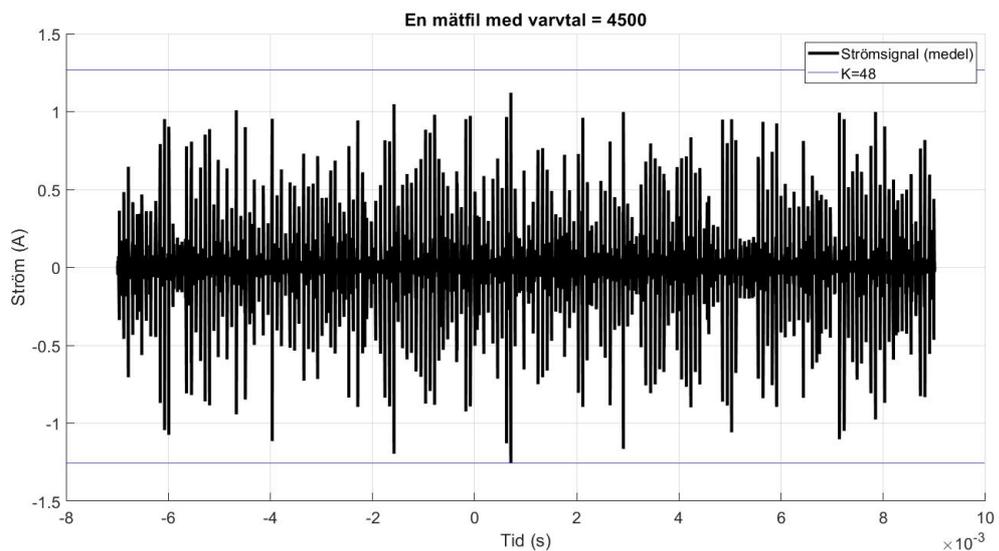
För att verifiera valet av K, skrevs ett skript som kunde köra igenom fler mätdatafiler med bestämt K-värde. Då minimumvärde för K redan var satt till 3, var nästa steg att bestämma möjligt maximumvärde för K i vald mätdata. Detta gjordes med hjälp av utvecklad funktion i Matlab i syfte att få en antydning på maximalt värde. Som ett exempel gav varvtalet 1500 rpm och spänningen 650 v ett maximalt värde på K=37. Med andra ord skulle K-värden över detta skulle svaret bli noll identifierade blixthändelser, detta är synligt i figur 18.



Figur 18: En hel mätdatafil från strömmätning där skillnaden mellan  $K=5$  och  $K=38$  är synliga.

I figur 18 ses en hel mätdatafil, med en miljon mätpunkter plottade, där  $\sigma = 0.03$  A. Nära mitten av signalen syns två blå horisontella linjer, dessa visade var ett gränsvärde på  $K=5$  skulle ligga. Ytterligare visas även en röd linje representerat  $K=38$ , detta innebär att inga mätpunkter och inte heller någon blixthändelser ligger utanför detta gränsvärde eftersom maxvärdet beräknades till 37 i Matlab.

Genom att observera en annan fullständig mätdatafil från när samma motor kördes, men med 4500 rpm gav mätningen ett annat maximalt  $K$ -värde, nämligen 48. I figur 19 visas detta.



Figur 19: En hel mätdatafil från strömmätning där  $K=48$ .

En annan observation är hur mätdatafilerna skiljer sig mycket beroende på vilket varvtal som motorn kördes med. I figur 18 är en mycket tydlig periodicitet synlig för blotta ögat medan i figur 19 är denna periodicitet inte lika tydlig. Om man förstorar

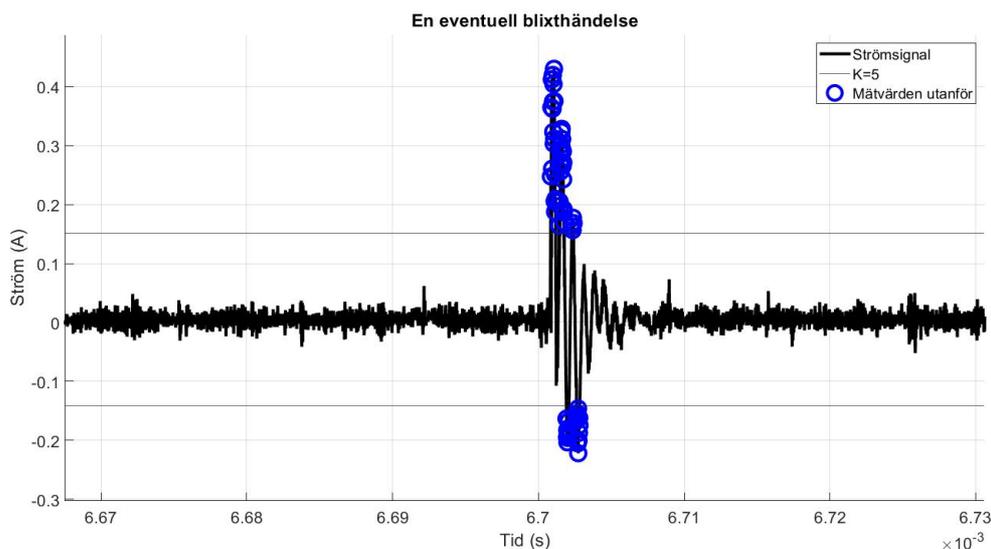
upp figur 19 kan man även för detta varvtal se en tydlig periodicitet, såsom periodiciteten i figur 18 är synlig. Avståndet i tid mellan spikarna för figur 19 motsvarar ungefär 1 ms. Under 0,62 ms gick att se sju avstånd, vilket blir:

$$\frac{0,62 \text{ ms}}{7} = 0,0886 = 88,6 \mu\text{s}$$

88,6  $\mu\text{s}$  motsvarar en frekvens av 11,3 kHz.

Maximala K-värdet varierar mellan olika varvtal och mätningar, därför är det svårt att påstå eller bestämma ett visst värde med de mätningar som för detta examensarbete hunnit genomföras. Å andra sidan är betydelsen av maxvärdet inte alltid av största intresse. Om val av K-värde görs för lågt identifieras en hel del brus, därför rekommenderas ett mellanläge.

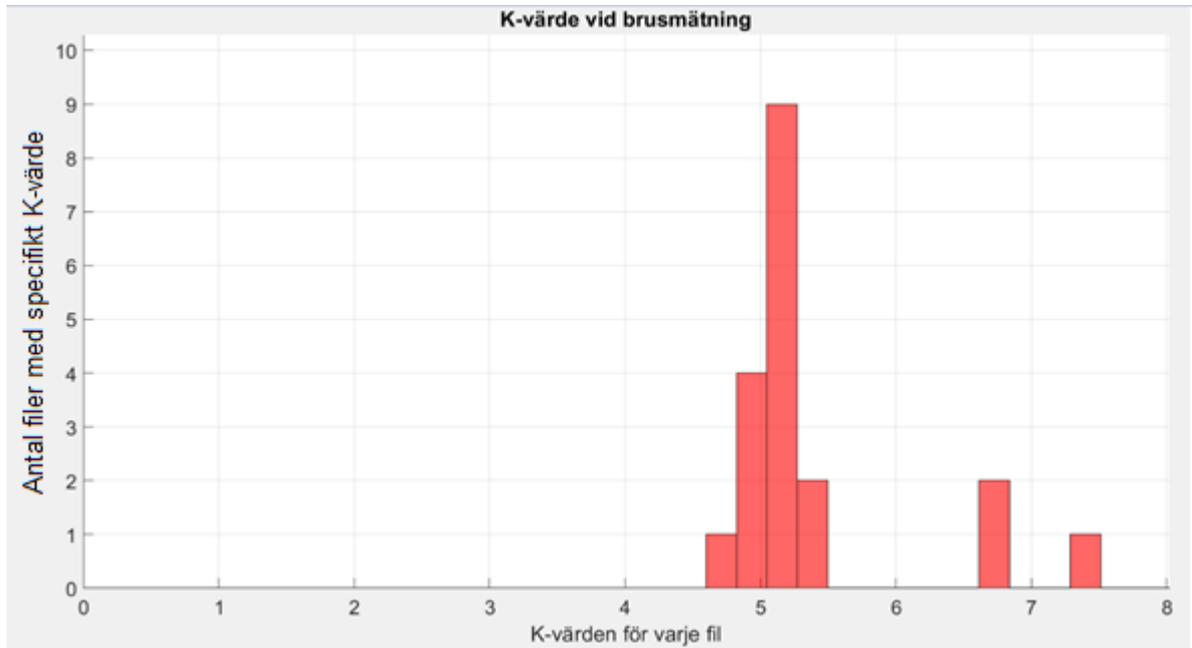
För att testa metoden utvecklades ett Matlab-skript vars funktion till en början verifierades genom de 20 slumpmässiga exempelpunkterna. Efter det bearbetades verklig mätdata vid ett motorvarvtal på 1500 rpm. Resultatet av bearbetningen kan ses i följande figur.



Figur 20: Bearbetning av en del av de verkliga mätvärdena, där de blå cirkelarna symboliserar de mätpunkter som ligger utanför angivet gränsvärde som representeras av de två horisontella linjerna.

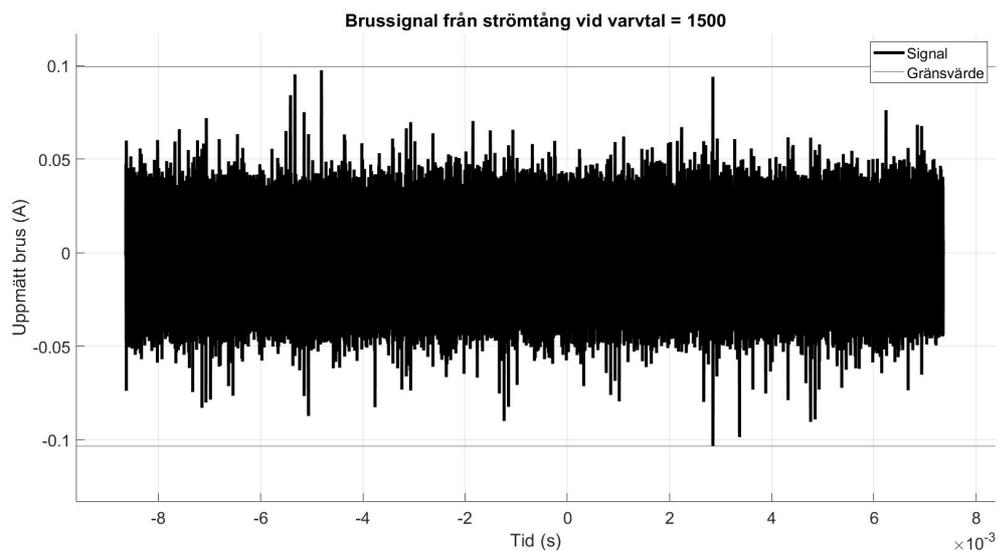
Figur 20 visar varje mätpunkt som befann sig utanför de angivna gränsvärdena markerade med en blå cirkel. Varje mätvärdes index som identifierades utanför angiven gräns lagrades med hjälp av det utvecklade skriptet i en ny variabelvektor med syfte att kunna återanvändas vid utveckling av algoritmen.

Genom att använda referensmätningen då ingen strömtång var kopplad till provobjektet kunde ett maximalt K-värde observeras till 6,7 då varvtalet var 1500 rpm. Mätdata från referensmätningen består således endast av brus som provobjektet och lamporna i testmiljön släpper ifrån sig.



Figur 21: Vanligaste K-värdet är omkring 5,05 – 5,25 vid brusmätning för en serie med prov.

Figur 21 visar en serie mätdatafiler vid brusmätning i syfte att identifiera ett maximalt K-värde när endast strömtången är i närheten av provobjektet och inte ansluten till kabeln på provobjektet. En brusmätning från denna serie av prov är synlig i figur 22.

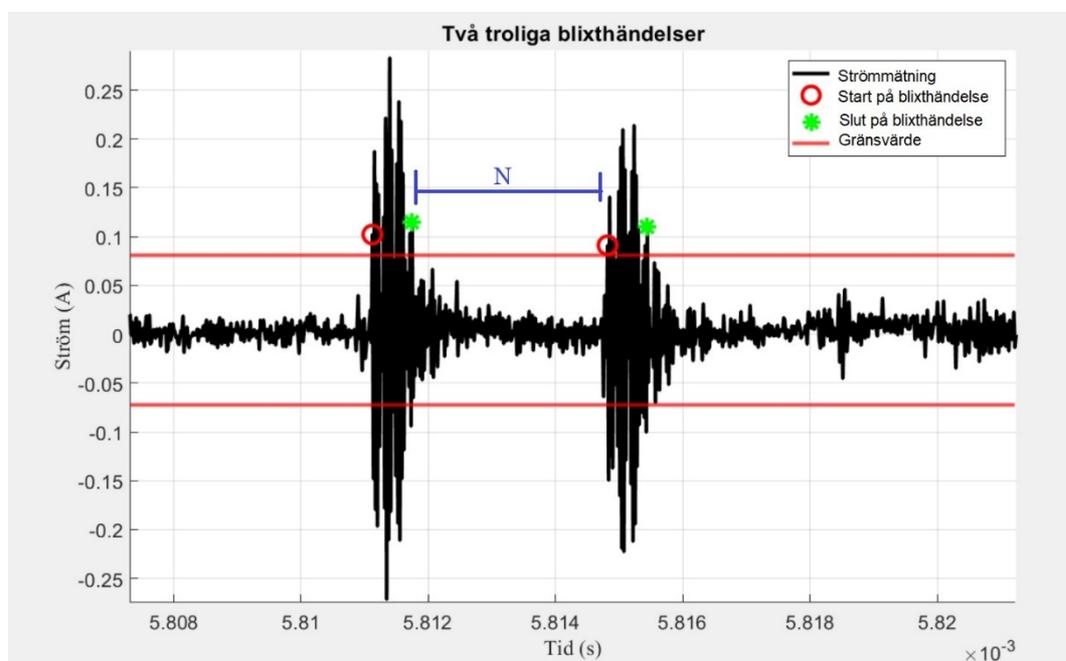


Figur 22: Brussignal vid varvtalet 1500 rpm. Stora delar av brusmattan ligger under 50 mA.

Figur 22 visar hur en signal vid brusmätning ser ut, med inskrivna gränsvärden. Bruaset är jämt fördelat i amplitud över de en miljon mätpunkter som lagrats. Metoden som har beskrivits tar dock inte hänsyn till blixthändelser som består av flera mätvärden där vissa av dem ligger innanför gränsen definierad av  $K$ . Om mätvärdena för en blixthändelse oscillerar mellan att vara innanför och utanför gränsvärdet, kommer en enskild oscillation att klassificeras som flera händelser. Därför är användningen av endast filtrering av lågpas och  $K$ -värden inte tillräckligt och gav därför inte ett tillfredställande resultat enligt frågan i figur 15, metodens överblick.

### 3.3.3 Variabeln $N$

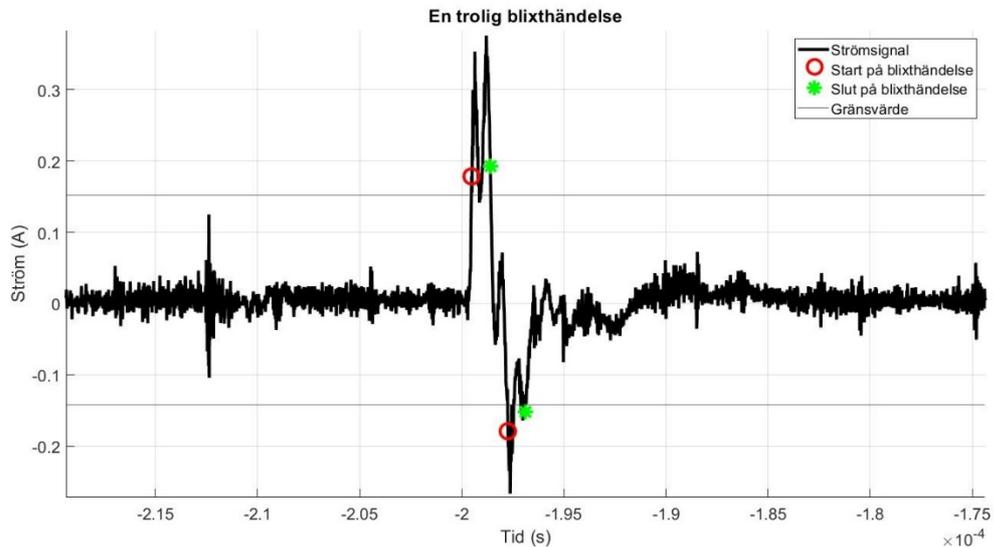
För att hantera blixthändelser som består av flera oscillerande mätvärden introducerades en ny variabel, kallad  $N$ .  $N$  är värdet som avgör om två närliggande värden utanför gränsen  $K$  hör till samma blixthändelse eller inte, se figur 23 där avståndet för  $N$  är markerat med blått. Exempelvis kan figur 23 nämnas där gränsvärdarna, definierade enligt formel 3.1 är de två horisontella axlarna synliga i rött. Det första mätvärdet som ligger utanför detta intervall är markerat med en röd cirkel medan det sista värdet i blixthändelsen är markerad med en grön stjärna. Hur långt avstånd det är mellan dessa två händelser behöver vara lägre än  $N$  för att de ska räknas som två, annars klassificeras de som en. Fortsättningsvis definierades variablerna  $N\_signal$  och  $N\_dead$ , dessa två variabler användes i syfte att bestämma om antalet mätvärden mellan första blixstens slut och andra blixstens början är tillräckligt många för att blixthändelserna ska anses vara separata.  $N\_dead$  innebär att om alla mätvärden hela tiden är innanför gränsvärdet  $K$  och längre än  $N$  är detta område inte av samma intresse som om avståndet innanför gränsvärdet är kortare än värdet på  $N$ , eftersom de två blixthändelserna i så fall slås ihop och ses som en blixthändelse i  $N\_signal$ .



Figur 23: Mätdata för två troliga blixthändelser.

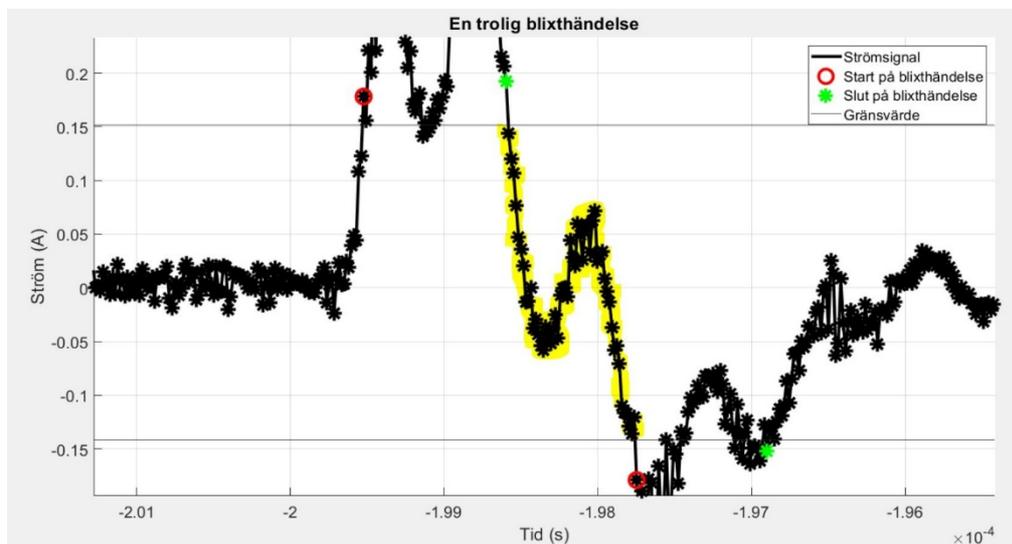
För de två blixthändelserna synliga i figur 23, passade det valda  $N$ -värdet på 30. Likt som för filtreringen med  $K$ , är det olika behov av gränser för värdet på  $N$ . I figur 24 är en annan blixthändelse synlig, med samma inställningar på  $K$  och  $N$  som för figur

24 ( $K=5$  och  $N=30$ ) men för denna händelse räknas blixten två gånger på grund av oscillationen, genom att händelsen har ett högre antal mätvärden mellan det övre och undre gränsvärdet. Vid dåligt gjorda val av parametervärdet  $N$ , skulle detta kunna generera en felräkning och ett icke önskvärt resultat av statistik.



Figur 24: Modellering för felaktigt valt värde på  $N$ -variabeln, trots en trolig händelse i figuren är det två synliga start och stopp.

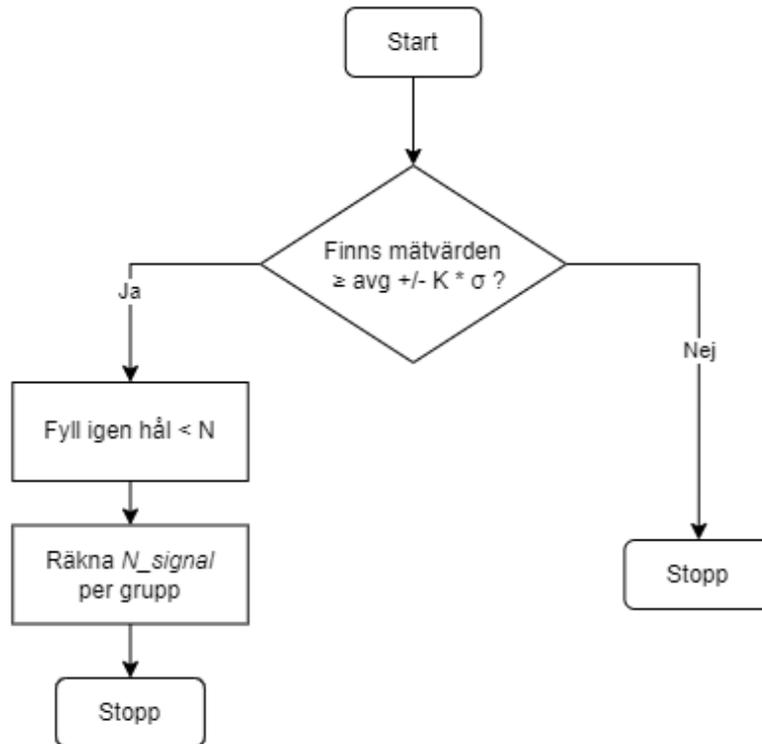
Vidare går att se en förstoring av figur 24 i figur 25. Målet är att med hjälp av variabeln  $N$  ska fler kryss markeras för mätvärden som ligger i det gula området. Detta skulle betyda att de två identifierade oscillationerna, tolkas som en blixthändelse.



Figur 25: Modellering för hur  $N$ -variabeln bestämdes. Mätvärden i det gulmarkerade området ska tillhöra blixthändelsen.

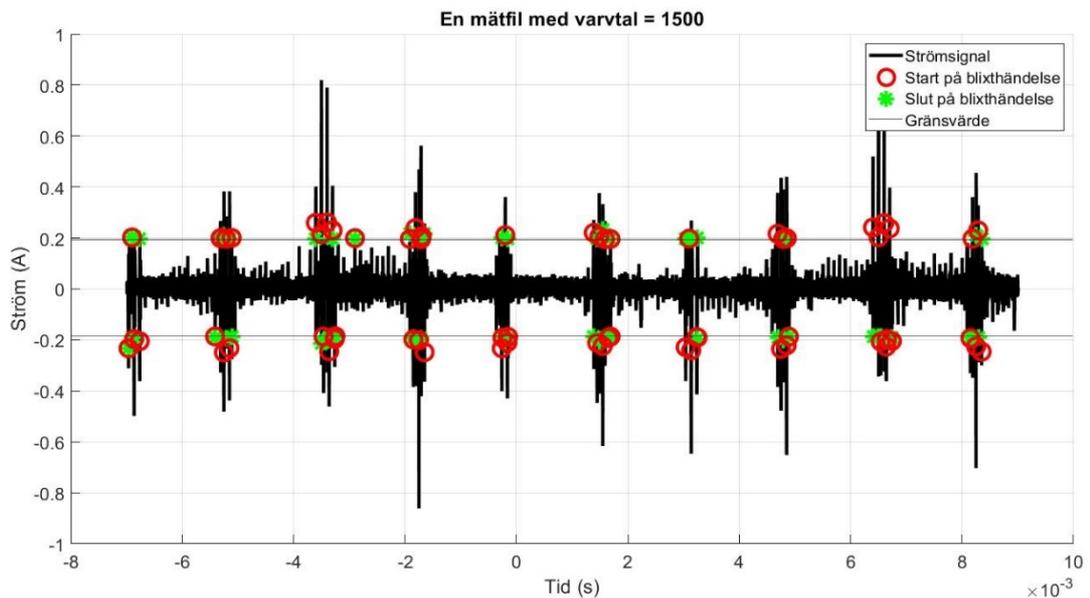
Efter det översta i figur 25, synligt som en grön stjärna följer fler stjärnor och ett okänt avstånd markerat i gult inom det övre och nedre gränsvärdet innan en röd startpunkt blir synlig.

Dessa svarta stjärnorna mellan slutet och starten ska egentligen ingå i blixthändelsen. För att räkna det gulmarkerade området i grafen till en blixthändelse introducerades en utveckling av algoritmen, som kan ses i följande flödesdiagram (figur 26).



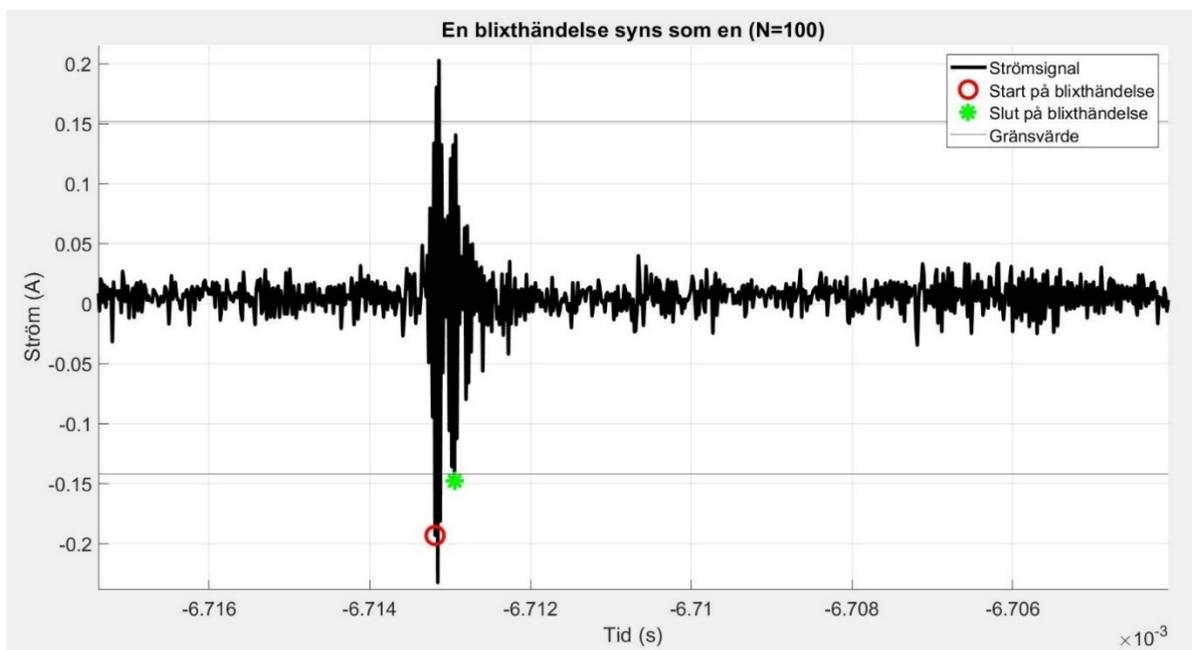
Figur 26: Algoritm för att identifiera blixthändelser med hjälp av variablerna  $K$  och  $N$ .

Figur 26 visar algoritmen i ett flödesschema, figuren påminner om figur 17, där skillnaden är att om mätvärden är större än det angivna gränsvärdet, skulle eventuella hål eller glapp mellan två mätvärden liggandes utanför gränsen (baserat på mätvärdens index) fyllas igen och inkluderas i föregående  $N\_signal$ . Variabeln  $N\_signal$  representerar en blixthändelse med alla sammanhängande värden efter varandra med glapp mindre än variabeln  $N$ . Resultatet av den modifierade algoritmen visas i följande figur.

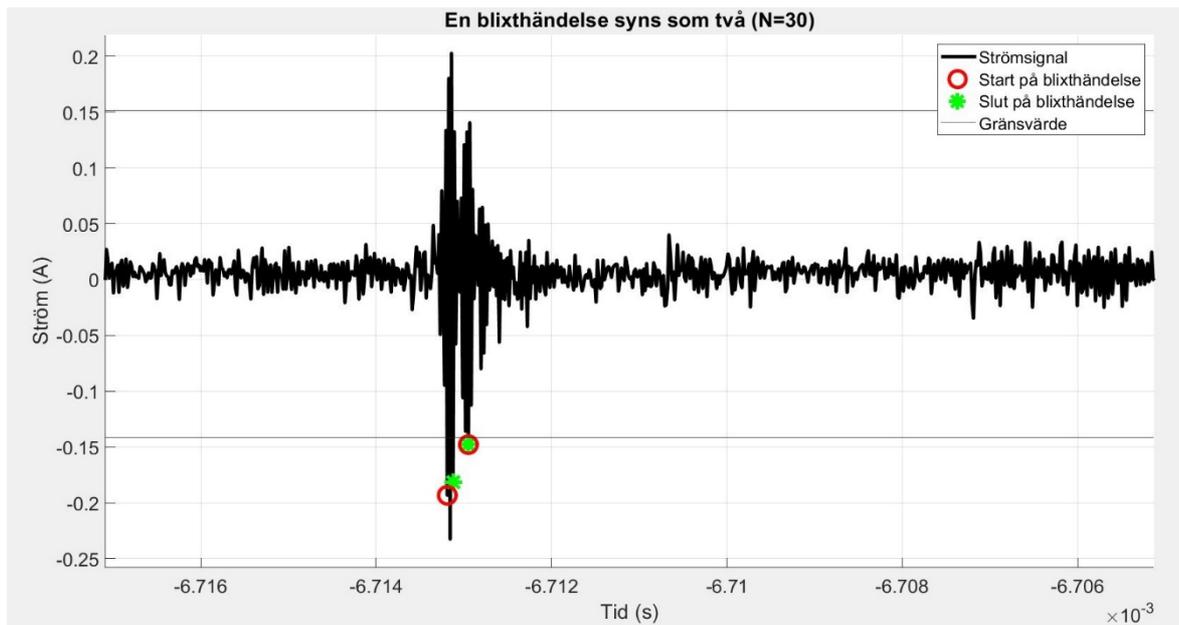


Figur 27: En hel mätdatafil synlig där  $K=7$  och  $N=100$ .

Figur 27 visar hur den modifierade algoritmen kan urskilja blixthändelser ur mätdata. I syfte av att identifiera mönster i mätdatafiler innehållande värden från beskriven strömtång gjordes flera tester med olika värden på  $N$ . Resultatet av två av dem kan ses i följande figurer.



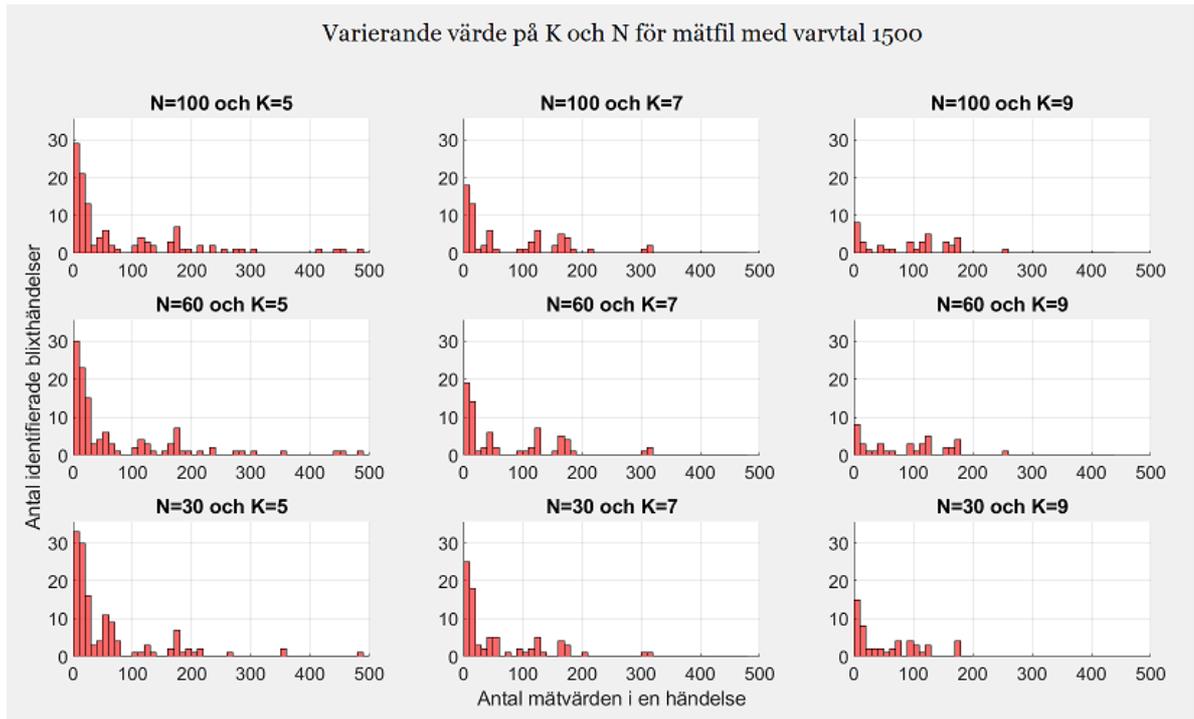
Figur 28: Om ett  $N$ -värde på 100 hade valts skulle denna blixthändelse räknas som en blixthändelse.



Figur 29: Om ett för lågt  $N$ -värde hade valts skulle denna blixthändelse räknas som två blixthändelser, något som skulle kunna ge missvisande statistik.

I figur 28 och 29 ses resultatet av  $N=100$  och  $N=30$ . En jämförelse kan ses, eftersom figur 28 betraktar samma blixthändelse som en händelse medan figur 29 räknar två delar av samma blixthändelse och elektriska urladdning som två även om det är oscillationer från urladdningen som har skett. En önskvärd blixthändelse har strukturen av en efterdyning, det vill säga en oscillerande och avtagande struktur. Om  $N$ -värdet som valts vore för lågt, skulle detta event kunna ses som två event eftersom vi i bilden kan se två tydliga extremvärden. Baserat på dessa två resultat (figur 28 och 29) kan ett första val av intervall för  $N$  kunna presenterats som  $N = 30 < X < 100$ .

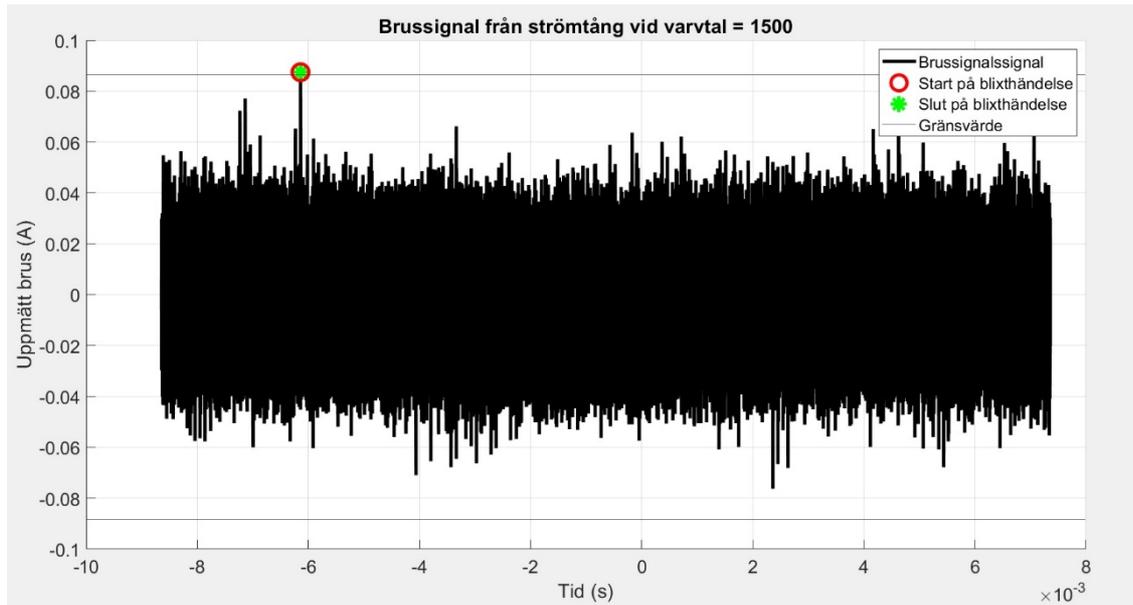
Som i avsnitt 3.3.2 då  $K$  presenterades nämndes att histogram var en metod som hade valts att tillämpas. Figur 30 visar en uppsättning av nio histogram, där samma fil med varvtalet 1500 visas med kombinationer av variabeln  $N = [30, 60, 100]$  och  $K = [5, 7, 9]$ .



Figur 30: nio histogram där K varierar per kolumn och N varierar längs raderna.

I figur 30 är det nio varierande histogram, i syfte att påvisa skillnaderna på utfallet av blixthändelser. Möjligt att se är att flest träffar identifieras i den vänstra kolumnen, där K är som lägst, det vill säga fem. Allra flest träffar blir det därför i det nedersta vänstra hörnet eftersom N-variabeln är satt till 30. På liknande sätt kan slutsatsen dras att det översta, högra hörnet är det histogram med minst träffar.

Samma brusmätning som i figur 22 visas här i figur 31 men med ett gränsvärde precis under så att endast en träff är synlig. K värdet är satt till 6,5, även om gränsen var 6,7. N i detta fall hade ingen större betydelse. Däremot var detta endast en spik i bruset, alltså inte en blixthändelse. Med detta i åtanke väcktes behovet av att även kunna filtrera antalet mätpunkter utanför för att räknas som en blixthändelse eftersom det identifierade mätvärdet i figur 31 inte ska ses som en trolig blixthändelse.

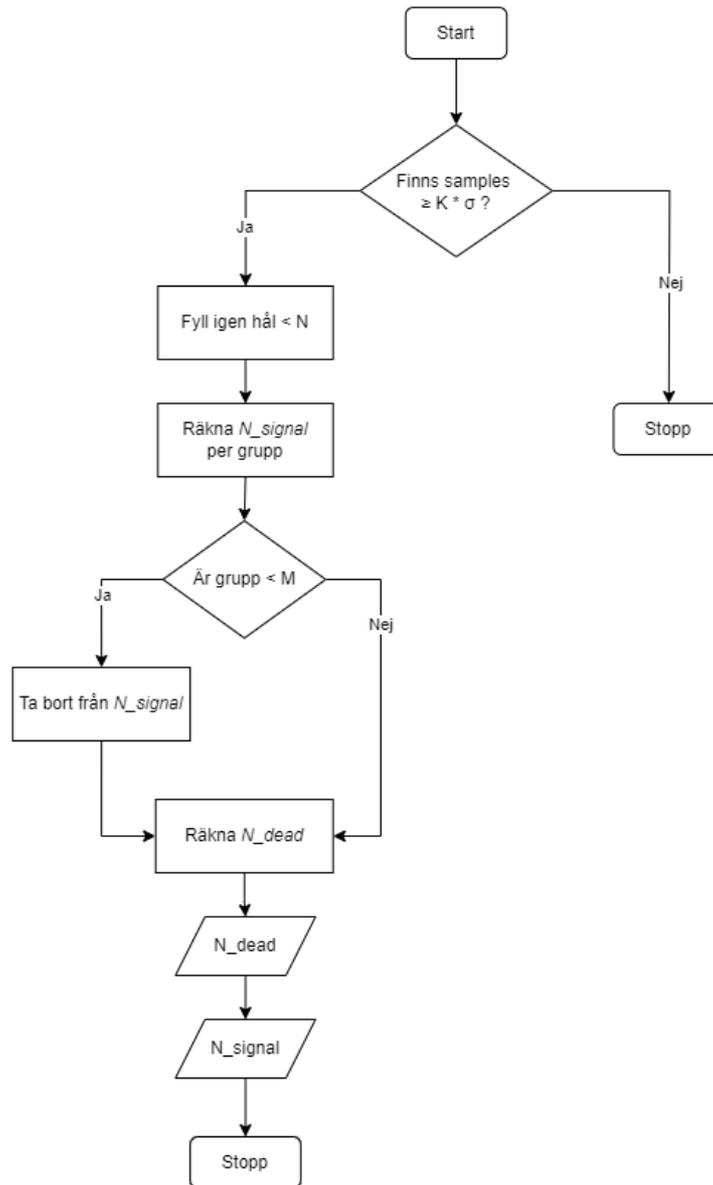


Figur 31: Start och stopp i samma mätvärde.

Figur 31 visar på hur enstaka mätvärden som egentligen ska klassificeras som brus blir klassificerade som blixthändelser. Den implementerade metoden som använde variablerna K och N behöver således utvecklas vidare för att undvika felklassificering av små förändringar i strömmen och brus.

#### 3.3.4 Variabeln M

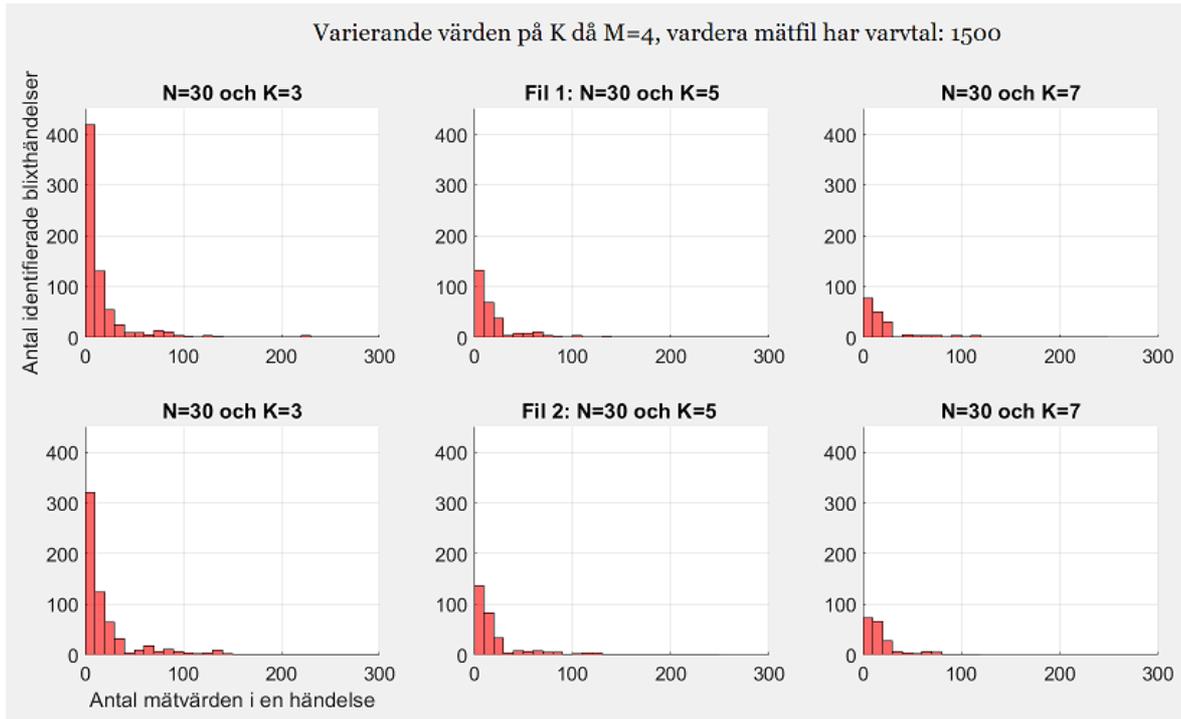
För att förbättra pålitligheten av klassificeringen av blixthändelser ytterligare kan en begränsning i längden på blixthändelser användas. Det vill säga, ett visst antal mätvärden måste befinna sig över gränsvärdet för att de ska räknas tillhöra en blixthändelse. En ny variabel kallad M introducerades, som definieras som minimumvärdet för antalet mätvärden som ska befinna sig utanför gränsvärdena för att en blixthändelse ska registreras. M-variabeln fungerade som ett lågpasfilter, det vill säga om antalet mätpunkter utanför gränsvärdena var färre än M, ska mätvärdena exkluderas. Om antalet mätpunkter däremot var M-antal eller fler utanför gränsvärdena, ska dessa tolkas som början av ett event och därefter kan efterföljande mätvärden räknas in till blixthändelsen. Den utökade algoritmen presenteras i följande flödesschema.



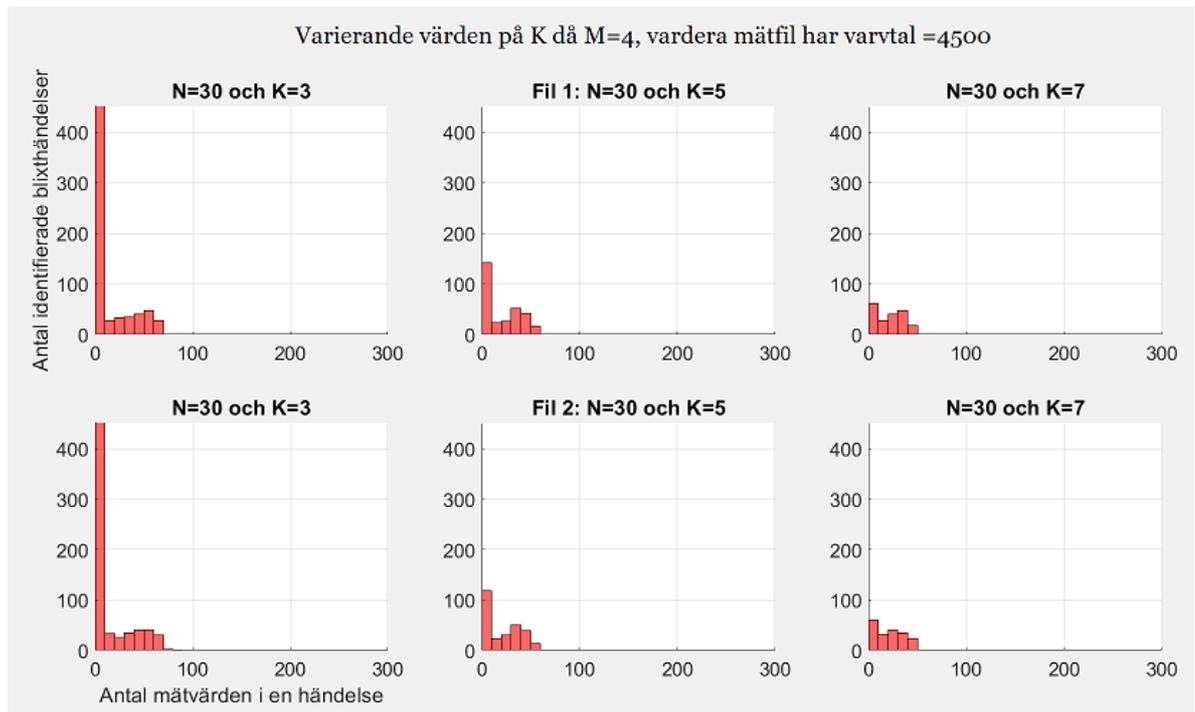
Figur 32: Flödesschema som visar den färdigställda algoritmen med variablerna  $K$ ,  $N$  och  $M$ .

Användningen av de tre variablerna  $K$ ,  $N$  och  $M$  i algoritmen gav följande resultat för att tolka blixthändelser utifrån mätdata. Algoritmen i figur 32 är en påbyggnad av figur 26, som istället för att stanna efter att  $N\_signal$  hade räknats kom till valet om varje grupp  $N\_signal$  var större eller mindre än  $M$ -variabeln. För att förklara  $M$ -variabeln och algoritmens funktion följer här två exempel: Tänk att  $M$ -variabeln är ett till fem, den första gruppen  $N\_signal$  är 12 mätvärden lång och den andra gruppen  $N\_signal$  innehåller endast tre mätvärden. Detta innebär att första gruppen  $N\_signal$  är större än gränsen och passerar därför utan någon förändring. Den andra gruppen  $N\_signal$  som endast har tre mätvärden var dock mindre än gränsvärdet för  $M$  och togs därför bort från vektorn  $N\_signal$ .

Samma inställningar användes på algoritmen både för figur 33 och figur 34, det enda som skiljer de två figurerna åt är att figur 33 representerar två filer med ett varvtal på 1500 rpm medan figur 34 representerar två filer med varvtalet 4500 rpm från samma mättillfälle, alltså bara minuter som skiljer med samma förutsättningar. Både figur 33 och 34 har samma längd på både x- och y-axeln, det vill säga 300 på x-axen och 450 på y-axeln. Egentligen är algoritmen utvecklad för att variera efter varje varvtals högsta antal blixtar. Detta innebar att y-axeln för figur 34 egentligen uppnådde ett y-värde närmare dubbelt så högt men har beslutats för att begränsas för att visuellt kunna jämföras.



Figur 33: Sex histogram, representerande två olika filer med varvtalet 1500 ( $K=3,5,7$  och  $N=30$ )



Figur 34: Sex histogram, representerande två olika filer med varvtalet 4500 ( $K=3,5,7$  och  $N=30$ )

Genom att studera de båda filerna från vardera varvtal går att konstatera att  $K=3$  är ett för lågt värde både för motorvarvtal på 1500 rpm och 4500 rpm. Vad gäller övriga plottar är dem mycket lika varandra oavsett om  $K$ -värdet är fem eller sju. En annan sak är att de minskar avtagande med bestående kurvform oavsett om figur 33 eller figur 34 betraktas. Eftersom det är samma inställningar på variablerna  $K$ ,  $N$  och  $M$  vid både körning av filerna 1500 och 4500 kan de i  $y$ -led jämföras för att identifiera mönster bland blixthändelserna. Antalet identifierade blixthändelser är ungefär samma för varvtal 4500 rpm jämfört med 1500, se tabell 4. Som ett exempel kan histogrammen för de två varvtalen med inställningarna  $K=7$  och  $N=30$ . För de två filerna för samma varvtal, oavsett om 1500 rpm eller 4500 rpm är utseendet på histogrammet relativt lika.

Tabell 4: Antal identifierade blixthändelser per mätdatafil

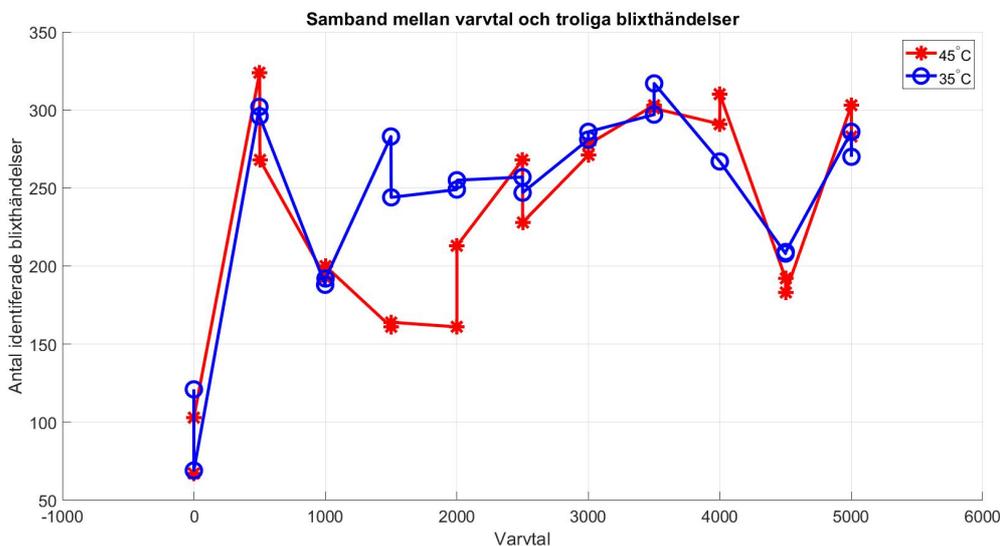
Varvtal (rpm)	Identifierade blixthändelser i fil nummer 1 (antal)	Identifierade blixthändelser i fil nummer 2 (antal)
1500	154	145
4500	160	162

Detta resultat kan tyda på, med dessa inställningar är antalet identifierade blixthändelser ungefär lika många.

I samband med att  $M$ -variabeln definierades gjordes brus och små ändringar i strömmen möjliga att ignorera. Genom att använda denna nya vektor har resultatet kunnat plottas inte bara i histogram, utan även i ett linjediagram.

## 3.3.5 Fallstudie för samband mellan trolig blixthändelse och varvtal

I detta kapitel görs en fallstudie med den utvecklade algoritmen för att identifiera blixthändelser i mätdata. Filer med mätvärden för flera olika varvtal bearbetas med hjälp av algoritmen och plottas i figur 35.



Figur 35: Antal uppmätta blixthändelser vid valda värden på  $K$ ,  $M$  och  $N$ .

I figur 35 visas två olika plotter från två olika mätningar, där temperaturen hos motoroljan är det enda som skiljer de olika mätningarna från varandra. För varje temperatur och varvtal sker två mätningar på grund av testcykelns utseende (se kapitel 2.4.3). Vid mätningen som plottas i rött, var oljetemperaturen 45 grader i jämförelse med den blåa plotten som visar en strömmätning av samma motor med en oljetemperatur på 35 grader. Vid dessa oljetemperaturer är det utifrån grafen möjligt att se att antalet blixthändelser mellan mätvärden följer varandra. Synligt är också att högst utfall av blixthändelser som överskrider valda värden på parametrarna sker vid 500 rpm. Synligt i figur 35 är att oavsett oljans temperaturskillnad på tio grader, ger algoritmen utslag vid nollvarvtal då motorn står still. Därför bör inga andra varvtal visa ett lägre antal identifierade blixthändelser än det.

Tabell 5: Valda värden på parametrarna vid utförd fallstudie.

Variabel	Valt värde
<b>K</b>	7
<b>N</b>	30
<b>M</b>	4

I tabell 5 visas de valda parametervärdena. Värdena bestämdes genom att manuellt verifiera en kombination som uppfyllde kraven på att korrekt klassificera blixthändelser. Ett mindre värde på  $M$  valdes för att små blixthändelser inte skulle ignoreras. Även om en blixthändelse är liten bedömdes det av vikt att klassificera dem korrekt.

## 4 Analys och diskussion

Denna studie har utforskat huruvida lagerströmmar i Scantias framdrivningsmotorer för tunga elfordon kan identifieras med hjälp av en algoritm utvecklad i Matlab. Detta kapitel reflekterar över resultaten från den utvecklade metoden, samt analyserar vad resultaten betyder och metodens begränsningar. Rekommendationer för framtida forskning och utveckling inom samma område kommer därefter att ges.

Målet med detta examensarbete var att ta fram en metod och ett verktyg som utifrån redan insamlad mätdata kunde identifiera lagerströmmar utifrån vissa satta kriterier. Delresultaten visade att flera olika variabler behövde introduceras för att få en algoritm som kunde utföra identifieringen.

Variabeln K visade sig vara grunden till identifieringen då den fyller en viktig funktion i att sätta en nivå (och därmed bestämmer vad som ska räknas som skadligt) för vad som ska räknas som en blixthändelse och inte. Det optimala värdet på K skilde sig mellan olika mätdatafiler, vilket gör det svårt att ta fram ett generellt värde på K som fungerar för alla mätningar. Därmed behövs mer experimentering för att djupare förstå hur parametern påverkar resultatet. Hade ett mindre K-värde valts hade histogrammen sett annorlunda ut eftersom mer brus hade klassificerats som blixthändelser, hade K däremot valts till ett större värde hade blixthändelser missats. Hade K-värdet valts större än det maximala mätvärdet hade resultatet blivit noll, därför utvidgades algoritmen med en koll som gör att detta inte kan ske. Liknande feldetektering och korrigerande av parametervärden är något som eventuellt skulle kunna vidareutvecklas.

Variabeln N var den parameter som tog längst tid att implementera. Detta var på grund av komplexiteten som krävdes i programmet för att hantera denna. N-variabeln gav dock ett mer sammanhängande resultat vid samspel med K. I relation till de en miljon mätpunkter var valet av  $N=30$  väldigt litet och kan potentiellt resultera att enstaka blixthändelser klassas som flera händelser. Hade mer tid allokerats till att jämföra resultat av olika värden på N hade ett mer passande värde kunnat hittas.

Slutligen var M-variabeln viktig för att inte räkna in enskilda avvikande mätvärden och brus som blixthändelser. Implementationen av M bygger på att algoritmen backar tillbaka och genomför samma typ av räkning igen efter valet om gruppen är större eller mindre än M. I praktiken betyder detta att algoritmen tar tid att använda, men genom att ha möjliggjort sökning av flera filer samtidigt kan annat arbete utföras parallellt. En optimering av algoritmen hade utförts vid mån av tid.

Eftersom resultatet av studien bygger på de tre variablerna K, N och M behövs mycket tid för att optimera dessa värden. Ramen för examensarbetet tillät dock inte optimering av parametrarna i den utsträckning som önskades då bearbetningen av mätdata tog lång tid att genomföra. Fortsatt arbete hade kunnat implementera en automatisk process där olika kombinationer av parametrarna automatiskt kördes, för att sedan kunna utvärdera resultaten manuellt. Eftersom en noggrann analys av

många kombinationer inte har genomförts är det svårt att ge tydliga rekommendationer för om metoden och verktyget är gångbart, däremot kan indikationer ges utifrån resultatet.

Verktyget kunde identifiera blixthändelser i mätdata och i utsträckning jämföra antalet blixthändelser mellan olika körningar i provobjektet. Från fallstudien konstaterades att antalet blixthändelser varierar vid olika varvtal. Antalet blixthändelser följer också varandra vid olika varvtal med viss skillnad då oljetemperaturen varierar. Detta kan ses som att faktiska blixthändelser klassificeras och inte endast brus, då felidentifieringen av brus borde ha gett upphov till ett förhållandevis konstant antal blixthändelser oavsett varvtal. Algoritmen ger utslag för blixthändelser trots att varvtalet är 0 rpm. Detta resultat kan upplevas som konstigt om provobjektet bör stå still, men en trolig orsak skulle kunna ligga i att växelriktaren som styr provobjektet går på tomgång eftersom motorn är av typen PMSM. Synkronmotorer kräver att reglersystemet även håller kvar rotorn i 0 rpm. Annars drivs provobjektet naturligt framåt, istället behöver reglersystemet kompensera mer eller mindre. En slutsats som därför kan dras är att antal räknade  $N\_signal$ , eventuella blixthändelser inte ska understiga antalet blixutslag vid 0 rpm i jämförelse med de andra tio varvtalen, som presenterat i avsnitt 2.4.3 där hur mätningen gick till beskrevs.

Samspelet mellan de tre variablerna var det som gjorde att identifiering av blixthändelser var möjlig. Därför är det möjligt att fler variabler och mer komplexitet i algoritmen kan förbättra resultatet. Den viktigaste möjligheten till ett förbättrat resultat är att ta hänsyn till spänningen över lagret, och inte endast strömmen som gjorts i detta arbete. I litteraturen och vid diskussion med insatta framgår det att vid analys av lagerströmmar är det vanligt förekommande att en jämförelse görs mellan ström- och spänningsmätningar. Potentialen över lagret sägs kunna uppnå höga värden när en urladdning sker. Sambandet mellan ström och spänning skulle därför kunna användas för att göra en mer pålitlig analys och hitta samband i mätdata som inte kan urskiljas från endast strömmätningar. Det utvecklade verktyg för examensarbetet skulle därför kunna utvecklas för att också analysera spänningsmätningar. Likaså hade möjligheten att göra en jämförelse mellan ström och spänning också varit givande.

Ett problem med mätningarna och identifieringen av lagerströmmar är att mätprincipen mäter alla former av ström, både resistiv, kapacitiv och blixurladdningar. Egentligen är det bara urladdningarna i motorn som önskas mätas. Ett annat problem med arbetet är samplingsintervallet på mätvärdena, samt vilken tid som mätningarna sker under. Hade samplingen haft en högre upplösning hade en tydligare kurvform fåtts vilket hade kunnat hjälpa vid identifiering. Eftersom mätningarna sker under en väldigt kort tid kan det ske att blixthändelser sker före eller efter mätningen och händelsen därmed missas. Behovet av M-variabeln hade eventuellt inte varit av samma intresse om mätvärden lagrades oftare, men med anledning av att analysen skulle genomföras med dåvarande inställningar på oscilloskopet var M-variabeln nödvändig. Dock hade en spik i bruset uppstått även med högre samplingsfrekvens, men det hade potentiellt varit lättare att klassificera spiken som brus eller en blixthändelse.

Vidare var en annan brist med mätdata att mätningar endast tas i ett provobjekt i labbmiljö. Eftersom det inte är säkert att blixthändelser uppstår på samma sätt eller med samma karaktär i verkliga körcyklar med verkliga belastningar på motorn är det svårt att säga om en förbättring eller försämring i labbmiljö implicerar samma skillnad i en verklig miljö. Därmed hade det varit givande att övervaka och utföra mätningar på ett fordon i drift för att se om testningen i en motorprovcell kan likställas med verklig körning. Om mätningar inte kan utföras på ett fordon i drift skulle ett provobjekt istället kunna innefattas av en vibrationsbädd med mekaniska vibrationer för att efterlikna en verklig miljö. Utöver en vibrationsbädd är ett alternativ att genomföra strömmätningarna med hjälp av en Rogowskispole, som beskrivits i kapitel (2.4.3), eftersom den är mer flexibel.

Om lagerströmmar inte åtgärdas sker en snabbare förslitning av elmotorns lager. Detta i sin tur ger upphov till kortare livslängd hos både motorlager och kortare tid mellan serviceintervall för elmotorn. Vid service krävs att lager byts ut, vilket ökar belastning på miljön och kostnader för kunden. Detta är även en viktig ståndpunkt för Scania som företag eftersom att eliminera slöseri är ett av kärnvärdena.

Vidare arbete skulle kunna innefatta att köra programmet med data från en oskyddad motor och jämföra resultatet med det från en skyddad motor. Likaså skulle experiment kunna utföras på provobjekt där lagerströmmar inte förekom, för att där efter jämföra mätdata. Vidare skulle det vara intressant att beräkna ett rullelements rotationshastighet eftersom det eventuellt skulle kunna finnas samband mellan dess rotationshastigheten, belastningen ett rullager utsätts för och hur ofta lagerströmmar uppkommer. Ytterligare framtida arbete skulle kunna bestå av att mäta ström eller spänning vid ökning och minskning av varvtal för att se om fler blixthändelser skulle uppstå på grund av påfrestning. För tillfället tas mätningarna endast vid plana varvtal när det har stabiliserat sig.



## 5 Slutsatser

Examensarbetet hade fyra delmål, vars syfte tillsammans var att utveckla en metod och ett verktyg för att kunna identifiera lagerströmmar i elmotorer för framdrivning av tunga fordon. Bakgrunden var att Scania har upptäckt problemet i sin nya generations elmotorer och därför påbörjat ett arbete för att förstå och åtgärda problemet.

Arbetet beskriver olika typer av lagerströmmar som kan uppstå i en elmotor och hur dessa kan mätas och bearbetas. Därefter har en algoritm tagits fram för att identifiera mönster i data från mätningar som har utförts på Scantias elmotorer. Algoritmen lyckades identifiera blixthändelser i mätdata men kräver mer optimering av parametrar samt vidare verifiering och validering. Algoritmen kommer att användas som en del i det fortsatta arbetet på Scania för att förebygga lagerströmsproblemet, och arbetet kan även användas som underlag vid metodutveckling för framtida arbeten inom området.

Efter slutfört arbete kan slutsatsen dras att det undersökande arbetet kommer att behöva fortsätta. Metoden och verktyget kan även utvecklas med nya parametrar och andra sorters mätdata, där en av de viktigare utvecklingarna är att bearbeta mätdata från spänningar och därmed hitta samband som inte var möjligt från endast analys av strömmätningar.

Eventuellt var mätdatafilerna som erhöles under arbetet inte optimala i syfte av att identifiera trender och mönster som tyder på lagerströmmar. Men med utveckling av algoritmen skulle det troligen vara möjligt att upptäcka fler värdefulla mönster. Genom användandet av den utvecklade algoritmen kan en övergripande bild av blixthändelser i mätdata studeras, där sambandet mellan olika varvtal, motoroljetemperaturen och antal iakttagna blixtar blir synligt.

Avslutningsvis, för att sammanfatta denna rapport kan det konstateras att lagerströmsproblemet är ett komplext ämne där mycket forskning kommer att krävas när världen ställer om till eldrivna fordon. Ämnet är inte bara aktuellt för Scania utan också för alla företag som utvecklar elmotorer och elfordon.



## Källförteckning

- [1] European Environment Agency. Transport and environment report 2021 [Internet]. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2022. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>
- [2] Europaparlamentet. Kodioxidutsläpp från bilar i siffror [Internet]. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/society/20190313STO31218/koldioxidutslapp-fran-bilar-i-siffror-nyhetsgrafik>
- [3] Ekonomifakta. Energianvändning per sektor – utveckling [Internet]. [uppdaterad 2023-04-05, citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/energianvandning-utveckling/>
- [4] Naturvårdsverket. Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk [Internet]. [citerad 2023-04-03] Hämtad från: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstillningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/>
- [5] FN. Globala målen för hållbar utveckling [Internet]. [citerad 2023-04-06]. Hämtad från: <https://fn.se/globala-malen-for-hallbar-utveckling/>
- [6] Energimyndigheten. Industriklivet ger stöd till produktion av elmotorer för tunga fordon [Internet]. [citerad 2023-04-03] Hämtad från: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/industriklivet-ger-stod-till-produktion-av-elmotorer-for-tunga-fordon/>
- [7] Larminie J, Lowry J. Electric Vehicle Technology Explained. 2 uppl. John Wiley & Sons, Ltd; 2012.
- [8] Scania. Scania in brief [Internet]. [citerad 2023-04-06]. Hämtad från: <https://www.scania.com/group/en/home/about-scania/scania-in-brief.html>
- [9] Cao Z, Mahmoudi A, Kahourzade S, L. Soong W. An Overview of Electric Motors for Electric Vehicles. 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). 2021; Perth.
- [10] Ravindra Jape S, Thosar A. Comparison of Electric Motors for Electric Vehicle Application. IJRET. 2017;06:sidor 12-17 .
- [11] Chau K. T, Chan C. C, Liu C, Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008;55:sidor 2246-2257.
- [12] SKF. Rullningslager [Internet]. [citerad 2023-05-08]. Hämtad från: <https://www.skf.com/se/products/rolling-bearings>
- [13] SKF. Bearing damage and failure analysis [Internet]. [citerad 2023-05-08]. Hämtad från: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968064c148/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968064c148\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf#cid=297619](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968064c148/pdf_preview_medium/0901d1968064c148_pdf_preview_medium.pdf#cid=297619)
- [14] Muetze A. Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors. 2003.

- [15] SKF. Smörjsystem [Internet]. [citerad 2023-05-08]. Hämtad från: <https://www.skf.com/se/products/lubrication-management>
- [16] SKF. Single row deep groove ball bearings [Internet]. [citerad 2023-05-08] Hämtad från: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings>
- [17] SKF. Deep groove ball bearings [Internet]. [citerad 2023-05-08]. Hämtad från: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings#cid-493604>
- [18] SKF. Cylindrical roller bearings [Internet]. [citerad 2023-05-08] Hämtad från: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings>
- [19] SKF. Hybrid bearings [Internet]. [citerad 2023-05-08]. <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/engineered-products/hybrid-bearings>
- [20] NE. Växelriktare [Internet]. [citerad 2023-05-10]. Hämtad från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/v%C3%A4xelriktare>
- [21] T. Rim C, Mi C. Introduction to Electric Vehicles (EVs). Wiley-IEEE Press; 2017 .
- [22] J. Ross N. Practical Handbook of Photovoltaics. 2 uppl. Academic Press; 2012.
- [23] NE. Transistor [Internet]. [citerad 2023-05-10]. Hämtad från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/transistor>
- [24] A. Melkebeek, J. Electrical Machines and Drives. Springer, Cham; 2018.
- [25] Jackson S.P. High-voltage thyristor strings for inverter applications. Proceedings of the IEEE. 1967;55:sidor 1487-1489.
- [26] Bharani Kumar R, Loganayaki A. Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications. 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS). 2019; Coimbatore.
- [27] Kempfski A. Capacitively coupled discharging currents in bearings of induction motor fed from PWM (pulsewidth modulation) inverters. Journal of Electrostatics. 2001;51-52:sidor 416-423.
- [28] L. Wernli Sr., D. Christ Robert. Power and Telemetry. The ROV Manual (Second Edition). 2014:sidor 141-161.
- [29] Murai Y, Ratnayake K.R.M.N. A novel PWM scheme to eliminate common-mode voltage in three-level voltage source inverter. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2018; Fukuoka.

- [30] Toulson R, Wilmshurst R. Analog Output. Fast and Effective Embedded Systems Design. 2012:sidor 57-75.
- [31] Ahola J, Muetze A, Niemelä M, Romanenko A. Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation. IEEE Transactions on Industry Applications. 2019;55:sidor 2770-2780.
- [32] Gray W, Macdonald D. A practical guide to understanding bearing damage related to PWM drives. Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 1998; Portland.
- [33] ABB. Bearing currents and their mitigation [Internet]. [citerad 2023-03-28]. Hämtad från: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107336&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [34] Chatterton S, Pennacchi P, Vania A. Electrical pitting of tilting-pad thrust bearings: Modelling and experimental evidence. Tribology International. 2016;103:sidor 475-486.
- [35] He F, Xie G, Luo J. Electrical bearing failures in electric vehicles. Friction. 2020;4: sidor 4-28.
- [36] T.A. Êvo M, M.Alzamora A, O. Zapparoli I, de Paula H. Inverter-induced bearing currents – A thorough study of the cause-and-effect chains. IAS. 2021; Vancouver.
- [37] Hodges G, Boyanton H.E. Bearing fluting in AC motors, DC motors and rolls on paper machines. Conference Record of 2001 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2001; Portland.
- [38] Suzumura J. Prevention of Electrical Pitting on Rolling Bearings by Electrically Conductive Grease. Quarterly Report of RTRI. 2016;57:sidor 42-47.
- [39] ABB. Bearing currents and how to beat them [Internet]. [citerad 2023-05-03]. Hämtad från: <https://new.abb.com/motors-generators/media/bearing-currents-and-how-to-beat-them>
- [40] Fluke. Vad är en strömtång? [Internet]. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.fluke.com/sv-se/las-mer/blogg/klammor/vad-ar-en-stromtang>
- [41] Fluke. Inuti strömtänger med strömtransformator (AC) [Internet]. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.fluke.com/sv-se/las-mer/blogg/klammor/inuti-stromtanger-med-stromtransformator-ac>
- [42] Fluke. Vad är Hall-effektströmtänger (AC, DC)? [Internet]. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.fluke.com/sv-se/las-mer/blogg/klammor/inuti-stromtanger-med-halleffekt>
- [43] Fluke. Inuti strömtänger med flexibel spole [Internet]. [citerad 2023-05-23]. Hämtad från: <https://www.fluke.com/sv-se/las-mer/blogg/klammor/inuti-stromtanger-med-flexibel-spole>
- [44] Quabeck S, Braun L, Fritz N, Klever S, W. De Doncker R. A Machine Integrated Rogowski Coil for Bearing Current Measurement. SDEMPED. 2023; Dallas.

[45] Thomas B. Modern reglerteknik. Stockholm: Liber; 2016

[46] Cochran W.T., Cooley J.W., Favin D.L., Helms H.D. Kaenel R.A., Lang W.W., et al. What is the fast Fourier transform? Proceedings of the IEEE. 1967;55:pages 1664-1674.

[47] NE. Sampling [Internet]. [citerad 2023-05-10]. Hämtad från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/sampling>

[48] Por E, van Kooten M, Sarkovic V. Nyquist-Shannon sampling theorem. Leiden University. 2019.

## Bilagor

### Bilaga A – Urklipp från algoritm

```
bis = abs(y-avg) > K*std_dev
sabis= zeros(1, length(bis));

for i = N:length(bis)
    sabis(i)=mean(bis(i-N+1:i));
end
sabis(1:N-1)=abs(y(1:N-1)-avg)>K*std_dev;
is=find(sabis)
id=find(diff(is)>1)
find_beginning_of_event=[is(1),is(id+1)] %Första mätvärdet tillhörande
varje blixthändelse lagras i denna variabel
bool = sabis > 0

samples_of_events = [];
count = 0;
for i = 1:length(bool)
    if bool(i) == 1
        count = count + 1;
    else
        if count > 0
            samples_of_events(end+1) = count;
            count = 0;
        end
    end
end
end
find_end_of_event = find_beginning_of_event + samples_of_events; %Sista
mätvärdet tillhörande varje blixthändelse lagras i denna variabel
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if ~isempty(bis)
bis_b=flipud(bis);
sabis=zeros(size(bis));
sabis_b=zeros(size(bis));

    for i=N+1:length(y)
        sabis(i,1)=mean(bis(i-N:i));
        sabis_b(i,1)=mean(bis_b(i-N:i));
    end
    sabis(1)=1;sabis_b(1)=1;
    is=find(sabis);is_b=find(sabis_b);
    ibegin=is(find(diff(is)>1)+1)-2*N;
    iend_b=is_b(find(diff(is_b)>1)+1);
    iend=length(y)-iend_b+1-2*N;
    iend=flipud(iend);
else
    disp('no samples deviates enough')
    ibegin=NaN;
    iend=NaN;
    Nsignal=NaN;
    Ndead=NaN;
end
ii=sort([ibegin;iend]);
dii=diff(ii);
Nsignal=dii(1:2:end)+1;
Ndead=dii(2:2:end)+1;
```

