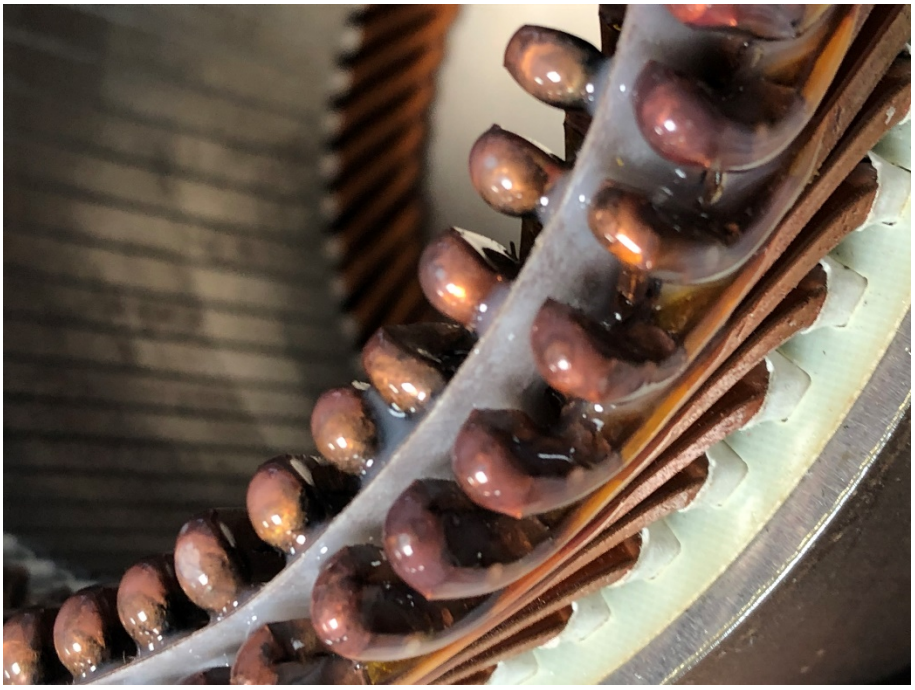
CHALMERS

VETENSKAPLIG RAPPORT



Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi

Design för miljö- och resurseffektivitet och krav på End-of-Life system

Rapport från FFI-projekt nr 44204-1

ANNE-MARIE TILLMAN
ANDERS NORDELÖF
EMMA GRUNDITZ
SONJA LUNDMARK
MIKAEL ALATALO
TORBJÖRN THIRINGER
MARIA LJUNGGREN

INSTITUTIONEN FÖR TEKNIKENS EKONOMI OCH ORGANISATION

Avdelningen för Miljösystemanalys

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020
www.chalmers.se
Rapport nr. 2020:06

Rapport nr. 2020:06

Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi

Institutionen för teknikens ekonomi och organisation
Avdelningen för miljösystemanalys

ANNE-MARIE TILLMAN
ANDERS NORDELÖF
MARIA LJUNGGREN

Institutionen för elektroteknik
Avdelningen för elkraftteknik

EMMA GRUNDITZ
SONJA LUNDMARK
MIKAEL ALATALO
TORBJÖRN THIRINGER

Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige 2020

Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi

ANNE-MARIE TILLMAN
ANDERS NORDELÖF
EMMA GRUNDITZ
SONJA LUNDMARK
MIKAEL ALATALO
TORBJÖRN THIRINGER
MARIA LJUNGGREN

© ANNE-MARIE TILLMAN, 2020
© ANDERS NORDELÖF, 2020
© EMMA GRUNDITZ, 2020
© SONJA LUNDMARK, 2020
© MIKAEL ALATALO, 2020
© TORBJÖRN THIRINGER, 2020
© MARIA LJUNGGREN, 2020

Rapport nr. 2020:06
Institutionen för teknikens ekonomi och organisation
Avdelningen för miljösystemanalys
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon +46 (0)31-772 1000

Förord

Detta är den samlade slutrapporten från FFI-projektet **Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi** (Energimyndighetens projektnummer 44204-1). Projektet kopplar på ett unikt sätt samman omfattande miljömässig livscykelanalys med detaljerad elektroteknisk utvärdering, för att studera hur elfordonskomponenter kan utformas för resurseffektiva materialflöden i en cirkulär ekonomi och samtidigt leverera god teknisk prestanda. Ytterligare ett syfte har varit att belysa hur End-of-Life-systemen behöver anpassas för att ta hand om elektrifierande fordon i mer cirkulära flöden.

Projektet har löpt under 2017-03-01 – 2020-10-31 och till ungefär lika delar finansierats av deltagande projektparter och Energimyndigheten inom ramen för programmet Fordonsstrategisk forskning och innovation (FFI). Projektet, som letts från Chalmers, har inneburit ett forskningssamarbete mellan två avdelningar med väsentligt olika kompetensområden, Elkraftteknik och Miljösystemanalys. Medverkande FFI-avtalsparter har varit AB Volvo och Volvo Car Corporation, samt från Fordonskomponentgruppen (FKG), elmotortillverkaren BorgWarner och utvecklingsbolaget China Euro Vehicle Technology AB (CEVT). En svensk elmotortillverkare, ELMO (Malmköpings Mekaniska Werkstad AB) har deltagit. Övriga parter har varit företrädare för det svenska återvinningssystemet för fordon, Sveriges Bilåtervinnares Riksförbund (SBR), Walters Bildelar AB, Eklunds Bildelslager AB och Stena Recycling. Genom att projektkonstellationen omfattat en hel produktkedja från underleverantörer, fordonstillverkare, demonterare och återvinnare har projektet kunnat bygga kompetens inom ett nytt fält, design för ökad cirkularitet, i berörd industri.

Rapporten har sammanställts av projektgruppen på Chalmers, med återkoppling från de industriella parterna. Den syftar till att ge en samlad, fyllig och samtidigt lättillgänglig redogörelse för projektet och rapportera dess resultat i sin helhet. Rapporten utmynnar i rekommendationer för design av resurseffektiva framdriftsmotorer och för End-of-Life-systemens utveckling. Den vänder sig till alla de aktörer som designar och hanterar elfordonskomponenter under deras livscykel, både komponentleverantörer, fordonstillverkare, demonterare och återvinnare, liksom till policyaktörer på området.

Ett varmt tack riktas till projektparterna för generöst delande av tid, kompetens och material och till FFI genom Energimyndigheten samt Chalmers Styrkeområde Energi för finansiellt stöd.

Göteborg 2020-10-31

Anne-Marie Tillman

Projektledare

Professor Miljösystemanalys, Chalmers

Innehåll

Förkortningar och begrepp **4**

Sammanfattning **5**

Summary **7**

DEL 1 – BAKGRUND

1. Inledning **10**

1.1 Introduktion 10
1.2 Rapportens upplägg 12

2. Termer och begrepp **14**

2.1 Vad är cirkulär ekonomi? 14
2.2 Vad är livscykelanalys och livscykeltänkande? 15
2.3 Vad är elektriska maskiner? 16

DEL 2 - NULÄGESANALYS

3. Fordons- och motorkravsättning **29**

3.1 Motiv till val av fordonstyper 29
3.2 Fordonsparametrar 30
3.3 Motorparametrar 33
3.4 Förekomst av olika motortyper 38

4. Miljöpåverkan, knapphet, kritikalitet och kostnad för materialen **40**

5. Demonteringsstudier **43**

5.1 Litteraturgenomgång 43
5.2 Demontering av personbilsmotor 44
5.3 Demontering av bussmotor 48
5.4 Reflektioner från demonteringsstudierna 55

6. Kartläggning av dagens End-of-Life hantering **56**

6.1 Bildemontering 56
6.2 Fragmentering 57
6.3 Bearbetning av kopparskrot till användbar koppar 59
6.4 Bearbetning av stålskrot till användbart stål 59
6.5 Bearbetning av aluminiumskrot till användbar aluminium 60

7. Strategier för cirkulära flöden för elmotorer **62**

7.1 Återanvändning 62
7.2 Semiautomatiserad demontering av kopparlindning 62
7.3 Semiautomatiserad demontering av magneter 64
7.4 Återvinning av magnetmaterial 64

DEL 3 – MODELLERING OCH UTVÄRDERING

8. Metodbeskrivning för elektromagnetiska- och körcykelberäkningar **68**

8.1 Elektromagnetiska beräkningar 68
8.2 Elektromagnetiska materialdata 71
8.3 Körscykelberäkningar 73

9. Studerade motoralternativ **80**

10. Design- och körcykelberäkningar ... 82

10.1 Geometri och massa - personbilsmotorer ... 82
10.2 Beskrivning personbilsmotorer ... 85
10.3 Verkningsgrad personbilsmotorer ... 91
10.4 Beräknad energiförbrukning under körcykel - personbilsmotorer ... 93
10.5 Geometri och massa, bussmotorer ... 96
10.6 Beskrivning – bussmotorer ... 99
10.7 Verkningsgrad – bussmotorer ... 100
10.8 Beräknad energiförbrukning under körcykel – bussmotorer ... 101

11. Materialflödesanalys av fragmentering och semiautomatiserad elmaskindemontering ... 105

11.1 Fragmentering (dagens situation) ... 105
11.2 Demontering för långtgående materialseparation ... 108

12. Livscykelanalys av utvalda elmaskiner ... 111

12.1 LCA-studie 1: Variation av rotordesignen för att undersöka olika magnetalternativ ... 111
12.2 LCA-studie 2: Variation av statordesignen för att undersöka långtgående materialåtervinning ... 117
12.3 Översiktlig analys av effekten av återanvändning ... 126

DEL 4 – REKOMMENDATIONER

13. Designrekommendationer ... 129

13.1 Designval med klimatpåverkan ... 129
13.2 Designval som påverkar resursanvändningen ... 130

14. Rekommendationer för End-of-Life-systemets utveckling ... 133

14.1 Förläng livslängden ... 133
14.2 Förbättra materialåtervinningen från fragmenteringen av hela fordon ... 133
14.3 Demontera komponenter för materialåtervinning ... 133

15. Identifierade forskningsbehov ... 135

16. Referenser ... 136

Appendix 1 ... 146

Förkortningar och begrepp

AFM	Axialflödesmaskin
ELV	End-of-Life vehicle, begrepp som återfinns i EU:s lagstiftning (ELV-direktivet) och som används också på svenska för utskrotade bilar
End-of-Life-system	System för omhändertagande av uttjänta fordon och deras komponenter. Omfattar demontering, renovering och återtillverkning, återanvändning av komponenter som reservdelar, materialåtervinning, energiutvinning och deponering
FEM	Finita elementmetoden
LCA	Livscykelanalys, på engelska life cycle assessment
LCI	Life cycle inventory analysis, på svenska inventeringsanalys, fas inom livscykelanalys som omfattar modellering av material och energiflöden ”från-vagga-till-grav”
LCIA	Life cycle impact assessment, på svenska miljöpåverkansbedömning, fas inom livscykelanalys där resultaten från inventeringsanalysen bedöms och ”översätts” till påverkan på ett antal miljöpåverkanskategorier
LCT	Livscykeltänkande, life cycle thinking på engelska, tänkande om produkter som omfattar deras miljöimplikationerna ”från-vaggan-till-graven”, enkelt utryckt kvalitativ LCA
MTPA	Maximum torque per ampere, maximalt vridmoment för given ström
MLC	Mimimum loss control, styrning av strömmen så att totala förlusterna minimeras
Nd(Dy)FeB	Magnetmaterial av neodym-dysprosium-järn-bor
NdFeB	Magnetmaterial av neodym-järn-bor
NF-fraktion	Icke magnetisk metallfraktion från engelskans ”nonferrous”
PM	Permanentmagnet
PMaSynRM	Permanentmagnet-assisterad synkronreluktansmaskin
PMSM	Permanentmagnet-synkronmaskin
REE	Rare earth elements, på svenska sällsynta jordartmetaller
RFM	Radialflödesmaskin
rpm	Revolutions per minute, på svenska varv per minut
rms	Root mean square, på svenska kvadratiskt medelvärde, inom elektrotekniken effektivvärde
SmCo	Magnetmaterial av samarium-kobolt
Sr-ferrit	Ferritbaserat magnetmaterial med inblandning av strontium
TFM	Transversalflödesmaskin
WLTC	World-wide harmonized light duty test cycle, standardiserad körcykel

Sammanfattning

Elektrifieringen av fordon drivs av nödvändigheten att drastiskt minska klimatutsläppen. Samtidigt behövs mer energi- och materialresurser för att bygga elektriska drivlinor, främst för batterier, men också för också andra komponenter i den elektriska drivlinan, som elmotorer. Föreliggande rapport fokuserar på elmotorer för framdrift av vägfordon, så kallade framdriftsmotorer, och hur de kan anpassas till den cirkulära ekonomin.

Material i elmotorerna med väsentlig miljö- och resurspåverkan är aluminium, elektroplåt, koppar samt magnetmaterialen. Deras produktion kräver energi som ger upphov utsläpp av klimatpåverkande gaser. Kopparproduktion leder också till utsläpp av toxiska metaller. Koppar och magnetmetaller som kobolt och sällsynta jordartsmetaller (dit neodym och dysprosium hör) är geologiskt knappa. Gruppen sällsynta jordartsmetaller, liksom kobolt, klassas också som kritiska av EU, vilket betyder att de bedöms utgöra en försörjningsrisk samtidigt som de är ekonomiskt viktiga. Alla materialslagen ger väsentliga bidrag till materialkostnaden. Strategier för att minska resursåtgången kan vara att minimera mängden material, att byta material, att renovera och förlänga motorns livslängd, eller att återvinna motorn till högkvalitativa material.

Mer cirkulära materialflöden för elfordon kräver både att fordonen och deras komponenter är utformade för lång livslängd, återanvändning och högkvalitativ återvinning, och att End-of-Life-systemet är anpassat for att effektivt ta hand om uttjänta fordon och deras komponenter och material. Projektet har därför syftat till:

- Rekommendationer för design av elektriska framdriftsmotor som uppfyller krav på hög verkningsgrad och annan önskvärd teknisk prestanda, och samtidigt är lämpade för en mer cirkulär ekonomi.
- Rekommendationer för utvecklingen av ett End-of-Life-system för fordon som kan nyttiggöra fordonskomponenter designade för en mer cirkulär ekonomi.

Nulägesanalyser användes för att välja ett antal motoralternativ att studera, liksom olika alternativ för att hantera dem vid End-of-Life. Kravspecifikationer för studerade motorer upprättades baserat på fordonskrav för en personbil och för en buss. De mest krävande materialen identifierades, utifrån miljöpåverkan, resurstillgång på lång och kort sikt, samt kostnader. Valda motoralternativ varierade med avseende på magnetmaterial, lindningsmaterial och lindningskonfiguration. I några alternativ användes en kärna av pressat järnpulver istället för elektroplåt. Magnetflödets riktning varierade mellan de undersökta motorerna.

Demonteringsstudier av använda motorer gav, tillsammans med en kartläggning av dagens End-of-Life-hantering, en beskrivning av hur uttjänta motorer hanteras idag, och utgjorde ett underlag för att ta fram ett scenario för en framtida mer cirkulär hantering med långtgående materialseparation.

De utvalda motoralternativen utvärderades med hjälp av elektromagnetiska beräkningar och körscykelberäkningar som användes för att beräkna energianvändningen under drift. Denna användes i livscykelanalyser, tillsammans med data om motorernas sammansättning och produktion, för att utvärdera deras miljö- och resurspåverkan. Effekten av varierande End-of-Life-hantering undersöktes i detalj.

Tre möjliga strategier för End-of-Life-systemets utveckling mot resurseffektivitet identifierades: att renovera och öka livslängden hos motorer och deras komponenter; att förbättra materialåtervinningen i dagens system med fragmentering; samt en långt driven separation av material ur motorer som demonterats ur fordonen, för materialåtervinning.

Effektiviteten i användning av material och komponenter kan ökas genom renovering och återanvändning. Begränsad renoveringsverksamhet finns idag, främst för tunga fordon, men skulle kunna utökas och också omfatta lätta fordon. Delar som kan bytas ut är kullager, motoraxel och möjligen även hela rotorpaket. Rotorpaket ur kasserade motorer skulle kunna utnyttjas som reservdelar. Hela motorer ur kasserade fordon kan också återanvändas som reservdelar. Däremot är möjligheterna att återanvända magneter mycket begränsade, eftersom deras form är låst till den ursprungliga designen.

I befintlig fragmenteringsverksamhet utvecklas kontinuerligt processerna för att sortera material i olika fraktioner. En utmaning för elmaskiner är de hoptrasslade nystan av koppartråd och elektroplåt som uppstår i fragmenteringen, så kallade ”köttbullar”. Separeringen av materialen i dessa skulle kunna drivas längre. Magnetmaterialen hamnar till största delen i en lättfraktion, varifrån de inte återvinns (som magnetmaterial). Inga processlösningar för återvinning av magnetmaterial ur fragmenterat skrot har identifierats.

Materialåtervinningen ur framdriftsmotorer kan ökas genom att demontera motorerna ur uttjänta fordon och därefter använda semiautomatiserad separering vilket ger relativt rena materialfraktioner. Det finns utrustning på marknaden för att separera koppar, stål och aluminium från uttjänta elmotorer, En långt driven semiautomatiserad separering av dessa material förbättrar återvinningen jämfört med fragmentering, men endast i begränsad omfattning. Semiautomatiserad separering av motormaterialen är dock den enda identifierade tekniken som gör det möjligt att återvinna magnetmaterial med såpass kvalitet att de kan användas för nytillverkning av magneter. Det finns ingen kommersiell utrustning för att separera ut magneter ur elmotorer inför återvinning idag, men det har gjorts experimentellt, och det finns processlösningar på prototypstadiet.

Renovering av framdriftsmotorer kräver att de enkelt kan demonteras ur fordonet och att motorn sedan utan svårigheter kan demonteras till en nivå där delar kan bytas ut. Fixerings- och impregneringsmedel bör därför användas på ett genomtänkt sätt och antalet varianter av skruvar och andra fästanordningar minimeras.

Motorns design är avgörande för både dess klimatpåverkan och resursanvändning. Klimatpåverkan orsakas av energianvändningen under drift, som avgörs av verkningsgraden över körcykeln och motorns vikt. Designval med betydelse är valet av lindningsmaterial och lindningskonfiguration. Koppar ger högre energieffektivitet än aluminium, liksom designer med hög andel koppar i det aktiva tvärsnittet, som hårnålslindning eller koncentrerad lindning.

De svaga magneter av strontium-ferrit som undersöktes gav låg energianvändning över körcykeln. Strontium-ferritmagneter är dock inte stabila vid temperaturer under cirka 20ºC, vilket är en teknisk utmaning som måste lösas. En intressant utvecklingsmöjlighet är att eftersträva elmotorer med hög effekttäthet, till exempel genom att de designas med mer koppar i spåren, kombinerat med svaga magneter. Ett färre antal starka magneter är också en möjlighet.

Designer med kärna av pressat järnpulver ger ingen fördel i materialåtervinningen, eftersom dagens fragmenteringsprocesser återvinner koppar, stål och aluminium med tämligen hög effektivitet. Magnetmaterialen återvinns dock inte och inga designåtgärder i elmotor-utvecklingen har identifierats som kan möjliggöra magnetåtervinning i fragmenterings-processen. Däremot, semiautomatiserad demontering av magneter skulle underlättas av en långt driven standardisering av laminatets tvärsnitt, liksom av att magneterna inte limmas fast.

Summary

Electrification of vehicles is driven by the need to drastically reduce greenhouse gas emissions. At the same time, more energy and material resources are needed to build electric drivetrains. This is true primarily for batteries, but also for other components in the electric drivetrain, such as electric motors. This report focusses electric traction motors for road vehicles and how they can be adapted to the circular economy.

Materials in electric motors with substantial environmental and resource impacts are aluminum, electric steel, copper, and magnet materials. Their production requires energy use which causes related greenhouse gas emissions. Copper production is also a source of emissions of toxic metals. Copper and magnet metals such as cobalt and rare earth metals (to which neodymium and dysprosium belong) are geologically scarce. The whole group of rare earth metals, and cobalt, are also classified as critical by the EU. This means that they constitute a supply risk while being economically important. All mentioned materials contribute substantially to material costs. Strategies to improve resource efficiency include minimization of the amount of material, substitution of materials, renovation and prolonging the lifetime of the motor and its components, and recycling to high quality materials.

More circular material flows for electric vehicles require that vehicles and their components are designed for a long lifetime, for reuse and for recycling to high quality materials and that the End-of-Life system is well suited to manage used vehicles, and the components and materials therein. For this reason, the project reported here aimed at:

- Recommendations for design of electric traction motors which fulfill requirements for high efficiency and other desired technical performance, and at the same time are well suited for a more circular economy
- Recommendations for the development of the End-of-Life system for vehicles to utilize and valorize vehicle components designed for a more circular economy

Analysis of the current situation was used to select a number of alternative motor designs for analysis, which were combined with alternative End-of-Life management options. Specifications for studied motors were established based on specifications for a car and a bus, respectively. The most impacting materials were identified, from the perspectives of environmental impact, resource availability on short and long term, and cost. Selected motor designs varied with respect to magnet material, winding material and winding configuration. In some alternatives a core of pressed iron powder was investigated as an alternative to laminates of electrical steel. Also, the direction for the magnetic flow was varied.

Dismantling studies, together with an analysis of the current End-of-Life system, provided a description of how scrapped motors are handled today, and formed a basis for the construction of a scenario of a future with more circular material management, including extensive material separation.

Selected motor alternatives were evaluated by means of electro-technical modelling and drive cycle calculations to estimate energy use during operation. This data was used, together with data on motor composition and production, in life cycle assessment studies to evaluate the environmental and resource impacts of the motor alternatives. The effect of different End-of-Life management strategies was investigated in detail.

Three strategies for the development of the End-of-Life system towards resource efficiency were identified: to renovate and increase the lifetime of motors and their components; to improve material recycling in the current system with fragmentation of End-of-Life vehicles;

and extensive separation of materials from traction motors dismantled from End-of-Life vehicles, for material recycling.

Currently, renovation of traction motors is limited, and directed towards heavy vehicles. This could be extended to include also light vehicles. Bearings and shafts can be replaced and possibly also complete rotor packages. Rotor packages from discarded motors could be used as spare parts, as could whole motors from discarded vehicles. I contrast, the potential to reuse magnets is very limited, since their physical shape is locked by their original design.

Fragmentation industry continuously develop their processes for separation of materials in different fractions. For electric machines, the so-called meatballs constitute a challenge. They are formed during the fragmentation and consist of intertangled copper wire and electrical steel laminate. They could be further separated, which would require additional fragmentation steps. The magnet materials largely go with a light fines fraction, from which they are not recycled (as magnet materials). No process solution has been identified to recycle magnet materials from fragmented scrap.

Material recycling can be increased through dismantling motors from scrap vehicles and subsequent semi-automated dismantling into rather clean material fractions. Commercial equipment exists for separation of copper, steel and aluminum from scrapped electric motors. However, these measures lead only to modestly improved recycling of these materials, compared to fragmentation. Still, semi-automated dismantling is the only technology which has been identified with potential to enable recycling of magnets to a material quality from which new magnets can be produced. While no equipment exists on the market today for removing magnets from electric motors to enable recycling, it has been done experimentally and prototype machines exist.

Renovation of traction motors requires that they can be easily dismantled from the vehicle and that the motor can then be sufficiently dismantled such that worn-out components can be replaced. For this reason, fixation and impregnation materials should be used with care and the number of variants of nuts and bolts limited.

The design of the motor determines its climate impact and resource use. The climate impact is caused by the energy use during operation, which is related to the energy efficiency over the drive cycle and the motor weight, which in turn is influenced by the winding material and the winding configuration. Copper windings gives motors with a higher energy efficiency than aluminum, and so do designs with a high proportion of copper in the active cross section such as hairpins or concentrated windings.

Also, weak magnets of strontium-ferrite gave an energy efficient traction motor. Strontium-ferrite magnets are however not stable below 20ºC, and this is a challenge which needs to be addressed for them to be technically viable. An interesting development potential is to go for electric motors with high power density, e.g. by using design solutions with more copper in the slots and combine this with weak magnets. Another option is to use fewer, but stronger, magnets.

Designs with a core of pressed iron powder gives no advantage in material recycling since the degree of separation of copper, steel and aluminum is high in current fragmentation processes. Fragmentation processes however do not recover magnet materials and no electric motor design measures have been identified which could enable such recovery during fragmentation. In contrast, semi-automated removal of magnets would be eased by a standardization of the cross section of laminates, and if magnets are not glued into their slots.

DEL 1 – BAKGRUND

I denna del av rapporten ges motiveringen till projektet, dess syften och mål, samt beskrivs rapportens upplägg. Grundläggande begrepp inom cirkulär ekonomi och livscykelanalys beskrivs liksom uppbyggnaden och funktionen hos olika slags elektriska maskiner.

1.Inledning

1.1 Introduktion

Utvecklingen av elektrifierade fordon drivs i hög grad av nödvändigheten att drastiskt minska utsläppen av klimatpåverkande gaser. Samtidigt får resursfrågor ett allt större fokus som drivkraft för såväl teknik- som affärsutveckling, inte minst genom EU:s initiativ för en cirkulär ekonomi (EC, 2015). Också näringslivet visar intresse. Bland annat deltar ett stort antal företag i arbete om cirkulär ekonomi i Ingenjörsvetenskapsakademins projekt (IVA, 2020) och inom ramen för Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2020). Cirkulär ekonomi kan ses som ett samhällssystem där materiella resurser bättre tas tillvara, där produkter ges en längre livslängd, återanvänds i högre grad och återvinns till mer högkvalitativa produkter. Det finns emellertid risk för målkonflikter mellan effektiv resursanvändning och minskning av klimatutsläpp. När det gäller fordon leder elektrifieringen till att mer resurser behövs för att bygga själva fordonen samtidigt som avgasutsläppen minskas eller elimineras. Framförallt kräver produktionen av batterier mycket energi och knappa material, men också andra komponenter i den elektriska drivlinan, som elmotorn, innehåller knappa material. Vi ser generellt en ökad användning av material i fordonen som är knappa i geologisk mening, liksom av material vars tillgänglighet begränsas av geopolitiska förhållanden, så kallat kritiska material. Den ökade användningen av sådana material drivs av såväl elektrifiering som av en ökande användning av elektronik för andra ändamål samt lättviktsmaterial (se till exempel Ljunggren Söderman et al. (2013) och Andersson et al. (2017)).

En förutsättning för att elfordon skall bidra till minskad klimatpåverkan är att de når tillräckliga marknadsandelar vilket i sin tur beror av välfungerande teknisk komponent- och systemdesign. Generellt ställs strävan efter hög verkningsgrad och små kompakta men kraftfulla komponenter mot kostnad, samtidigt som säkerhet och ljudnivå också måste beaktas. Förbättringar kan nås genom till exempel integrering av komponenter för kompaktare system med färre delar, genom att välja material med högre prestanda och längre livslängd, eller alternativt lägre kostnader. Olika komponenter behöver anpassas till varandra som till exempel framdriftsmotorn, kylsystemet och växeln. Utvecklingen av drivsystem för el- och hybridfordon är fortsatt intensiv och har resulterat i ett stort antal olika systemlösningar och komponentkonstruktioner. Det skede teknikutvecklingen befinner sig i, med snabb utveckling och fortfarande många möjliga lösningar, gör att det just nu finns ett möjlighetsfönster för att utforma designen av komponenter och system för en cirkulär ekonomi.

Den snabba teknikutvecklingen leder emellertid också till att befintliga och väl beprövade konstruktionslösningar används för enskilda komponenter. Magneter används i elmotorer för att öka effekttätheten och verkningsgraden. För framdriftsmotorer används ofta de starkaste permanentmagneterna av neodym-dysprosium-järn-bor (Nd(Dy)FeB) trots att kostnaden för dessa har ökat och återvinning ännu saknas.

Bedömningar av kritiska material som genomförts i till exempel EU (EC, 2020), USA (National Research Council, 2008) och Japan (Shinko Research, 2009) pekar på den höga risken för minskad tillgång till sällsynta jordartsmetaller, dit neodym och dysprosium hör. Gruv- och upparbetningsprocesserna är dessutom resurskrävande och förorenande (Nordelöf och Tillman, 2018). Produktionen av sällsynta jordartsmetaller sker nästan uteslutande i Kina, och efterfrågan förväntas öka snabbare än utbyggnaden av produktionskapaciteten, vilket innebär innebär betydande risk för leveransstörningar och stigande priser. Möjliga strategier för att minska beroendet av sällsynta jordartsmetaller i motorer är att minimera mängden magneter eller att byta ut dem mot andra (mindre starka) magnetmaterial som till exempel

ferriter eller samarium-kobolt (SmCo), till priset av att motorerna då blir något större (Alatalo et al., 2011). Det pågår även betydande forskning på motorer utan magneter.

En annan nyckelfaktor för mer cirkulära materialflöden är vad som händer med fordonen och deras komponenter när de tjänat ut. I denna rapport används begreppet End-of-Life för allt som sker efter den första användningsfasen, det vill säga demontering, återanvändning, återtillverkning/renovering och återvinning, men också energiutvinning och deponering. Dagens End-of-Life system för fordon består av demontering av vissa komponenter (på affärsmässiga grunder eller drivet av lagstiftning) samt efterföljande fragmentering av det som återstår, följt av materialåtervinning och i mindre utsträckning energiutvinning och deponering. Det finns lagkrav på demontering av till exempel katalysatorer, däck, batterier och vindrutor för specifik återvinning. Materialåtervinningsgraden för fordon är 85% på viktbasis, med det sker en förlust av materialkvalitet i återvinningen av de flesta material. Funktionell återvinning (det vill säga återvinning till högkvalitativa material med bibehållna funktionsegenskaper) av knappa metaller är ytterst begränsad, vilket gör att de, med undantag av platina, i stort går förlorade i återvinningen. De hamnar antingen som föroreningar i återvunnet stål, i det slagg som uppstår i metallurgiska processer, eller i de oorganiska materialflöden som återvinns för konstruktionsändamål (Andersson et al., 2017).

Det finns en kommersiell återanvändning av fordonskomponenter som reservdelar, i det skick de har efter demontering, eller efter renovering och ibland återtillverkning. Återtillverkning innebär att renoveringen drivs så långt att komponentens ursprungliga specifikation kan uppfyllas. Återanvändning av använda komponenter vid tillverkning av nya fordon förekommer däremot inte. Komponenter som ofta demonteras för att användas som reservdelar är till exempel växellådor, förbränningsmotorer, dörrar, stötfångare och strålkastare.

För att minska miljöpåverkan och resursanvändningen för elfordon krävs att både fordonen och deras komponenter är utformade för återanvändning och funktionell återvinning, samt att End-of-Life-systemet är anpassat for att effektivt ta hand om uttjänta fordon utan att värdefulla resurser i form av komponenter eller material förloras.

Det övergripande syftet med den forskning som rapporteras här har varit att belysa:

- Hur elfordonskomponenter kan designas med god teknisk prestanda avseende momenttäthet, effekttäthet och verkningsgrad och samtidigt för en cirkulär ekonomi, det vill säga för lång livslängd, goda möjligheter till underhåll och återtillverkning och med möjlighet för högkvalitativ återvinning av de ingående materialen.
- Hur End-of-Life-systemen behöver anpassas för att bättre kunna tillvarata de komponenter och material som byggs in i elfordon.

Dessa frågeställningar är generella för såväl batterier som kraftelektronik och framdriftsmotorer som alla ställer stora krav på avancerad teknisk design och innehåller såväl ”vanliga” material som koppar och specialstål, som mer kritiska material som sällsynta jordartsmetaller. För att möjliggöra fokusering har projektet avgränsats till elektriska framdriftsmotorer som är ett relativt obearbetat fält där det finns stark kompetens i Sverige.

Studien har utförts inom FFI-projektet **Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi**.

Rapporten syftar till att ge en samlad, fyllig och samtidigt lättillgänglig redogörelse för projektet och rapportera dess resultat i sin helhet. Den vänder sig till alla de aktörer som designar och hanterar elfordonskomponenter under deras livscykel, det vill säga både komponentleverantörer, fordonstillverkare, demonterare och återvinnare. Likaså är aktörer som på olika sätt utformar regelverk, stödprogram och politiska strategier för fordon, deras komponenter och fortsatta materialhantering viktiga avnämare. Rapporten utmynnar i:

- Rekommendationer för design av elektriska framdriftsmotor som uppfyller krav på hög verkningsgrad och annan önskvärd teknisk prestanda, och samtidigt är lämpade för en mer cirkulär ekonomi.
- Rekommendationer för utvecklingen av ett End-of-Life-system för fordon som kan nyttiggöra fordonskomponenter designade för en mer cirkulär ekonomi.
- Rekommendationer för fortsatt forskning

1.2 Rapportens upplägg

Rapporten är uppdelad i fyra olika delar. I *Del 1* ges motiveringen till projektet, dess syften och mål, samt beskrivs rapportens upplägg (kapitel 1). Grundläggande begrepp inom cirkulär ekonomi och livscykelanalys beskrivs i kapitel 2, liksom uppbyggnaden och funktionen hos olika slags elektriska maskiner.

I *Del 2* beskrivs de nulägesanalyser som gjordes i projektets inledning och som ledde fram till avgränsningar och metodval. De krav som fordonen ställer på motorernas design beskrivs kapitel 3, liksom vilka fordonskrav som beaktades i projektet. Eftersom cirkulär ekonomi bland annat syftar till att anpassa produkter och materialflöden i samhället till miljö- och resursbegränsningar, identifieras i kapitel 4 vilka av de material som ingår i en elmotor som, ur olika aspekter, är mest resurskrävande. För att praktiskt och konkret få en uppfattning om hur lätt eller svårt det skulle kunna vara att återanvända eller återvinna olika delkomponenter, demonterades två använda motorer från en personbil och från en buss. Demonteringsstudierna tillsammans med en litteraturgenomgång av andra demonteringsstudier beskrivs i kapitel 5. Slutligen kartlades dagens End-of-Life hantering genom studiebesök och litteraturstudier (kapitel 6) och möjliga strategier för mer cirkulära flöden identifierades (kapitel 7).

I rapportens *Del 3* beskrivs de modelleringar och utvärderingar som gjorts. Använd metodik för beräkning av energianvändningen under drift genom elektromagnetiska beräkningar och körscykelberäkningar beskrivs i kapitel 8. Baserat på de inledande studierna togs beslut om exakt vilka motoralternativ som skulle undersökas närmare (kapitel 9). Motoralternativen representerar dels dagens teknik och dels lösningar som av olika skäl bedömdes vara mer anpassade till en cirkulär ekonomi. I kapitel 10 beskrivs designen av de olika motorerna liksom deras prestanda, inklusive energianvändningen under drift.

Scenarier för motorernas hantering efter användning konstruerades i kapitel 11, ett som beskriver dagens situation och ett som beskriver en möjlig framtid med långtgående materialseparering. För att få tydliga kontraster, beskriver inte framtidsscenariet den mest troliga framtiden, utan snarare den bästa tänkbara ur återvinningssynpunkt.

De undersökta motoralternativen och deras end-of-life hantering utvärderas därefter miljö- och resursmässigt med hjälp av livscykelanalys (LCA) i kapitel 12.

Arbetet ledde fram till rekommendationer som beskrivs i rapportens avslutande *Del 4*, för motorernas design (kapitel 13) och för End-of-Life-systemets utveckling (kapitel 14). Fortsatta forskningsbehov identifieras i kapitel 15.

1.2.1 Övrig rapportering från projektet

Presentationer riktade mot avnämare och en bredare publik:

- Slutkonferens 3 september 2020
- Radiointervju av Anders Nordelöf om sällsynta jordartsmetaller, P1-morgon, 19 september 2019

- Presentation av Anders Nordelöf "Batterier och elmaskiner för fordonsdrift: livscykelanalys med fokus på tillverkning" på sessionen för klimat- och resurseffektivitet på FFI-konferensen 2019 med temat "Fordonsindustrin i förändring: Hur växlar vi upp för att möta samhällets stora utmaningar? arrangerad av Vinnova, 16 oktober 2019.
- Presentation av Maria Ljunggren "What metals propel the European vehicle fleet – now and in the future?" på Chalmers öppna dag, Initiative Seminar 2019, Transportation in the Age of Digitalisation, 26 september 2019, Chalmers
- Presentation av Anders Nordelöf "Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi" på konferensen "Energirelaterad fordonsforskning 2017", arrangerad Energimyndigheten, 5 oktober 2017.

1.2.2 Akademiska publikationer, publicerade eller under utformning

- Grunditz, E A, Lundmark, S, Alatalo, M, Thiringer, T and Nordelöf, A. 2018. Three traction motors with different magnet materials — Influence on cost, losses, vehicle performance, energy use and environmental impact. 2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), p. 1-13
- Nordelöf, A, Grunditz, E., Lundmark, S, Tillman, A-M, Alatalo, M and Thiringer, T. 2019. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol 67, p 263-274.
- Alatalo, M. 2018. Axial flux machine as a traction motor for electric and hybrid vehicles. Technical report 2018:1, Department of Electrical Engineering Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg
- Grunditz, E A, 2020. Traction Motor for a Battery Electric City Bus - Specification and Drive Cycle Evaluation, Based on Comprehensive Data Collection, Technical report 2020:1, Report for the FFI project Electric Traction Motors in a Circular Economy, Department of Electrical Engineering Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg
- Konferensbidrag om elmotordesign – radialflödesmaskiner för bussar med olika lindningstyper: distribuerad koppartråd, koncentrerad koppartråd, och distribuerad aluminiumtråd. Under utformning
- Tidskriftsartikel – LCA av elmotorer som omfattar End-of-Life-hantering, baserat på samma underlag som redovisas i kapital 11 och 12 i denna rapport. Under utformning.
- Syntesartikel alternativt sammanfattande rapport på engelska. Under utformning.

2. Termer och begrepp

2.1 Vad är cirkulär ekonomi?

Cirkulär ekonomi är en vision om ett industriellt system där resursanvändning, miljöpåverkan och avfallsgenerering är så små som möjligt, samtidigt som affärsmöjligheter och ekonomisk tillväxt skapas. Annorlunda uttryckt handlar det om ett industriellt system där ekonomisk tillväxt frikopplas från resursförbrukning och miljöpåverkan.

Cirkulär ekonomi är det senaste svaret på en oro som funnits mycket länge över en ständigt växande resursförbrukning, och, som ett resultat, avfallsgenerering och miljöpåverkan i övrigt. Den mest prominenta formuleringen av problemet står kanske att finna i Romklubbens rapport "Limits to Growth" från 1972 (Meadows et al., 1972). Framväxten av begreppet cirkulär ekonomi beskrivs väl av Blomsma och Brennan (2017).

Centralt i diskussionen om cirkulär ekonomi är de olika åtgärder (ofta kallade strategier) som kan vidtas for att minska resursförbrukningen och öka resurseffektiviteten, åtgärder som att återvinna, återtillverka och återanvända, eller helt enkelt använda produkter under längre tid. Åtgärderna inordnas ofta i hierarkiska ramverk (Kirchherr et al., 2017). Ett exempel är EUs avfallshierarki som föreskriver följande prioritering i avfallslagstiftningen: förebyggande av avfall, förberedande för återanvändning, materialåtervinning, energiutvinning och kvittblivning (EU, 2008). Sådana hierarkier har ifrågasatts, bland annat därför att de bygger på förenklade och idealiserade beskrivningar av materialflöden där man bortser från verkliga förhållanden, som till exempel låga insamlingsnivåer och produktlivslängder som i verkligenheten är kortare än förväntat (Ljunggren Söderman och André, 2019). Inte heller tar de hänsyn till att de olika åtgärderna kan kombineras och ofta är beroende av varandra (Blomsma och Brennan, 2017) eller att olika åtgärder passar olika bra för olika produkter (Böckin et al., 2020).

I figur 2.1 visas ett livcykelbaserat ramverk för olika åtgärder för resurseffektivitet. Åtgärderna är utan inbördes rangordning. Ramverket lyfter istället fram i vilket skede i en produkts livscykel som en viss åtgärd vidtas - i produktionen, under användning eller efter användning (End-of-Life).

Åtgärder i produktionsfas, som till exempel energi och materialeffektivisering, räknas ibland in i cirkulär ekonomi, ibland inte, eftersom de inte är "cirkulära" i meningen att flöden går runt. Oavsett terminologi är sådan effektivisering viktig, och kan ge stora effekter. Att byta eller minska mängden material är också något som görs i produktionsfasen, till exempel för att göra fordon lättare.

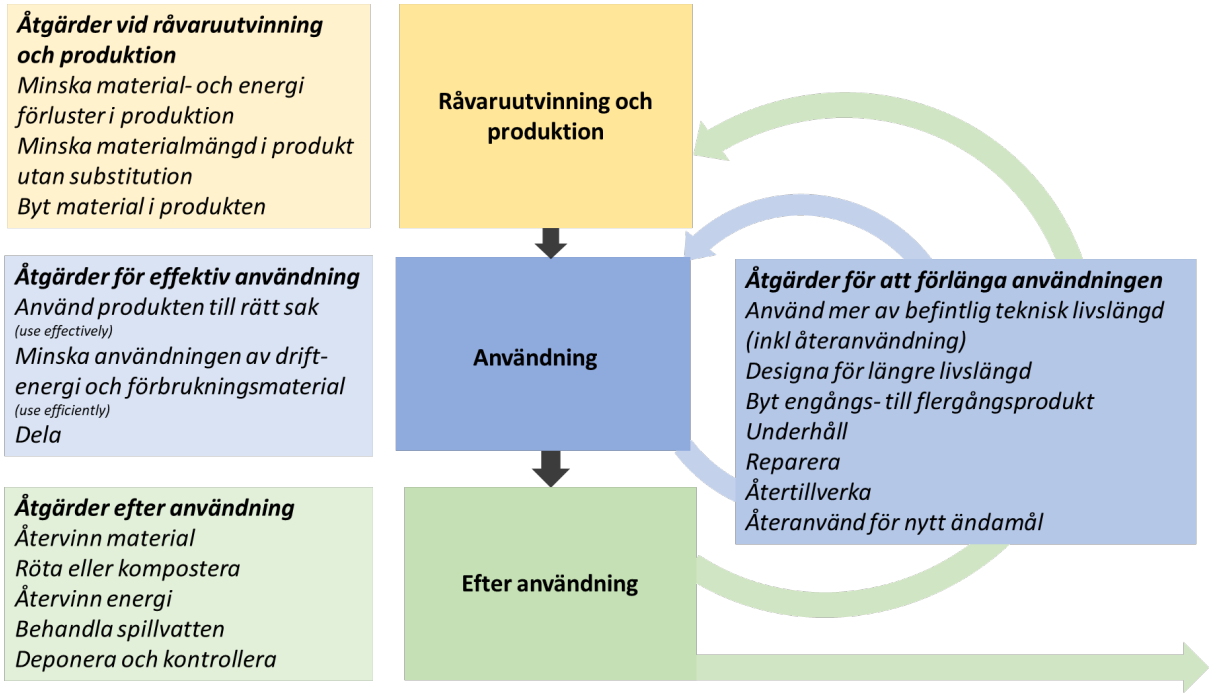
I användningsled kan man också effektivisera, till exempel genom att minska energianvändningen för fordon. Det är också i användningsled som de flesta "cirkulära" åtgärderna kan vidtas, som till exempel förlängd livslängd, återanvändning, reparation och återtillverkning. Efter användningen kan materialet i produkter återvinnas, eller energin kan utvinnas ur brännbara materialfraktioner. Åtgärderna som vidtas efter användning sluter sällan materialflödena, det vill säga de är inte så "cirkulära" som det först kan verka, eftersom det återvunna materialet oftast får en lägre kvalitet och måste gå till andra tillämpningar än den ursprungliga.

Många av åtgärderna är beroende av produktens design, och design lyfts ofta fram som ett viktigt element i den cirkulära ekonomin. På samma sätt ses nya affärsmodeller som en viktig aspekt. Som exempel kan nämnas affärsmodeller där tillverkaren behåller ägandet av

produkten över hela dess livslängd och istället säljer användningen av den som en tjänst eller där flera användare delar på samma produkt, till exempel bilpooler och olika hyrlösningar.

Det finns ofta målkonflikter mellan effekterna av olika åtgärder. Exempelvis ger elektrifieringen av fordon en effektivare framdrift och mindre (eller inga) avgasutsläpp, (dock förekommer utsläpp i samband med elproduktionen) medan byggandet av elektrifierade fordon kräver mer resurser för till exempel batterier, elmotorer och kraftelektronik (Nordelöf et al., 2014). På liknande sätt ger användande av lättviktsmaterial en effektivare framdrift, medan framställningen av lättviktsmaterial kan vara resurskrävande.

Figur 2.1: Livcykelbaserat ramverk för åtgärder för resurseffektivitet (efter Böckin et al. (2020)).



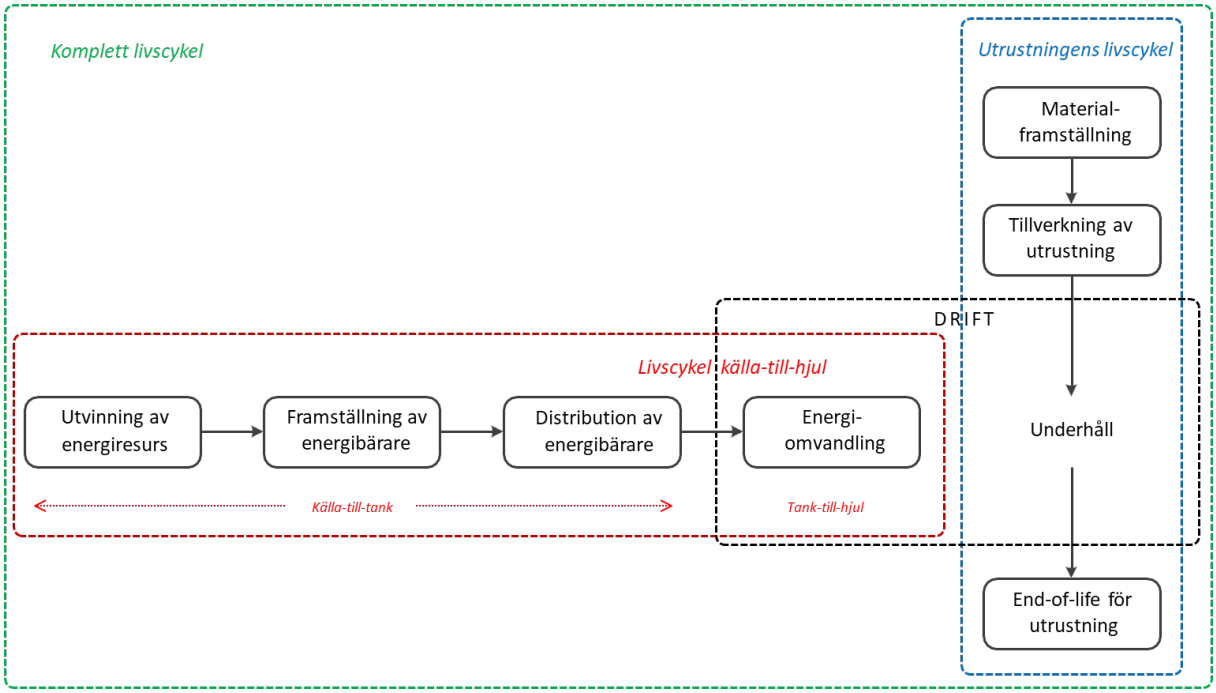
2.2 Vad är livscykelanalys och livscykeltänkande?

Livscykelanalys (LCA) är en metod för att bedöma miljö- och resurspåverkan av produkter, i ett systemperspektiv. Material- och energiflöden som kan hänföras till funktionen av en analyserad produkt följs ”från-vaggan-till-graven”, det vill säga från och med råvaruutvinning, genom alla produktionsprocesser, genom användningsled och genom det som sker efter användning. I hela den systemmodell som på detta sätt byggs upp kvantifieras hur mycket naturresurser det går åt i olika led, av vilket slag, liksom utsläpp till miljön av olika slag. Exempel på olika livscykelmodeller för fordon ges i figur 2.2.

Resultaten av denna tekniskt inriktade så kallade inventeringsanalys (LCI, life cycle inventory analysis) blir en lång lista på parametrar som kvantifierar vilka naturresurser och utsläpp som kan hänföras till den studerade produkten. Listan kan vara oöverskådlig och svårtolkad och av bland annat detta skäl finns det metoder att aggregera informationen och översätta den till mått på miljöpåverkan. Detta kallas miljöverkansbedömning (LCIA, life cycle impact assessment) och resulterar i att resultaten uttrycks som påverkan på ett antal (vanligtvis runt

10 stycken) miljöpåverkanskategorier. Exempel på sådana är klimatpåverkan, toxiska effekter i miljön, toxiska effekter på människor samt olika aggregerade mått på resursanvändning.

Figur 2.2: Principskiss av fordonets livscykel, i sin helhet och uppdelat på energibärarens livscykel (källa-till-hjul, på engelska "well-to-wheels") och utrustningens livscykel. Ur Nordelöf et al. (2014).



LCA lämpar sig mycket väl för att bedöma effekten av olika "cirkulära" åtgärder. Det är också en metod som väl lämpar sig för att identifiera och kvantifiera vilka avvägningar mellan konflikterande miljöaspekter, så kallade trade-offs, som olika åtgärder ger upphov till.

LCA är en ambitiös metod som kräver expertkunskap och mycket data. Ett viktigt komplement är därför livscykeltänkande (på engelska "life cycle thinking", förkortat LCT) som enkelt uttryckt är kvalitativ LCA. En sådan förenklad metod kan användas för att identifiera vilken sorts miljöpåverkan man kan förvänta sig av en viss produkt, liksom vilka trade-offs eller på annat sätt kritiska punkter det kan finnas. Speciellt i fall när det finns fullständiga kvantitativa LCA-studier av liknande produkter är livscykeltänkande en mycket användbar metod. Den har använts i projektet för att identifiera vilka motoralternativ som varit av intresse att undersöka.

2.3 Vad är elektriska maskiner?

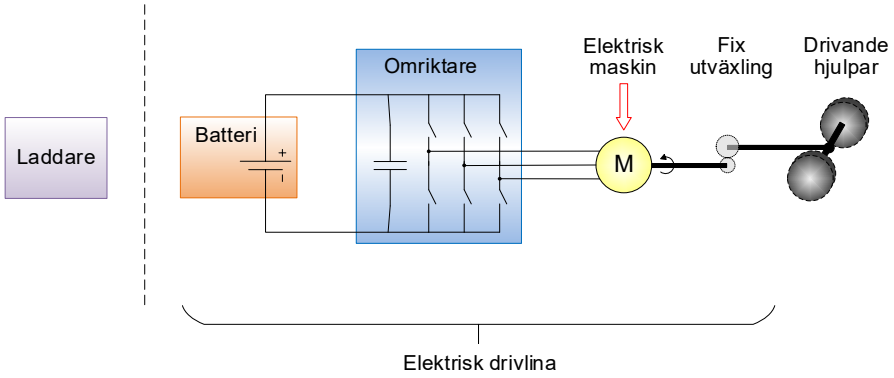
Elektriska maskiner omvandlar elektrisk energi till mekanisk och vice versa via magnetisk energi. En elektrisk framdrivningsmotor används i fordon för att leverera mekanisk kraft i form av ett önskat vridmoment till hjulen medan fordonets, och därmed även hjulets och motorns hastighet varierar. Elektriska framdrivningsmotorer bör företrädesvis kunna producera ett högt vridmoment relativt deras vikt eller volym, ha hög verkningsgrad, hög reglerbarhet, låg kostnad och låga ljud- och vibrationsnivåer. Andra viktiga konstruktionsparametrar är möjlighet till återvinning och låg användning av miljöfarliga eller

knappa material. Som en allmän tumregel kan det sägas att vridmomentet är proportionellt mot den elektriska maskinens volym, medan effekten också beror på motorvarvtalet.

Eftersom den elektriska motorn endast är en del av ett elektriskt drivsystem, som exemplifieras schematiskt i figur 2.3, kan det finnas ytterligare externa faktorer som påverkar designvalen. Exempel på detta är begränsat packningsutrymme, maximal likspänningsnivå från matningsbatteriet (ofta runt 400 V för personbilar) eller maximal tillåten växelström i motorn på grund av termiska begränsningar (ofta 400–600 A rms).

Det finns många sätt att klassificera elektriska maskiner beroende på deras huvudsakliga egenskaper, till exempel typen av spänning/ström som matar den (likspänning eller växelspänning), vilken typ av rörelse den producerar (linjär eller roterande med låga, höga eller varierande varvtal), sättet att generera magnetfält i de olika delarna (elektromagneter med olika lindningstyp, eller permanentmagneter med olika placering och av olika material) och det magnetiska flödets orientering (radiell, axiell, transversell) samt maximal effektnivå. Det finns alltså flera olika typer av elektriska växelströmsmaskiner, till exempel induktionsmaskiner och synkronmaskiner med permanentmagneter (på engelska ”permanent magnet synchronous machine”, PMSM). Den hittills vanligast förekommande maskintypen i elektrifierade fordon är PMSM, såväl i hybridiserade som helelektriska fordon. Därför har i detta arbete en motor av PMSM-typ valts som ***referensmotor,*** som de övriga undersökta maskintyperna jämförs med. I referensmotorn är permanentmagneterna monterade i rotorkärnan nära dess yttre yta.

Figur 2.3: Schematisk översikt över ett elektriskt drivsystem; batteri, omriktare, elmotor och växel.



2.3.1 Grundläggande parametrar för elektriska maskiner

En elmaskins konstruktion och storlek baseras på två grundläggande motorparametrar, vridmoment och effekt. Båda relaterar till den elektromagnetiska kraften som produceras av motorn. Vridmoment (T) är måttet på rotationskraften på rotorn och har enheten Newtonmeter (Nm). Effekten (P), i sin tur, är graden av arbete som utförs av vridmomentet per tidsenhet och utrycks i Watt (W). Därför kan effekten för en roterande elektrisk maskin uttryckas som produkten av vridmomentet och vinkelhastigheten (ω), vilken har enheten radianer per sekund (rad / s). Förhållandet kan skrivas som:

$$P = T \times \omega \tag{2.1}$$

När det gäller elektriska maskiner används emellertid vanligen parametern varvtal (n), uttryckt i rotationer per minut (varv per minut), istället för vinkelhastighet. Eftersom

$$n = \frac{60}{2\pi} \times \omega \tag{2.2}$$

kan uttrycket för effekt då skrivas som:

$$P = T \times \frac{\pi}{30} \times n \tag{2.3}$$

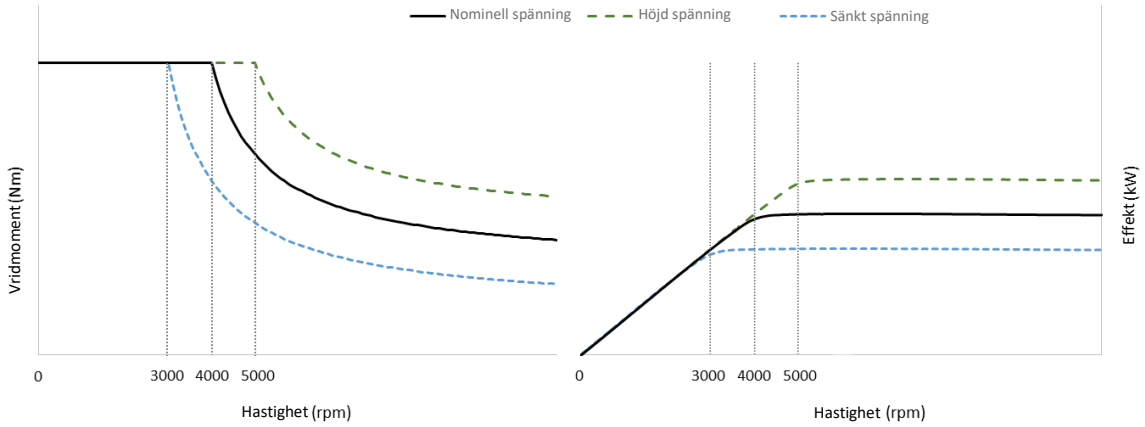
En konventionell industriell elektrisk motor, till exempel en pump, arbetar under en lång tid (mer än 10 minuter) med konstant effekt och vridmoment. Detta kallas kontinuerlig drift och den maximala driftspunkten bestäms då av maskinens termiska maximum. I en personbil är det däremot vanligt att det krävs hög effekt under accelerationer som bara varar i cirka 5–15 sekunder. Resten av tiden behövs en betydligt lägre effekt. Eftersom elektriska maskiner har lång termisk tidskonstant, är det i fordon möjligt att utnyttja det faktum att den elektromagnetiska förmågan hos en elektrisk maskin är mycket högre än den termiska förmågan. Toppmomentet är vanligtvis två till tre gånger högre än det kontinuerliga vridmomentet, men kan i vissa maskiner vara upp till 5 gånger högre. Elmotorer för fordon specificeras därför ofta med toppvärdet, för att ange hur mycket effekt som kan levereras under en kortare acceleration.

All elektrisk energi som matas till en elektrisk maskin omvandlas inte till användbar mekanisk energi. Viss energi går förlorad på vägen, till exempel i ledningar/lindningar (kopparförluster), i det magnetiskt ledande materialet (virvelströmsförluster och hysteres) och på grund av mekanisk friktion. Sådana energiförluster omvandlas till värmeenergi som kräver kylning (vilket i sin tur förbrukar extra energi) och drar ner motorns prestanda. Motorns verkningsgrad definieras som förhållandet mellan effektuttaget och effektinmatningen.

Moderna elektriska maskiner för fordon har mycket hög verkningsgrad, upp mot 97%, och den genomsnittliga verkningsgraden under varierad körning når upp till 90%, beroende på körprofil (Grunditz och Thiringer, 2015). Redan vid start kan en elektrisk maskin producera maximalt vridmoment, som är konstant vid låg hastighet (lågt varvtal), se figur 2.4, och när hastigheten (motorvarvtalet) ökar så ökar också den maximalt uppnåeliga effekten. Vid en viss hastighetsnivå, kallad bashastighet, begränsas effekten enligt figur 2.4 beroende på batteriets maximala spänning och effekt. Därför är systemets märkspänning (för vilken motorn är konstruerad) grundläggande för förhållandet mellan effekt och vridmoment.

Över bashastigheten minskar det tillgängliga maximala vridmomentet som funktion av den ökande hastigheten. Detta kallas *fältförsvagning* och används vanligtvis för att möjliggöra körning i höga hastigheter och för att tillhandahålla en mekanisk effekt på hjulen som liknar den från en förbränningsmotor med en växellåda, det vill säga med en förlust av vridmoment och därmed lägre acceleration vid hög hastighet jämfört med låg hastighet (Hendershot och Miller, 2010). Med denna metod utökas det möjliga varvtalsområdet upp till den maximala hastigheten, vilket kan vara 2–4 gånger bashastigheten, utan att kräva en ökad storlek på drivsystemet.

Figur 2.4: Det typiska förhållandet mellan vridmoment, effekt och hastighet (varvtal) för en elektrisk maskin, inklusive hur den maximala effekten, maximala vridmomentet och bashastigheten också beror på spänningen, exemplifierad för intervallet 3000–5000 rpm (varv per minut)



Elektriska maskiner kan normalt drivas både som motor och generator. I motordrift omvandlas elektrisk energi till mekanisk energi för att driva fordonet och i generatordrift fungerar maskinen som en broms och återvinner mekanisk energi till elektrisk energi (som kan lagras i ett batteri).

2.3.2 Designvariationer och metoder

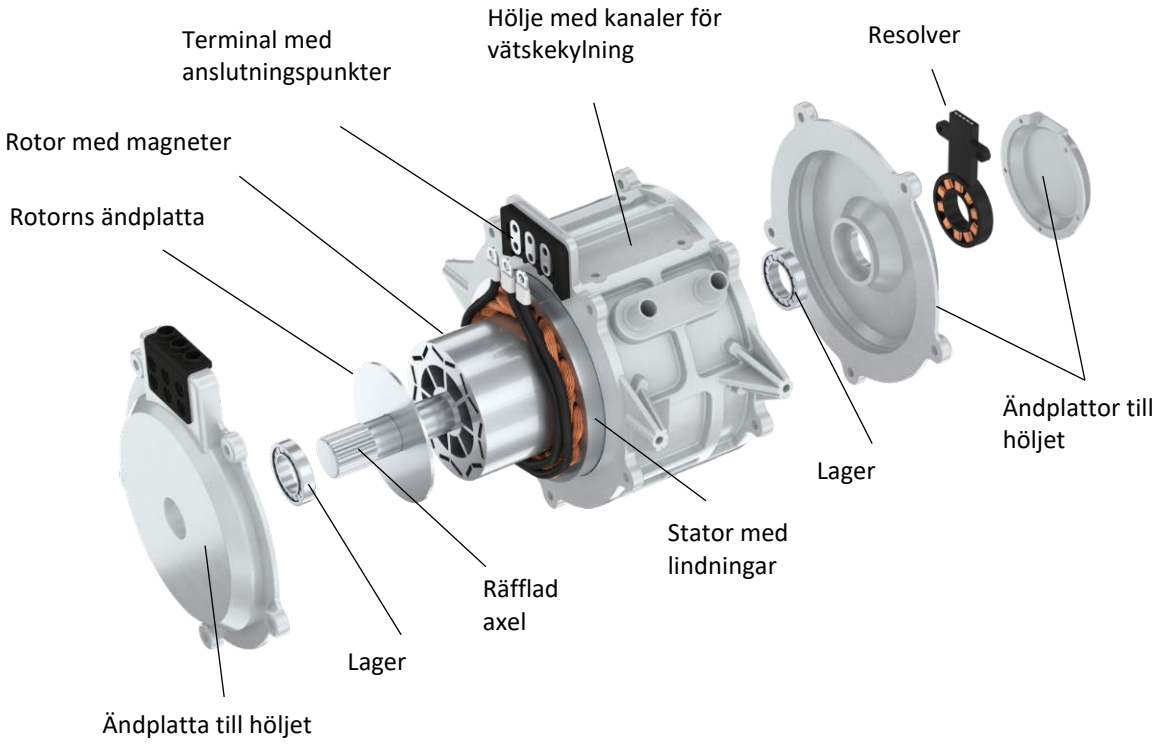
Det finns betydande variationer i design av elmotorer för fordon, även för applikationsområden som liknar varandra, som motorer i elbussar och i elbilar. Uppgiften att designa en elektrisk motor för ett drivsystem kräver överväganden inom flera olika kunskapsområden, till exempel elektromagnetik (för att beräkna vridmoment, energiförluster mm), kemi (materialkunskap) och mekanik (för att kunna beräkna hållfastighet, temperaturer, vibrationer och ljud mm). Utgångspunkten är ofta övergripande krav på fordonet och drivlinan, och designparametrar och kriterier för de olika delarna balanseras och beaktas ur ett systemperspektiv. För att uppnå kort konstruktionstid konstrueras emellertid ibland motorn mer eller mindre oberoende av systemet. Drivsystemet kan då komma att fungera mindre bra eller motorn kan vara överdimensionerad i en eller flera aspekter. Det finns också många rimliga designlösningar som uppfyller liknande krav.

En elektrisk maskins vridmoment och effekt är linjärt proportionell mot statorkärnans ytterlängd och kvadratiskt proportionell mot dess ytterdiameter, men enskilda applikation har ofta specifika geometriska begränsningar, till exempel olika stort utrymme tillgängligt för elmaskinen, så kallad packningsvolym. Det är ofta inte möjligt för en fordonstillverkare att få sin ideala motor till ett lågt pris. Vanligtvis kan ett bra pris erhållas genom att använda en design som maskinleverantören har sålt till andra kunder, eventuellt med måttliga modifieringar. Ett viktigt skäl till detta är att verktygen för att tillverka elektrostålplåtarna (till de laminerade rotor- och statorkärnorna) är mycket dyra och därför erbjuder leverantörer vanligtvis bara maskiner med vissa fasta diametrar. Längden kan emellertid lättare justeras för att leverera önskad effektnivå genom att lägga till eller ta bort plåtar.

2.3.3 Elmaskinens olika delar

För cylindriska elektriska maskiner, som normalt används i fordon, överförs den mekaniska effekten via en roterande axel som kan driva en extern last. Den rörliga delen av maskinen (som är monterad på axeln) kallas därför *rotor* i alla typer av elektriska maskiner. En annan del, som är stationär, kallas *stator*, och de två delarna separeras av ett tunt luftgap. Andra, mindre vanliga typer av maskiner kan ha flera rörliga delar eller ha en linjärt rörlig rotor. Rotorn kan placeras antingen innanför, vilket är vanligast, eller utanför, statorn. Mekaniskt förenas statorn och rotorn via lager monterade på axeln. Figur 2.5 visar en sprängskiss av en PMSM och dess huvuddelar.

Figur 2.5: Sprängskiss av PMSM-motor, från Nordelöf et al. (2018).



Statorns roll är att skapa ett roterande magnetfält, riktat i radiellt led, som tvingar rotorn att rotera. Magnetfältet skapas av att de vanligen tre fasernas lindningar utplaceras strategiskt runt om i statorn och matas med trefas-växelspänning. Inmatad elektrisk effekt till statorn omvandlas således till ett magnetfält. Det magnetiska flödet korsar luftgapet mellan statorn och rotorn och skapar en kraft i rotorn som får rotorn att rotera. Anledningen är att rotorns magneter samverkar med magnetfältet som produceras av statorn. Rotationskraften (vridmomentet) beror på styrkan hos det producerade magnetfältet i statorn, vilken i sin tur aktivt styrs av nivån på inmatad växelström. Statorns lindning är nästan alltid av kopparledare. En annan möjlighet är att använda det lättare och billigare materialet aluminium i stället för koppar, dock ger det högre energiförluster i ledarna och därmed lägre verkningsgrad.

Den elektriska strömmen kan matas från valfri spänningskälla, som nätsladd eller från ett batteri. I ett typiskt drivsystem i ett elfordon kommer strömmen som matar elmotorn från ett batteri via en omriktare (växelriktare). Omriktaren styr den elektriska maskinens drift genom att slå på och stänga av transistorer samtidigt som den omvandlar batteriets likspänning till en styrbar, trefas växelspänning och växelström. För en snabb, pålitlig och stabil maskinstyrning mäts rotorns läge och rotationshastighet vanligtvis av en så kallad resolver, som liknar en mycket liten elektrisk maskin med lindningar och en järnkärna.

De maskindelar som leder det magnetiska flödet, rotor- och statorkärnorna, består i allmänhet av elektriskt stål för att koncentrera det magnetiska flödet och därmed minimera så kallade magnetiska läckflöden, det vill säga magnetiska flöden som tar oönskade omvägar och därmed inte bidrar till vridmomentproduktionen. Läckflödena kan också orsaka energiförluster samt störningar på andra komponenter. För att minimera inducerade strömmar i ståldelarna består båda kärnorna av staplade tunna stålskivor, kallade *laminat*, var och en cirka 0,3 mm tjocka och elektriskt isolerade. Laminaten pressas samman för att bilda en stapel längs axeln och som utgör den aktiva längden på statorn och rotorn. Till exempel är en vanlig längd för en elmotor till en bakaxel i en personbil cirka 100–200 mm.

Axeln monteras i rotorn. Axeln är ofta tillverkad av kolhaltigt stål, eller ibland, när korrosion måste undvikas, av rostfritt stål (Tong, 2014). Maskinen täcks av en cylindrisk ram, kallad *hus* eller hölje, som i allmänhet för fordonsapplikationer är tillverkat av aluminium (Tong, 2014). De cylindriska änd-delarna av huset benämns ändplattor. De monteras tillsammans med lagren och ingår i huset beroende på hur mycket integration det finns med de omgivande drivlinekomponenterna.

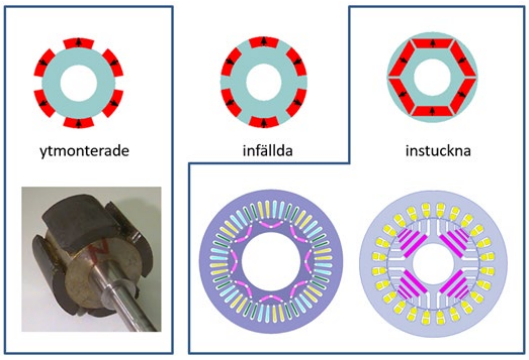
På grund av oundvikliga energiförluster, vilka ökar med ökande effekt, måste elektriska maskiner kylas. Typiska maxtemperaturer är 100–120˚C i magneterna och 150–180˚C i lindningen. En effektiv kylning gör det möjligt att driva en högre effekt i maskinen. Vätskekylning i huset används vanligtvis för framdriftsmotorer för fordon, till skillnad från allmänna industriella elmaskiner, där luftkylning ofta är tillräckligt.

För att få hög effekttäthet vill man att maskinens rotationsvarvtal skall vara relativt höga. Det leder till att maskinen roterar snabbare än fordonets hjulhastighet under drift. För att kunna realisera detta behövs en växel mellan maskinens axel och fordonets drivaxel.

2.3.4 PMSM med olika magnetplaceringar och magnetmaterial

Magneterna i en permanentmagnet-synkronmaskin (PMSM) kan placeras på olika sätt, vilka exemplifieras i figur 2.6. En enkel lösning är att placera magneterna på rotorns yta, en så kallad ytmonterad PMSM. I vissa fall används sådana motorer i elektriska drivlinor. Det är dock möjligt att få ut ett högre vridmoment från samma maskin och magnetvolym genom att istället placera magneterna inuti rotorn, vilket därför är vanligare (Burress et al., 2011, Sato et al., 2011). Det högre vridmomentet beror på att vridmoment även skapas om den magnetiska ledningsförmågan varierar längs rotorns periferi, vilket den gör om magneterna placeras med visst mellanrum som istället fylls upp av laminat. Då kommer rotorn att sträva efter att ställa in sig, genom att vrida sig runt sin axel, för att den magnetiska reluktansen (magnetiska motståndet) längs magnetflödets slinga ska minimeras, så kallat reluktansvridmoment. Det är även detta fenomen som de så kallade synkronreluktansmaskinerna, vilka helt saknar magneter, utnyttjar vid sin vridmomentproduktion. I så kallade permanentmagnet-assisterade synkronreluktansmaskiner, PMaSynRM, utnyttjar man alltså reluktansvariation i hög grad för vridmomentproduktionen, men placerar även en viss mängd magnetmaterial strategiskt i magnetflödesbanorna för att på så sätt öka vridmomentproduktionen. Ett exempel på en PMaSynRM visas längst ner till höger i figur 2.6.

Figur 2.6: Olika magnetplaceringar i rotorn; ytmonterade, infällda eller instuckna i rotorn.



Magneterna i rotorn placeras för att omväxlande åstadkomma nord- och sydpoler runt om i rotorn i så kallade *poler*. Samma antal poler återskapas vanligen även med statorlindningen (som utgör elektromagneter). Maskinens varvtal, n, och den elektriska frekvensen, f_s, på den matande växelspänningen relaterar till antalet poler, p, enligt

$$n = 120\,\frac{f_s}{p} \tag{2.4}$$

Det innebär att om man vill öka antalet magnetiska poler, men behålla ett givet maxvarvtal, måste även växelspänningsfrekvensen öka i motsvarande grad. Det gör att rotationshastigheten på det stator-producerade magnetfältet ökar, vilket ökar de frekvensberoende energiförlusterna. En högre frekvens på det roterande magnetfältet gör emellertid också att dess utbredning i framförallt statorryggen minskar, vilket gör att statorryggen kan göras tunnare och därmed kan motorn minska i volym och vikt. Om antalet poler ökas för statorlindningen, kan lindningens härvändar kan göras kortare, eftersom det blir kortare avstånd mellan polernas spår.

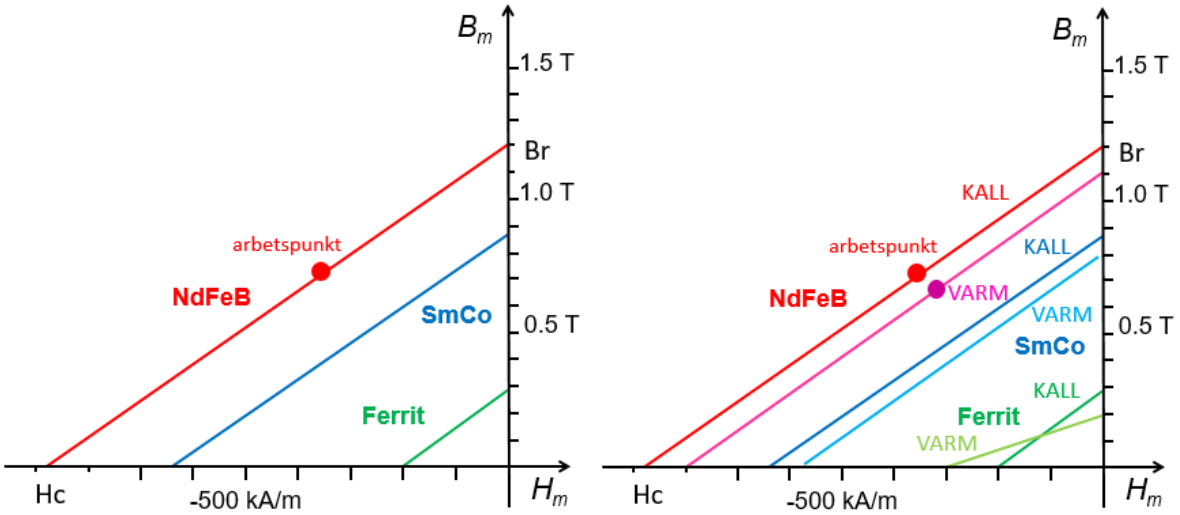
Figur 2.7a visar ungefärliga egenskaper, flödestäthet, B_m som funktion av fältstyrka, H_m, för några av de vanliga permanentmagnetmaterialen; neodym-järn-bor (NdFeB), samarium-kobolt (SmCo) och ferriter. Magneterna är starkare om de har ett högt värde på energiprodukten ($B_m \times H_m$). Från figur 2.7a kan vi se att NdFeB är det starkaste magnetmaterialet med högsta värdet på såväl remanensen (B_m=B_r) som koerciviteten (H_m=H_c). Det är dock inte bara den maximala energiprodukten som skiljer sig mellan de olika permanentmagnetmaterialen. Det finns också variationer i kostnad, temperaturbeständighet, risk för avmagnetisering, resistivitet, densitet och hållfasthet, samt produktionstekniker och möjlighet till återvinning. Alla permanentmagneter som används i fordon är tillverkade genom sintring av en pulvriserad blandning och magneterna är därför spröda.

Ferriter är elektriska och termiska isolatorer, medan NdFeB-magneter ger problem med värmealstrande virvelströmförluster. Ferriter innehåller inte några sällsynta jordartsmetaller som neodym i NdFeB-magneter, eller neodym och dysprosium i Nd(Dy)FeB-magneter. En stor nackdel med ferriter är dock att de är svagare (med lägre $B_m \times H_m$). Detta kan kompenseras genom att maskinerna tillåts bli större vilket möjliggör att samma motorprestanda (total effektnivå) kan erhållas som med de starkare magnetmaterialen.

Trots att de kallas permanentmagneter så kan magnetiseringen påverkas utifrån om de utsätts för yttre magnetfält, höga och låga temperaturer och mekaniska krafter. Vid stor påverkan kan magneterna till och med förlora sin magnetisering permanent. De starkaste magneterna (med högst $B_m \times H_m$) är mest motståndskraftiga mot avmagnetisering. När magneterna är placerade i rotorn i en elektrisk maskin så är det magnetfältet från statorn som utsätter magneterna för avmagnetiserande magnetfält. Risken att magneterna skadas av detta måste undvikas i designstadiet. Också uppvärmning av rotorn kan leda till avmagnetisering. Framförallt ytmonterade magneter är utsatta för statorfälten som både avmagnetiserar och skapar värmealstrande förluster i magneterna.

De olika magnetmaterialen reagerar olika på värme, vilket illustreras i figur 2.7b. Där ser vi att magnetstyrkan sjunker vid ökad temperatur för NdFeB och SmCo, medan lutningen (permeabiliteten) på demagnetiseringslinjen ändras för ferriterna för att beloppet på H_c ökar med ökad temperatur. Därför är det större risk att avmagnetisera ferriter när motorn är kall än när den är varm. Skillnaderna i egenskaper mellan de undersökta magnetmaterialen sammanfattas i tabell 2.1.

Figur 2.7: Magnetisk flödestäthet som funktion av fältstyrka för olika magnetmaterial för a) kall magnet (till vänster) och b) kall och varm magnet (till höger).



Tabell 2.1: Egenskaper för de modellerade magnetmaterialen där grön text markerar goda egenskaper och röd text markerar sämre egenskaper

	Remanens B_r [T]	**Koersivitet** H_c [kA / m]	**Elektrisk lednings-förmåga** [kS/m]	**Mass-densitet** [kg/m³]	**Risk för av-magnetisering**	**Pris** [SEK/kg]	**Innehåll av sällsynta jordarts-metaller**
Nd(Dy)FeB	hög	hög	hög	hög	låg	högt	ja
SmCo	mellan	mellan	hög	hög	mellan	högt	ja
Sr-ferrit	låg	låg	nära noll	lägre	hög	lågt	nej

2.3.5 PMSM jämfört med induktionsmaskiner

Elektriska motorer för framdrift i fordon är alltså ofta av PMSM-typ (Ramesh och Lenin, 2019). En av de kända modellerna för elfordon, Tesla Model S, använder emellertid induktionsmaskiner, numera dock endast som komplementmotor för ökad acceleration. I det följande diskuterar vi kort skillnaderna mellan dessa två elektriska maskintyper.

Generellt sett har en induktionsmaskin lägre verkningsgrad och lägre effekt- och momenttäthet jämfört med en maskin av PMSM-typ i samma storlek, vilket gör att en induktionsmaskin behöver vara lite större än en maskin av PMSM-typ för att kunna producera samma vridmoment. Skillnaden mellan de två typerna är rotorkonstruktionen och mekanismen för produktion av vridmoment. Induktionsmaskiner innehåller inga magneter, istället har deras rotorer aluminium- eller kopparstänger i vilka strömmar induceras och skapar det magnetfält som är nödvändigt för vridmomentproduktion. Induktionsmaskinerna har fått sitt namn från att strömmar just induceras i rotorledarna. Ett annat namn på induktionsmaskinen är asynkronmaskinen som härrör från att rotorn roterar asynkront relativt statorns roterande magnetfält. Det innebär att rotorn roterar något långsammare än statorns magnetfält, med så kallad *eftersläpning* och det är den relativa hastigheten som gör att det induceras ström i rotorledarna och att ett vridmoment erhålls. I en synkronmaskin roterar rotorn med tillhörande magneter med samma hastighet (synkront) som det roterande magnetiska statorfältet.

2.3.6 Radialflödesmaskiner jämfört med axialflödesmaskiner och transversalflödesmaskiner

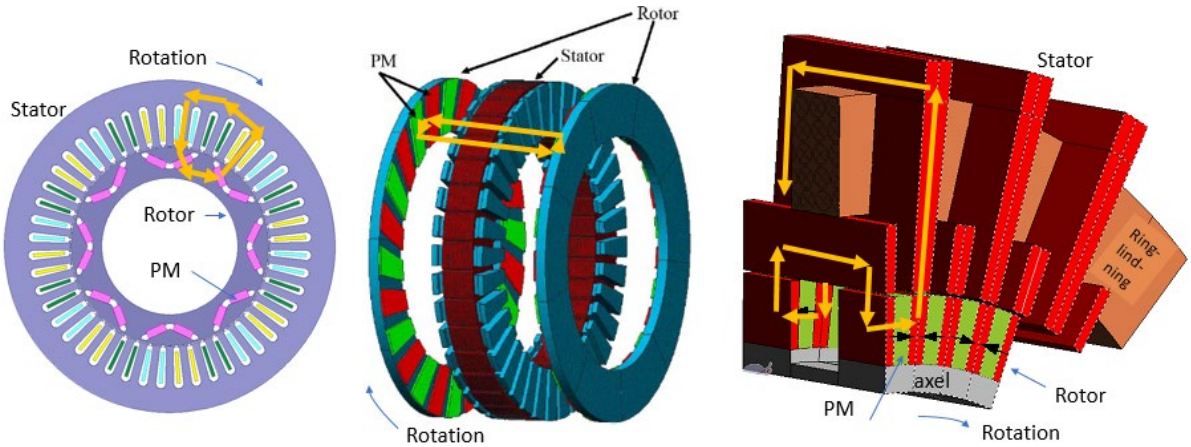
Elmaskinens rotor- och statorkärna är nästan alltid gjorda av laminerat stål för att leda det magnetiska flödet i laminatets plan. Men det finns alternativa designlösningar där det magnetiska flödet går en annan väg genom motorn än i de ovan beskrivna *radialflödesmaskinerna* (RFM). Hit hör *axialflödesmaskinen* (AFM) och *transversalflödesmaskinen* (TFM). I bägge dessa maskintyper kan de konventionella stållaminaten bytas ut mot pressat järnpulver. Detta skulle kunna förenkla materialåtervinningen genom att när motorn går genom fragmenteringen krossas motordelarna. Då frigörs kopparn från järnet, vilket möjliggör en mer högkvalitativ återvinning av både koppar och stål. Dock ger motordelar av pressat järnpulver större energiförluster under motorns användning än delar av stållaminat. Samt mindre moment och effekt för samma storlek på motorn.

I den konventionella radialflödesmaskinen leds det magnetiska flödet i en tvådimensionell bana runt i statorn och rotorn och passerar luftgapet radiellt två gånger. I axialflödesmaskinen passerar det magnetiska flödet luftgapet axiellt, vilket förklarar dess namn. En axialflödesmaskin med permanentmagneter har, liksom en radialflödesmaskin med permanentmagneter, högt vridmoment, hög effekttäthet och hög verkningsgrad. Konstruktionen är dock mer komplicerad, och axialflödesmaskinen har tidigare ansetts gynnsam endast för applikationer med stor diameter relativt längd, som i motorer integrerade med hjulen på fordon, vilket är intressant för skogs- och anläggningsmaskiner. Det finns många alternativa sätt att konstruera axialflödesmaskiner, men de bästa kommersiella maskinerna tenderar att ha två rotorer och en central stator (vilket ger mekanisk stabilitet men försvårar kylning av statorlindningarna).

I transversalflödesmaskinen passerar det magnetiska flödet luftgapet radiellt (ibland fler än två gånger) men flödet i statorn och rotorn följer inte samma väg som i radialflödesmaskinen utan leds i en bana som är på tvärs med rotationsriktningen. Detta illustreras i figur 2.8. Det finns en variant på transversalflödesmaskinen som kallas klopolmaskin, där statorkärnan (och

ibland även rotorkärnan) är utformade som klor och det magnetiska flödets bana är tredimensionellt, vilket gör att stållaminat inte kan användas utan pressat järnpulver är enda alternativet. Transversalflödesmaskinen (och klopolmaskinen) har en fördel i att lindningen har en enkel konstruktion, den består endast av en ring-lindning per fas, vilket ger förhållandevis låga energiförluster i kopparlindningen.

Figur 2.8: Radialflödesmaskin (tvärsnitt), axialflödesmaskin (med förstorade luftgap), och (del av) en transversalflödesmaskin. Banan av det magnetiska flödet illustreras av orange pilar.



2.3.7 Varianter på statorlindningar; distribuerad, koncentrerad och hårnålslindning

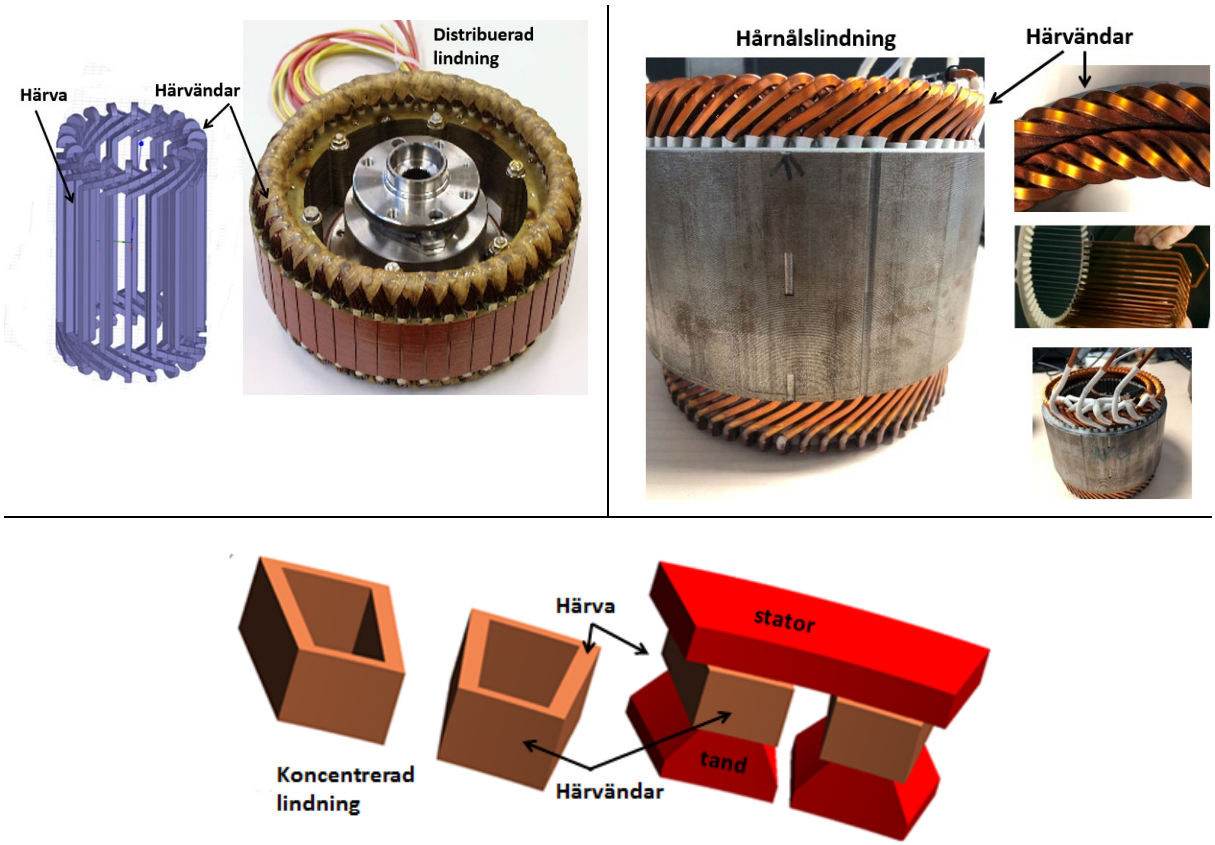
De vanligaste lindningarna, så kallade *distribuerade lindningar*, består av härvor av rund koppartråd som placeras i statorspåren mellan statortänderna, där varje härva har ett spann av flera statortänder. Härvändarna varvas i motorns ändar så att alla härvändar tillsammans bildar en kompakt krans i var ände på motorn, se figur 2.9. Varje tråd har ett lager av elektriskt isolerande material, till exempel lack, och längs innerytan i varje spår finns en spårisolering av papper eller tunn film av polyester. I härvändarna behövs även isolering mellan faserna.

Koncentrerade lindningar lindas runt en statortand, se figur 2.9, så att varje härva har ett spann av endast en tand. Denna typ av lindning är relativt ny och används i mindre motorer och i motorer med permanentmagneter såsom PMSM-motorer. Fördelarna inkluderar kortare härvändar (och därmed kortare elmaskin och lägre energiförluster) och man får en enklare lindningskonstruktion. Det finns också en möjlighet till att få plats med högre andel koppar i spåret, det vill säga *fyllfaktorn* kan vara hög, speciellt om man använder böjbar rektangulär koppartråd, se figur 2.10. I en maskin med koncentrerade lindningar hålls lindningarna åtskilda utan överlappande härvändar och ett eventuellt isolationsfel i en lindning behöver inte betyda ett helt haveri, utan elmaskinen kan fortsätta användas med begränsad funktion. Den koncentrerade lindningen har nackdelar som högre pulsationer av vridmomentet och att det magnetiska flödet som trycks på rotorn från statorsidan har långt ifrån ideal sinusform. Det senare leder till högre energiförluster i rotorn vilka kan vara svåra att hantera termiskt.

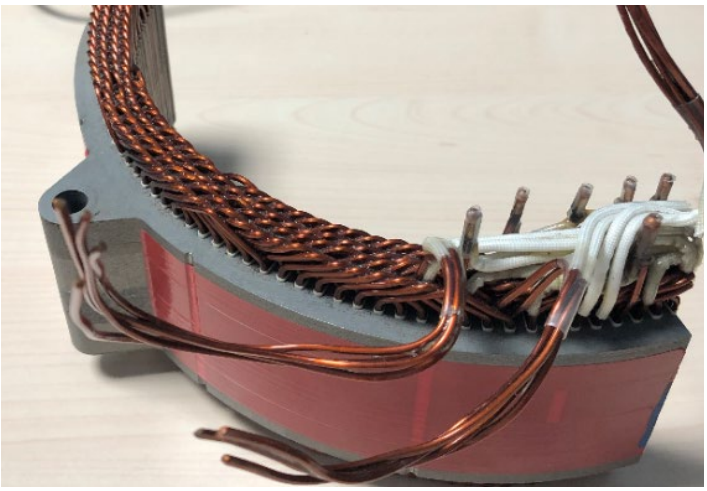
Fraktionella spårlindningar (på engelska ”fractional slots”) är en teknik som kan användas för att minska momentpulsationerna och dämpa de högre frekvenserna hos spänning och magnetfält, genom att ordna lindningen så att antalet statorspår per magnetisk pol per elektrisk fas inte är ett heltal.

En så kallad *hårnålslindning* består av kopparstänger med rektangulära tvärsnitt som böjs i ena änden av maskinen och därför får formen av en hårnål, se figur 2.9. Ledarna isoleras med tre ytskikt innan de böjs och monteras i spåren i axiell riktning. Med hårnålslindningar kan en hög fyllfaktor uppnås. Detta gör att det är lättare att leda bort värmen som uppstår när ström går genom ledarna och det ger också en ökad effekttäthet. Den större tvärsnittsarean på lindningen ökar emellertid de frekvensberoende energiförlusterna som uppstår genom att så kallade virvelströmmar induceras i ledarna på grund av magnetiska läckflöden. Den konventionella, distribuerade, lindningen med många hopbuntade trådar har sinsemellan slumpmässig placering inom härvorna, varför den frekvensberoende förlusten reduceras. Däremot är den icke frekvensberoende förlusten lägre med hårnålslindningar eftersom lindningen har en högre fyllfaktor. Därför är hårnålslindningen att föredra vid lägre frekvenser, och därmed rotationsvarvtal, medan den konventionella lindningen är bättre vid högre frekvenser. Ju fler nålar (pins) i varje spår, desto mer liknar hårnålens lindning den konventionella lindningen med rund trådlindning som är slumpmässigt utspridd i spåret.

Figur 2.9: Konventionell lindning, här med isolermaterial applicerat (överst till vänster), hårnålslindning (överst till höger) och koncentrerad lindning (nederst).



Figur 2.10: Lindning med böjbar fyrkantstråd (som förts in i spåren radiellt).



DEL 2 - NULÄGESANALYS

Denna del av rapporten beskriver de nulägesanalyser som gjordes i projektets inledning och som ledde fram till val av exakt vilka motoralternativ och End-of-Life system som modellerades i projektets senare delar. Kravspecifikationer för studerade motorer upprättas baserat på fordonskrav. Vilka av de material som ingår i en elmotor som är mest resurskrävande identifieras. Demontering av använda motorer beskrivs både utifrån egna demonteringsstudier och litteraturen. Tillsammansmed en kartläggning av dagens End-of-Life hantering ledde detta fram till möjliga strategier för mer cirkulära flöden, som kunde utvärderas i projektets senare delar.

---

3. Fordons- och motorkravsättning

I projektet jämfördes olika elmotortyper i fråga om både mängden och sammansättningen av ingående material samt energiförbrukning under drift. Resultaten gick vidare in i utvärdering med hjälp av livscykelanalys. Mängden material som behövs beror på hur kraftfull elmaskin som önskas. Generellt gäller att ju större kraft som ska levereras, desto mer material behövs. Likaså kan energiförbrukningen under drift påverkas av hur stor elmaskinen är. Detta beror på att motorns verkningsgrad varierar med belastning, det vill säga hastighet och rotationskraft. Även om en större elmaskin kan uppnå en högre topp-verkningsgrad jämfört med en mindre, krävs det en högre belastning (vridmoment) för att nå den.

För en kunna göra en så rättvis jämförelse som möjligt av de olika alternativa motordesigner som jämförs i projektet bör jämförda motorer leverera likartad effekt under likvärdig belastning. Därför har alla motortyper anpassats till samma fordonstorlek och så långt som möjligt samma fordonsprestanda. För studiens allmänna giltighet och relevans har vi identifierat fordonskrav som kan antas vara representativa för typiska fordon på marknaden både i närtid och på sikt. Dessa beskrivs i avsnitt 3.2.

Elektrifiering av fordonsflottan bedrivs idag globalt för en lång rad olika markgående fordonstyper, från två-hjulingar och personbilar till lastbilar, bussar och arbetsfordon. I projektet har vi valt att utgå från ett lätt och ett tungt fordon representerade av en personbil och en stadsbuss. Endast helelektriska fordon, det vill säga fordon utan förbränningsmotor, behandlas. Fordonsparametrar och prestanda för både det lätta och tunga fordonet har valts mot bakgrund av befintliga modeller på den globala marknaden, så att de representerar en typisk modell snarare än en specifik modell. Som bakgrund har en tidigare publicerad sammanställning av fordons- och drivlinedata rörande batterielektriska personbilsmodeller på marknaden använts (Grunditz och Thiringer, 2016b). Motsvarande data för bussar har sammanställts inom ramen för detta projekt och publiceras som en separat rapport (Grunditz, 2020).

För de valda fordonsspecifikationerna har vi sedan identifierat vilka krav som behöver ställas på motorn för att uppnå dem, för både personbilen och bussen (avsnitt 3.3). I avsnitt 3.4 redogörs slutligen vilka motortyper som förekommer på marknaden.

3.1 Motiv till val av fordonstyper

Globalt står personbilar idag för den största andelen av transportsektorns energiförbrukning (och därmed även utsläpp). I sexton av IEA:s (International Energy Agency) medlemsländer var siffran 59% år 2017 (IEA, 2019a). Andelen spås av IEA att vara fortsatt mycket hög inom de närmsta tre decennierna (IEA, 2019c). Därför är en förbättring av personbilars verkningsgrad av högsta vikt för att begränsa transportsektorns energiförbrukning, vilken ändå spås öka med väntad befolkningsökning.

Många av de största fordonstillverkarna erbjuder sedan några år en helelektrisk personbilsmodell på marknaden (Grunditz och Thiringer, 2016b, Ramesh och Lenin, 2019). Försäljningsvolymerna av dessa fordon har ökat kraftigt de senaste åren, framförallt i Kina, Europa och USA (IEA, 2019b), även om de än så länge endast utgör några få procent av den totala personbilsförsäljningen i världen. Försäljningsvolymerna av elbilar förutspås fortsätta öka de närmsta 2–3 decennierna (IEA, 2019b, c), till stor del på grund av de allt strängare miljökrav som ställs på fordon, framförallt utsläppsregler. Därtill har de flesta stora fordonstillverkare tillkännagivit planer på utveckling av flertalet nya elektrifierade modeller.

Det väntas många nya modeller i alla fordonsstorlekar. I Kina och USA, till skillnad från Europa, väntas flest nya modeller komma i SUV-formatet (IEA, 2019b)

Bussar står i dagsläget för en relativt liten del av transportsektorns energiförbrukning, 2017 bara 2 % (IEA, 2019a) vilket kan jämföras med 27% för lastbilar och 8% för flyg. Den förutspås vara fortsatt relativt låg de närmsta 3 decennierna (IEA, 2019c). Ändå är övergången mot helelektrifierade bussar i full gång framför allt i Kina som idag utgör 99% av marknaden. Vår marknadsundersökning visade att det redan 2018 fanns ett stort antal tillverkare av produktionsfärdiga batterielektriska bussar, inte bara i Kina, utan även i Europa, Nordamerika och Australien. Den övervägande andelen var stadsbussar, varför vi valde att undersöka elektriska motorer för en stadsbuss.

Marknaden för elbilar och elbussar sammanfattas i tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1: Total global fordonsflotta och försäljning av batterielektriska och ladd-hybrid elbilar och elbussar för 2018, samt andel försäljning i Kina [IEA_EV_Outlook2019].

	Elbilar	**Elbussar**
Global fordonsflotta	5,1 miljoner	460 000
Global försäljning	<2 miljoner	92 000
Andel sålda batterielektriska fordon	68%	93%
Andel sålda i Kina	55%	99%

Även om lastbilar står får en högre andel av transportsektorns energiförbrukning än bussar, hade det vid tiden för detta arbete ännu inte publicerats mycket data om elektrifierade modeller. Idag, då denna rapport skrivs, erbjuder ett flertal lastbilstillverkare produktionsfärdiga modeller i mellanstorleken ämnade för leveranser i stadsmiljö (det vill säga för relativt korta körsträckor) (IEA, 2019c), viket gör dem mycket intressanta för vidare studier. IEA förutser att antalet elbussar kommer att öka snabbare än antalet ellastbilar det närmsta decenniet (IEA, 2019c).

3.2 Fordonsparametrar

De valda fordonsparametrarna rör aspekter som påverkar vilken kraft och hastighet som elmaskinen behöver kunna leverera till fordonets drivande hjulpar.

3.2.1 Personbilsparametrar

Samma personbilsdata som använts i en tidigare publikation har i detta arbete använts då det ansetts fortsatt relevant (Nordelöf et al., 2019a). Valet av fordonsparametrar utgick från en sammanställning publicerad 2016 (Grunditz och Thiringer, 2016b) av över 40 tillgängliga batterielektriska bilmodeller på den globala marknaden, i vilken specifikationer för fordonen och deras drivlinor presenteras och jämförs. Data har främst hämtats från tillverkarnas publicerade produktspecifikationer. Studien visar på en stor spridning i specifikationsdata för fordonen, deras drivlina, prestanda och energiförbrukning.

De fem mest sålda batterielektriska modellerna i världen under 2014 och 2015 var i turordning Nissan Leaf, Tesla Model S, BMW i3, Renault Zoe och Volkswagen e-Golf (Grunditz och Thiringer, 2016b). Model S skiljde sig markant från samtliga andra modeller på

marknaden med högre vikt, kraftfullare drivlina och högre fordonsprestanda. Modell i3 hade både en lägre vikt tack vare stor användning av lättviktsmaterial och en aningen kraftfullare motor vilket tillsammans ger den högsta prestandan av de övriga fyra. Två av modellerna, Nissan Leaf och VW e-Golf, hade mycket snarlika specifikationer för fordon, drivlina och prestanda.

Fordonsparametrar för det lätta fordonet i denna studie har därför baserats på data för både Volkswagen e-Golf och Nissan Leaf (Grunditz och Thiringer, 2016b), se tabell 3.2. Fordonsvikt och dimensioner är tänkta som ett slags medelvärden av de två modellerna och är valda för att representera en typisk mellanstor bil. Däremot har något kraftfullare prestanda valts med hänsyn till att historiska data över fordonsprestanda inom EU visar på allt högre topphastigheter och minskande accelerationstider (Bieker et al., 2019). Väglutning anges sällan i specifikationerna för personbilarna, men för de fåtal modeller där de anges är intervallet 20%-33% lutning (Grunditz och Thiringer, 2016b). Däckens rullmotståndskoefficient anges ännu mer sällan i specifikationerna och har här satts till ett relativt lågt värde. Slutligen har en förarvikt på 75 kg använts, vilket är standard i europeiska tester för typgodkännande.

Tabell 3.2: Använda fordonsdata baserade på Grunditz och Thiringer (2016b). Data som estimerats av författarna är kursiverade.

	BMW i3	**Renault Zoe**	**Nissan Leaf '15**	**Nissan Leaf '16**	**VW e-Golf**	**Vald personbils data**
Tjänstevikt fordon	1195 kg	1468 kg	1474 kg	1516 kg	1510 kg	1 500 kg
Effektiv tvärsnittsarea, *A*	2,38 m^2	*2,59 m^2*	2,27 m^2	-	*2.19 m^2*	2,2 m^2
Luftmotstånds-koefficient, C_d	0,29	0,29	0,291	0,29	0,27	0,28
Rullmotstånds-koefficient, C_r	-	-	-	-	-	0,009
Hjulradie, *r* (olastat)	0,345 m	0,311 m	0,316 m	0,316 m	0,316 m	0,316 m
Max hastighet	150 km/h	135 km/h	140 km/h	144 km/h	140 km/h	145 km/h
Tid för acceleration 0-100km/h	7,2 s	13,5 s	11,5 s	11,5 s	10,4 s	<10 s

3.2.2 Bussparametrar

Som underlag till denna studie har data för batterielektriska bussar samlats in och sammanställts för över 90 olika batterielektriska stadsbussmodeller av tillverkare från olika delar av världen. Denna data publiceras i en separat rapport (Grunditz, 2020). Data har hämtats från tillverkarnas publicerade produktspecifikationer, men även andra publicerade rapporter.

Relevanta insamlade fordonsdata är:

- Fordonsvikt och dimensioner, däckdimensioner, utväxling
- Topprestanda som maxhastighet, acceleration, maximal väglutning (vid bibehållen hastighet eller vid start)
- Energiförbrukning under drift

Det finns elektriska bussar i intervallet 6–19 m, men de avgjort mest vanligt förekommande, både på vägarna och sett till antalet modeller, är kring 12 m långa. Därför har längden 12 m valts för elbussen i studien.

För 12-meters bussarna varierar tjänstevikten (vikten av en buss utan förare och passagerare) mellan 12–15 ton och totalvikten (vikten av en fullastad buss) mellan cirka 18–20 ton. Variationen beror troligen på materialval, installerad batterikapacitet och, när det gäller totalvikten, maximalt antal passagerare. En linjär kurvanpassning gjordes för de bägge viktkategorierna. med vikt som funktion av längd för bussar mellan 10–13 m. Det resulterade i valet av en tjänstevikt på 13 ton och en totalvikt på 18,4 ton för elbussen i denna studie.

Ingen av busstillverkarna anger luftmotståndskoefficient, C_d, eller rullmotståndskoefficient, C_r (se avsnitt 8.3). Dessa har istället valts efter vad som återfunnits i en handfull (6) vetenskapliga publikationer, där luftmotståndskoefficienten varierade mellan 0,7–0,79 och rullmotståndskoefficienten mellan 0,0076–0,018. Som ungefärliga medelvärden valdes C_d till 0,75 och C_r till 0,013.

Ingen av busstillverkarna har heller tillhandahållit effektiv tvärsnittsarea, A. Arean kan dock uppskattas som en andel av bredden gånger höjden på bussen sett framifrån (eller bakifrån). Denna andel kunde endast utrönas från två av källorna och var då 0,9 och 0,95. Däremot återfanns bussens yttermått för åtskilliga av modellerna. Därför gjordes en linjär kurvanpassning för varje andel gånger bredd gånger höjd som funktion av längd. Det resulterade i intervallet 7,5–7,9 m^2. För att inte underskatta arean valdes det högre värdet i intervallet för elbussen i denna studie.

För att estimera hjulradien valdes den klart vanligast förekommande däckdimensionen 275/70R22.5, vilket ger en radie på 0,4783 m (vid olastat däck).

Noterade topphastigheter för stadsbussarna varierade mellan 50–105 km/h. De flesta bussar hade en topphastighet på 70 km/h, men medelvärdet var 80 km/h. Därför valdes 80 km/h för elbussen i denna studie.

Maximal väglutning innebär den högsta procentuella väglutning som fordonet kan framföras i med bibehållen hastighet, och avser för dessa bussar endast vid start och låga hastigheter. Specificerad maximal väglutning bland samtliga undersökta bussmodeller varierade mellan 11–28%, med en lite större grupp i intervallet 15–20% och en lite mindre grupp i intervallet 23–28%. För bussar med 80 km/h som topphastighet var intervallet 16–20%, dock baserat på endast ett fåtal modeller. Det antas här att elbussen i denna studie inte tillhör de mest högpresterande modellerna, men ej heller de mest lågpresterande. Därför väljs en maximal väglutning på 20% vid tjänstevikt.

Det gjordes även försök att fastställa huruvida angiven maximal väglutning gällde vid tjänstevikt eller totalvikt, samt om det gällde för maximal prestanda på motorn eller vid kontinuerlig prestanda. Detta gjordes genom att utnyttja så många kända parametrar som möjligt på kommersiella elbussar, för att uppskatta maximal väglutning och sedan jämföra uppskattningen med specificerade data. Detta kunde endast göras för två av bussmodellerna. Uppskattningen av maximal väglutning stämde med specifikationen antingen med tjänstevikt

och kontinuerligt vridmoment, eller med knappa maxvikten och maxvridmomentet. Rimligen borde maximal väglutning avgöras av kontinuerlig drift av elmaskinen.

För 20 bussmodeller uppskattades även maximal väglutning vid tjänstevikt och kontinuerlig drift, vilket jämfördes mellan olika elmotormodeller. Det visade sig att olika bussmodeller som använde sig av samma elmotor uppvisade liknande uppskattade maximala väglutningsvärden.

För ytterst få, endast fem, bussmodeller finns information rörande acceleration angiven, då som en tid på 4,5–7,8 sekunder att accelerera 0–30 km/h eller 18–23 sekunder för att accelerera 0–50 km/h. Detta är dock inte tillräckligt användbart. Istället framkom i diskussion med en teknisk specialist från ett lokalt fordonsföretag att en maximal acceleration på cirka 1,5–2 m/s^2 är ett lämpligt mål för bibehållen passagerarkomfort. Detta kan jämföras med värden i kända busskörcykler (se avsnitt 8.3). I den amerikanska New York cykeln noterades en maximal acceleration på 2,91 m/s^2, medan den högsta accelerationen i den europeiska Braunschweig cykeln är 2,13 m/s^2. För samma 20 bussmodeller har även maximal acceleration uppskattats vilket resulterade i medelvärdet på 1,5 m/s^2 vid totalvikt och 2,2 m/s^2 vid tjänstevikt.

För elbussen i denna studie valdes att den skall klara en acceleration på 1,5 m/s^2 vid totalvikt, det vill säga vid full last. En väglutning på 20% motsvarar en acceleration på 1,92 m/s^2 för samma vikt. Det betyder att en väglutning på 20% kan uppnås vid tjänstevikt, men inte med totalvikten.

De valda fordonsparametrarna för elbussen sammanfattas i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Använda fordonsdata för den elektriska stadsbussen.

	Elbuss
Längd	12 m
Fordonsmassa utan passagerare/last	13 000 kg
Fordonsmassa, totalvikt	18 400 kg
Effektiv tvärsnittsarea, *A*	7,9 m^2
Luftmotståndskoefficient, C_d	0,75
Rullmotståndskoefficient, C_r	0,013
Hjulradie, *r*	0,4783 m
Max hastighet (vid plan väg)	80 km/h
Max väglutning (vid tjänstevikt)	20%
Max acceleration (vid totalvikt)	1,5 m/s^2

3.3 Motorparametrar

Specifikationer för elektriska drivlinor och motorer i batterielektriska personbilar på marknaden återfinns i publikationen från 2016 [GrunditzThiringer2016]. För bussar däremot har en insamling och sammanställning utförts inom ramen för detta projekt. Det rör sig om data för:

- Topprestanda såsom maxeffekt, vridmoment, varvtal (även basvarvtal)
- Maximal fasström och dc-spänning
- Eventuellt inre och yttre dimensioner
- Typ av kylning

Eftersom både fordonsdimensioner och fordonsprestanda varierar stort mellan de studerade modellerna, så återfinns även en stor variation i specifikationer för de elektriska motorerna i drivlinan.

I en studie som denna där man vill jämföra olika motortyper vill man hålla så många prestandaparametrar som möjligt konstanta. Dessvärre är det oundvikligt att motorernas förmåga att leva upp till flera olika prestandakrav skiljer sig åt. I denna studie har motorerna dimensionerats för att ge samma toppeffekt samt maximalt vridmoment från start, medan vridmoment på varvtal över basvarvtalet, och därmed även effekten, har tillåtits variera.

Vidare har det varit önskvärt att de elektriska randvillkoren för motorn skall vara så lika som möjligt för att ge minimal påverkan på storleken och konfigurationen av resten av de elektriska komponenterna i drivlinan, det vill säga för omriktaren och batteriet, samt för transmissionen. Det är därför önskvärt att samtliga motorer anpassas till en och samma dc-spänningsnivå, fasström och utväxling.

En annan viktig aspekt är motorvolymen, vilken till stor del beror av statorns cylinder-diameter och längd. Vanligtvis är den tillgängliga volymen i fordonen begränsad i fråga om båda dessa dimensioner. Därför har dimensionerna på elmotorer i befintliga fordon använts som relevanta referenser. En viktig faktor här är att ett stansverktyg för en viss utformning av stållaminat är relativt dyrt att utveckla, vilket gör att motortillverkare ofta erbjuder elmaskiner i olika storlekar med ett fåtal varianter på ytterdiametrar, men för en större variation i längd. Med detta i åtanke har prioritet lagts på att bibehålla samma ytterdiameter för de olika maskintyperna inom sitt fordonsslag, men att tillåta längden på motorn att variera för att fortfarande kunna åstadkomma samma maximala vridmoment och effekt.

Slutligen, för att minska skillnaderna i kylbehov mellan de olika maskinerna, och därmed även storleken och utformningen av huset, har vi försökt hålla den maximala strömtätheten i spåret på ungefär samma nivå.

3.3.1 Personbilsmotor

För personbilen beror dimensioneringen av elmotorns mekaniska prestanda vanligtvis av specificerad accelerationstid från 0 till 100 km/h vilken ofta kräver ett högre vridmoment och en högre effekt till hjulen än både maximal väglutning och topphastighet (Grunditz och Thiringer, 2018). Vidare kan samma accelerationstid uppnås med olika kombinationer av maxeffekt och maxvridmoment (från start upp till basvarvtal) (Grunditz och Thiringer, 2018). En specificerad accelerationstid är alltså inte ett tillräckligt kriterium för att dimensionera motorns mekaniska uteffekt.

Enligt Grunditz och Thiringer (2016b) var typiska värden för förhållandet mellan installerad motoreffekt och fordonsvikt cirka 45–65 W/kg för elbilar med tjänstevikt kring 1500 kg. Det högre värdet i intervallet skulle motsvara en motoreffekt kring 98 kW för den valda referenspersonbilen. Som jämförelse kan nämnas att motoreffekten i fyra av de fem mest sålda elbilarna under 2014 och 2015 var 65–125 kW. Noteras bör att effekten kan ha specificerats vid något olika förhållanden vad det gäller spänningsnivå och tid under vilken effekten kan upprätthållas utan att motorn når vald kritisk temperatur, vilken även den kan skilja sig åt mellan motorerna.

En annan omständighet är att enligt data i (Bieker et al., 2019) har den genomsnittliga motoreffekten i nya passagerarbilar för alla typer av drivlinor i EU stadigt ökat med tiden, och var år 2018 98 kW, vilket är 25% högre än 15 år tidigare. Även om detta främst gäller förbränningsmotorer är det troligt att en liknande utveckling kan komma att ske också för elektrifierade drivlinor. Med denna bakgrund kan den valda motoreffekten på 100 kW för elmotorn i passagerarbilen anses rimlig.

Vanligt förekommande maxvarvtal för bilmotormodeller liknande den valda, är cirka 10 000–12 000 rpm medan spannet för samtliga bilmotormodeller i studien är 7000–16 000 rpm (Grunditz och Thiringer, 2016b). Maxvarvtalet är ofta cirka 2,3–4,5 gånger högre än basvarvtalet. Här har ett maxvarvtal på 12 000 rpm valts och ett basvarvtal på 4000 rpm.

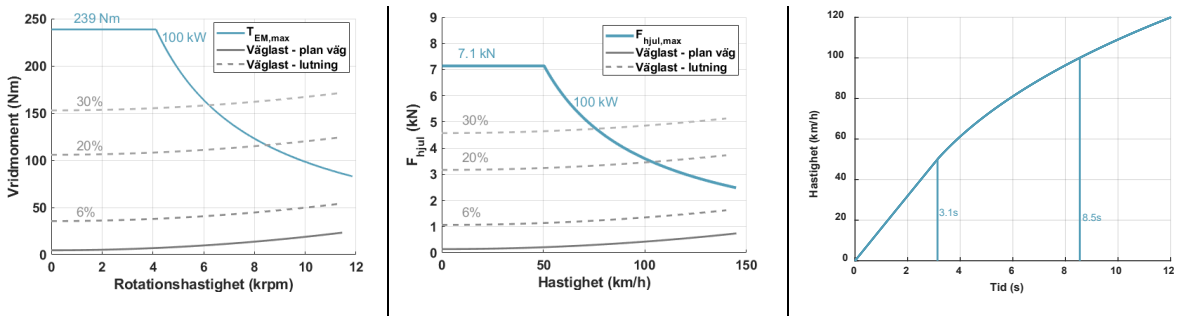
Utväxlingen har satts till 9,7470 vilket används i e-Golf som har samma maxvarvtal på elmotorn. Maximalt vridmoment från start till basvarvtal har bestämts till 239 Nm baserat på ekvation 2.1.

Utvärdering av prestanda.

Motorns maximala vridmoment som funktion av varvtal, tillsammans med dess kraftöverföring till drivhjulen som funktion av bilens hastighet, presenteras i figur 3.1. Där visas också hastigheten som funktion av tid vid maximal acceleration från 0–120 km/h och vilket vridmoment och kraft på hjulen som krävs för att köra med konstant hastighet vid olika väglutning, så kallad väglast.

Med de satta specifikationerna för fordon och elmotor kan accelerationstiden 0–100 km/h grovt beräknas till cirka 8 sekunder, utan hänsyn till roterande massor i drivlinan samt vid en verkningsgrad i växeln på 97%.

Figur 3.1: Maxprestanda och väglast vid olika väglutning, samt accelerationstider för personbilen med tjänstevikt och en förare 75 kg.



Motorns dimensioner bestäms av ytterdiametern på statorn som satts till 200 mm vilket även observerats i benchmarking-studier för elektrifierade fordon (Ozpineci, 2014). Statorns längd anpassas sedan med en given referensmaskindesign så att önskad mekanisk prestanda kan levereras i form av vridmoment och effekt.

I praktiken varierar spänningen från batteriet under körning beroende på den aktuella driftströmmen och energinivån i batteriet. Batterispänningen definieras därför ofta som ett spänningsintervall snarare än ett enskilt nominellt värde. För e-Golf anges ett sådant

spänningsintervall till 250–430 V, medan nominell spänning är 323 V. Enligt Grunditz och Thiringer (2016b) är nominella batterispänningar typiskt inom intervallet 300–400 V, medan maxspänningar är 380–430 V, även om ett fåtal högpresterande modeller har maxspänningar på 600–700 V. Här har motorns maximala mekaniska uteffekt definierats vid en dc-spänning på 430 V.

Istället för att ansätta en viss maximal fasström har den maximala strömtätheten (rms) i spåret satts till 20 A/mm^2. Detta värde baseras på verkliga framdriftsmotorer publicerade i benchmarking-litteratur (Ozpineci, 2011, Boldea et al., 2014)]. Den maximala fasströmmens effektivvärde (rms) samt antalet lindningsvarv bestäms sedan med en given referensmaskindesign. I strävan efter högre effekttäthet är det rimligt att anta att utvecklingen under den närmaste tiden kommer att gå mot högre värden på maximal strömtäthet, med en samtidig förbättrad kylning av lindningen.

3.3.2 Bussmotor

Specifikationer över drivlinor och omriktare från tillverkare av befintliga elbussar och av elektriska maskiner till elbussar, har studerats och sammanställts i Grunditz (2020).

Det förekommer i huvudsak tre grupper av maxvarvtal i elbussar, där alla tre är i stort sett lika vanliga. Gruppen med lägst maxvarvtal har cirka 500 rpm och är hjulmotorer, det vill säga de arbetar i par utan vare sig transmission eller differential. De mellanvarviga har maxvarv på cirka 3500 rpm och de högvarviga går upp till cirka 11 000 rpm. Här gjordes valet att elmotorn i bussen skall ha ett maxvarv på 11 000 rpm, då detta förefaller vara en trend i dagsläget. Även för tunga fordon är höga varv en fördel vid strävan mot högre effekttäthet.

Under diskussion med en teknisk specialist för ett lokalt fordonsföretag framkom att eftersom produktionsvolymerna för bussar är relativt små jämfört med både passagerarbilar och lastbilar, skulle utvecklingskostnader av komponenter specifikt för elektrifierade bussar bli relativt höga. Istället försöker man i huvudsak anpassa sig till de större marknaderna, dock med möjlighet till vissa justeringar av designen såsom ingjutning av härvändar för bättre värmeledning, eller egen lösning för kylning i motorns hus/hölje.

En motor med högre varv kan göras med mindre radie för samma uteffekt. Däremot behöver växeln bli större och därmed tyngre. Genom att öka motors varvtal är det möjligt att ”flytta” materialvikt från motorn till växeln, och därmed till material som är lättare att återvinna.

Det antas att busstillverkare är intresserade av motorsystem som kan kopplas i par och passa på en enda drivaxel, likt ZFs AVE 130, för att möjliggöra lågt golv och högre passagerarkomfort. Detta ger en utväxling på 24,79 baserat på relationen mellan motorns maxvarv och bussens topphastighet.

Spridningen är stor gällande total maxeffekt för bussar med längden 10–13 m, även om de flesta ligger i intervallet 160–300 kW. Medelvärdet är 253 kW, varför effektnivån för elbussen bestäms till 250 kW totalt motsvarande 125 kW per maskin.

Det maximala vridmomentet beräknas till 655 Nm för en acceleration på 1,5 m/s^2 på plan väg vid en hastighet på 30 km/h, med maxvikten och en verkningsgrad på 97% för utväxlingen.

De flesta av alla 10–13 m bussar har en nominell spänningsnivå på batteriet i intervallet 580–600 V. Därför bestäms att maxeffekten för motorerna skall beräknas vid en batterispänning på 580 V.

Maxströmmen anges väldigt sällan av busstillverkarna. Istället har maxströmmen från motortillverkare använts som referens. För maskiner vid liknande varvtal ligger effektivvärdet

av fasströmmen mellan cirka 250 A och 340 A. Det bedöms därmed som rimligt att maxströmmen skall ligga på cirka 280 A.

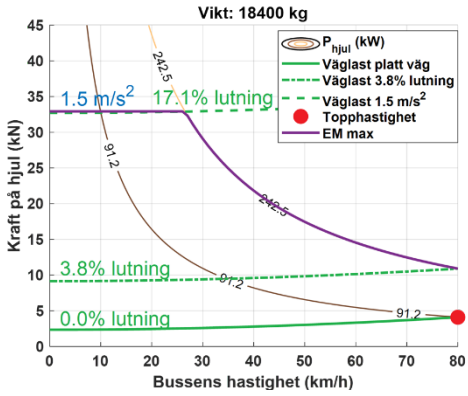
Data rörande diameter eller längd på de aktiva delarna av motorn har inte hittats, varken från buss- eller motortillverkare. Istället används värden från en teknisk skiss på ZFs Ave 130 drivaxel, genom grovt uppskattade dimensioner. Statordiametern uppskattades till 270 mm och stacklängden till 174 mm. Detta ger en indikation på att en enskild elmaskin till elbussen bör ha en diameter på max cirka 280 mm och en längd på max cirka 200 mm.

För bussar varierar vikten under drift mellan tjänstevikten och totalvikten, vilket har betydande inverkan på fordonets prestanda. I figur 3.2. presenteras utvärderad prestanda med totalvikt och tjänstevikt vid en verkningsgrad i växeln på 97%, samt med ett tillägg på 10% av uppskattad roterande massa i drivlinan vid acceleration.

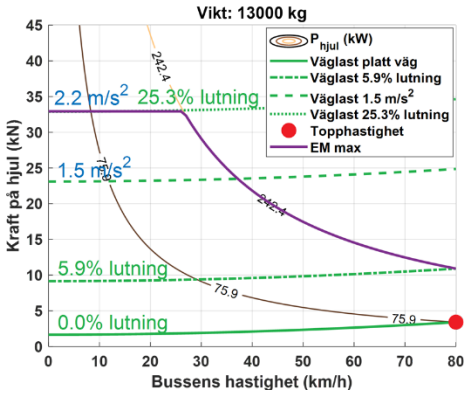
Med specificerad drivlina beräknas elbussen vid totalvikt klara upp till 1,5 m/s^2 på plan väg, alternativt upp till 17,1% väglutning med konstant hastighet. Vid tjänstevikt (tom buss) beräknas den klara 2,2 m/s^2 på plan väg alternativt 25,3% lutning.

Figur 3.2: Maxprestanda och väglast vid olika väglutning, samt accelerationstider för stadsbussen med tjänstevikt och totalvikt (alternativ e och f visas på nästa sida).

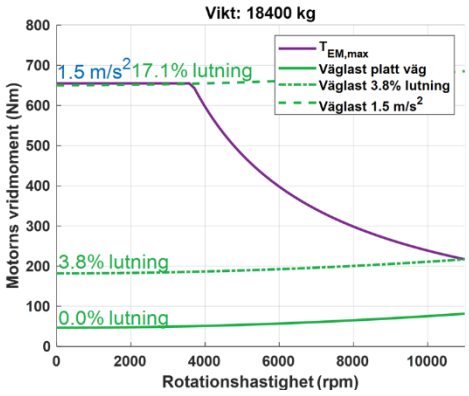
a) Hjulkraft som funktion av busshastighet med totalvikt.



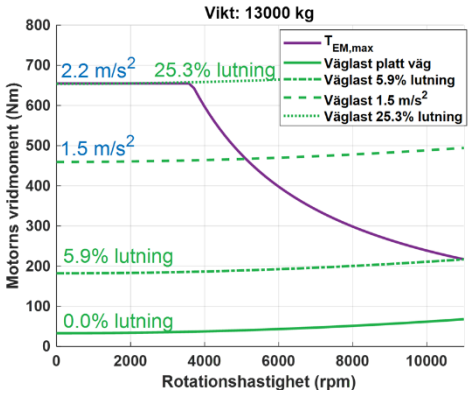
b) Hjulkraft som funktion av busshastighet med tjänstevikt.



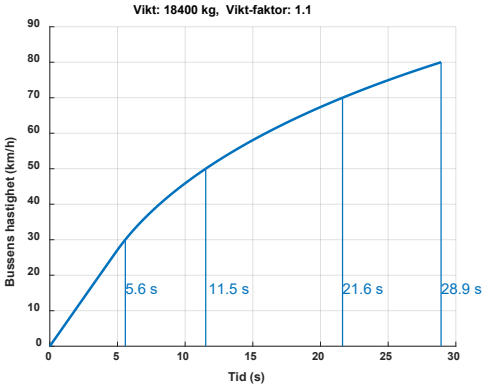
c) Motorvridmoment som funktion av rotationshastighet med totalvikt.



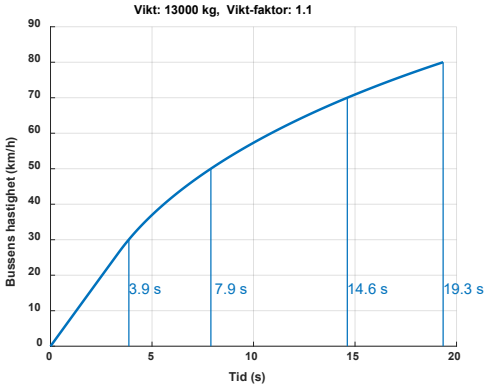
d) Motorvridmoment som funktion av rotationshastighet med tjänstevikt.



e) Accelerationstider med totalvikt.



f) Accelerationstider med tjänstevikt.



3.3.3 Sammanfattning motorparametrar

De valda motorparameterar för både personbilen och elbussen sammanfattas i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Elmaskinspecifikationer för elektriska referensmaskiner för personbilen och stadsbussen.

Elmotor	**Personbil**	**Elbuss**
Växel, utväxlingskoefficient, $k_{växel}$	9,747	24,79
Max motorvarvtal	12 000 rpm	11 000 rpm
Basvarvtal	4 000 rpm	3 600 rpm
Max effekt (kort tid, vid max spänning)	100 kW	2 x 125 kW
Max vridmoment	239 Nm	2 x 328 Nm
Max fasström (effektivvärde)	260 A	280 A
Max strömtäthet i spår (effektivvärde)	20 A/mm^2	20 A/mm^2
Max dc-spänning	430 V	580 V
Max ytter-diameter stator	200 mm	280 mm
Max statorlängd	127 mm	200 mm

3.4 Förekomst av olika motortyper

Undersökningar av elbilsmarknaden visar att PMSM är den klart dominerande typen av elektiska framdriftsmotorer, och speciellt varianten med neodymbaserade magneter i ett eller två v-ställda lager alternativt i deltaform (Santiago et al., 2012, Boldea et al., 2014, Sarlioglu et al., 2015, 2017, Grunditz och Thiringer, 2016b, Ramesh och Lenin, 2019, Shao et al., 2020). De främsta fördelarna med denna motortyp är dess höga effekttäthet och verkningsgrad över ett stort arbetsområde. Ett fåtal tillverkare använder sig av asynkron-maskiner – Tesla, Audi, Mercedes (Ramesh och Lenin, 2019, Sarlioglu et al., 2017). Den vanligaste lindningstypen hittills är distribuerad trådlindning, men några tillverkare har valt att övergå till hårnålslingning – Toyota Prius 2017 (Shao et al., 2020), BMW (Car and Driver,

2020), VW (InsideEVs, 2020), vilket GM (Shao et al., 2020, Ramesh och Lenin, 2019, Sarlioglu et al., 2015) och BorgWarner (BorgWarner, 2019) redan har använt i flera år.

Dagens forskning och utveckling både i industri och akademi är i hög grad drivna av att upprätthålla faktorer som en hög effekt- och vridmomenttäthet och hög verkningsgrad samtidigt som kostnaderna hålls nere. Designkrav som dessa är inte sällan motstridiga, varför olika typer av kompromisser ofta blir nödvändiga.

Förutom alla de maskiner som förekommer i dagens elfordon, pågår forskning både i akademi och industri, ibland i tätt samarbete, på en rad andra maskintyper och designvariationer samt beträffande materialval och materialutveckling till exempel:

- maskiner utan magneter, för att reducera kostnader men också för att minska risken att inte ha tillgång till viktiga material vars produktionen är geografiskt koncentrerad till vissa länder (Boldea et al., 2014)]
    - synkronreluktansmaskiner – Land Rover var tidigt intresserade (Ramesh och Lenin, 2019)
    - asynkronmaskiner med kopparledare i rotorn – har använts av GM, Tesla, Mercedes och Audi (Ramesh och Lenin, 2019, Sarlioglu et al., 2017)
    - switch-reluktansmaskiner (Sarlioglu et al., 2017)
    - lindad rotor med styrbar strömkälla, för att skapa magnetfält från rotorn – ännu ej implementerad som framdrivningsmotor kommersiellt.
- maskiner med magneter utan sällsynta jordartsmetaller, till exempel ferriter (svagare)
- maskiner med färre magneter
    - permanentmagnet-assisterad synkronreluktansmaskin – används av BMW i3 (Ramesh och Lenin, 2019).
- permanentmagnet-maskiner med koncentrerad lindning – har använts i hybridelektriska Hyundai Sonata och Chevrolet Volt (Boldea et al., 2014).
- axialflödesmaskiner studeras för möjligheten till hög vridmomentstäthet – ofta tänkta som hjulmotorer (Shao et al., 2020).
- olika varianter på transversalflödesmaskiner (Boldea et al., 2014).

Vår undersökning av befintliga elbussar, både stadsbussar och långfärdsbussar, visade att cirka 75% av bussarna använder elmaskiner med permanentmagneter medan 25% använder induktionsmaskiner. Ett fåtal av elmaskinerna som utvecklas för elbussar har 6 eller 9 faser. Dessvärre är de publicerade detaljerna om elektriska maskiner till bussar avsevärt färre än de för personbilar.

4. Miljöpåverkan, knapphet, kritikalitet och kostnad för materialen

Elektriska framdriftmotorer innehåller ett stort antal metaller som påverkar miljön, tar naturresurser i anspråk, är kritiska ur ett försörjningsperspektiv och betingar ett högt ekonomiskt pris. Metallframställning har sin främsta *miljöpåverkan* dels i samband med gruvdriften som kan ge upphov till toxiska metallutsläpp framförallt från hanteringen av gruvslagg, dels genom energianvändning vid renframställningen av metaller från malm med kopplad klimatpåverkan. Metaller kan vara *knappa* i geologisk mening, det vill säga att om det inte finns så stor mängd av dem i jordskorpan så blir deras tillgänglighet på lång sikt begränsad. Tillgängligheten kan också vara begränsad på kort sikt, till exempel av geopolitiska förhållanden som handelsrestriktioner. Denna så kallade försörjningsrisk är vad som vägs in när EU bedömer om en råvara är *kritisk*, tillsammans med hur pass viktig den är för ekonomin i EU (EC, 2020). Ett material kan också vara dyrt i *ekonomiska* termer och dess pris fluktuera över tid.

I ett inledande skede av projektet genomfördes både LCA (benämnt LCA-studie 1 i denna rapport, se avsnitt 12.1) och teknisk utvärdering av tre olika elmotordesignlösningar för fordonsframdrift som hade identifierats som intressanta i tidigare arbete (Grunditz et al., 2018, Nordelöf et al., 2019a). Utifrån resultatet gjordes sedan en övergripande sammanställning av vilken miljöpåverkan och vilka kostnader som de dominerande materialen medför. Detta kompletterades med en genomgång av geologisk knapphet och kritikalitet för samma material. Resultatet var en av utgångspunkterna för de alternativa designlösningar som valdes för vidare analys i projektet.

Tabell 4.1 visar beräknade kostnader i kronor (SEK) per kg ingående material vid tillverkning av olika motordelar. I den vidare analysen, beaktades sedan även de ungefärliga mängderna av respektive material som krävs för att tillverka de elmotorer som ingick i LCA-studie 1 (avsnitt 12.1), vilka redovisas med mer tekniska detaljer i avsnitten 10.2.1-3. Dataunderlaget för vilka metaller som kan anses vara knappa utgick från förekomsten av grundämnen i jordskorpan (Rankin, 2011), både i medeltal och i totala mineralfyndigheter, kompletterad med information från (USGS, 2020) för strontium. Bedömningen omfattade även resonemang kring hur länge nuvarande reserver kan anses vara tillgängliga beroende på brytningstakten enligt Henckens et al. (2016). Klassificeringen materialens kritikalitet utgick från EU:s tredje bedömning av kritiska råvaror (EC, 2020). Bedömningar av kritikalitet är beroende av från vilket perspektiv de görs – hela ekonomier såsom EU eller enskilda företag. EU:s studie pekar ut vilka råvaror som är kritiska för EU:s ekonomi i sin helhet. Viktigt att notera är att enskilda företag kan dra andra slutsatser kring vilka råvaror som är kritiska för just dem.

Resultaten för den övergripande genomgången sammanfattas i tabell 4.2, där ett kryss indikerar en väsentlig miljö- eller resurspåverkan.

Tabell 4.1: Uppskattad råvarukostnad i SEK per kg ingående material vid tillverkning av aluminiumdelar, elektroplåt och koppartråd samt tre olika magnetmaterial, två baserade på sällsynta jordartsmetaller (Nd(Dy)FeB-magneter och SmCo-magneter) och ett keramiskt material (Sr-ferrit-magneter). Kostnaderna är beräknade från genomsnittliga handelspriser för 2015–2019 enligt USGS (2013, 2020) och Bastian (2019), samt Riksbanken (2020) avseende snittkursen från $ till SEK.

Material	**Råvarukostnad SEK per kg**
Aluminium	18,60
Elektroplåt	6,30
Koppar	50,70
Nd(Dy)FeB	185,20
SmCo	222,10
Sr-ferrit	10,90

Tabell 4.2: Identifiering av material som ingår i elmotorer för fordonsframdrift med väsentlig påverkan på miljö, resursknapphet, kritikalitet samt kostnad, med hänsyn tagen till de mängder material som typiskt ingår i sådana motorer (markerade med x).

Material	**Miljöpåverkan**	**Resursknapphet**	**Kritikalitet**	**Kostnad**
Aluminium	x			x
Elektroplåt	x			x
Koppar	x	x		x
Nd(Dy)FeB		x	x	x
SmCo		x	x	x
Sr-ferrit				

Vid produktion av det stål som ingår i elektroplåt måste först järnmalmen reduceras till råjärn. Detta sker med hjälp av koks från fossilt kol vilket ger upphov till stora klimatpåverkande koldioxidutsläpp. Vid produktion av aluminium sker reduktionen till metall istället med hjälp av elektrisk energi. Behovet av elenergi är stort, varför miljöpåverkan av aluminium är beroende av vilken primärenergikälla som används för elproduktionen. Användning av koppar leder till utsläpp av toxiska metaller, som kommer främst från gruvhanteringen. Koppar förekommer i naturen som sulfidmalm, och det gruvavfall som bildas vid hanteringen läcker metaller till omgivande vatten där det ger upphov till toxiska effekter. Också de sällsynta jordartsmetallerna (neodym, dysprosium och samarium) finns i sulfidmalmer och ger upphov till liknande problem. Dock är problemen sett i relation till elmotorer mindre, eftersom mängderna av sällsynta jordartsmetaller är klart mindre än kopparinnehållet (mindre än 1% av totalvikten för motorn, jämfört med runt 10% för koppar) (Nordelöf et al., 2018).

Aluminium och järn tillhör jordskorpans vanligaste grundämnen, och allteftersom utvinningen fortskrider övergår man till malm med lägre koncentration även om detta då medför högre framställningskostnader (Rankin, 2011). I stort är därför ämnen relativt oproblematiska sett till knapphet. Däremot kan specifika legeringsämnen som blandas in i små mängder vara knappa. Alla huvudsakliga beståndsdelar i elektroplåt är dock vanligt förekommande ämnen som järn, kol (grundämnet) och kisel, jämte en mindre mängd aluminium (Nordelöf et al., 2018, Rankin, 2011).

Koppar, däremot, klassificeras bland de ämnen som är geologiskt knappa (Rankin, 2011).[1] Användningen av koppar i samhället är omfattande. Den beräknande mängden kopparmalm i jordskorpan som anses rimlig att bryta är samtidigt lägre än för flera andra metaller med mindre omsättning i samhället, till exempel krom, nickel och vanadin (Rankin, 2011) (USGS, 2020). Henckens et al. (2016) prognosticerar att all form av utvinningsbar kopparmalm i jordskorpan är uttömd till år 2150, under antagandet att den globala efterfrågan på koppar växer med 3% per år fram till 2050 och därefter förblir konstant.

Bland magnetmaterialen förekommer de sällsynta jordartsmetallerna neodym, dysprosium och samarium. Dock är inte alla ämnen i gruppen så sällsynta som namnet antyder. Metallerna delas in i två huvudsakliga undergrupper, lätta och tunga sällsynta jordartsmetaller, som ofta förekommer tillsammans i malmfyndigheter. Det leder till att utvinning vars främsta syfte är att framställa till exempel neodym samtidigt generar andra sällsynta jordartsmetaller i renframställningen. Hela gruppen klassificeras som geologiskt knapp enligt Rankin (2011), men den mest efterfrågade av metallerna, neodym, är den inom gruppen mest rikligt förekommande. Den är dessutom i de flesta magnetapplikationer utbytbar mot praseodym, som är ungefär lika vanligt. I jämförelse är dysprosium och samarium mer knappa.

Också kobolt och strontium som ingår i magnetmaterialen är geologiskt knappa (Rankin, 2011). Strontium ligger emellertid nära gränsen för att klassificeras som vanligt förekommande i jordskorpan. Inblandning som en mindre beståndsdel i ferritmagneter är idag det näst vanligaste användningsområdet, och exempelvis var användningen av strontium-föreningar i olika tekniska applikationer hundra gånger lägre än användningen av koppar i USA under 2019 (USGS, 2020). Dessutom är strontium relativt vanligt förekommande i havsvatten.[2] Huvuddelen av innehållet i strontium-ferrit-magneter utgörs av järn, kisel och syre, och sammantaget bedöms Sr-ferrit inte som ett resursknappt material i denna studie.

EU klassar hela gruppen sällsynta jordartsmetaller som kritisk, eftersom den är av stor ekonomisk betydelse i kombination med att den övervägande volymen produceras i ett enda land, Kina (EC, 2020). Precis som i frågan om knapphet, så finns det dock skillnader mellan de olika metallerna. Medan efterfrågan på både neodym och dysprosium generellt är mycket hög, och ökande, vilket också ökar försörjningsrisken, produceras samarium ofta i överskott på grund av den gemensamma produktionskedjan (Lucas et al., 2015). Bland beståndsdelarna i magneter klassas även kobolt som ett kritiskt material för EU. Det förs även diskussioner om att inkludera kobolt bland de metaller som ingår i EU:s förordning om konfliktmineraler, det vill säga mineraler med ursprung i konfliktdrabbade områden och högriskområden, men i nuläget ingår det inte på den listan (Eriksson, 2017, EU, 2017). EU räknar även boratsalt (från vilket man tillverkar bor) och metalliskt kisel som kritiska ämnen. Bor ingår i neodym-dysprosium-magneter medan kisel ingår i kiselstål från vilket man gör elektroplåten. I båda fallen kan man dock utgå från andra mineralföreningar än de som är klassade som kritiska – borkarbid för magneterna och ferrokisel för elektroplåten.

Då råvarukostnaderna per kg material vägdes samman med ungefärliga mängdproportioner av respektive material för en hel elmotor, inklusive större förlustflöden i motortillverkningen, framgick det att kostnaden är ganska jämnt fördelad mellan de olika materialslagen. Ett undantag är dock ferritmagneterna som har betydligt lägre kostnad. Detta, tillsammans med att de har låg miljöpåverkan och varken kräver knappa eller kritiska råvaror gör dem mycket intressanta för fortsatt utveckling av elmotorer.

[1] Ämnen som utgör mindre än 0,1% av jordskorpans massa är ”geologiskt knappa” (Rankin, 2011).
[2] Koncentrationen av strontium i havsvatten är cirka 40–50 gånger högre än koncentration för litium för vilket utvinning ur havsvatten ibland nämns som en framtida möjlighet avseende batterimaterial, vilket också berör elektrisk framdrift av fordon (Rankin, 2011).

5. Demonteringsstudier

Under projekttiden genomfördes två demonteringsstudier, i ena fallet avseende en elmotor från en personbil på ECRIS i Jönköping den 6:e december 2017, och i andra fallet avseende en elmotor från ett tungt fordon på Volvo Remanufacturing i Flen den 13:e mars 2018. Syftet var att ge projektdeltagarna en praktisk inblick i de utmaningar som uppstår vid demontering, oavsett om målet med demonteringen är renovering av hela motorn, återanvändning av enskilda komponenter, eller att separera ut så rena materialfraktioner som möjligt för att underlätta materialåtervinning. I Jönköping demonterades en 60 kW-motor från en Volvo XC90 T8 och i Flen en 110 kW-motor från en av Volvos hybridbussar. Båda motorerna hade permanentmagneter instuckna i rotorn, det vill säga monterade inuti rotorlaminaten. Demonterings-övningarna dokumenterades med film och fotografering, samt genom noteringar. Verktyg beskrevs, borttagna delar numrerades och deras mått och vikt antecknades. Studierna beskrivs i avsnitt 5.2 respektive 5.3. Projektet omfattade inga motsvarande undersökningar av hur lätt eller svårt det är att demontera motorn ur respektive fordon.

I samband med demonteringsstudierna genomfördes även en litteraturstudie om elmotordemontering som sammanfattas i avsnitt 5.1 nedan. En mer detaljerad beskrivning av en möjlig framtida mer långtgående separering och vidarebehandling av magneter ges i kapitel 7, baserad på de mest genomarbetade undersökningarna från litteraturstudien.

5.1 Litteraturgenomgång

Sammanfattningsvis återfanns 15 artiklar eller rapporter från perioden 1998–2019, som i större eller mindre grad berör demontering och mekanisk separering av elmotorer för att möjliggöra återanvändning av delar eller förbättra återvinning av material. Bland dessa ingår två tidigare arbeten av rapportförfattarna, Alatalo et al. (2011) och Lundmark och Alatalo (2013), som omfattar utvärdering av olika elmotordesignlösningar framtagna för att förenkla separering av delar i motorn från varandra, vilket i sin tur underlättar stegvis demontering likväl som storskalig fragmentering (se kapitel 6). Totalt sett indikerar det relativt måttliga antalet studier över en så pass lång tidsperiod att ämnet inte varit högprioriterat i forskningen. En relativt stor andel är publicerad i Sverige och Tyskland, utöver en specifik forskargrupp i Venezuela som publicerat ett flertal artiklar som adresserar design för återvinning (Hernández-Millán et al., 2000, Hernández-Millán et al., 2001, Hernández-Millán et al., 2009, Hernández-Millán och Pacheco-Pimentel, 2017). Tidiga projekt, till exempel Karlsson och Fugger (1998), Karlsson och Järrhed (2000), Hernández-Millán et al. (2000) samt Hernández-Millán et al. (2001) berör främst asynkronmaskiner och möjligheter till förbättrad återvinning av koppar och stål. Karlsson och Fugger (1998) presenterade en robotiserad separering av motorlindningarna från statorlaminaten genom kapning, vilket ger en föraning om de maskiner för detta ändamål som numera finns kommersiellt tillgängliga (se kapitel 7).

Hernández-Millán et al. (2000), Hernández-Millán et al. (2001), Hernández-Millán et al. (2009) samt Hernández-Millán och Pacheco-Pimentel (2017) lyfter fram betydelsen av designval för att förenkla demontering, sortering och återanvändning. Här ingår bland annat att minska diversiteten bland valda material och använda standardiserade dimensioner och former på skruvar och infästningar. En annan viktig rekommendation är att härdningen av impregnerings- och fixeringsmaterial i möjligaste mån bör vara reversibel, dock utan att man i närmare detalj utreder vilka teknikval som då finns tillgängliga och vad det får för betydelse för motorns prestanda och slitage. Soh et al. (2014) lyfter fram betydelsen av att minimera

mängden fästdon och fästpunkter i elmaskiner för att minska kostnader och tidsåtgång vid demontering. Detta avser både det totala antalet fästdon, antalet olika varianter och hur lättillgängliga de är. Soh et al. (2014) förordar även försiktig demontering och återanvändning av större delkomponenter, till exempel rotorkärnan.

I senare studier, med tyngdpunkten efter 2010, är fokus förskjutet mot demontering för återanvändning av magneter eller återvinning av magnetmaterial. Även här finns det två huvudspår – projekt som utreder möjliga designförändringar för att förenkla demontering av elmaskiner så att magneterna kan återanvändas, eller åtminstone så att magnetmaterialet blir möjligt att tillvarata skiljt från övriga material i så stor utsträckning som möjligt, och projekt som inriktar sig på att automatisera magnetdemontering, med samma målbild. De två angreppsätten är beroende av varandra eftersom det blir enklare att automatisera en demonteringsprocess om elmotordesignen anpassas för denna process. Bland de studier som beskriver automatiserad demontering återfinns arbete från ett större konsortium bestående av industri, akademi och forskningsinstitut i Tyskland som genomförde ett projekt benämnt MORE (från ”Motor Recycling”) (Bast et al., 2014). Projektet utvecklade metoder och tekniker för demontering av magneter, inklusive kompletta prototyper som testkördes och utvärderades av Klier et al. (2013). Likaså undersöktes alternativa vägar för att tillvarata magneterna – återanvändning av hela magneter i andra elmotorer, återvinning av allt magnetmaterial som pulver för tillverkning av magneter med något lägre prestanda och återvinning av de sällsynta jordartsmetallerna för användning vid nytillverkning av magneter med likvärdig prestanda. Bast et al. (2014) framhåller flera utmaningar med att demontera magneter för återanvändning. Till exempel nämns magneternas låga hållfasthet och utmaningar med att avlägsna det lim de kan vara fixerade med.

Både Elwert et al. (2016) och Li et al. (2019) sammanfattar och beskriver MORE-projektet i sina övergripande sammanställningar om kunskapsläget för demontering av elmotorer och möjligheterna till återanvändning och återvinning av magneter. Li et al. (2019) nämner ett flertal projekt som har genomförts med syfte att uppnå ökade cirkulära materialflöden för sällsynta jordartsmetaller i elmotorer, men lägger också stor tonvikt på erfarenheterna från MORE-projektet. Andra artiklar tar kort upp demonteringssteget för att sedan huvudsakligen fokusera på de metallurgiska processer som krävs för att åter- eller nytillverka magneter Kimiabeigi et al. (2018) och Yang et al. (2017). Ytterligare detaljer från Kimiabeigi et al. (2018), Elwert et al. (2016), Yang et al. (2017) och Li et al. (2019) beskrivs i kapitel 7.

Genomgången i Elwert et al. (2016) är bredare och omfattar utvecklingen och utmaningar för återanvändning, återtillverkning och materialåtervinning av flera nyckelkomponenter i hybrid- och elfordon såsom elmotorer, batterier och kraftelektronik. För motorer finner man att demontering ner till stator- och rotornivå kan bli ekonomiskt lönsamt om ansträngningar läggs på att separera ut så ren koppar som möjligt ur statorn. Detta gäller även med de lönenivåer som gäller i Tyskland, men kräver åtminstone semiautomatisering. Trots att tyngdpunkten i Elwert et al. (2016) inte ligger på design för återanvändning och demontering, drar de slutsatsen att motordesignen i möjligaste mån bör anpassas för automatiserad demontering. Effektiv demontering framhålls som en nyckel till framgång för alla senare steg, sett både till kostnader i genomförandet och kvaliteten på de komponenter och material som återförs i cirkulära materialflöden.

5.2 Demontering av personbilsmotor

För att undersöka hur en elmotor från en bil skulle kunna demonteras tillhandahöll Volvo Cars och ECRIS en 60 kW elmotor, se figur 5.1, samt verkstadsplats och kunnig personal.

Demonteringen och dokumentationen skedde i Jönköping 6:e dec 2017 med projektdeltagare från Volvo Cars, ECRIS och Chalmers. En likadan motor hade redan delvis demonterats på ECRIS, varför erfarenheter från detta också dokumenterades.

Demonteringen påbörjades med att kåpan för el-matningen och andra yttre skruvar togs bort med en skruvdragare (varvid några av skruvarna som satt fast med fixeringsmassa gick av), se figur 5.2. De yttre anslutningskablarna (1,4 kg) kunde sedan lossas med skruvmejsel, avbitartång och manuell demontering, se figur 5.3.

Den yttre kåpan på växel-sidan avlägsnades, för vilket krävdes kopparhammare, skruvmejsel, avbitartång, kaprondell, och manuell dragkraft. Det läckte under tiden en del olja. Mindre kablar löpte genom flera godsdelar, se figur 5.4.

Den yttre kåpan på resolver-sidan, samt resolvern, avlägsnades med skruvdragare och en liten hammare, se figur 5.5.

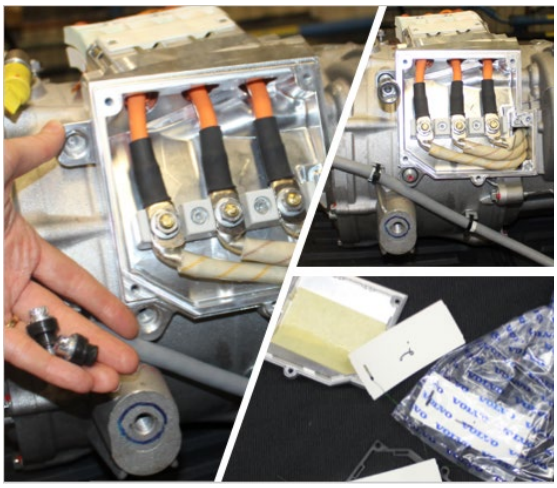
Statorn satt med presspassning i huset av aluminium, som också innehöll kylkanaler. Statorn kunde tas loss från huset genom att såga längsledes genom huset. Eftersom detta redan var gjort med den motor som redan delvis demonterats, användes den redan losstagna statorn i den fortsatta demonteringen.

Nästa utmaning var att försöka separera kopparlindningarna från stål-laminatet i statorn. Stämjärn, hammare, mejsel, tång, och tigersåg användes för detta, se figur 5.6 och figur 5.7, med begränsad framgång. Ena änd-lindningen sågades av och bildade en krans på cirka 1kg (syns längst ner i figur 5.7). Försök gjordes sedan att dra ut lindningen från andra sidan med tång, men den rubbades inte. Genom att såga i spåret, så gick det dock att dra ut lindningstrådar.

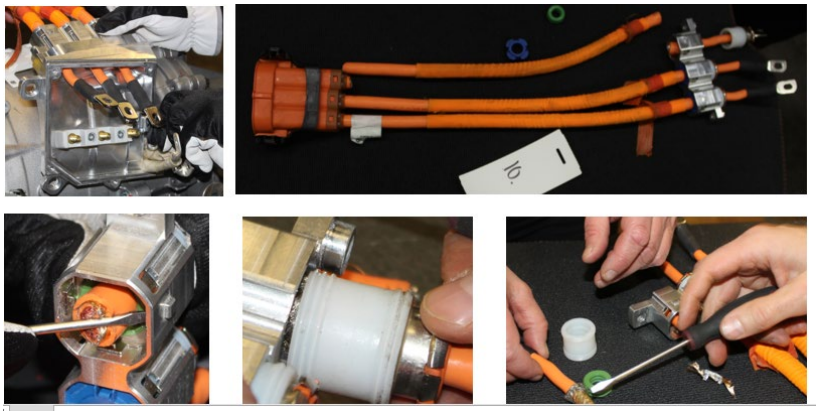
Rotorn bearbetades med en kaprondell, press, skruvmejsel, stämjärn och hammare för att först få loss rotorn från gjutgodset mellan motor och växelhus och sedan separera ändplattor, laminat och magneter. När axeln pressades ut från rotorn lossnade även ett lager och resolverlaminaten. Axeln konstaterades antagligen vara i ett stycke, med en stopp-kant på ena sidan, se figur 5.8. Det fanns instuckna metall-bitar i rotorn, antagligen för balansering. Vid försök att demontera magneterna konstaterades att dessa väldigt lätt gick sönder.

Figur 5.1: Elmotorn som ska demonteras.

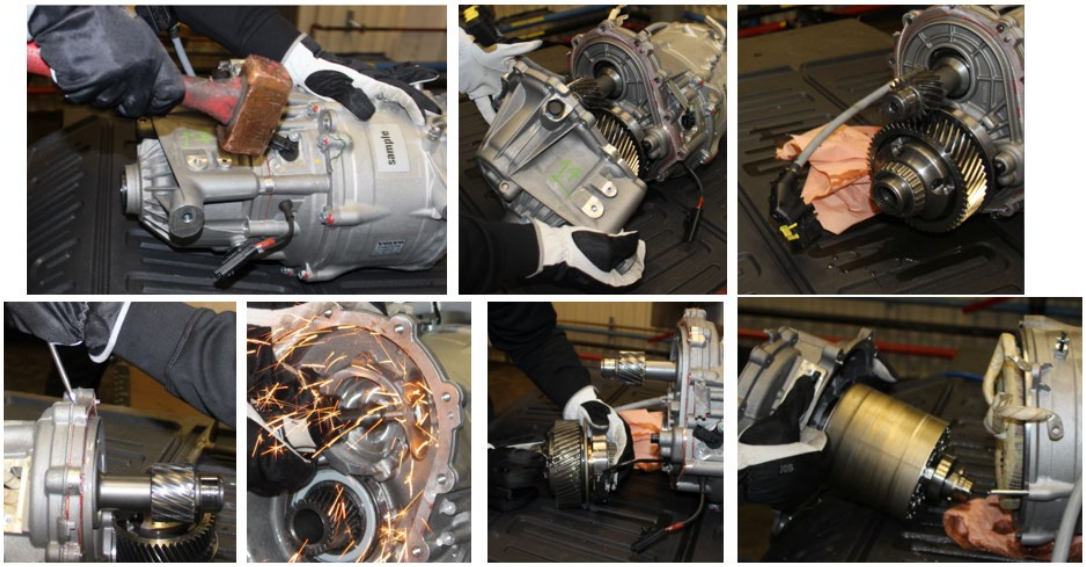
Figur 5.2: Kåpan för el-matningen borttagen (bildserie).



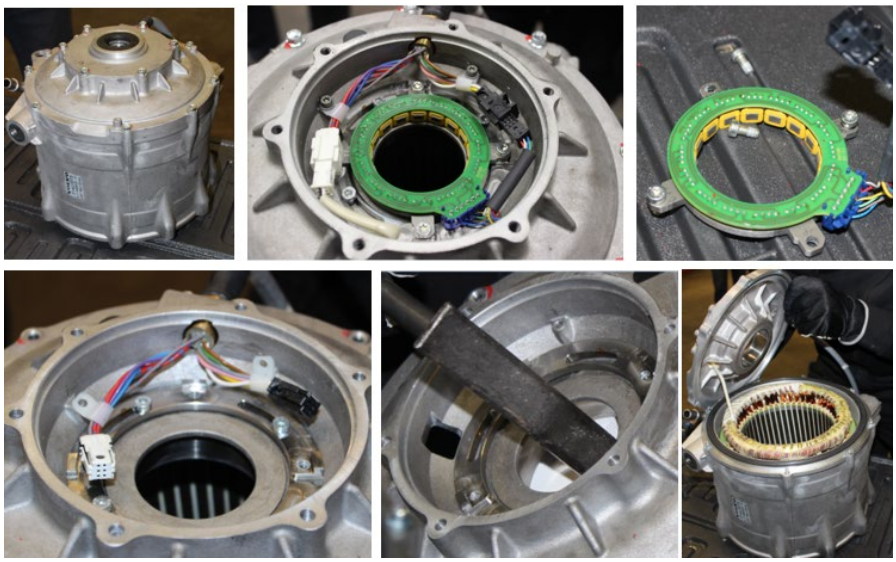
Figur 5.3: Kablarna lossas och plockas isär (bildserie)



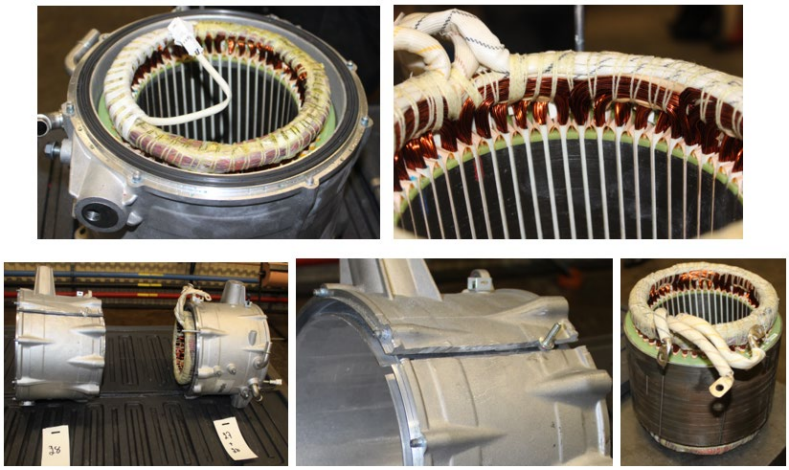
Figur 5.4: Den yttre kåpan på växel-sidan avlägsnas



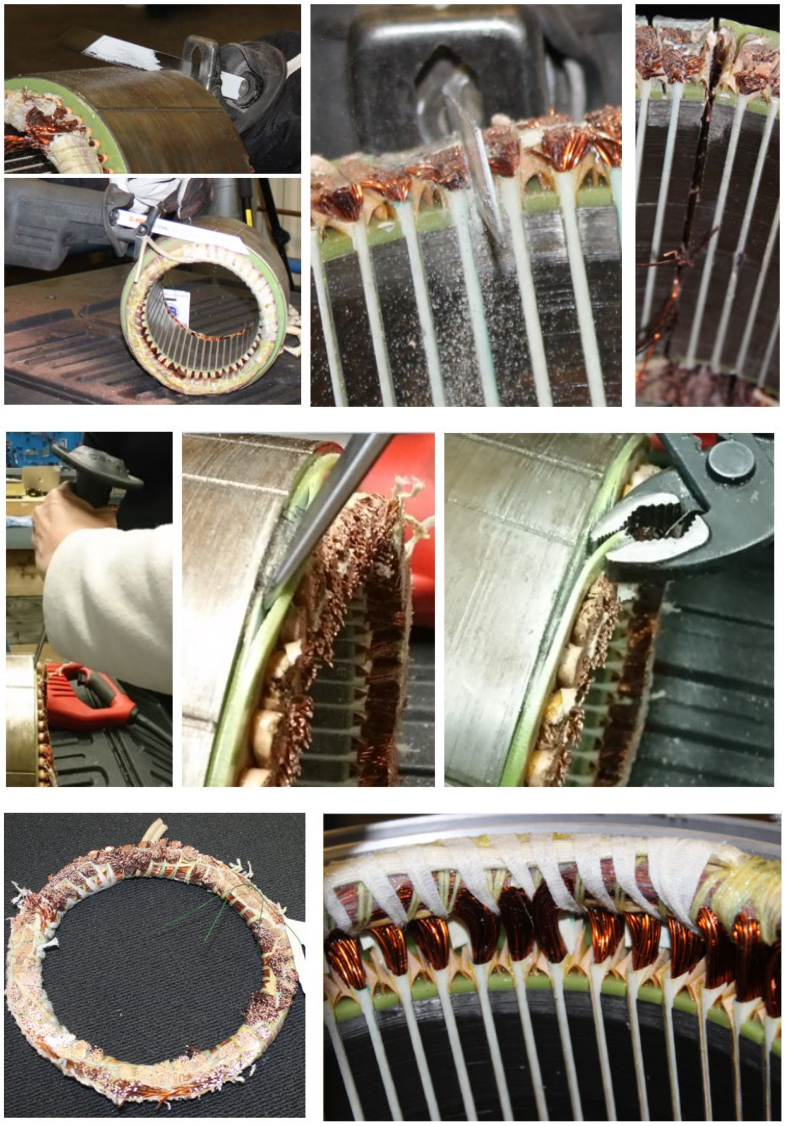
Figur 5.5: Den yttre kåpan på resolver-sidan, samt resolvern, avlägsnas



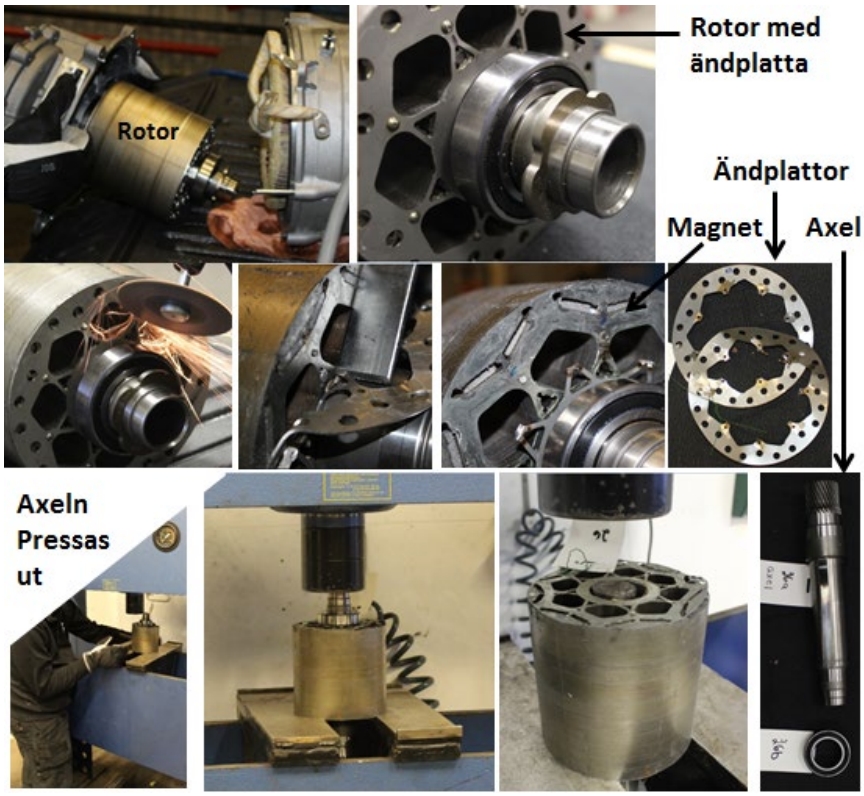
Figur 5.6: Statorhöljet avlägsnas från statorn genom att såga genom höljet



Figur 5.7: Försök görs att separera kopparlindningarna från stål-laminatet.



Figur 5.8: Rotorn demonteras och ändplattor och axel avlägsnas.



5.3 Demontering av bussmotor

På Volvo Remanufacturing i Flen renoveras förbränningsmotorer och andra delsystem eller komponenter i fordonen, som sedan säljs som reservdelar. Volvo Parts använder en form av utbytessystem där kunden får avdrag på sin nya motor eller annan reservdel om den gamla lämnas in. Den icke-fungerande enheten skickas till Flen där den felsöks och renoveras för att sedan säljas som en reservdel. Det händer att vissa komponenter passerar renoveringen ett flertal gånger eftersom det endast är förslitningsdelarna, till exempel kullager, som behöver bytas medan övriga delar går att återanvända mycket längre. Fram till mars 2018, hade dock elmotorer ännu inte hanterats inom ramen för den ordinarie verksamheten.

För att undersöka hur en elmotor från en buss skulle kunna demonteras tillhandahöll Volvo en använd (110 kW) elmotor från en hybridbuss, samt verkstadsplats och hjälp från erfaren personal. Demonteringen genomfördes i Flen den 13:e mars 2018 med projektdeltagare från Volvo och Chalmers. En internstudie gjord på en liknande (120 kW) motor rapporterade vikten till 161 kg varav 3% koppar, 2% magneter, 19% aluminium, 72% stål, och 5% övriga material (Henriksson, 2008).

Demonteringen av denna elmotor var extra svår på grund av att motorn kom från ett hybridfordon där dess upphängning är integrerad med förbränningsmotorn. Detta hade som följd att det ena kullagret som motorns axel vilar på blev borttaget redan när elmotorn separerades från förbränningsmotorn. När några specifika skruvar sedan togs loss för att kunna dra ur axeln ur motorn så fastnade rotorn i statorn. För att ha viss förberedelse på denna utmaning så hade Volvo redan provat att demontera en liknande motor före workshopen.

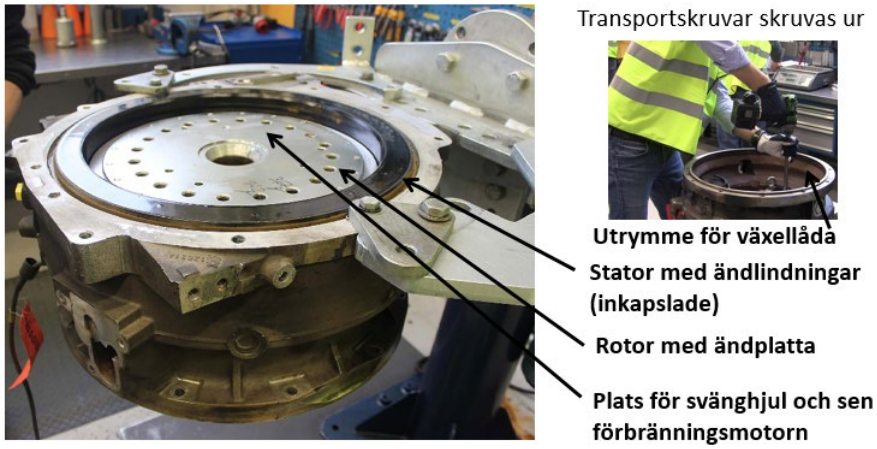
Motorn kunde börja demonteras genom att den hängdes upp i en roterbar lyftanordning, se figur 5.9 som visar motorns båda sidor (uppifrån och nerifrån). Därefter togs transportskruvar och dammtätning bort (figur 5.10). Skruvarna under tätningen var svåra att få loss p g a att fixeringsmassa[3] använts på skruvhuvudena. För att få loss dem krävdes värmning med gassvets följt av skruvning med hävarm på en lång bits, förstärkt med hammare (figur 5.11). Skruvarnas funktion var oklar, kanske de var fästa i en del under resolvern. Ett skydd lades på golvet under motorn ifall rotorn skulle ramla ner när skruvarna lossades (vilket den inte gjorde).

I nästa steg togs två skruvar och två sladdklämmor bort för att lossa sladden till resolvern (figur 5.12). En fast nyckel användes för att få bort skruvarna och en avbitartång användes för att klippa av sladden. Vinkelanslutningen till kylkanalen lossades med en fast nyckel, skruvdragare och handkraft, vilket syns i figur 5.13. Två kvadratiska brickor, åtta skruvar och två ventilbultar lossades med en skruvnyckel. Av två kylkanalbultar är en i metall och en i plast. Brickorna sitter framför ventilbultarna, de verkar vara för luftventiler (figur 5.14).

Därefter var det dags att lossa rotorn, som hade fastnat i statorn. En i förväg förberedd cylinder med passande storlek användes för att pressa ner rotorn med en lufttryckspress i en trälåda som lagts under (figur 5.15). Under processen rann olja ut. En gummiring satt lös på den utpressade rotorn. Figur 5.16 visar både statorn och rotorn. En tätningsfilt, kopparfjäder och tätningsring låg lösa ovanför kopplingen på axeln, efter att rotorn pressats bort.

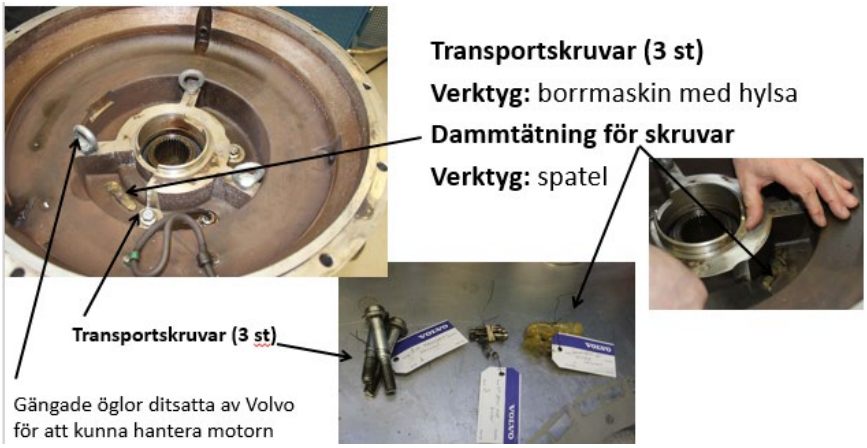
Resolver och lager togs sedan bort från rotorn. Ett specialverktyg hade tillverkats på Volvo för att skruva bort låsringen som höll fast resolvern. Det krävdes dock att hålen som verktyget skulle passa i borrades upp till större storlek. Ett annat verktyg hade troligen använts när motorn tillverkades, men på grund av fixeringsmassa så kunde det verktyget inte användas igen. På grund av fixeringsmassan måste delen värmas i omgångar innan den kunde skruvas loss. Resolvern blev därmed antagligen förstörd av värmen. En försvårande omständighet var att både isärtagna delar och verktygen lätt fastnade i rotorn på grund av de kraftiga magneterna. Bilder från dessa moment visas i figur 5.17. Efter att första ringen lyfts upp för hand lyftes resolverdelen upp med en skruvanordning (figur 5.18). Resolvern och lager togs isär med hjälp av såg, stämjärn, slägga och tång (figur 5.19).

Figur 5.9: Elmotorn upphängd i en roterbar lyftanordning (bildserie).

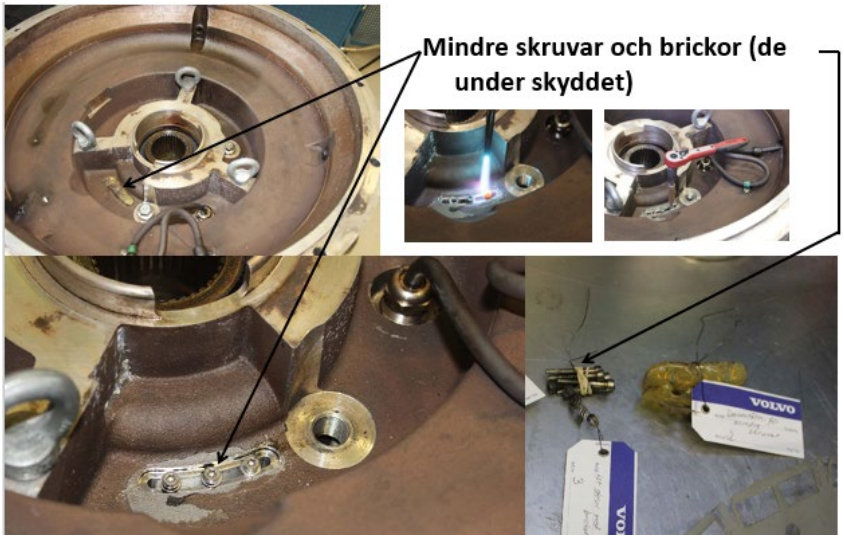


[3] Loctite.

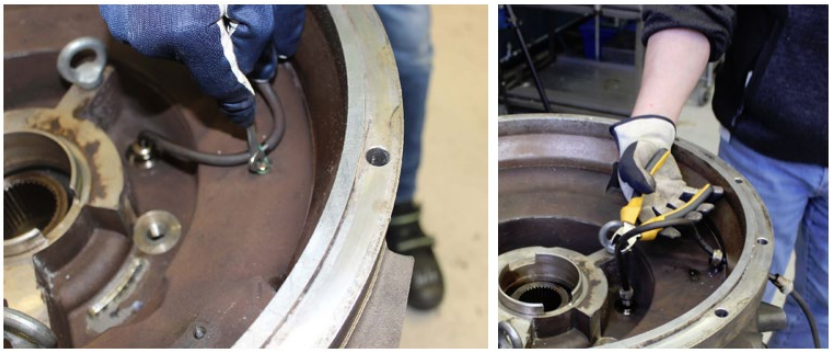
Figur 5.10: Demonteringen påbörjades med att transportskruvar och dammtätning togs bort från sidan där växellådan suttit (bildserie).



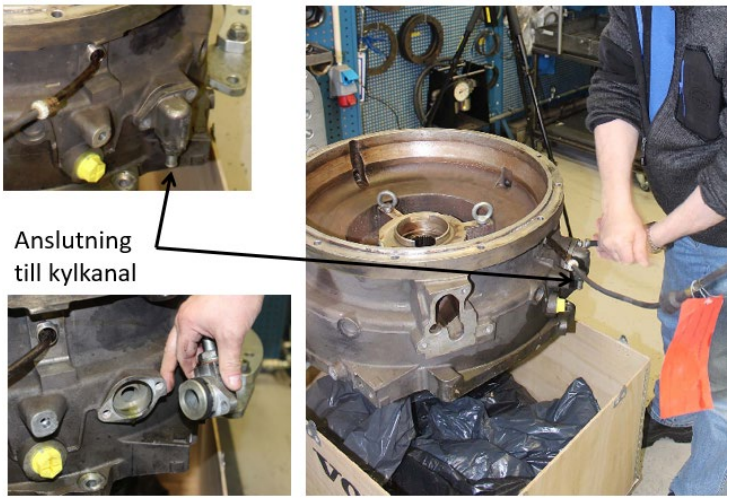
Figur 5.11: Det var omständligt att värma bort fixeringsmassa för att få loss skruvarna, en av skruvarnas huvud blev lite deformerad och bitsen fick hamras ner (bildserie).



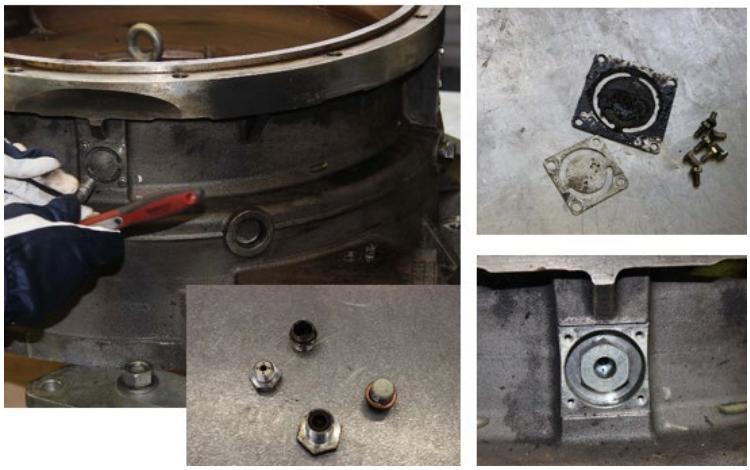
Figur 5.12: Resoversladden lossas och klipps av (bildserie).



Figur 5.13: Vinkelanslutningen till kylkanalen lossas med en fast nyckel, skruvdragare och handkraft (bildserie).

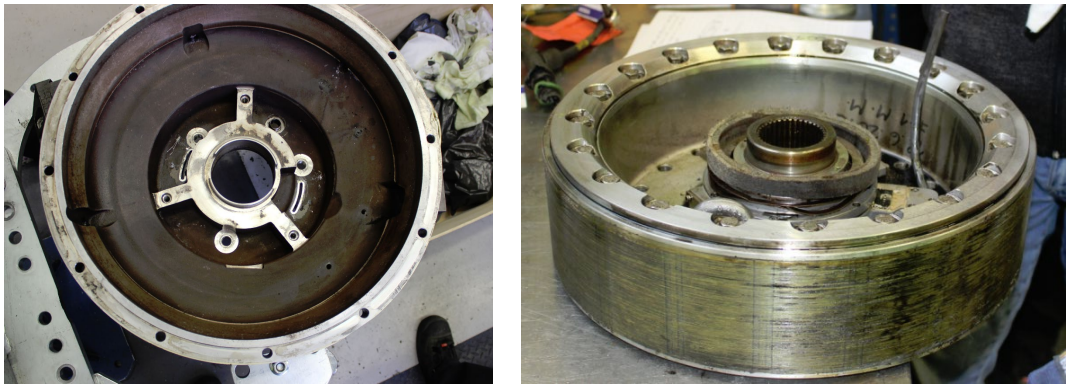


Figur 5.14: Två kvadratiska brickor, åtta skruvar och två ventilbultar lossas med en skruvnyckel. Av två kylkanalbultar så är en i metall och en i plast (bildserie).

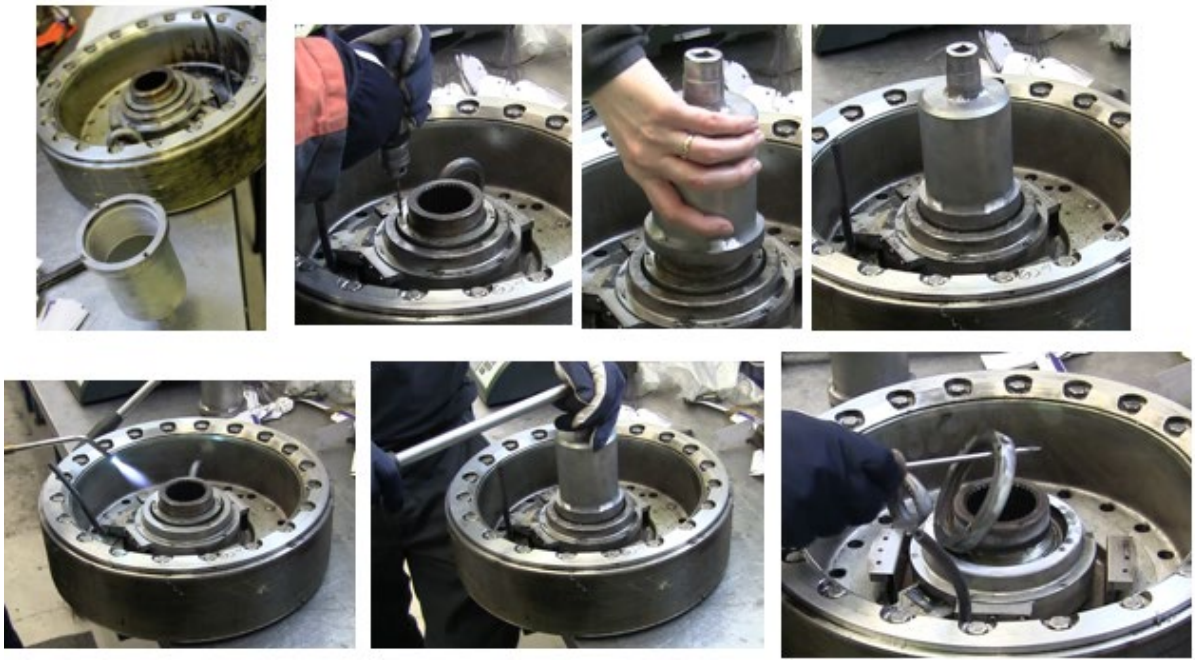


Figur 5.15: Rotorn pressas ut från stator och hus.

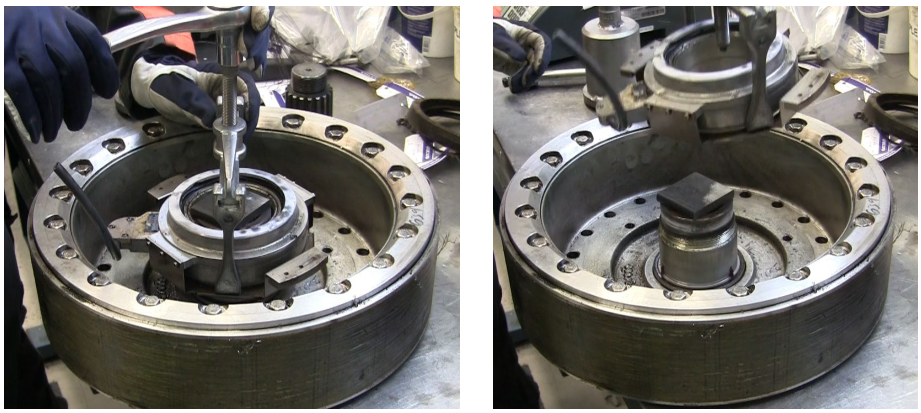
Figur 5.16: Statorn och rotorn. Tätningsfilt, kopparfjäder och tätningsring ovan kopplingen på axeln låg lösa efter att rotorn pressats bort (bildserie).



Figur 5.17: Resolvern avlägsnas från rotorn (bildserie).



Figur 5.18: En resolverdel lyfts upp med en skruvanordning (bildserie)

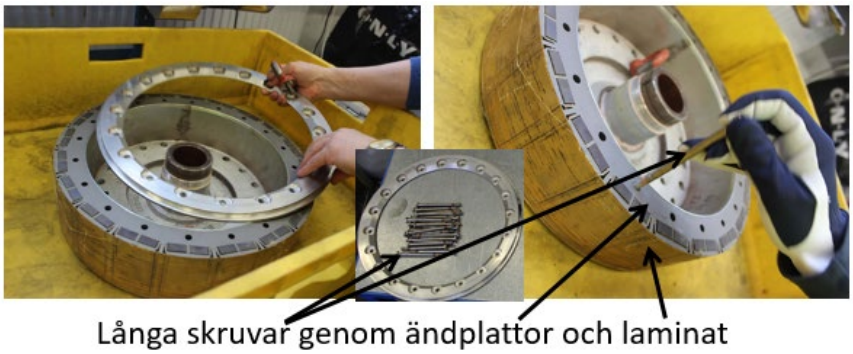


Figur 5.19: Resolvern och lager plockas isär med hjälp av såg, stämjärn, slägga och tång

Rotorn demonterades med skruvmejsel, spatel och tång. Rotorns yta mot luftgapet var täckt med trådig harts. Ändplattor och långa skruvar höll ihop rotorlaminaten (figur 5.20). När dessa avlägsnats kunde rotor-laminaten plockas bort en i taget med skruvmejsel och spatel (figur 5.21). Magneterna var segmenterade med 3 segment i längsled (axiellt). De kunde tas ut med tång med viss svårighet (figur 5.22).

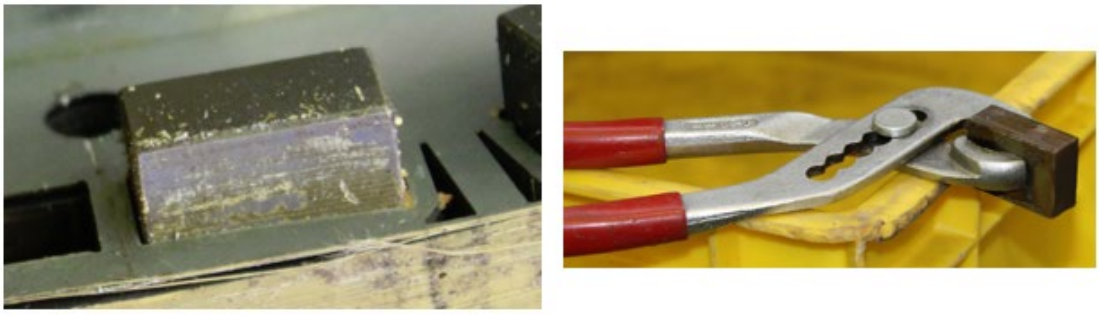
På grund av motorns konstruktion bedömdes det som för svårt att separera stator och hus, framförallt därför att statorn bara var tillgänglig från ena sidan. Det var också mycket svårt att få bort isoleringen som kapslade in stators ändlindning. Till exempel fungerade inte värmning. Från utseendet bedömdes det som att statorlindningen hade blivit impregnerad med epoxy genom gjutning (med ett lock över gjutmassan). Det var svårt att se vilken typ av lindning det var eftersom tvärsnittet skadades av sågen (figur 5.23).

Figur 5.20: Rotorns ändplattor avlägsnas.



Figur 5.21: Rotorlaminaten plockas bort en i taget med skruvmejsel och spatel (bildserie).

Figur 5.22: Magneterna plockas ut med tång med viss svårighet (bildserie)



Figur 5.23: Försök att se lindningen gjordes genom att såga genom isolermaterialet (bildserie).

5.4 Reflektioner från demonteringsstudierna

Målet med båda demonteringsövningarna var att projektdeltagarna skulle få praktisk inblick i de utmaningar som finns när man demonterar elmotorer för fordonsdrift, vare sig syftet är att reparera och återanvända, eller att dela upp motorn i renare fraktioner inför material-återvinning.

Några övergripande observationer var:

- Det är stor variation mellan olika fästanordningar, till exempel olika typer av skruvar, bultar and muttrar, vilket försvårar isärtagning och skapar behov av ett stort antal tillgängliga verktyg
- Enskilda verktyg som tagits fram specifikt för att underlätta demontering gör mycket stor skillnad för hur snabbt enskilda steg i demonteringen tar i anspråk
- Användning av fixeringsmedel och impregnering av kopparlindningen försvårar isärtagning och ökar avsevärt risken för att delar förstörs vid demontering.
- Eftersom pressmontering och presspassning är vanliga steg i elmotortillverkning så krävs motsvarande verktyg vid demontering, till exempel för att ta isär axel och rotor, eller hus och stator
- Magneterna är svåra att jobba med så länge de är magnetiserade på grund av att de är så kraftfulla, till exempel kan de fastna i varandra eller andra magnetiska material, och det finns risk för skador vid manuell hantering. Ytterligare en svårighet är att materialet är sprött och att de lätt skadas.
- Tidiga steg i demonteringsprocessen har potential att vara enkla och snabba utan att motorn skadas, till exempel att ta isär motorn för att byta lager. Mer långtgående demontering för att reparera enskilda delar utgör en betydligt större utmaning

Sammanfattningsvis kan några enstaka steg identifieras som skulle kunna utgöra grunden för en enkel och kostnadseffektiv återtillverkning där kullager, motoraxeln eller hela rotorpaket byts ut. Mer långgående demontering för att separera material från varandra för dedikerad återvinning (till skillnad från för att reparera motorn) är tänkbar men kräver utveckling av nya verktyg. En fungerande demontering av magneter, oavsett om det är för återanvändning eller dedikerad återvinning, kan förväntas kräva demagnetisering.

6. Kartläggning av dagens End-of-Life hantering

Hanteringen av uttjänta fordon styrs, när det gäller personbilar och lätta lastbilar upp till 3,5 ton, av EU:s ELV-direktiv – End of Life Vehicles Directive (EG, 2000). Direktivet ställer bland annat krav på att 95% av fordonsvikten återcirkuleras i någon form, varav minst 85% genom återanvändning eller materialåtervinning. Därtill får material upp till motsvarande 10% av fordonsvikten gå till energiutvinning genom att brännbara komponenter förbränns för att generera el och värme. Detta innebär att endast 5% av fordonsvikten får deponeras (Williams et al., 2020).

Beskrivningen av dagens End-of-Life-hantering baseras på tillgänglig litteratur och studiebesök hos en bildemonterare, Walters Bildelar i Falkenberg och en fragmenterings-anläggning, Stena Recycling i Halmstad. Syftet med kartläggningen var dubbelt: dels för att identifiera strategier för hur End-of-Life-systemen kan utvecklas (kapitel 7), dels för att utveckla scenarier för End-of-Life-hantering (kapitel 11) som utgör underlag för livscykelanalyserna (kapitel 12).

Kapitel 6 innehåller också beskrivningar av vad som händer med koppar-, stål- och aluminiumskrot efter fragmenteringsanläggningen, det vill säga skrotets fortsatta upparbetning till användbar metall. Det beskrivs också hur motsvarande produktion från malmbaserad råvara går till. Beskrivningarna, som är litteraturbaserade, utgör även de underlag till livscykelanalyserna (kapitel 12), där återvunnen metall antas kunna ersätta nyproducerad.

6.1 Bildemontering

Demontering av fordon görs av flera anledningar; för att ta ut värdefulla komponenter och material och för att förbereda fordonet för en fragmentering som möter lagkrav enligt ELV-direktivet. Enligt direktivet måste oljor, bränsle och andra vätskor tömmas ur fordonet, och katalysatorer, däck, batterier och vindrutor demonteras för specifik återvinning. En annan drivkraft för bildemonteringsfirmor är att plocka ut funktionsdugliga komponenter för försäljning och återanvändning som reservdelar. Vissa firmor är specialiserade på att hantera så kallade värdebilar som tillhandahålls av försäkringsbolag på grund av att de krockats eller på annat sätt skadats så att de måste tas ur bruk. Ur dessa fordon är det vanligt att demontera till exempel växellådor, förbränningsmotorer, dörrar, stötfångare och strålkastare (Andersson et al., 2017). Reservdelshanteringen, liksom all återanvändning, är beroende av lagerhållning eftersom inflödet inte sammanfaller tidsmässigt med efterfrågan. Eftersom utrymmet i lagret är begränsat krävs hård prioritering av vilka delar man tror sig kunna sälja med vinst.

Även så kallade ”ELV-bilar” når demonteringsfirmorna, det vill säga de fordon som tas ur bruk och skrotas på grund av slitage och ålder. De firmor som koncentrerar sin verksamhet på att behandla dessa äldre bilar är ofta fokuserade på att demontera komponenter med högt aluminiuminnehåll för att kunna sälja materialet till återvinning, till exempel förbränningsmotorer, växellådor, och fälgar (Andersson et al., 2017). Även kablage och komponenter med högt kopparinnhåll är intressanta. Däremot ägnar sig dessa firmor i mindre utsträckning åt att demontera reservdelar för återanvändning.

Figur 6.1: Demontering av vindruta och kablage ur skrotbil inför fragmentering

Elmotorer för framdrift genomgår idag ingen entydig behandling i bildemonteringssteget. Det är troligt att de, liksom de mindre elmotorer som ingår i till exempel fönsterhissar eller justerbara stolar, inte demonteras ur fordonen utan fortsätter till fragmentering. Inom ramen för detta projekt visade det sig dock att större elmotorer som följt med i värdebilar ibland hade monterats ur fordonen, med tanken att i ett senare skede kunna användas som reservdelar eller säljas till materialåtervinning, bland annat för sitt kopparinnehåll.

Inom bildemonteringsverksamheten finns det inte någon procedur för fortsatt demontering av elmotorer, från komplett motor till enskilda delar. En utveckling av verksamheten från att demontera komponenter ur fordon till att också demontera isär komponenter (för återanvändning av delkomponenter eller materialåtervinning) skulle innebära ett bredare affärsfokus hos bildemonterare och kräva ytterligare kompetens, mer lik den hos komponentrenoverare och återtillverkare.

6.2 Fragmentering

Till fragmenteringsanläggningar kommer skrotade fordon som är förberedda för fragmentering genom att alla vätskor tömts ut, krockkuddar lösts ut och komponenter demonterats, till exempel däck, vindrutor och katalysatorer. Fordonen fragmenteras tillsammans med annat metallskrot, till exempel produktionsavfall från industrier och skrot från kommunala återvinningsstationer.

De flesta fragmenteringsprocesser använder sig av ungefär samma metoder för att separera och sortera inkommande material. En typisk anläggning startar med en hammarkvarn som slår sönder det som stoppas in till knytnävsstora bitar. Denna följs sedan av flera sorteringssteg omfattande luftklassificering, magnetisk separering samt olika behandling av lätta och icke-järnhaltiga fraktioner respektive tunga fragmenteringsrester (Andersson et al., 2017). Efter hammarkvarnen separerar luftklassificeringen de lätta och tunga fraktionerna. Den lätta fraktionen genomgår siktning för att skilja ut de minsta beståndsdelarna, ofta rost, grus och sand, ibland refererat till som finfraktion (på engelska ”fines”), vilket används som konstruktionsmaterial, i till exempel deponier och vägar (Cullbrand et al., 2015). Den återstående lättfraktionen separeras i så kallad fluff, innehållande plast, gummi och textilier, samt aluminium- och kopparrika fraktioner genom virvelströmsseparation. Fluffet går vidare till avfallsförbränning eller deponeras.

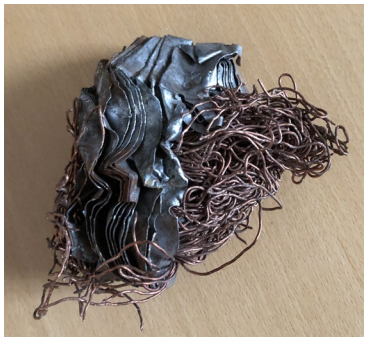
Den tunga fraktionen fortsätter till magnetisk separering där järn och stål skiljs ifrån övriga icke-magnetiska material i den så kallade NF-fraktionen (från ”nonferrous”). NF-fraktionen består främst av aluminium, magnesium, koppar, rostfritt stål och bly men även vissa tyngre delar med icke-metaller. Den bearbetas vidare med hjälp av siktning, ytterligare magnetseparering och virvelströmseparatorer samt en serie flytande bad som sorterar innehållet baserat på densitet. Detta leder till att mindre delar med järn och stål skiljs ut och

kan sorteras med övrigt järn och stål, samt att en aluminiumrik fraktion skiljs ut (Andersson et al., 2017). Den återstående blandade fraktionen exporteras ofta för handsortering och metallraffinering. Koppar är den metall som totalt sett har störst värde i den blandade fraktionen (Welter, 2013).

Elmotorer från industriella applikationer fragmenteras ibland separat och då blir det tydligt att kombinationen av pressade stålkärnor med olika former av kopparlindningar är en stor utmaning för separerings- och sorteringsprocessen. Resultatet blir en specifik typ av fragmenteringsrest bestående av klumpar med stål och koppar som benämns ”meatballs” (Fowler, 2011, Welter, 2013). Storleken på denna ”köttbulle” av stål-koppar-skrot från separat fragmentering av elmotorer avslöjar att det inte bör spela någon större roll om elmotorer för framdrivningen går igenom hammarkvarnen som en enskild del eller fortfarande monterad i fordonet. Noteras kan att ”köttbullar” observerades också i utflödet från hammarkvarnen vid studiebesöket på Stena Recycling (figur 6.2).

I de fall andelen koppar och stål är ungefär lika sett till vikt sorteras köttbullen ofta till det icke-magnetiska flödet, på grund av att magneterna inte förmår lyfta den (Fowler, 2011), eftersom koppar har högre densitet än stål. Även formen kan påverka magneternas förmåga att sortera köttbullarna. För att förbättra utfallet används ibland handsortering av köttbullar som komplement till det magnetiska sorteringssteget. För den fortsatta processen är det mest ekonomiskt fördelaktigt om köttbullarna sorteras till NF-fraktionen och därefter som ett eget specifikt flöde som kan skickas till kopparåtervinning från lågvärdigt järnblandat kopparskrot (Welter, 2013).

Figur 6.2: Skrot på väg in i hammarkvarnen (till vänster) samt fragmenteringsrest från en elmotor, en så kallad ”köttbulle” (till höger).



De flesta magnettyper är spröda och bryts lätt sönder. Detta leder till att magneter som går igenom fragmentering till stor del blir pulveriserade och hamnar i den lätta fraktionen (Widmer et al., 2015, Jilvero, 2019). Det antas ibland i forskningslitteraturen att magnetmaterial följer med stålfraktionen (Bandara et al., 2014, Yang et al., 2017) men kemisk analys av olika fragmenteringsfraktioner visar att mindre än 1% av pulveriserat neodym följer med stål och järnskrot (Widmer et al., 2015). Däremot råder viss osäkerhet om hur stor andel av magneterna som sitter kvar i rotorn utan att pulveriseras, och som då sorteras som magnetiskt material. Rimligen kan detta skilja sig åt något mellan olika designlösningar, motortyper och magnetmaterial, vilket också antyds i genomgången litteratur (Widmer et al., 2015).

6.3 Bearbetning av kopparskrot till användbar koppar

Koppar som sorteras från demontering eller fragmentering återvinns till ren koppar på olika sätt beroende på skrotets skick och mängden föroreningar, till exempel i form av andra ämnen eller oxidationsskikt (Schlesinger et al., 2011, Cusano et al., 2017). Om mängden föroreningar är mycket små kan skrotet användas för inblandning i primär kopparproduktion. Detta gäller kopparspill från tillverkningsprocesser, eller skrot från använda produkter av hög kvalitet, till exempel från industriellt kablage. Vart olika typer av kopparskrot tar vägen beror emellertid på flera faktorer såsom vilka smältnings- eller konverteringsanläggningar som köper upp skrot på en viss marknad, på existerande avfallsreglering och vilka legeringselement som efterfrågas i specifika processer (Schlesinger et al., 2011). Grovsorterat kopparavfall med lågt kopparinnehåll, som till exempel ”köttbullar”, där koppar och järn inte har separerats ordentligt i tidigare steg, eller andra rester från fragmentering av fordon, kräver mer omfattande behandling jämfört med mer högvärdigt kopparavfall. Det finns olika exempel på standardklassificering av kopparskrot, till exempel inom EU där standard EN 12861 gäller (Muchová et al., 2011), eller den amerikanska klassificeringen av branschorganisationen Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI, 2018). Syftet med dessa är att underlätta handel och att utgöra referenser för prissättning och underlag för kvalitetskontroll (Cusano et al., 2017).

Typiskt lågvärdigt kopparskrot som köttbullar går till en pyrometallurgisk smältprocess som producerar "svartkoppar", vilket har en medelkopparhalt på cirka 80 % [Schlesinger cp 19]. Processen genererar också slagg med en viss andel koppar i, och avgaser med bland annat metalldamm och partiklar. I nästa steg behandlas svartkopparn i en konverteringsprocess. Utöver svartkoppar matas här ugnen även med kopparskot vars kopparhalt ligger ungefär i spannet 65–90 % (Cusano et al., 2017). Processen oxiderar föroreningarna och förädlar metallen till "råkoppar" som har cirka 95–97 % kopparhalt. Samma typ av processteg ingår även i primär kopparproduktion. I nästa steg går råkoppar i sin tur vidare till anodgjutning i en så kallad anodugn. I denna process minskas mängden syre och andra föroreningar i produkten så pass att renheten når upp till 99 %. I det avslutande steget elektrolyseras anoderna till katoder med en renhet på 99,99 % eller högre, med hjälp av elektricitet (Schlesinger et al., 2011, Cusano et al., 2017). De framställda kopparkatoderna är likvärdiga med produkter från primär koppartillverkning och redo att formbearbetas till typiska kopparprodukter som tråd eller kopparplåt. Behandlingen i anodugnen och den efterföljande elektrolysen ger upphov till utsläpp och slam, samt biprodukter såsom nickel- och kopparsulfat.

6.4 Bearbetning av stålskrot till användbart stål

Stål- och järnskrot kan klassificeras på flera sätt, till exempel beroende på tidigare användningsområde eller baserat på avfallsbearbetningsmetod samt på hur förorenat det är (Muchová och Eder, 2010b). Ofta skiljs nytt skrot, dvs. spill från stålverk, valsverk eller från olika former av bearbetning och komponenttillverkning, från gammalt skrot som kommer från produkter som kasserats efter användning. En fördel med att ha tillgång till nytt skrot är att sammansättningen är välkänd och att det innehåller få föroreningar jämfört med gammalt skrot. En del spill från tillverkningsprocesser kan gå direkt till stålverken för omsmältning men ofta mals eller krossas dessa fraktioner till lagom storlek först, på samma sätt som vid fragmentering av gammalt skrot. På samma sätt mals ibland även större delar av gammalt järn- eller stålskrot ner till mindre bitar, även i de fall då de redan separerats och klassificerats fria från andra material, till exempel vid demontering för hand.

Inom EU används en avfallsklassificering för fragmenterat stålskrot som benämns med koden E40 (EFR, 2017). Detta avser gammalt stålskrot som vid fragmenteringen malts till delar som inte överstiger 200 mm i någon riktning för 95 % av lasten, och där inget stycke bland de återstående 5 % får överskrida 1000 mm. Andelen ämnen som betraktas som föroreningar får maximalt uppgå till 0,4 %, varav maxminalt 0,25 procentenheter koppar och 0,02 procentenheter tenn. Bland föroreningar ingår även icke-metalliska material som till exempel isolermaterial. Stora mängder järnoxid får inte heller förekomma, med undantag för viss ytrost som uppstår vid lagring utomhus av förberett skrot.

Skrotbaserad ståltillverkning görs i så kallade ljusbågsugnar som drivs med elektricitet (Björkman och Samuelsson, 2014). Processen kräver mycket mindre energi än malmbaserad ståltillverkning, ungefär 400–450 kWh el per ton stål. Åtgången av elektricitet beror på skrotets sammansättning men även på att det finns vissa steg där andra energikällor kan användas, till exempel bränslebaserad förvärmning av skrotet. Processen matas ofta enbart med skrot, men en det förekommer även att jungfruligt järn används i form av järnsvamp. Ämnen som bildar slagg tillsätts i smältan för att binda upp några av de föroreningar som följer med stålskrotet. Ljusbågsugnen kan hantera alla olika typer av stålskrot och är en effektiv smältanordning. Däremot är den sämre för att genomföra förädlingsreaktioner till olika former av högkvalitativt stål. Detta görs ofta i efterföljande steg, till exempel i en skänkugn, varefter produkten går vidare till gjutning och formbearbetning.

Vid malmbaserad ståltillverkning reduceras järnmalm till råjärn i en masugn och därefter minskas kolhalten genom så kallad färskning i en konverteringsugn till råstål. Vid färskningen krävs kylmedel för att temperaturen inte skall bli för hög när värme frigörs av exoterma reaktioner. Kylmedlet utgörs ofta av stålskrot, men även här är det möjligt att använda järnsvamp som framställts med direktreduktion av järnmalm vid lägre temperaturer än i masugnen. Totalt sett tillsätts ofta 15–20 % stål- och järnskrot i de olika stegen i malmbaserad ståltillverkning (Björkman och Samuelsson, 2014). Totalt härrör cirka 40 % av världens nyproducerade stål från stålskrot, varav en inte oväsentlig del blandas in i malmbaserad stålproduktion.

Sammanfattningsvis, för malmbaserad stålframställning utgörs råmaterialet oftast av en kombination av skrot och malm, och för skrotbaserad framställning förekommer ibland malmbaserad järnsvamp som en av de ingående ingredienserna. Emellertid, av betydelse för den LCA som genomförts inom ramen för detta projekt, går det att identifiera och tekniskt beskriva helt malmbaserad respektive helt skrotbaserad stålproduktion.

6.5 Bearbetning av aluminiumskrot till användbar aluminium

Aluminiumskrot kan också delas in i många olika kategorier, och även här används begreppet nytt skrot för fabriksspill och gammalt skrot för uttjänta och kasserade produkter. Återvinning till användbar sekundär råvara sker antingen genom direkt omsmältning eller mer avancerad raffinering (Muchová och Eder, 2010a). Omsmältningsverk tar emot nytt skrot eller väl sorterat gammalt skrot, i båda fallen där sammansättningen är relativt känd. Ytbeläggningar som färg eller lack, olja eller annan smuts tas bort i olika förbehandlingsprocesser (Cusano et al., 2017). På detta sätt kan man minska energiåtgången och utsläppen under omsmältningen. Även järnrester tas bort med magneter. Flamugnar och induktionsugnar används vanligtvis vid omsmältning av denna typ av renare aluminiumskrot (Muchová och Eder, 2010a).

Aluminiumskrot som innehåller en större andel föroreningar, till exempel andra oönskade metaller såsom stålbultar, går till aluminiumraffinaderier som kan arbeta med alla typer av skrot. Här används bland annat så kallade rotationsugnar samt ugnar med lutande härd och

man tillsätter salter för att binda föroreningarna i slagg (Cusano et al., 2017). Mängden salter som behöver tillsättas beror på typ av smältugn och renhetsgraden hos skrotet. Dessa slaggbildare har ungefär samma energibehov per kg i ugnen som det ingående skrotet (Cusano et al., 2017). Effekten blir att skrot med hög andel föroreningar kräver högre specifik energiförbrukning och ger upphov till mer slagg än mindre förorenat skrot.

När saltslagg tappas ut från bearbetningsugnarna innehåller det stora mängder aluminiumoxid och en del metalliskt aluminium, 4–10% av den totala slaggvikten (Cusano et al., 2017). Av denna anledning behandlas saltslagget i ytterligare återvinningsprocesser som separerar ut användbar metall och aluminiumoxid, samt salt som kan återanvändas. Återstående slaggrester används till stor del som konstruktionsmaterial, i vägar och liknande. Detta, i kombination med att även filterdamm från återvinningsanläggningen går igenom återvinning betyder att i stort sett inget fast avfall, eller åtminstone mycket liten mängd, behöver gå till deponi från aluminiumåtervinning.

7. Strategier för cirkulära flöden för elmotorer

I detta kapitel beskrivs ett antal olika strategier för att hantera elmotorer för framdrift mer cirkulärt i End-of-Life-systemen. Det rör sig om möjligheterna för återanvändning av hela, eller delar av, motorn, semiautomatiserad demontering av kopparlindning för att åstadkomma att en renare kopparfraktion kan gå till återvinning och semiautomatiserad demontering av magneter för återanvändning eller återvinning. Slutligen beskrivs vilka möjligheter det finns för återvinning av magnetmaterial.

De identifierade strategierna ligger till grund för de End-of-Life-scenarier, beskrivna i kapitel 11, som ligger till grund för livscykelanalyserna i kapitel 12. De baseras på genomgång av litteratur i området samt på observationer i samband med studiebesöken. I några fall, som elmotorklyven för demontering av koppar, finns kommersiell teknik framme, medan det i andra fall, som utrustning för att demontera magneter, rör sig om försöksutrustning.

7.1 Återanvändning

Återanvändning av hela elmotorer för framdrift av fordon är möjlig om elmotorns livslängd bedöms eller kan säkerställas vara längre än fordonets. Exempel är bilar, bussar eller lastbilar som skrotas på grund av en olycka, men det där inga skador åsamkats motorn. Ett annat exempel är elmotorer som skickas på lagning eller återtillverkning från en verkstad då någon typ av felindikation föranlett ett byte av framdrivningsmotorn i ett befintligt fordon, men det visar sig att elmotorn egentligen inte är sönder, utan att felindikationen uppstått felaktigt eller tillfälligt i något specifikt driftsfall. En gemensam nämnare är att sådana motorer måste genomgå inspektion och testning för att säkerställa att de fortfarande fungerar. En förutsättning för återanvändning är att det går någorlunda enkelt att demontera elmotorn ur fordonet.

I de fall motorn går sönder genom förslitning av kullagren eller motoraxeln kan reparation genomföras genom byte av dessa delkomponenter. De är möjliga att demontera utan att skada övriga delar i de flesta designlösningar för elmotorer. Framförallt kullager drabbas av slitage, och därför är det en viktig poäng i att anpassa motordesignen så att demontering av motorn av och byte av lager är möjligt är genomföra. Denna typ av åtgärder har stor betydelse eftersom de förlänger livet på samtliga övriga komponenter i motorn, inklusive dem som innehåller de material som pekas ut som viktiga ur ett miljö- och resursperspektiv (kapitel 4, tabell 4.2): aluminium, elektroplåt, koppar och magnetmaterial.

I projektet har det framkommit att en annan vanlig orsak till att elmotorer kasseras är att statorn går sönder och i värsta fall kortsluts på grund av att isoleringen i lindningen degraderar och går sönder. En tydlig potential för ökad återanvändning är därför att återanvända hela rotorn intakt och installera den i en annan stator. En sådan åtgärd skulle då minska miljöbördan i förhållande till tillhandahållen funktion för rotorn, elektroplåten och magnetmaterialet.

7.2 Semiautomatiserad demontering av kopparlindning

De första stegen vid isärtagning av elmotorer kan med rätt verktyg gå göras genom handdemontering. Detta avser då att ta av ändplattor och frigöra kullager och rotorpaketet (rotor inklusive axeln). För statorpaketet uppträder sedan en tydlig utmaning då först aluminiumhuset skall skiljas ifrån, och därefter kopparlindningen separeras från statorkärnan.

Detta kan inte göras utan förstörande demontering och syftar då i första hand till att dela upp motorn i renare materialfraktioner än vad som blir resultaten om hela motorn går genom en fragmenteringskvarn (se avsnitt 6.2).

Figur 7.1 visar ett exempel på en typ av hydraulisk klyv- och dragmaskin som tagits fram för denna typ av ändamål. Samma maskin kan med några manuella verktygsbyten klyva och separera bort huset, klyva statorkärnan och dra loss lindningen från statorkärnan. Resultatet blir att aluminium, elektroplåt och koppar helt kan separeras från varandra, medan delar av spårisoleringen följer med kopparen och andra med elektroplåten. Denna typ av utrustning skulle kunna vara användbar hos t ex bildemonteringsföretag som vill sälja enskilda material till ett högre skrotpris.

Figur 7.1: Exempel på en klyv och dragmaskin som kan användas för att separera statorn i renare materialfraktioner (bildserie) Maskinen på bilderna kommer från Bronneberg BV och marknadsförs som en "electric motor recycling machine". (Bilder återgivna med tillstånd)

7.3 Semiautomatiserad demontering av magneter

Om rotorpaketet skall delas upp i materialfraktioner efter att det skiljts från statorpaketet måste axeln först separeras från det övriga delar av rotorn. Detta kräver i regel en press, och beroende på hur infästningen av rotorkärnan mot axeln är konstruerad möjliggör detta eventuellt också att rotorns ändplattor kan avlägsnas med handverktyg. Ändplattorna är ofta gjorda av rostfritt stål (Nordelöf et al., 2017).

Därefter, om syftet är att återanvända eller återvinna magneterna, krävs mer avancerade processer för att få loss dem oskadda ur rotorn eftersom de hålls fast i rotorkärnan av starka magnetiska krafter och också kan vara limmade. Av denna anledning kan rotorn behöva hettas upp i en ugn för att lösa upp limmet och avmagnetisera magneterna. Typiska temperaturer för avmagnetisering av neodymbaserade magneter är runt 350˚C (Li et al., 2019). En viktig förutsättning är att det lim som använts för att fixera magneterna inte smälter innan man uppnår avmagnetiseringstemperaturen, eftersom det kan förekomma repellerande krafter i rotorn som skapar en risk att magneter skjuts ut (Li et al., 2019).

MORE-projektet studerade möjligheten till återanvändning av permanentmagneter. Här undveks utmaningarna med avmagnetisering genom att man konstruerade två demonteringsrobotor som kan avlägsna magneter ur rotorn, en för ytmonterade magneter och den andra för integrerade (infällda eller instuckna) magneter (Elwert et al., 2016). Dock krävs att rotorn först demonteras manuellt. Magneterna måste avtäckas före proceduren, till exempel genom att ändplattor tas bort när man har integrerade magneter och eventuella metallnäthylsor tas bort för ytmonterade magneter. De integrerade magneterna pressas ut ur rotorn med en rotorspecifik ejektor och leds via en icke-magnetisk rutchbana till ett transportband, antingen för att avmagnetiseras direkt med infraröd strålning, eller för att paketeras i plastplattor och transporteras till materialåtervinning. Ytmonterade magneter kapas och transporteras till avmagnetisering eller staplas direkt på icke-magnetiska plastplattor. I både fallen kunde man visa att förlusterna av magnetmaterial var under 1% utan att det krävdes avmagnetisering före demonteringen (Elwert et al., 2016).

MORE-projektet fann att demonterade magneter blir fullt dugliga för återanvändning i nya elmotorer om ytskiktet är intakt. Men eftersom nya magneters egenskaper kontinuerligt förbättras och eftersom rotorkärnans tvärsnitt ändras i nya elmotordesigner är det ändå svårt att återanvända dem. Det mest intressanta blir därmed att låta dem gå vidare till materialåtervinning. Yang et al. (2017) framhåller därvid att kostnadseffektiv demontering av magneter är ett avgörande steg.

7.4 Återvinning av magnetmaterial

Återvinning av material från neodymbaserade magneter sker idag nästan uteslutande i Kina och avser då spill från magnetframställning (Elwert et al., 2016). En viktig förklaring till att verksamheten har kunnat etableras är Kinas marknadsdominans för denna typ av magneter, med över 80% av världsmarknaden, vilket leder till att det finns tillräckliga mängder spillmaterial för att återvinning ska vara lönsam. Det finns mogna industriella processer för att extrahera ut de sällsynta jordartsmetallerna från spillmaterialet och återfå dem som råmaterial (Yang et al., 2017). Däremot är återvinning av magneter från skrot efter uttjänta elmaskiner sällsynt och har beräknats utgöra under 1% av den återvinning som sker (Graedel et al., 2011). Viktiga orsaker till detta är ineffektiv insamling, tekniska svårigheter att separera magneter från övriga material i många olika applikationer och en för hög kostnadsbild (Elwert et al., 2016).

Samtidigt framhåller till exempel Yang et al. (2017) att redan inom 10–15 år bör sällsynta jordartsmetaller återvunna från använda permanentmagneter spela en betydande roll i den totala försörjningen av sällsynta jordartsmetaller. En förklaring är att det utanför Kina finns ett behov av att säkerställa tillgången på dessa metaller (Elwert et al., 2016), eftersom tillgången från annan primärutvinning är låg, samtidigt som fordonssektorn genomgår en omfattande omställning till elektrisk framdrift med kraftig ökad efterfrågan på dessa metaller.

Det finns tre huvudspår för materialåtervinning för neodymbaserade magneter:

1. framställning av högkvalitetsmagneter genom omsmältning av den befintliga legeringen följt av pulverisering och blandning med magnetpulver från primär råvara
2. framställning av magneter med lägre kvalitet genom omsmältning av den befintliga legeringen följt av pulverisering och en enklare bindningsprocess
3. framställning av råmaterial som kan användas i högkvalitetsmagneter, främst ingående sällsynta jordartsmetaller såsom neodym och dysprosium

Inom ramen för MORE-projektet undersöktes både spår 1 och 3 (Elwert et al., 2016). Det första bygger på så kallad sintring där magneten skapas genom att pulver pressas samman samtidigt som det hettas upp till hög temperatur, ibland under vakuum (Nordelöf et al., 2017). Pulverisering av den omsmälta magnetlegeringen åstadkoms genom malning, vilket i spår 1 även kan föregås av så kallad ”vätgas-splittring” (”hydrogen decrepitation” på engelska) för att pulvret skall bli så finkornigt som möjligt. Det förbättrar malningsprocessen och minskar det återvunna materialets degradering (Elwert et al., 2016), men leder till högre kostnader (Oeters och Ottrow, 2012).

Syftet med att återvinna hela den befintliga legeringen, såsom i både spår 1 och 2, är att undvika de många processteg, och därmed förknippade kostnader, som krävs om man istället siktar på att separera ut de sällsynta jordartsmetallerna var för sig. Emellertid leder återvinning av hela magnetlegeringen till att föroreningar i form av oxider och karbider blir kvar i magneten. Följden är att materialet får sämre egenskaper, både avseende remanens och koercivitet (Li et al., 2019), även i spår 1 där avsikten är att uppnå hög kvalitet. Därtill kommer direkta materialförluster och andra kvalitetsförsämringar (Elwert et al., 2016). Till exempel behöver det nickel som ingår i magneterna ytbeläggning separeras ut från pulverblandningen (Kimiabeigi et al., 2018). Vidare måste magnetskrotets sammansättning vara känd för att processerna skall kunna optimeras.

Det är en utmaning att återvinna hela magnetlegeringen när målet är högkvalitativa magneter. Ett alternativ är att välja spår 2 och använda det återvunna magnetpulvret för att framställa magneter med lägre prestandakrav (Kimiabeigi et al., 2018). Istället för sintring fogas pulvret ihop med hjälp av ett bindemedel till så kallade bundna magneter. Bundna neodymbaserade magneter som framställts med återvunnet innehåll kan dock inte användas för samma typ av applikationer som sintrade magneter. För de användningsområden som är aktuella finns andra billigare magnettyper, till exempel ferritmagneter (Nordelöf et al., 2019a). Detta gör att även magneter återvunna enligt spår 2 utmanas av höga kostnader.

Mot denna bakgrund blev slutsatsen i MORE-projektet att återvinning av hela magnetlegeringen genom omsmältning (spår 1 och 2) leder till för höga förluster och för stor försämring i funktion för att vara rimligt. Trots att framställning av sekundära sällsynta jordartsmetaller enligt spår 3 är det dyraste och mest miljöbelastande alternativet bedömde man det som det mest genomförbara på kortare sikt (Elwert et al., 2016).

En ytterligare utmaning för återvinning av neodymbaserade magneter från skrotade elmotorer ligger i att det finns en strävan att minska mängden sällsynta jordartsmetaller i legeringen för att få ner kostnaderna även på magneter från primär råvara (Els, 2017). Specifikt görs

ansträngningar för att minska mängden dysprosium (Elwert et al., 2016), till exempel genom att inte ha detta ämne jämnt fördelat i hela magneten, utan endast i vissa delar av strukturen (Nordelöf et al., 2017). Följden blir att återvinning av hela magnetlegeringen såsom i spår 1 riskerar att bli ännu mer utmanande sett till att bibehålla materialegenskaper och prestanda, samtidigt som lönsamheten i att återvinna rena råmaterial såsom i spår 3 riskerar att minska. För dysprosium i permanentmagneter finns således en motsägelse mellan att minska mängden dysprosium och att öka återvinningen som strategier för att minska kostnaderna för neodymmagneter (Els, 2017).

Arbete pågår dock för att hitta nya vägar för design och tillverkning av magneter med tillräckligt god prestanda för fordonsapplikationer som samtidigt är lättare att återvinna. Li et al. (2019) exemplifierar med en ny typ dysprosium-fri sammansättning för bundna magneter med ett termoplastiskt bindemedel. Med viss inblandning av nytt magnetpulver kan hela denna bundna magnet återvinnas samtidigt som magnetkvaliteten upprätthålls. Magneterna blir inte lika starka som sintrade magneter men å andra sidan kan de tillverkas med stor flexibilitet beträffande form (Li et al., 2019).

DEL 3 – MODELLERING OCH UTVÄRDERING

Rapportens tredje del beskriver de modelleringar och utvärderingar som gjorts, tekniska såväl som miljö- och resursmässiga.

Inledningsvis beskrivs metodiken hur energianvändningen under drift beräknats, genom elektromagnetiska och körscykelberäkningar. Sedan presenteras de motoralternativ för vilka beräkningar utförts. De representerar dels dagens teknik, dels lösningar som bedömdes kunna vara bättre anpassade till en cirkulär ekonomi.

Avslutningsvis går resultaten från energianvändningen under drift, tillsammans med scenarier för motorernas End-of-Life-hantering, in i livscykelanalyser av utvalda motoralternativ.

8. Metodbeskrivning för elektromagnetiska- och körcykelberäkningar

I detta kapitel beskrivs hur energiförbrukningen under drift har beräknats för de olika elektriska maskinerna, vilken är en viktig ingångsparameter till livscykelanalysen. Resultaten presenteras i kapitel 10. I det första steget har den totala motorvikten beräknats, samt den så kallade *verkningsgradskartan* (på engelska ”efficiency map”) som beräknats för varje enskild maskin inom dess möjliga arbetsområde. Verkningsgradskartan beskriver verkningsgraden som funktion av de varvtal och vridmoment som motorn kan leverera. Därefter, för att beräkna energiförbrukningen under drift, antogs maskinerna var och en agera framdrivningsmotor i det lätta eller tunga fordonet (specificerade i kapitel 3). Syftet var att definiera de specifika varvtal och vridmoment som maskinerna behöver leverera då fordonet följer en utvald, fördefinierad hastighetsprofil som funktion av tid, s.k. *körcykel*. För varje sekund i körcykeln, lästes sedan energiförbrukningen av från verkningsgradskartan vid aktuellt varvtal och vridmoment, och summerades.

De energiförluster som de olika elmaskinerna orsakar i resten av drivlinans komponenter samt batteriladdaren har tagits hänsyn till med hjälp av deras verkningsgrader. Dock har fixa verkningsgradsvärden för dessa använts, för enkelhets skull, det vill säga deras verkningsgrad har inte varierat under körcykeln. Därefter har den energimängd beräknats som skulle behöva tas från elnätet vid laddning av batteriet, för att täcka hela fordonets energiförbrukning för framdrivning under körcykeln.

Projektet ville emellertid undersöka vilken energiförbrukning under drift som elmaskinen ger upphov till genom sina förluster samt att den bidrar till fordonets totala vikt. Den fås fram genom att först beräkna energiförbrukningen för fordonet som helhet, med motorn inkluderad, och sedan subtrahera den energiförbrukning som erhålls om man sätter motorns egen vikt och energiförlusterna i motorn till noll.

8.1 Elektromagnetiska beräkningar

Energiförlusterna i varje enskild elektrisk maskin har beräknats som funktion av både hastighet och vridmoment i ett diskret, men relativt stort, antal arbetspunkter som täcker hela maskinens möjliga arbetsområde. Detta har gjorts med mjukvaran ANSYS Maxwell 2D (två dimensioner) för radialflödesmaskinerna, och med ANSYS Maxwell 3D (tre dimensioner) för transversal- och axialflödesmaskinerna. Mjukvaran använder den numeriska finita element-metoden (FEM) för de elektromagnetiska beräkningarna (simuleringarna). De görs med transient elektromagnetisk analys för ett givet varvtal och given styrka och frekvens på strömmen i de tre faserna.

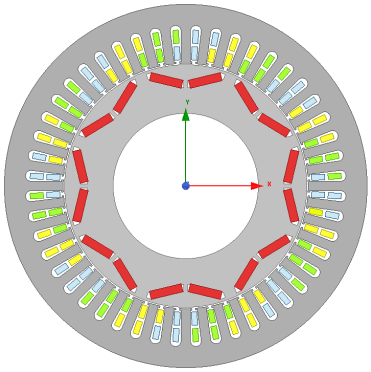
I 2D har maskinens geometri ritats för ett axiellt tvärsnitt och resultaten tolkats per längdenhet. Denna metod tar alltså inte hänsyn till virvelströmmar och elektromagnetiska flöden i axiellt led. I 3D har maskinernas geometri representerats i samtliga tre dimensioner. På grund av att motorn i 2D-beräkningarna är symmetrisk runt sitt axiella tvärsnitt räcker det att modellera och utföra elektromagnetiska beräkningar på endast en sektor, vilket exemplifieras i figur 8.1a och b. I 3D kan axiell symmetri utnyttjas för att endast modellera halva maskinsektorn (det vill säga halva aktiva delen och en änd-del).

Vidare modelleras endast de delar av maskinen som har betydelse för de elektromagnetiska beräkningarna, det vill säga statorns och rotorns stållaminat, magneterna samt statorns lindningar, som i 2D representeras i form av rektangulära ytor motsvarande total koppararea i

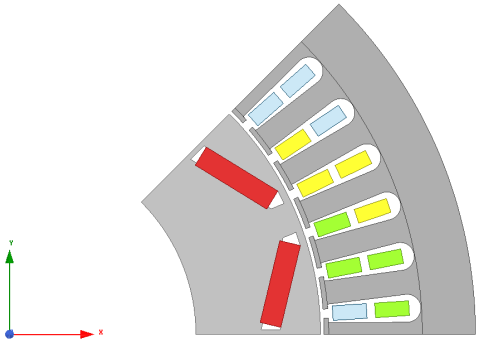
spåret. Därmed ingår inte elektromagnetiskt passiva delar såsom rotorns innersta delar, axeln, lagren, positionssensorn (på engelska resolver) eller huset. Eftersom styrkan på magnetfältet i den inre delen av rotorn är försumbar kan dessa delar exkluderas från de elektromagnetiska beräkningarna utan påverkan på resultatet. Däremot underskattas den laminatvikt som går vidare till LCA-beräkningarna. Därför har en uppskattning av kopplingen till axeln gjorts utanför de elektromagnetiska beräkningarna, vilken exemplifieras i figur 8.1c.

Figur 8.1: Axiellt tvärsnitt av elmaskin a) hel 360º vy, b) sektor modellerad i 2D, c) estimerad koppling till axel vid användning i LCA beräkningar.

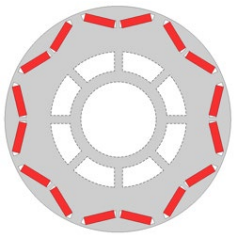
a) Tvärsnitt i 360º av elmaskin i 2D.



b) Tvärsnitt av sektor modellerad i 2D.



c) Estimerad koppling mellan rotor och axel vid LCA-beräkningar för samtliga maskiner. Här expemplifierad för en rotor med instuckna magneter.



Förlusterna i en elmaskin kan variera beroende på hur man styr strömmens styrka och fasvinkel i förhållande till rotorns position. Här har den så kallade ”Maximum Torque Per Ampere” (MTPA) metoden eller ”maximalt vridmoment för given ström” använts vilket innebär att strömmen styrs så att lindningens energiförluster minimeras. Detta är en vanligt förekommande styrmetod i elektrifierade fordon. Metoden används för arbetspunkter på låga varv upp till det varvtal då gränsen för maximal spänning har nåtts. För högre varvtal då spänningen begränsas till sin maximala nivå, används istället en något modifierad strömregleringsmetod, så kallad fältförsvagning. Då styrs strömmen så att magnetfältet från statorn kan motverka rotorns magnetfält (vilket kommer från magneterna). På så sätt kan den inducerade spänningen begränsas och hållas under den maximala spänningsnivån. För transversalflödesmaskinen, som har höga energiförluster i järnet men relativt låga energiförluster i lindningen, så lämpar det sig bättre med en så kallad ”Mimimum Loss Control” (MLC) vilket innebär att strömmen styrs så att de totala förlusterna minimeras.

8.1.1 För 2D geometrierna: radialflödesmaskinerna

För att kunna fastställa strömregleringen både gällande MTPA och fältförsvagning utförs först ett hundratal FEM simuleringar vid ett och samma varvtal, där strömstyrka och fasvinkel varieras. Strömregleringen beräknas sedan i beräkningsverktyget Matlab dit simuleringsdata exporteras. Därefter används den fastställda strömregleringen i en simuleringsmatris vid ett diskret antal olika varvtal och vridmoment i vilka maskinens effektförluster beräknas.

Effektförlusterna i lindningen beräknas som produkten av fasresistansen och kvadraten på strömstyrkan, där strömförträngning försummas. Fasresistansen beräknas utifrån den elektriska ledningsförmågan för ledarmaterialet vid 70oC samt med kännedom om lindningens geometri, längd och tvärsnittsarea. Lindningens tvärsnittsarea i spåret ansätts genom vald andel koppararea relativt spår-area, så kallad fyllfaktor. Längden på den aktiva delen är proportionell mot laminatstackens längd samt antalet varv per lindning. Längden på härvändan uppskattas bestå av en del axiellt utstickande ledare (typiskt 2–4 cm för aktuell maskinstorlek), samt en del som för distribuerade- och hårnålslindningar går i en cirkelbåge från ett spår till ett annat och är proportionellt mot statordiametern och antalet poler (Lindström, 1999).

Effektförlusterna i stållaminaten beräknas som medelvärdet av förlusterna per tidsenhet över den andra av två simulerade elektriska perioder i varje varvtal-vridmoment-arbetspunkt. Magneterna modelleras som icke ström-exciterade ledare, och deras effektförluster beräknas utifrån de inducerade virvelströmmarna i det axiella tvärsnittet. Mekaniska friktionsförluster i lager och friktion på grund av den inneslutande luftens motstånd under rotation har försummats.

Effektförlusterna för de olika maskinerna är beräknade med sinusformade strömmar som källa, vilket hittills är den vanligast förekommande metoden. Därmed tas inte hänsyn till det högre frekvensinnehåll finns i (switchade) omriktarmatade maskiner i praktiken, och som orsakar något högre energiförluster, speciellt i stållaminaten. Upplösningen i vridmoment-varvtals-planet har sedan utökats genom linjär interpolation av FEM-simuleringsresultaten med hjälp av beräkningsverktyget Matlab.

8.1.2 För 3D geometri: transversalflödesmaskinen

För transversalflödesmaskinen sattes de geometriska parametrarna och ritades 3D-geometrin i ritprogrammet DesignModeler. Modellen kopplades till ANSYS Maxwell i programmet ANSYS Workbench. Därefter gjordes ett antal simuleringar med varierande strömstyrka och fasvinkel, vid olika varvtal. Utifrån dessa data valdes de strömstyrka-vinkel-kombinationer i moment-varvtalsplanet som resulterade i högst verkningsgrad.

8.1.3 För 3D geometri: axialflödesmaskinen

För axialflödesmaskinen ritades geometrin i tre dimensioner med hjälp ANSYS motordesign-verktyg RmXprt, i vilket en föreslagen design approximativt kan utvärderas på relativt kort tid. Den slutliga designen exporterades sedan till Maxwell. Simulering i en arbetspunkt ger tillräcklig information för att beräkna strömregleringen i hela maskinens arbetsområde i moment-varvtalsplanet eftersom magneterna är ytmonterade. Därefter simuleras ett diskret antal punkter jämnt fördelade i moment-varvtalsområdet, med sinusformad strömmatning, under två elektriska perioder. Effektförlusterna beräknas sedan på samma sätt som för 2D geometrin.

8.2 Elektromagnetiska materialdata

I detta avsnitt redovisas de elektromagnetiska data som använts för motormaterialen.

8.2.1 Lindning

I samtliga beräkningar har lindningsmaterialets elektriska ledningsförmåga vid 70°C satts till 49 890 042 S/m för koppar och 29 674 000 S/m för aluminium. Lindningens massdensitet har för koppar satts till 8940 kg/m^3 och för aluminium till 2700 kg/m^3.

8.2.2 Elektroplåt och järnpulver

Samtliga radialflödesmaskiner (RFM) är modellerade med magnetfälts- och förlustdata för Cogents NO30 elektroplåt i stator och rotorkärnan (Surahammars Bruk, 2015). Denna plåt är speciellt utvecklad för användning i elmaskiner med rotationshastigheter som är vanligt förekommande i elektriska fordon (Surahammars Bruk, 2014), främst med avseende på reducerade förluster och högre tröskel för magnetisk mättning. Tjockleken på laminaten är 0,3 mm, vilket är representativt vid jämförelse med publicerade data för elektrifierade fordon på marknaden (Nordelöf et al., 2017). Massdensiteten är 7600 kg/m^3 och magnetiseringskurva och förlustdata finns i Surahammars Bruk (2015). Även om både stator- och rotorkärnan i praktiken är uppbyggda av stållaminat som utgör cirka 95% av deras längd, medan resten utgörs av elektriskt isolerande material som lack och eventuella luftfickor så har detta försummats i FEM simuleringarna för samtliga maskintyper.

Axial- och transversalflödesmaskinerna använder istället pressat järnpulver, i detta fall Somaloy 1000 från Höganäs AB (Höganäs, 2020), som kan leda magnetfält likvärdigt i alla riktningar till skillnad från laminat. Massdensiteten är 7560 kg/m^3 och magnetiseringskurva och förlustdata finns i Lundmark (2015). En nackdel med järnpulvret är att den relativa permeabiliteten är avsevärt lägre än för elektriskt stål. Den låga permeabiliteten beror på att materialets korn isoleras individuellt med en tunn oorganisk ytbeläggning för att begränsa virvelströmsförluster. För att inte skada ytbeläggningen och bindningsmaterialet så värmebehandlas de pressade delarna med en relativt låg temperatur på cirka 500°C, vilket leder till relativt höga hysteresförluster (jämfört med laminaten som kan värmebehandlas vid högre temperaturer). Virvelströmförlusterna i järnpulverdelarna beror inte bara på storleken och formen på järnpartiklarna utan också på komponentens geometri eftersom isoleringen mellan partiklarna inte är helt perfekt.

Tillverkare publicerar vanligtvis energiförlustdata som funktion av magnetisk flödestäthet och dess variationsfrekvens, vilka är uppmätta i provbitar av järnmaterialen (laminatet såväl som det pressade järnpulvret) enligt en viss standard. Baserat på denna typ av data för laminatet och det pressade järnpulvret, approximerades energiförlustkoefficienter i Maxwell från respektive bidrag till totalförlusterna beroende på hysteres, virvelströmmar samt eventuella överskottsförluster. I FEM simuleringarna beräknas effektförlusterna i järnmaterialen ($P_{järn}$) per volymenhet utifrån dessa koefficienter enligt

$$P_{järn} = k_h f B^2 + k_v (f B)^2 + k_ö (f B)^{1.5} \qquad (8.1)$$

där f är frekvensen (Hz), B är den magnetiska flödestätheten och de använda energiförlustkoefficienterna k_h, k_v och $k_ö$ presenteras i tabell 8.1.

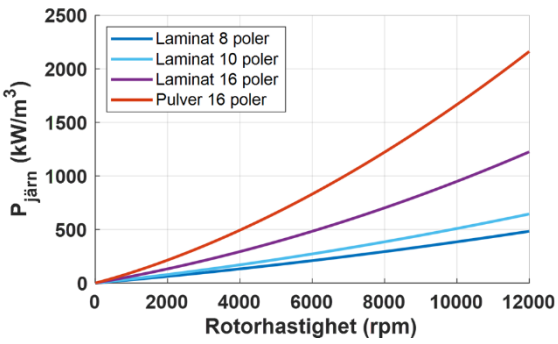
Tabell 8.1: Använda energiförlustkoefficienter för laminat (NO30) samt pressat järnpulver (Somaloy 1000).

	Laminat	**Järnpulver**
Hystereskoefficient, k_h (W/m^3)	443,1	620,2
Virvelströmskoefficient, k_v (W/m^3)	0,2016	0,2976
Överskottsförlustkoefficient, $k_ö$ (W/m^3)	0	6,381

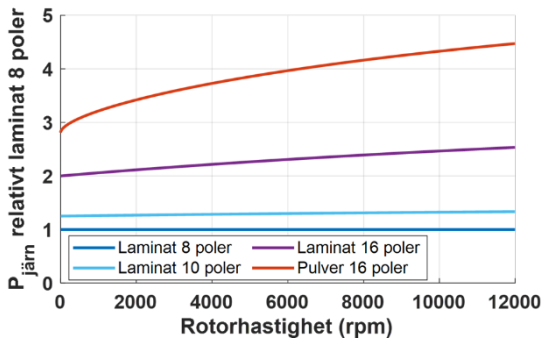
I figur 8.2 presenteras en jämförelse mellan det använda laminatet och det pressade järnpulvret gällande effektförluster per volymenhet som funktion av rotorhastighet vid olika antal poler, beräknade enligt ekvation 8.1. Ett högre poltal gör att magnetfältet varierar med högre frekvenser vilket leder till högre effektförluster (samt högre inducerad spänning). Även vid samma poltal kan det pressade järnpulvret ge 3–4 gånger högre förluster per volymenhet jämfört med laminatet. Dock kan materialegenskaperna på det tillverkade pressade järnpulvret variera beroende på styrbara faktorer så som bindnings- och isolermaterial, trycket vid pressningen samt temperaturen under värmebehandlingen. I detta arbete har endast en av alla dessa möjliga materialvarianter valts (Somaloy 1000).

Figur 8.2: Effektförluster per volym vid fix flödestäthet på 1T, för laminat (NO30) vid 8, 10 eller 16 poler, samt järnpulver (Somaloy 1000) vid 16 poler.

a) Absoluta värden.



b) Värden normaliserade med maskin med laminat och 8 poler.



8.2.3 Magneter

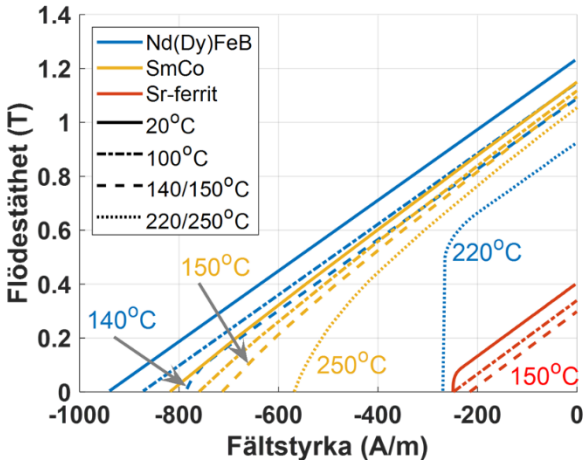
Magneten som betecknas som Nd(Dy)FeB, modelleras som Hitachis NMX-37F från deras NEOMAX-serie (Hitachi Metals, 2014b, a, 2015, Hitachi, 2014). Magneten innehåller cirka 4% dysprosium och klarar upp till 140ºC (Hitachi Metals, 2014a). Magneten väntas klara alla aktuella driftpunkter för de modellerade elektriska maskinerna, och de magnetiska egenskaperna är väl i linje med publicerade data för magneter använda i elektrifierade fordon (Burress et al., 2011).

SmCo-magneten modelleras med en 32 gradig Sm_2Co_{17} magnet från Arnold Magnetics RECOMA-serie (RECOMA 32) och klarar upp till 250˚C (Arnold Magnetics, 2014, 2016). Den svagaste magneten, av keramiskt ferritmaterial, modelleras som en strontium-ferritmagnet av graden HF 30/26 från MS-Schramberg och klarar upp till 250˚C (MS-Schramberg, 2016). Magneterna modelleras med de parameterdata för 70ºC som presenteras i tabell 8.2. Som jämförelse presenteras även de tre magnetmaterialens demagnetiseringslinjer vid temperaturerna 20˚C, 70˚C och 100˚C i figur 8.3.

Tabell 8.2: Materialparametrar för de modellerade magnetmaterialen vid 70˚C.

	Relativ permeabilitet [-]	**Koersivitet** H_c [kA / m]	**Elektrisk ledningsförmåga** [S / m]	**Massdensitet** [kg/m^3]	**Referens**
Nd(Dy)FeB	1,04	902	750 000	7500	Hitachi Metals (2014b)
SmCo	1,16	777	1 053 000	8300	Arnold Magnetics (2014)
Sr-ferrit	1,08	267	100	4850	MS-Schramberg (2016)

Figur 8.3: Magnetisk flödestäthet som funktion av fältstyrka för de tre magnetmaterialen.



8.3 Körscykelberäkningar

Ett fordons energiförbrukning beror i hög grad på dess storlek och massa, drivlinans typ och konfiguration samt på hastighet och accelerationer under körning. De senare påverkas av väglutning, vägtyp, trafiktäthet och av förarens körstil, men också av väderförhållanden såsom vind, temperatur, luftdensitet och nederbörd. Vanligtvis utvärderas energiförbrukningen hos ett fordon under väldefinierade klimatförhållanden och enligt en förbestämd referenshastighetssekvens, kallad *körcykel*.

Förutom de egna energiförlusterna påverkar de olika motorernas verkningsgrader också energiförlusterna i de omgivande komponenterna, trots att fordonet framförs på exakt samma sätt. Det betyder att även om studieobjektet här är den elektriska motorn i drivlinan, så behöver andra relevanta delar av drivlinan beaktas samt fordonets körbeteende definieras för att fordonsdynamiska beräkningar skall kunna utföras. Eftersom det är en jämförande studie mellan olika motoralternativ är endast den energiförbrukning som kan hänföras till respektive elmotor av intresse.

8.3.1 Fordonsdynamiska beräkningar

Under körning av ett fordon måste önskad hastighet, kraft, effekt och energi ledas från drivlinan till de drivande hjulen. Nivåerna på dessa modelleras typiskt med fordonsdynamiska ekvationer samt med Newtons andra lag. När syftet är att beräkna ett fordons energiförbrukning tar man vanligtvis endast hänsyn till krafter och rörelser i fordonets färdriktning, under antagandet om full stabilitet. Under dessa villkor kan den kraft beräknas som drivlinan måste tillföra de drivande hjulen (F_{hjul}) för att möta summan av fordonets luftmotstånd, rullmotstånd, accelerationskraft och väglutning enligt

$$F_{hjul} = F_{luftmot} + F_{rullmot} + F_{väglut} + F_{accel} \tag{8.2}$$

Hjulkraften kan ses som kontrollerad av föraren så att när kraften (och därmed även effekten) är positiv är gaspedalen nedtryckt och energi från fordonets energilager tillförs hjulen via drivlinan. När kraften vid hjulen istället är negativ är gaspedalen släppt och ofta också bromspedalen nedtryckt. Då kan fordonets rörelseenergi istället, föras tillbaka till energilagret via drivlinan.

Drivlinans effekt vid hjulen (P_{hjul}) är produkten av kraften och hastigheten, och energin vid hjulen (E_{hjul}) är tidsintegralen av effekten. Energin som konsumeras från fordonets energilager beräknas som energin som krävs vid hjulen dividerat med drivlinans verkningsgrad. Vid inbromsning är energin som kan tillföras energilagret istället produkten av hjulenergin och drivlinans verkningsgrad.

$$P_{hjul} = v \cdot F_{hjul} \tag{8.3}$$

$$E_{hjul} = \int P_{hjul}\,\mathrm{dt} \tag{8.4}$$

$$E_{drivlina,\ framdrift} = \frac{E_{hjul}}{\eta_{drivlina}} \tag{8.5}$$

$$E_{drivlina,\ inbromsning} = \eta_{drivlina} \cdot E_{hjul} \tag{8.6}$$

Krafter som beror på luftmotstånd, rullmotstånd, väglutning och acceleration modelleras typiskt enligt

$$F_{hjul} = {}^{1}/_{2} \cdot \rho_{luft} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + m \cdot a \tag{8.7}$$

med parametrar specificerade enligt tabell 8.3.

Tabell 8.3: Parameterförklaring för ekvation 8.7

ρ_{luft}	[kg/m^3]	luftens densitet (1,225 kg/m^3 vid standard atmosfäriska villkor, här satt till 1,2 kg/m^3)
C_d	[-]	luftmotståndskoefficient, beror på fordonets form
A	[m^2]	fordonets effektiva tvärsnittsarea
v	[m/s]	fordonshastighet (vindhastighet kan adderas för motvind och subtraheras för medvind)
C_r	[-]	rullmotståndskoefficient, beror på material, temperatur, struktur, tryck etc. för både däck och väglag
α	[rad]	vinkel på väglutning
m	[kg]	fordonets massa inklusive passagerare och bagage
g	[m/s^2]	jordens gravitationskonstant (här satt till 9,81 m/s^2)
a	[m/s^2]	fordonets acceleration (a=dv/dt)

Luftmotståndet beror på fordonets tvärsnittsarea och form samt kvadraten på hastigheten. Fordonets massa påverkar tre av krafterna, rullmotstånd, väglutning och acceleration. För personbilar är accelerationskraften typiskt den som når högst nivåer under körning.

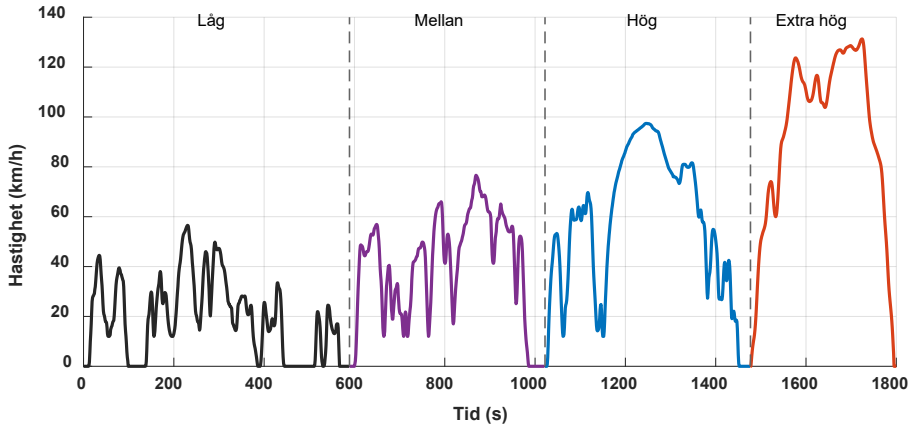
Energin som används för att motverka luftmotståndet och rullmotståndet kan inte återfås, medan energin som används för att köra uppför och för att öka hastigheten är möjliga att delvis återvinna vid körning i nedförsbacke och under inbromsning.

Vid jämförelse av olika drivlinor måste körvillkoren vara lika, både i praktiska experiment och i teoretiska studier. Därför används väldefinierade körcykler och specificerade klimatförhållanden vid utvärdering av fordons energiförbrukning. Körcykeln består av en förutbestämd hastighetsprofil, inklusive accelerationer, som funktion av tid. Information om väglutning kan inkluderas i körcykeln, men det är mindre vanligt. Den resulterande energiförbrukningen anges ofta som körcykelns medelenergiförbrukning per körd sträcka.

Historiskt har olika körcykler tagits fram för att studera hur fordonsemissioner beror på körning, för att senare användas vid reglering av emissioner i standardiserade former. Utveckling av körcykler baseras ofta på en serie hastighetsmätningar av fordon på väg, som bildar ett statistiskt underlag. De framtagna körcyklerna är tänkta att representera typisk körning i olika förhållanden såsom stadstrafik, landsvägskörning och motorvägskörning, vid olika trafiktäthet. Vissa körcykler inkluderar endast en typ av körning, medan andra kombinerar olika mönster (Grunditz och Thiringer, 2016a). Det finns ett stort antal uppmätta och offentliga körcykler för bussar och lastbilar, såväl som för personbilar.

För att utvärdera elmaskinernas energiförbrukning i det lätta fordonet används den så kallade Worldwide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) som är den nu gällande vid mätning av emissioner i samband med typgodkännande av fordon i Europa (Tutuianu et al., 2015, EU, 2018). Körcykeln är baserad på loggade hastighetsmätningar på fordon i trafik från Europa, Indien, Japan, Korea och USA och avser representera genomsnittlig körning i en global kontext (Giakoumis, 2017). Valda körcykelspecifika parametrar presenteras i tabell 8.4 och hastighetsprofilen visas i figur 8.4.

Figur 8.4: Hastighet som funktion av tid för WLTC, fordonsklass 3, inklusive dess delkomponenter Låg, Medel, Hög och Extra hög (UNECE, 2013, 2014).

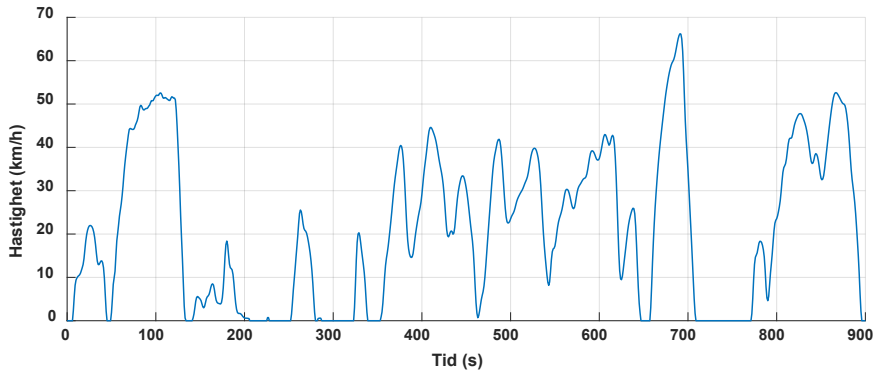


Tabell 8.4: Körcykelparametrar för WLTC, fordonsklass 3, inklusive delcykler.

Körcykelparametrar	**Låg**	**Mellan**	**Hög**	**Extrahög**	**WLTC class 3 total**
Varaktighet [s]	589	433	455	323	1 800
Körd sträcka [m]	3 095	4 756	7 162	8 254	23 266
Max hastighet [km/h]	57	77	97	131	131
Medelhastighet [km/h]	19	40	57	92	47
Medelhastighet ej stillastående [km/h]	25	44	61	94	53
Andel tid stillastående [%]	28	11	7	2	14
Max positiv acc. [m/s^2]	1.61	1.61	1.67	1.06	1.67
Max negativ acc. [m/s^2]	-1.50	-1.50	-1.50	-1.44	-1.50

Även för tunga fordon har en körcykel utvecklats ämnad att representera genomsnittlig körning i en global kontext, baserad på data främst från lastbilar men även bussar, framförda i Australien, Europa, Japan och USA; worldwide transient vehicle cycle (WTVC). Däremot används denna körcykel inte direkt vid lagstadgad mätning av utsläpp. Istället har den transformerats till en testcykel för motorer till tunga fordon. Detta eftersom laboratorietester på enskilda förbränningsmotorer är avsevärt mindre komplicerade än hela fordonstester för tunga fordon. Testcykeln är idag gällande inom EU vid uppmätning av utsläpp för utsläppsstandarden Euro VI för motorer till tunga fordon. Körcykelspecifika parametrar presenteras i tabell 8.5 och hastighetsprofilen visas i figur 8.5. Endast den del av körcykeln som representerar stadskörning, dvs. låga hastigheter, används i denna studie, då hastigheten överskrider den valda stadsbussens maxhastighet i resterande del av WTVC.

Figur 8.5: Hastighet som funktion av tid för WTVC Urban (DieselNet, 2020).



Tabell 8.5: Körcykelparametrar för WTVC Urban .

Körcykelparametrar	WHVC Urban
Varaktighet [s]	900
Körd sträcka [m]	5 321
Max hastighet [km/h]	66
Medelhastighet [km/h]	21
Medelhastighet ej stillastående [km/h]	27
Andel tid stillastående [%]	26
Max positiv acc. [m/s^2]	1.51
Max negativ acc. [m/s^2]	-1.67

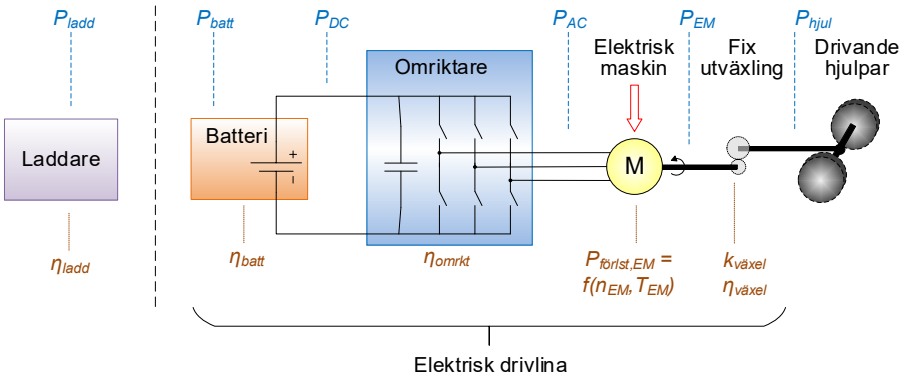
8.3.2 Drivlinan

För att beräkna energiförbrukningen av en elektrisk drivlina behöver effektförlusterna i samtliga ingående huvudkomponenter beaktas. Deras verkningsgrad är lastberoende, vilket innebär att verkningsgraden varierar beroende på fordonets hastighet och behov av kraft vid hjul. Trots det används här fixa värden för att representera medelverkningsgrad under körning för alla komponenter som representeras i figur 8.6, utom för den elektriska maskinen. Därmed reduceras komplexiteten i beräkningarna, samtidigt som information om övriga komponenters bidrag till energiförbrukningen ändå är inkluderad.

I praktiken kan man förvänta sig att de något varierade förlusterna i de studerade motorerna även skulle resultera i något olika arbetspunkter för de övriga komponenterna i drivlinan. Effekten av sådana förändringar är här antagna att vara relativt små och har därför försummats. Medelverkningsgraden för omriktare, växel och batteri har beräknats med hjälp av en drivsystemmodell presenterad i Grunditz och Thiringer (2016a) kombinerad med fordonsdata från Grunditz (2016) under respektive fordons körcykel. För samtliga fordon i denna rapport har medelverkningsgraden för omriktare och växel satts till 97% och för batteriet till 99%.

Batteriladdarens verkningsgrad (i fordon eller utanför) påverkar också ett laddbart fordons energiförbrukning när det kommer till den energi som måste tillföras från elnätet. Förluster i laddaren är normalt 5–10% (INL, 2015, ABB, 2016). Här har en verkningsgrad på 94% används för laddning enligt Grunditz och Thiringer (2016b).

Figur 8.6: Modellerad batteri-elektrisk drivlina kopplad till ett drivande hjulpar, samt batteriladdare, inklusive använda beteckningar för verkningsgrader och effekter.



8.3.3 Beräkningsprocedur

Körcykelberäkningen med respektive fordons körcykel har utförts ett tidssteg i taget, med körcykelns hastighet och beräknade acceleration[4] som indata, där varje tidssteg representerar en sekund. Kraften vid hjulen beräknas med ekvation 8.7 som använder körcykeldata enligt avsnitt 8.3.1 och fordonens parametrar enligt avsnitt 3.2. Effektnivåerna för drivlinans komponenter (P_{EM}, P_{AC}, P_{DC}, P_{batt} i figur 8.6) har beräknats med de fixa verkningsgraderna ($\eta_{växel}$, η_{omrkt}, and η_{batt} i samma figur) samt elmaskinens driftberoende förluster. Följande ekvationer har använts för att relatera motorns vridmoment (T_{EM}) och rotationshastighet (n_{EM}) till hjulets kraft (F_{hjul}) och hastighet (ω_{hjul}):

$$T_{EM} = \frac{r \cdot F_{hjul}}{\eta_{växel} \cdot k_{växel}} \tag{8.7}$$

$$n_{EM} = k_{växel} \cdot \frac{v}{r} \cdot \frac{60}{2\pi} = k_{växel} \cdot \omega_{hjul} \cdot \frac{60}{2\pi} \tag{8.8}$$

För enkelhets skull användes samma verkningsgrader vid både framdrivning och inbromsning. Förlusterna i varje komponent beräknas som skillnaden mellan ingående och utgående effekt. Genom att summera effektförlusterna över tid fås energiförlusterna under körcykeln. Den totala energin som tas ut från batteriet beräknas som summan av den energi

[4] Accelerationen har beräknats med den så kallade centrala differensmetoden baserat på slutsatser i Grunditz och Thiringer (2016a).

som krävs för att övervinna luftmotstånd, rullmotstånd och förluster i drivlinans samtliga komponenter; växel, elmotor, omriktare och batteri. Under inbromsning, då hjulkraften är negativ, förs fordonets rörelseenergi genom drivlinan tillbaka till batteriet. Batteriets, och därmed fordonets, nettoenergianvändning beräknas som skillnaden mellan framdrivningsenergin och bromsenergin enligt

$$E_{batt,netto} = E_{batt,\,framdrivning} - E_{batt,inbromsning} \tag{8.9}$$

För att få fram den energiförbrukning som orsakas av elmaskinen, och för att kunna jämföra den mellan de olika maskinerna, har batteriets nettoenergianvändning beräknats först med motorförluster och motorvikt inkluderade, $E_{batt,netto,med\ EM}$, och sedan med motorförluster och motorns vikt satta till noll, $E_{batt,netto,ingen\ EM}$. Skillnaden mellan dessa definieras som den energianvändning som kan hänföras till elmaskinen och beräknas enligt

$$E_{batt,netto,pga\ EM} = E_{batt,\,netto,\,med\ EM} - E_{batt,\,netto,\,ingen\ EM} \tag{8.10}$$

Slutligen har energin som laddas till batteriet från elnätet beräknats genom att dividera med laddarens fixa verkningsgrad enligt

$$E_{elnät,pga\ EM} = \frac{E_{batt,netto,pga\ EM}}{\eta_{ladd}} \tag{8.11}$$

Därmed kan denna energiförbrukning, $E_{elnät,pga\ EM}$ betraktas som just den energiförbrukning av drivlinan och laddaren som orsakas av en specifik elektrisk motormodell. En mer detaljerad beskrivning av beräkningsalgoritmen finns i Appendix 1.

9. Studerade motoralternativ

Baserat på de studier som redovisas i nulägesanalysen i denna rapport (del 2) togs beslut om vilka motoralternativ som skulle undersökas närmare i projektet. Detta gjordes i två steg – ett första urval gjordes tidigt som underlag till den första LCA-studie som genomfördes (se avsnitt 12.1) och ett andra urval gjordes en bit in i projektet med ett betydligt större antal motorer avsedda för ett lätt respektive ett tungt fordon.

Det andra urvalet gjordes baserat på livscykeltänkande utifrån de observationer som gjordes och slutsatser som drogs i LCA-studie 1, men även baserat på den kunskap om End-of-Life-systemet som projektets kartläggningar gjort tillgänglig. Motoralternativen representerar därför ett urval av möjliga tekniska lösningar som bedömdes kunna minska miljöpåverkan och resursanvändningen. Målet var att utvärdera hur väl de olika teknikvalen fungerar för fordonsframdrift i termer av prestanda och energiförbrukning, samt avseende miljöpåverkan och resursanvändning i ett par utvalda fall.

Följande faktorer bedömdes extra viktiga att studera, och utgör motivering till det urval som presenteras i tabell 9.1 (följande sida):

- Variera magnetstyrkan genom att testa olika magnetstyper eftersom detta kan reducera miljöpåverkan och resursanvändning orsakad av brytning av magnetmaterial
- Lindning med aluminium eftersom det är mindre problematiskt än koppar vid oavsiktlig materialblandning vid materialåtervinning av stål och eftersom aluminium är ett mindre knappt material än koppar
- Lindning med hårnål kan ge bättre förutsättningar för att separera lindningen från statorkärnan vid demontering för att erhålla renare koppar inför materialåtervinning
- Koncentrerad lindning eftersom det kan reducera mängden aktivt material
- Axial- och transversalflödesmaskiner använder järnpulver som lätt kan slås sönder vilket kan ge en enklare separering av stål och koppar inför materialåtervinning
- Transversalflödesmaskinen (som också har koncentrerad ring-lindning) kan ha en så kallad klopol-rotor där magneterna monteras utan lim mellan två delar av järnpulvermaterial, vilket kan underlätta materialåtervinning av järn och magneter.

Tabell 9.1: Översikt över modellerade motortyper och deras applikation. x = modellerade.

Flödestyp	Statorn: Lindningstyp – material	Spår/ poler	Rotorn: Magnetplacering – material	Personbil	Buss	LCA-studie 1	LCA-studie 2
Radialflöde (RFM)	Distribuerad trådlindning – koppar	48/8	Instuckna – Nd(Dy)FeB	x	x	x	x
		48/8	Instuckna – SmCo	x	-	x	-
		48/8	Instuckna – Sr-ferrit	x	-	x	-
	Distribuerad trådlindning – aluminium	48/8	Instuckna – Nd(Dy)FeB	x	x	-	x
	Distribuerad hårnålslindning – koppar	48/8	Instuckna – Nd(Dy)FeB	x	-	-	x
	Koncentrerad trådlindning – koppar	24/16	Ytmonterade – Nd(Dy)FeB -	x	-	-	-
	Koncentrerad trådlindning – koppar	15/10	Instuckna – Nd(Dy)FeB -	-	x	-	-
Axialflöde (AFM)	Koncentrerad trådlindning – koppar	24/16	Ytmonterade – Nd(Dy)FeB	x	-	-	-
Transversalflöde (TFM)	Ringformad trådlindning – koppar	20/20	Inmonterade – Nd(Dy)FeB	x	-	-	-

10. Design- och körcykelberäkningar

Detta kapitel beskriver de modellerade elektriska maskinernas uppbyggnad samt redovisar beräknade verkningsgradskartor och resultat från körcykelberäkningar. Av utrymmesskäl används förkortningar i motorbeteckningarna i vissa tabeller och figurer, vilka förklaras i tabell 10.1.

Tabell 10.1: Använda förkortningar av elmaskinbeteckningar.

Förkortad beteckning	Fullständig beteckning	Förkortad beteckning	Fullständig beteckning
Al	aluminium	instkn	instuckna (magneter)
Cu	koppar	konc	koncentrerad (lindning)
distr	distribuerad (lindning)	ring	ringformad (lindning)
hårnålslindn	hårnålslindning	trådlindn	trådlindning
infälld	infällda (magneter)	ytmont	ytmonterade (magneter)
inmont	inmonterade (magneter)		

10.1 Geometri och massa - personbilsmotorer

Samtliga elektromagnetiska modeller för personbilens motorer är presenterade i figur 10.1. För radialflödesmaskinerna är magneterna röda, rotorjärnet ljusgrått, statorjärnet mörkgrått och lindningarnas tre faser är gula, gröna och blå. I axialflödesmaskinen är magneterna ljusgröna, lindningarnas tre faser röda, gröna och blå medan rotor- och statorjärn är gråa. I transversalflödesmaskinen är magneterna rosa, ringlindningen gul och rotor- och statorjärn gråa.

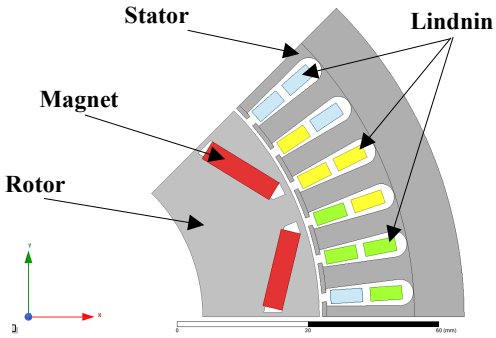
Information rörande elektriska, mekaniska och geometriska data för de olika maskinerna presenteras i tabell 10.2, tillsammans med vikter för motorns delar.

Figur 10.1: Modellerad geometri för de elektriska maskinerna för personbilen. För axialflödesmaskinen visas två rotor-stator pol-segment där statorsegmenten delar järnkärna så att deras rygg kan undvikas. Detsamma görs för den ena av dessa rotordelars ryggar i de slutliga beräkningarna. För transversalflödesmaskinen visas ett pol-segment för en fas av en av maskinerna.

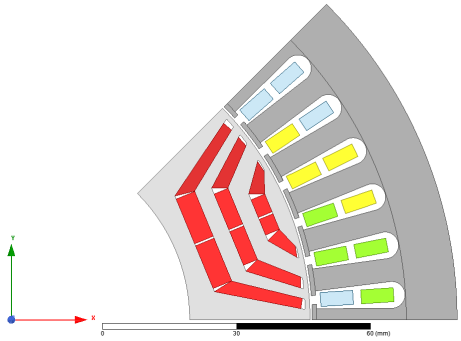
RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**

RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo

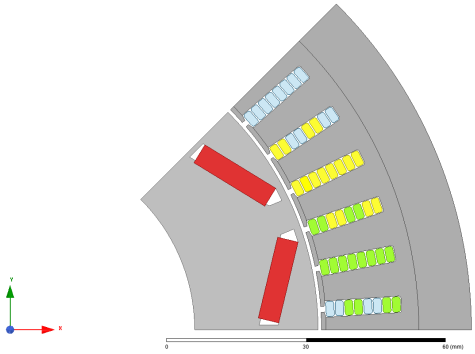
RFM - distr trådlindn Al - instkn. Nd(Dy)FeB



RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit

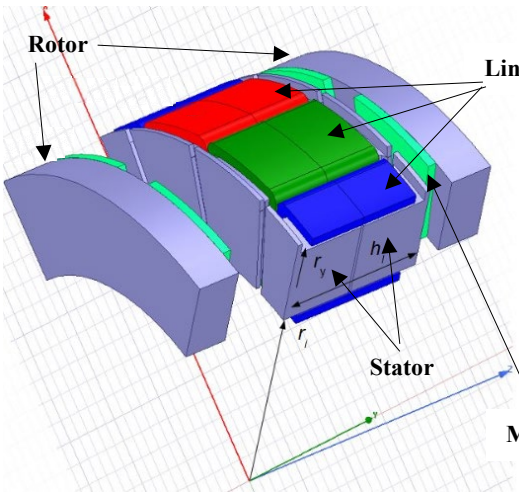


RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB

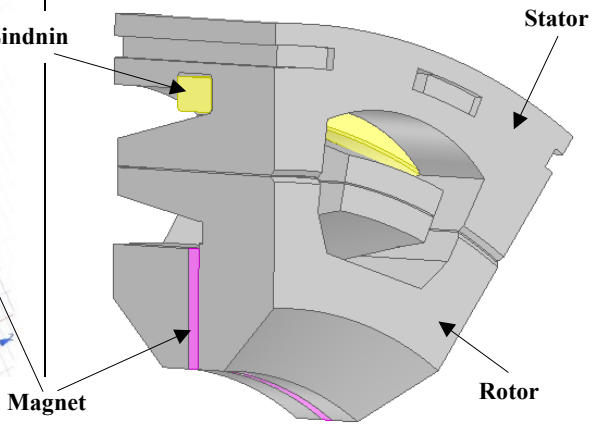


RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB

AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB



TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB



Tabell 10.2–1: Elektriska, mekaniska och geometriska data för personbilsmaskinerna, samt vikter för motorernas delar (tabellen fortsätter på nästa sida, som del 2)

Motoralternativ	RFM – distr trådlindn. Cu – instkn. Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo	RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit	RFM - distr trådlindn Al - instkn. Nd(Dy)FeB	RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB	RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB	
Generellt data									**Enhet**
Max. vridmoment	239	239	239	239	239	239	239	241	Nm
Max. effekt (430 V_{dc} 4000 rpm)	100	97	95	100	100	100	100	101	kW
Max. verkningsgrad	97,2%	97,2%	97,1%	96,5%	97,3%	98,1%	97,3%	95,2%	-
Längd på kärnan	127	133	136	127	100	127	105	403	Mm
Max. dc spänning	430	430	430	430	460	456	414	430	V
Max. fasström (rms)	260	260	260	260	256	223	277	300	A
Strömtäthet i spår (rms)	20	20	20	20	22	19,1	20	20	A /mm^2
Antal poler	8	8	8	8	8	16	16	20	-
Luftgapslängd	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5	0,3	mm
Parallella ledare per fas	4	4	4	4	2	2		1	
Statorgeometri									**Enhet**
Ytterdiameter	200	200	200	200	200	200	200	222	mm
Innerdiameter	135	135	135	135	135	150	146	176,6	mm
Antal spår	48	48	48	48	48	24	24	-	-
Spår fyllfaktor	0,45	0,45	0,45	0,45	0,69	0,55	0,7	0,7	-
Tandbredd	5	5	5	5	-	10,7	-	-	mm
Spårvidd	-	-	-	-	3,52		10	-	mm
Spårdjup	17	17	17	17	16,5	18	9,6	-	mm
Spåröppning	2	2	2	2	1,2	3	-	-	mm
Spårarea	101	101	101	101	67,5	192	-	-	mm^2
Spåromkrets	48	48	48	48	38	53	-	-	mm
Varv per lindning	7	7	7	7	1	9	-	7	-
Ändlindning axiell utsträckning	25	25	25	25	20	9	9	0	mm

Tabell 10.2–2: Elektriska, mekaniska och geometriska data för personbilsmaskinerna, samt vikter för motorernas delar (tabellen fortsätter från föregående sida, del 1).

Motoralternativ	RFM – distr trådlindn. Cu – instkn. Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo	RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit	RFM - distr trådlindn Al - instkn. Nd(Dy)FeB	RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB	RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB	
Rotorgeometri									**Enhet**
Ytterdiameter	133,5	133,5	133,5	133,5	133,5	149	200	176	mm
Innerdiameter, aktiv kärna	80	80	80	80	80	80	146	104	mm
Magnetlängd	127	133	136	127	100	127	-	-	mm
Magnetbredd	18	18	-	18	18	25	-	-	mm
Magnet-tjocklek	4,6	4,6	-	4,6	4,6	2,7	2,7	-	mm
Volym, per magnet	10,4	10,9	-	10,4	8,2	7,7	12,1	26,1	cm^3
Total magnetvolym	168	174	407	168	131	124	194	235	cm^3
Vikt									**Enhet**
Statorkärna	11,8	12,4	12,7	11,8	10,9	8,8	3,6	27,4	kg
Rotorkärna	8,5	8,8	7,4	8,5	6,9	11,8	2,5	24,5	kg
Magneter	1,26	1,45	1,98	1,26	0,99	0,93	1,44	1,76	kg
Lindning	4,8	5,0	5,0	1,5	4,4	3,9	2,6	2,0	kg
Aktiv	*2,5*	*2,6*	*2,7*	*0,7*	*2,0*	*2,9*	*1,6*	*1,9*	*kg*
Passiv (inkl. fasledare)	*2,3*	*2,4*	*2,4*	*0,7*	*2,4*	*1,1*	*1,0*	*0,1*	*kg*
Totalvikt	44,9	46,1	45,6	41,3	40,8	43,6	28,1	66,6	kg

10.2 Beskrivning personbilsmotorer

Här beskrivs och motiveras personbilsmotorernas konstruktion samt kommenteras de erhållna verkningsgradskartorna som presenteras i avsnitt 10.3, figur 10.5.

*10.2.1 RFM, PMSM, distribuerad Cu-trådlindning, instuckna Nd(Dy)FeB-magneter - **referensmotor***

Den så kallade referensmotorn i denna studie togs ursprungligen fram i ett tidigare arbete (Nordelöf et al., 2018, Nordelöf et al., 2019a) där befintliga motortyper på marknaden undersöktes. Designen baseras på de då högst ansedda framdriftsmotorerna med ursprung i

Japan, till fordon såsom Toyota Prius och Camry, Lexus (samtliga hybrider) och Nissan Leaf (elbil). I en publicerad benchmarkingstudie av ramdriftsmotorerna framgår vissa gemensamma drag hos dessa föregångsmodeller på marknaden (Burress och Campbell, 2013). Samtliga motorer var av PMSM typ, med 48 spår och 8 poler, med distribuerad trådlindning av koppar och vanligen v-ställda magneter vilka ger både hög verkningsgrad och effekttäthet. Dessa konstruktionsval har varit kvar också i uppdaterade versioner av maskinerna, även om Toyota numera övergått till hårnålslindning (Shao et al., 2020).

Specifikt är referensmotorns tvärsnittsgeometri för stator- och rotorlaminat baserade på laminaten för 2004 års Toyota Prius (ANSYS, 2011), med några mindre justeringar såsom en tunnare statorrygg vilket kan göras på grund av ett dubbelt så högt maxvarvtal, samt en något ändrad vinkel mellan magneterna för att minska vridmomentpulsationer. Vidare har lindningen fyra parallella grenar per fas, och två-lager i spåret med viss skiftning mellan spår för att få en mer sinusformad magnetvåg från statorn. Spårets fyllfaktor sattes till 0,45, vilket antogs rimligt för en trådad distribuerad lindning.

Statorns ytterdiameter valdes till 200 mm vilket var samma som för dåvarande Nissan Leaf och Lexus LS 600h (Ozpineci, 2014). Längden på statorstacken, samt antal lindade varv per härva bestämdes med hjälp av iterativa elektromagnetiska beräkningar vid basvarvtal och maximal strömtäthet, dels så att det producerade vridmomentet blev 239 Nm, och dels så att den inducerade spänningen blev cirka 430 V vid det önskade basvarvtalet 4000 rpm. Därur följde fasströmmens effektivvärde.

Den specifika Nd(Dy)FeB -magnettillverkaren Hitachi valdes med tanke på att andelen dysprosium var publicerad, vilket var ovanligt. För ändamålet valdes en magnet med relativt lågt halt dysprosium, för att spegla publicerade data från bland annat Nissan om reducerad mängd dysprosium i deras nyare motorer (Shimizu et al., 2013)

Som framgår av figur 10.5 överstiger verkningsgraden 97% i ett ovalt område kring cirka 4300 – 6300 rpm och cirka 50–100 Nm och når som mest 97,2%.

10.2.2 RFM, PMSM, distribuerad Cu-trådlindning, instuckna SmCo-magneter

Motorn med SmCo-magneter har exakt samma geometri i tvärsnittet och samma lindningskonfiguration som referensmotorn med Nd(Dy)FeB magneter. Skillnaden är att SmCo-magneten har en lägre energiprodukt, så motorns aktiva längd, det vill säga rotor- och statorlaminatstacken med statorlindning är förlängda så att motorn kan leverera samma startvridmoment. För detta krävdes att motorn förlängdes med 6 mm till 133 mm. Eftersom maximal dc-spänning var satt till samma som för referens-motorn (430 V), så blev basvarvtalet något lägre med de svagare magneterna, samtidigt som effekten vid basvarvtalet blev något lägre.

Verkningsgraden för motorn med SmCo-magneten är mycket lik den för referensmotorn och det högsta värdet är nästan lika högt, 97,2 % (se figur 10.5). På de höga varven, vid så kallad fältförsvagning, är verkningsgraden högre än för referensmotorn, eftersom de svagare magneterna kräver en lägre ström från statorn för att motverkas. Energiförlusterna i både laminaten och lindningen är lägre än hos referensmotorn i detta område.

10.2.3 RFM, PMaSynRM, distribuerad Cu-trådlindning, instuckna Sr-ferritmagneter

Då ferritmagneterna har avsevärt lägre energiprodukt blev inte vridmomentet tillräckligt högt då samma tvärsnittsgeometri som i referensmotorn användes. Istället baserades rotorgeometrin för denna motor på ett förslag presenterat i (Ibrahim et al., 2016) för en permanentmagnet-assisterad synkronreluktansmaskin, fast med två modifikationer. Den första var att rotorn anpassades till åtta poler istället för de ursprungliga fyra, för att vara jämförbar med referensmotorn. Den andra modifikationen var att hela luft-spåren i rotorn fylldes med magnetmaterial i stället för med endast en magnet i centrum per spår som i det ursprungliga förslaget. Detta för att komma närmare det önskade vridmomentet. Detaljer om rotordesignen är publicerad i konferensartikeln Grunditz et al. (2018). För att kunna producera 239 Nm förlängdes denna motor i axiellt led relativt referensmotorn, på samma sätt som för SmCo-motorn, med 9 mm, till 136 mm. Även om Sr-ferritmotorn är längre än SmCo-motorn, så har den lägre vikt eftersom en större mängd järnmaterial är ersatt med magnetmaterial som har lägre densitet.

En följd av den svagare magneten är att vridmomentet på högre hastighet ej kan hållas lika högt med samma ström som för maskinerna med de starkare magneterna.

Beträffande verkningsgrad (figur 10.5) syns liknande trend för motorn med Sr-ferritmagneter som för motorn med SmCo-magneter, fast ännu mer utpräglat eftersom Sr-ferritmagneterna är så mycket svagare. Både energiförlusterna i laminaten och i lindningen är alltså lägre än i referensmaskinen i fältförsvagningsområdet. Detta ger en klart högre verkningsgrad vid höga varvtal. Samtidigt kräver den svagare magneten en något högre ström på de låga varven för samma vridmoment, vilket ger lägre verkningsgrad än hos referensmaskinen i detta område. Dess högsta värde är 97,1% och jämfört med referensmotorn ligger området med över 97% verkningsgrad på något lägre vridmoment (cirka 30–70 Nm) och högre varvtal (cirka 6000–9000 rpm).

10.2.4 RFM, PMSM, distribuerad Al-trådlindning, instuckna Nd(Dy)FeB-magneter

Denna motor har exakt samma geometri som referensmotorn, med den enda skillnaden att lindningsmaterialet är av aluminium istället för koppar.

Som väntat är verkningsgraden för motorn med aluminiumlindning lägre än för referensmotorn, eftersom den elektriska ledningsförmågan för aluminium är cirka 40% lägre än för koppar (se figur 10.5). Detta syns över hela motorn arbetsområde. Motorn når en verkningsgrad över 96% i ungefär samma område som referensmotorn når över 97%. Den högsta verkningsgraden är 96,5%.

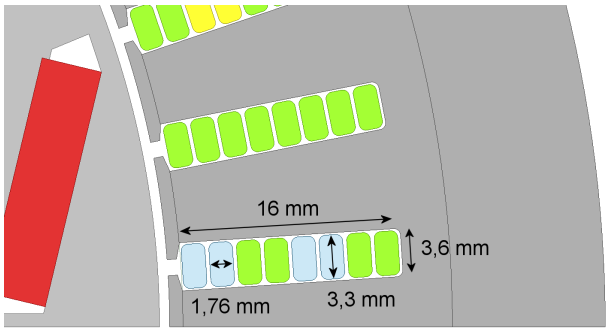
10.2.5 RFM, PMSM, distribuerad Cu-hårnålslindning, instuckna Nd(Dy)FeB- magneter

Motorn med hårnålslindning har samma rotorkonstruktion som referensmotorn, för att vara så jämförbar som möjligt. Statorn har samma yttre och inre diametrar och samma antal spår. Spårisoleringen är liknande den i en trådlindad maskin. Spåren är dock mer rektangulära för att passa med hårnålslindningarna. Eftersom det är vanligast att använda 4 pins per spår, utvärderades initialt en sådan variant. Men denna lindning skulle med givna motordimensioner och rotorvarvtal kräva alldeles för hög maximal fasström (och lägre

maxspänning). Det skulle alltså inte fungera att ha exakt samma omriktare som för de andra motorerna, trots samma effektnivå.

För att geometrin inte skulle behöva ändras så mycket användes istället 8 pins per spår, som presenteras närmare i figur 10.2. Därmed kan max-strömmen vara lägre, men maxspänningen högre jämfört med 4 pins, och gränserna kan alltså vara närmare de för referensmotorn. Idealt skulle antalet lindningsvarv vara samma som för referensmotorn (7 varv) med det är inte praktiskt möjligt. För att få rätt spännings- och effektnivå kortades istället längden på motorn till 100 mm från referensmotorns 127 mm.

Figur 10.2: Mått för spår och pins i hårnålsmotorn.



För hårnålsmotorn har vi tagit hänsyn till växelströmseffekten i spåren (men inte i ändlindningarna), till skillnad från maskinerna med trådlindning, där denna effekt har lägre inverkan. Längden på ändlindningen är något kortare jämfört med referensmotorn. En fördel med 8 pins jämfört med 4 (samt den kortare motorn) är att lindningsresistansen och därmed effektförlusterna blir lägre.

Som framgår av figur 10.5 är verkningsgraden för motorn med hårnålslindning är mycket lik den för referensmotorn, även om området över 97% ligger vid något lägre vridmoment (cirka 40–80 Nm). Den högsta verkningsgraden som nås är 97,3%.

10.2.6 RFM, PMSM, koncentrerad Cu-trådlindning, ytmonterade Nd(Dy)FeB -magneter

Denna maskin har koncentrerade lindningar av koppar i 24 spår med 16 poler, jämfört med referensmaskinens 48 spår och 8 poler. Kärnan består av samma elektrostållaminat som i de övriga laminerade maskinerna. Däremot är de neodymbaserade magneterna ytmonterade på rotorn med lim, vilket gör att maskinen förlustmässigt kan jämföras med axialflödesmaskinen som också har 16 poler och ytmonterade magneter. På grund av magneternas placering nära luftgapet kommer magnetiska spårövervågor att inducera virvelströmmar i magneterna under drift, vilket skapar energiförluster som gör magneterna varma. Eftersom det är svårt att kyla rotorn effektivt bör dessa strömmar minimeras. Det antas därför att magneterna består av 18 mindre delar (i axiellt led) som är elektriskt isolerade från varandra. Vidare antas härvändorna vara avsevärt kortare än för referensmotorn.

Motorn med koncentrerad lindning når en högre verkningsgrad än referensmotorn, med ett maximalt värde på 98,1% (se figur 10.5). Dessutom är området med över 97% i verknings-grad avsevärt större i utbredning än för referensmotorn och alla andra maskiner i jämförelsen. För att nå dit krävs ett vridmoment på minst 50 Nm på låga varv och cirka 70 Nm på de höga.

10.2.7 AFM, PMSM, koncentrerad Cu-trådlindning, ytmonterade Nd(Dy)FeB-magneter

Inom projektet togs en jämförbar axialflödesmaskin-design fram. Det arbetet beskrivs detaljerat i rapporten Alatalo (2018) och sammanfattas nedan.

En stator- och en rotorskiva arbetar i par och är separerade av ett luftgap. En rotorskiva består av järnmaterial på vilken tunna platta magneter är monterade på ena sidan. Järnmaterialet leder magnetflödet under magneten. Statorskivans järnkärna bär upp lindningarna som lindas kring kärnans tänder med koncentrerad lindning. Eftersom lindningarna är riktade så att de skapar ett magnetfält i axiellt led är även tänderna utsträckta axiellt från en gemensam statorrygg. För att öka utnyttjandegraden av lindningen till att producera vridmoment, designas tändernas ytor mot luftgapet extra stora (de överlappar lindningen) så att läckaget av magnetfält minskas.

Ett segment bestående av en stator- och en rotorskiva levererar endast en fjärdedel av det nödvändiga vridmomentet vid liknande specifikationer som för referensmotorn, det vill säga ytterdiameter och strömtäthet. Därför har fyra segment staplats axiellt och dessa antas alltså utgöra den slutliga axialflödesmotorn. Dessutom ökar den mekaniska stabiliteten när man använder flera rotordelar.

En fördel med denna lösning är att statorskivorna kan slås ihop i par, rygg mot rygg, vilket gör att båda deras statorryggar kan uteslutas ur konstruktionen. Två statorskivor i taget kan nu dela på magnetfältsbanan. Samma sak kan göras med två av rotorskivorna. Detta gör motorn både lättare och kortare. Någon specifik uppfästning av statorn, eller kylteknik, har inte utarbetats annat än i ett förslag presenterat i figur 10.3.

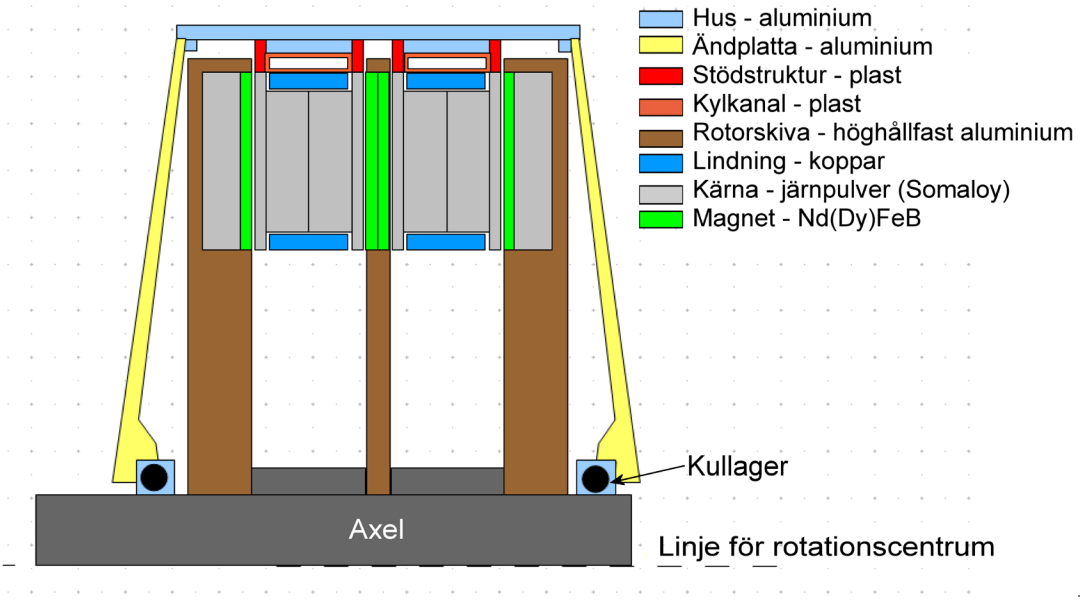
Den slutliga designens järnkärna har en ytterdiameter likt referensmaskinens på 200 mm, men på grund av lindningarna blir den totala aktiva diametern något lite större, 210 mm. Det skulle gå att använda laminat för denna motor men blir avancerat eftersom pol-bredden varierar med radien, vilket gör det komplicerat att tillverka ett laminat. Istället används delar av pressat järnpulver.

För denna maskin antas att de ytmonterade magneterna delas i 18 delar, varpå deras energiförluster antas minska med faktorn 10 (Lundmark och P. Roshanfekr Fard, 2017).

För axialflödesmaskinen är området med över 97% i verkningsgrad något större än för referensmotorn (med ett maxvärde på 97,3%), och ligger i ungefär samma varvtalsintervall, men kräver något högre vridmoment (cirka 80–180 Nm), se figur 10.5. Framförallt är verkningsgraden på de högre varvtalen lägre för axialflödesmaskinen än för referensmaskinen.

Även om man skulle byta till samma elektrostållaminat som i referensmotorn skulle energiförlusterna i arbetspunkten 4000 rpm och 50 Nm endast minska med 100 W. Det skulle inte vara tillräckligt för att få lägre förluster än i referensmaskinen. För att få det skulle maskinen istället behöva konstrueras om med lägre flödestäthet i framförallt statorn. En mer konkurrenskraftig maskin skulle sannolikt väga mer och ha bättre och dyrare material i statorn.

Figur 10.3: Principskiss över ett axiellt tvärsnitt i en av axialflödesmaskinen, med de 4 segmenten av rotor-stator-par.



10.2.8 TFM, PMSM, ringformad Cu-trådlindning, inmonterade Nd(Dy)FeB-magneter

Också en transversalflödesmaskin (TFM) designades för att kunna jämföras med referensmotorn. Dess magnetfält leds i en tre-dimensionell bana i en konstruktion bestående av pressat järnpulver. I statorn finns en ringformad en-fas ledare av koppar och i rotorn finns ringformade neodymbaserade magneter. För tre faser behöver alltså tre set av stator och rotor segment kopplas på samma axel. En fördel med att faserna är separerade är att det minskar risken för fel-fall. Ett stator-rotor segment för en fas visas i figur 10.4.

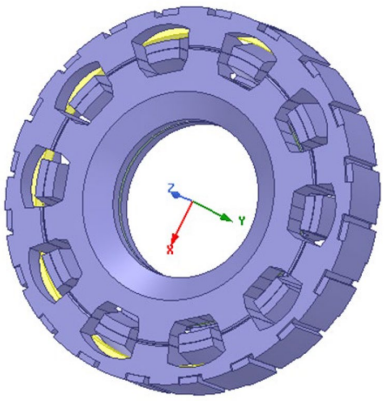
Det visade sig dock svårt att uppnå önskad prestanda med de specificerade dimensionerna för referensmotorn. Det var till exempel omöjligt att nå de högre vridmomenten utan att överstiga referensmotorns maximala fasström och strömtäthet. Maskintypen är nämligen som mest fördelaktig vid lägre hastigheter, och vid ett förhållandevis högt diameter/längd-förhållande. Dessutom visade det sig att precis som för axialflödesmaskinen räckte det inte med en enda tre-fas-motor på axeln för att uppnå önskat vridmoment, utan tre stycken var nödvändiga. Nackdelen är att hela motorn då blir relativt tung och järnförlusterna betydande.

I detta läge ställdes verkningsgrad och motorvikt mot mekanisk prestanda. Ett alternativ som undersöktes var att använda två tre-fas-motordelar på axeln i stället för tre, och att låta båda motordelarna matas med maxströmmen. På detta sätt kunde järnförlusterna reduceras till två tredjedelar, vilket gav både en högre verkningsgrad och lägre total motorvikt. Nackdelen var istället att motorn levererade ett betydligt lägre maximalt vridmoment jämfört med referensmotorn (160 Nm), vilket betyder att fordonet inte skulle kunna leverera en lika hög maximal acceleration eller ge en lika kort accelerationstid för 0–100 km/h. Detta alternativ avskrevs på grund av att det inte klarade att leverera jämförbar mekanisk prestanda.

Istället valdes lösningen med tre stycken tre-fas motordelar för TFM. För att ändå maximera motorns yttre statordiameter för högsta prestanda, antogs att motorhuset kunde integreras med statorkärnan.

I figur 10.5 syns att med denna lösning får man den högsta verkningsgraden för arbetspunkter med låga varvtal (2000–4500 rpm) men relativt höga vridmoment (120–200 Nm), med ett maxvärde på 95,2%. Jämfört med referensmaskinen och de övriga maskinerna är verkningsgraden klart lägre på de låga vridmomenten.

Figur 10.4: Ett helt stator-rotor segment för en fas av en motordel till transversalflödesmaskinen (TFM). I den fullständiga TFM används 3x3 sådana delar för att bygga tre stycken tre-fas-motorer på samma axel.

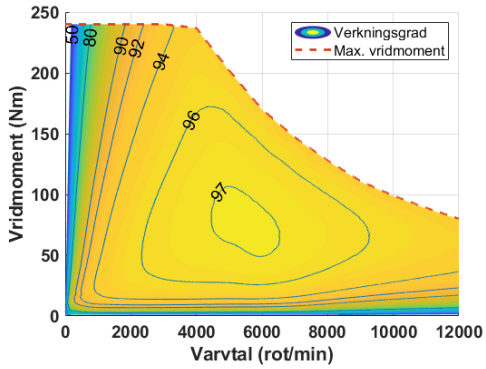


10.3 Verkningsgrad personbilsmotorer

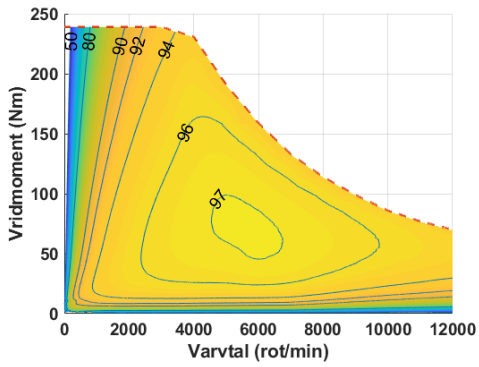
Personbilsmotorernas verkningsgrad som funktion av rotationshastighet och vridmoment presenteras i figur 10.5.

Figur 10.5–1: Verkningsgrad som funktion av varvtal och vridmoment för personbilsmaskinerna (figuren fortsätter på nästa sida, del 2).

RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB

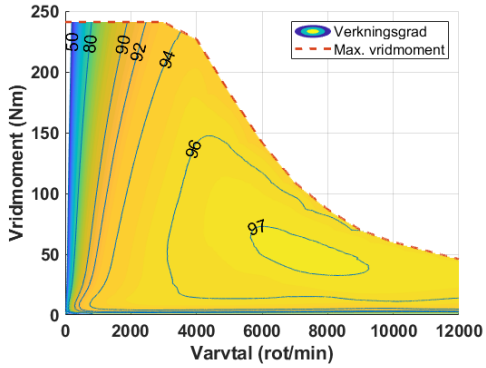


RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo

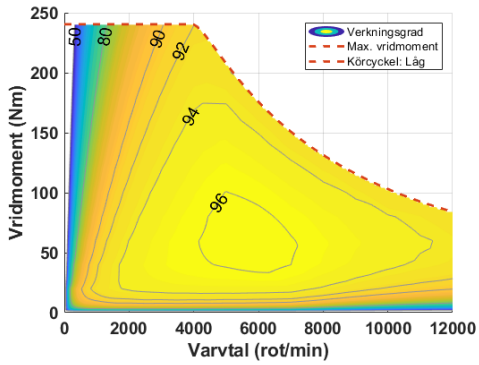


Figur 10.5–2: Verkningsgrad som funktion av varvtal och vridmoment för personbilsmaskinerna (figuren fortsätter från föregående sida, del 1).

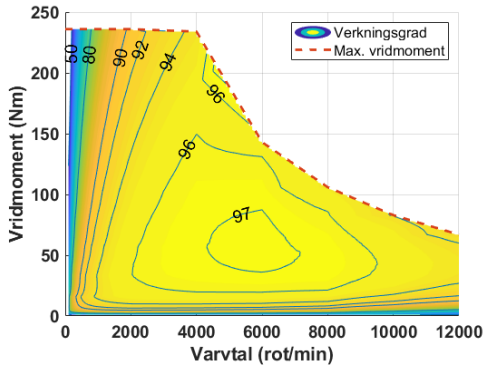
RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit



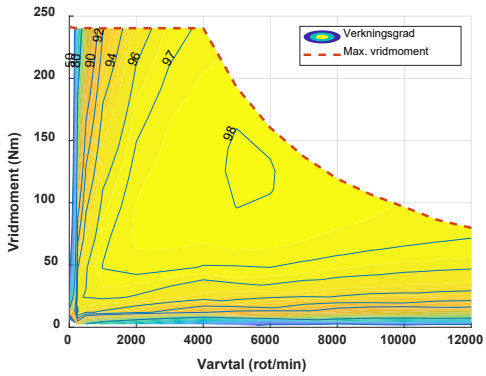
RFM - distr trådlindn Al - instkn Nd(Dy)FeB



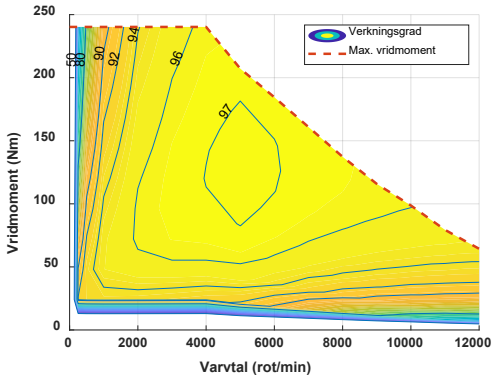
RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB



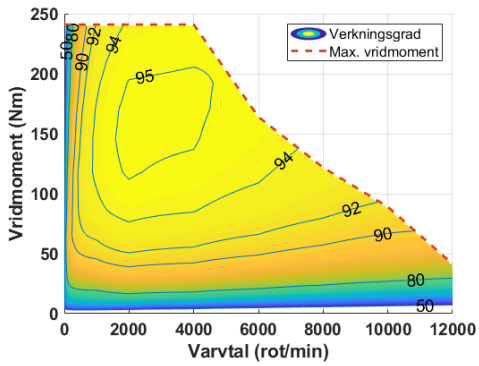
RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB



AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB



TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB



10.4 Beräknad energiförbrukning under körcykel - personbilsmotorer

Energiförbrukningen under användarfasen har beräknats enligt avsnitt 8.3, med körcykeln WLTC för personbilen med de olika motorerna. I figur 10.6 visas både motorernas verkningsgrad som funktion av varvtal och vridmoment samt de kombinationer av varvtal och vridmoment som motorerna arbetar i, med en prick för varje sekund i körcykeln. De maskiner som ger lägst energiförbrukning är de som har högst verkningsgrad i de områden som motorn arbetar under körcykeln.

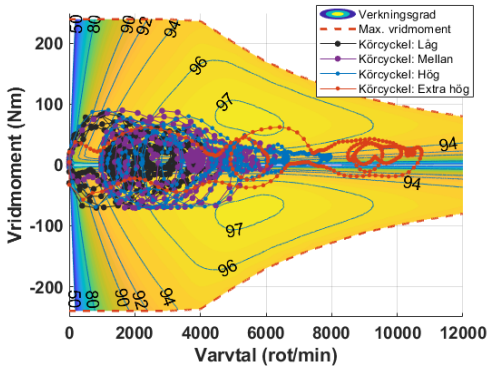
Samtliga körcykelrelaterade resultat är redovisade i tabell 10.3 för de olika personbilsmotorerna. Såväl den totala energiförbrukningen från batteriet som de olika modellerade orsakerna (rullmotstånd, luftmotstånd, växel, elmaskin, omriktare och batteri) är redovisade, samt motorernas energiförlustkomponenter: järn, lindning och magnet.

Energiförbrukningen som direkt kan relateras till elmotorn, ”Pga EM”, beräknas, enligt beskrivningen i avsnitt 8.3, som skillnaden mellan fallet ”Med EM” då både motorns vikt och energiförluster är inkluderade, och fallet ”Utan EM” då varken motorns vikt eller dess energiförluster är inkluderade. Den data som gått vidare till LCA-studien är energiförbrukningen som direkt kan hänföras till elmotorn under användarfasen, det vill säga den energiförbrukning som elmotorn orsakar från elnätet under hela sin livslängd i fordonet, vilket här är definierats som en körsträcka på 200 000 km. Värdet på denna energiförbrukning fås genom att beräkna medelenergiförbrukningen per körd sträcka med körcykeln (Wh/km, där körcykelns totala sträcka är 23,2663 km) och multiplicera det med 200 000, varefter produkten divideras med den antagna verkningsgraden för laddaren.

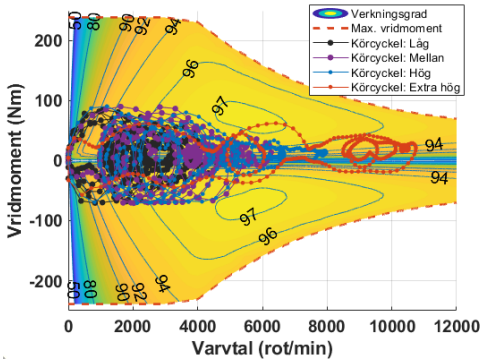
I tabell 10.3 anges även medelverkningsgraden för hela drivlinan för samtliga fall under körcykeln då energiflödet går från batteriet till hjulen, ”framdrift”, samt medelverkningsgraden för hela drivlinan för samtliga fall under körcykeln då energiflödet istället går från hjulen till batteriet, ”inbromsning”.

Figur 10.6–1: Verkningsgrad samt körcykeln WLTCs arbetspunkter med en prick per sekund för personbilsmotorerna (figuren fortsätter på nästa sida, del 2).

RFM – distr trådlindn. Cu – instkn Nd(Dy)FeB

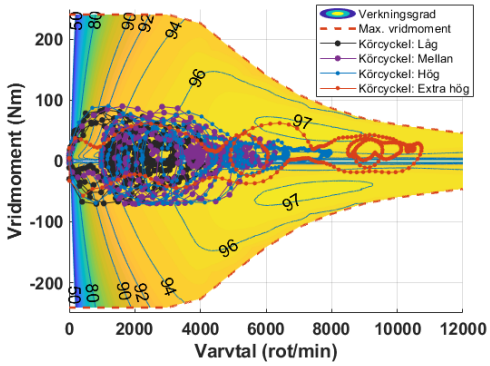


RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo

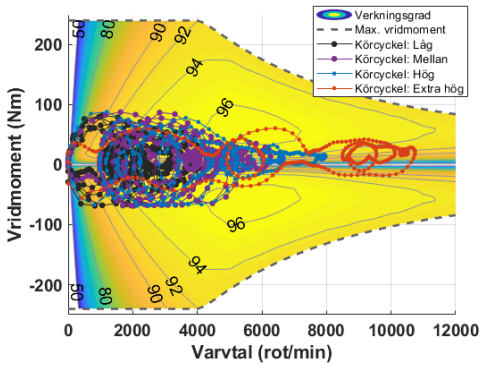


Figur 10.6–2: Verkningsgrad samt körcykeln WLTCs arbetspunkter med en prick per sekund för personbilsmotorerna (figuren fortsätter från föregående sida, del 1).

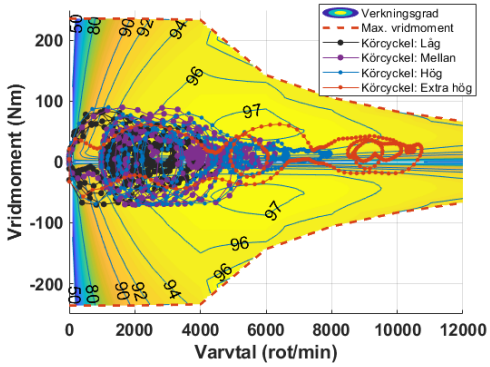
RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit



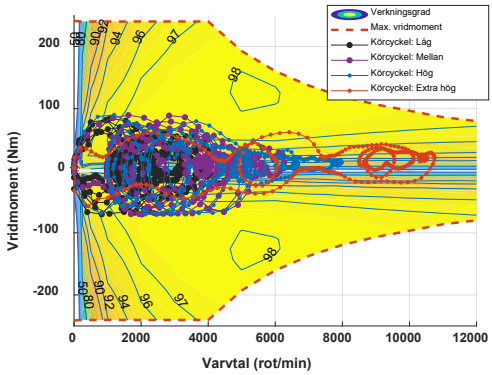
RFM - distr trådlindn Al - instkn Nd(Dy)FeB



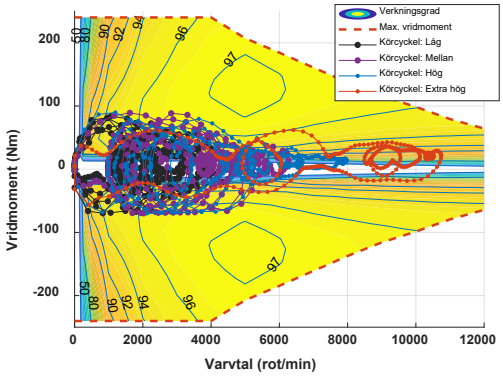
RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB



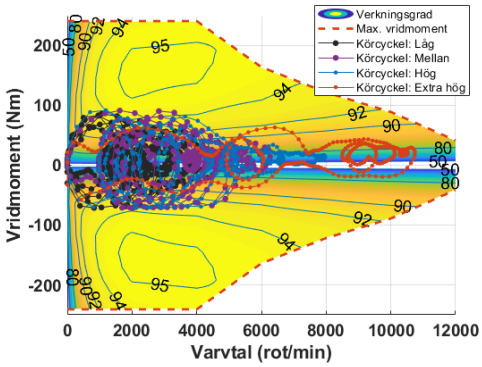
RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB



AFM – konc trådlindn Cu – ytmont. Nd(Dy)FeB



TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB



Tabell 10.3–1: Samtliga körcykelrelaterade resultat för personbilen med WLTC (tabellen fortsätter på nästa föregående sida, del 2). Grönmarkerade värden användes i LCA-beräkningarna (se kapitel 12).

Motoralternativ		RFM – distr trådlindn. Cu – instkn. Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo	RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit	RFM - distr trådlindn Al - instkn. Nd(Dy)FeB	RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB	RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB	
Totalvikt		44,9	46,1	45,6	41,3	40,8	43,6	28,1	66,6	kg
Energiförbrukning per körd strecka										**Enhet**
Från batteriet pga. EM		12,7	11,9	9,3	14,8	10,5	13,8	21,5	48,4	Wh/km
Från elnätet pga. EM		13,5	12,7	9,9	15,7	11,2	14,7	22,8	51,5	Wh/km
Från elnätet pga. EM, för 200 000 km		**2702**	**2534**	**1972**	**3148**	**2230**	2943	4564	10308	kWh
Energiförbrukning från batteriet										**Enhet**
Utan EM		2419								Wh
Med EM		2715	2696	2635	2763	2663	2741	2918	3546	Wh
Pga EM		296	277	216	344	244	322	499	1127	Wh
Energiförluster										**Enhet**
Pga rull-motstånd	Utan EM	899								Wh
	Med EM	924	925	925	922	922	924	915	937	Wh
	Pga EM	26	26	26	24	23	25	16	38	Wh
Pga luft-motstånd	Utan EM	1230								Wh
	Med EM	1230								Wh
	Pga EM	0								Wh
Växel	Utan EM	123								Wh
	Med EM	126	126	126	126	126	126	125	127	Wh
	Pga EM	2,7	2,8	2,8	2,5	2,5	2,6	1,7	4,0	Wh
Elmotor	Utan EM	0								Wh
	Med EM	257	239	179	308	210	284	467	1054	Wh
	Pga EM	257	239	179	308	210	284	467	1054	Wh
Omriktare	Utan EM	125								Wh
	Med EM	133	132	131	133	132	133	136	149	Wh
	Pga EM	7,4	7,0	5,6	7,9	6,1	7,9	10,5	24	Wh

Tabell 10.3–2: Samtliga körcykelrelaterade resultat för personbilen med WLTC (tabellen fortsätter från föregående sida, del 1).

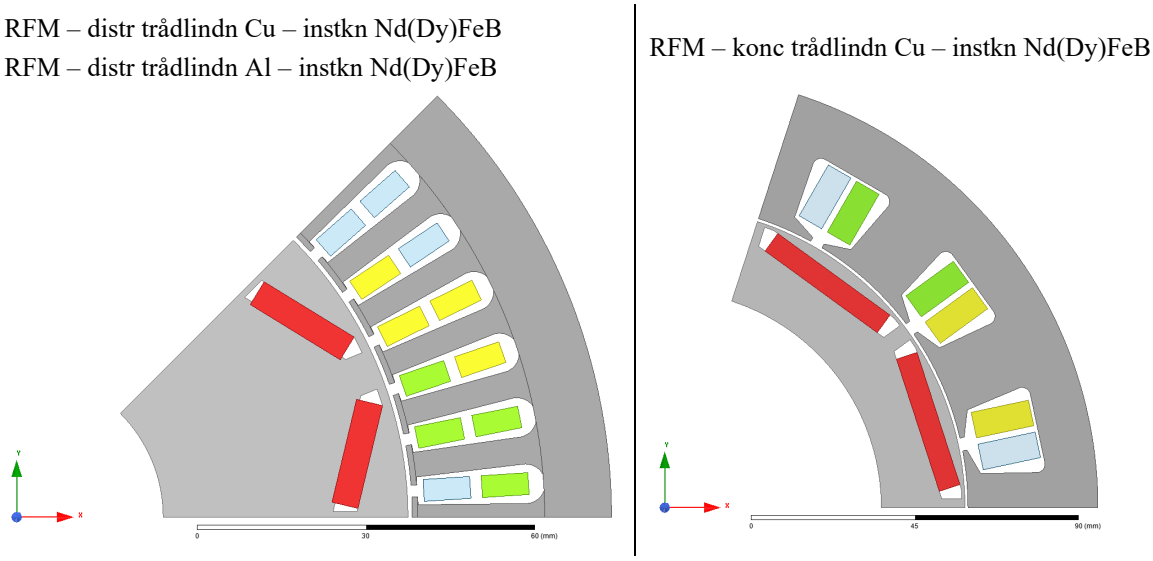
Motoralternativ		RFM – distr trådlindn. Cu – instkn. Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM - distr trådlindn Cu – instkn SmCo	RFM - distr trådlindn Cu – instkn Sr-ferrit	RFM - distr trådlindn Al - instkn. Nd(Dy)FeB	RFM – distr hårnålslindn Cu - instkn Nd(Dy)FeB	RFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	AFM – konc trådlindn Cu – ytmont Nd(Dy)FeB	TFM – ring trådlindn Cu – inmont Nd(Dy)FeB	
Energiförluster										**Enhet**
	Utan EM	42								Wh
Batteri	Med EM	44	44	44	45	44	45	45	50	Wh
	Pga. EM	2,5	2,4	1,9	2,7	2,1	2,7	3,6	8,1	Wh
	Järnkärna	177	165	115	188	136	195	297	954	Wh
EM del	Lindning	80	73	65	120	72	81	162	83	Wh
	Magnet	0,3	0,3	0	0,4	0,2	8	8	16	Wh
	Järnkärna	69%	69%	64%	61%	65%	69%	64%	91%	-
EM andel	Lindning	31%	31%	36%	39%	35%	28%	35%	8%	-
	Magnet	0%	0%	0%	0%	0%	3%	2%	2%	-
Drivlinans medelverkningsgrader										**Enhet**
Framdrift		87,7%	88,1%	89,4%	86,7%	88,7%	87,0%	83,4%	74,0%	-
Inbromsning		87,8%	88,0%	88,8%	86,5%	88,5%	87,5%	83,8%	72,6%	-

10.5 Geometri och massa, bussmotorer

De elektromagnetiska modellerna för bussmotorerna presenteras i figur 10.7. Magneterna är röda, rotorjärnet ljusgrått, statorjärnet mörkgrått och lindningarnas tre faser är gula, gröna och blå.

Information rörande elektriska, mekaniska och geometriska data för de olika maskinerna presenteras i tabell 10.4, tillsammans med vikter för motorernas delar.

Figur 10.7 Modellerad geometri för de elektriska maskinerna för bussen.



Tabell 10.4–1: Elektriska, mekaniska och geometriska data för bussmaskinerna, samt vikter för motorernas delar (tabellen fortsätter på nästa sida, som del 2)

Motoralternativ	RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM – distr trådlindn Al – instkn Nd(Dy)FeB	RFM - konc.trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB	
Generellt data				**Enhet**
Max. vridmoment	2 x 331	2 x 331	2 x 327	Nm
Max. effekt (580 V_{dc} 3700 rpm)	2 x 125	2 x 125	2 x 115	kW
Max. verkningsgrad	97.6%	96.9%	98.1%	
Längd på kärnan	138	138	127	mm
Max. dc spänning	580	580	546	V
Max. fasström (rms)	280	280	250	A
Strömtäthet i spår (rms)	19,3	19,3	15,4	A/mm^2
Antal poler	8	8	10	-

Tabell 10.4–2: Elektriska, mekaniska och geometriska data för bussmaskinerna, samt vikter för motorernas delar (tabellen fortsätter från föregående sida, del 1, och vidare på nästa sida, del 3).

Motoralternativ	RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM – distr trådlindn Al – instkn Nd(Dy)FeB	RFM - konc.trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB	
Generellt data				**Enhet**
Luftgapslängd	0,79	0,79	1	mm
Parallella ledare per fas	4	4	1	
Statorgeometri				**Enhet**
Ytterdiameter	213	213	240	mm
Innerdiameter	142	142	172	mm
Antal spår	48	48	15	-
Spår fyllfaktor	0,47	0,47	0,58	-
Tandbredd	4,7	4,7	21,4	mm
Spårdjup	23	23	21	mm
Spåröppning	2,1	1,5	3	mm
Spårarea	139	139	358	mm
Spåromkrets	53	53	71	mm^2
Varv per lindning	9	9	7	mm
Ändlindning axiell utsträckning	25	25	12	mm
Rotorgeometri				**Enhet**
Ytterdiameter	140	140	170	mm
Innerdiameter, aktiv kärna	80	80	80	mm
Magnetlängd	138	138	127	mm
Magnetbredd	18,9	18,9	40	mm
Magnet, tjocklek	4,8	4,8	5	mm
Volym, per magnet	13	13	25	cm^3
Total magnetvolym	199	199	254	cm^3

Tabell 10.4–3: Elektriska, mekaniska och geometriska data för bussmaskinerna, samt vikter för motorernas delar (tabellen fortsätter från föregående sida, del 2).

Motoralternativ	RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM – distr trådlindn Al – instkn Nd(Dy)FeB	RFM - konc.trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB	
Vikt				**Enhet**
Statorkärna	13,9	13,9	16,1	kg
Rotorkärna	12,2	12,2	15,7	kg
Magneter	1,50	1,50	1,91	kg
Lindning	7,5	2,3	5,7	kg
Aktiv	*3,9*	*1,2*	*3,5*	*kg*
Passiv (inkl. fasledare)	*3,6*	*1,1*	*2,2*	*kg*
Totalvikt	56,6	51,3	64,2	kg

10.6 Beskrivning – bussmotorer

Här beskrivs och motiveras bussmotorernas konstruktion, samt kommenteras de erhållna verkningsgraderna som finns redovisade i avsnitt 10.7, figur 10.8.

*10.6.1 RFM, PMSM, distribuerad Cu-trådlindning, instuckna Nd(Dy)FeB -magneter - **referensmotor***

Till skillnad från personbilsmotorn, hittades mycket lite detaljerad designinformation om olika elektriska maskiner till bussar. I samtal med en teknisk expert hos en av projektparterna framgick att eftersom försäljningsvolymerna är så pass låga på bussar jämfört med personbilar så blir det svårt för enskilda fordonstillverkare att driva specialiserad elmotorutveckling mot enbart bussar. Det är därför rimligt att tänkas sig att de i första hand väljer motordesigner som redan finns på marknaden, med modifikationer på huskonstruktion med kylkanaler och eventuellt impregnering av lindningen i härdat epoxy-material.

Eftersom det valda maxvarvtalet för bussmotorn på 11 000 rpm är relativt nära det för personbilsmotorn antogs att referensmotorn för elbussen skulle ha en snarlik PMSM design med distribuerad trådlindning av koppar i två lager och fyra parallella grenar, samt instuckna Nd(Dy)FeB-magneter placerade i v-form.

Med utgångspunkt från samma laminattvärsnitt som för personbilens referensmotor, samt de givna specifikationerna för motorn som presenterades i kapitel 3 (angående spänning, ström, effekt, vridmoment och varvtal), bestämdes en lämplig ytterdiameter på statorn och längd på järnkärnan med hjälp av FEM beräkningar vid basvarvtalet. För att klara ström- och spänningsgränserna justerades antalet varv per lindning till 9. För att kompensera för den högre strömmen gjordes statorspåren både bredare (21%) och längre (9%) jämfört med personbilslaminaten, för att begränsa energiförlusterna i lindningen.

Som framgår av figur 10.8 är verkningsgraden för bussens referensmaskin över 97% för ett större område jämfört med personbilens referensmaskin. Den högsta verkningsgraden är 97,6%.

10.6.2 RFM, PMSM, distribuerad Al-trådlindning, instuckna Nd(Dy)FeB -magneter

Denna maskin har exakt samma geometri som bussens referensmaskin, med den enda skillnaden att lindningsmaterialet är av aluminium istället för koppar. Som väntat är verkningsgraden med aluminiumlindning något lägre än med koppar, som mest 96,9% (se figur 10.8).

10.6.3 RFM, PMSM, koncentrerad Cu-trådlindning, instuckna Nd(Dy)FeB -magneter

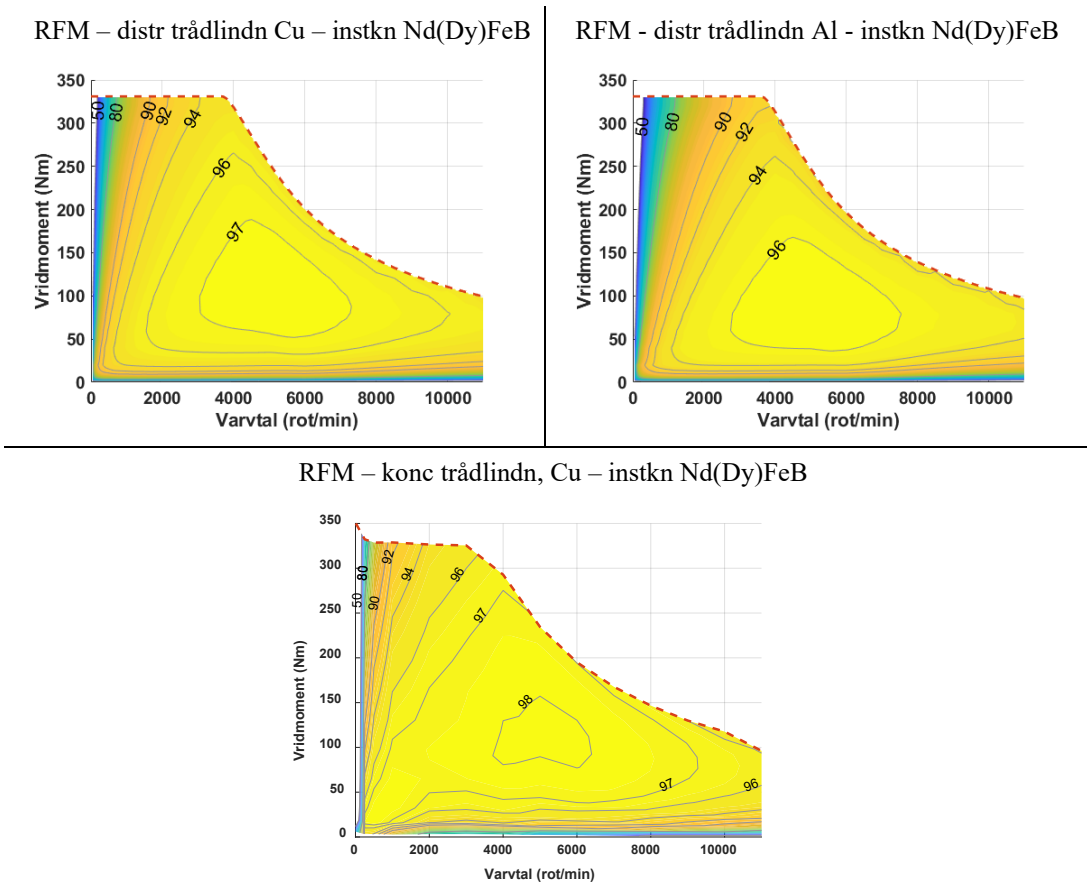
Till skillnad från personbilsmotorn med koncentrerad lindning, har bussmotorns magneter placerats instuckna i rotorn i rak form. Energiförlusterna är lägre i instuckna magneter jämför med ytmonterade. Dessutom kan motorn med denna magnetplacering, i likhet med den med v-form, producera så kallat reluktans-vridmoment, vilket är till hjälp vid höga varvtal. Jämfört med personbilens motor med koncentrerad lindning har spåret här gjorts något grundare och smalare för att få ner induktansen.

Även för bussmotorn är verkningsgraden med den koncentrerade lindningen högre än för referensmotorn, som mest 98,1% (figur 10.8).

10.7 Verkningsgrad – bussmotorer

Bussmotorernas verkningsgrad som funktion av rotationshastighet och vridmoment presenteras i figur 10.8.

Figur 10.8: Verkningsgrad som funktion av varvtal och vridmoment för bussmaskinerna.



10.8 Beräknad energiförbrukning under körcykel – bussmotorer

Energiförbrukningen under användarfasen har beräknats enligt avsnitt 8.3, med körcykeln WTVC Urban för stadsbussen och dess motorer. I figur 10.9 visas både motorernas verkningsgrad som funktion av varvtal och vridmoment samt de kombinationer av varvtal och vridmoment som motorerna arbetar i, med en prick för varje sekund i körcykeln. De maskiner som ger lägst energiförbrukning är de som har högst verkningsgrad i de områden som motorn arbetar under körcykeln.

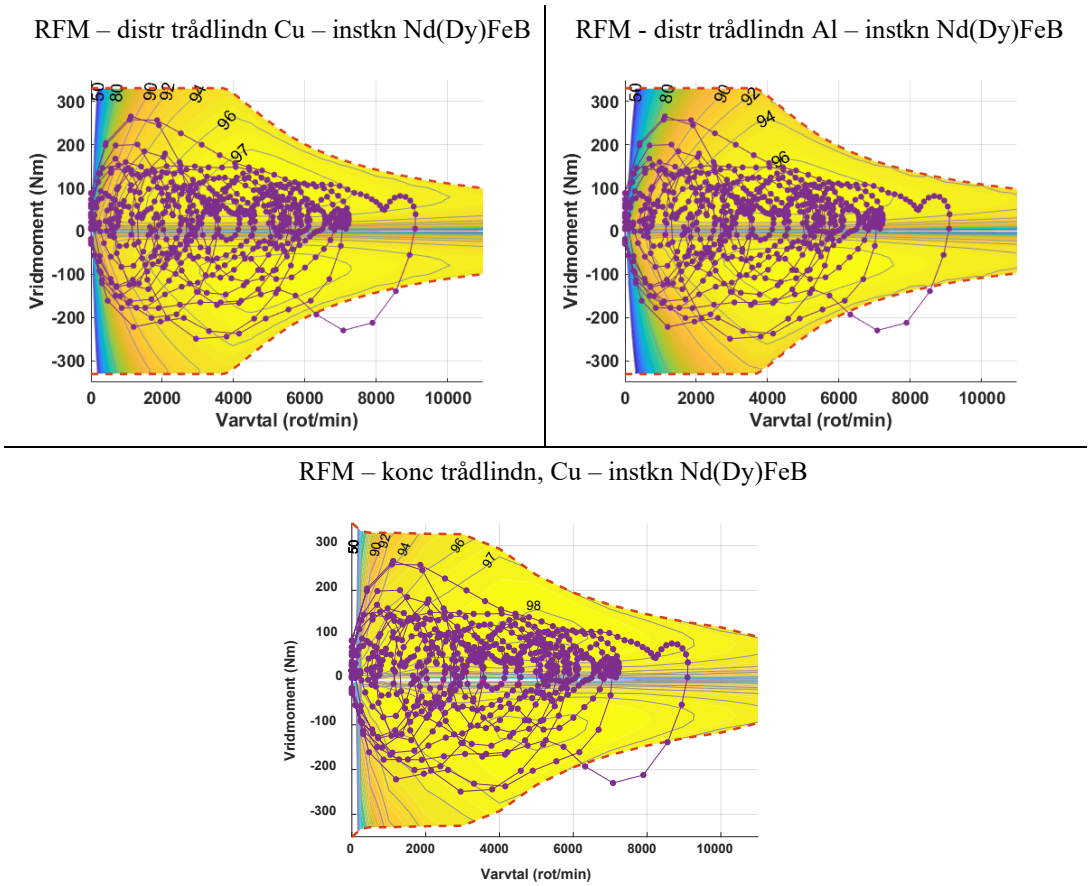
Samtliga körcykelrelaterade resultat är redovisade i tabell 10.5 för de olika stadsbussmotorerna. Såväl den totala energiförbrukningen från batteriet som de olika modellerade orsakerna (rullmotstånd, luftmotstånd, växel, elmaskin, omriktare och batteri) är redovisade, samt motorernas energiförlustkomponenter: järn, lindning och magnet.

Energiförbrukningen som direkt kan relateras till elmotorn, ”Pga. EM”, beräknas, enligt beskrivningen i avsnitt 8.3, som skillnaden mellan fallet ”Med EM” då både motorns vikt och energiförluster är inkluderade, och fallet ”Utan EM” då varken motorns vikt eller dess energiförluster är inkluderade. För bussarna beräknades inte den energiförbrukning som elmotorn orsakar från elnätet under livslängd i fordonet, eftersom det inte genomfördes någon LCA-studie av dessa motorer inom ramen för projektet. Värden för denna energiförbrukning kan dock beräknas från medelenergiförbrukningen per körd sträcka med körcykeln (Wh/km,

där buskörcykelns totala sträcka är 5,321 km) och multiplicera en total körsträcka över bussens livstid, varefter produkten divideras med den antagna verkningsgraden för laddaren. En buss kan antas köra cirka 60000–70000 km per år under en period på 10–12 år (Nordelöf et al., 2019b).

I tabell 10.5 anges även medelverkningsgraden för hela drivlinan för samtliga fall under körcykeln då energiflödet går från batteriet till hjulen, ”framdrift”, samt medelverkningsgraden för hela drivlinan för samtliga fall under körcykeln då energiflödet istället går från hjulen till batteriet, ”inbromsning”.

Figur 10.9: Verkningsgrad samt körcykeln WTVC Urban:s arbetspunkter med en prick per sekund för stadsbussmotorerna.



Tabell 10.5–1: Samtliga körcykelrelaterade resultat för stadsbussen med WTVC Urban (tabellen fortsätter på nästa sida, del 2).

Motoralternativ		RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM – distr trådlindn Al – instkn Nd(Dy)FeB	RFM - konc.trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB	
Totalvikt		2 x 56,6	2 x 51,3	2 x 64,2	kg
Energiförbrukning per körd sträcka					**Enhet**
Från batteriet pga. EM		73,7	93,9	56,8	Wh/km
Från elnätet pga. EM		78,4	99,9	60,4	Wh/km
Energiförbrukning från batteriet					**Enhet**
Utan EM			4242		Wh
Med EM		4634	4742	4544	Wh
Pga. EM		392	500	302	Wh
Energiförluster					**Enhet**
Pga. rull-motstånd	Utan EM		2959		Wh
	Med EM	2980	2978	2983	Wh
	Pga EM	21,3	19,3	24,2	Wh
Pga. luft-motstånd	Utan EM		618		Wh
	Med EM		618		Wh
	Pga EM		0		Wh
Växel	Utan EM		283		Wh
	Med EM	285	285	285	Wh
	Pga EM	2,0	1,8	2,2	Wh
Elmotor	Utan EM		0		Wh
	Med EM	360	468	268	Wh
	Pga EM	360	468	268	Wh
Omriktare	Utan EM		287		Wh
	Med EM	293	294	292	Wh
	Pga EM	6,7	7,6	5,6	Wh

Tabell 10.5–2: Samtliga körcykelrelaterade resultat för stadsbussen med WTVC Urban (tabellen fortsätter från föregående sida, del 1).

Motoralternativ		RFM – distr trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB - **referensmotor**	RFM – distr trådlindn Al – instkn Nd(Dy)FeB	RFM - konc.trådlindn Cu – instkn Nd(Dy)FeB	
Energiförluster					**Enhet**
Batteri	Utan EM	95			Wh
	Med EM	98	98	97	Wh
	Pga. EM	2,3	2,6	1,9	Wh
EM del	Järnkärna	202	202	191	Wh
	Lindning	157	266	72	Wh
	Magnet	0,6	0,6	5,5	Wh
EM andel	Järnkärna	56%	43%	71%	-
	Lindning	44%	57%	27%	-
	Magnet	0%	0%	2%	-
Drivlinans medelverkningsgrader					**Enhet**
Framdrift		89,7%	88,8%	90,6%	-
Inbromsning		89,6%	88,4%	90,4%	-

11. Materialflödesanalys av fragmentering och semiautomatiserad elmaskindemontering

I arbetet med att analysera hur dagens End-of-Life-system kan anpassas för att bättre tillvarata de värdefulla material som ingår i elektriska framdrivningsmaskiner så analyserades två scenarier för förstörande separering av motordelar till ett par huvudsakliga fraktioner för materialåtervinning mer djupgående. Detta gjordes för de tre radialflödesmaskiner som senare analyserades inom ramen för LCA-studie 2, vilket beskrivs vidare i avsnitt 12.2:

- PMSM med distribuerad trådlindning av koppar - **referensmotorn**
- PMSM med distribuerad trådlindning av aluminium
- PMSM med distribuerad hårnålslindning av koppar

Det ena scenariot beskriver dagens situation och utgår från att motorerna genomgår fragmentering, separat eller ihop med övriga fordonet, medan det andra scenariot representerar en långt tagen semiautomatiserad demontering där alla material separeras och sorteras i så rena fraktioner som möjligt för koppar, stål och järnskrot, samt aluminium (se beskrivningar i avsnitten 6.3-6.5). I det semiautomatiska demonteringsscenariot inkluderades också separering av lindningen från statorkärnan och magneterna från rotorkärnan, i linje med beskrivningarna i avsnitt 7.2 och 7.3. Denna jämförelse mellan olika grader av materialseparering är intressant i sig, eftersom den ger en indikation på hur stora andelar av värdefulla material som går förlorade vid ofullständig sortering i materialfraktioner i nuvarande fragmenteringsprocedur. Därutöver utgjorde analysen ett viktigt underlag för den ena av de två LCA-studierna som genomfördes inom ramen för projektet (se avsnitt 12.2).

Dataunderlag och procedurbeskrivningar för denna analys hämtades dels från litteratur och genom direkt dialog med projektets partners, och dels från observationer gjorda under de demonteringsövningar som beskrivs i kapitel 4, samt vid ett besök till en fragmenteringsanläggning. I denna analys av End-of-Life-systemen lades fokus på förstörande separering av motordelar inför materialåtervinning eftersom blandning av olika material utgör en utmaning för fortsatt effektiv hantering i End-of-Life-systemet.

Icke-förstörande demontering, som krävs för att realisera de strategier för återanvändning och återtillverkning av olika motordelar som redovisas i avsnitt 7.1, ger istället, om den genomförs framgångsrikt och relevanta delar förblir intakta, möjligheten att bibehålla funktionen hos de delkomponenter och material som förblir i elmotorn. Detta bedöms, baserat på kvalitativ LCA, ha så pass otvetydiga fördelar sett till minskad miljöpåverkan att det inte föranleder behov av att etablera kvantifierade materialflöden.

11.1 Fragmentering (dagens situation)

Data för energianvändningen vid fragmentering utgick från data för Stena Recyclings hammarkvarn i Halmstad samt behandling av olika materialfraktioner i det näraliggande Stena Nordic Recycling Center (SNRC). Data för driften av denna hammarkvarn har tidigare rapporterats av Lassesson (2008) och en övre fräns för förbrukning av elektricitet och värme i SNRC redovisas i kombination med maximal mängd material som anläggning kan hantera vid full drift i miljö- och tillståndsprövningen från 2017 (Vänersborgs Tingsrätt, 2017). Energiberäkningar baserade på dessa underlag stämdes därefter av kvalitativt med representanter för Stena Recycling (Jilvero, 2019).

Malningen i hammarkvarnen syftar till att skilja de olika materialen i inkommande skrot, och därmed också de olika motormaterialen, från varandra så att de i senare steg kan sorteras till olika återvinningsfraktioner. Övergripande användes (Andersson et al., 2017) för att identifiera de olika sorterings- och separeringsstegen och modellera hur fragmenterade elmaskiner fördelar sig i de olika fraktionerna. Framförallt är statorn en stor utmaning för malningen, då processen typiskt inte klarar av att skilja kopparlindningen från elektroplåten i statorkärnan. Detta leder, i enlighet med beskrivningen i avsnitt 6.2, till att en viss koppar följer med elektroplåten i den magnetiska fraktionen medan en större mängd elektroplåt istället sorteras som icke-magnetiskt material i form av köttbullar.

Utöver elektroplåt så sorteras till den magnetiska fraktionen också kullager och motoraxeln samt de delar av magnetmaterialet som inte pulveriseras vid malningen och som fortfararande sitter ihop med elektroplåt från rotorn. För den magnetiska fraktionen utgick materialflödesanalysen från att processen klarar av att uppnå de krav på stålskrot som definieras för klassificering E40 som fragmenterat stålskrot enligt (Muchová och Eder, 2010b, EFR, 2017). Enligt denna klassificering får materialet maximalt innehålla 0,25% koppar och 0,15% andra material, som här antas vara lindningsisolering.

För att därefter modellera hur stor andel av det icke-magnetiska materialet som blir pulveriserat och därför sorteras till lättfraktionen, samt hur denna andel bearbetas vidare, så utgick analysen från en kvalitativ beskrivning av Stena Recycling (Jilvero, 2019), kombinerat med data från (Bouzidi och Leymarie, 2009) för aluminium, (Widmer et al., 2015) för sällsynta jordartsmetaller och från (Schlesinger et al., 2011) för koppar. Alla plast- och isoleringsmaterial, utöver de som är tydligt integrerade i till exempel lindningar, eller som fixeringsmassa för magneter, antogs också följa med i lättfraktionen och sedan sorteras som så kallat fluff.

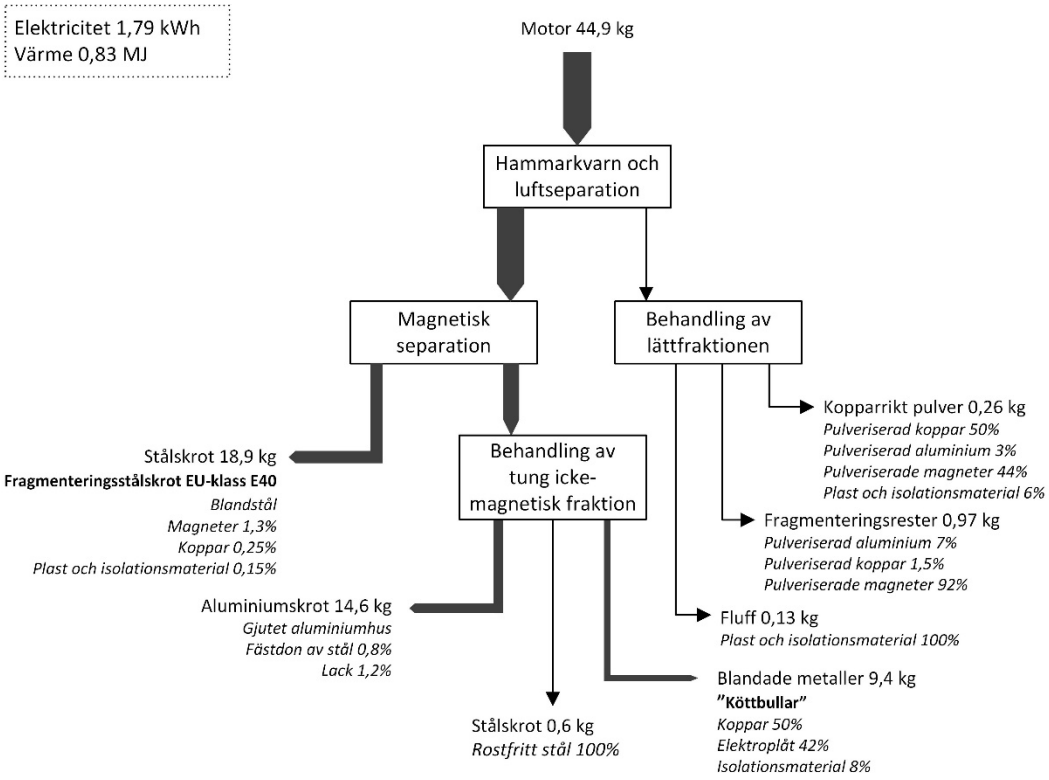
För den tunga icke-magnetiska fraktionen var bedömningen att bortsett från en viss mängd fästdon av stål, så kommer aluminiumdelar från ändskivor och huskropp helt separeras från övriga motorn när den slits sönder i hammarkvarnen. På samma sätt frigörs de delar som består av rostfritt stål (och som därmed är icke-magnetiska). En viss mängd aluminium pulveriseras dock och följer därför med till lättfraktionen.

Återstående delar av motorn består sedan av den så kallade köttbullen. Här utgår modelleringen från att all övrig koppar ingår i köttbullen och att den utgör hälften av dess massa i linje med beskrivning i avsnitt 6.2 samt från (Fowler, 2011, Welter, 2013). Övrigt material i köttbullen utgörs av det isoleringsmaterial som sitter kvar i lindningen och kvarstående elektrostål från statorkärnan. För motoralternativet med aluminiumlindning, görs motsvarande modellering.

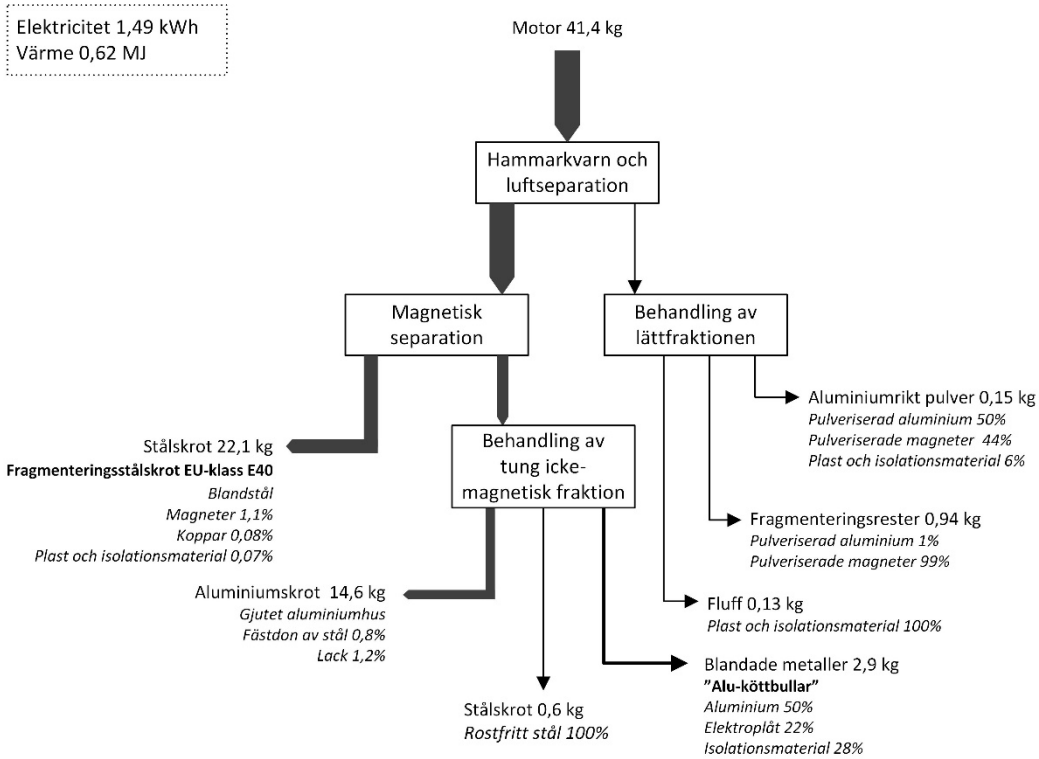
Resultaten för materialflödesanalysen av fragmentering och efterföljande sortering av utgående fraktioner till olika skrotkategorier, visas för de tre motoralternativen i figurerna 11.1–11.3.

De modellerade materialflödena utgår från att hela fordonet, med motorn kvar, fragmenteras. Ett alternativ vore att demontera motorn ur fordonet och fragmentera elmotorer separat. Vi gör bedömningen att utfallet beträffande sortering i materialfraktioner blir detsamma vid en sådan separat fragmentering.

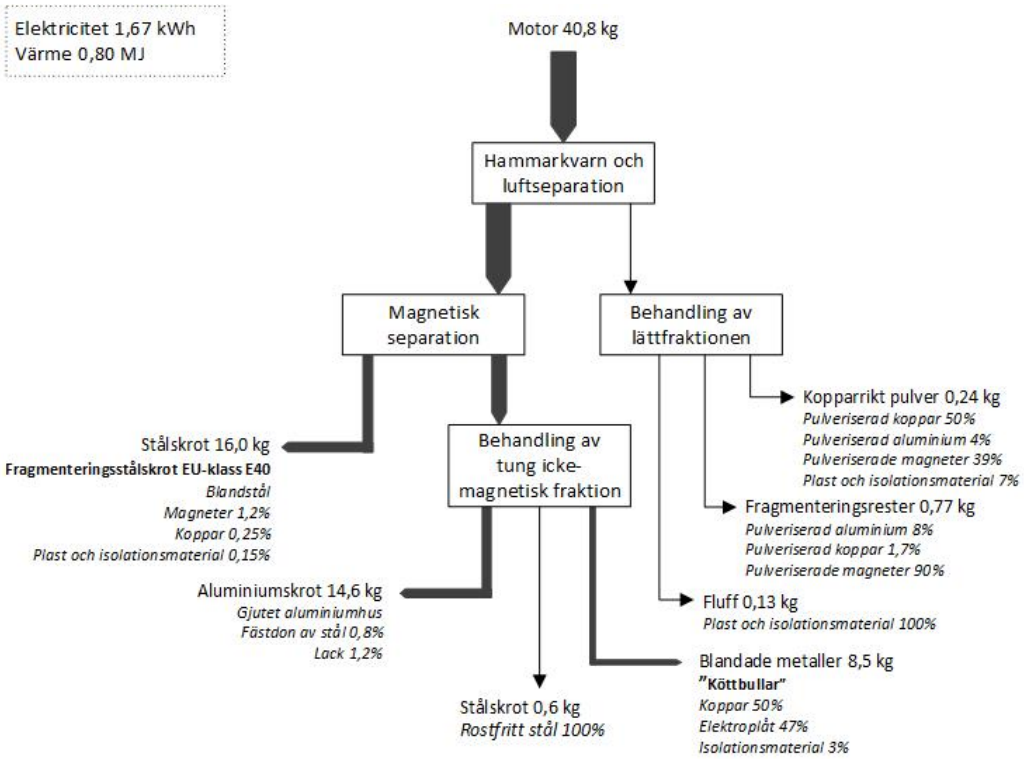
Figur 11.1: Materialflödesanalys av referensmotorn, PMSM med distribuerad kopparlindning, och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår fragmentering och efterföljande separering.



Figur 11.2: Materialflödesanalys av motoralternativet PMSM med distribuerad aluminium-lindning och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår fragmentering och efterföljande separering.



Figur 11.3: Materialflödesanalys av motoralternativet PMSM med hårnålslindning av koppar och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår fragmentering och efterföljande separering.



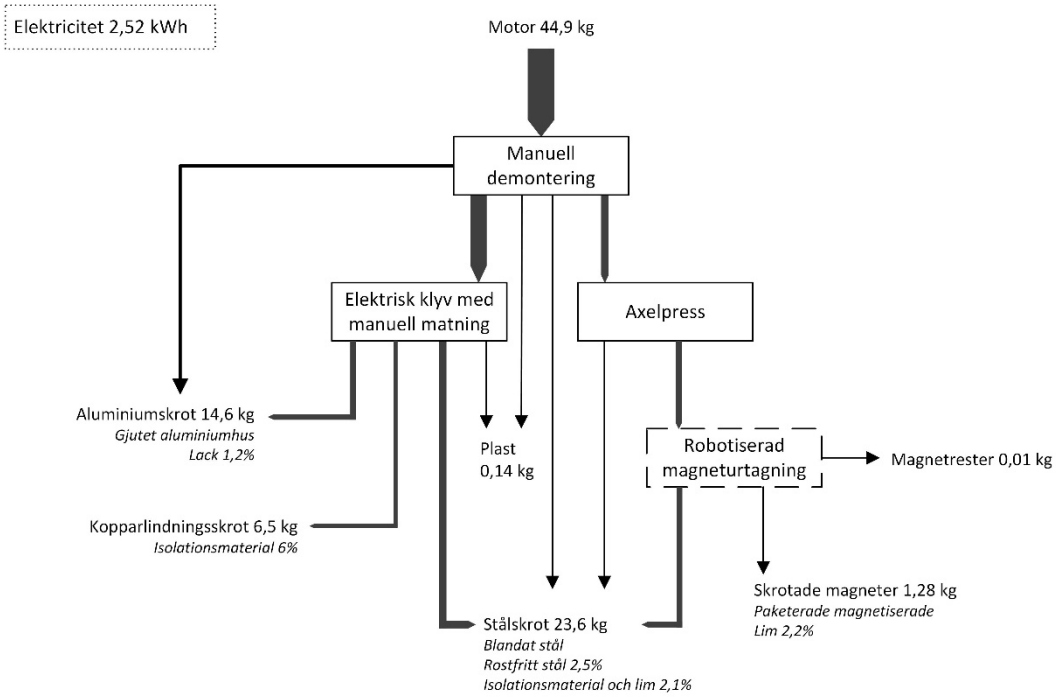
11.2 Demontering för långtgående materialseparation

För att spegla framtida möjligheter till mer långtgående demontering och materialseparation så konstruerades ett scenario med semiautomatiserad separation av ingående delkomponenter i så pass rena materialfraktioner som bedöms praktiskt möjligt. Detta scenario analyserades sedan med materialflödesanalys för de tre motoralternativen. Till skillnad från fragmenteringsscenarierna (avsnitt 11.1), så är en viktig förutsättning här att motorerna först har demonterats ur de skrotade fordonen. Scenariot bygger på projektets egna demonterings-studier kombinerat med beskrivningar av utrustning hämtat från forskningslitteratur eller maskinspecifikationer, till exempel beträffade möjligheterna till att klyva av hus och stator, samt dra ur lindningen (Bronneberg, 2020), samt att pressa ut magneterna ur rotorn (Elwert et al., 2016, Walachowicz et al., 2014). Scenariot innebär att allt stål, all koppar och all aluminium separeras till helt egna fraktioner, med inblandning endast av icke-metalliskt material som lack, isoler- eller fixerings-material. Även magneterna går vidare till material-återvinning, med endast små viktförluster (ca 1%), baserat på Walachowicz et al. (2014).

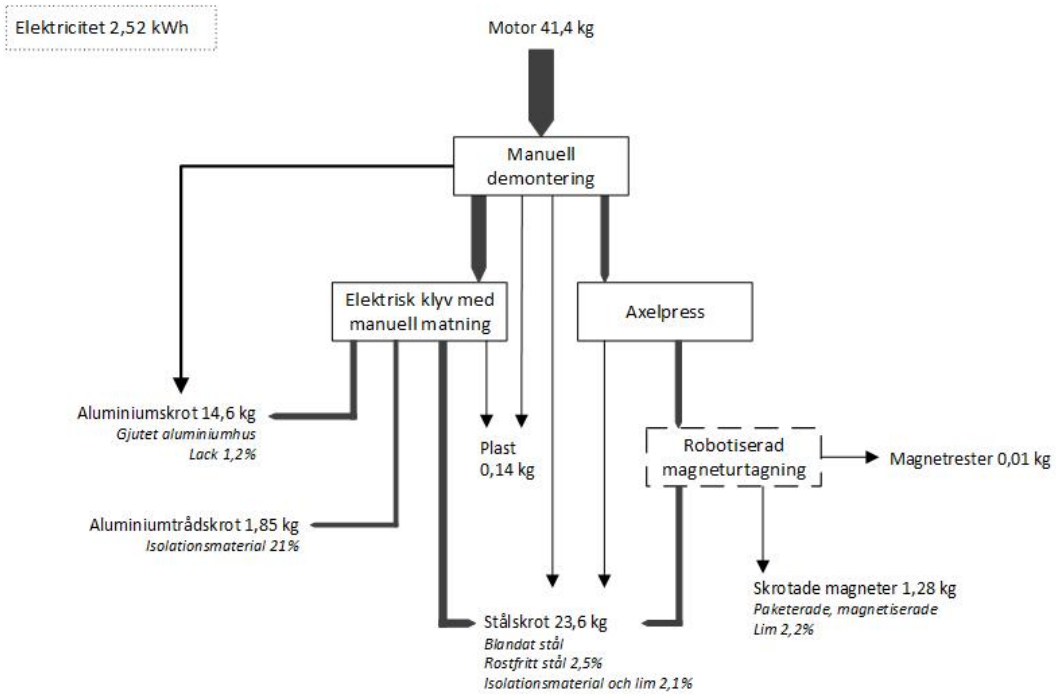
Energianvändningen uppskattades genom att kombinera data. Först användes maskindata för den elektriska klyv- och dragmaskin som visas figur 7.1. Därefter approximerades maskinen som pressar ur magneter med data för en pneumatisk press från Nordelöf et al. (2017). Till sist adderades en överslagsberäkning för el- och värmeåtgång för en demonterings-hall, inklusive ventilation och allmän användning av el för handhållna verktyg, baserat på data för montering av kraftelektronik under liknande förutsättningar, men med betydligt fler monteringssteg (Nordelöf och Alatalo, 2017). Alla motoralternativ kräver lika många steg i

demonteringen. Av denna anledning modelleras samma energianvändning för samtliga studerades motoralternativ.

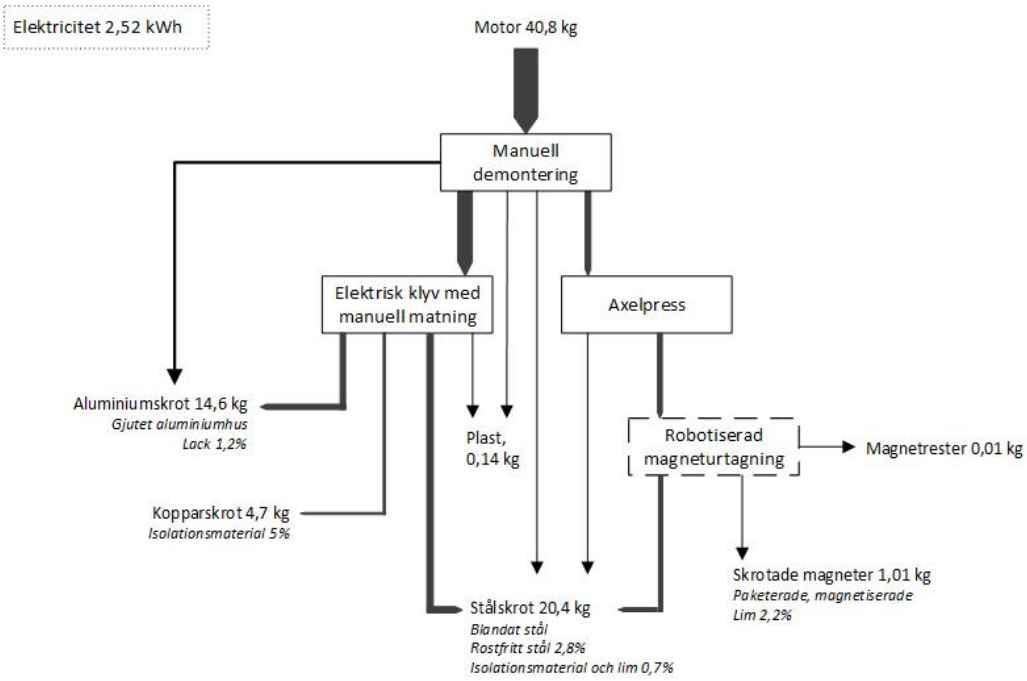
Figur 11.4: Materialflödesanalys av referensmotorn, PMSM med distribuerad kopparlindning, och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår semiautomatiserad demontering.



Figur 11.5: Materialflödesanalys av motoralternativet PMSM med distribuerad aluminium-lindning och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår semiautomatiserad demontering.



Figur 11.6: Materialflödesanalys av motoralternativet PMSM med hårnålslindning av koppar och Nd(Dy)FeB-magneter, som genomgår semiautomatiserad demontering.



12. Livscykelanalys av utvalda elmaskiner

Två detaljerade LCA-studier genomfördes inom ramen för projektet. Den första gjordes tidigt i arbetet, baserad på ett föregående projekt där tillverkning av elmotorer av PMSM-typ och framställning av Nd(Dy)FeB-magneter kartlades (Nordelöf et al., 2017, Nordelöf et al., 2018, Nordelöf och Tillman, 2018). Inom projektets ram breddades studien till att även inkludera motorer med andra magnetmaterial, SmCo och Sr-ferrit. Denna första LCA-studie bidrog till projektmålen genom att identifiera de material och delar av elmotorn som är särskilt viktiga avseende miljöpåverkan vid utvinning av råmaterial, och redovisas med alla detaljer i tidskriftsartikeln Nordelöf et al. (2019a), med en tillhörande bakgrundsrapport på förlagets hemsida.

Lärdomar från LCA-studie 1 användes sedan i den bredare genomgång av de huvudsakliga materialen i elmotorer avseende miljöpåverkan, resursknapphet, kritikalitet och kostnad som sammanfattas i kapitel 4. Utifrån det underlaget, i kombination med den fordons- och motorkravsättning som arbetats fram (kapitel 3) identifierades sedan olika designförslag som bedömdes intressanta att utvärdera i det fortsatta projektet. Speciellt lades fokus på alternativa lösningar för statorn, lindningstyp och lindningsmaterial.

Parallellt genomfördes demonteringsstudier (som redovisas i kapitel 5) och kartläggningen av dagens End-of-Life hantering (kapitel 6). En kombination av observationerna gjorda under dessa genomgångar ledde fram till de strategier för ökade cirkulära materialflöden som formuleras och beskrivs i kapitel 7. Vidare gjordes ett urval motorer för kvantitativa miljösystemanalytiska studier bland dem som beskrivs i kapitel 10, för att undersöka End-of-Life-systemets potential för att recirkulera de material som ingår. Dels gjordes den materialflödesanalys av två olika spår för materialseparering som redovisas i kapitel 11, för tre olika motoralternativ, och dels gjordes LCA-studie 2 för samma tre motoralternativ över hela deras livscykler, där End-of-Life-hanteringen följs hela vägen till dess att råmaterial av högvärdig kvalitet har återfåtts. Resultaten från materialflödesanalyssteget användes därmed som indata till LCA modellerna.

12.1 LCA-studie 1: Variation av rotordesignen för att undersöka olika magnetalternativ

LCA studie 1 utgick från den typ av RFM PMSM-design som är vanligast i dagens elektriskt framdrivna fordon med distribuerad trådlindning av koppar och instuckna magneter. Dels ingick den vanligaste varianten med Nd(Dy)FeB-magneter som presenteras som hela projektets referensmaskin i avsnitt 10.2.1, och den snarlika variant med SmCo-magneter som presenteras i avsnitt 10.2.2. Dessa två rotortvärsnitt är identiska men på grund av SmCo-magnetens lägre energiprodukt, så är motorns aktiva längd 6 mm längre för den med SmCo-magneter jämfört med varianten som har Nd(Dy)FeB-magneter för att uppnå samma maximala vridmoment. Utöver dessa två undersöktes även en annan variant på RFM, den permanentmagnet-assisterade synkronreluktansmotor (PMaSynRM) med Sr-ferritmagneter som presenteras i avsnitt 10.2.4. Denna motorvariant har ett annat mönster i rotortvärsnittet än de två PMSM-varianterna, och därtill en annan aktiv längd. Sammantaget har de tre studerade motoralternativen olika totalvikt och olika materialkomposition utöver att de använder olika typer av magneter, samt olika verkningsgrad vid drift. Detta gjorde att de bedömdes som intressanta att jämföra med LCA där miljöeffekter från råvaruutvinning och bearbetning, samt framställning av material och komponenter ställs mot bördan av den energi som går till spillo i motorerna vid drift på grund av olika typer av förluster.

Utöver att baseras på den tidigare detaljerade livscykeldatamodell som finns beskriven i Nordelöf et al. (2017), Nordelöf et al. (2018) samt Nordelöf och Tillman (2018), vilken inkluderar tillverkning av elektriskt stål, Nd(Dy)FeB-magnettillverkning samt en komplett motorfabrik, så kompletterades studien i Nordelöf et al. (2019a) med ytterligare datainsamling för tillverkning av SmCo- och Sr-ferritmagneter och framställning av sällsynta jordarts-metaller (REE). Data för användningsfasen togs fram inom ramen för projektet och finns rapporterade i avsnitt 10.4.

12.1.1 Mål och omfattning

LCA studie 1 genomfördes för att undersöka hur valet av rotorkonstruktion och magnetmaterial i elmaskiner för fordon påverkar deras miljöpåverkan. Den primära målgruppen för studien var företag som utvecklar och tillverkar denna typ av elmaskiner, samt för fordonsindustrin som utvecklar nya modeller med elektrisk drift. Även myndigheter och akademiska forskare med fokus på fordonsteknikutveckling eller miljöbedömning av fordon ingick i målgruppen. Avsikten var att ge underlag för kravbalansering, både på motor- och fordonsnivå, genom att tillhandahålla information om hur miljöbelastningen förändras med variation av rotorns tvärsnittsdesign och val av magneter, samt därtill kopplade förändringar i motorns storlek, vikt och energiförbrukning i drift.

Tre motoralternativ jämfördes:

- PMSM utrustad med Nd(Dy)FeB-magneter - **referensmotorn**
- PMSM utrustad med SmCo-magneter
- PMaSynRM utrustad med keramiska Sr-ferrit-magneter

Jämförelsen utgick ifrån att samtliga tre motorer skulle ha samma ytterdiameter på statorn och rotorn samt klara följande prestandaparametrar för ett gemensamt referensfordon:

- hantera samma start, det vill säga lika förmåga att tillhandahålla vridmoment för acceleration 0–50 km/h
- tillhandahålla samma topphastighet (145 km/h)
- klara driften för hela den körcykel som valdes för utvärderingen av användningsfasens energieffektivitet, WLTC (se beskrivning i avsnitt 8.3.1)

De tre maskinerna fick dock skilja sig åt i övrig accelerationsprestanda, och ha något varierande toppeffekt: 100 kW för Nd(Dy)FeB-PMSM, 97 kW för SmCo-PMSM och 95 kW för Sr-ferrit PM-assisterad SynRM, i enlighet med beskrivningarna i avsnitten 10.1 och 10.2. Vikter och geometri för samtliga undersökta motorer redovisas i tabell 10.2.

Studiens funktionella enhet är en körd fordonskilometer, och samtliga motorer antogs ha en total livslängd på 200 000 kilometers drift på den valda körcykeln (WLTC), baserat på en teknisk bedömning av författarna som också överensstämde med antaganden gjorda i andra LCA-studier av elektriska fordon.

Studien genomfördes som en så kallad bokförings-LCA[5]. Ett viktigt skäl är att denna typ av LCA studie är additiv, vilket innebar att insamlade data och beräknade resultat därmed kunde utgöra en byggsten för fortsatta LCA studier. Omfattningen avgränsades för att möjliggöra transparens och distinkt analys. All data som representerar bakgrundssystemet, det vill säga sådana processer där data inte samlats in specifikt för studien eller för att beskriva elmotortillverkning, till exempel transporter, processkemikalier, råvaruutvinning och

[5] En bokförings-LCA uppskattar vilken andel av den globala miljöpåverkan som kan hänföras till en produkt, till skillnad från en konsekvens-LCA som uppskattar hur den globala miljöpåverkan påverkas av att produktens tillverkning och användning (Ekvall, 2020).

framställning av grundmaterial och el-generering, modellerades med data från version 3.3 av databasen Ecoinvent (Weidema et al., 2013, Wernet et al., 2016). Geografiskt representerar detta data globala eller regionala medelvärden för en stor mängd produkter, samt i vissa fall nationella medelvärden, till exempel för elförsörjning. För det mer specifikt modellerade förgrundssystemet antogs det att magneterna produceras i Kina, eftersom det är där de flesta av världens permanentmagneter tillverkas, när de är baserade på sällsynta jordartsmetaller. Andra faser i livscykeln, som motorfabriken och laddning av batterierna för användningsfasen, modellerades för två olika geografiska scenarier: (a) i Sverige eller (b) i USA. Tanken var att jämföra två olika alternativ sett till koldioxidintensitet och utsläpp orsakade av el-generering. Sverige representerar då ett lägre utsläppsscenario och USA ett högre.

Sett till livscykelfaser så omfattade studien tillverkning och användning av motorerna, men inte End-of-Life, där avfallshantering sker och återvinning sker, eftersom varken demonteringsstudier eller någon kartläggning av End-of-Life-systemet då hade genomförts. Viktigt att nämna är dock att använd bakgrundsdata för framställning av metaller i studien inkluderar en viss andel återvunnet material, beroende på hur hög återvinningsgrad som gäller i medeltal för respektive metall. Främst avser detta koppar, aluminium och stål. I den systemmodell som användes så innebär det att miljöbördan för materialframställning är lägre än om alltigenom jungfruliga metaller hade använts.

Avslutningsvis bör det också nämnas att resultatet i användarfasen kopplat till varje motors energiförbrukning beräknades med utgångspunkt från körcykeln WLTC. Men studien omfattade även en robusthetsanalys av driftsfasens energiförbrukning där körning vid sex ytterligare körcykler utvärderades (Nordelöf et al., 2019a).

12.1.2 Inventeringsanalys

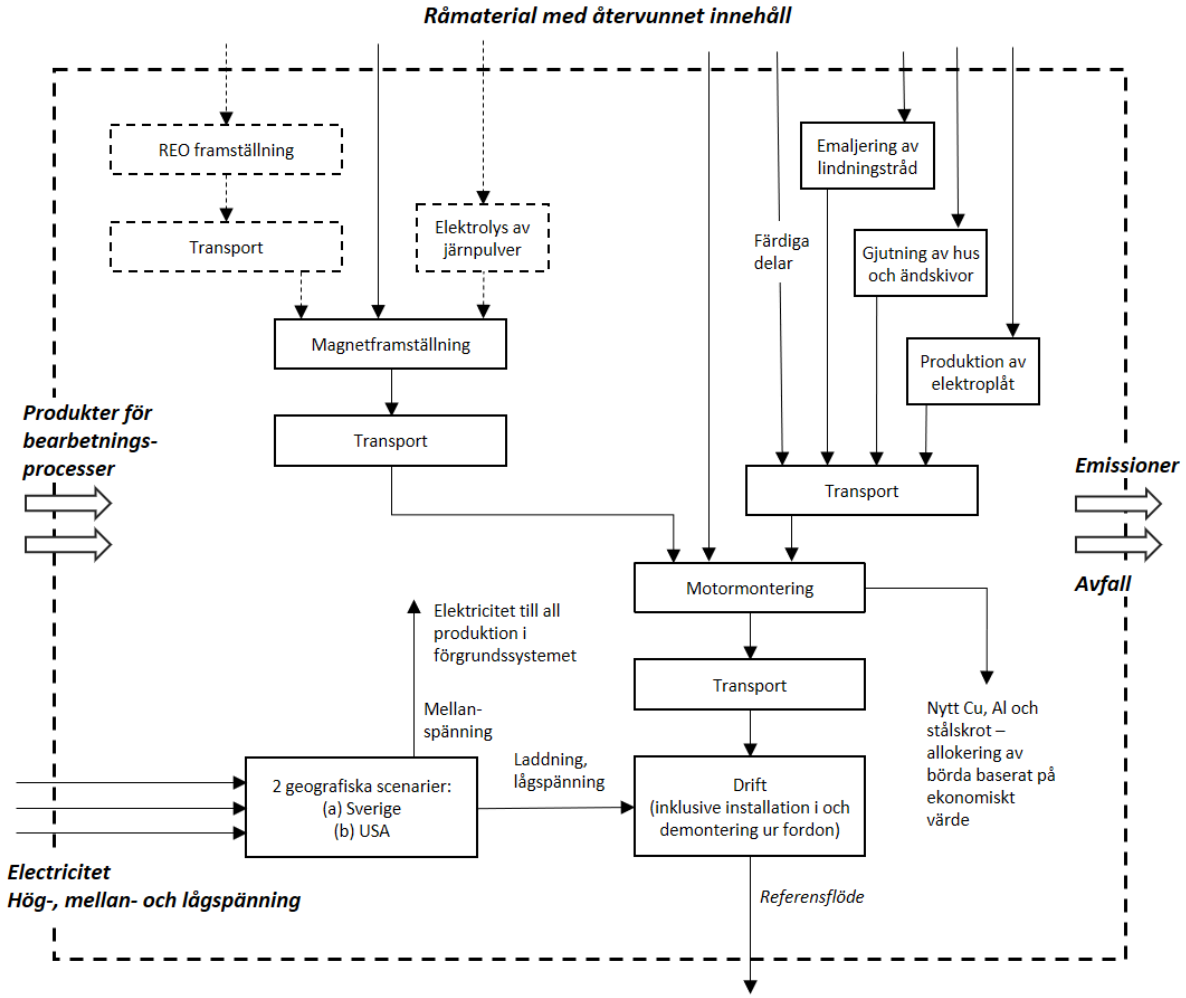
Figur 12.1 (nästa sida) redovisar ett översiktligt flödesschema för det system som modellerades, datasattes och analyserades i LCA-studie 1.

12.1.3 Resultat för utvalda miljöpåverkanskategorier

Klimatförändringar och landanvändning var de två miljöpåverkanskategorier för vilka LCA-studie 1 fann störst påverkan på naturliga ekosystem, medan skador på människors hälsa riskerar att uppkomma genom toxiska utsläpp, andningspåverkande partikelutsläpp samt även där klimatförändringar. Andra typer av miljöpåverkanskategorier, som till exempel försurning, övergödning eller smog, vilka orsakas av avgasutsläpp och därför ofta bedöms som viktiga i fordonssammanhang, befanns mindre viktiga för elmotorer. Resurser, till exempel i form av mineraler och metaller som bryts från berggrunden, undersöktes också men här gav valda bedömningsmetoder inga tydliga svar kring utmaningar eller viktiga problemområden. Istället gav studien exempel på luckor och felaktigheter i befintliga bedömningsmetoder för resursanvändning inom LCA och pekade ut ett tydligt behov av ny metodutveckling. Till exempel saknades karakteriseringsfaktorer för sällsynta jordartsmetaller i bedömningsmetoderna. Resursfrågeställningarna gavs därför mindre fokus i studie 1 än ursprungligen tänkt.

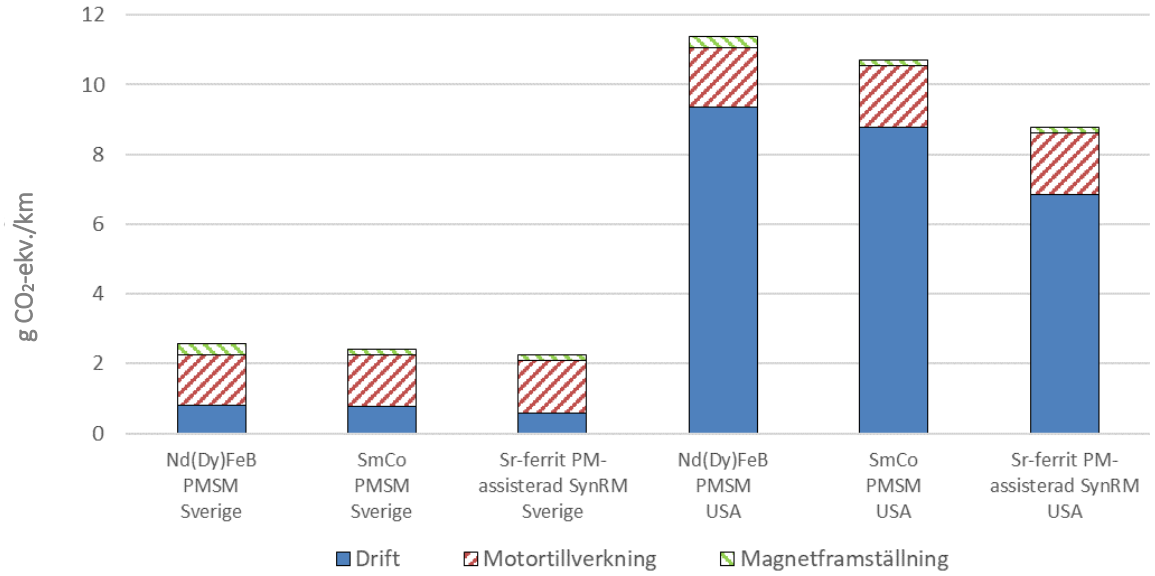
Figur 12.2 (sida 115) visar resultaten för klimatpåverkan och figur 12.3 (sida 115) redovisar resultat för icke-cancerogen toxicitet. Tillsammans med kategorin för cancerogena giftutsläpp, vars resultat i stort har ett liknande mönster som det för icke-cancerogena utsläpp, är dessa de resultat som bedömdes vara mest intressanta i studie 1.

Figur 12.1: Flödesschema för det system som modellerades i LCA-studie 1.

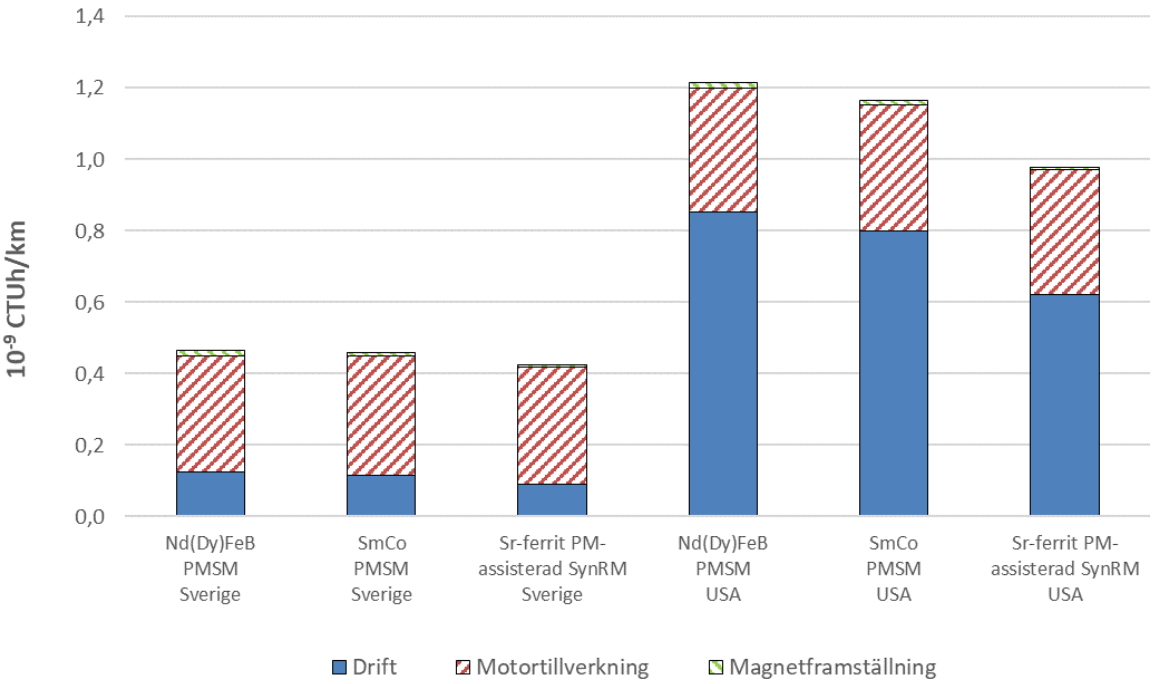


Resultatet för utsläpp som påverkar klimatet visar stor skillnad beroende på om det geografiska scenariot förlägger produktionen och driften av motorerna i Sverige eller i USA, vilket i sin tur huvudsakligen beror på koldioxidintensiteten i elförsörjningen i respektive land. I USA, där fossila bränslen är en betydligt vanligare energikälla än i Sverige, så blir hög effektivitet under drift avgörande för vilket motoralternativ som totalt sett kommer ut som mest fördelaktigt, eftersom driftsfasens koldioxidutsläpp orsakas av den laddning som krävs för att kompensera för de förluster som genereras i och av elmotorerna när det driver fordonet framåt. I detta fall blir det synkronreluktansmotorn med ferrit-magneter som är det minst förorenande alternativet eftersom den visade sig ha lägst energiförbrukning i drift. Här kan vi också nämna att den extra robusthetsanalysen för driftsfasens energiförbrukning som genomfördes visade på samma rangordning mellan motorerna avseende vilken som är minst, respektive mest, energikrävande för fem av sex tillkommande körcykler. Den sjätte, som var en generellt mer energikrävande stadskörningscykel, pekade dock ut synkronreluktansmotorn med ferrit-magneter som mest energikrävande. Resultaten för klimatpåverkan från magnetframställningen har ett liknande mönster som driftsfasen, mellan alternativen, men ger ett betydligt mindre bidrag totalt sett. Magnettillframställningens utsläpp domineras av förbränningen av fossila bränslen i den kinesiska energisektorn.

Figur 12.2: Klimatpåverkan från de olika elmotoralternativen, totalt och för olika livscykelfaser, angivet per kilometer som fordonet kör.



Figur 12.3: Bidrag till icke-cancerogen toxicitet från de olika elmotoralternativen, totalt och för olika livscykelfaser, angivet per kilometer som fordonet kör.



Motortillverkningssteget ger ungefär lika stort bidrag i koldioxidutsläpp för alla motoralternativ, med något mindre bidrag om tillverkningen sker i Sverige jämfört med USA. Figur 12.2 visar dock tydligt att medan driftsfasen dominerar i USA-scenariot, så är det tillverkningsfasen som dominerar i det svenska scenariot. Framställning av stål för rotorns och statorns laminat är den största orsaken till utsläpp från tillverkning, följt av aluminiumframställning för huset och att göra koppartråd för lindningarna. Totalt står magnetframställning och motortillverkningen för 1,8–2,0 CO_2-ekv./km för Nd (Dy) FeB PMSM (referensmotorn) och 1,7–1,9 CO_2-ekv./km för de andra två alternativen.

Tre olika typer av giftspridning undersöktes i studien: ekotoxicitet i sötvatten samt cancerframkallande och icke-cancerframkallande toxicitet för människor. Sammantaget var mönstren i alla tre kategorierna lika, det vill säga figur 12.3 är i viss mån representativ för all typ av giftspridning. Rangordningen för motoralternativen fanns vara direkt kopplad till energiförbrukningen i driftsfasen, även när den inte var den dominerande fasen totalt sett, till exempel i det svenska scenariot i figur 12.3. Olika tungmetaller som sprids till näraliggande vattendrag från gruvdrift, anrikning och framställning av metaller är de viktigaste källorna för alla typer av toxicitet, såsom koppar, zink, arsenik, krom och nickel. Framställning av stål och aluminium ger betydande bidrag liksom utvinning av fossila råvaror för elproduktion. Den viktigaste gemensamma nämnaren för alla undersökta toxicitetskategorier är dock produktion av koppar, för alla motortyper och i båda de geografiska scenarierna. I figur 12.3 är det den dominerande orsaken till miljöpåverkan för alla alternativ. Viktiga utsläpp från primär kopparproduktion kopplas till svavelhaltigt gruvslagg som läcker tungmetaller som till exempel arsenik, zink och koppar.

I jämförelse ger magnetframställningen mindre bidrag till giftutsläpp för alla studerade alternativ. Icke desto mindre görs noterbara utsläpp från produktionen av grafitanoder för reduktion av neodym-oxid, samt från upparbetningen och gruvslagg för sällsynta jordartsmetaller. För SmCo-magneterna ger koboltproduktion betydelsefulla bidrag.

Totalt sett visar både figur 12.2 och 12.3 liknande mönster i resultaten, där totalresultatet visade sig avgöras av storleken på motorns energiförluster under drift. Skillnaden i miljöpåverkan mellan motoralternativen blir därmed också större i USA-scenariot eftersom utsläppen från elproduktionen där är genomgående högre än i Sverige-scenariot.

12.1.4 Slutsatser

Sammantaget har den ferritmagnetassisterade synkronreluktansmotorn den minsta miljöbelastningen av de tre motoralternativen på grund av dess breda arbetsområde med hög effektivitet jämfört med de två PMSM-alternativen. Oavsett hur laddningselen genereras så minskar hög effektivitet driftsfasens roll och därmed också kopplade effekter på klimatförändringar, markanvändning, och människors hälsa.

Att sträva efter ökad effektivitet utan att ha tillgång till ytterligare mer detaljerad designvägledning kan leda till större motorer, varvid miljöbördan flyttas till produktionsfasen, och delvis omintetgöra fördelar under drift. Resultaten i studie 1 visade att både koppar- och aluminiumanvändning bör om möjligt reduceras, till exempel genom att minimera ändlindningen och genom att designa motorhuset så litet som möjligt utan att göra inskränkningen på funktionen. Studien indikerade också att den klimatpåverkan som uppkommer vid tillverkningen av elektroplåt kan hanteras genom att välja metoder för tillverkning baserad på stansning i segment som genererar mindre skrot jämfört med stansning av laminat i hela stycken, både för statorn och rotorn. Direkta återvinningsvägar

från bearbetningen av elektroplåt tillbaka till smältningen av samma specifika legering skulle också vara fördelaktigt jämfört med nuvarande handel med stålskrot där risken för försämrad materialkvalitet och förlust av specifika legeringsämnen är stor.

Delvis i strid med förväntningarna på LCA-studie 1 så visade sig inte magneterna vara avgörande för elmotorernas miljöprestanda. Istället fanns deras påverkan i första hand vara indirekt, det vill säga att deras egenskaper styr mängden andra material som används i designen. Men det viktigt att framhålla att resultaten för resursanvändning visade sig vara mycket osäkra och skilja sig åt mellan olika utvärderingsmetoder. Dessutom, inte minst när det gäller resursanvändning, så är återvinning av hela motorn när den nått sin fulla livslängd en uppenbar metod för att ytterligare minska belastningen för alla studerade motoralternativ, även om det inte kvantifierades i denna studie.

Speciellt pekade studie 1 ut att återvinning av all koppar med bevarad materialkvalitet inte kan förväntas med dagens EoL-hantering, men också att en förbättring utöver nuvarande praxis vore ett sätt att minska belastningen på människors hälsa och resursanvändning orsakad av kopparproduktion. Studien lyfter också fram att det kan åstadkommas genom att demontera motorer från fordonet före fragmentering och genom att i möjligaste mån separera materialet till så rena fraktioner som möjligt.

12.2 LCA-studie 2: Variation av statordesignen för att undersöka långtgående materialåtervinning

I LCA studie 2 lades fokus på ändringar av statordesignen och olika typer av lindningar, samt på End-of-Life-systemet och materialåtervinning. Studien utgick från samma grunddesign som studie 1, det vill säga typen RFM PMSM. Tre olika designlösningar undersöktes och bland dessa ingick, liksom i studie 1, referensmaskinen med distribuerad trådlindning av koppar och instuckna magneter som presenteras i avsnitt 10.2.1. Därtill varierades statorlindningen med att byta materialet i lindningstråden till aluminium, i linje med beskrivningen i avsnitt 10.2.3. Denna maskin är identisk sett till geometrin jämfört med den med kopparlindning, men har lägre vikt på lindningen (se tabell 10.2 för redovisning av vikter och geometri).

Utöver detta inkluderades även den elmaskin med hårnålslindning som presenteras i avsnitt 10.2.5. Dess stators tvärsnittsdesign skiljer sig en aning från de två andra varianterna då spåren är mer rektangulära, vilket också leder till att spårisoleringen är något modifierad jämfört med de trådlindade maskinerna. Men viktigast ur ett materialperspektiv är att eftersom elmotorn med hårnålslindning har högre förmåga att leverera effekt och vridmoment, så är den aktiva längden 27 mm kortare än referensmotorn för att den skall uppnå samma prestanda. Detta reducerar i sin tur vikten på både rotorn och statorn, och denna maskin har lägst totalvikt av dem som undersöktes i studie 2. Rotorns tvärsnitt är emellertid identiskt för samtliga alternativ och de använder allihop samma typ av magnet, Nd(Dy)FeB-varianten.

En följd av designvariationerna mellan de tre studerade motoralternativen är att de, på samma sätt som i studie 1, har olika totalvikt och materialkomposition samt olika verkningsgrad vid drift. Med utgångspunkt från resultaten från studie 1, där användningen och framställningen av koppar var avgörande, så bedömdes dessa tre alternativ som specifikt intressanta att jämföra i kombination med mer detaljerad modellering av EoL-systemet. Ett viktigt steg i analysen av EoL-systemet var att arbeta fram de materialflödesanalysmodeller av de initiala separerings- och sorteringsstegen som redovisas i kapitel 11. LCA-studie 2 inkluderar dessa modeller som en delmängd av livscykeln och kopplar ihop dem med de bearbetningsprocesser

som krävs för att återfå materialråvaror av samma kvalitet som de som ingick i tillverkningen av elmotorerna. Studien gav därmed möjlighet att jämföra miljöeffekterna av dagens typiska EoL-hantering baserad på fragmentering jämfört med en så långt tagen demontering som möjligt. Jämfört med studie 1, som inte omfattade EoL, så är därmed studie 2 en komplett analys omfattande vagga-till-grav, samt för en stor del av ingående material, en komplett kartläggning av de återvinningsprocesser som krävs för att använda dem med hög kvalitet i nya produkter.

LCA-studie 2 baserades på samma grundmodell som studie 1 avseende tillverkning av elmotorerna, inklusive magneter (Nordelöf et al., 2017, Nordelöf et al., 2018, Nordelöf och Tillman, 2018). Detta innefattade då även utvinning av sällsynta jordartsmetaller och en detaljerad modellering av driftsfasens energiförbrukning baserad på de olika motorernas prestanda, enligt vad som rapporterats tidigare i denna rapport samt vad som beskrivs mer detaljerat i Nordelöf et al. (2019a). Därutöver gjordes en omfattande datainsamling och modellering för att beskriva alla tekniska processer som krävs för återvinning i EoL-systemet, med fokus på stål från elektroplåten och andra ståldelar, aluminium i hus och lindningar, koppar i lindningar och kontaktdon, samt Nd(Dy)FeB-magneterna. Jämfört med studie 1 så arbetades det även fram två geografiskt oberoende scenarier för den el som används för tillverkning och laddning samt demonterings- och återvinningsprocesser, med utgångspunkt från projektioner gjorda av World Energy Outlook för 2019 publicerad av International Energy Agency (IEA, 2019c).

12.2.1 Mål och omfattning

LCA-studie 2 genomfördes för att undersöka hur valet av statorkonstruktion och lindningsmaterial i elmaskiner för fordon inverkar på deras miljöpåverkan. En viktig målgrupp för studien var företag som utvecklar och tillverkar denna typ av elmaskiner, samt för fordonsindustrin som utvecklar nya modeller med elektrisk drift. En annan huvudsaklig målgrupp var aktörer i EoL-systemet för att ge dem möjlighet att se hur denna del av livscykeln påverkar miljöbelastningen från elmotorer, samt i vilken mån förändringar i dessa processer kan ändra resultaten. Även myndigheter och akademiska forskare med fokus på fordonsteknikutveckling eller miljöbedömning av fordon ingick i målgruppen. Syftet med studien var att ge underlag för kravsättning, både avseende motorerna och EoL-systemet, genom att tillhandahålla information om hur miljöbelastningen förändras med variation av statorns lindningsdesign, samt därtill kopplade förändringar i motorns storlek, vikt och energiförbrukning, samt att studera EoL-systemets potential för förbättrad materialåtervinning.

Tre motoralternativ jämfördes, samtliga med Nd(Dy)FeB-magneter:

- PMSM utrustad med distribuerad trådlindning av koppar - **referensmotorn**
- PMSM utrustad med distribuerad trådlindning av aluminium
- PMSM utrustad med distribuerad hårnålslindning av koppar

Jämförelsen utgick ifrån att samtliga tre motorer skulle ha samma ytterdiameter på statorn och rotorn samt klara följande prestandaparametrar för ett gemensamt referensfordon:

- hantera samma start, det vill säga lika förmåga att tillhandahålla vridmoment för acceleration 0–50 km/h
- tillhandahålla samma topphastighet (145 km/h)
- klara driften för hela den körcykel som valdes för utvärderingen av användningsfasens energieffektivitet, WLTC (se beskrivning i avsnitt 8.3.1)

De tre maskinerna har ungefärligt samma accelerationsprestanda och toppeffekt på 100 kW. Vikter och geometri för samtliga undersökta motorer redovisas i tabell 10.2. Studiens funktionella enhet är en körd fordonskilometer, och samtliga motorer antogs ha en total livslängd på 200 000 kilometers drift på den valda körcykeln, baserat på en teknisk bedömning av författarna som också överensstämde med antaganden gjorda i andra LCA-studier av elektriska fordon.

Också denna studie genomfördes som en så kallad bokförings-LCA, det vill säga den uppskattar vilken andel av den globala miljöpåverkan som kan hänföras till den studerade produkten (Ekvall, 2020). Ett viktigt skäl är att denna typ av LCA studie är additiv, vilket innebar att insamlade data och beräknade resultat därmed kan utgöra en byggsten för fortsatta LCA studier.

Studiens omfattning avgränsades för att möjliggöra transparens och distinkt analys. All data som representerar bakgrundssystemet, det vill säga sådana processer där data inte samlats in specifikt för studien eller för att beskriva elmotortillverkning, till exempel transporter, processkemikalier, råvaruutvinning och framställning av grundmaterial och el-generering, modellerades med data från version 3.6 av databasen Ecoinvent (Wernet et al., 2016). Geografiskt representerar detta data globala eller regionala medelvärden för en stor mängd produkter och tjänster, samt i vissa fall nationella medelvärden. Modellen utgick från samma beskrivning av magnettillverkning i Kina som LCA-studie 1, men däremot har användning av all el i förgrundsystemet, inklusive magnettillverkningen, kopplats till de övergripande scenarier för elförsörjningen som modellerats för ett med hög koldioxidintensitet och ett med låg koldioxidintensitet. Detta utgick från den slutpunkten (år 2040 i senaste utgåvan av World Energy Outlook) för de projektioner som sammanställts av International Energy Agency (IEA, 2019c) för (a) ”hållbar utveckling” och (b) ”nuvarande policy”.

Sett till livscykelfaser så omfattade studien tillverkning, drift och demontering av motorerna, samt återvinning av både produktionsspill och kasserade motorer i EoL. Av denna anledning har endast bakgrundsdata som representerar jungfrulig framställning av metaller använts uppströms, som råvaror till motor- och magnettillverkningen. För att ta fram denna representation omarbetades ett stort antal så kallade enhetsprocesser i databasen Ecoinvent (Wernet et al., 2016), som också kompletterades med ny information och data. På detta sätt möjliggjordes en metodologiskt sammanhållen modell i livscykelns båda ändar, samt att det på ett väl definierat sätt går att avskriva miljöbörda från livscykeln för de material som går vidare från EoL-systemet till nya produkter. Det innebar samtidigt att den systemmodell som användes i vissa fall gav högre miljöbörda för materialframställning för samma komponenter jämfört med LCA-studie 1. De tekniska processer som beskrivs i EoL-systemet bygger på datainsamling från verksamhet i flertal länder i Europa.

Liksom i studie 1 så är resultatet i driftsfasen kopplat till varje motors energiförbrukning beräknad med utgångspunkt från endast en körcykel, WLTC.

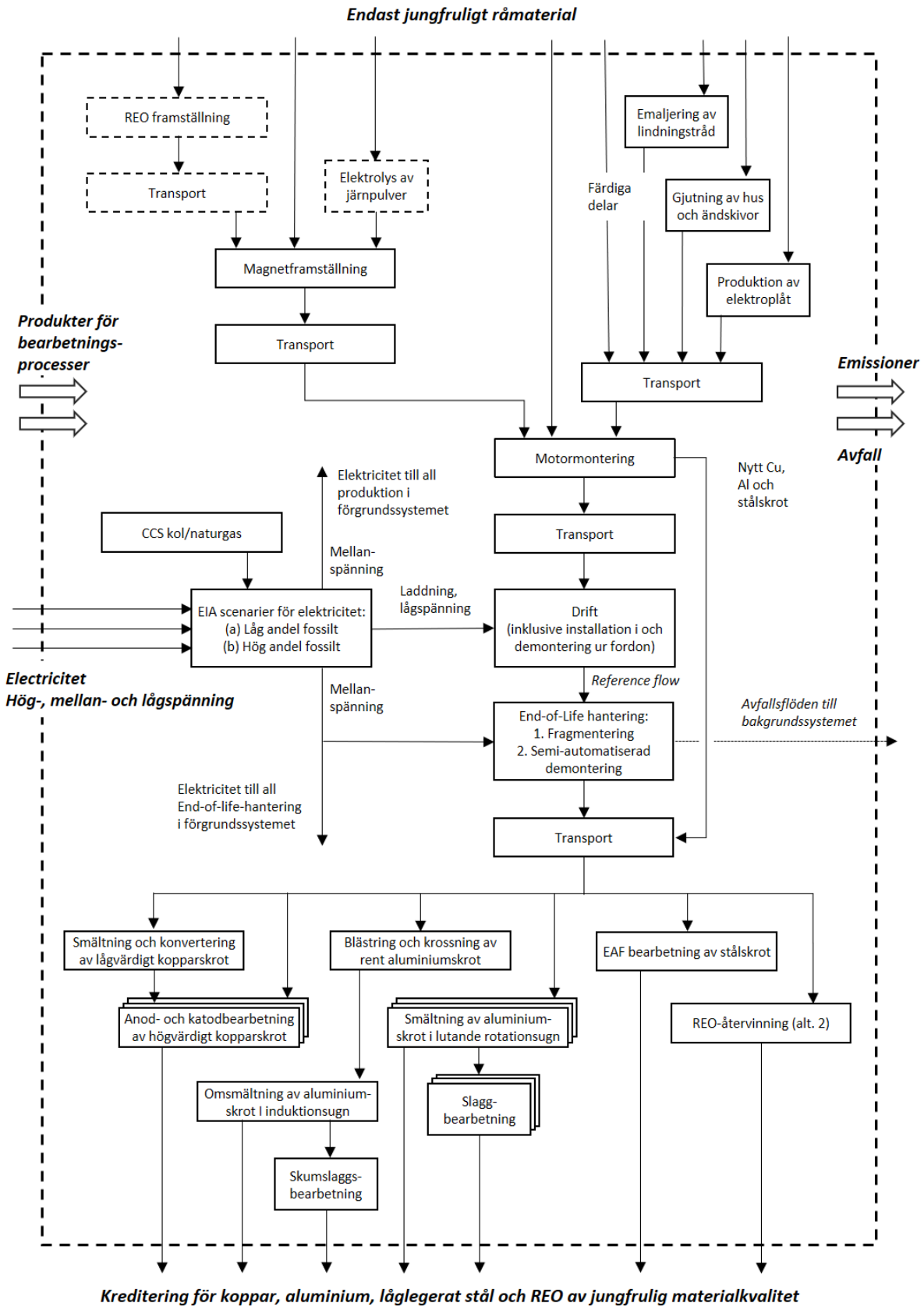
12.2.2 Inventeringsanalys

Figur 12.4 (nästa sida) redovisar ett översiktligt flödesschema för det system som modellerades, datasattes och analyserades i studie 2.

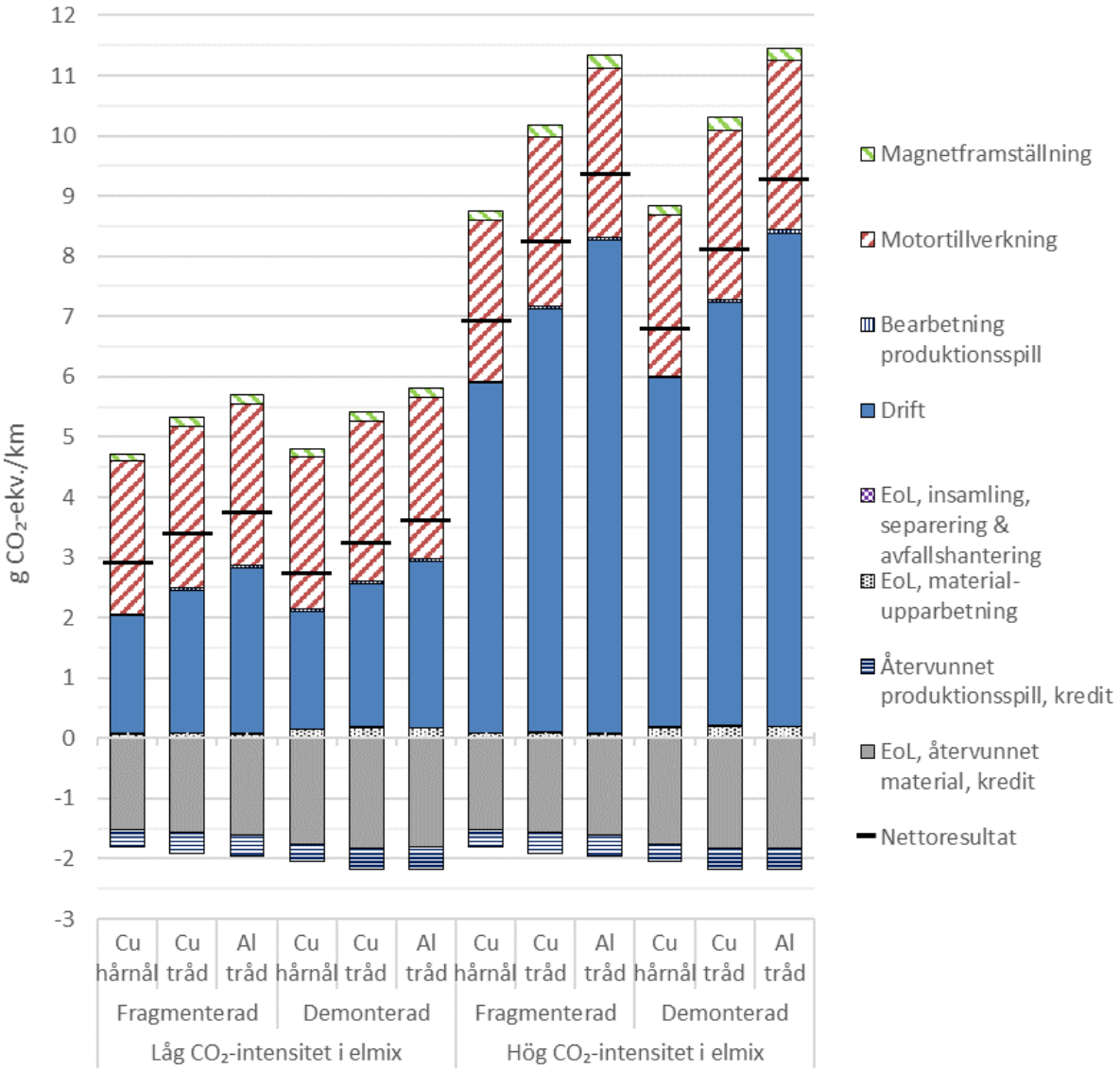
12.2.3 Resultat för utvalda miljöpåverkanskategorier

Även i LCA-studie 2 lades fokus på klimatpåverkan och toxiska utsläpp, oftast orsakade vid brytning och förädling av metaller, på grund av dessa miljöpåverkankategoriers avgörande

Figur 12.4: Flödesschema för det system som modellerades i LCA-studie 2.



Figur 12.3: Klimatpåverkan från de olika elmotoralternativen, totalt och för olika livscykelfaser, angivet per kilometer som fordonet kör.



bidrag till den totala miljöpåverkan i enlighet med LCA-studie 1. Till detta lades ett förnyat fokus på resursanvändning eftersom metodutveckling gjord parallellt med projektet nu möjliggjorde användning av en helt ny bedömningsindikator, med inriktning på långsiktig knapphet i jordskorpan (Arvidsson et al., 2020).

Mer övergripande är det värt att påpeka att just dessa påverkanskategorier är typiskt intressanta i de flesta LCA-studier kring elektromobilitet (Nordelöf et al., 2014). En tydligt drivkraft inom elektrifiering av framdriftssystem, och därmed elmaskiner som ingår i dessa system, är att minska bidragen till klimatpåverkan, som i sin tur ger belastning på både ekosystem och mänsklig hälsa. Tidigare studier tyder då på att möjliga fördelar sett till klimatpåverkan kommer med en ”trade-off” i form av resursrelaterade utmaningar, det vill säga annan påverkan på mänsklig hälsa, ofta i andra delar av livscykeln, samt genom att mer

och fler mineralresurser tas i anspråk. Dessa observationer är speciellt intressanta i detta projekt som handlar om att säkerställa materialresurser för framtida användning.

Figur 12.3 (föregående sida) visar resultaten för klimatpåverkan. Vid hög koldioxidintensitet i laddningselen, det vill säga när det ingår en större andel fossila energikällor i framställningen av el, så utgör driften den livscykelfas som ger störst utsläpp. Vid låg koldioxidintensitet i laddningselen är driften fortfarande avgörande för rangordningen mellan alternativen, det vill säga att effektiviteten i drift är det som avgör resultaten. Den effektivaste motorn av de tre studerade alternativen, den med hårnålslindning av koppar, kommer ut som det mest fördelaktiga alternativet.

En närmare analys av resultaten i figur 12.3 visar också att när alla ingående delkomponenter modellerades med framställning från jungfruliga metallresurser, så skiljer sig resultatet för tillverkningsfasen i LCA studie 2 tydligt jämfört LCA studie 1 avseende aluminiumdelar. Belastningen sett till koldioxidutsläpp är avsevärt högre i studie 2. I gengäld visar då samtidigt också resultatet för End-of-Life-systemet att återvinning av aluminiumdelar tydligt också bidrar till att minska miljöbelastningen när detta material tas i anspråk på nytt. Tillverkning av elektrostållaminat och andra ståldelar ger också en noterbar klimatpåverkan, och på samma sätt som för aluminium medför därför en välfungerande återvinning en viss minskning av denna miljöpåverkan.

Resultaten för studie 2 bekräftar också att magneterna endast har en mindre betydelse klimatpåverkan. Därtill utgör hanteringen av magneterna, och återvinningen av de sällsynta jordartsmetallerna, en viktig förklaring till att belastningen i materialupparbetningssteget är klart tydligare observerbar i det semiautomatiserade demonteringsalternativet. Samtidigt är de koldioxidutsläpp som sparas då framställda sekundära sällsynta jordartsmetallerna ersätter motsvarande jungfruliga mängder, lägre än vad utsläppen från dessa återvinningsprocessteg är, och magnetåtervinningen innebär en faktiskt nettobelastning.

Resultat för giftutsläpp visas i figur 12.4 (som redovisar icke-cancerogen toxicitet, se nästa sida). Här är det noterbart att driftsfasen minskar i betydelse totalt sett jämfört med figur 12.3 och det är ingen uppenbar skillnad på belastningen beroende på CO_2-intensiteten i laddningselen. Återigen ger magnet-framställningen, och de ingående sällsynta jordartsmetallerna, relativt liten påverkan. Skillnaden mellan alternativen med kopparlindning, både för distribuerad och hårnålslindning, och varianten med aluminiumlindning, visar skillnaden mellan den börda som härrör från koppar respektive aluminiumutvinning, och även då fördelarna med återvinning av dessa metaller sett till toxicitet. Framställning av primär aluminium orsakar dock större utsläpp av gifter som är cancerogena vid hanteringen av så kallat rödslam, vilket är en avfallsprodukt från steget då bauxit förädlas till aluminiumoxid.

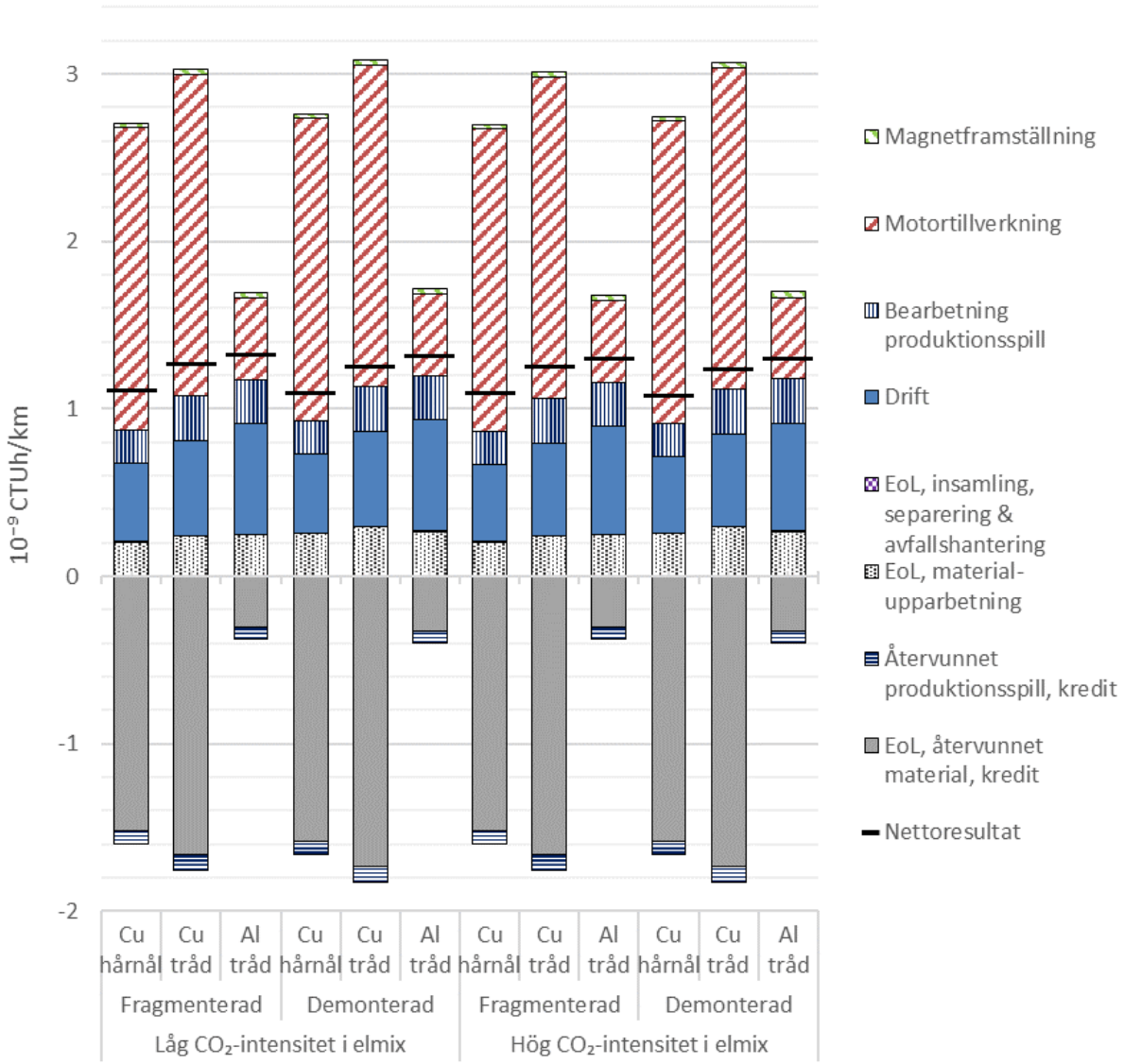
Resultaten i figur 12.4 visar också att både framställning jungfruligt stål och bearbetning av stålskrot ger toxiska utsläpp, och det gäller även i den kategori som avser cancerframkallande ämnen, som ej redovisas grafiskt här. Båda dessa processer skapar avfall och slagg som innehåller tungmetaller, och framförallt är slagget från ljusbågsugnar en källa till utsläpp av krom vid återvinning av stålskrot. Dessa omständigheter utgör den huvudsakliga förklaringen till att både bearbetning av produktionsspill och materialupparbetning i End-of-Life-steget får en mycket tydligare roll i livscykeln när toxicitet beaktas, jämfört med andra miljöpåverkanskategorier.

LCA-studie 2 omfattade även en utvärdering av resursanvändning. Resultaten för denna påverkanskategori redovisas i figur 12.5 (sida 124), och de representerar en nyutvecklad indikator för olika metallers långsiktiga knapphet, baserat på deras förekomst i jordskorpan (Arvidsson et al., 2020). I denna figur är det väl synligt, vid jämförelse med de två tidigare

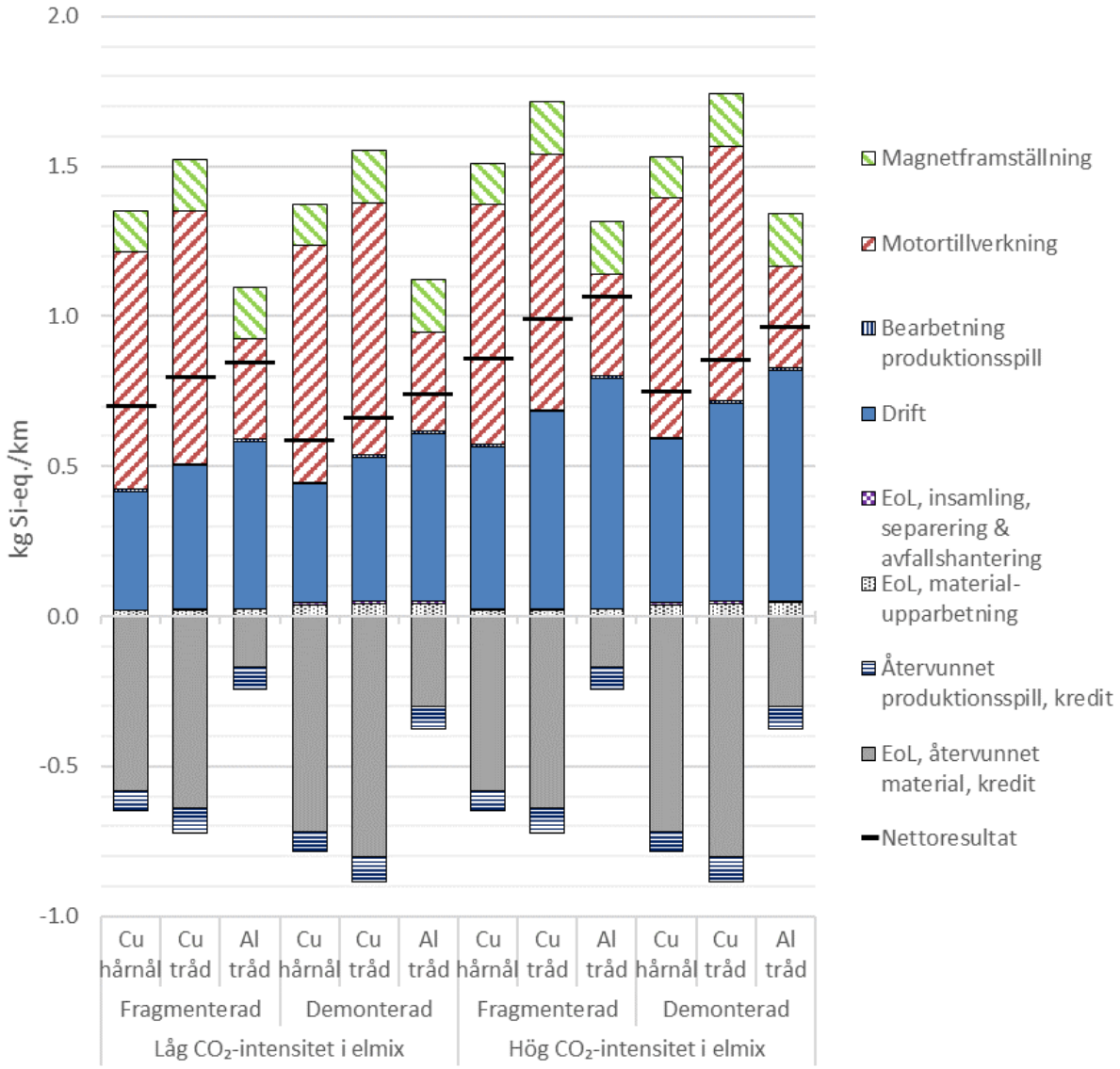
resultatdiagrammen för LCA-studie 2, att de sällsynta jordartsmetallerna som ingår i magneterna har en större betydelse som råvaruresurser än vad deras bidrag är till de studerade elmotorernas övriga miljö- och hälsopåverkan över livscykeln. Här är det också noterbart att semiautomatiserad demontering och återvinning av magnetmaterialen följaktligen ger en lite större reducerande effekt på nettoresultatet.

Den metall som ger störst utslag i figur 12.5 är emellertid koppar. Precis som i figur 12.4 för toxicitet så uppvisar alternativen med koppar i lindningen störst amplitud i stapeldiagrammet, det vill säga att en stor börda uppstår vid materialutvinningen och denna kompenseras sedan med en relativt hög återvinningsgrad i End-of-Life. Mer generellt går det därmed att observera att mängden koppar som ingår i en elmotor, och hur stor andel av denna som sedan återvinns, är avgörande för hur den bedöms avseende sitt beroende på långsiktigt knappa metallresurser.

Figur 12.4: Bidrag till icke-cancerogen toxicitet från de olika elmotoralternativen, total och för olika livscykelfaser, angivet per kilometer som fordonet kör.



Figur 12.5: Utvärdering av resursanvändning, mätt som långsiktig knapphet i jordskorpan, för de olika elmotoralternativen, totalt och för olika livscykelfaser, angivet per kilometer som fordonet kör.



12.2.4 Slutsatser

LCA-studie 2 befäster de flesta av slutsatserna i studie 1, men tonar ner behovet att minska mängden aluminium i huset, om det återvinns. Speciellt ur klimatsynvinkel är aluminium viktigt att återvinna, så länge primäraluminiumtillverkningen till stor del försörjs med energi direkt ifrån kolkraftverk, vilket fortfarande är fallet vid många aluminiumsmältverk. Här är det viktigt att lyfta fram att i studie 1 inkluderades endast den nettomiljöbörda som uppstår för material med återvunnet innehåll då en viss andel jungfruligt råmaterial blandas med sekundärt råmaterial för vilket tidigare aluminiumprodukter burit miljökostnaden för den initiala och jungfruliga utvinningen. Gjutaluminium, vilket är det som modellerats för huskroppen och ändskivorna i alla studerade motorer, innehåller till exempel i medeltal 70%

återvunnet material. I LCA-studie 2, när allt råmaterial istället modellerades som jungfruligt, är bidraget till klimatpåverkan avsevärt högre för aluminium under tillverkningsfasen, och effekten att aluminium bidrar mer till klimatpåverkan än elektroplåt i rotor- och statorkärnan. Här bör det också nämnas att elektroplåt är en typ av specialstål vars legering utgår från olegerat stål, som i typfallet endast innehåller en mindre mängd återvunnet stålskrot och som därmed skiftar mindre i börda när jungfrulig malm utgör 100% av råvaran. Medelandelen återvunna metaller i olika ingående delkomponenter är alltså en viktigt faktor om man vill förstå varför resultaten skiljer sig åt mellan de två LCA-studierna, speciellt för referensmotorn som ingår i båda fallen.

En effekt av metodvalen gjorda i LCA-studie 2 är att livscykeln sträcker sig längre nedströms och följer återvinningsprocesserna till dess att de sekundära metaller som tas fram är jämförbara med och kan substituera jungfruliga metaller. Detta innebär att delsteg i End-of-Life-systemet analyseras mer noggrant och systematiskt, och resultaten visar utmaningar som är specifika för återvinningsprocesserna. Stål är ett exempel, där resultaten pekar på att både primärframställning från malm i masugn, och sekundärframställning från skrot i elektrisk ljusbågsugn, har utmaningar med giftspridning från hanteringen och deponering av slagg och avfall från ugnarna. Resultaten visar även att stålframställning från skrot ger upphov till spridning av tungmetaller när smältverket körs samt när man hanterar filtrerat damm. Även valsverk där stålet bearbetas till plåt orsakar tungmetallutsläpp. Förbättrade processer och minskade emissioner i hela denna kedja skulle därmed bidra tydligt till att minska giftutsläpp från elmotorer. Det finns även betydande osäkerheter. Krom, som ger väsentliga bidrag i ett flertal processer som kopplar till bearbetningen av skrot i ljusbågsugnar, kan härledas som ett legeringsämne främst i rostfritt stål. Det tillverkas med blandat stålskrot som råvara, inklusive tidigare rostfritt stål (Cross et al., 1999, Sperle et al., 2013). Modellering för LCA-studie 2 utgår från medelvärden både för de olika skrotkategorier som skeppas in i ljusbågsugnarna, och för de utsläpp som genereras, samt att slutprodukten inte är rostfritt stål. Samtliga studerade elmotorer innehåller främst elektroplåt, men även rostfritt och annat stål, och för att avgöra hur respektive ingående stålskrotskategori bidrar till olika typer av tungmetallutsläpp mer specifikt krävs noggrannare upplösning och analys än vad modellen medger.

Ett par ytterligare observationer är värda att lyfta fram. Semiautomatiserad demontering ger mindre fördelar än väntat i jämförelse med fragmentering, men dess relativa betydelse ökar med minskad miljöbelastning i laddningselen. En förklaring är att de processer för kopparåtervinning som ingår i studien är relativt effektiva på att återvinna koppar även vid hög sammanblandning med andra material. Men det kräver fler bearbetningssteg varvid det genereras mer slagg och avfall. En rimlig hypotes är därmed att kostnaden för dessa materialupparbetningssteg skulle bli lägre med mer effektiv separering och sortering, till exempel för köttbullar. Huruvida sådana kostnadsfördelar uppvägs av kostnadsökningar i demonteringssteget är en fråga för framtida forskning.

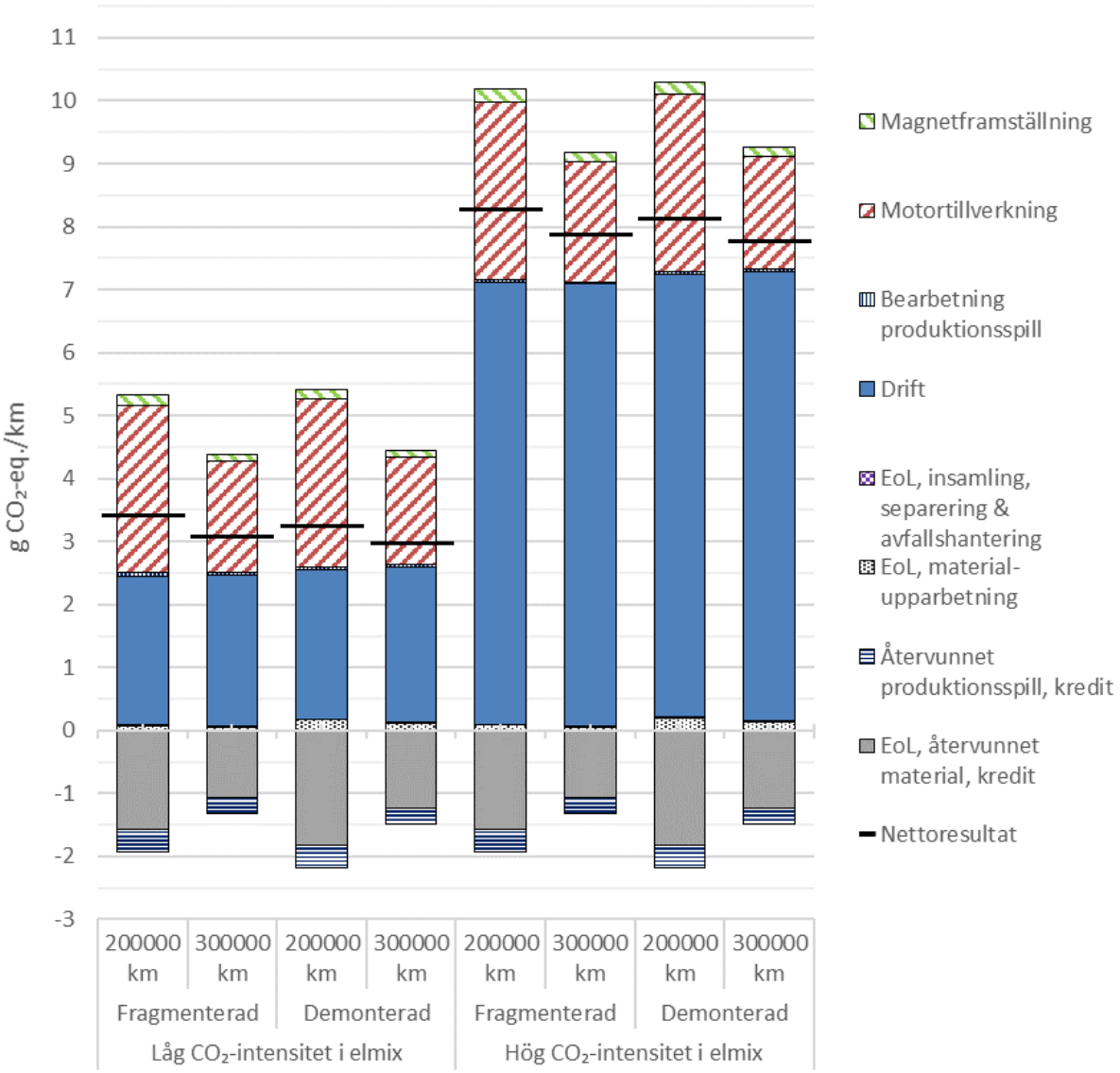
Däremot är semiautomatiserad demontering en möjlig väg framåt för att minska magneternas bidrag till miljöpåverkan sett till långsiktig resursknapphet. Samtidigt pekar samma nya bedömningsmetod ut koppar som den viktigaste metallen eftersom den förekommer i betydligt större mängder. Den relativt höga klimatpåverkan från magnetåtervinningen, som överväger fördelarna sett till enbart denna miljöpåverkan, föranleder ytterligare frågor om möjligheter att effektivisera processen.

Till sist är det värt att lyfta fram att hårnålsmotorn presterar genomgående bäst tack vare lägre energiförbrukning än övriga motoralternativ och totalt sett mindre mängd aktivt material. Då avses mängden elektroplåt i stator och rotor, mängden magneter och mängden koppar i lindningen.

12.3 Översiktlig analys av effekten av återanvändning

Inom ramen för projektet gjordes en enklare analys av olika återanvändningsscenarier för elmotorer. Denna analys gjordes endast för referensmaskinen med distribuerad trådlindning av koppar och instuckna magneter presenterad i avsnitt 10.2.1. Vidare användes modellen och systemgränserna från LCA-studie 2 för att studera hur resultaten för klimatpåverkan och resursanvändning ändrar sig om motorns livslängd sätts till 300 000 km istället för 200 000 km. Det antogs att alltså att återtillverkning möjliggör att motorns körsträcka blir 50% längre samtidigt som den medför ett byte av motoraxeln och motors kullager till motsvarande nytillverkade komponenter en gång under motorns livstid. De gamla delarna antas skickas till återvinning. Totalt sett förändras miljöbördan för tillverkningsfasen och End-of-Life-hanteringen, samtidigt som den fördelas på fler körda kilometer i fallet då livslängden ökas. I driftsfasen påverkas däremot inte resultatet eftersom energiförbrukningen per körd sträcka förblir densamma.

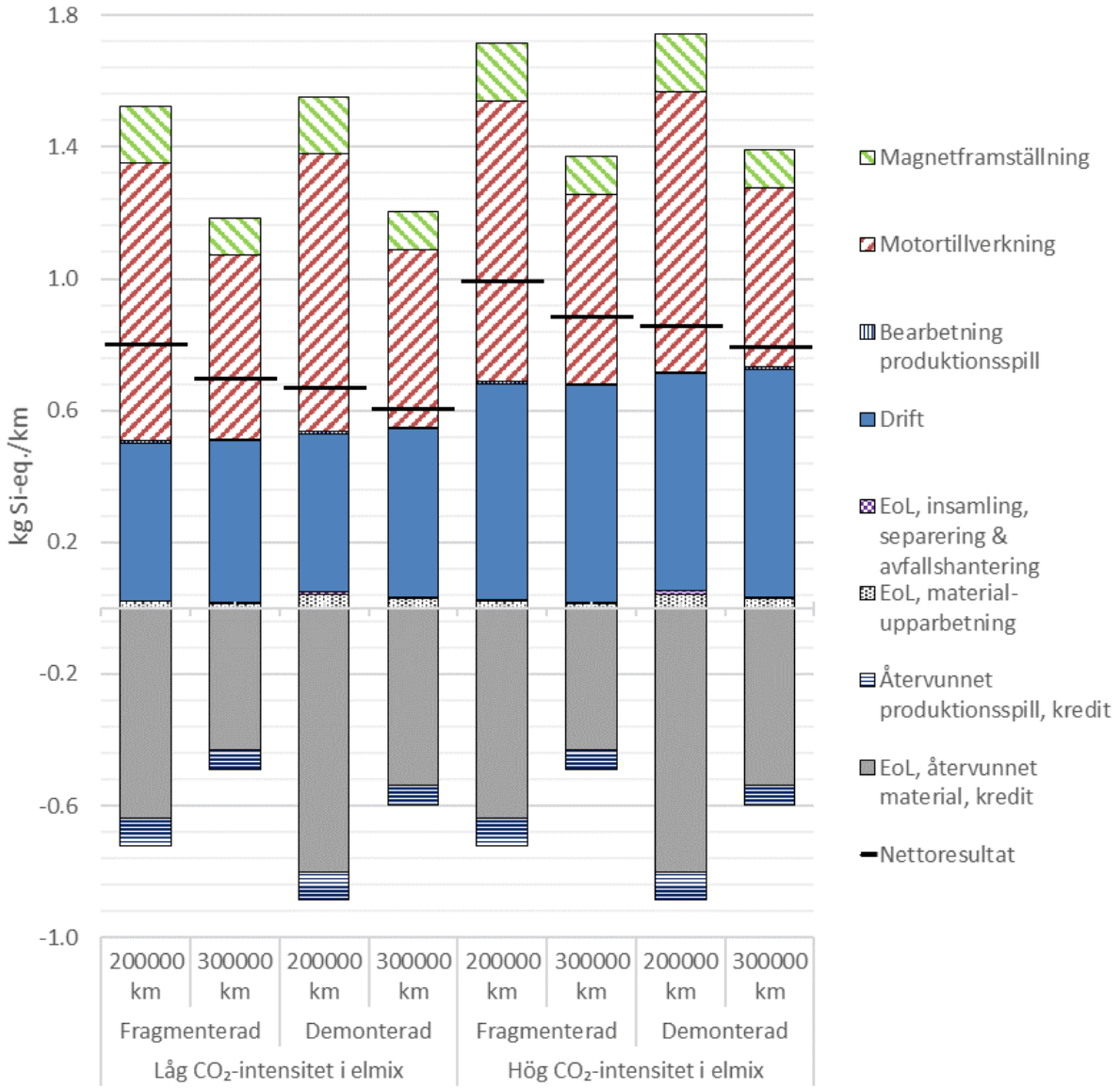
Figur 12.6: Utvärdering av bidrag till klimatförändringar för referensmotorn, totalt och för olika livscykelfaser, vid olika livslängd sett till total körsträcka, angivet per kilometer som fordonet kör.



Resultat för klimatpåverkan för de två scenarierna visas i figur 12.6 (föregående sida). Nettomiljöbelastningen minskar något för den längre körsträckan, med återanvändning, men det är tydligt att den förlängda livslängden har mindre effekt på resultatet än CO_2-intensiteten i laddningselen eller att samtliga material når välfungerande återvinningsprocesser. Däremot har den något större betydelse än valet av separationsmetod i End-of-Life-steget.

Resultaten för resurspåverkan i figur 12.7 har samma mönster, men fördelarna är generellt sett lite större än för klimatpåverkan. Resultaten visar även ett annat intressant fenomen – att fördelarna med semiautomatiserad demontering minskar ju längre livslängd motorn har, eller omvänt, att fördelen med att köra längre minskar om motorn kommer att genomgå semiautomatiserad demontering istället för fragmentering. Samtidigt är det så att fördelarna med förlängd livslängd, likväl som mer långtgående demontering, får ökad relativ betydelse med minskad miljöbelastning i laddningselen. Om strävan verkligen är att minska miljöbelastningen så mycket som möjligt så är det fördelaktigt att kombinera båda åtgärderna.

Figur 12.7: Utvärdering av resursanvändning, mätt som långsiktig knapphet i jordskorpan, för referensmotorn, totalt och för olika livscykelfaser, vid olika livslängd sett till total körsträcka, angivet per kilometer som fordonet kör.



DEL 4 – REKOMMENDATIONER

I denna sista del av rapporten sammanfattas projektets resultat som rekommendationer, dels för designen av elmaskinerna, dels för End-of-Life-systemets utveckling. Slutligen identifieras framtida forskningsbehov.

13. Designrekommendationer

Elmotorernas design har implikationer för såväl klimatpåverkan som resursanvändning. Designrekommendationerna i detta avsnitt har strukturerats utifrån dessa två aspekter. Det är viktigt att notera att de två aspekterna många gånger står i motsats till varandra - en minskning av klimatpåverkan sker ofta till priset av en ökad resursanvändning.

Klimatfrågan är akut och kräver snabba åtgärder, medan risken för geologisk resursknapphet är mer långsiktig. Det gör att det finns ett visst utrymme att vinna klimatfördelar till priset av en ökad resursanvändning. Detta är också vad som sker vid utbygganden av flera nya energitekniker, där elektrifieringen inom transportsektorn är ett exempel bland flera och där elmotorn bara är en del en elektrifierad drivlina. Det är emellertid mycket viktigt att utvecklingen av klimatsmarta tekniker sker med medvetenhet om de långsiktiga resursbegränsningarna, för att minska risken för inlåsning i tekniklösningar som är långsiktigt ohållbara. Det skall också noteras att försörjningen av vissa material riskerar att begränsas på kort sikt av geopolitiska förhållanden som handelsrestriktioner, snarare än av geologisk knapphet.

13.1 Designval med klimatpåverkan

LCA-studierna visar att energianvändning under drift är avgörande för vilken klimatpåverkan olika designlösningar ger upphov till. De aspekter som avgör energianvändningen är dels verkningsgraden över körcykeln (till skillnad från verkningsgraden i enskilda driftpunkter), dels motorns vikt, eftersom motorn skall driva hela fordonet, inklusive sin egen vikt. Motorns vikt har dock mindre betydelse än verkningsgraden över körcykeln. Nedan följer vilka designimplikationer man kan se av detta.

13.1.1 För lindning

Koppar i lindningen ger högre verkningsgrad än aluminium eftersom energiförlusterna är lägre. Aluminium ger vissa fördelar i End-of-Life-fasen, på grund av att det finns stora miljöfördelar med aluminiumåtervinning och eftersom denna är effektiv. Dock är denna effekt inte tillräcklig för att kompensera för den högre energiförlusten i aluminiumlindningen under drift.

En större andel koppar i det aktiva tvärsnittet av motorn ger en högre effekttäthet vilket innebär att mindre mängd material krävs totalt för att leverera samma prestanda. Då kan motorn göras kortare och därmed lättare, vilket bidrar till att minska energiförlusterna under drift. Det innebär att hårnålslindning och koncentrerad lindning är fördelaktigt från miljö- och resurssynpunkt.

13.1.2 För magneter

Svaga magneter som Sr-ferrit ger låg energianvändning över körcykeln, på grund av att de ger låga energiförluster vid höga varvtal. Trots att en sådan motor måste göras längre, och därmed blir tyngre, än motsvarande motor med starka neodymbaserade magneter, så uppväger ökningen i verkningsgrad detta. Det skall dock noteras att Sr-ferrit magneter inte är stabila i hela det temperaturintervall som är av intresse för applikationer på kallare breddgrader

(temperaturer under cirka 20ºC). En framtida utveckling mot motorer med svagare magneter måste lösa denna fråga.

SmCo-magneter, som är något svagare än de av Nd(Dy)FeB, ger en måttlig minskning av energianvändningen över körcykeln, men kräver samtidigt att motorn görs längre, och därmed tyngre, för att uppnå samma prestanda. I detta fall spelar effekten av den tyngre motorn större roll än den minskade energianvändningen, vilket gör lösningen mindre intressant.

Resultaten pekar dock mot att det kan finnas framtida möjligheter i att kombinera svagare magneter med motordesigner som har högre effekttäthet, det vill säga mer koppar i spåret. Ett ytterligare alternativ är att kombinera designlösningar med hög effekttäthet med en mindre mängd starka magneter.

13.1.3 För val av motorns flödestyp och rotorns tvärsnittsdesign

Bland radialflödesmaskinerna är PMSM den dominerande typen idag, men PMaSynRM ger lovande resultat ihop med svaga magneter. Resultaten indikerar att det kan vara intressant att undersöka motorer av PMaSynRM-typ med starkare magneter.

De fordonskrav som valdes i projektet gav transversalsflödesmaskinen väsentligt högre energiförbrukning över körcykeln än radialflödesmaskinerna. Också axialflödesmaskinen gav en högre energiförbrukning i körcykelberäkningarna. Detta bör inte tolkas som att dessa maskintyper generellt sett skulle ge sämre resultat. Istället är den lägre verkningsgraden ett resultat av fordonskravsättningen. Till exempel skulle transversalsflödesmaskinen ge bättre utfall för applikationer med ett lägre maxvarvtal och där en större diameter tillåts. Även axialflödesmaskinens energiförluster i järnkärnan skulle kunna reduceras betydligt om en större ytterdiameter tilläts.

13.2 Designval som påverkar resursanvändningen

Även om klimatpåverkan relaterad till driftsenergi är viktig i LCA-resultaten är resursanvändningen över livscykeln en betydande aspekt, och den som i första hand lyfts fram i diskussionen om en cirkulär ekonomi. Resursanvändning har implikationer för mer långsiktig resursknapphet men också för kostnader och mer kortsiktig säkerhet i materialförsörjningen, så kallad kritikalitet (förklarat i kapitel 4). Den aspekt som undersökts i LCA-studierna i projektet är den långsiktiga knappheten.

Resursanvändningen för elmotorer kan minskas designmässigt genom val av material som är mindre knappa eller genom att designen innehåller mindre mängd av de material som är knappa. Men den kan också minskas genom att öka livslängden på motorn och/eller dess komponenter, till exempel genom renovering och återanvändning, liksom genom materialåtervinning. Designrekommendationer med implikationer för resursanvändning presenteras i det följande utifrån dessa tre aspekter.

13.2.1 Materialval och mängd material

Materialval i framdriftsmotorer som har väsentlig betydelse för olika miljö- och resursindikatorer är aluminium, elektroplåt, koppar samt magnetmaterialen. Framställning av aluminium, elektroplåt och koppar ger en stor miljöpåverkan. Koppar, kobolt och de sällsynta jordartsmetallerna är geologiskt knappa. Gruppen sällsynta jordartsmetaller, liksom kobolt, klassas också som kritiska enligt EU:s klassificering, vilket betyder att de bedöms utgöra en

försörjningsrisk samtidigt som de är ekonomiskt viktiga för EU. Alla materialslagen ger väsentliga bidrag till materialkostnaden.

Motorer bör därför designas så att de utnyttjar de ovan nämnda materialen så effektivt som möjligt, till exempel genom en hög effekttäthet i det aktiva tvärsnittet.

Användningen av *koppar* är en utmaning för elektrifieringen i stort, och kanske speciellt för elmaskiner med deras höga kopparinnehåll, dels därför att den geologiska tillgången på koppar är begränsad, dels därför att efterfrågan hela tiden ökar. Att koppar används effektivt blir därför extra viktigt, liksom att maskinerna designas så att koppar kan återvinnas effektivt.

I elmaskiner är hårnålslindning eller koncentrerad lindning fördelaktiga, inte bara ur klimatsynvinkel utan också sett till resursanvändning. Designerna minskar behovet av koppar och samtidigt, genom att maskinerna kan göras kortare, minskar också behovet av elektrostål och mängden magneter.

Koncentrerad lindning minskar mängden passiv koppar i ändlindningar till ett minimum och utnyttjar därmed använd koppar mycket mer effektivt än andra lösningar. Den koncentrerade lindningen som finns i transversalflödesmaskinen utgör extremfallet eftersom den inte har någon ändlindning, det vill säga all koppar är aktiv.

Dysprosium, som ingår i neodymbaserade magneter för fordonsanvändning, är en metall som förtjänar uppmärksamhet. Den tillhör de mer knappa sällsynta jordartsmetallerna, är dyr och klassas dessutom som ett kritiskt material. Dysprosium tillsätts i neodymbaserade magneter för att göra dem mer motståndskraftiga mot avmagnetisering vid höga temperaturer. Samtidigt minskar magnetstyrkan. För att få mindre effekt på magnetstyrkan, men också för att spara kostnader, har en teknik utvecklats där dysprosium appliceras huvudsakligen i korngränserna i magnetmaterialet. Fördelningen av dysprosium blir därmed inhomogen i materialet, vilket gör en materialåtervinning med bibehållna materialegenskaper omöjlig. Om ett system för återvinning av magnetmaterial kommer på plats skulle magneter med homogen materialsammansättning kunna vara fördelaktigt ur resurssynpunkt, även om det skulle innebära ett högre dysprosiuminnehåll i magneterna. Detta särskilt som projektets resultat indikerar att magnetstyrka inte är avgörande för motorernas verkningsgrad.

Isolerings- och fixeringsmaterial innebär ingen stor resurspåverkan i sig, men påverkar resurspåverkan för de andra materialen, både positivt och negativt. En fixering och isolering som ger god mekanisk och termisk hållfasthet gör att motorn håller längre och minskar därmed åtgången av de andra materialen. Samtidigt har vi i projektet observerat att isolerings- och fixeringsmaterial kan hindra såväl renovering som effektiv materialåtervinning. Termisk och mekanisk stabilitet hos materialen har dock inte undersökts.

13.2.2 Design för ökad livslängd och renovering/återtillverkning

Att centrala komponenter i fordon som till exempel framdriftsmotorer designas för att hålla hela fordonets livslängd är naturligtvis av betydelse för såväl kostnader som resursanvändning i övrigt. Detta är också skälet till att ändlindningar gjuts in i epoxi, liksom att andra fixerings- och isoleringsmaterial används. Användningen verkar vara mer omfattande i motorer for tunga fordon än för lätta, vilket kan förklaras av olika driftsvillkor.

Elmotorer går trots detta ibland sönder. Viss renoveringsverksamhet för elmotorer för vägfordon finns idag, främst för tunga fordon, men borde kunna utökas, och omfatta såväl tunga som lätta fordon. Kullager, motoraxel och hela rotorpaket skulle kunna bytas ut, liksom rotorpaket ur kasserade maskiner skulle kunna utnyttjas som reservdelar. Renovering kräver en design som:

- Tillåter enkel demontering av motorn ur fordonet.
- Tillåter att motorn kan demonteras ner till den nivå där delar kan bytas ut, genom en genomtänkt användning av fixerings- och impregneringsmedel.
- Använder så få varianter av skruvar och andra fästanordningar som möjligt.

13.2.3 Design för materialåtervinning

Materialåtervinning genom fragmentering av hela fordon, med efterföljande materialseparation och bearbetning av utsorterat skrot till användbar metall, är det sätt som materialet i fordon i dagens system tas tillvara. För fordon upp till 3,5 ton regleras denna hantering av ELV-direktivet. Projektet har kartlagt miljö-och resursimplikationerna av dagens End-of-Life-hantering av framdriftsmotorer med hjälp av LCA. Som en jämförelse har också ett möjligt framtida scenario undersökts, där motorerna demonteras ur fordonen och så långt möjlig tas isär i olika materialfraktioner för materialåtervinning genom en semiautomatiserad process.

Dagens End-of-Life system återvinner koppar, stål och aluminium med tämligen hög effektivitet. En utmaning vid fragmentering som är specifik för elmotorer är att separera kopparlindning och stållaminat i tillräckligt hög grad. Potentiellt kan impregnering av lindningen med epoxi ytterligare försvåra denna separation, vilket dock inte närmare undersökts inom projektets ram.

I fragmenteringsanläggningen hamnar det mesta av magnetmaterialen från elmotorer i det som kallas lättfraktionen, varifrån de inte återvinns (i alla fall inte som magnetmaterial). Även om en framtida processutveckling skulle göra det möjligt att återvinna magnetmaterial ur denna fraktion har inga uppenbara designåtgärder identifierats som kan underlätta sådan återvinning.

En hypotes när projektet startade var att elmotorer med en kärna av pressat stålpulver skulle innebära en fördel i materialåtervinningen. Tanken var att det pressade järnpulvret lätt pulveriseras i fragmenteringen varvid lindningen friläggs och renare materialfraktioner skulle erhållas. Det visade sig emellertid att detta har mindre betydelse så som fragmenteringsanläggningar drivs. De har en hög grad av utsortering av koppar redan ur ”vanliga” elmaskiner med stållaminat eftersom de är noga med att inte få med för mycket koppar i stålfraktionen. Därför sorteras de så kallade köttbullarna (koppar-elektroplåts-nystan) till kopparfraktionen, varifrån koppar återvinns med högt utbyte. Detta innebär en viss förlust av stål, men mindre av det dyrbarare materialet koppar.

Demontering av elmotorer för materialåtervinning görs inte idag, i alla fall inte i Sverige, men har undersökts i projektet. En förutsättning för detta är att motorn lätt kan demonteras ur fordonet.

Det finns maskiner på marknaden för att separera koppar, stål och aluminium från uttjänta elmotorer i en semiautomatisk process. Motordesigner med impregnerade lindningar kan misstänkas försvåra separation av lindningen från sådan motor. (Detta har dock inte undersökts närmare inom projektet.)

Semiautomatiserad demontering av motorn är den enda identifierade metoden som möjliggör återvinning magneter. Utrustning för att få ut magneterna ur uttjänta motorer finns dock ännu bara på experimentstadiet. Eftersom verktygen behöver anpassas till formen på laminaten och magneterna så skulle en sådan hantering underlättas av en långt driven standardisering av tvärsnittet på laminat och magneter. Limning av magneter i statorkärnan förvårar separation för återvinning och bör undvikas om magneterna skall kunna återvinnas.

14. Rekommendationer för End-of-Life-systemets utveckling

Tre olika möjliga strategier för End-of-Life-systemets utveckling mot större resurseffektivitet i hanteringen av elmotorer för fordon har identifierats; att renovera och öka livslängden hos motorer och deras komponenter, att förbättra materialåtervinningen i dagens system med fragmentering samt en långt driven demontering av komponenter ur elmotorer som demonterats ur fordonen, för materialåtervinning.

14.1 Förläng livslängden

Begränsad renoveringsverksamhet för elmotorer för vägfordon finns idag, främst för tunga fordon. Det är möjligt att tänka sig att denna kan öka i framtiden. En förlängd livslängd minskar resursanvändningen, medan fördelarna vad avser klimatpåverkan är mer begränsade. Renovering av elmotorer skulle kunna inordnas i befintlig verksamhet för demontering, återtillverkning och renovering inom fordonsindustrin.

Delar som skulle kunna bytas ut är kullager och motoraxel och hela rotorpaket. Likaså skulle rotorpaket ur kasserade motorer kunna utnyttjas som reservdelar. Det är också möjligt att montera ur hela motorer ur kasserade fordon, för återanvändning som reservdelar.

Däremot är möjligheterna att återanvända magneter, som sådana, mycket begränsade, eftersom deras form är låst till den ursprungliga designen.

14.2 Förbättra materialåtervinningen från fragmenteringen av hela fordon

I befintlig fragmenteringsverksamhet utvecklas kontinuerligt processerna för att sortera material i olika fraktioner. En utmaning för elmaskiner är härvid de hoptrasslade nystan av koppartråd och elektroplåt som uppstår i fragmenteringen, så kallade ”köttbullar”. Separeringen av materialen i dessa skulle kunna drivas längre.

Det finns också ett behov av att utveckla processer som skiljer ifrån och återvinner magnetmaterial, främst de sällsynta jordartsmetallerna. Detta gäller såväl processerna i fragmenteringsanläggningarna, där finns behov av att kunna skilja ut magnetmaterialen, som det gäller efterföljande bearbetningsprocesser

14.3 Demontera komponenter för materialåtervinning

En tredje möjlighet, som undersökts inom projektet, är att demontera komponenter (i det här fallet framdriftsmotorn) ur uttjänta fordon för ytterligare separation till i relativt rena materialfraktioner, för materialåtervinning.

Det finns, som nämnts, utrustning på marknaden för att separera delar av koppar, stål och aluminium från uttjänta elmotorer, men ingen kommersiell utrustning för att separera ut magneter för materialåtervinning. Det har emellertid gjorts experimentellt och visat sig vara möjligt.

En långt driven semiautomatiserad separering motormaterialen förbättrar återvinningen av koppar, stål och aluminium, jämfört med fragmentering av hela fordon, och ger därmed en minskad miljöpåverkan, dock i begränsad omfattning. Semiautomatiserad separering av motorn gör det möjligt att återvinna magnetmaterial så att de kan användas vid tillverkning av nya magneter. Sådan hantering kommer möjligen att kräva avmagnetisering, av säkerhetsskäl.

Om man lyckas separera ut magneterna ur uttjänta motorer finns det flera möjliga processlösningar för att materialåtervinna dem. Däremot har projektet inte identifierat några kommersiella anläggningar som gör detta. De processlösningar på prototypstadie som separerar ut de sällsynta jordartsmetallerna som enskilda metalloxider har i tidigare forskning bedömts vara de som har ekonomiskt störst potential.

Strategin att demontera komponenter ur bilarna för att sedan ytterligare ta isär dem för materialåtervinning kan potentiellt möta hinder genom att inte passa in i etablerade aktörers affärslogik. Fragmenteringsanläggningar hanterar hela fordon som förberetts för fragmentering av demonterare. Demonterarna, å sin sida hanterar hela fordon och hela komponenter för återanvändning som reservdelar. Det är inte självklart var en verksamhet som skulle innebära ytterligare demontering av komponenter för materialåtervinning skulle passa in.

15. Identifierade forskningsbehov

Eftersom användarfasens energiförbrukning är avgörande för motorernas miljöprestanda rekommenderas fortsatt forskning som syftar till minskad energiförbrukning. På längre sikt, i takt med att elproduktionen blir allt mer fossilfri, kommer produktionen av material och komponenter att få en allt större relativ betydelse, varför strävan mot en minskad materialanvändning och en mer cirkulär materialhantering kommer att få ökad betydelse. Denna rekommendation gäller inte bara elmaskiner för fordonsframdrift utan mer generellt för drivlinans alla komponenter.

Inom projektet har en rad nya mer specifika forskningsbehov identifierats:

- De beräkningar av energiförluster som gjorts inom projektet skulle behöva valideras experimentellt.
- De teoretiska materialflödesanalyser som gjorts behöver verifieras experimentellt, framförallt de för fragmentering. Eftersom fragmenteringens utfall skiljer sig åt, mellan anläggningar såväl som inom anläggningar, krävs mätningar som ger ett statistiskt underlag.
- Projektet har identifierat PMaSynRM-motorn som lovande ur ett livscykelperspektiv, på grund av dess höga verkningsgrad över körcykeln. Den PMaSynRM-motor som undersöktes i projektet var emellertid utrustad med Sr-ferrit-magneter som har begränsningar vad gäller termisk stabilitet. Av intresse vore därför att ytterligare undersöka denna motortyp, men med få, men starka, neodymbaserade magneter. Det är också av intresse att undersöka varianter av denna motor med koncentrerad lindning eller hårnålslindning, liksom med varierande poltal.
- Resultaten för de olika elmotorerna som undersöktes i projektet är starkt styrda av den fordonskravsättning som sattes upp, vilket är en viktig orsak till att de transversalflödes- och axialflödesmaskiner som undersöktes inte kom så väl ut. De kunde inte designas optimalt under de fastslagna förutsättningarna. Det finns anledning att undersöka vidare hur dessa motortyper skulle komma ut under andra förutsättningar, det vill säga om fordonskravsättningen tillåts variera.
- Det finns ytterligare motortyper som helt lämnats utanför projektet, men som skulle vara intressanta att undersöka, såväl beträffande teknisk prestanda som ur ett miljö- och resursmässigt perspektiv. Hit hör asynkronmaskiner, som helt saknar magneter.
- Projektet har identifierat isoler-och fixeringsmaterial som ett hinder för såväl demontering för renovering som för materialseparation vid End-of-Life. Samtidigt kan sådana material förlänga motorernas livslängd. I vilken utsträckning de faktiskt hindrar demontering behöver ytterligare utredas. För att få bättre grepp om livlängdsfrågan skulle det också behöva utredas hur motorernas temperatur påverkar livslängden hos materialen och hur isoleringsmaterial och -mängd kan matchas mot kylning.
- Det finns behov av fortsatt forskning och utveckling för magnetåtervinning. De prototypmaskiner för magnetdemontering som tagit fram behöver vidareutvecklas. Likaså behövs processutveckling för energi- och resurseffektiv återvinning av sällsynta jordartsmetaller ur utseparerade magneter eller magnetmaterial.
- Det finns behov av ekonomiska analyser av semiautomatiserad demontering. Uppvägs kostnaderna för demontering av en effektivare upparbetning av de renare materialfraktioner som erhålls?

16. Referenser

ABB (2016). *Electric Vehicle Charging Infrastructure Terra 53 multi-standard DC charging station*. Rijswijk, The Netherlands: ABB EV Charging Infrastructure. (Product leaflet).

Alatalo, M., Lundmark, S. & Grunditz, E. (2011) Electric Machine Design for Traction Applications Considering Recycling Aspects - Review and New Solution. *The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 7-10 November 2011, Melbourne, Australia.

Alatalo, M. C. D. (2018). Axial flux machine as a traction motor for electric and hybrid vehicles. 2018, Gotbenburg, Sweden: Department of Electrical Engineering, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology. Technical report 2018:1.

Andersson, M., Ljunggren Söderman, M. & Sandén, B. A. (2017). Are scarce metals in cars functionally recycled? *Waste Management,* 60**,** pp. 407-416.

ANSYS (2011). *Study of a Permanent Magnet Motor with MAXWELL 3D:Example of the 2004 Prius IPM Motor*. Ansoft Maxwell Field Simulator: Topic – Motor Application Note 1.1, Maxwell 3D, version 11. Accessed 2015. ANSYS, Inc. (Tutorial example from Ansoft Maxwell).

Arnold Magnetics (2014). *RECOMA -The complete range of $SmCo_5$ and Sm_2Co_{17} alloys*. 140527a. Lupfig, Switzerland: Arnold Magnetic Technologies AG. (Specification catalog for the RECOMA SmCo magnet series).

Arnold Magnetics (2016). *Safety Data Sheet: Sm2Co17 StabRECOMA 26, RECOMA 28, RECOMA 30, RECOMA 32, RECOMA 24HE, RECOMA 26HE, RECOMA 28HE, RECOMA 30HE, RECOMA 30S, RECOMA 32S, RECOMA 33E, RECOMA 35E*. 4 April. Lupfig, Switzerland: Arnold Magnetic Technologies AG. (Safety Data Sheet according to regulation (EC) No. 1907/2006 (REACH) with its amendment Regulation (EU) 2015/830).

Arvidsson, R., Söderman, M. L., Sandén, B. A., Nordelöf, A., André, H. & Tillman, A.-M. (2020). A crustal scarcity indicator for long-term global elemental resource assessment in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 25(9)**,** pp. 1805-1817.

Bandara, H. M. D., Darcy, J. W., Apelian, D. & Emmert, M. H. (2014). Value Analysis of Neodymium Content in Shredder Feed: Toward Enabling the Feasibility of Rare Earth Magnet Recycling. *Environmental Science & Technology,* 48(12)**,** pp. 6553-6560.

Bast, U., Blank, R., Buchert, M., Elwert, T., Finsterwalder, F., Hörnig, G., Klier, T., Langkau, S., Marscheider-Weidemann, F., Müller, J.-O., Thürigen, C., Treffer, F. & Walter, T. (2014). Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben: MORE (Motor Recycling). 31 August 2014. Final Research Report.

Bastian, D. (2019). Preismonitor. December 2019: DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR: der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Bieker, G., Tietge, U., Rodriguez, F. & Mock, P. (2019). European Vehicle Market Statistics, Pocketbook 2019/20. 16 December 2019: INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION EUROPE.

Björkman, B. & Samuelsson, C. (2014). Recycling of Steel. *In:* WORRELL, E. & REUTER, M. (eds.) *Handbook of Recycling.* 1st ed.: Elsevier Inc. ISBN: 9780123965066.

Blomsma, F. & Brennan, G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology,* 21(3)**,** pp. 603-614.

Boldea, I., Tutelea, L. N., Parsa, L. & Dorrell, D. (2014). Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 61(10)**,** pp. 5696-5711.

BorgWarner (2019). *BorgWarner Expands High Voltage Hairpin Electric Motor Series, Introduces HVH 146* [Online]. BorgWarner Inc. Tillgänglig: https://www.borgwarner.com/newsroom/press-releases/2019/12/05/borgwarner-expands-high-voltage-hairpin-electric-motor-series-introduces-hvh-146 Besökt november 2020.

Bouzidi, Y. & Leymarie, J.-N. (2009). Recycling rates of aluminium from end-of-life commercial vehicles. December 2009: THE EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION: Université de Technologie de Troyes.

Bronneberg (2020). *Electric Motor Wrecker*. Helmond, Germany: Bronneberg BV.

Burress, T. & Campbell, S. (2013) Benchmarking EV and HEV Power Electronics and Electric Machines. *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE* 16-19 June 2013, Detroit, MI, USA. IEEE, pp. 1 - 6.

Burress, T. A., Campbell, S. L., Coomer, C. L., Ayers, C. W., Wereszczak, A. A., Cunningham, J. P., Marlino, L. D., Seiber, L. E. & Lin, H. T. (2011). *Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System*. Editor: OLSZEWSKI, M. March. USA: Electrical and Electronics Systems Research Division, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy. ORNL/TM-2010/253.

Böckin, D., Willskytt, S., André, H., Tillman, A.-M. & Ljunggren Söderman, M. (2020). How product characteristics can guide measures for resource efficiency — A synthesis of assessment studies. *Resources, Conservation and Recycling,* 154**,** pp. 104582.

Car and Driver (2020). *BMW Brings the Electric HEAT* [Online]. Hearst Autos, Inc., Hearst Digital Media. Tillgänglig: https://www.caranddriver.com/news/a22656237/bmw-simplifies-ev-production/ Besökt november 2020.

Cross, H. J., Beach, J., Levy, L. S., Sadhra, S., Sorahan, T. & McRoy, C. (1999). Manufacture, processing and use of stainless steel: A Review of the Health Effects. 1999, Brussels; Belgium: EUROPEAN CONFEDERATION OF IRON AND STEEL INDUSTRIES (EUROFER): Institute of Occupational Health, University of Birmingham.

Cullbrand, K., Fråne, A. & Jensen, C. (2015). Utökad demontering av personbilar – Utvärdering av demontering- och fragmenteringsförsök av 220 personbilar. 2015, Stockholm, Sweden: IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB. Report no C142. (Swedish EoL study of how increased disassembly before shredding can influence material recycling for passenger vehicles).

Cusano, G., Gonzalo, M. R., Farrell, F., Remus, R., Roudier, S. & Sancho, L. D. (2017). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. *JRC Science for Policy Report: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)* 2017, Luxembourg: PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION, E. U. EUR 28648 EN.

DieselNet (2020). *World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)* [Online]. ECOpoint Inc. Tillgänglig: https://dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php Besökt 20 augusti 2020.

EC (2015). Meddelande från Kommissionen till Europaparlamentet, Rådet, Europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt Regionkommittén. Att sluta kretsloppet – en EU-handlingsplan för den cirkulära ekonomin. 2 december 2015: Europeiska kommissionen (EC). COM/2015/0614 final.

EC (2020). Meddelande från Kommissionen till Europaparlamentet, Rådet, Europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt Regionkommittén. Resiliens för råvaror av avgörande betydelse: Att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet. 3 september 2020: Europeiska kommissionen (EC). COM(2020) 474 final.

EFR (2017). EU-27 Steel Scrap Specification. May 2017, Brussels, Belgium: European Ferrous Recovery and Recycling Federation.

EG (2000). Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/53/EG av den 18 september 2000 om uttjänta fordon. 22 november 2000: Europeiska gemenskapernas officiella tidning (EG).

Ekvall, T. (2020). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. *In:* BASTANTE-CECA, M. J. (ed.) *Sustainability Assessment in the 21st Century.* IntechOpen. ISBN: 978-1-78984-977-6.

Els, P. (2017). *Automotive IQ: Reducing the industry's reliance on rare earth metals* [Online]. Berlin, Germany: IQPC Gesellschaft für Management Konferenzen mbH. Tillgänglig: https://www.automotive-iq.com/powertrain/articles/reducing-industrys-reliance-rare-earth-metals Besökt november 2020.

Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D. & Sutter, J. (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling,* 1(1)**,** pp. 25-60.

EMF (2020). *Ellen MacArthur Foundation* [Online]. Ellen MacArthur Foundation. Tillgänglig: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/ Besökt november 2020.

Eriksson, J. (2017). *Utökad definition av konfliktmineraler*. Motion till riksdagen 2017/18:3370. Sveriges riksdag. (MP1603).

EU (2008). Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/98/EG av den 19 november 2008 om avfall och om upphävande av vissa direktiv. 22 november 2008: Europeiska unionens officiella tidning (EU).

EU (2017). Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2017/821 av den 17 maj 2017 om fastställande av skyldigheter avseende tillbörlig aktsamhet i leveranskedjan för unionsimportörer av tenn, tantal och volfram, malmer av dessa metaller, samt guld med ursprung i konfliktdrabbade områden och högriskområden. 19 maj 2017: Europeiska unionens officiella tidning (EU).

EU (2018). Kommissionens förordning (EU) 2018/1832 av den 5 november 2018 om ändring av Europaparlamentets och rådets direktiv 2007/46/EG samt kommissionens förordningar (EG) nr 692/2008 och (EU) 2017/1151 i syfte att förbättra förfaranden och provningar för typgodkännande avseende utsläpp av lätta personbilar och lätta nyttofordon, inbegripet sådana för överensstämmelse hos fordon i drift och utsläpp vid verklig körning, och införa anordningar för övervakning av förbrukning av bränsle och elenergi. 5 november 2018: Europeiska unionens officiella tidning (EU).

Fowler, J. (2011). *Meatball Separators*. Scrap. Washington, DC, USA: Institute of Scrap Recycling Industries, Inc.

Giakoumis, E. G. (2017). *Driving and Engine Cycles*. Cham, Switzerland: Springer Nature, Springer International Publishing AG. ISBN: 978-3-319-49033-5.

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F. & Sonnemann, G. (2011). Recycling Rates of Metals. 2011, Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.

Grunditz, E. A. (2016). *Design and Assessment of Battery Electric Vehicle Powertrain, with Respect to Performance, Energy Consumption and Electric Motor Thermal Capability.* PhD Thesis at the Graduate School in Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Grunditz, E. A. (2020). Traction Motor for a Battery Electric City Bus - Specification and Drive Cycle Evaluation, Based on Comprehensive Data Collection. Report for the FFI project Electric Traction Motors in a Circular Economy. 2020, Gothenburg, Sweden: Division of Electric Power Engineering, Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology. Technical report 2020:1.

Grunditz, E. A., Lundmark, S. T., Alatalo, M., Thiringer, T. & Nordelöf, A. (2018). Three traction motors with different magnet materials — Influence on cost, losses, vehicle performance, energy use and environmental impact. *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 10-12 April 2018. pp. 1-13.

Grunditz, E. A. & Thiringer, T. (2016a). Characterizing BEV Powertrain Energy Consumption, Efficiency and Range during Official and Drive Cycles from Gothenburg/Sweden. *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* 65(6)**,** pp. 3964-3980.

Grunditz, E. A. & Thiringer, T. (2016b). Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.

Grunditz, E. A. & Thiringer, T. (2018). Electric Vehicle Acceleration Performance and Motor Drive Cycle Energy Efficiency Trade-Off. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 3-6 Sept. 2018. pp. 717-723.

Henckens, M. L. C. M., van Ierland, E. C., Driessen, P. P. J. & Worrell, E. (2016). Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy,* 49**,** pp. 102-111.

Hendershot, J. R. & Miller, T. J. E. (2010). *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*. 2:nd ed, USA: Motor Design Books LLC. ISBN: 9780984068708.

Henriksson, M. W. (2008). LCA (life cycle assessment) of hybrid powertrain. 9 December 2008: GROUP, V. ER-531031.

Hernández-Millán, R. & Pacheco-Pimentel, J. R. (2017). Recycling rotating electrical machines. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia,* (83)**,** pp. 50-56.

Hernández-Millán, R., Pacheco-Pimentel, J. R. & Salinas, J. (2001). Design principles for recycling induction motors. *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485)*, 17-20 June 2001. pp. 782-788.

Hernández-Millán, R., Salinas, J. & Pacheco-Pimentel, J. R. (2000) Design Principles for Recycling large Electric Machinery. *International Conference on Electrical Machines ICEM 2000*, September 2000, Helsinki, Finland., pp. 1679.

Hernández-Millán, R., Salinas, J. & Pacheco-Pimentel, J. R. (2009). Basic concepts of design for recycling induction motors. *In:* MASTORAKIS, N. E. & MLADENOV, V., eds. *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Circuits ICC'09*, July 2009, Stevens Point, Wisconsin, United States. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), pp. 146–151.

Hitachi (2014). Special Issue "Hitachi Technology 2014". *Hitachi Review,* 63(3).

Hitachi Metals (2014a). *NEOMAX® Series - Demagnitization Curve*. Japan: Hitachi Metals, Ltd. (Demagnitization datasheet for Neomax series).

Hitachi Metals (2014b). *Permanent Magnets*. Japan: Hitachi Metals, Ltd. (Product catalogue for Neomax series).

Hitachi Metals (2015). *Neodymium-iron-boron magnets NEOMAX® - Properties* [Online]. Japan: Hitachi Metals, Ltd. Tillgänglig: http://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/auto/el/p03_21.html Besökt September 24 2015. (Product specifications under "Electric- and Electronics-Related Products (Magnets, Harnesses, and Sensors)")

Höganäs (2020). *Somaloy, powders for electromagnetic applications* [Online]. Höganäs, Sweden: Höganäs AB. Tillgänglig: https://www.hoganas.com/sv/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/ Besökt april 2020.

Ibrahim, M. N., Sergeant, P. & Rashad, E. M. (2016). Influence of rotor flux-barrier geometry on torque and torque ripple of permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motors. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 4-7 Sept. 2016. pp. 398-404.

IEA (2019a). Energy Efficiency Indicators 2019 2 December 2019a, Paris, France: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.

IEA (2019b). Global EV Outlook 2019. May 2019b, Paris, France: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.

IEA (2019c). *World Energy Outlook 2019*. Paris, France: International Energy Agency. ISBN: 978-92-64-97300-8.

INL (2015). *Charging System Testing - Vehicle Charging System Testing* [Online]. Idaho, USA: Advanced Vehicles, Idaho National Laboratory (INL), US Department of Energy. Tillgänglig: https://avt.inl.gov/project-type/vehicle-charging-system-testing Besökt March 2:nd 2017. (Compilation of test result for charging of electric vehicles)

InsideEVs (2020). *VW ID.3 Electric Motor Is So Compact That It Fits In A Sports Bag* [Online]. InsideEVs. Tillgänglig: https://insideevs.com/news/382377/vw-id3-electric-motor-compact/ Besökt november 2020.

ISRI (2018). *Scrap Specifications Circular*. 16 April 2018. Washington, DC, USA: Institute of Scrap Recycling Industries, Inc.

IVA (2020). *Resurseffektivitet och cirkulär ekonomi* [Online]. Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien. Tillgänglig: https://www.iva.se/projekt/resurseffektivitet-och-cirkular-ekonomi/ Besökt november 2020.

Jilvero, H. (2019) "Research and Development Engineer" på Stena Metall AB intervjuad av ANDERS NORDELÖF, 29 november 2019.

Karlsson, B. & Fugger, E. (1998). Atomatized disassembly of electrical industrial motors. *Proceeding of SPIE 3517, Intelligent Systems in Design and Manufacturing*, November 1998, Boston. Massachusetts. SPIE, vol. 3517.

Karlsson, B. & Järrhed, J.-O. (2000). Recycling of electrical motors by automatic disassembly. *Measurement Science and Technology,* 11(4)**,** pp. 350-357.

Kimiabeigi, M., Sheridan, R. S., Widmer, J. D., Walton, A., Farr, M., Scholes, B. & Harris, I. R. (2018). Production and Application of HPMS Recycled Bonded Permanent Magnets for a Traction Motor Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 65(5)**,** pp. 3795-3804.

Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling,* 127**,** pp. 221-232.

Klier, T., Risch, F. & Franke, J. (2013). Disassembly strategies for recovering valuable magnet material of electric drives. *2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 29-30 Oct. 2013. pp. 1-3.

Lassesson, H. (2008). *Energy consumptions and CO2 emissions resulting from different handling strategies of glass from end-of-life vehicles.* Thesis for the degree of Master of Science, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Li, Z., Kedous-Lebouc, A., Dubus, J.-M., Garbuio, L. & Personnaz, S. (2019). Direct reuse strategies of rare earth permanent magnets for PM electrical machines – an overview study. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.,* 86(2)**,** pp. 20901.

Lindström, J. (1999). *Development of an Experimental Permanent-Magnet Motor Drive.* Licentiante Thesis at the School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg. (Technical Report No. 312L)

Ljunggren Söderman, M. & André, H. (2019). *Scarce metals in complex products - exploring the effects of circular economy measures*. (Submitted manuscript).

Ljunggren Söderman, M., Kushnir, D. & Sandén, B. (2013). Will metal scarcity limit the use of electric vehicles? *In:* SANDÉN, B. A. & PETTERSSON, K. (eds.) *Systems Perspectives on Electromobility 2014*, Elektronisk publikation. Göteborg: Chalmers University of Technology.

Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A. & Davenport, W. G. I. (2015). *Rare Earths - Science, Technology, Production and Use* Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V. ISBN: 978-0-444-62735-3.

Lundmark, S. T. (2015). Magnet Radial and Transverse Flux IPM Core and Magnet Loss in FEM 2D and 3D. 2015, Gothenburg, Sweden: Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology. Report no 2015:2.

Lundmark, S. T. & Alatalo, M. (2013) A segmented claw-pole motor for Traction Applications Considering Recycling Aspect. *EVER Conference on Electrical Vehicles and Renewable energies*, 27-29 Mars 2013, Monte Carlo, Monaco.

Lundmark, S. T. & P. Roshanfekr Fard (2017). Two-Dimensional and Three-Dimensional Core and Magnet Loss Modeling in a Radial Flux and a Transverse Flux PM Traction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 53(3)**,** pp. 2028-2039.

Meadows, D., Meadows, D., Randers, J. & Behrens III, W. (1972). *Limits to growth*. New York: Universe Books.

MS-Schramberg (2016). *Hard ferrite magnets: Strontium ferrite HF 30/26, anisotropic, wet pressed* [Online]. Schramberg-Sulgen, Germany: MS-Schramberg GmbH & Co. KG. Tillgänglig: https://www.magnete.de/fileadmin/user_upload/Content/Produkte/PDF/Gesinterte_HF_Magnete/HF_30-26_E.pdf Besökt 18 oktober 2016. (Specifikation för strontium-ferritmagnet, nedladdad som pdf-fil från leverantörens hemsida)

Muchová, L. & Eder, P. (2010a). End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals. 2010a, Luxembourg, Luxembourg: PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION: Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.

Muchová, L. & Eder, P. (2010b). End-of-waste Criteria for Iron and Steel Scrap: Technical Proposals. 2010b, Luxembourg, Luxembourg: PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION: Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.

Muchová, L., Eder, P. & Villanueva, A. (2011). End-of-waste Criteria for Copper and Copper Alloy Scrap: Technical Proposals. 2011, Luxembourg, Luxembourg: PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION: Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.

National Research Council (2008). *Committee on Critical Mineral Impacts on the US Economy. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy.*, Washington, DC, USA: The National Academies Press.

Nordelöf, A. & Alatalo, M. (2017). A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit – Technical and Methodological Description, version 1.0. 2017, Gothenburg, Sweden: Department of Energy and Environment, Divisions of Environmental Systems Analysis & Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology. ESA report no. 2016:5.

Nordelöf, A., Grunditz, E., Lundmark, S., Tillman, A.-M., Alatalo, M. & Thiringer, T. (2019a). Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 67**,** pp. 263-274.

Nordelöf, A., Grunditz, E., Tillman, A.-M., Thiringer, T. & Alatalo, M. (2017). A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine – Technical and Methodological Description, version 1.01. 2017, Gothenburg, Sweden: Department of Energy and Environment, Divisions of Environmental Systems Analysis & Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology. ESA report no. 2016:4 (version 1.01 updated 2017).

Nordelöf, A., Grunditz, E., Tillman, A.-M., Thiringer, T. & Alatalo, M. (2018). A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition. *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 23(1)**,** pp. 55-69.

Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M. & Van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 19(11)**,** pp. 1866-1890.

Nordelöf, A., Romare, M. & Tivander, J. (2019b). Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 75**,** pp. 211-222.

Nordelöf, A. & Tillman, A.-M. (2018). A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part II: manufacturing processes. *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 23(2)**,** pp. 295-313.

Oeters, F. & Ottrow, M. (2012). Production of pure and high purity iron. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Elektronisk publikation. Chapter 5. Volume 20. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Online ISBN 978-3-5273-0673-2.

Ozpineci, B. (2011). Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Machinery Program. *Annual Progress Report - Power Electronics and Electric Machines*. October 2011, USA: US DEPARTMENT OF ENERGY: Energy and Transportation Science Division, Oak Ridge National Laboratory. ORNL/TM-2011/263.

Ozpineci, B. (2014). Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program. *Annual Progress Report - Advanced Power Electronics and Electric Motors*. November 2014, USA: US DEPARTMENT OF ENERGY: Electrical and Electronics Systems Research Division, Oak Ridge National Laboratory. ORNL/SPR-2014/532.

Ramesh, P. & Lenin, N. C. (2019). High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles—Comprehensive Review Based on Material Technology. *IEEE Transactions on Magnetics,* 55(11)**,** pp. 1-21.

Rankin, W. J. (2011). *Minerals, Metals and Sustainability: Meeting Future Material Needs*. The Netherlands: CRC Press/Balkema. ISBN: 978-0-415-68459-0.

Riksbanken (2020). *Sök räntor & valutakurser* [Online]. Stockholm: Sveriges Riksbank. Tillgänglig: https://www.riksbank.se/sv/statistik/sok-rantor--valutakurser/ Besökt 31 mars 2020.

Santiago, J. d., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R. & Leijon, M. (2012). Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* 61(2)**,** pp. 475-484.

Sarlioglu, B., Morris, C. T., Han, D. & Li, S. (2015). Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, 2-4 Sept. 2015. pp. 519-526.

Sarlioglu, B., Morris, C. T., Han, D. & Li, S. (2017). Driving Toward Accessibility: A Review of Technological Improvements for Electric Machines, Power Electronics, and Batteries for Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Industry Applications Magazine,* 23(1)**,** pp. 14-25.

Sato, Y., Ishikawa, S., Okubo, T., Abe, M. & Tamai, K. (2011). *Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle*. SAE Technical Paper 2011-01-0350. SAE International.

Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C. & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. ISBN: 978-0-08-096789-9.

Shao, L., Karci, A. E. H., Tavernini, D., Sorniotti, A. & Cheng, M. (2020). Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access,* 8**,** pp. 116900-116913.

Shimizu, H., Okubo, T., Hirano, I., Ishikawa, S. & Abe, M. (2013). *Development of an Integrated Electrified Powertrain for a Newly Developed Electric Vehicle*. SAE Technical Paper 2013-01-1759. SAE International.

Shinko Research (2009). Trend Report of Development in Materials for Substitution of Scarce Metals. 2009, Tokyo, Japan: New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

Soh, S. L., Ong, S. K. & Nee, A. Y. C. (2014). Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology. *Procedia CIRP,* 15**,** pp. 407-412.

Sperle, J.-O., Hallberg, L., Almemark, M., Lars-Gunnar Lindfors, Andersson, G., Ekdahl, Å., Larsson, J., Johansson, B., Johansson, H., Kaplin, C. & Schedin, E. (2013). *Miljövärdering av stål och strålkonstruktioner. Handbok för ingenjörer, forskare och högskolestudenter.*, Stockholm, Sverige: Jernkontoret. ISBN: 978-91-977783-3-6.

Surahammars Bruk (2014). *Hi-Lite - Electrical steel for next generation designs*. COGENT POWER INC.: Tata Steel Europe, Tata Group. (Product catalogue).

Surahammars Bruk (2015). *Hi-Lite - NO30*. April. COGENT POWER INC.: Tata Steel Europe, Tata Group. (Datasheet).

Tong, W. (2014). *Mechanical Design of Electric Motors*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-9144-1.

Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., Pavlovic, J. & Steven, H. (2015). Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 40**,** pp. 61-75.

UNECE (2013). *WLTP-DHC-16-06e_rev* [Online]. United Nations Economic Commission of Europe. Tillgänglig: https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/5801079/WLTP-DHC-16-06e_rev.xlsx?api=v2 Besökt 14 November 2013.

UNECE (2014). Addendum 15: Global technical regulation No. 15 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure. 12 March 2014: UNITED NATIONS: United Nations Economic Commission of Europe. ECE/TRANS/180/Add.15.

USGS (2013). Metal Prices in the United States Through 2010. March 2013, Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. Scientific Investigations Report 2012–5188.

USGS (2020). Mineral Commodity Summaries 2020. January 2020, Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior.

Vänersborgs Tingsrätt (2017). *DELDOM 2017-12-06 meddelad i Vänersborg: Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för befintlig och tillkommande verksamhet med hantering av avfall på fastigheten Fyllinge 20:6 i Halmstads kommun*. Editor: MARK- OCH MILJÖDOMSTOLEN, V. T. Vänersborg, Sweden.

Walachowicz, F., March, A., Fiedler, S., Buchert, M., Sutter, J. & Merz, C. (2014). Verbundprojekt: Recycling von Elektromotoren – MORE. Teilprojekt: Ökobilanz der Recyclingverfahren. 17 Oktober 2014, Berlin, Deutschland: Öko-Institut e. V. und Siemens AG.

Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O. & Wernet, G. (2013). *The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3* [Online]. Switzerland: The Centre for Life Cycle Inventories. Tillgänglig: www.ecoinvent.org 2014-2017.

Welter, J.-M. (2013). Briefing Note - The Recycling of Copper Rotor Motors. March 2013: INSTITUTE, E. C. ECI Publication No Cu0181.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 21(9)**,** pp. 1218-1230.

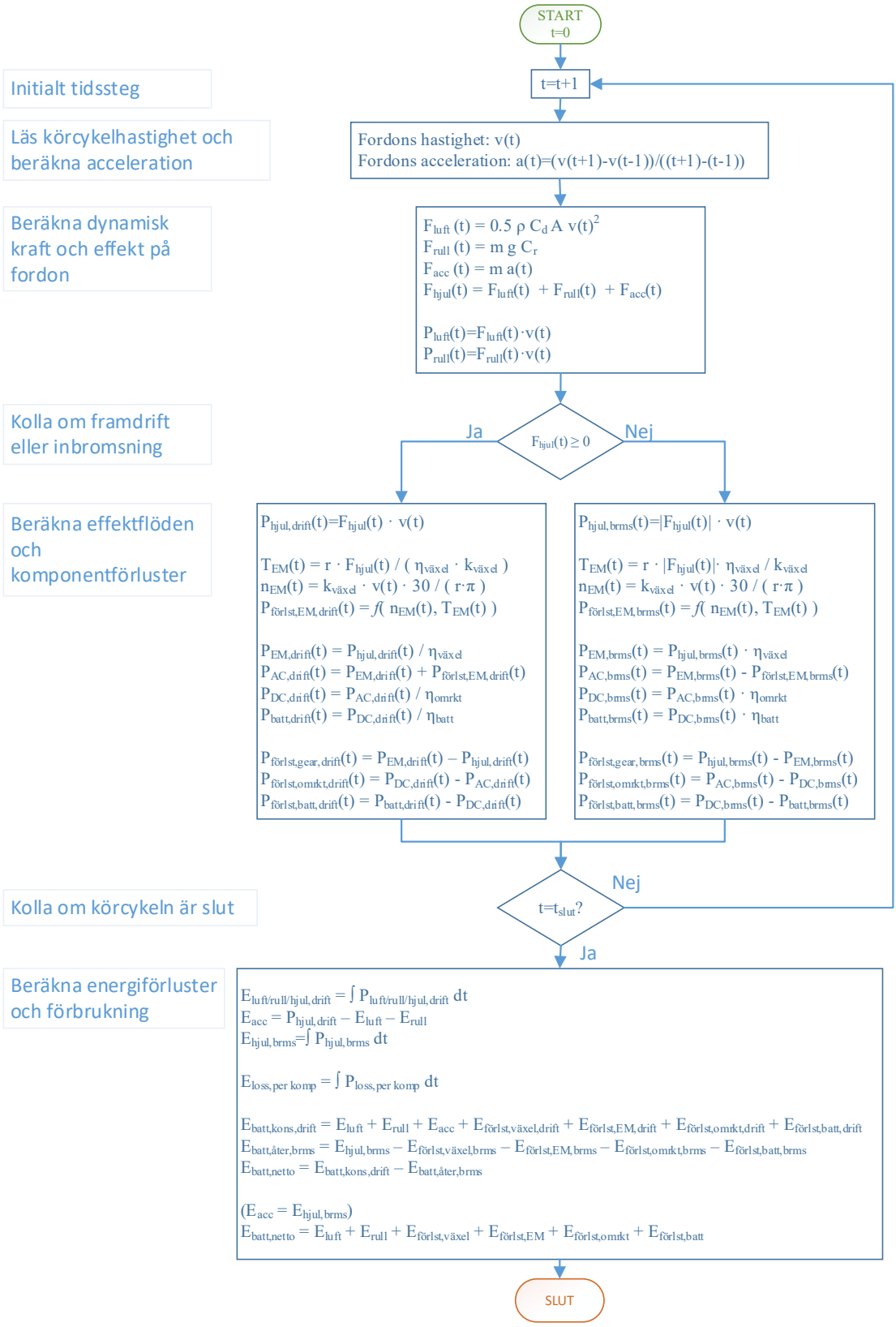
Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E. & Wäger, P. A. (2015). Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output. *Environmental Science & Technology,* 49(7)**,** pp. 4591-4599.

Williams, R., Keeling, W., Petsinaris, F., Baron, Y. & Mehlhart, G. (2020). Supporting the Evaluation of the Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. Final Report. August 2020, Rotterdam, the Netherlands: EUROPEAN COMMISSION – DG ENVIRONMENT A.2.

Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P. T. & Binnemans, K. (2017). REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy,* 3(1)**,** pp. 122-149.

Appendix 1

En schematisk presentation av beräkningsproceduren av batteriets nettoenergiförbrukning under körcykel. I samtliga beräkningar är luftdensiteten satt till 1.2 kg/m^3.



INSTITUTIONEN FÖR TEKNIKENS
EKONOMI OCH ORGANISATION
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020
www.chalmers.se

CHALMERS