

Konduktiv laddning av elfordon

JONATAN BJÖRK
DAVID ERIKSSON
GUSTAV FORSBERG
LOUISE KEMPE
TOM NILSSON
OLLE NORDQVIST

Institutionen för Signaler och System
Avdelningen för Reglerteknik, automation och mekatronik (RAM)
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012
Kandidatarbete SSYX02-12-26

KANDIDATARBETE NR SSYX02-12-26

Konduktiv laddning av elfordon

Kandidatarbete i Signaler och System

JONATAN BJÖRK
DAVID ERIKSSON
GUSTAV FORSBERG
LOUISE KEMPE
TOM NILSSON
OLLE NORDQVIST

Institutionen för Signaler och System
Avdelningen för Reglerteknik, automation och mekatronik (RAM)
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012

Konduktiv laddning av elfordon

JONATAN BJÖRK
DAVID ERIKSSON
GUSTAV FORSBERG
LOUISE KEMPE
TOM NILSSON
OLLE NORDQVIST

© JONATAN BJÖRK, DAVID ERIKSSON, GUSTAV FORSBERG, LOUISE
KEMPE, TOM NILSSON, OLLE NORDQVIST, 2012

Kandidatarbete SSYX02-12-26
Institutionen för Signaler och System
Avdelningen för Reglerteknik, Automation och Mekatronik (RAM)
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige

Sammanfattning

Utsläppen av växthusgaser är ett av de största miljöproblem världen stått inför. I Sverige utgör vägtrafikens närmare 30% av landets totala utsläpp vilket innebär att en övergång till en eldriven fordonsflotta möjliggör en markant minskning av dessa. Dagens elfordon har en mycket begränsad räckvidd till följd av otillräckliga batterier. Det här arbetet syftar till att föreslå en möjlig lösning på det problemet. Genom att kontinuerligt tillföra elektrisk energi under färd på större vägar blir inte längre batteriet en begränsande faktor utan kan sparas för körning utanför det centrala vägnätet. Att genomföra detta med ett markförlagt skensystem har flera fördelar. De främsta är möjligheten att anpassa till olika fordonstyper samt den mycket höga verkningsgraden.

För att minimera risken för förluster mellan plus- och minuspol som riskerar uppstå mellan två parallella poler används ett system med en segmenterad monoskena, där skensegmenten växlar polaritet allteftersom fordonen passerar. Ett sådant system finns idag inte ens i teststadiet varför den här rapporten ska ses som en förundersökning för ett möjligt testsystem. Under undersökningen ställdes olika tekniska lösningar mot varandra för att utröna hur systemet skulle konstrueras utifrån kriterier så som säkerhet, tillförlitlighet och realiserbarhet.

Den teoretiska modell som togs fram använder 1000 V DC som driftspänning och har en mycket hög verkningsgrad - över 60% från kraftverk till fordonets hjul, att jämföra med bensinmotorns maximala 30%. För att sätta modellen i ett verklighetsperspektiv gjordes en undersökning av vad elektrifiering av Europaväg 6 mellan Malmö och Göteborg skulle innebära. Genom att använda genomsnittliga värden för trafikflöde och effektbehov erhöles ett medelvärde på 205,9 kW/km. Om detta effektbehov tillgodoses med el från svenska producenter blir de totala utsläppen av koldioxidekvivalenter 1,75 ton CO_2/h för hela vägsträckan. I dagsläget släpper vägtrafiken på samma sträcka ut 17,3 ton CO_2/h . I Sverige innebär alltså en övergång till elfordon som laddas under färd en minskning av utsläppen från motorvägskörning med närmare 90%. Samma beräkning för elproduktion med europeiska genomsnittsutsläppen leder dock till en ökning med 260% vilket visar på vikten av att välja rena miljövänliga energikällor.

Avslutningsvis konstruerades en småskalig demonstrationsbana för att ge en visuell bild av systemets funktion.

Abstract

The pollution caused by green house gases is one of the greatest environmental dilemmas the world has ever faced. In Sweden, road traffic emissions represent nearly 30% of the country's net total, which means that switching to an electric vehicle fleet enables a large reduction of these emissions. Today's electric vehicles have a very limited range due to a lack of battery capacity. This project aims to provide a possible solution to that problem. By continuously supplying electric power while driving on major roads the battery will no longer be the limiting factor, but can be saved for driving outside the central road network. There are several advantages to implement this system using a ground based rail system. The key ones being the ability to adapt to different vehicle types and its high efficiency.

In order to minimize the risk of losses which could arise between a plus and minus pole in parallel, a system with a segmented mono rail is used, where the rail segments alternate polarity as the vehicles pass. Such a system does currently not exist, even in testing stage, which is why this report should be viewed only as a preliminary investigation of a possible test system. During the investigation different technologies were compared based on criteria such as safety, reliability and realizability in order to determine how the system should be constructed.

The theoretical model was developed using 1000 V DC and has a very high efficiency - over 60% from power plant to the wheel, in comparison to a petrol engine's maximum of 30%. To make the model applicable for real implementation a study was conducted regarding the electrification of the European highway between Malmö and Gothenburg. By using the average values of traffic flow and power requirements a mean of 205.9% was obtained. If this requirement is satisfied using electricity from Swedish producers the total carbon dioxide emission would be 1.75 tonnes of CO_2/h . Today, the traffic travelling the same stretch of road emit 17.3 tonnes of CO_2/h . This means that a Swedish transition to the proposed system would yield a reduction of green house gas emissions of almost 90 %. The same calculation using electricity produced by average European power plants gives an increase of 260%, which shows the importance of choosing good energy sources.

Finally, a small scale demonstration model was constructed in order to visualize the systems workings.

Vokabulär- och förkortningslista

A	Ampere
AC	Växelström
CO₂	Kemisk beteckning för koldioxid.
DC	Likström
DFS-Master	DFS står för Dynamic Frequency Selection och är en teknik för att dynamiskt tilldela tillgängliga kommunikationsfrekvenser inom ett visst frekvensintervall för att undvika störningar och interferens. DFS-master är en fast enhet som styr denna teknik och kommunicerar med de mobila slavenheterna benämnda DFS-slave.
DFS-Slave	Se DFS-master
Diod	En elektrisk komponent som blockerar ström i en riktning.
Högpasfilter	Elektrisk krets som filtrerar bort låga frekvenser, men släpper igenom höga frekvenser. Vad som är höga frekvenser beror på ingående komponenter.
Kontaktdon	Fordonets teknik för att etablera kontakt med samt överföra elkraft från skensystemet. I de flesta fall någon form av arm som utgår från fordonets undersida. Denna arm är sedan utrustad med en for som är anpassad för att släpas mot skenan.
Likriktare	En elektrisk apparat som omformar en växelspanning av vanligtvis sinusformad karaktär till en likspänning.
Ljusbåge	Ett elektriskt fenomen där luften mellan ett laddat och ett ledande material blir joniserat och en kraftig elektrisk urladdning sker. En åskblixt är en gigantisk form av ljusbåge.
LS-omriktare	Står för Likspänningsomriktare. Används för att omvandla en likspänningsnivå till en annan.
Monoskena	En enkelspårig skena där de elektriska polerna ej är parallellt förlagda längs färdriktningen utan istället ligger i serie.

Rippel	Oönskad cyklisk förändring mellan två nivåer. Ojämnheter som kan uppstå vid likriktning.
Transistor	En elektrisk komponent som styr en utspänning med hjälp av en inspanning.
Tyristor	En elektrisk komponent som blockerar ström i en riktning. Till skillnad från en diod kan tyristorn styras att vara öppen ett spänningsintervall.
V	Volt
W	Watt

Förord

Denna rapport är skriven för personer som besitter grundläggande kunskaper inom ellära. Detta arbete har utförts som ett kandidatarbete för Institutionen för Signaler och system vid Chalmers tekniska högskola under vårterminen 2012.

Ett stort tack till följande för all hjälp och stöd som gjort denna rapport möjlig.

Oscar Olsson vid Viktoriainstitutet, för all feedback och väl genomförd handledning.

Jan Braage, Reine Nohlborg och Nils Nilsson i Chalmers prototyp-laboratorium för alla råd och den hjälp vi fått kring bilbanan.

Erik Ström från Institutionen Signaler och system, för viktiga insikter och idéer om den senaste fordonsbaserade WiFi-tekniken.

Jörgen Blenow från Institutionen Högspänningsteknik, för den briljanta idén om brytning av strömmar samt tankar kring systemets utformning.

Aleksander Bartnicki från Institutionen Högspänningsteknik, för insikten över systemets problematik gällande överföringsförluster.

Torbjörn Thiringer från Institutionen Elteknik, för den tekniska expertisen om kraftelektriska komponenter.

Elektrosektionens Teletekniska Avdelning (ETA) för tips och rådgivning vid arbetet med styrsystemet.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Mål	3
1.4	Metod	4
1.5	Avgränsningar	8
2	Teori	9
2.1	Existerande system	9
2.1.1	Konduktiv elöverföring	10
2.1.2	Induktiv elöverföring	10
2.1.3	Elways	10
2.1.4	Innorail	11
2.2	Olika spänningstyper	11
2.3	Elsäkerhet	11
2.3.1	Lagar och regler	12
2.3.2	Säkerhetsrisker	12
2.4	Kraftelektriska komponenter	13
2.4.1	Transformator	13
2.4.2	Likriktare	14
2.4.3	Likspänningsomriktare	14
2.4.4	Reläer och kontaktorer	16
2.5	Sveriges elnät	17
2.6	Standarder för konduktiv laddning av elfordon	18
2.7	Verkningsgrad	19
2.7.1	Termodynamisk verkningsgrad	19
2.7.2	Elektrisk verkningsgrad	19
2.7.3	Kraftelektriska komponenter	20
2.7.4	Överföringsförluster	20
2.8	Interaktion mellan fordon och skensystem	21
2.8.1	Etablerade tekniker	21
2.8.2	EITS – European Intelligent Transport System	22
3	Förutsättningar	23
3.1	Trafiktäthet	24
3.2	Effektförbrukning	25
3.3	Miljöpåverkan	26
3.3.1	Trafikens miljöpåverkan	26
3.3.2	Olika energikällor	26

4	Analys och beräkningar	27
4.1	Existerande system	27
4.2	Elsäkerhet	28
4.3	Standarder för konduktiv laddning	28
4.4	Systemets verkningsgrad	29
4.4.1	Kraftelektriska komponenter	29
4.4.2	Överföringsförluster	29
4.4.3	Total verkningsgrad	30
4.5	Effektbehov	31
4.5.1	Fordon	31
4.5.2	Effektbehov vid realisering	32
4.6	Miljöpåverkan	32
4.7	Interaktion mellan fordon och skensystem	35
4.8	Möjliga tekniska lösningar	36
4.8.1	Konstant strömförsörjning	37
4.8.2	Intermittent strömförsörjning	39
4.9	Utvärdering av tekniska lösningar	41
5	Demonstrationsmodell	43
5.1	Bil	43
5.2	Bilbana	44
5.3	Styrsystem	47
5.4	Materiellista	50
6	Diskussion	52
6.1	Verkningsgrad	52
6.2	Effektbehov	53
6.3	Miljöpåverkan	54
6.4	Interaktion mellan fordon och skensystem	55
6.5	Tekniska lösningar	55
6.6	Demonstrationsmodell	56
6.7	Utvecklingspotential	57
7	Slutsats	59
	Referenser	62
A	Mätdata mellan Falkenberg och Varberg	67
B	Mätdata vid Bäckebo	70
C	Pughs beslutsmatris	73

D Ritning bilbanan	74
E Ritning kurvsegment	75
F Kopplingsschema styrsystem	76
G Kopplingsschema timerkrets 556	77
H Kopplingsschema indikatorkrets	78

1 Inledning

När den nuvarande fordonsflottan ser sig om efter nya drivmedel har eldrift tagits fram som en av de alternativa lösningarna. Denna idé begränsas dock av dagens batteriteknik som ej möjliggör längre körsträckor. Batterierna tar även relativt lång tid att ladda vilket ej är önskvärt. Att ladda eller upprätthålla laddningen under färd har därför blivit allt mer intressant (Becker, Sidhu och Tenderich 2012). Det finns idag ett flertal tekniker framtagna av olika intressenter för att utvärdera system som löser detta. Dessa intressenter har valt att gå olika vägar och kan generellt sett delas in i två grupper av laddningstekniker: konduktiv och induktiv laddning (Bombardier AB 2012b; Swanson 2003). Ett konduktivt system baseras på att fordonet använder sig av en släpkontakt som leder elektrisk energi från en skena i vägen över till fordonet medan det induktiva systemet istället använder sig av induktiva slingor i vägbanan för att överföra energin trådlöst (Nationalencyklopedin 2012a,b). Det här projektet fokuserar på att undersöka möjligheterna hos ett konduktivt skensystem.

1.1 Bakgrund

En av de största utmaningar dagens samhälle står inför är bevarandet av miljön, vilket till stor del sker genom minskning av fossila utsläpp samt ansvarsfullt utnyttjande av energitillgångar (Cuff och Goudie 2009). I Sverige står vägtransporter för den största användningen av fossila bränslen (Svensson 2012). För att minska användningen, och därmed utsläppen, måste antingen transporterna minska i antal eller övergå till annan energikälla.

I och med dagens konsumtionssamhälle är en minskning av trafiken orimlig och då kvarstår att övergå till en alternativ energikälla. Vid eldrift ges möjlighet att välja hur den elektriska energin ska produceras och således kan användningen av fossila bränslen minskas om energin kommer från miljövänliga källor. Elmotorns klart högre verkningsgrad bidrar även till bättre utnyttjande av den producerade energin (Beckman 2001).

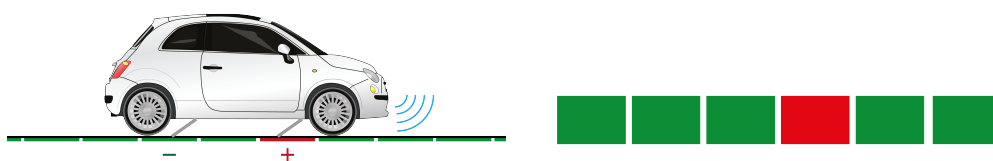
I nuläget är batteriteknologin en av de stora bromsklossarna för en framtida övergång till en eldriven fordonsflotta. Med dagens teknik skulle ett batteri som uppfyller prestandakraven för tunga laster och längre transportsträckor bli ohållbart stora, tunga och dyra (Becker, Sidhu och Tenderich 2012). En alternativ lösning för längre transporter skulle vara någon form av energitillförsel under färd, antingen för att bibehålla batteriets energinivå eller ännu hellre för att ladda det.

Fördelen med att basera ett system på konduktiv matning är framförallt att tekniken är väl beprövad jämfört med induktion. Den har länge funnits i

bruk i diverse järnvägsbaserade transportsystem, till exempel tågtrafik, spår-
vagnsnät och tunnelbanor samt även system med fordon som ej är bundna
till något rälsnät, såsom trådbussar. Kraftöverföringen har i dessa fall oftast
skett genom ledningar ovanför fordonet. På senare år har flertalet aktörer ut-
arbetat koncept där kraftöverföringen sker på sidan av eller under fordonet.

Alternativet som förefaller mest intressant för applikation i vägnätet är
överföring via ett konduktivt skensystem under fordonet. Det är orealistiskt
att konstruera ett system med överföring ovanifrån som fungerar för både
person- och tung trafik. Höjdskillnaden mellan dessa fordon är så stor att
personfordonen i så fall tvingas ha orimligt långa kontakter för att nå led-
ningarna som befinner sig cirka 5 meter upp. En normal elbil är i dagsläget
cirka 1,5 meter hög (Nissan Sverige 2012) vilket innebär att dessa kontakter
skulle behöva vara cirka 3,5 meter långa. Systemet med överföring från sidan
blir omöjligt för mer än två filer och medför dessutom stora säkerhetsrisker
eftersom öppna skenor ligger längs vägarnas sidor. Om ett fordon krockar
med en sådan skena och denna skadas kan strömförande ledare lämnas helt
öppet och innebära livsfara.

I dagsläget finns redan olika system för att tillföra energi underifrån ge-
nom strömförande skenor i marken. Tekniker har testats bland annat för att
driva spårvagnar i Bordeaux, Frankrike (Swanson 2003), och för att ladda
batteriet på bussar i Trieste, Italien (Ansaldobreda u.å). Gemensamt för des-
sa tekniker är att de använder sig av en skena uppdelad i segment. Generellt
sett kan detta göras på två sätt; det första är att ha plus- och minuspol par-
allellt liggande med varandra och det andra är att de ligger i följd med plus-
och minuspol efter varandra, även kallat monoskensystem, se Figur 1.



(a) Illustrativ bild över bil och skena från sidan (b) Monoskenan ovanifrån. Röd färg markerar spänningssatt segment.

Figur 1: Illustrativa bilder över skensystemet

Vid utveckling av ett markbaserat skensystem för konduktiv laddning av
elfordon finns dock många aspekter att ta hänsyn till. En viktig del är att
systemet är säkert, vilket innefattar allt från att förebygga olyckor till att
minimera skadeverkan vid eventuell olycka. Systemet bör vara säkert för alla
fordon såsom motorcyklar, personbilar och lastbilar att vistas på och runt om

skenan. Även personsäkerheten behöver vara hög och systemet skall i så stor utsträckning som möjligt vara fri från exponerade strömförande delar.

För att systemet ska bli verklighet måste det vara en kommersiellt gångbar teknik, där effektbehov och tillförlitlighet är en betydande faktor vid realisering. Dagens vägar trafikeras av olika typer av fordon med varierande effektförbrukning, varför det kommande skensystemet behöver anpassas till att klara växlande trafikmängd och olika fordonstyper. Om systemet ska realiseras måste det även vara ekonomiskt försvarbart att implementera i det framtida vägnätet. Med detta i åtanke kommer de nödvändiga komponenterna dimensioneras utifrån det efterfrågade effektbehovet.

Ur miljöperspektiv är det tänkt att systemet ska minska användningen av fossila bränslen i fordon. På så vis fås möjlighet att välja en mer miljövänlig energikälla. En annan fördel är att den visuella påverkan blir marginell då systemet implementeras i befintlig väg.

Då projektets uppdragsgivare önskar utveckla ett monoskensystem har fokus legat på denna teknik.

1.2 Syfte

Projektets syfte är att utveckla ett markbaserat monoskensystem, anpassat för personfordon och tyngre trafik, för att möjliggöra kontinuerligt laddning under färd. Det mest lämpliga framtagna systemet med hänsyn taget till säkerhet, effektivitet och miljöpåverkan ska sedan realiseras i ett demonstrationsexemplar.

1.3 Mål

För att uppnå projektets syfte krävs det att ett antal uppställda mål uppfylls:

- A Skensystemet ska utformas för att överföra erforderlig effekt för drift av personfordon och tyngre lastbilar under färd längs en motorväg i 100 *km/h*.
- B När segment i skensystemet inte är aktiva, det vill säga ej överför energi, ska dessa vara ej ledande.
- C Skensystemet i drift ska ha en minskad inverkan på miljön jämfört med dagens vägtrafik.
- D Demonstrationsexemplaret ska likna den teoretiska modellen och laddning av demonstrationsfordonet ska ske under färd.

1.4 Metod

Följande avsnitt beskriver hur arbetet genom projektets gång planerats och genomförts.

Uppdelningen och ordningen på delarna i avsnittet visar kronologiskt hur projektet genomfördes. Värt att notera är att demonstrationsmodellen baserades på den framtagna teoretiska modellen.

Litteraturstudie

Inledningsvis genomfördes en teknisk litteraturstudie över befintliga konduktiva skensystem där en generell uppfattning om de idag existerande teknikerna skapades. Då det framkom att det ännu inte finns ett system likt det syftet beskriver riktades fokus i studien på att hitta för- och nackdelar med de idag befintliga systemen. Utifrån detta studerades de tekniker som i någon utsträckning kunde tillämpas i monoskenan. Dessa tekniker utvärderades och resulterade i ett antal delstudier.

- **Trafikmängd på motorväg**

För att veta hur stor påfrestning skensystemet ska klara av undersöktes trafikmängden på en större motorväg i Sverige. I kombination med undersökningen gjordes även beräkningar som fastställde det effektbehov som föreligger på skensystemet. Återkopplas till mål A.

- **Fordonens batterier och laddningsbehov**

Området studerades för att fastställa vilken spänningsnivå och teknik som används vid laddning av elfordons batterier i dagsläget. Återkopplas till mål A.

- **Elöverföring från kraftmatningen av skenan till bilen**

Då det finns flera alternativ för elöverföring från skenan till bilen gjordes en undersökning av dessa. De undersökta överföringsteknikerna är växelspanning och likspanning, där deras grundläggande egenskaper studerades och jämfördes med elfordonets laddningsbehov. Återkopplas till mål A.

- **Elektriska komponenter för transformering av spänning och ström**

Eftersom skensystemet behöver anpassas till olika typer av elfordon har en studie gjorts där komponenter för transformering av spänning och strömmar gjorts. De olika komponenternas fysikaliska egenskaper och förutsättningar har undersökts. Återkopplas till mål A.

- **Brytning av strömmar**

Då skenan inte ska vara konstant spänningsatt studerades möjligheterna för hur brytning av matningen till skenan ska ske. Det var under studien viktigt att snabbheten och tillförlitligheten var stor nog att klara av trafikmängden. Återkopplas till mål B.

- **Interaktion mellan skena och elfordon**

För att lyckas med att bryta och slå på skensegmenten i rätt tid har en studie över möjligheten av interaktion mellan skena och elfordon framtagits. De olika möjligheterna av interaktion som är av intresse är trådlöst och trådbundet. Även här är tillförlitligheten av stort intresse för att inte få exponerade strömförande delar på sektioner av skensystemet som inte används. Återkopplas till mål B.

Under delstudiernas gång sammanfattades all relevant information ner i dokument för att lätt ha möjligheten att arbeta vidare med det.

Empiriska data

Då syftet är att systemet ska vara realiserbart är det viktigt att alla beslut, undersökningar och intervjuer sker med information som är relevant för projektet. Därför har alla projektets intervjuer genomförts med personer som har stor insikt och erfarenhet inom sitt område.

Mål D; demonstrationsmodell, utformas utifrån gruppens egna erfarenheter och kunskap.

Utvärdering och val av modell

Då litteraturstudien var utvärderad och färdigställd påbörjades analysen av det samlade materialet och den kunskap som införskaffats. Med hjälp av det utvärderade materialet valdes ett antal alternativ ut för en möjlig realisering. För att få en bättre bild av de alternativ som framtagits och skapa en enklare beslutsprocess användes en så kallad Pughs matris, se Tabell 1. Att använda sig av Pughs matris kräver först ett antal presenterade urvalsalternativ. Efter det ställs ett antal kriterier upp, där dessa delas in efter hur viktiga de är för skensystemets realisering. Sedan poängsätts de olika alternativen efter hur väl de uppfyller de uppställda kriterierna, där även kriterierna viktas efter hur viktiga de är. När poängsättningen är klar summeras de för att utse vilket alternativ som fick högst totalpoäng och därmed lämpar sig bäst för projektet (University of California, Berkeley 2012).

Tabell 1: Illustrativt exempel av en Pugh beslutsmatris

	Vikt	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Kriterium 1	•	•	•	•
Kriterium 2	•	•	•	•
Kriterium 3	•	•	•	•
Kriterium 4	•	•	•	•
Total poäng	•	•	•	•

Demonstrationsmodell

Efter att en teoretisk modell valdes togs en evaluering över hur demonstrationsmodellen realisering fram. Demonstrationsmodellen är en skalad variant av den teoretiskt framtagna modellen. Utformningen av demonstrationsmodellen togs fram utifrån vissa kriterier. Dessa kriterier är av största vikt då modellens huvudsyfte är att vara ett demonstrativt exempel av hela systemet. De kriterier sombehövde uppfyllas var följande.:

Modellen ska:

- visa på det framtagna teoretiska systemets helhetsbild.
- under färd laddas konduktivt via en skena under bilen.
- ha mycket goda demonstrativa egenskaper där det är enkelt att förstå det framtagna systemets generella konstruktion och huvudfunktioner.
- vara ekonomiskt möjlig inom budgetens ramar.
- vara mobil då det kan bli aktuellt att demonstrera den på annan plats, såsom mässor etc.

Utifrån dessa krav växte ett koncept fram. Parallellt jobbade sedan tre grupper med optimering av bilen, programmering av styrsystemet respektive bygge av bilbanan. Genom att hålla tät kontakt och skriva loggbok kunde hela gruppen se hur arbetet fortskred.

Det första som bestämdes var vilken bil som skulle användas. Den behövde vara stor nog att bygga om, men med en så liten svängradie som möjligt så att hålla nere banans storlek.

Bilen

Efter inköp av radiostyrd bilmodell undersöktes några nyckelparametrar så som svängradie, hastighet, markfrigång samt spänning och ström till motorn. Allt detta för att definiera bilens specifikationer och utvärdera vilka modifieringar som behövdes för användning. Bilen går att se i Figur 2.



Figur 2: Bilden visar den radiostyrda modell av en Volvo XC60 som användes i projektet.

För att göra bilen mer lätthanterlig krävdes en minskning av svängradie och topphastighet. Svängradien förbättrades genom att avlägsna plastdetaljer i styrsystemet och topphastigheten sänktes genom en diodkrets som begränsar spänningen över motorn. Bilens fjädring bortmonterades för att skapa mer stabilitet och en fast markfrigång. På så vis underlättades konstruktionen av kontaktdonen.

Bilens båda kontaktdon tillverkades i aluminium och utformades som rektangulära plattor med uppbockade kanter för att ge mindre känslighet mot ojämnheter i banan. De fästes därefter under bilen med ett inbördes avstånd som motsvarade längden av två skensegment inklusive isolationavstånd. För att möjliggöra kommunikation med styrsystemet monterades en IR-lysdiod i bilen.

Demonstrationsbanan

Bilens storlek och svängradie var den begränsande faktorn för banans minsta möjliga storlek. Samtidigt som kontinuerlig körning under en längre tid skulle möjliggöras var en alltför otymplig bana inte önskvärd varför valet föll på en ovalbana. Materialet till banan var en kompromiss mellan robusthet, vikt och kostnad och till viss del även tillgänglighet.

Trots optimering av svängradien gjorde bilbanans storlek den svår att förflytta i ett stycke, därför delades den i två delar och sattes samman med gångjärn. För att ge plats för elektronik och dessutom öka hållfastheten på banan fästes regler på dess undersida.

Segmentens längd gentemot bilen gjordes skalenliga och kurvdelarna böjdes för hand innan de sågades till önskad längd. Ett spår frästes för metallkenorna att placeras i. Dessa skruvades sedan på plats med skruv som även användes som kontaktpunkt för styrsystemet. På undersidan fästes kablar till elektroniken med hjälp av muttrar, kabelskor och brickor.

För att förenkla placeringen och därmed kalibreringen av detektorerna frästes ett spår runt hela banan även för dessa. Spåret kompletterades med borrade hål för kabeldragning till undersidan av banan.

Demonstrationsmodellens styrsystem

Kommunikationen för att bestämma bilens position relativt skensegmenten sker med hjälp av infraröd kommunikation, hädanefter IR-kommunikation. Vid varje segment placerades en IR-sensor för att detektera om bilen befann sig ovanför det aktuella segmentet. Vidare valdes en mikroprocessor för att behandla IR-sensorernas signaler. Dels för att via dess USB-gränssnitt indikera vilka segment som är aktiverade på ett datorprogram programmerat i Java, dels för att styra de reläer som är nödvändiga för att strömförsörja demonstrationsmodellens skensegment.

Kretskorten för styrelektroniken utformades i ett datorprogram kallat Eagle CADSoft. För att undvika att utformningen blev onödigt komplicerad och tidskrävande gjordes en kretskortslayout för enbart fyra stycken segment som sedan duplicerades för att erhålla det önskade totala antalet. Kretskorten tillverkades för hand med hjälp av etsningsteknik vid Elektroteknologsektionens Teletekniska Avdelning (ETA) vid Chalmers Tekniska Högskola. De elektroniska komponenterna löddes fast på de etsade kretskorten för hand. Monteringen av kretskorten gjordes på undersidan av bilbanan för att underlätta transport och ihopmontering för användaren.

1.5 Avgränsningar

Ekonomi och kostnader

Under projektets gång har ingen kostnadskalkyl genomförts utan endast analys av den ekonomiska rimligheten, detta för att begränsa projektets storlek. Däremot kan kostnaderna inte helt försummas då ekonomin är en viktig del av att realisera systemet.

Materialval i skenan

En undersökning av vilket material skenan ska vara byggd av har inte behandlats. Fokus ligger ej i detta område och gruppens kompetens inom materialteknik är ytterst begränsad. Denna avgränsning innefattar även att beräkningar av livslängd, förslitningar och hållbarhet ej utförts.

Reglering av överföring till fordon

Tekniken som sammanbinder fordonen med skenan, även kallad kontaktdon, har inte studerats. Det förutsätts att kontaktdonet har kontinuerlig kontakt med skenan då fordonet befinner sig över den. Även reglering av kontaktdonet, så som detektering och anslutning till skenan antas fungera problemfritt.

Elförsörjning av systemet

Projektet förutsätter att erforderlig effekt matas från det befintliga elnätet.

Miljö

Systemets miljöpåverkan har endast behandlas kortfattat. En fullständig livscykelanalys av större karaktär har ej genomförts. Dock är miljöaspekten, liksom den ekonomiska, viktig för önskad implementering och har på så sätt inverkan på den tekniska lösningen.

Demonstrationsmodell

Vid utformningen av kommunikationen mellan bil och demonstrationsbana föll valet på IR-kommunikation som var bekant för gruppen sedan tidigare. Således avgränsades andra kommunikationsmetoder som till exempel WiFi och laserreflektion.

2 Teori

I följande teoriavsnitt beskrivs flertalet tekniska områden som är av intresse för att konstruera monoskenssystemet. Inledningsvis redogörs vilka tekniker som har testats inom området konduktivt laddningssystem.

2.1 Existerande system

I dagsläget finns redan projekt för elektrifiering av fordon under färd. Dessa är i regel oftast baserade på en av två metoder, konduktiv eller induktiv elöverföring. Följande avsnitt behandlar dessa metoder och tar upp ett par av de projekt som pågår just nu.

2.1.1 Konduktiv elöverföring

Det finns idag ett par olika alternativ för konduktiv elöverföring. Ett av dessa är det som använder sig av kraftförsörjning ovanför fordonet, där en kraftledning följer över vägen eller rälsen. Två typiska exempel är det svenska järnvägsnätet och spårvägssystemet i Göteborg. Detta system fungerar både för spårfordon och vägfordon med hjälp av en upptagningsarm som regleras att följa den överliggande kraftledningen.

Ett annat alternativ är kraftförsörjning från sidan av fordonet. Denna teknik använder sig till exempel Stockholms tunnelbanesystem av. Nackdelen med detta är att avståndet till fordonet måste vara känt och att det inte ändras under färd vilket endast gör det möjligt för spårfordon att fungera med denna teknik.

Som nämnts i inledningen finns det även ett antal system som använder sig av kraftförsörjning under fordonet. Fördelen med dessa system är de fungerar med både spårfordon och vägfordon.

2.1.2 Induktiv elöverföring

En metod för strömöverföring där direktkontakt inte behöver finnas är genom induktion som använder sig av magnetiska fält för att överföra energi. Ett stort projekt inom laddning av elfordon med denna teknik leds idag av Bombardier (Bombardier AB 2012a,b). Då induktiv elöverföring sker trådlöst har den ingen direktkontakt mot någon ledare, dock blir förlusterna stora (Svensk Energi 2010b).

2.1.3 Elways

Det finns ett svenskt företag, Elways AB, som idag utvecklar ett markbaserat skensystem för konduktiv laddning av elfordon. Systemet bygger på en tvådelad skena där ena spåret fungerar som pluspol och andra spåret som minuspol. Här har Elways AB valt att dela upp skenan i segment för att slippa ha hela denna i drift. Skenans segment är i grundläget jordade och spänningssätts enbart när det passerande fordonet befinner sig ovanför dessa (Elways 2012b). Detta innebär både högre säkerhet för omgivningen och minskade förluster om kontakt mellan skenorna skulle uppstå av misstag.

Företaget har nyss beviljats ett stöd på 9 miljoner från Energimyndigheten för att bygga en fullstor bilbana vid Arlanda i Stockholm (Elways 2012a). Målet är att det ska fungera för bilar och lastbilar på befintliga vägar, men än så länge är detta ett projekt i utvecklingsstadiet.

2.1.4 Innorail

Innorail är ett annat system för markbunden kraftöverföring till fordon. Likt Elways bygger systemet på två parallellgående skenor, uppdelade i segment. Då fordonet når ett segment skickas en kodad signal till en kontaktor i skenan och segmentet spänningssätts. För jämn effektöverföring krävs två uppsättningar kontaktdon (Swanson 2003), varför detta system lämpar sig bättre för längre fordon. Innorail finns idag i franska Bordeaux och används där för spårvagnar (Briginshaw 2003). Även i italienska Trieste finns systemet på försök men då för trådbussar (Swanson 2003).

2.2 Olika spänningstyper

När elektricitet började användas som energikälla användes först likspänning för att transportera energin från kraftkälla till konsument. Att likspänning var det som användes härstammar från uppfinnandet av dynamon, som är en enklare likströmgenerator. I slutet av 1800-talet hade elektrifieringen av samhället börjat, och allt fler ville ansluta sig till elnätet. För att klara av den ökade efterfrågan uppfanns då växelspanningen. Fördelen med växelspanningen var att överföringsförlusterna minskade i och med att högre driftspänningar kunde användas samt att det var lättare att variera spänningsnivån (Dorf och Svoboda 2000).

En växelspanning, även benämnt AC-spänning, definieras som en spänning som växelvis byter polaritet, ofta som en sinusformad signal (Dorf och Svoboda 2000). Till skillnad från växelspanning är en likspänning, även benämnt DC, en spänning som ej byter polaritet. Då likspänningen ej varierar utan är konstant större än noll krävs en högre spänning för att överföra samma effekt som en växelspanning (Bartnicki 2010). Ett typiskt exempel på likspänning är ett batteri med pluspol och minuspol, mellan dessa är potentialen det som normalt benämns spänningen.

2.3 Elsäkerhet

Överföring av elektrisk energi innebär alltid säkerhetsrisker vilka ofta står i direkt proportion till energiinnehållet. Det finns olika tekniker för att minimera säkerhetsriskerna samt ett flertal lagar och regler kring vad som är tillåtet och under vilka omständigheter. Detta avsnitt innehåller ett utdrag av dessa lagar och regler, risker och problematik samt metoder för att minska dessa risker.

2.3.1 Lagar och regler

Hur elektricitet får användas i Sverige styrs av Elsäkerhetsmyndigheten med hjälp av Ellagen. De olika regleringarna är beskrivna i myndighetens senaste författningssamling Elsäk-FS 2008-1. Denna innehåller flera stadgar och regler för hur lågspännings- och högspänningsanläggningar ska konstrueras för att uppfylla lagens krav. Definitionen av en lågspänningsanläggning är att den nominella spänningen ej får överstiga 1000 V AC alt. 1500 V DC . Över dessa spänningsnivåer kategoriseras anläggningen som högspänningsanläggning (Elsäkerhetsverket 2008a). Skillnaden mellan dessa två typer av anläggningar är att högspänningsanläggningar har mycket högre krav på avskärmning för att undvika kontakt med spänningsatta delar eller delar som med hjälp av induktion kan bli spänningsatta. En sådan anläggning lämpar sig således ej för bruk i offentlig miljö. För att konstruera och dimensionera ett skensystem som ska kunna användas på allmänna vägar, kommer de således behöva uppfylla kraven för en lågspänningsanläggning. Nedan spaltas några av de krav som tycks vara mest relevanta för denna typ av applikation som sedan kan användas vidare i utvecklingen av skensystemet. Nedanstående är taget direkt ur Elsäk-FS 2008-1 (Elsäkerhetsverket 2008b).

- En luft- eller kontaktledning ska vara utförd och framdragen så, att dess konstruktion och läge i betryggande omfattning förebygger fara för person- eller sakskada på grund av el.
- En starkströmsanläggning ska vara utförd så, att personer och husdjur skyddas mot elchock som kan uppstå vid direkt beröring av spänningsförande delar eller av utsatta delar som blivit spänningsförande genom ett fel, det vill säga indirekt beröring.
- En starkströmsanläggning ska vara utförd så, att den inte medför risk för person- eller sakskada på grund av höga temperaturer, ljusbågar eller mekaniska påkänningar förorsakade av ström vid normal drift eller av överström.

Med starkströmsanläggning menas en anläggning vars ström eller frekvens kan komma att vara farlig för personer (Elsäkerhetsverket 2008a). Dödligheten ökar med ökad ström- eller frekvensnivå. Till exempel kan en ström på 100 mA med frekvensen 50 Hz vara dödlig (Bartnicki 2010).

2.3.2 Säkerhetsrisker

När en ström ska brytas mekaniskt kan ett överslag ske via luften och ge upphov till något som kallas för ljusbåge. Då de ledande metallytorna i till

exempel en brytare separerar från varandra, fungerar det omkringliggande mediet som en isolator för strömmen. Om strömmen är tillräcklig stark räcker luften inte till som isolator och luften joniseras till plasma. Via plasman kan strömmen fortsätta att flyta. Under detta kritiska moment kan den heta joniserade plasman kylas ned av antingen omkringliggande luft eller tillfört kylmedium för att bli icke ledande och således stoppa ljusbågen.

Vid växelströmsmatning kan en ljusbåge kylas ned och stoppas då strömnivån når 0 A , detta därför energitillförseln till ljusbågen är momentant 0 . Dock är chansen för nedkyllning lägre om det varit en hög ström tidigare i växelströmsperioden som värmt upp plasman.

En likström saknar till skillnad från växelström en period då strömmen momentant når värdet 0 A . För att bryta en likström och minimera risken för en ljusbåge krävs det en brytare som höjer ljusbågens resistans och därmed sänker dess spänningsnivå till samma nivå som bakomliggande nätets driftspänning och tvingar således ned ljusbågens ström till 0 . En annan metod är att med hjälp av en kondensator och en spole kopplad parallellt med brytaren, åstadkomma en pendlande ström hos ljusbågen och därmed uppnå en momentan strömnivå på 0 A (Sölver 2007).

Ur ett personsäkerhetsperspektiv är växelström ej att föredra jämfört med likström då växelströmmen ger upphov till ett krampliknande symptom i kroppens muskler och hjärta om olyckan skulle vara framme. Även den strömgräns för vilken personskador uppstår är lägre för växelström i jämförelse med likström (Elforsk 1999).

2.4 Kraftelektriska komponenter

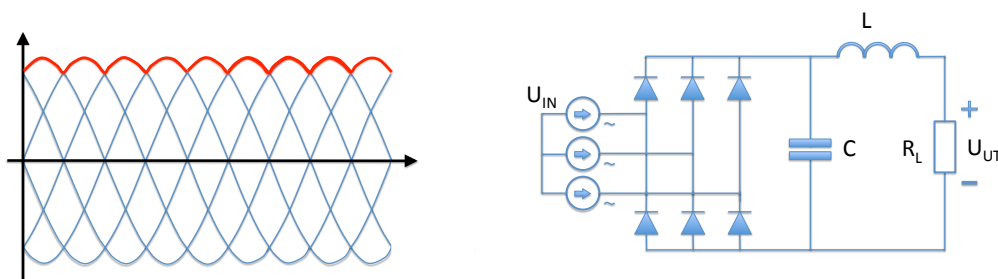
För att styra och reglera överföring av elektrisk energi används flertalet olika komponenter. Nedan återfinns ett antal av dessa som är av intresse för det aktuella problemet.

2.4.1 Transformator

I ett elnät används flera olika spänningsnivåer för att minska överföringsförlusterna så mycket som möjligt. För att detta ska vara möjligt måste spänningarna och strömmarna kunna transformeras till olika nivåer, detta sker med hjälp av en så kallad transformator. En enfastransformator är uppbyggd av två galvaniskt skilda spolar med olika antal lindningar. När en ström går genom den ena spolen, induceras en ström i den andra och på så vis har amplituden på strömmen/spänningen förändrats i och med det olika antalet lindningar. En transformator kännetecknas av hög verkningsgrad där de som används i elnätet normalt har en verkningsgrad på 95-99% (Bartnicki 2010).

2.4.2 Likriktare

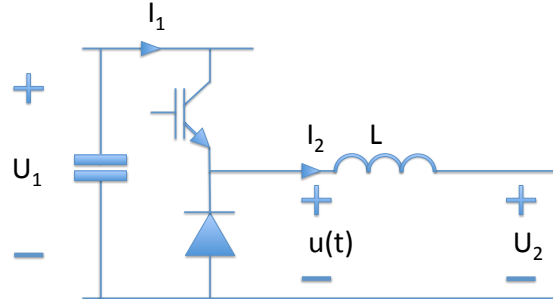
Likriktare används i elektriska sammanhang då en växelspanning ska omformas till en likspänning. Dess grundprincip baseras på att ett antal dioder leder vid olika tidpunkter så att växelspanningens negativa halvperioder blir positiva, se Figur 3a. Det gör att en likformig spänningsnivå erhålls. Beroende på om en- eller trefas växelspanning likriktas, kommer likriktaren skapa olika mycket rippel på likspänningen. En trefaslikriktare skapar mindre rippel och är därför att föredra då rippel kan störa andra komponenter (Kuperman m. fl. 2011). För att jämna ut rippet används ofta en kondensator tillsammans med en spole. Det finns likriktare som klarar att leverera 50 kW , den effekt som behövs för att snabbbladda ett elfordon, men de är otympliga och väger uppemot 400 kg (ABB AB 2011). I dagsläget är de kommersiella elfordonen endast utrustade med en enfasig likriktare på ungefär $3,3\text{ kW}$ (Nissan USA 2012).



(a) Trefasspänningen likriktas när den passerar genom dioderna men ett visst rippel kvarstår. Detta jämnas ut med hjälp av olika komponenter. (b) Trefaslikriktare med glättningskondensator och spole för att minska rippet på utspänningen U_{UT} .

2.4.3 Likspänningsomriktare

En likspänningsomriktare, även benämnd LS-omriktare, används för att förändra amplituden hos likspänning och likström. Den kan användas som nedspänningsomriktare eller uppspänningsomriktare där den enklaste formen av LS-omriktare består av en transistor, en diod och en spole, se Figur 3.



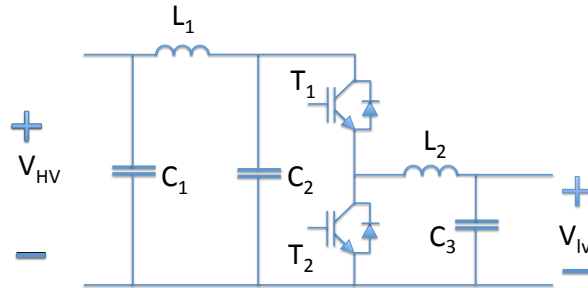
Figur 3: Schematisk bild över en enklare LS-omriktare.

Genom att styra hur stor del av varje period transistorn är öppen används LS-omriktaren för att skapa en pulserande spänning på nedspänningssidan $u(t)$. Spolen L används för att jämna ut spänningen så att U_2 blir en nästintill ren likspänning. Förhållandet mellan inspänningen U_1 och utspänningen U_2 blir således enligt Ekvation 1, där T är periodtiden och t_p är den tid som transistorn leder under varje period. På motsvarande sätt blir strömsambandet det omvända, se Ekvation 2.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{T}{t_p} \quad (1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{t_p}{T} \quad (2)$$

Utöver denna enklaste LS-omriktare finns många andra varianter med möjlighet att styra riktning hos både spänning och ström för att kunna användas både till motor- och generatordrift. Dessutom används ofta olika typer av filter för att minska det brus som annars kan uppkomma. Ett exempel på en sådan typ av LS-omriktare är en så kallad buck-boost converter med ett filter på nedspänningssidan, se Figur 4. Denna LS-omriktare är av intresse då det utvecklas en modell med samma teknik gjord för överföring av hög effekt i lastbilshybrider. Den i studien aktuella LS-omriktaren klarar av att överföra effekter på upp till 100 kW och kan arbeta med en switchfrekvens på 100 kHz , dessutom har den en beräknad verkningsgrad på $97\text{-}98\%$. Den har en storlek på $300 \times 260 \times 70 \text{ mm}$. Allt detta gör den mycket lämplig för användning i ett skensystem för effektöverföring till fordon genom galvanisk kontakt (Eckardt m. fl. 2006).



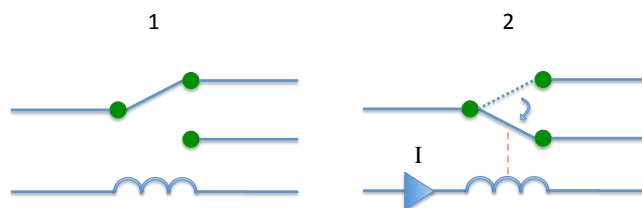
Figur 4: Beskrivande bild av en buck-boost LS-omriktare

2.4.4 Reläer och kontaktorer

För att möjliggöra växelvis spänningssättning av systemets skensegment måste någon form av brytar- eller switchteknik användas. Brytningen av en elektrisk krets är mindre tekniskt krävande om en liten ström flyter i den, stora strömmar ger däremot problem med ljusbågar och gnistor.

En kontaktor är en typ av mekanisk brytare som är anpassad för att kunna bryta större strömmar, utan att få problem med fastsvetsningar av kontaktytorna på grund av den kraftiga strömmen (All About Circuits 2012). På marknaden idag finns det kontaktorer som möjliggör brytning av både växel- och likspänningar upp till 1000 V. Företaget ABB säljer t.ex. kontaktorer som bryter en 1000 V DC spänning på 1 ms, dessa är även anpassade för fjärrstyrning (ABB AB 2012).

Ett relä använder en separat styrkrets för att bryta huvudkretsen, detta sker antingen med en mindre mekanisk brytare alternativt en halvledarkomponent. Styrkretsen består av en spole och en mindre brytare eller motsvarande komponent. När styrkretsen sluts laddas spolen upp och fungerar som en elektromagnet mot ett drivankare som används för att sluta eller bryta huvudkretsen, se Figur 5.

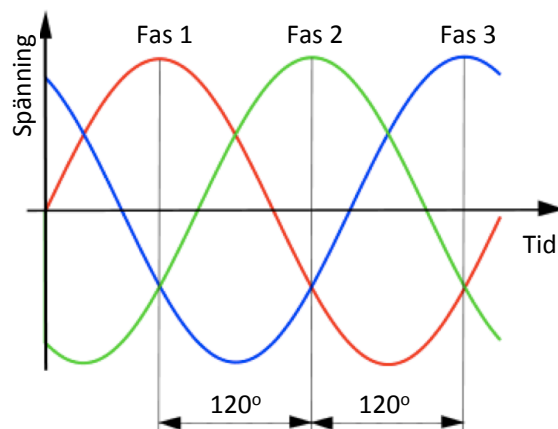


Figur 5: Figuren illustrerar funktionen för ett elektromagnetiskt relä. Läge 1 visar reläets utgångsläge och läge 2 visar då en ström flyter genom spolen.

2.5 Sveriges elnät

Elnätet i Sverige använder 50 Hz växelspanning trefas och är indelat efter olika spänningsnivåer. Den högsta nivån är 400 kV och används i stamnätet som överför el över långa sträckor. Syftet med att använda en hög spänningsnivå för längre överföringar är att minska förluster, vilket tas upp senare i avsnitt 2.7. Stamnätet förgrenas i flertalet regioner där spänningen transformeras ned till en regional nivå, vanligen 130 kV . Närmare samhällen och industrier övergår regionnätet i lokalnät där distributionen sker med 11 kV . Slutligen levereras elen till konsumenter, då med 400 V (Bartnicki 2010). Normalt hålls förlusterna vid överföring till industrier nere på 3% medan de vid överföring till privathushåll uppgår till $7\text{-}9\%$ (Vattenfall AB 2010a).

I avsnitt 2.2 presenteras vad som karakteriserar en växelspanning. De flesta elnät använder trefas växelspanning, dock med varierande frekvens. Trefas innebär att spänningen består av tre sinusformade växelspanningar som är inbördes förskjutna 120° , se figur 6. Detta har fördelen att en nolledare inte krävs om lasten är symmetrisk, det vill säga belastar de tre faserna likvärdigt. Summan av de tre spänningarna i varje punkt blir då noll vilket innebär att en artificiell nolla uppstår. Av säkerhetsskäl finns dock oftast en nolledare ändå. Om lasten istället är osymmetrisk eller på annat sätt belastar nätet ojämnt kan det leda till oönskade frekvenser och störningar (Bartnicki 2010).



Figur 6: Trefassspänning. Faserna är inbördes förskjutna 120 grader.

2.6 Standarder för konduktiv laddning av elfordon

Idag finns det en europeisk standard för hur laddning av vägbaserade elfordon ska ske. Denna standard benämns IEC 62196 och specificerar vilka strömmar, spänningar samt vilka typer av kontakter som är tillåtna. Dessa är uppdelade i fyra olika kategorier enligt följande (International Electrotechnical Commission 2011).

Mode 1 kopplas direkt till 50 Hz elnätet och får tillämpa spänningar upp till 250 V AC enfas eller 480 V AC trefas med ström på 16 A. Mode 1 är främst tänkt att användas i hushåll eller på andra platser med vanliga uttag. Kategorin ger enkel användning, men ger långsam laddning i och med den låga strömmen.

Mode 2 kan likt Mode 1 kopplas direkt till ett 50 Hz elnät, men tillåter en ström på 32 A. Övriga krav är att en jordfelsbrytare måste användas.

Mode 3 tillåter strömmar upp till 32 A/250 A beroende på utrustning. Den är tänkt att användas i mer permanenta laddningsstationer med möjlighet till mer intelligent kommunikation mellan station och bil men kräver ständig uppkoppling till elnätet och står i stand-by när ingen aktiv laddning sker.

Mode 4 tillåter strömmar upp till 400 A. Till skillnad från de övriga används DC-spänning. Mode 4 är också tänkt att användas för fasta laddstationer som har tillräckligt avancerade kontrollsystem. Då batterier använder DC-spänning innebär detta system att mycket lite elektronik behöver placeras i fordonet.

Mode 4 är ännu inte helt fastställd men en spänningsbegränsning på 1000 V DC diskuteras (International Electrotechnical Commission 2011). De olika laddningsteknikerna har i mycket begränsad omfattning realiserats, vilket bör möjliggöra eventuell modifiering för att tillämpa nya användningsområden så som laddningstyper anpassade för rörliga enheter.

I dagsläget finns det några olika typer snabbbladdare, som är anpassade för Mode 4, där japanska CHAdeMO är en av de lösningar som ligger i teknikens framkant. CHAdeMO-laddningsenheter som kan leverera en effekt på 50 kW finns idag på marknaden (CHAdeMO 2012). En fördel med dessa laddstationer är att nödvändig elektronik kan placeras i dessa och således inte behövs i varje enskilt fordon (Karlberg 2010).

2.7 Verkningsgrad

Verkningsgraden är ett mått på effektiviteten hos ett system som betecknas η och skrivs som kvoten mellan utvunnen energi och tillförd energi. Följande avsnitt behandlar verkningsgrad för olika typer av system och komponenter.

2.7.1 Termodynamisk verkningsgrad

Termodynamisk verkningsgrad definieras som kvoten mellan utvunnet arbete W och tillförd värmemängd Q , se Ekvation 3 (Schroeder 2000).

$$\eta = \frac{W_{ut}}{Q_{in}} \quad (3)$$

Den energi som går förlorad på vägen blir till värme. Vad en maskin har för teoretisk verkningsgrad beror på dess uppbyggnad. Den motor som används i vanliga bensinmotorer i bilar är den så kallade ottomotorn. Verkningsgraden ligger på ungefär 30% (Schroeder 2000).

I lastbilar, som kräver högre vridmoment, används istället en dieselmotor. Fördelen gentemot ottomotorn är förutom vridmomentet att denna har en verkningsgrad på 45% (Volvo AB 2012).

2.7.2 Elektrisk verkningsgrad

Precis som inom termodynamiken kan effektiviteten för elektroniska system beräknas genom kvoten för energin före och efter, här betecknat P , se Ekvation 4.

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} \quad (4)$$

För elektrisk energi beror verkningsgraden, förutom på de termiska förutsättningarna, på förskjutningen mellan spänningen och strömmen, något som alltid finns vid växelström. Färförskjutningen ger upphov till reaktiv effekt som inte kan användas utan endast tar upp plats i ledningarna. Den orsakar även ett större motstånd för den användbara aktiva effekten. Större färförskjutning ger större reaktiv effekt, se Ekvation 5.

$$S_{ut} = UI \cos(\varphi) + jUI \sin(\varphi) \quad (5)$$

Här är S skenbar effekt i Voltampere, U betecknar spänning i Volt, I ström i Ampere och φ är färförskjutning i grader. Den skenbara effekten delas upp i två komponenter, aktiv och reaktiv enligt Ekvation 6, 7 och 8.

$$S = P + jQ \quad (6)$$

$$P = UI \cos(\varphi) \quad (7)$$

$$Q = UI \sin(\varphi) \quad (8)$$

P betecknar aktiv effekt och mäts i Watt och Q är reaktiv effekt vilket mäts i Voltampere reaktiv, eller VAR.

En elektrisk motor har betydligt högre verkningsgrad än både diesel- och ottomotorn. Som exempel kan sportbilen Tesla Roadster ges där verkningsgraden från batteri till hjulen anges till 88 % (Tesla 2012).

2.7.3 Kraftelektriska komponenter

De kraftelektriska komponenter som krävs för skensystemet har rent generellt en mycket hög verkningsgrad. Aktuella modeller av likriktare, LS-omriktare och transformator har verkningsgrader på 97-98%¹, 97-98 % respektive 95-99 %. Generellt gäller att komponenternas verkningsgrad ökar med märkeffekten (Bartnicki 2010; Eckardt m. fl. 2006).

2.7.4 Överföringsförluster

Överföringsförluster uppstår vid olika delar av systemet. I matningskabeln och de kablar som förläggs mellan de olika delarna i systemet uppstår aktiva förluster $P_{\text{förlust}}$, beroende på längd och resistans i kabeln enligt Ekvationerna 9, 10 och 11. Ledarens resistans R_l beror av materialet och tvärsnittsarean. En vanlig aluminiumkabel anpassad för 12 kV med tvärsnittsarean 300mm² har en resistans på 0,100 Ω/km (Ericsson AB 2010). All teori i detta avsnitt

¹Torbjörn Thiringer (Professor vid Applied Power Electronics på Chalmers Tekniska Högskola) intervjuades av Jonatan Björk och Olle Nordqvist den 27 april 2012

gäller kablar eller ledningar förlagda under ideala förhållanden. I själva verket beror dessa förluster även av miljön ledaren placeras i, hur den ligger i förhållande till andra ledare och hur den är lindad².

$$R_l = \frac{\rho}{A}l \quad (9)$$

$$P_{AC, \text{ förlust}} = 3R_l I^2 \quad (10)$$

$$P_{DC, \text{ förlust}} = R_l I^2 \quad (11)$$

På motsvarande sätt uppstår reaktiva förluster $Q_{\text{förlust}}$, beroende på kablarnas induktans och kapacitans, se Ekvation 12. Då likspänning ej har någon fasvinkel uppstår inga reaktiva effektförluster.

$$Q_{\text{förlust}} = 3XI^2 \quad (12)$$

Där X betecknar kabelns induktiva och kapacitiva egenskaper. Dessa parametrar bestäms av hur kabeln är lindad och det inbördes avståndet mellan faserna. Som tidigare nämnts tillför inte den reaktiva effekten något användbart och minimeras därför genom faskompensering. Detta uppnås genom att använda spolar för att öka fasvinkeln eller kondensatorer för att minska den.

Ekvationerna ovan beskriver hur förlusterna är beroende av den ström som flyter genom kabeln i kvadrat. För att minska överföringsförlusterna kan en högre spänning väljas för att minska strömmen enligt ohms lag.

2.8 Interaktion mellan fordon och skensystem

För att styra skensystemets av och påslagning av de olika skensegmenten behöver någon form av kommunikationsteknik användas så att systemets segment endast är spänningssatta då ett fordon passerar. Då systemet ska vara anpassat för fordon som färdas i hög hastighet ställer det krav på hur snabbt och exakt information kan överföras. Det finns flera möjliga tekniker med olika för- och nackdelar som presenteras i avsnittet nedan.

2.8.1 Etablerade tekniker

Det blir allt vanligare att ansluta mobila enheter av olika slag till trådlösa nätverk. Den absolut största tekniken för detta är IEEE 802.11, även kallad WiFi. Denna teknik är mycket smidig för att ansluta många enheter till ett

²Aleksander Bartnicki (Förste Forskningsingenjör vid Högspänningsteknik på Chalmers Tekniska Högskola) intervjuades av Jonatan Björk och Olle Nordqvist den 27 april 2012.

och samma nätverk men har en mycket begränsad räckvidd på endast ett tiotal meter (Kurose och Ross 2010).

Det finns idag tekniker för att integrera dataöverföring i det befintliga elnätet och ett exempel på en sådan teknik är benämnd IEEE 1901. Tekniken sänder informationen på en bestämd frekvens som är markant högre än elnätets för att undvika informationsbortfall (Homeplug 2012). Ett högpasfilter används sedan för att filtrera bort nätets frekvens och endast läsa av den sända informationen. Systemet har en mycket hög överföringshastighet men kräver konstant kontakt under tiden information överförs vilket innebär att avbrott i kontakten kan leda till stora felaktigheter.

En kommunikationsteknik som förefaller som en relativt enkel lösning är användningen av induktiva givare. Sådana kan utformas på flera olika sätt, men generellt baseras tekniken på en sensor som triggas av ett riktat magnetfält från en sändarenhet. Denna sensor kan sedan användas för att skicka en simpel signal till en styrkrets. Det som är signifikant för denna teknik är att den har hög noggrannhet och god precision men möjliggör ej någon utökad dataöverföring (Elgered 2010).

2.8.2 EITS – European Intelligent Transport System

Världen över pågår flertalet forskningsprojekt för att ta fram en kommunikationsteknik som är anpassad för fordonsapplikationer. I Europa har en standard som benämns EITS tagits fram, vilket ska vara ett intelligent kommunikationsprotokoll specialanpassat för fordonsanvändning. Med hjälp av denna teknik ska fordon kunna kommunicera med varandra och på så vis möjliggöra användningen av till exempel aktiv säkerhet. Med aktiv säkerhet menas att fordonen ska kunna känna av omgivningen och på så vis kunna undvika kollisioner eller förhindra att föraren gör felaktiga trafikbedömningar (Nationalencyklopedin 2012c). Denna typ av system har ingen, alternativt väldigt låg, tolerans för långa uppkopplingstider när kommunikation ska startas. Därför kan inte vanlig WiFi-teknik användas som inte skulle klara av detta krav. Samtidigt vill forskarna använda WiFi-teknikens möjligheter till olika applikationsintegreringar efter hand, så att systemet kan vidareutvecklas med fler funktioner utan att behöva göra om grundtekniken. Detta har resulterat i en teknik vid namn ETSI ITS-G5, där ITS står för Intelligent Transport System, som baseras på WiFi-protokollet 802.11p.

ITS-G5

EITS ITS-G5 är en standard för hur arkitekturen kring kommunikationssystem är anpassade för olika typer av fordon. För vägbaserade fordon är ett frekvensband mellan 5470-5950 *MHz* numera reserverat för detta an-

vändningsområde. I detta intervall är olika områden specificerade, så kallade masker vid namn ITS-G5A, ITS-G5B och ITS-G5C, som ska användas till olika typer av kommunikation.

ITS-G5A masken är 50 MHz bred, och innehåller fem kanaler på respektive 10 MHz . Av dessa kanaler finns det en kontrollkanal och fyra servicekanaler där alla är till för att användas av olika säkerhetsapplikationer som till exempel nödbromsfunktioner eller liknande. ITS-G5B är utformad likadant som G5A, men är enligt standarden till för icke-säkerhetsapplikationer. Om en enhet skickar någon information på någon av dessa masker, kommer sändaren alltid agera som peer oavsett om sändarenheten är mobil eller fast.

ITS-G5C är den sista specifika masken i EITS LTI-G5 standarden som är 255 MHz bred och är tänkt att hushålla andra LTI-applikationer som kan tänkas behövas. Till skillnad från G5A/G5B har denna mask bredare kontrollkanal för att ge ökad kapacitet. Den här masken delar även frekvensutrymmet med RLAN, som är en typ av radarkommunikation. På grund av detta använder sig inte denna mask av peer-to-peer teknik utan istället skall fasta enheter arbeta som så kallad DFS Master och mobila enheter då som DFS slaves (Strom 2011).

De som alla enheter som använder sig av LTI-G5 standarden har gemensamt är att de hela tiden måste kunna ta emot information på kontrollkanalerna, även om de inte aktivt själva skickar information. Det är denna egenskap som skiljer EITS LTI-G5 från 802.11p som ej har detta krav. I och med denna funktion ska systemet vara anpassat för att skapa olika lösningar som vägtrafiken i framtiden kan tänkas behöva ³.

3 Förutsättningar

För att utvärdera och analysera olika alternativa skensystem krävs information gällande den svenska trafikens energiförbrukning och miljöpåverkan. Systemet applicerades teoretiskt på en befintlig vältrafikerad vägsträcka i Sverige för att ge ett verklighetsperspektiv. För detta syfte valdes Europaväg 6 mellan Malmö och Göteborg, en sträcka på 270 km (Google Maps 2012).

³Erik Ström (Professor vid Kommunikationssystem, informationsteori och antenner på Chalmers Tekniska Högskola) intervjuades av Louise Kempe och Olle Nordqvist den 20 februari 2012

3.1 Trafiktäthet

År 2010 fanns det 461 bilar per 1000 invånare i Sverige och genomsnittsbilen körde samma år 1291 mil. Antalet invånare var 9 415 570 personer, vilket innebär totalt 4,3 miljoner bilar och en total körsträcka för personbilar på 5,6 miljarder mil. Samtidigt körde 80 000 tunga fordon omkring på vägarna. Deras genomsnittssträcka per år var ungefär ett jordevarv, alltså strax över 4000 mil (Statistiska Centralbyrån 2012a). Det är svårt att veta exakt hur och när dessa fordon färdas, men med hjälp av data från två mätpunkter kring Göteborg har en uppskattning gjorts.

I appendix A presenteras trafikdata för dessa två mätpunkter längs motorväg E6. Trafikverket fastställde informationen genom att mäta trafikflödet över fyra respektive sex år och sedan medelvärdesbilda det till genomsnittligt dygnsflöde. De två mätpunkterna är lokaliserade vid Bäckeboismotet norr om Göteborg samt mellan Varberg och Falkenberg och gäller båda körriktningarna. I Bäckebo passerar cirka 30 000 fordon i varje riktning per dygn och det räknas som en högtrafikzon. Mellan Varberg och Falkenberg passerar däremot cirka 12 000 fordon, se Tabell 2 respektive 3.

Tabell 2: Trafikflöde vid mätpunkt Bäckebo under två mätperioder i de två körriktningarna.

Fr.o.m	T.o.m	Riktning	Bilar	Lastbilar	Totalt
2006-01-01	2010-01-01	1	25720±(6%)	2660±(7%)	28380±(6,1%)
2006-01-01	2010-01-01	2	25720±(6%)	2480±(7%)	28200±(5,5%)
2010-01-01	Pågående	1	28480±(10%)	2890±(11%)	31370±(9%)
2010-01-01	Pågående	2	26970±(10%)	2730±(11%)	29700±(10%)

Tabell 3: Trafikflöde vid mätpunkt mellan Varberg och Falkenberg under två mätperioder i de två körriktningarna.

Fr.o.m	T.o.m	Riktning	Bilar	Lastbilar	Totalt
2002-01-01	2006-01-01	1	8140±(7%)	1380±(8%)	9520±(7%)
2002-01-01	2006-01-01	2	8130±(7%)	1360±(8%)	9490±(7%)
2006-01-01	Pågående	1	9220±(12%)	1820±(9%)	11040±(11,5%)
2006-01-01	Pågående	2	10150±(8%)	1800±(7%)	11950 ±(8%)

Vidare är fordonens hastighet av intresse då det påverkar effektförbrukningen. Nedan, i Tabell 4 och 5, presenteras hastighetsdata för de två mätpunkterna. Utförligare data finns i Appendix A.

Tabell 4: Medelhastighet för bilar och lastbilar vid mätpunkt Bäckebo. Viss variation efter säsong.

Fr.o.m	T.o.m	Medelhastighet bilar	Medelhastighet lastbilar
2006-07-21	2006-07-24	104 km/h	92 km/h
2010-05-11	2010-05-14	91 km/h	85,5 km/h
2010-07-27	2010-07-28	102,5 km/h	90,5 km/h
2010-10-28	2010-10-29	91,5 km/h	85 km/h

Tabell 5: Medelhastighet för bilar och lastbilar vid mätpunkt mellan Varberg och Falkenberg.

Fr.o.m	T.o.m	Medelhastighet bilar	Medelhastighet lastbilar
2006-04-06	2006-04-07	112,5 km/h	91 km/h
2006-04-07	2006-04-10	116 km/h	94,5 km/h
2006-09-22	2006-09-25	117 km/h	96 km/h
2006-09-25	2006-09-26	119 km/h	93,5 km/h

3.2 Effektförbrukning

De två vanligaste drivmedlen i Sveriges fordonsflotta är bensin och diesel, där bensin dominerar bland personbilar och diesel bland tyngre fordon (Konsumentverket 2012a; Trafikverket 2012a). Dessa två bränslen skiljer sig något åt i energiinnehåll, där bensin ger 9,04 kWh/l och diesel 9,96 kWh/l (Statistiska Centralbyrån 2012b).

Statistiska centralbyråns undersökning från 2011 ger att en genomsnittsbil förbrukar 0,83 l bensin/ mil (Statistiska Centralbyrån 2012a). Genomsnittsförbrukningen för lastbilar är däremot något mer komplicerad då den stora variationen i utformning och storlek leder till stora skillnader i bränsleförbrukning. Enligt en undersökning utförd av Volvo Lastvagnar AB på deras olika lastbilstyper förbrukar en liten lastbil 2,25 kWh/mil och en stor långtradare 24,7 kWh/mil 2003, dock förbättrades effektiviteten med 47% mellan 1980 och 2001.

En personbil har ett effektbehov på 23 kW vid 90 km/h . Motsvarande för lastbilars förbrukning är estimerat till 160 kW ⁴. Den nyligen lanserade elbilen Nissan Leaf har en batterikapacitet på 24 kWh vilket tar den 100 km på en laddning vid motorvägskörning (Battery University u.å.). Jämförelsevis har en svensk villa ett genomsnittligt effektbehov på 2,7 kW , sett över hela året (Energimyndigheten 2012).

⁴Gunnar Asplund (VD för Elways AB) via mailkonversation den 31 januari 2012

3.3 Miljöpåverkan

I linje med Mål C bör projektet leda till minskad miljöpåverkan från trafiken. Det finns flera olika sätt att uppskatta och mäta detta, men då användandet av ett skensystem för konduktiv laddning i första hand påverkar fordonens utsläpp av växthusgaser är detta i fokus.

Förutom den vanligaste växthusgasen koldioxid finns en rad andra gaser som påverkar atmosfärens förmåga att reflektera infraröd strålning. Dessa kan samlas och mätas under begreppet koldioxidekvivalenter (Finlands officiella statistik (FOS) 2012).

3.3.1 Trafikens miljöpåverkan

År 2010 uppgick Sveriges utsläpp av växthusgaser till 66,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Av dessa stod den inrikes transportsektorn för 20,7 miljoner ton, eller 31,3% av de totala utsläppen. Vägtrafikens utsläpp är den klart största delen och utgör hela 92,3% vilket motsvarar 19,1 miljoner ton (Ekonomifakta 2012).

Den genomsnittliga personbilen i Sverige 2010 hade en bränsleförbrukning på 0,83 *l/mil* och släppte ut 191 *gCO₂/km* vid blandad körning (Statistiska Centralbyrån 2012a; Trafikverket 2012c). Denna utsläppssiffra tar endast hänsyn till det koldioxidutsläpp körningen står för men om även framställning av bränslet tas med blir siffran 213 *gCO₂/km*, alltså 11,7% mer (Konsumentverket 2012b).

Återigen är lastbilars förbrukning och utsläpp något mer komplicerade till följd av stora variationer i storlek och modell. Enligt Transportstyrelsen och Teknikföretagen förbrukade genomsnittslastbilen 3,5 *l/mil* 2010, dessutom körde den 7400 mil och släppte ut 75 ton koldioxid (Teknikföretagen 2012; Trafikverket 2012c).

Alla dessa siffror gäller för genomsnittsfordon vid blandad körning varför det är rimligt att anta att både förbrukning och utsläpp blir större vid motorvägskörning (Trafikverket 2012b).

3.3.2 Olika energikällor

För att fastställa huruvida det tänkta systemet leder till en minskad miljöpåverkan krävs information gällande framställning av elektrisk energi. Nedan presenteras data för de fyra vanliga metoderna vattenkraft, vindkraft, kärnkraft och kolkraft.

Livscykelanalyser av de ovan nämnda teknikerna gav information samlad i Tabell 6.

Tabell 6: Totalt utsläpp av CO_2 -ekvivalenter per framställd kWh av elektrisk energi sett till kraftverkets hela livscykel (Dones, Bauer och Heck 2007; Vattenfall AB 2005, 2010a,b, 2011)

Kraftverkstyp	gCO_2/kWh
Kärnkraft	7,1
Vattenkraft	9,9
Vindkraft	17
Kolkraft	700
Svenskt genomsnitt	20
Europeiskt genomsnitt	515

Det europeiska genomsnittet ovan är ett medelvärde för utsläppen av den totala produktionen av elektrisk energi i Europa vilket visar att mycket av den europeiska energin produceras med fossila bränslen. I Sverige genereras elen till 85% av vatten- och kärnkraft men det förekommer även en del kraftvärme vilket höjer genomsnittet något (Ekonomifakta 2011; Svensk Energi 2010a).

4 Analys och beräkningar

Detta avsnitt syftar till att undersöka de fakta som presenteras i teoriavsnittet och analysera hur de kan användas och kombineras för att tillsammans utgöra ett inom avgränsningarna komplett system för konduktiv laddning av elfordon under färd.

4.1 Existerande system

I teoriavsnittet presenterades ett antal befintliga system för elektrisk energiöverföring till fordon. Dessa system använder olika tekniska lösningar med för- och nackdelar som analyseras nedan.

I enlighet med projektets syfte är inte induktiv energiöverföring aktuell, bland annat på grund av de stora energiförluster som detta är förknippat med, se 2.1.2. Istället ligger fokus på konduktiv överföring där det finns ett antal olika alternativ. Av dessa alternativ är det framförallt överföring via ett skensystem beläget under fordonen som är aktuellt. Överföring från sidan är praktiskt i ett tunnelbanesystem eller liknande rälssystem där fordonet ej förflyttas i sidled. Att applicera detta på biltrafik ställer höga krav på föraren eller det automatiska styrsystemet. Dessutom är det begränsat till ett körfält i varje riktning, alternativt två på en motorväg. Överföring via ett system ovan fordonen, likt ett tåg eller rälsbuss, har även det några avgörande brister. Förutom den stora visuella påverkan detta resulterar i är det

opraktiskt att anpassa både till personbilar och tung trafik. Höjdskillnaden mellan olika typer av fordon innebär att ledningarna behöver placeras tillräckligt högt för att ge fri passage till de största lastbilarna vilket innebär att kontakterna till ledningarna från de mindre personbilarna blir olämpligt långa. Ett system som tillför fordonen energi underifrån kan däremot placeras i vägbanans samtliga körfält och anpassas för både lätt och tung trafik.

Både Innorail och Elways använder segmenterade skensystem belägna i vägbanan med parallella poler. Detta innebär att endast ett kontaktdon med både ledare och återledare behöver ha kontakt med skenan. Den stora nackdelen med dessa system är att polerna är separerade med ett mycket litet isolationsavstånd vilket kan leda till stora energiförluster när vägbanan är salt och våt.

4.2 Elsäkerhet

Det är viktigt att skensystemet följer de lagar och regler som finns uppsatta för elanläggningar. Både ur säkerhetsperspektiv men även för att förenkla implementeringen av systemet. Detta innebär att spänningsnivån närmast vägbanan ej får överstiga 1000 *VAC* eller 1500 *VDC* vilket är gränsen för en högspänningsanläggning. En högre spänning ställer helt enkelt för stora krav på säkerhetssystemet. Jordning av skensystemet är ett annat viktigt område ur säkerhetssynpunkt. För att undvika att skensegmenten bygger upp en potential när de ej används och därmed utgör en säkerhetsrisk behöver segmenten jordas då de inte är aktiva.

Ur ett personsäkerhetsperspektiv är, enligt avsnitt 2.3.2, likström säkrare än växelström men innebär dock andra svårigheter som problem med brytning och överslag. Därför är det svårt att avgöra vilket som är säkrast vid användning, det får bedömas från fall till fall, se 4.8. Däremot utgör trefas växelström en större risk än enfas. Fördelen med trefas är att det inte krävs någon återledare, eller nolledare som det också benämns, vilket ställer stora krav på lastens symmetri och att alla ledare har konstant kontakt, se 2.5. Om en av ledarna skulle förlora kontakten försvinner symmetrin vilken innebär stor instabilitet och risk för både överslag och påfrestningar på komponenter, se 2.3.2.

4.3 Standarder för konduktiv laddning

Av de standarder som tas upp i teoriavsnittet är framförallt mode 3 och 4 av störst intresse. Mode 1 och 2 är inte anpassade att leverera erforderlig effekt och kan därför inte användas. Inget av systemen är egentligen anpassat för laddning under färd men det kan ändå vara viktigt att ha dessa i åtanke när

fordonens laddningssystem konstrueras. En fördel med mode 4 är att det är anpassat för likspänning vilket underlättar laddning av batterier då ingen otymplig likriktare behöver placeras i fordonet, se 2.4.2.

4.4 Systemets verkningsgrad

Systemets verkningsgrad är ett mått på dess totala effektivitet och är viktig både ur miljömässig och ekonomisk synvinkel. Verkningsgraden beror bland annat av överföringsförluster i elnätet, kabelförläggning, omvandlingsförluster i elektriska komponenter och fordonets förmåga att utnyttja överförd energi.

4.4.1 Kraftelektriska komponenter

Samtliga kraftelektriska komponenter som presenteras i 2.7.3 har verkningsgrader på mellan 95 och 99%, den totala förlusten beror då på hur dessa komponenter kombineras. En möjlig modell med transformator och likriktare i en större station och en LS-omriktare i fordonet ger förluster i komponenterna enligt Ekvation 13.

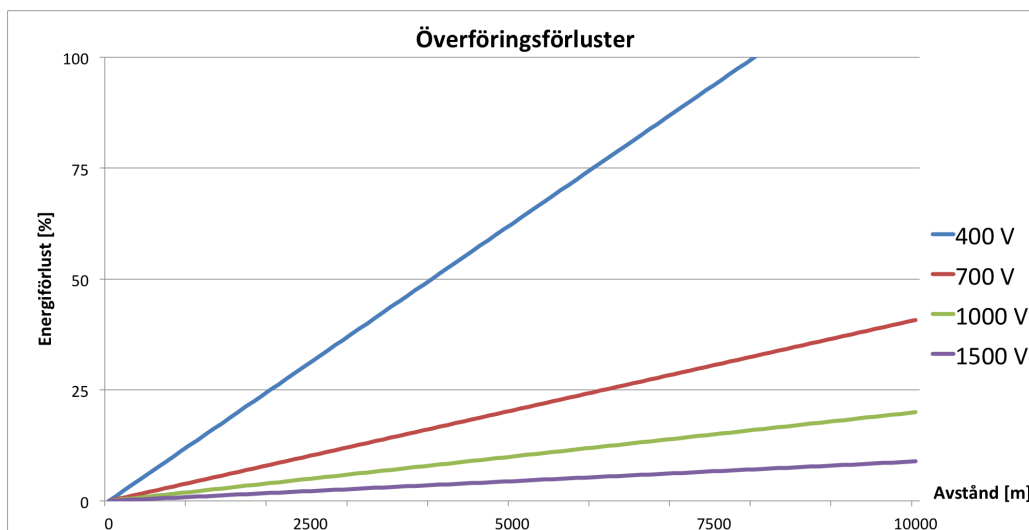
$$1 - \eta = 1 - (\eta_{trans.} \cdot \eta_{likr.} \cdot \eta_{omrikt.}) = 1 - (0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,95) = 10,6\% \quad (13)$$

Detta resultat är beräknat med de lägsta angivna verkningsgraderna. Det finns en poäng med att designa systemet så att komponenter anpassade för högre effekt placeras tidigt i överföringskedjan då större komponenter har en högre verkningsgrad.

4.4.2 Överföringsförluster

Enligt teori i 2.7.4 är det mycket komplext att beräkna de totala överföringsförlusterna. Hänsyn behöver tas till hur ledarna är förlagda, lindade och placerade i förhållande till varandra. Eftersom det tilltänkta systemet i nuläget endast är teoretisk är det omöjligt att göra en realistisk uppskattning av detta. Därför presenteras endast beräkningar för idealfallet där det förutsätts att alla reaktiva förluster är kompenserade för.

Förutom de kriterier som nämnts ovan påverkar ledarens längd, resistans och överförd effekt hur stora förlusterna blir. Figur 7 ger en generell bild över hur förlusterna ökar med överföringsavståndet för några olika spänningar.



Figur 7: Bilden visar överföringsförluster vid överföring av effekten 200 kW till ett enskilt segment och förutsätter därmed en enskilt kabel till varje segment. För beräkningarna används aluminiumkabeln i 2.7.4.

Antagandet att varje segment spänningssätts med en egen kabel är med största sannolikhet inte ekonomiskt gångbart varpå resultaten i Figur 7 ej är lämpliga när det kommer till att beräkna systemet slutliga verkningsgrad. Figuren visar däremot vikten av att använda en hög spänning.

Spänningarna som använts i beräkningarna ligger inom gränserna för lågspänning, 1000 V växelspanning respektive 1500 V likspänning, se 2.3.1. Då förlusterna blir avsevärt mycket större vid lägre spänningar är det lämpligt att utnyttja så hög tillåten spänning som möjligt.

Vattenfall ger ett värde på överföringsförlusterna med större verklighetsförankring. De räknar med förluster på 3% vid överföring till regionnätسابbonnenter, 130 kV och 7-9% förluster till lågspänningskunder, 400 V . Utifrån detta är en rimlig uppskattad förlust från kraftverk till skensegmenten 7-9 %. Även om en högre spänning än 400 V förmodligen kommer användas gör den stora effektåtgången att förlusterna rimligen hamnar i samma storleksordning.

4.4.3 Total verkningsgrad

Systemets totala verkningsgrad kan delas upp i tre delar: överföring från kraftverk till skensegment, systemets kraftelektriska komponenter och fordons energieffektivitet, se Ekvation 14.

$$\eta_{tot} = \eta_{\text{över.}} \cdot \eta_{\text{kraft.}} \cdot \eta_{\text{fordon.}} = (1 - 0,09) \cdot (1 - 0,106) \cdot 0,88 = 63,7\% \quad (14)$$

Resultatet $\eta_{tot} = 63,7\%$ gäller alltså effektiviteten från kraftverk till fordonets hjul.

4.5 Effektbehov

För att beräkna det totala och momentana effektbehovet längs ett vägavsnitt är det nödvändigt att känna till enskilda fordons effektbehov. Vidare för att dimensionera systemet behövs även en uppskattning av hur många fordon som passerar det angivna vägavsnittet.

4.5.1 Fordon

Utifrån data presenterad i 3.2 och 2.7 kan följande beräkningar göras gällande bilar och lastbilars momentana effektförbrukning vid motorvägskörning 100 km/h , se ekvation 15 och 16.

$$E_{bil} = \frac{\text{bränsleförbrukning } kWh \ km}{\text{sträcka}} \frac{l}{l} \frac{km}{h} \cdot \eta_{otto} = 22,5kW \quad (15)$$

$$E_{lastbil} = \frac{l}{km} \frac{kWh \ km}{l} \frac{km}{h} \cdot \eta_{diesel} = \begin{cases} 112kW, & \text{liten lastbil.} \\ 247kW, & \text{tung lastbil} \end{cases} \quad (16)$$

Där η_{otto} och η_{diesel} betecknar verkningsgraden för en Ottomotor respektive dieselmotor.

22,5 kW för personbilar stämmer väl överens med Gunnar Asplunds 23 kW vid 90 km/h . Dessutom kan elbilen Nissan Leaf köra 100 km motorväg på en laddning med dess 24 kWh -batteri vilket innebär en momentan effektåtgång på 24 kW . Här framgår tyvärr inte vilken hastighetsbegränsning som är gällande på motorvägen.

Enligt trafikdata från mätpunkterna kring Göteborg har trafikmängden ökat de senaste åren varför det är lämpligt att dimensionera systemet för en något större effektåtgång än den som finns i dagsläget. Därför väljs en momentan effektförbrukning för personfordon på 25 kW vid körning i 100 km/h . Detta är inte på något sätt ett empiriskt uppmätt värde utan endast en approximation utifrån kända data.

På liknande sätt behövs även en approximation för lastbilars effektförbrukning. Då det råder en mycket större variation mellan olika typer av tyngre fordon än det gör mellan personbilar är det dessutom lämpligt med

en uppskattning av den genomsnittliga effektförbrukningen och det toppvärde som kan förväntas av de större fordonen i kategorin. Enligt beräkningen ovan ligger en lastbils momentana effektförbrukning vid motorvägskörning mellan 112 och 247 kW men de siffror som används är från 2003. I linje med den utveckling som Volvo presenterar över slutet av 1900-talet bör denna effektförbrukning minskat ytterligare under de senaste åren, se 3.2. Utifrån detta approximeras den maximala momentana effektförbrukningen för en lastbil till 200 kW och genomsnittsförbrukningen till 140 kW .

4.5.2 Effektbehov vid realisering

För att beräkna effektbehovet för en svensk motorväg behöver vissa antaganden göras. Enligt Ekvation 17 blir det maximala genomsnittliga momentana effektbehovet i Bäckebo, där det passerar 27725 bilar och 2810 lastbilar per dygn, 14,5 kW .

$$P_{bb} = \frac{\text{antal bilar} \cdot E_{bil} + \text{antal lastbilar} \cdot E_{lastbil_{max}}}{\text{dygn i sek}} = 14,5kW \quad (17)$$

Motsvarande beräkning ger ett genomsnittligt effektbehov på 7,0 kW vid mätpunkten mellan Varberg och Falkenberg, där det passerar cirka 12000 fordon per dygn. För att erhålla ett större perspektiv antas denna mät punkt och dess data vara representativ för körsträckan Göteborg-Malmö längs E6. Enligt mätdata i 3.1 gällande trafikflöde och approximationer för fordonens effektförbrukning ger detta ett genomsnittligt momentant effektbehov, P_{tot} , på totalt 205,9 kW/km , se Ekvation 18 nedan.

$$P_{tot} = \frac{\text{antal bilar} \cdot E_{bil} + \text{antal lastbilar} \cdot E_{lastbil_{medel}}}{\text{sträcka}} \cdot \frac{\text{sträcka}}{\text{timmar per dygn} \cdot \text{hastighet}} = 205,9kW/km \quad (18)$$

Effektbehovet motsvarar ungefär 75 villor, ett medelstort bostadsområde, per kilometer, se 3.2. Det momentana effektbehovet vid rusningstrafik blir givetvis större vilket kommer ställa krav på distributionsnätet.

4.6 Miljöpåverkan

När den här typen av system konstrueras är den miljömässiga besparingen en stor bidragande faktor till att möjliggöra en minskning av utsläpp i dagens

samhälle. Övergången till elfordon påverkar framförallt utsläppen av växthusgaser vilket mäts i koldioxidekvivalenter. Övrig miljömässig påverkan som partiklar från väg och däck samt påverkan från själva vägbygget antas inte förändras vid övergång till elektrisk drift. För att göra en adekvat jämförelse mellan elfordon och fordon som drivs av fossila bränslen krävs en gemensam enhet för att mäta miljöpåverkan. En lämplig enhet som ofta används för detta syfte är $g\ CO_2/kWh$. Ekvationerna 19 och 20 visar hur enhetsomvandlingen för bensin respektive diesel sker. I 3.3.1 presenteras konsumentverkets siffror för hur mycket större utsläppen från bensinbilar blir om även framställningen av bränslet inräknas, 11,7 %. I beräkningen nedan antas detsamma gälla för diesel.

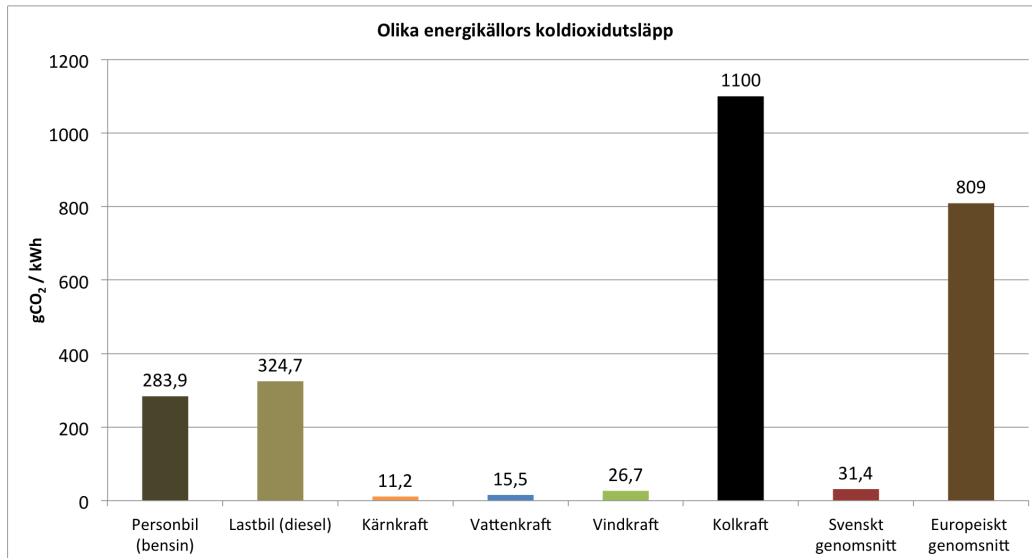
$$\frac{2130gCO_2/mil}{0,83l/mil \cdot 9,04kWh/l} = 283,9gCO_2/kWh \quad (19)$$

$$\frac{75 \cdot 10^6 gCO_2 \cdot 1,117}{7400mil \cdot 3,5l/mil \cdot 9,96kWh/l} = 324,7gCO_2/kWh \quad (20)$$

I 3.3.2 presenterades utsläppet av koldioxidekvivalenter för olika kraftverk. Dessa tar dock inte hänsyn till systemets verkningsgrad varför vissa enklare beräkningar behöver göras, se ekvation 21.

$$\frac{gCO_{2-\eta-tot}}{kWh} = \frac{gCO_2}{kWh \cdot \eta_{tot}} \quad (21)$$

I Figur 8 visas olika aktuella energityper för drift av fordon och dess utsläpp. Där framgår tydligt att de vanligaste metoderna för framställning av elektrisk energi i Sverige, vattenkraft och kärnkraft se 3.3.2, leder till mycket lägre utsläpp av växthusgaser.



Figur 8: Jämförelse mellan utsläpp i gram koldioxidekvivalenter per kWh för olika energikällor.

Genom att beräkna utsläppen av växthusgaser från Europaväg 6 under en timme sätts de olika energikällornas utsläpp i perspektiv till varandra. Ekvationerna 22 och 23 visar beräkning av utsläppen per timme från det totala antalet fordon under ett dygns körning, det tar dock inte ett helt dygn att köra Europaväg 6 mellan Malmö och Göteborg. Genom att använda tiden varje fordon spenderar på körstäckan erhålls ett genomsnittligt utsläpp per timme i Ekvation 24.

$$\begin{aligned}
 gCO_{2\text{-bilar}} &= \text{antal bilar} \cdot E_{bil} \cdot gCO_{2/kWh} = \\
 &= 10150 \cdot 25 \cdot 283,9 = 72,04 \text{ ton } CO_2
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 gCO_{2\text{-lastbilar}} &= \text{antal lastbilar} \cdot E_{lastbil_medel} \cdot gCO_{2/kWh} = \\
 &= 1800 \cdot 140 \cdot 324,7 = 81,82 \text{ ton } CO_2
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 gCO_2/h &= \frac{(gCO_{2\text{-bilar}} + gCO_{2\text{-lastbilar}}) \cdot \text{sträcka}}{\text{timmar per dygn} \cdot \text{hastighet}} = \\
 &= \frac{(72,04 + 81,82) \cdot 270}{24 \cdot 100} = 17,31 \text{ ton } CO_2/h
 \end{aligned} \tag{24}$$

I Ekvation 25 återfinns det totala beräknade energibehovet. Ekvation 26 och 27 ger de beräknade utsläppen från elproduktion till elbilar med svenskt respektive europeiskt genomsnitt.

$$\begin{aligned} \text{Totalt energibehov} &= \text{effektbehov/km} \cdot \text{sträcka} \cdot \text{tid} = \\ &= 205,9kW/km \cdot 270km \cdot 1h = 55,59MWh \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{Utsläpp med svensk el} &= \\ &= \text{Totalt energibehov} \cdot \text{Utsläpp, svensk elproduktion/kWh} = \\ &= 55590kWh \cdot 31,4gCO_2/kWh = 1,745 \text{ ton } CO_2/h \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{Utsläpp med europeisk el} &= \\ &= \text{Totalt energibehov} \cdot \text{Utsläpp, europeisk elproduktion/kWh} = \\ &= 55590kWh \cdot 809gCO_2/kWh = 44,97 \text{ ton } CO_2/h \end{aligned} \quad (27)$$

Beräkningarna ovan visar tydligt skillnaden i utsläpp mellan olika energikällor. Idag släpper trafiken längs Europaväg 6 ut 17,31 ton CO_2/h . Om trafiken istället använde eldrift, med el producerad i Sverige sjunker utsläppen till 1,75 ton CO_2/h , en dryg tiondel av dagens. Eldrift i Europa skulle däremot inte leda till minskade utsläpp. Om en elektrifierad Europaväg 6 förses med europeisk genomsnittsel ökar utsläppen till 44,97 ton CO_2/h .

4.7 Interaktion mellan fordon och skensystem

För att möjliggöra styrning av skensystemets av- och påslagning av de olika skensegmenten finns det flera alternativa tekniker, se 2.8. Tanken är att varje fordon ska kunna kommunicera och på så vis aktivera de skensegment som fordonen passerar med hjälp av någon av dessa tekniker.

Att använda tekniken IEEE 1901, se 2.8.1, kräver att fordonen har en kontinuerlig kontakt med skenan för att inte skapa brus eller störningar i signalerna. Om kontaktdonet tillfälligt tappar kontakten måste en ny etablering av kommunikationen ske. Att initiera kontakten vid varje segment som passerar och även sända klart informationen under denna korta tid förefaller orimligt i och med fordonens höga hastighet på motorvägar. Om kommunikationen lider av stora informationsförluster kan det påverka elsäkerheten till exempel genom att fel skensegment blir spänningsatta.

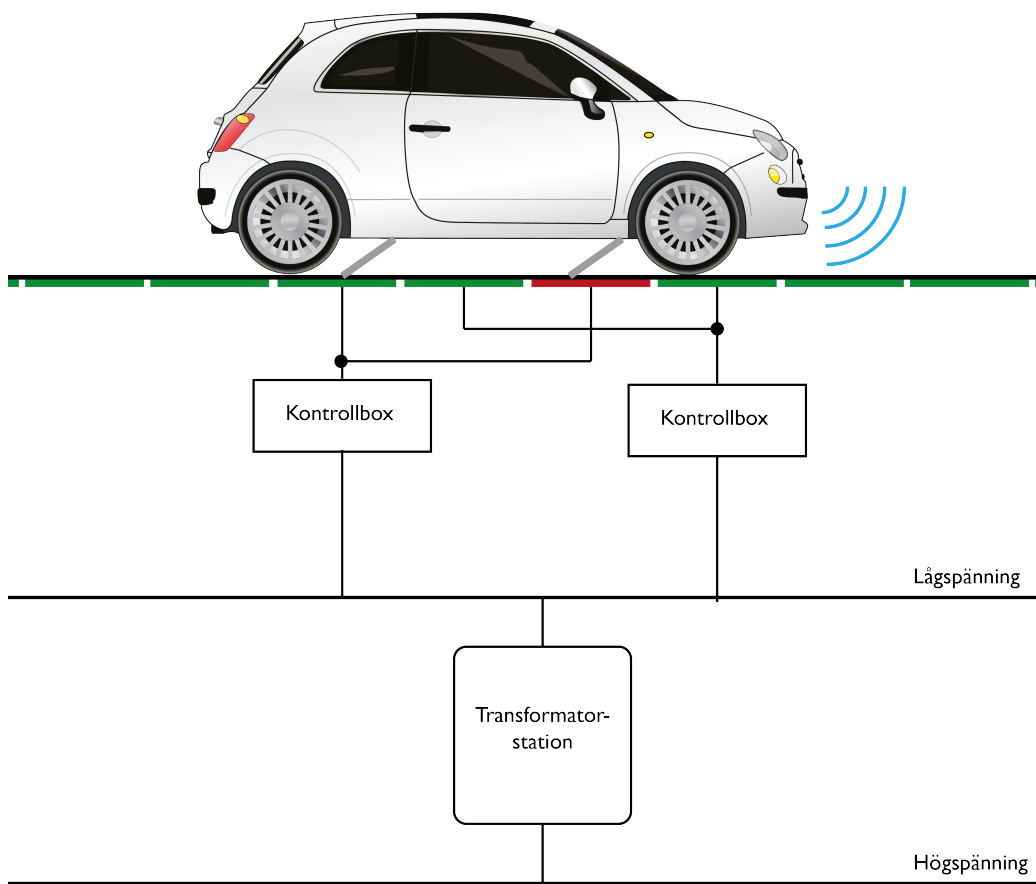
Induktiva givare har generellt hög noggrannhet, se 2.8.1, och bör ge en stabil styrning av systemet. Det som tekniken inte stödjer dock är någon utökad informationsutväxling, endast av- och påslagning är implementerbart. Implementering av till exempel betalsystem eller vilken typ av fordon som vill använda segmentet är funktioner som således ej är möjliga.

Att integrera EITS för att styra skensystemet aktiveringsprocess skulle vara fullt möjligt eftersom det är uppbyggt för att användas av fordon i rörelse. Vid användningen av EITS i systemet skulle ITS-G5C masken kunna användas som är anpassad för kommunikation med fasta föremål, se 2.8.2. Då tekniken redan innehåller information om fordonstyp, hastighet och riktning kan denna information användas för att spänningssätta rätt segment vid rätt tidpunkt. EITS har även fördelen att kunna anpassas efter att systemet blivit verklighet genom att skapa nya WiFi-protokoll inom teknikens frekvensband.

4.8 Möjliga tekniska lösningar

Laddningen av fordonsbatteriet kan ske med två huvudsakliga metoder som sedan kan realiseras med en rad olika tekniker. Sett ur fordonets perspektiv kan dessa metoder benämnas konstant eller intermitterent strömförsörjning.

Samtliga tekniker har ett antal gemensamma egenskaper. De använder sig alla av poler i serie istället för parallellt likt de existerande systemen, av anledningar som togs upp i 2.3.2. Det fungerar genom att varje segment kan växla mellan att vara kopplat till skyddsjord eller leda. De passerande fordonen får således sin strömmatning från ett främre segment och återleder till ett jordat segment längre bak, se Figur 9. De två segmenten är separerade med minst ett mellanliggande segment dels för att förlänga tiden reglersystemet har för att växla segment från ledare till jord (framförallt i de tekniker som använder konstant kontakt, se 4.8.1) och dels för att minimera de förluster som kan uppstå om vägbanan är våt och ledarna är för nära varandra. Skensegmentens längd behöver anpassas efter avståndet mellan fordonens kontaktdon som i sin tur beror av längden på det enskilda fordonet. Därför behövs en standard för skensegmentslängden. En sådan standard kommer med stor sannolikhet leda till begränsningar gällande vilka fordon som faktiskt kan köra på vägen. Om skensegmenten och isolationsavstånd till nästa segment tillsammans är till exempel en meter långt behöver kontaktdonen sitta två meter från varandra. Detta medför att fordonet måste vara längre än denna sträcka på två meter. Skensegmentens bredd beror av kontaktdonets beskaffenhet vilket inte behandlas i den här rapporten.



Figur 9: En beskrivande bild av skensystemet

De båda växelströmsalternativen som presenteras nedan använder enfas växelström. Förutom de säkerhetsrisker som finns med att använda trefas i detta fall, se 2.3.2, innebär ett trefassystem att de tre ledarna behöver sitta parallellt med varandra och leder därmed till samma förluster som presenteras i 2.1.

4.8.1 Konstant strömförsörjning

Med konstant strömförsörjning menas att strömmen aldrig bryts då fordonets kontaktdon passerar från ett segment till ett annat. För att detta ska vara möjligt behöver det framföriggande skensegmentet inneha samma elektriska potential som det segment kontaktdonet är på väg att ska lämna, se Figur 9. Vidare krävs att kontaktdonet är tillräckligt långt för att överbrygga isolationsavståndet mellan två skensegment. När kontaktdonet sedan har lämnat det nu bakomliggande segmentet kan det enkelt kopplas om till jord då det

inte längre finns någon sluten krets som det kan flyta ström genom. Nedan beskrivs hur detta kan åstadkommas med både växel- och likströmssystem.

Växelström 50 Hz

Vid användandet av enfasig växelspanning för kraftöverföringen mellan skensegment och elfordon utnyttjas det faktum att nästintill all högspänd kraftöverföring i Sverige sker med just växelspanning. Då överföringen i det optimala fallet inte bryts vid byte mellan skensegment är det dessutom möjligt att använda stamnätets frekvens 50 Hz. Den relativt låga överföringsfrekvensen medför att elfordonets kontaktdon måste överbrygga isoleringsavståndet mellan två aktiva skensegment vid byte av överföringssegment. Om så inte vore fallet hinner inte elfordonet mottaga en hel överföringsperiod innan den når fram till ett nytt skensegment, där en ny överföringsperiod mottages. Således skulle synkroniseringsproblem uppstå och belasta kraftelektroniken. Denna problematik behandlas ytterligare i Högfrekvent växelström.

En stor fördel med tekniken är att antalet omformningar och likriktningar hålls på ett minimum eftersom stamnätets frekvens utnyttjas, vilket leder till att även energiförlusterna minskar, se 2.7. Däremot krävs att den överförda växelspanningen likriktas i elfordonet för att kunna ladda elfordonets batterier. I dagsläget är de kommersiella elfordonen utrustade med en enfasig likriktare på ungefär 3,3 kW, se 2.4.2. Det understiger det approximerade effektbehovet på 25 kW för en personbil som färdas längs en motorväg. Således skulle en kraftfullare och därigenom tyngre och mer utrymmeskrävande likriktare krävas för att möta det ställda effektbehovet. En likriktare med den effekten byggd med dagens teknik skulle bli alltför skrymmande och tung för att på ett miljövänligt sätt integreras i ett mindre elfordon, se 2.4.2. Dessutom är växelström ej att föredra ur ett personsäkerhetsperspektiv då växelströmmen ger upphov till ett krampliknande symptom i kroppens muskler och hjärta. Även den strömgräns för vilken personskador uppstår är lägre för växelström i jämförelse med likström, se 2.3.

Att utnyttja elnätets alla tre faser vid kraftöverföringen mellan skena och elfordon är otänkbart. Detta på grund av att i ett sådant system skulle kravet på kontinuerlig kontakt med alla tre faser vara orimligt. Om så inte är fallet uppstår asymmetri i elnätet.

Likström med relä

Skensystemet överför energi till passerande fordon genom likspänning från en likriktarstation. För att systemet ska fungera krävs, som i fallet

med växelström 50 Hz, att fordonens kontaktdon överlappar isoleringsavståndet mellan skensegmenten. När isoleringen överbryggas kan ett framförliggande segment spänningssättas precis innan fordonets kontaktdon anlänt. Denna lösning använder sig av ett elektromekaniskt relä vid av- och påslagning av ström-.

I denna lösning matas alla passerande fordon med samma spänningsnivå vilket innebär att då fordonens batterier kräver olika nivåer behöver samtliga fordon utrustas med LS-omriktare. Dessa måste vara anpassade för att rikta om systemets matningsspänning till den aktuella batterispänningen. Då fordonsindustrin idag inte använder sig av någon generell batteristandard är alla elfordon redan utrustade med LS-omriktare för att förse batteriet med korrekt spänning, se 2.6.

Likström med LS-omriktare

Detta alternativ är mycket likt det system som använder sig av DC tillsammans med kontakter fast med vissa skillnader. Systemet använder sig av en LS-omriktare istället för kontakter. Även i detta alternativ spänningssätts skensegmenten innan kontaktdonet överbryggas isolationsavståndet mellan två segment. När kontaktdonet har lämnat det bakre segmentet kan strömmen i detta brytas utan risk för överslag. Den stora skillnaden mellan detta alternativ och det med kontakter är att LS-omriktaren har möjlighet att ändra utspänningen till skenan. Genom att fordonet när det närmar sig informerar om vilken typ av fordon det är till en kontrollbox kan LS-omriktaren ställa om sig så att rätt spänning läggs på skenan. Det är en stor fördel då flera olika typer av fordon kan färdas på vägen utan att extra utrustning behöver tillföras fordonen. En nackdel kan dock bli att kostnaden för vägen blir högre och att framtida uppgraderingar av utrustning försvåras påtagligt då det blir ett stort antal styrboxar som måste öppnas och arbetas med.

4.8.2 Intermittent strömförsörjning

Vid intermittent strömförsörjning spänningssätts ett segment först när fordonets kontaktdon har kontakt, för att sedan jorda segmentet innan kontaktdonet lämnat. Om segmentet inte har potentialen noll innan kontaktdonet lämnar finns risk för överslag, vilket ställer stora krav på synkroniseringen mellan fordonet och styrsystemet. Nedan presenteras två olika tekniker för intermittent strömförsörjning: en som använder sig av likström och en som använder sig av växelström.

Högfrekvent växelström

Högfrekvent växelström arbetar med frekvenser högre än den i Sverige standardiserade elnätsfrekvensen 50 Hz . För att åstadkomma en ström med denna högre frekvens krävs att strömmen först likriktas för att därefter växelriktas. Efter överföring till elfordonet likriktas slutligen strömmen återigen i elfordonet för att ladda dess batteri. Syftet med att höja frekvensen är att utnyttja att växelströmmen har två noder per period vid vilka strömmen kan brytas utan risk för överslag. Enligt Ekvation 28 och 29 nedan krävs en skensegmentslängd på nästan $0,6\text{ m}$ för att ett elfordon ska hinna tillgodogöra sig en hel överföringsperiod om frekvensen är 50 Hz .

Ett räkneexempel på en lämplig skenlängd för ett fordon som färdas med en hastighet av 100 km/h :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02s \quad (28)$$

$$S = v \cdot t = \frac{100}{3,6} \cdot 0,02 = 0,56m \quad (29)$$

Detta system är beroende av att hastigheten synkroniseras med strömmens frekvens och skenlängd och blir därför mycket instabilt. Genom att höja frekvensen hinner fler perioder passera under kontakttiden med varje skensegment och därmed kan överföringen optimeras.

En möjlig fördel med användandet av högfrekvent AC-kraftöverföring är utnyttjandet av tyristorer för att bryta överföringsströmmen vid nivå noll. Därmed undviks att en ljusbåge uppstår mellan skensegmentet och fordonets kontaktdon.

Nackdelar med systemet är antalet transformeringar och omvandlingar som krävs innan energin når fordonets batteri och systemets totala effektgrad blir därför lägre jämfört med andra överföringstekniker behandlade i denna rapport. Dessutom är växelström ej att föredra ur ett personsäkerhetsperspektiv då växelströmmen ger upphov till ett krampliknande symptom i kroppens muskler och hjärta. Även den strömgräns för vilken personskador uppstår är lägre för växelström i jämförelse med likström, se 2.3. Slutligen blir likriktaren som behövs i fordonet opraktiskt tung och skrymmande, se 2.4.2.

Intermittent likström

För att undvika problemet med att bryta stora likströmmar går det att använda en LS-omriktare. Denna leder strömmen en annan väg istället för att bryta den som en kontaktor eller ett relä. En annan fördel med LS-omriktaren är att den kan variera nivån på utspänningen.

LS-omriktarens transistorer får en signal som talar om att de ska börja växla mellan av och på samt vilken tid varje switchperiod de ska vara öppna. Innan fordonets kontaktdon lämnar segmenten skickas en signal som stänger av transistorerna i tillräckligt god tid för LS-omriktarens spole att hinna laddas ur och på så vid eliminera risken för en ljusbåge. När fordonet sedan fortsätter till nästa segment upprepas proceduren.

Det finns nackdelar med systemet till följd av att kretsen bryts mellan varje byte av skensegment. Systemet drar ström i pulser vilket innebär stora påfrestningar på omkringliggande elektronik och problem med rippel i nätet i stort. Det stället även stora krav på regleringens exakthet och timing eftersom inget segment får vara spänningssatt innan fordonets kontaktdon når det. Slutligen måste spolen i LS-omriktaren, se Figur 3, hinna laddas upp innan fordonet får ström och laddas ur innan transistorerna kan stänga, annars föreligger en stor risk för överslag. Denna pulserande laddning leder dock inte bara till problem för elnätet och omkringliggande kraftelektronik utan leder också till en totalt sett förkortad laddningstid under en viss körsträcka. För att kompensera detta skulle större effekt behöva överföras vilket ställer ännu större krav på nätet och dess komponenter.

4.9 Utvärdering av tekniska lösningar

De ovan beskrivna teknikerna för att konstruera ett skensystem för konduktiv laddning har alla olika för- och nackdelar. Genom att använda en Pugh beslutsmatris, se Figur 10, kan dessa vägas mot varandra. På så vis kan det mest lämpliga systemet utifrån valda kriterier sorteras ut. De valda kriterierna förklaras ytterligare nedan.

Kategorin säkerhet behandlar främst personsäkerheten.

- Personsäkerhet syftar till hur skadlig strömmen är för kroppen och framförallt hjärtat. I allmänhet är växelström mer skadlig än likström på grund av dess pulserande egenskaper, se 2.3.2.

Under kategorin tillförlitlighet samlas kriterier gällande de olika teknikernas förmåga att förse fordon med energi samt deras påverkan på omkringliggande kraftsystem.

- Kriteriet timing avser vilka svårigheter som kan uppstå när fordonet befinner sig över ett segment och kräver ström just i det ögonblicket. Vid användning av växelström uppstår ett problem då det är svårt att passa in strömkurvan till fordonet. Om till exempel fordonet vid ett segment plockar upp ström som befinner sig på toppen av växelströmskurvan och botten vid nästa segment, försvåras laddning av batterierna.
- Tätt sammankopplat med kriteriet timing kommer kontaktkänslighet för arm. Ett system baserat på växelström ställer högre krav på att armen har kontinuerlig kontakt med skenan för att undvika avbrott i växelströmsperioden.
- Nätbelastning syftar på systemets belastning på överliggande elnät. En ojämn belastning kan leda till olika typer av störningar vilket påverkar nätet negativt enligt avsnitt 2.5. Således är detta kriterium indirekt kopplat till kriteriet timing.

För att systemet ska bli verklighet är det viktigt att det är realistiskt genomförbart. Detta ställer krav på enkelhet och robusthet både i konstruktion och utformning.

- Kriteriet simplicitet bedömer antalet ingående komponenter och hur komplext systemets uppbyggnad är.
- Det är viktigt att de ingående komponenterna är av sådan storlek att de möjliggör en realisering, detta kriterium benämns storlek.
- Det sista kriteriet, spänningsreglering, avser hur svårt det är att reglera spänningen till olika fordonstyper. Tung trafik kräver högre spänning än persontrafik och därför måste systemet konstrueras för att tillgodose detta.

	Kat. vikt	Vikt	AC Enfas	AC Högfrekvent	DC Brytare	DC LS-omriktare	DC Intermittent
Säkerhet	100		3	1	6	6	6
Personssäkerhet		100	3	1	6	6	6
Tillförlitlighet	120		6,4	4	10,1	10,1	6,9
Timing		50	8	2	8	8	4
Kontaktkänslighet för arm		50	4	200	9	450	9
Nätbelastning		20	2	40	5	100	2
Realiserbarhet	150		8,0	4,5	10,0	9,0	9,5
Simplicitet		50	10	500	3	150	8
Storlek		50	1	50	1	50	7
Spänningsreglering		50	5	250	5	250	5
Total	370		17,4	9,5	26,1	25,1	22,4

Figur 10: En sammanställning av de olika alternativa systemen uppställda i en Pughs beslutsmatrix

Enligt Pughmatrisen uppfylls de ställda kraven bäst av ett skensystem baserat på likström där brytningen sker med hjälp av elektromekaniska komponenter. Kriterierna i matrisen viktas utifrån ställda mål och information i teoriavsnittet.

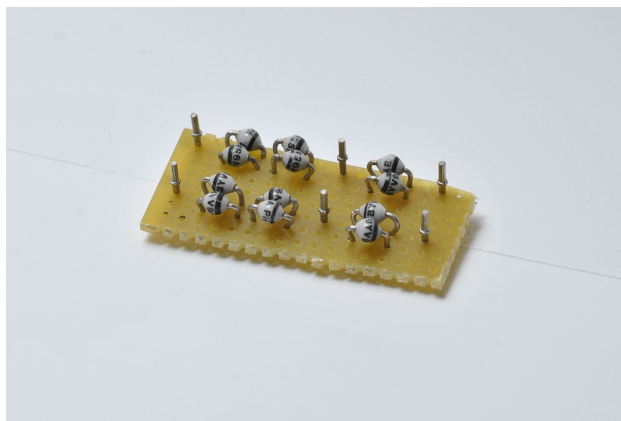
5 Demonstrationsmodell

Modellens syfte är, enligt Mål D i avsnitt 1.3, att likna den teoretiska modellen samt att ladda det valda demonstrationsfordonet. I nedanstående avsnitt beskrivs modellens utformning och tekniska lösningar fördelat på de tre huvuddelarna bil, bilbana och styrsystem.

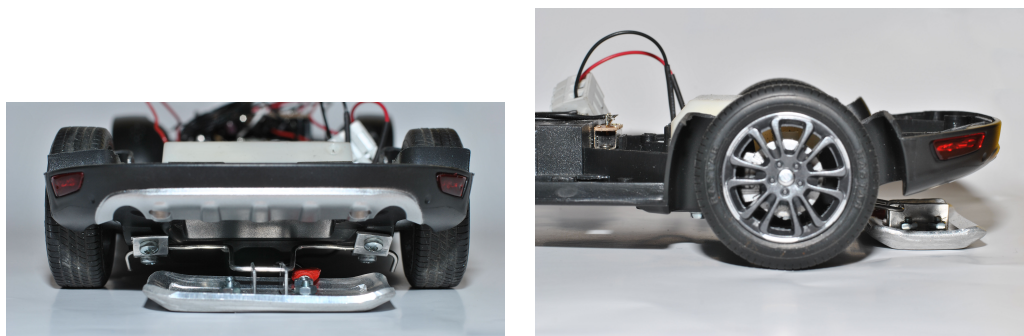
5.1 Bil

Den radiostyrda bilmodellen är av enklare typ som drivs med hjälp av fem 1,5 V uppladdningsbara AA-batterier. Den medföljande fjärrkontrollen medger enbart fullt eller inget gaspådrag, detsamma gäller dess styrutslag. Diodkretsen som begränsar bilens topphastighet består av tolv dioder i fram- och backriktning, se figur 11.

Överföring av elektrisk energi sker med hjälp av två kontaktdon monterade på bilens undersida, se Figur 12. Dessa i kontakt med bilbanans skenssegment sluter en elektrisk krets och möjliggör därmed laddning av bilens batterier. En lysdiod monterad på bilen indikerar när så sker, se Appendix H för dess kopplingschema.



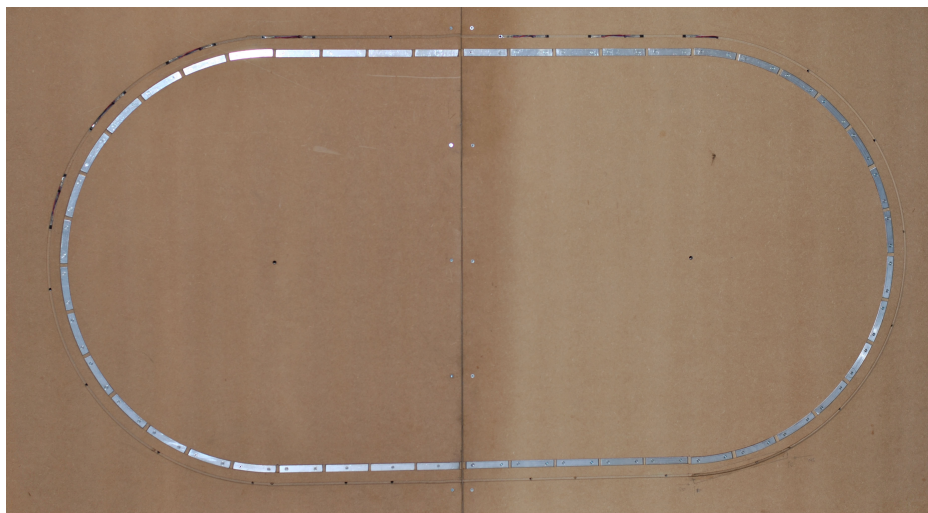
Figur 11: Diodkretsen på bilden används för att begränsa bilens topphastighet



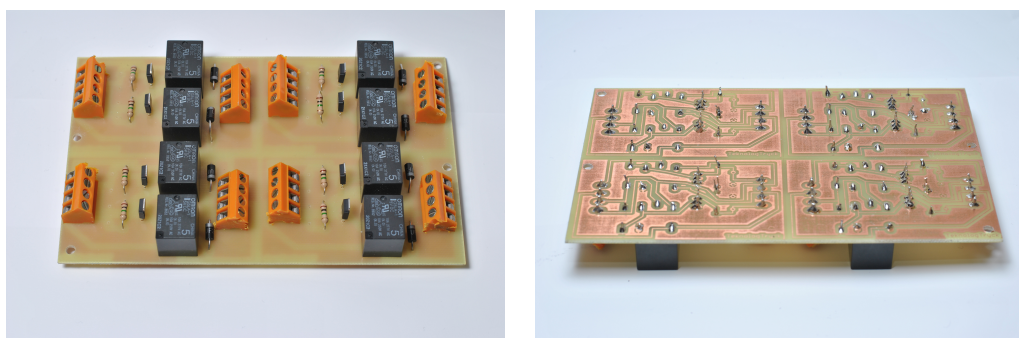
Figur 12: Bakre kontaktdonet monterat under bilen

5.2 Bilbana

De material som har använts vid konstruktionen av bilbanan har valts med tanke på hållbarhet, tillgänglighet och pris. Banan är till största del uppbyggd av träreglar, MDF-skivor och aluminiumsegment. MDF-skivan och aluminiumsegmenten illustrerar en svensk motorväg och det teoretiska systemets skensystem. Alla delar av bilbanan är tekniskt förenklade gentemot den teoretiska modellen för att på ett enkelt sätt visa på systemets uppbyggnad och funktion, vilka följer kraven i avsnitt 1.4. Reglarnas storlek har valts så att banan skall kunna placeras på ett plant underlag utan att dess styrsystem kommer till skada. Se Figur 13 för en översiktsbild av bilbanan. För en bild på styrsystemets kretskort, se Figur 14.

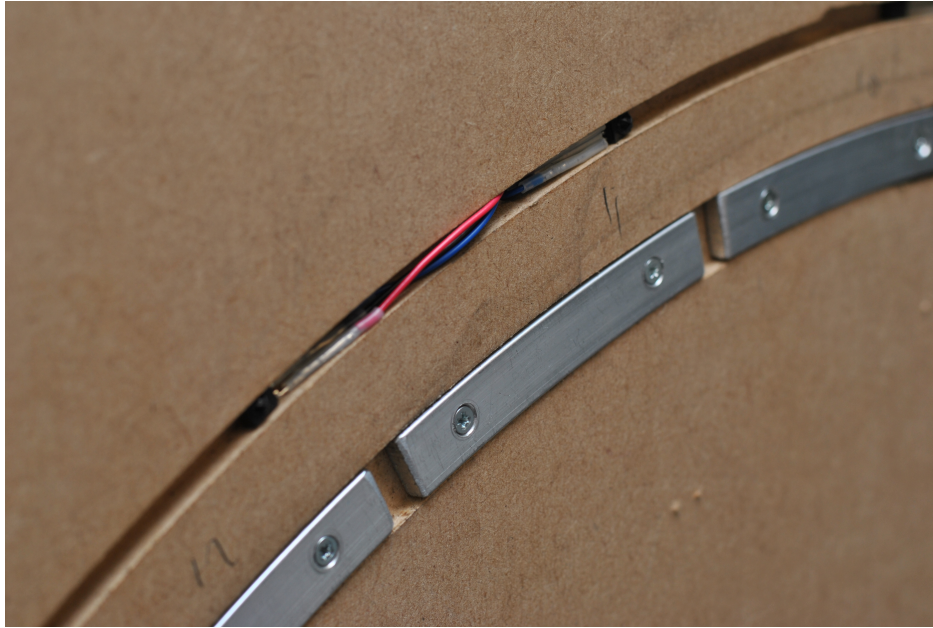


Figur 13: Översiktsbild över hela bilbanan



Figur 14: Bilderna visar en färdigmonterad krets till styrsystemet ur olika vinklar. Till demonstrationsmodellen krävdes sex sådana kretsar

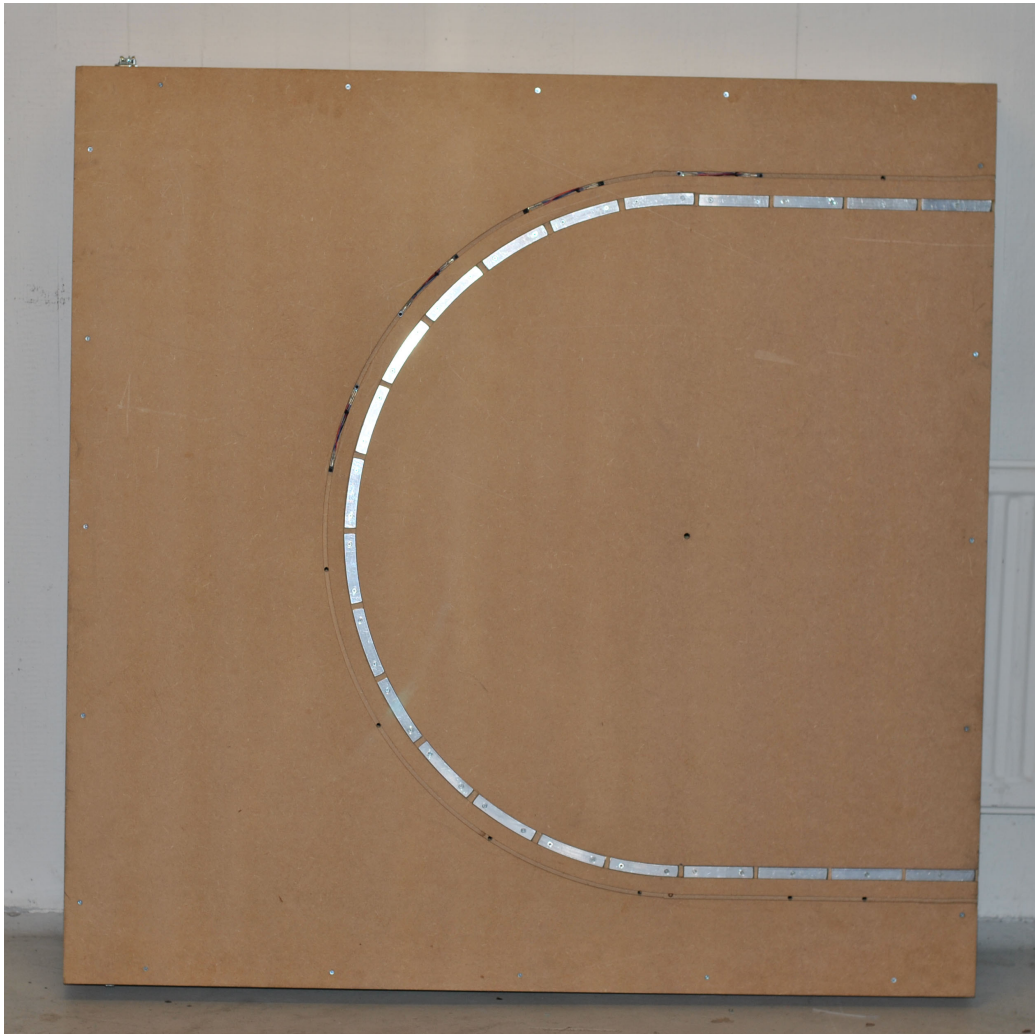
Aluminiumsegmenten har frästs ned i MDF-skivan och för att öka dess kontakt med bilens kontaktdon monterades segmenten 1 mm högre än banan. Segmenten är monterade i banan med försänkta skruvar för att kontaktytan ska bli så jämn som möjligt, se Figur 15. Skruvarna används som kontaktpunkter för styrsystemet.



Figur 15: Detaljbild över segmentmonteringen

Totalt är det 46 segment fördelat på nio per raksträcka och 14 per sväng. Vid varje skensegment sitter en lysdiod monterad som indikerar då segmentet är ledande. Även en IR-sensor sitter monterad vid varje skensegment för positionering av bilen. Dessa är placerade på ett sådant sätt att enbart en körriktning är möjlig, se avsnitt 5.3. För måttspecifikationer se Appendix D och E.

Banan är byggd i två delar som är sammansatta med gångjärn för att förenkla förflyttning, detta skyddar även elektroniken under flytt då den blir förseglad. Se Figur 16.



Figur 16: Banans två delar hopvikta skyddar elektroniken och gör den enklare att förflytta.

5.3 Styrsystem

Styrsystemet har till uppgift att kontrollera bilbanans skensegment för att möjliggöra laddning av demonstrationsbilen. Enbart det skensegment som är under bilen skall vara aktiverat och strömförande, de övriga bör vara kopplade till skyddsjord för att förhindra att personskador uppstår. Nedan presenteras en lista med förklaringar över hur några av komponenterna i styrsystemet fungerar. Kopplingsscheman återfinns i Appendix F och Appendix G.

- **Timerkrets 556**

556 är modellbeteckningen för en integrerad krets innehållandes två

stycken timerkretsar 555 i en och samma kapsel. I varje timerkrets 555 kan användaren genom att välja resistorer och kondensatorer i olika kombinationer erhålla olika funktioner och frekvensintervall upp till maximala $2,7 \text{ MHz}$ (ST Microelectronics 2008).

- **Transistor IRLU014NPBF**

Transistor IRLU014NPBF är en n-kanals MOSFET-transistor anpassad för logiska kretsar. MOSFET står för metal oxide semiconductor field effect transistor, vilket innebär att transistorn styrs kapacitivt från Gate-ingången genom att variera dess potential. n-kanal innebär att när en hög potential ($+5 \text{ V DC}$) läggs på transistorns Gate-ingång kan en ström flyta mellan transistorns Source- och Drain-ingång. Vid låg potential (0 V DC) på Gate-ingången blockeras istället denna ström (International IR Rectifier 2012).

- **Effektrelä G5LA-1 5DC**

Ett relä är en elektromekanisk komponent där en mindre styrström möjliggör brytning och påslagning av en andra yttre krets där strömmen kan vara betydligt högre. G5LA-1 5DC kräver en spänning över styrkretsen på $+5 \text{ V DC}$ för att kunna sluta den yttre strömkretsen. Den yttre kretsen kan maximalt överföra 10 A vid 24 V DC (Omron Electronic Components 2012).

- **Diod DO-15**

Dioden DO-15 är en komponent som tillåter ström att enbart flyta åt ett håll. Maximal blockeringsspänning är 600 V DC (Multicomp 2011).

- **IR-sensor GP1UX310QS**

En komponent som reagerar på infrarött ljus med våglängden 900 nm , frekvensen 36 kHz och pulskvoten 50% . Vid belysning läggs en låg nivå (0 V DC) på dess utgång. Då belysning ej sker är utgångsnivån hög ($+5 \text{ V DC}$). Sensorn innehåller ett filter som förhindrar ofrivillig aktivering av kontinuerligt bakgrundsljus såsom lysrör och dagsljus (Sharp 2012).

- **Multiplexer SN74150N**

En multiplexer är en aktiv elektrisk komponent som bland annat används till att utöka antalet läsbara ingångar i en krets. Genom att applicera höga styrsignaler ($+5 \text{ V DC}$) på styringångarna i olika kombinationer, läggs en av de 16 ingångarnas logiska värden på utgången (Texas Instruments 2011).

- **Arduino Mega 2560**

Arduino är en plattform baserad på en Atmel 2560 mikroprocessor och

har 54 portar som antingen kan fungera som in- eller utgångar. Med hjälp av ett speciellt programmeringsspråk kan användaren bland annat utföra en mängd olika logiska operationer (Arduino 2012).

Kommunikation mellan fordon och demonstrationsmodell sker med hjälp av IR-kommunikation. Vid varje skensegment sitter en IR-sensor som reagerar på infrarött ljus med våglängden 900 nm , frekvensen 36 kHz och pulskvoten 50% . Denna signal genereras i fordonets framvagn med hjälp av en IR-lysdiod kopplad till en 556 timerkrets. Belysningen sker ej kontinuerligt utan med en frekvens av 500 Hz , även här med en pulskvot på 50% . Detta för att undvika att IR-sensorn filtrerar bort signalen som störande bakgrundsbrus. Placeringen av bilens IR-lysdiod i kombination med positionen av det främre kontaktdonet medför att IR-sensorn placeras i framkant av varje skensegment för att övergången mellan segmenten ska bli smidig. Således är demonstrationsmodellen endast anpassad för laddning vid körning i en riktning.

Utgångarna på IR-sensorerna är kopplade via glättningskondensatorer till multiplexrar som slutligen går in i en Arduino-mikroprocessor. Glättningskondensatorerna har till uppgift att utjämna IR-sensorns utsignal, då den uppträder med en pulskvot av 50% . Detta härrör av att bilen belyser IR-sensorerna med just denna pulskvot för att undvika att tolkas som störande bakgrundsbrus. Multiplexrarna används för att utöka antalet läsbara ingångar på mikroprocessorn.

Mikroprocessorn tolkar insignalerna och skickar ut motsvarande utsignaler för att aktivera strömtillförseln till de aktuella skensegmenten. För att åstadkomma detta läggs en hög signal ($+5\text{ V DC}$) på en av dess utgångar. Transistorer reagerar och släpper igenom en ström som medför att de aktiverade skensegmentens relän växlar från jordat till ledande tillstånd med en spänning på $+7,5\text{ V DC}$. Skensegmenten är nu i aktivt ledande tillstånd och kan således ladda fordonet. För att förhindra och skydda mikroprocessorn monterades ett urladdningsmotstånd mellan transistorens Gate-ingång och jord. Dessutom monterades en skyddsdiode på varje relä för att förhindra att spänningsspike fortplantar sig in till transistor.

Då fordonet lämnar ett skensegment upphör belysningen och IR-sensorn indikerar detta genom att byta logiknivå på dess utgång. Mikroprocessorn tolkar detta och lägger en låg utsignal (0 V DC) på motsvarande transistor och därmed stryps strömtillförseln till reläet som växlar till jordat tillstånd. Skensegmentet är nu jordat och är därmed ej strömförande.

Till mikroprocessorn kan en dator kopplas via en USB-kontakt. Med hjälp av ett egenutvecklat Java-program kan användaren se vilka segment som är aktiva samt manuellt stänga av individuella segment. Extern aktivering av

individuella segment är av säkerhetsskäl ej möjlig. Java är ett plattformsoberoende programmeringsspråk med tillgång till grafiska utvecklingsverktyg.

5.4 Materiellista

Detta kapitel presenterar de komponenter och materiel som använts vid byggandet av demonstrationsmodellen.

Bil

- Aluminiumplåt
- Kopplingskabel
- Diod, 12 *st*
- Kretskort med banor, 1 *st*
- Kopplingsstift, 6 *st*
- Uppladdningsbart AA NIMH-batteri, 5 *st*
- Indikatorlysdiod, 1 *st*
- Spärrdiod, 1 *st*

Bilbana

- Indikatorlysdiod grön, 46 *st*
- Kabelsko M4, 46 *st*
- Låsmutter M3, 46 *st*
- Mutter M3, 46 *st*
- Aluminiumskena 15x5 *mm*, 5 *m*
- Metallskruv med försänkt huvud M3, 92 *st*
- Brickor M3, 184 *st*
- Kopplingskabel, diverse färger
- MDF-skiva 2440x1220 *mm*, 1 *st*
- Träregel 440x440 *mm*, 10 *m*
- Gångjärn 500x600 *mm*, 2 *st*
- Excenterlås, 2 *st*

Styrsystem

- IR-lysdiod, 1 *st*
- Effektrele, 46 *st*
- MOSFET transistor, 46 *st*
- Skyddsdiode, 46 *st*
- IR-detektor, 46 *st*
- Kretskort egenetsat, 6 *st*
- Resistor 1 $M\Omega$, 46 *st*
- 556 Timerkrets, 1 *st*
- Kondensator 1 μF , 46 *st*
- DC-plugg hona, 2 *st*
- USB-plugg hona, 1 *st*

- USB-kabel A->B 2 m, 1 st
- Multiplexer, 3 st
- Nätadapter 5V, 1 st
- Nätadapter 7,5V, 1 st

6 Diskussion

Utifrån de analyser och beräkningar som genomförts i de två föregående avsnitten följer nedan en diskussion rörande trovärdighet, felkällor och huruvida projektets syfte och mål uppfylls. Utöver detta återfinns även ett avsnitt rörande framtida utvecklingsmöjligheter för både den teoretiska och den demonstrativa modellen.

6.1 Verkningsgrad

Den verkningsgrad som beräknas i 4.4.3 är approximerad utifrån förluster i de ingående kraftelektriska komponenterna, överföringen och fordonets förmåga att utnyttja tillförd energi. Beräkningen resulterade i en verkningsgrad på 63,7% från energikälla till fordonets hjul. Redan här innebär övergången till elfordon med tillgång till konduktiv laddning under färd en avsevärd förbättring gentemot bensinbilars ottomotor och lastbilars dieselmotor. De verkningsgrader som presenteras för dessa två förbränningsmotorer i 2.7.1, 30% respektive 45%, gäller dessutom endast motorernas verkningsgrad. Den tar inte hänsyn till den energi som går åt vid tillverkning och transport av bränslet och inte heller till de övriga energiförluster som finns inom fordonet.

I 4.4.1 beräknas förlusterna i de kraftelektriska komponenterna till 10,6%. Eftersom den teoretiskt lägsta verkningsgraden för respektive komponent användes bör 10,6% vara väl tilltaget. Den modell som föreslås i 4.9 och benämns "Likström med relä", placerar både likriktare och transformator tidigt i överföringskedjan vilket bör leda till mindre förluster då de större komponenterna har en högre verkningsgrad, se 2.7.3. Till exempel används verkningsgraden 95% för transformatorn när stora transformatorer kan nå så högt som 99%.

Nästa stora bidrag till de totala förlusterna är de förluster som sker på olika nivåer i elnätet. För beräkning av den totala verkningsgraden approximeras dessa förluster till 9% baserat på Vattenfalls livscykelanalyser för olika energislag. Enligt Vattenfall är den generella överföringsförlusten till regionnät, 70 - 130 kV, 3% och till lågspänningskunder, 400 V, 7-9 %. Fördelen med att använda Vattenfalls generaliserade förluster för olika nivåer i elnätet är att dessa inkluderar de förluster som sker till följd av nätets uppbyggnad. Förlusterna är med stor sannolikhet baserade på mätningar istället för avancerade beräkningar. Sådana beräkningar blir väldigt komplexa då de förutom överföringsavståndet även behöver ta hänsyn till hur ledarna är förlagda, lindade och placerade i förhållande till varandra, se 2.7.4.

På grund av säkerhetsaspekter och kostnader är det inte rimligt att mata skensystemet direkt från regionnätet, däremot kommer med största sanno-

likhet en högre spänning än 400 V användas. Någonstans på vägen måste regionmätets spänning transformeras ner till en lägre, mer hanterlig spänningsnivå. Valet av spänningsnivå beror delvis på spänningstyp. Enligt svensk lag går gränsen för högspänningsanläggning vid 1000 V AC respektive 1500 V DC, se 2.3.1. Att använda högre spänningar innebär oerhört stora krav på säkerhetssystemen och lämpar sig inte i en miljö tillgänglig för allmänheten. För att underlätta implementeringen av systemet finns det anledning att anpassa det till någon av de olika laddningsstandarder som presenteras i 2.6. I enlighet med 4.3 är det därför lämpligt att använda laddningsstandarderna Mode 3 eller 4 för växel- respektive likspänning. Detta skulle leda till en begränsning vid 1000 V DC istället för de tillåtna 1500 V.

I slutändan blir utformningen av systemet en avvägning mellan effektförluster och kostnad. Kortare och fler lågspänningskablar resulterar i låga förluster men större anläggningskostnader då avståndet mellan transformatorstationerna som transformerar från högre spänningsnivå blir kortare. Huruvida Vattenfalls 7 - 9% som används vid beräkningen av den totala verkningsgraden är ett rimligt antagande går därför inte att svara på men för undersökningens syfte ger det en uppskattning av vad som kan uppnås vid realisering.

Det slutliga steget är fordonets förmåga att utnyttja den tillförda energin från skensystemet. Fordonets verkningsgrad beror både av elmotorn och kraftöverföringen från batteriet. I beräkningen används verkningsgraden från batteri till hjul för en Tesla Roadster. Tesla Roaster är knappast en optimal representant för fordonsflottan då det är en relativt dyr sportbil, men den bör ge en bild av vad som är möjligt för framtidens elbilar. Tesla är dessutom en av få tillverkare av elbilar som presenterar ingående information gällande fordonens prestanda.

6.2 Effektbehov

I rapporten approximeras det momentana effektbehovet för bil och lastbil till 25 kW respektive 200 kW. Dessa värden baserades på beräkningar utifrån fordonens bränsleförbrukning och verifierades med data från källor, se 4.5.1. En felkälla i dessa beräkningar är det värde på verkningsgraden som använts för respektive fordonstyp. Verkningsgraden för en motor för sig är bättre än den för hela fordonet då den slutliga verkningsgraden dessutom beror av förluster i kraftöverföringen. Verkningsgraderna 30% för ottomotorn och 45% för dieselmotorn ligger i överkant av vad dessa förbränningsmotorer klarar av. I verkligheten är verkningsgraden vid motorvägskörning något lägre. De ovan nämnda värdena för effektbehov måste därför betraktas som en grov uppskattning av energiåtgången vid motorvägskörning.

För att ge en bild av ett realiserat skensystem applicerades det tänkta systemet på vägsträckan Göteborg - Malmö via Europaväg 6, se 4.5.2. Data över trafikflöden från Trafikverket användes för att beräkna den totala effektåtgången. För uträkningens skull antogs trafikmängden vid mätpunkten mellan Varberg och Falkenberg vara representativ för hela vägsträckan. Resultatet $205,9 \text{ kW/km}$ är därför ett medelvärde på effektbehovet baserat på mätningar över flera år, motsvarande förbrukningen av ett mindre bostadsområde om 75 hus. Därför ger det en god uppskattning av effektåtgången sett över längre tid. Givetvis kommer effektbehovet överstigas markant vid storhelger etc. när trafikmängden är större än vanligt.

När en stor lastbil passerar blir det momentana effektbehovet för ett enskilt segment mycket stort, här 200 kW , vilket kablage och komponenter för segmentet måste dimensioneras efter. Här blir det tydligt att det genomsnittliga effektbehovet per kilometer, $205,9 \text{ kW/km}$, inte blir den avgörande faktorn när det kommer till design av det närmast omgivande elnätet. Vid rusningstrafik blir dessutom kraven på effektförsörjningen till enskilda grupper av segment mycket stora. För att komma till bukt med oförutsedda effekttoppar skulle reglering av trafiken kunna vara en lämplig lösning. Avstånds begränsning mellan tyngre fordon, subventionering för transporter under vissa tider på dygnet eller reglering av vilka fordonstyper som får färdas på vägen är några exempel på alternativa lösningar vilket i slutändan är ämne för en politisk diskussion.

6.3 Miljöpåverkan

I Sverige släpper vägtrafiken ut 19,1 miljoner ton koldioxidekvivalenter varje år, vilket är en stor del av de totala utsläppen, se 3.3.1. Därmed skulle minskade utsläpp från trafikens sida leda till en stor miljömässig besparing vilket är ett av huvudsyftena med implementeringen av ett skensystem för laddning av elfordon. För att utröna hur stor besparing som är möjlig beräknades utsläppen per kWh för några kraftverkstyper med hänsyn till systemets verkningsgrad.

Den största miljömässiga fördelen med att använda elektricitet för framdrift är att det ger möjligheten att välja vilken energikälla som ska användas. För att en övergång till elfordon som laddas via ett konduktivt skensystem ska leda till minskade utsläpp är det viktigt att fastställa huruvida det kraftverk som används för framställning av den elektriska energin släpper ut mindre än de förbränningsmotorer som i nuläget används. I Figur 8 visas en jämförelse mellan olika energislag och förbränningsmotorer. Där framgår tydligt att både kolkraft för sig och det europeiska genomsnittet för utsläpp till följd av energiproduktion skulle leda till en avsevärd ökning av utsläppen

om de implementerades. Beräkningarna i ekvation 22 - 27 visar däremot att utsläppen från trafiken på Europaväg 6 skulle minska med närmare 90%, från 17,3 ton CO_2/h till 1,75 ton CO_2/h om fordonen försågs med el från svenska kraftverk. Om samma sträcka elektrifierades med el från europeiska genomsnittskraftverk skulle istället utsläppen öka till 45,0 ton CO_2/h . Detta visar att det europeiska vägnätet inte bör förses med energi från de i nuläget använda kraftverken. I Sverige däremot står vatten- och kärnkraft för 85% av elproduktionen, se 3.3.2, vilket skulle innebära en mycket stor förbättring från bensin och diesel.

6.4 Interaktion mellan fordon och skensystem

För att aktivt styra vilka segment som är spänningssatta och på så vis ge så hög säkerhet som möjligt är det viktigt att kommunikationen mellan fordonen och skensystemets styrenheter fungerar felfritt. Det räcker inte endast med att segmenten aktiveras när ett fordon passerar och jordas när det lämnat. En teknik som möjliggör anpassning till olika trafiksituationer är önskvärd för att kunna bibehålla säkerheten vid till exempel köbildning eller olyckor. Information om fordonens hastighet, riktning och position skulle kunna användas för att aktivt reglera tiden segmenten är aktiva eller om det rent av ska fortsätta vara inaktiva. EITS är en teknik som är tänkt att innehålla denna typ av information och är även anpassad för kommunikation mellan fordon och mellan fordon och infrastruktur, se 4.7. En annan fördel är även att framtida fordon med stor sannolikhet kommer att använda sig av tekniken vilket gör valet enklare. Alla dessa argument gör att projektets skensystem bör konstrueras med hjälp av denna teknik.

6.5 Tekniska lösningar

I analysavsnitt 4.9 användes en Pughs beslutsmatris för att avgöra vilken av de tidigare presenterade teknikalternativen som var mest lämpligt. Detta resulterade i att tekniken benämnd "Likström med relä", se 4.8.1, ansågs uppfylla kraven bäst. Den följdes tätt av "Likström med LS-omriktare". Skillnaden mellan dessa två tekniker är i praktiken endast placering av LS-omriktaren. I den första tekniken placeras omriktaren i fordonet medan den i det andra fallet förläggs vid vägbanan. Även om två fordon har samma effektbehov vid motorvägskörning kan deras batterier vara anpassade för olika spänningsnivåer. Till följd av detta är det fördelaktigt att låta fordonstillverkaren anpassa LS-omriktaren. Om LS-omriktaren istället placeras vid vägbanan måste varje enskilt fordon sända information om vilken spänning det kräver. Då måste

även informationen hanteras av kommunikationssystemet och styrsystemet behöver reglera spänningen för varje fordon.

De andra jämförda teknikerna har ännu större nackdelar. De båda växelströmsalternativen kräver att en likriktare placeras i varje fordon, vilket inte är rimligt på grund av dess storlek, se 2.4.2. Det sista likströmsalternativet, ”Intermittent likström”, ställer orimligt stora krav på reglering av systemet. Det ger dessutom mindre överförd effekt och kan leda till onödigt slitage för fordonen till följd av att kontakten ständigt bryts.

I analysavsnittet som behandlar tekniken ”Likström med relä” framhålls fördelar att alla fordon redan idag är utrustade med LS-omriktare. Det innebär dock inte att alla idag existerande fordon enkelt kan anpassas för matning via ett skensystem. Omriktaren behöver vara konstruerad för att hantera den effekt fordonet förbrukar vid motorvägskörning och dessutom vara anpassad till skensystemets spänningsnivå. Det sistnämnda förenklas förhoppningsvis om skensystemets spänningsnivå anpassas efter en laddningsstandard för laddning med likström, lämpligtvis Mode 4, se 4.3. För att förlänga systemets livslängd och dess tillförlitlighet bör möjligheten att använda icke-mekaniska relän undersökas.

6.6 Demonstrationsmodell

Bygget av demonstrationsmodellen ska påvisa den teoretiska modellens principiella lösningar. För att åstadkomma detta implementerades elektromekaniska relän i styrsystemet istället för andra, enklare brytarlösningar. Vidare implementerades lysdioder för att påvisa strömöverföring till demonstrationsfordon. För att ge betraktaren en direkt visuell förståelse av skensystemets huvudmål att ladda elfordon valdes en radiostyrd bil som fordonmodell. Det har inte lagts någon stor vikt vid kontaktdonets utseende annat än att det ska vara funktionellt för demonstrationsbanans egenskaper och utformning.

Vidare skiljer sig demonstrationsmodellen när det kommer till kommunikation och indirekt säkerhetssystem. Istället för att använda EITS, vilket är en WiFi-teknik speciellt anpassad för fordonskommunikation används IR-kommunikation. Fördelen med IR-kommunikationen är dess enkelhet, vilket även innebär att informationsinnehållet är mycket begränsat. Till skillnad från EITS som skickar information gällande bilens hastighet och riktning med mera ger IR-kommunikation endast möjlighet till av- och påslagning. Detta innebär begränsningar när det kommer till säkerhetssystem för ”olyckor” och minimihastighet för fordonet, vilket föreslagits för den teoretiska modellen.

Valet av demonstrationsfordon föll på en radiobilmodell av enklare och rymligare modell då den innehöll minimalt med komponenter och elektronik

för att lättare möjliggöra egna modifikationer. Nackdelen med valet av en enklare modell visade sig vara att svängradien var för stor och att gasreglaget bestod av två lägen: av eller på. Bilen var därför tvungen att modifieras genom sänkning av topphastigheten och ökning av det maximala styrutslaget.

Materialvalet för skensegment och kontaktdon föll på aluminium eftersom dess relativt låga kostnad och tillgänglighet gentemot andra ledarmaterial såsom koppar gjorde den lämplig. Ett annat skäl var att materialet var lätt att bearbeta och forma efter behov. Ett skäl att istället välja koppar hade varit den ökade ledningsförmågan gentemot aluminium, dock är denna skillnad försumbar med de strömstyrkor demonstrationsmodellen överför.

Som konstruktionsmaterial till banan valdes MDF-skivor. Detta är ett tätt material vilket medförde att banan blev tung och svårflyttad. Dock hade alternativa, lättare material såsom spånskivor eller plywood varit sprödare i jämförelse, vilket försvårat fräsarbeten och montering.

För att styra segmenten på distans utvecklades ett Java-program som möjliggjorde statusindikering samt manuell avstängning av individuella segment. Java är ett plattformsoberoende programmeringsspråk där användaren kan välja vilken plattform programmet skall köras ifrån. Ytterligare en fördel var tillgången av kostnadsfria grafiska utvecklingsverktyg för design av användarvyn. Andra programmeringsspråk som C# och C++ har även tillgång till detta, dock är dessa språk plattformsoberoende och därmed inte lika mångsidiga. Som kommunikationsteknik mellan fordon och styrsystem valdes IR-signaler. Svårigheten med detta har varit att lyckas begränsa och rikta IR-ljuset på just den detektor som befinner sig under fordonet. Denna kalibrering utfördes manuellt med hjälp av både detektorernas placering och IR-lysdiodens avskärmning. Andra kommunikationsmetoder var uppe för diskussion och utvärdering till exempel WiFi-teknik, laserreflektion och vinkelgivare. Dock hade dessa alternativ bland annat varit mer komplexa att implementera varpå de tidigt valdes bort.

6.7 Utvecklingspotential

I rapporten presenteras tekniker, lösningar och beräkningar för att ge en grund till ett system för konduktiv laddning av elfordon. Flera av de alternativ som diskuteras i föregående avsnitt kräver vidare undersökningar för att avgöra huruvida de är lämpliga för implementering i ett verkligt system. Andra områden har lämnats mer öppna.

Kommunikationssystemet EITS bör vara det som är mest lämpligt men det kvarstår att bestämma exakt hur kommunikationen mellan fordon och skensystem ska ske. Till exempel vilka komponenter som behövs och vilken information som ska skickas och behandlas.

Det omkringliggande nätet som förser det tänkta systemet med elektricitet behöver designas utifrån en kompromiss mellan kostnad och effektförluster, se 6.1. För att göra detta krävs en mer ingående undersökning av variationer i effektbehov till följd av ojämnt trafikflöde. De ingående komponenterna behöver dimensioneras med hänsyn till det maximala momentana effektbehovet. Dessutom måste det undersökas vad som krävs för att Sveriges elnät ska klara av den ökade belastning en elektrifierad fordonsflotta skulle innebära.

Något som lämnats helt öppet i detta arbete är skenans och kontaktdonets uppbyggnad och funktion. Kontaktdonets styrning måste ske med stor precision och dessutom vara mycket tåligt. Rimligtvis bör skensegmenten vara av ett hårdare material än kontaktdonets kontaktyta då det bör vara lättare att byta ytan på donet än att kontinuerligt ersätta slitna segment i vägbanan.

Demonstrationsmodellens användarvy kan om systemet realiseras i stor skala inneha mer avancerade funktioner till exempel snabb avstängning av hela sektioner av segment i händelse av störningar och avläsning av elförbrukningen. Även någon form av timerfunktion som automatiskt avaktiverar ett segment om ett fordon blir stillastående kan tänkas implementeras. Funktioner som med största sannolikhet kommer att krävas av myndigheter för att användas i trafikledningscentraler för en säker användning av skensystemet.

Framtida utvecklingsmöjligheter för den demonstrationsmodell som konstruerats är att bland annat se över kommunikationen mellan fordon och skensegment. IR-kommunikationen kan eventuellt ersättas med ett krypterat WiFi-kommunikationsprotokoll eller RFID-kommunikation. Fordonets positioneringsprecision kan därmed ökas och funktioner för individuell debitering av fordons förbrukade energi kan läggas till. Risken att obehöriga utnyttjar skensystemet minskar i och med införandet av krypterad kommunikation.

För att påvisa att skensystemet även kan användas för tyngre trafik kan demonstrationsfordonet med fördel bytas ut från en personbil till en lastbil. Även kontaktdonet kan vidareutvecklas till en automatiskt variant som sänker sig själv i närheten av skensystemet för att utanför skensystemet vara upphöjd och därmed förbättra fordonets framkomlighet.

7 Slutsats

Utvecklingen och införandet av ett system för konduktiv laddning av elfordon förefaller vara ett gott alternativ för att anta utmaningen att minska utsläpp från användning av fossila bränslen. Mycket arbete kvarstår innan ett sådant system är komplett men de uppenbara miljömässiga fördelarna bör vara tillräckligt stora för att motivera en vidareutveckling.

I rapportens början ställs ett antal mål vilka syftar till att utvärdera huruvida ett framtaget system är lämplig att användas i vägnätet, se 1.3. Nedan följer en utvärdering av hur väl dessa mål uppfylls.

Utvärdering av mål

A Skensystemet ska utformas för att överföra erforderlig effekt för drift av personfordon och tyngre lastbilar under färd längs en motorväg i 100 km/h.

Det i rapporten föreslagna systemet har möjlighet att uppnå en verkningsgrad på mellan 60-65% från kraftverk till fordonens hjul vilket långt överstiger vad som är möjligt för en förbränningsmotor. Det innebär att det totala energibehovet, oavsett energikälla, minskar. För att bibehålla denna höga verkningsgrad är det viktigt att göra en bra avvägning mellan spänningsnivå och överföringsavstånd.

Systemet anpassas lämpligen till den europeiska standard för konduktiv laddning av elfordon som använder sig av 1000 V DC. Orsaken till detta är att fordonstillverkare får en redan färdig standard att utgå ifrån varpå ingen ny standard behöver utvecklas. 1000 V är dessutom en relativt hög spänning vilket krävs för att hålla en hög verkningsgrad.

Enligt beräkningar i avsnitt 4.5.1 drar en större lastbil under motorvägskörning en effekt på 200 kW, motsvarande för en personbil är 25 kW. De kraftelektiska komponenter som presenteras i 2.4 klarar alla av att överföra tillräcklig effekt. Det finns heller inga hinder rent tekniskt när det kommer till ledningar och kablar. När det gäller mer storskalig implementering av systemet, såsom i exemplet med elektrifiering av sträckan mellan Malmö och Göteborg uppstår andra problem, se 4.5.2 och 6.2. Det är i nuläget inte undersökt huruvida det svenska elnätet klarar att leverera en medeleffekt på 205,9 kW per kilometer motorväg, motsvarande 75 medelhus. En effekt som dessutom bör vara mycket större vid rusningstrafik. Det krävs vidare efterforskningar gällande nätets förmåga att klara den ökade lasten innan det går att avgöra om en storskalig realisering är möjlig. Utöver dessa svårigheter tillkommer den ekonomiska aspekten av

konstruktion av nytt nät och förändring av befintlig infrastruktur, se 6.1 och 6.2.

B När segment i skensystemet inte är aktiva, det vill säga ej överför energi, ska dessa vara ej ledande.

När ett fordon passerat slår ett relä om från ledare till jord. Eftersom systemet är designat så att fordonets kontaktdon överbryggar avståndet mellan två segment kommer segmenten även vara ledande en kort stund efter det att donet lämnat. Tiden innan segmenten jordas måste vara mycket kort för att möjliggöra återledning genom minuspolen, se Figur 9. Detta innebär att segmentet jordats redan under tiden det befinner sig under bilen. Av säkerhetsskäl bör segmenten dessutom vara konstant jordade om det passerande fordonets hastighet är för låg vilket möjliggörs om kommunikationssystemet EITS används, se 6.4 och inledningen till 4.8.

C Skensystemet i drift ska ha en minskad inverkan på miljön jämfört med dagens vägtrafik.

Som tidigare nämnts är en av de största fördelarna med elfordon att de ger möjlighet att välja vilken energikälla som ska användas, se 6.3. Genom att använda ”renare” energikällor så som vatten- och kärnkraft kan utsläppen av växthusgaser från trafiken minskas markant. Enligt tabell och beräkningar i 3.3 skulle övergång till elektriska vägar i Sverige innebära markant lägre utsläpp. Genom att elektrifiera Europaväg 6 mellan Malmö och Göteborg kan utsläppen av koldioxidekvivalenter per timme minskas från dagens 17,3 ton CO_2/h till 1,75 ton CO_2/h , en minskning på närmare 90%. Det genomsnittliga utsläppet för elproduktion i Europa är däremot mycket större, hela 809 gCO_2/kWh vilket innebär en försämring mot dagens trafikutsläpp, från 17,3 ton CO_2/h till 45,0 ton CO_2/h . Om en implementering av systemet ska leda till minskade utsläpp måste alltså energikällan för elproduktionen väljas med omsorg. I dagsläget är det europeiska genomsnittlandet ej redo för övergång till det föreslagna skensystemet, eller ens en eldriven fordonsflotta.

Värt att notera är att alla ovanstående siffror för elproduktion inkluderar de totala utsläppen för kraftverkens hela livscykel samt förluster i överföringen till fordon. I rapporten kvantifieras miljöpåverkan i utsläpp av gCO_2/kWh , därför har ingen hänsyn tagits till kraftverkens övriga påverkan på omgivningen. Slutförvaring av kärnbränsle och visuell påverkan är exempel på detta.

D Demonstrationsexemplaret ska likna den teoretiska modellen och laddning av demonstrationsfordonet ska kunna ske under färd.

Med hjälp av en modifierad radiostyrd bil och en oval bana där elektriskt ledande aluminiumsegment frästs ned i en MDF-skiva påvisar demonstrationsexemplaret tydligt hur det teoretiska systemet är uppbyggt. Likt den valda teoretiska modellen sker likströmsbrytningen till skensegmenten med hjälp av elektromekaniska relän, se 4.9. En lysdiod monterad på bilen indikerar att en strömkrets mellan kontaktdonen är sluten och laddning sker.

Eftersom demonstrationsmodellens huvudsakliga syfte är att likna och ge en visuell bild av den teoretiska modellen har vissa förenklingar och nedskalningar gjorts. De mest påtagliga skillnaderna, förutom storlek och spänningsnivå, är kontaktdonens utformning och kommunikationssystemet. Den teoretiska modellen tar inte ställning till kontaktdonets utseende och funktion, varför en så enkel modell som möjligt utformats för demonstrationsmodellen. Kommunikationssystemet EITS som föreslås till den teoretiska modellen finns ännu inte att tillgå, utöver detta innebär WiFi-kommunikation andra problem, se 6.6. Av dessa anledningar valdes en enklare IR-kommunikation för av- och påslagning av skensegmenten. Eftersom IR-kommunikationen har ett mycket begränsat informationsinnehåll, endast av och på, möjliggörs ingen hastighetsbegränsning eller automatisk deaktivering vid t.ex. olyckor.

Referenser

- ABB AB (2011). *Electric Vehicle Charging Infrastructure - Terra 51 Charge Station*. Datablad.
- (2012). *DC switching contactors, type GAF - A compact contactor up to 1000V DC*.
- All About Circuits (2012). *Contactors*. URL: http://www.allaboutcircuits.com/vol_4/chpt_5/2.html (hämtad 2012-03-06).
- Ansaldobreda (u.å). *Stream magnetic pick-up electric transportation system*. Via Argine 425, 80147 Napoli, Italia.
- Arduino (2012). *Arduino Mega 2560*. URL: <http://arduino.cc/it/Main/ArduinoBoardMega2560> (hämtad 2012-05-16).
- Bartnicki, Aleksander (2010). *Elteknik*. Chalmers Tekniska Högskola.
- Battery University (u.å). *Electric Vehicle*. URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle (hämtad 2012-03-09).
- Becker, Thomas A., Ikhtlaq Sidhu och Burghardt Tenderich (2012). *Electric Vehicles in the United States A New Model with Forecasts to 2030*. Technical brief 2009.1.v.2.0. Center for Entrepreneurship & Technology, University of California Berkeley.
- Beckman, Olof (2001). *Grundläggande termodynamik för högskolestudier*. LIBER, s. 269.
- Bombardier AB (2012a). *Fleet Operators*. URL: http://primovecity.bombardier.com/en/vision/primove_for_fleet_operators.html (hämtad 2012-03-06).
- (2012b). *Technology behind PrimoveCity*. URL: http://primovecity.bombardier.com/en/PRIMOVEtechnology/working_principle.html (hämtad 2012-03-06).
- Briginshaw, D. (2003). "Wireless light rail comes to Bordeaux". I: *International Railway Journal* 43.7, s. 26.
- CHAdEMO (2012). *CHAdEMO DC fast charge*. URL: <http://www.chademo.com/> (hämtad 2012-03-06).
- Cuff, David J och Andrew Goudie (2009). *The Oxford Companion to Global Change*. Oxford University Press.
- Dones, Roberto, Christian Bauer och Thomas Heck (2007). *LCA of current coal, gas and nuclear electricity systems and electricity mix in the USA*. Tekn. rapport. 5232 Villigen PSI, Switzerland: Paul Scherrer Institut.
- Dorf, Richard C. och James A. Svoboda (2000). *Introduction to Electric Circuits*. Vol. 4. John Wiley & Sons.
- Eckardt, B. m. fl. (juni 2006). "Automotive Powertrain DC/DC Converter with 25kW/dm(exp3) by using SiC Diodes". I: *Integrated Power Systems (CIPS), 2006 4th International Conference on*, s. 1–6.

- Ekonomifakta (2011). *Elproduktion*. URL: <http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Elproduktion/> (hämtad 2012-05-14).
- (2012). *Växthusgaser per sektor*. URL: <http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Miljo/Utslapp-i-Sverige/Vaxthusgaser/> (hämtad 2012-05-14).
- Elforsk (1999). *Likström för drift av elektrisk utrustning i fastigheter Förstudie*. Tekn. rapport. Elforsk.
- Elgered, Gunnar (2010). *Mätteknik*. Chalmers Tekniska Högskola.
- Elsäkerhetsverket (2008a). *Elsäkerhetsverkets författningssamling*. URL: <http://www.elsakerhetsverket.se/Global/F%C3%B6reskrifter/2008-1.pdf> (hämtad 2012-03-06).
- (2008b). *Elsäkerhetsverkets författningssamling p. 2-6*. URL: <http://www.elsakerhetsverket.se/Global/F%C3%B6reskrifter/2008-1.pdf> (hämtad 2012-03-06).
- Elways (2012a). *Bilbana i fullstorlek byggs vid Arlanda*. URL: <http://elways.se/pressmeddelanden/bilbana-i-fullstorlek-byggs-vid-arlanda/> (hämtad 2012-03-06).
- (2012b). *Elways lösning*. URL: <http://elways.se/elways-losning/> (hämtad 2012-03-06).
- Energimyndigheten (2012). *Ditt hus och din uppvärmning*. URL: <http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Din-uppvarmning/> (hämtad 2012-05-16).
- Ericsson AB (2010). *AXCE-LT 6/10(12)kV Produktinformation*. URL: <http://archive.ericsson.net/service/internet/picov/get?DocNo=3/28701-FGC101681&Lang=EN&HighestFree=Y> (hämtad 2012-05-14).
- Finlands officiella statistik (FOS) (2012). *Koldioxidekvivalenter*. URL: http://www.stat.fi/meta/kas/ekvivalenttinen_sv.html (hämtad 2012-05-14).
- Google Maps (2012). *Färdbeskrivning mellan Malmö och Göteborg*. URL: http://maps.google.com/maps?saddr=Malm%C3%B6,+Sverige&daddr=G%C3%B6teborg,+Sverige&hl=sv&ie=UTF8&ll=55.621405,13.08815&spn=0.22604,0.617294&sll=55.604981,13.003822&sspn=0.226134,0.617294&geocode=FfV2UAMdLmzGACn_kcR0pQVTRjHliEi93wWp0w%3BFUaRcAMdoLe2ACk_B2yWZ45PRjFAfA4peJABBA&oq=g%C3%B6teborg&mra=ls&t=m&z=11 (hämtad 2012-05-14).
- Homeplug (2012). *HomePlug Support for IEEE Standards*. URL: https://www.homeplug.org/tech/ieee_1901 (hämtad 2012-03-06).
- International Electrotechnical Commission (2011). *IEC releases final draft standards for EV charging*. URL: <http://www.iec.ch/newslog/2011/nr1511.htm> (hämtad 2012-03-06).

- International IR Rectifier (2012). *IRLR/U014N HEXFET Power MOSFET*. URL: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlr014n.pdf> (hämtad 2012-05-14).
- Karlberg, Lars Anders (2010). *Japan har lösningen på snabbbladdning av elbilar*. URL: http://www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/motor/article747830.ece (hämtad 2012-03-06).
- Konsumentverket (2012a). *Drivmedel*. URL: <http://www.konsumentverket.se/bilar/Nybilsguiden/Drivmedelochutslapp/Drivmedel/> (hämtad 2012-05-14).
- (2012b). *Minska dina utsläpp*. URL: <http://www.konsumentverket.se/bilar/Nybilsguiden/Drivmedelochutslapp/Koldioxidutslapp/> (hämtad 2012-05-14).
- Kuperman, A. m.fl. (juni 2011). "High power Li-Ion battery charger for electric vehicle". I: *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop*, s. 342–347. DOI: 10.1109/CPE.2011.5942258.
- Kurose, James F. och Keith W. Ross (2010). *Computer Networking A Top Down Approach*. 5. utg. Addison Wesley. ISBN: 978-0136079675.
- Multicomp (2011). *Ultra fast rectifier*. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1441720.pdf> (hämtad 2012-05-14).
- Nationalencyklopedin (2012a). *Induktion*. URL: <http://www.ne.se/lang/induktion/211235> (hämtad 2012-05-03).
- (2012b). *Konduktivitet*. URL: <http://www.ne.se/lang/konduktivitet> (hämtad 2012-05-03).
- (2012c). *Körsäkerhet*. URL: <http://www.ne.se/korsakerhet> (hämtad 2012-03-06).
- Nissan Sverige (2012). *Specifikationer*. URL: <http://www.nissan.se/SE/sv/vehicles/electric-vehicles/electric-leaf/leaf/pricing-and-specifications/specifications.html> (hämtad 2012-03-07).
- Nissan USA (2012). *Nissan Leaf*. URL: <http://www.nissanusa.com/ev/media/pdf/specs/FeaturesAndSpecs.pdf> (hämtad 2012-03-06).
- Omron Electronic Components (2012). *PCB Relay G5LA*. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/96357.pdf> (hämtad 2012-05-14).
- Schroeder, Daniel V. (2000). *An Introduction to Thermal Physics*. Addison Wesley Longham.
- Sharp (2012). *GP1UX31QS Series*. URL: http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1ux31qs_e.pdf (hämtad 2012-05-14).
- Sölver, C. E. (febr. 2007). *Electric arcs and arc interruption*. Föreläsningsmaterial. Department of Materials och Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology.

- ST Microelectronics (2008). *TS556 Low-power dual CMOS timer*. URL: http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000894.pdf (hämtad 2012-05-14).
- Statistiska Centralbyrån (2012a). *Bensin- respektive dieselförbrukning, liter per mil*. URL: http://www.scb.se/Pages/Standard___313065.aspx (hämtad 2012-05-14).
- (2012b). *Beräkningsmodell för bensin respektive diesel förbrukning per kommun*. URL: http://www.scb.se/Statistik/TK/_dokument/AnvÄndarhandledning2010.pdf (hämtad 2012-05-14).
- Strom, E.G. (juli 2011). "On Medium Access and Physical Layer Standards for Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe". I: *Proceedings of the IEEE* 99.7, s. 1183 –1188. ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2136310.
- Svensk Energi (2010a). *Den svenska elens miljöpåverkan*.
- (2010b). *Laddinfrastruktur för elfordon*. URL: http://www.vattenfall.com/en/file/laddningsinfrastruktur_elfordon_16569641.pdf (hämtad 2012-05-15).
- Svensson, Ulrika (2012). "Overview of emissions trends per sector". I: *National inventory report 2012*. Swedish environmental protection agency, s. 62–63.
- Swanson, John D (april 2003). "Light rail systems without wires?" I: *Rail Conference, 2003. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint*, s. 11 –22. DOI: 10.1109/RRCON.2003.1204647.
- Teknikföretagen (2012). *Utsläppen sjunker när tjänster och produkter drar åt samma håll*. URL: <http://www.teknikforetagen.se/hem/Publicerat/Nyheter/Utslappen-sjunker-nar-tjanster-och-produkter-drar-att-samma-hall/> (hämtad 2012-05-14).
- Tesla (2012). *Using energy efficiently*. URL: <http://www.teslamotors.com/goelectric/efficiency%20> (hämtad 2012-05-14).
- Texas Instruments (2011). *Multiplexer SN74150N*. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1446430.pdf> (hämtad 2012-05-14).
- Trafikverket (2012a). *Bränslen*. URL: http://www.trafikverket.se/PageFiles/46572/12_branslen.pdf (hämtad 2012-05-14).
- (2012b). *Hastighet och miljöpåverkan*. URL: <http://www.trafikverket.se/Privat/Trafiksakerhet/Din-sakerhet-pa-vagen/Hastighet/Hastighet-och-miljopaverkan/> (hämtad 2012-05-14).
- (febr. 2012c). *Minskade utsläpp av koldioxid från vägriften*. PM.
- University of California, Berkeley (2012). *Concept Evaluation & Selection p.18-20*. URL: <http://www.me.berkeley.edu/ME110/presentations/ConceptSelection.pdf> (hämtad 2012-03-07).

- Vattenfall AB (2005). *Livscykelanalys Vattenfalls el i Sverige*. URL: http://www.vattenfall.se/sv/file/Livscykelanalys-2005_11336961.pdf (hämtad 2012-05-14).
- (2010a). *Vattenfall AB Nuclear Power Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Ringhals Nuclear Power Plant*. URL: <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7315/epd26.pdf> (hämtad 2012-05-14).
- (2010b). *Vattenfall AB wind power Certified environmental product declaration EPD of electricity from Vattenfalls wind farms*. URL: http://www.vattenfall.se/sv/file/EPD-vindkraft-april2010_12333411.pdf (hämtad 2012-05-14).
- (2011). *Vattenfall AB Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfalls Nordic Hydropower*. URL: http://gryphon.environdec.com/data/files/6/7470/epd88_v2011.pdf (hämtad 2012-05-14).
- Volvo AB (2012). *Energieffektivitet*. URL: <http://www.volvotrucks.com/trucks/sweden-market/sv-se/aboutus/environment/our-trucks-and-services/pages/energy-efficiency.aspx> (hämtad 2012-03-09).

A Mätdata mellan Falkenberg och Varberg

Nästkommande två sidor visar mätdata från en av Trafikverkets mätstation mellan Falkenberg och Varberg.



Avsnitt: 5120078 Län: N Vägnummer: 6

Presentation av årsmedeldygnstrafik

Avsnitt	Fr o m	Till	Mätkod	Mätår	Mätriktning	ÅDT(OS) Fordon	ÅDT(OS) Lastbilar	ÅDT(OS) Axelpar
5120078	1993-10-01	1998-01-01	2	1993	1	5090±(12%)	770±(14%)	6220±(12%)
5120078	1997-01-01	1998-01-01	2	1993	2	4800±(17%)	760±(18%)	5860±(17%)
5120078	1998-01-01	2002-01-01	2	1998	1	6600±(7%)	1120±(8%)	8200±(7%)
5120078	1998-01-01	2002-01-01	2	1998	2	6620±(7%)	1110±(8%)	8170±(7%)
5120078	2002-01-01	2006-01-01	2	2002	1	8140±(7%)	1380±(8%)	9990±(7%)
5120078	2002-01-01	2006-01-01	2	2002	2	8130±(7%)	1360±(8%)	9880±(7%)
5120078	2006-01-01	9999-12-31	2	2006	1	9220±(12%)	1820±(9%)	11550±(12%)
5120078	2006-01-01	9999-12-31	2	2006	2	10150±(8%)	1800±(7%)	12310±(8%)

Fältförklaring

Beräkning av medelantal axlar för lastbilar









Mätår: 2011

	Riktning 1	Riktning 2	Totalt
Antal lastbilsaxlar tvåaxliga dragbilar	5111	5079	10190
Antal lastbilsaxlar treaxliga dragbilar	3996	3554	7550
Antal lastbilar utan släp	701	698	1400
Antal lastbilar med släp	1383	1298	2681
Medelantal axlar för lastbilar	4,4	4,3	4,3

Presentation av medelhastigheter

Mätperiod	Slytt.hast		Dag (06:00 - 22:00)				Natt (22:00 - 06:00)				Hela mätperioden			
			PU	PS	LU	LS	PU	PS	LU	LS	PU	PS	LU	LS
1998-03-17 10:00 - 1998-03-18 10:00		Antal fordon	3732	68	320	921	188	3	25	201	3920	71	345	1122
		Hastighet	116	91	96	87	115	101	99	86	116	92	96	87
1998-06-26 10:00 - 1998-06-29 10:00		Antal fordon	22195	1166	925	1123	2296	67	131	267	24491	1233	1056	1390
		Hastighet	114	87	97	87	116	90	101	87	114	88	98	87
1998-06-29 10:00 - 1998-06-30 10:00		Antal fordon	5916	284	392	944	431	11	38	220	6347	295	430	1164
		Hastighet	113	86	95	86	118	89	102	87	114	86	95	87
1998-09-23 11:00 - 1998-09-24 11:00		Antal fordon	4655	97	397	929	257	6	38	204	4912	103	435	1133
		Hastighet	117	91	98	87	119	93	97	88	117	91	98	87
1998-11-27 12:00 - 1998-11-30 12:00		Antal fordon	13270	303	627	1119	982	20	101	275	14252	323	728	1394
		Hastighet	114	91	97	87	112	91	99	88	114	91	97	87
1998-11-30 12:00 - 1998-12-01 12:00		Antal fordon	3843	83	281	954	393	9	38	212	4236	92	319	1166
		Hastighet	114	89	96	87	106	87	97	87	113	88	96	87
2002-02-28 12:00 - 2002-03-01 12:00		Antal fordon	5311	118	411	1069	291	11	56	221	5602	129	467	1290
		Hastighet	115	92	97	87	116	100	96	86	115	93	97	87
2002-03-01 12:00 - 2002-03-04 12:00		Antal fordon	15831	366	824	1348	1130	22	141	254	16961	388	965	1602
		Hastighet	112	90	99	87	114	96	100	87	112	90	99	87
2002-06-03 17:00 - 2002-06-04 17:00		Antal fordon	5947	152	454	1073	322	13	58	242	6269	165	512	1315
		Hastighet	117	91	99	88	121	96	100	88	117	91	99	88
2002-06-03 17:00 - 2002-06-04 17:00		Antal fordon	26381	1174	1289	1298	2539	91	193	271	28920	1265	1482	1569
		Hastighet	118	92	102	88	120	96	105	88	118	92	103	88

Presentation av medelhastigheter

		Dag (06:00 - 22:00)				Natt (22:00 - 06:00)				Hela mätperioden				
		Hastighet												
2002-08-16 09:00 - 2002-08-19 09:00		Antal fordon												
		Hastighet												
2002-08-19 09:00 - 2002-08-20 09:00		Antal fordon	6509	240	505	960	420	15	65	219	6929	255	570	1179
		Hastighet	117	90	99	87	119	94	100	87	117	90	99	87
		Hastighet	5084	88	447	1108	291	7	55	207	5375	95	502	1315
2002-11-13 12:00 - 2002-11-14 12:00		Antal fordon	116	90	99	87	115	102	98	87	116	91	99	87
		Hastighet	4859	101	464	1304	261	7	71	278	5120	108	535	1582
2006-01-30 15:00 - 2006-01-31 15:00		Antal fordon	115	91	101	87	108	93	99	87	115	91	101	87
		Hastighet	7790	225	701	1430	646	28	98	300	8436	253	799	1730
2006-04-06 12:00 - 2006-04-07 12:00		Antal fordon	113	90	100	87	114	94	101	87	113	91	100	87
		Hastighet	22712	726	1548	1899	1965	86	257	380	24677	812	1805	2279
2006-04-07 12:00 - 2006-04-10 12:00		Antal fordon	117	91	104	87	119	100	106	87	117	92	104	87
		Hastighet	24437	970	1627	1686	1922	93	217	345	26359	1063	1844	2031
		Hastighet	118	92	104	88	121	100	111	88	118	93	105	88
2006-09-22 09:00 - 2006-09-25 09:00		Antal fordon	6812	205	662	1257	463	18	58	288	7275	223	720	1545
		Hastighet	120	93	105	88	123	98	106	88	120	93	105	88
2006-09-25 09:00 - 2006-09-26 09:00		Antal fordon												
		Hastighet												

B Mätdata vid Bäckebo

Nästkommande två sidor visar mätdata från en av Trafikverkets mätstation vid Bäckebo i Göteborg.


TRAFIKVERKET
Avsnitt: 7110576 Län: O Vägnummer: 6
Presentation av årsmedeldygnstrafik

Avsnitt	Fr o m	Till	Mätkod	Mätår	Mätriktning	ÅDT(OS) Fordon	ÅDT(OS) Lastbilar	ÅDT(OS) Axelpar
7110576	1994-01-01	1998-01-01	2	1992	1	18480±(8%)	1170±(14%)	19500±(8%)
7110576	1997-01-01	1998-01-01	2	1992	2	18380±(8%)	1110±(14%)	19380±(8%)
7110576	1998-01-01	2002-01-01	2	1998	1	20240±(6%)	1910±(8%)	22100±(6%)
7110576	1998-01-01	2002-01-01	2	1998	2	19890±(6%)	1860±(8%)	21660±(6%)
7110576	2002-01-01	2006-01-01	2	2002	1	23460±(6%)	2380±(8%)	25810±(6%)
7110576	2002-01-01	2006-01-01	2	2002	2	23280±(6%)	2230±(8%)	25310±(6%)
7110576	2006-01-01	2010-01-01	2	2006	1	25720±(6%)	2660±(7%)	28330±(6%)
7110576	2006-01-01	2010-01-01	2	2006	2	25720±(6%)	2480±(7%)	28110±(6%)
7110576	2010-01-01	9999-12-31	2	2010	1	28480±(10%)	2890±(11%)	31370±(10%)
7110576	2010-01-01	9999-12-31	2	2010	2	26970±(10%)	2730±(11%)	29460±(10%)

Fältförklaring

Beräkning av medelantal axlar för lastbilar

Mätår: 2010

	Riktning 1	Riktning 2	Totalt
Antal lastbilsaxlar tvåaxliga dragbilar	6064	5591	11655
Antal lastbilsaxlar treaxliga dragbilar	4328	3910	8237
Antal lastbilar utan släp	1631	1649	3279
Antal lastbilar med släp	1258	1083	2340
Medelantal axlar för lastbilar	3,6	3,5	3,5

Presentation av medelhastigheter













Dag (06:00 - 22:00)

Natt (22:00 - 06:00)

Hela mätperioden

Mätperiod	Skyllt.hast		Dag (06:00 - 22:00)				Natt (22:00 - 06:00)				Hela mätperioden			
			PU	PS	LU	LS	PU	PS	LU	LS	PU	PS	LU	LS
1998-02-06 09:00 - 1998-02-09 09:00		Antal fordon	40557	625	1641	1358	3263	19	350	258	43820	644	1991	1616
		Hastighet	103	88	93	85	105	90	95	86	103	88	94	85
1998-02-09 09:00 - 1998-02-10 09:00		Antal fordon	14530	266	1072	1049	798	4	84	197	15328	270	1156	1246
		Hastighet	103	88	91	85	105	85	93	86	103	88	91	85
1998-05-05 00:00 - 1998-05-06 00:00		Antal fordon	17703	472	1292	1033	1004	7	113	159	18707	479	1405	1192
		Hastighet	104	85	92	85	108	88	95	86	104	85	92	85
1998-08-13 12:00 - 1998-08-14 12:00		Antal fordon	20458	569	1257	971	1882	30	122	217	22340	599	1379	1188
		Hastighet	100	81	89	84	107	90	95	87	100	82	89	85
1998-08-14 12:00 - 1998-08-17 12:00		Antal fordon	53539	1716	2091	1267	5440	61	278	249	58979	1777	2369	1516
		Hastighet	100	81	92	84	107	88	97	87	100	81	92	84
1998-10-20 23:00 - 1998-10-21 23:00		Antal fordon	16842	314	1215	1027	1092	7	105	198	17934	321	1320	1225
		Hastighet	101	84	91	85	104	91	94	86	101	84	92	85
2002-03-13 23:00 - 2002-03-14 23:00		Antal fordon	18212	434	1555	1319	1107	10	128	279	19319	444	1683	1598
		Hastighet	104	85	93	86	108	94	95	87	104	86	93	86
2002-07-05 09:00 - 2002-07-08 09:00		Antal fordon	65960	3149	3236	1327	5578	180	402	305	71538	3329	3638	1632
		Hastighet	104	86	94	86	111	90	98	88	104	86	95	87
		Antal fordon	20227	865	1280	740	1615	58	120	188	21842	923	1400	928
		Hastighet	105	85	93	87	109	88	98	87	106	86	94	87

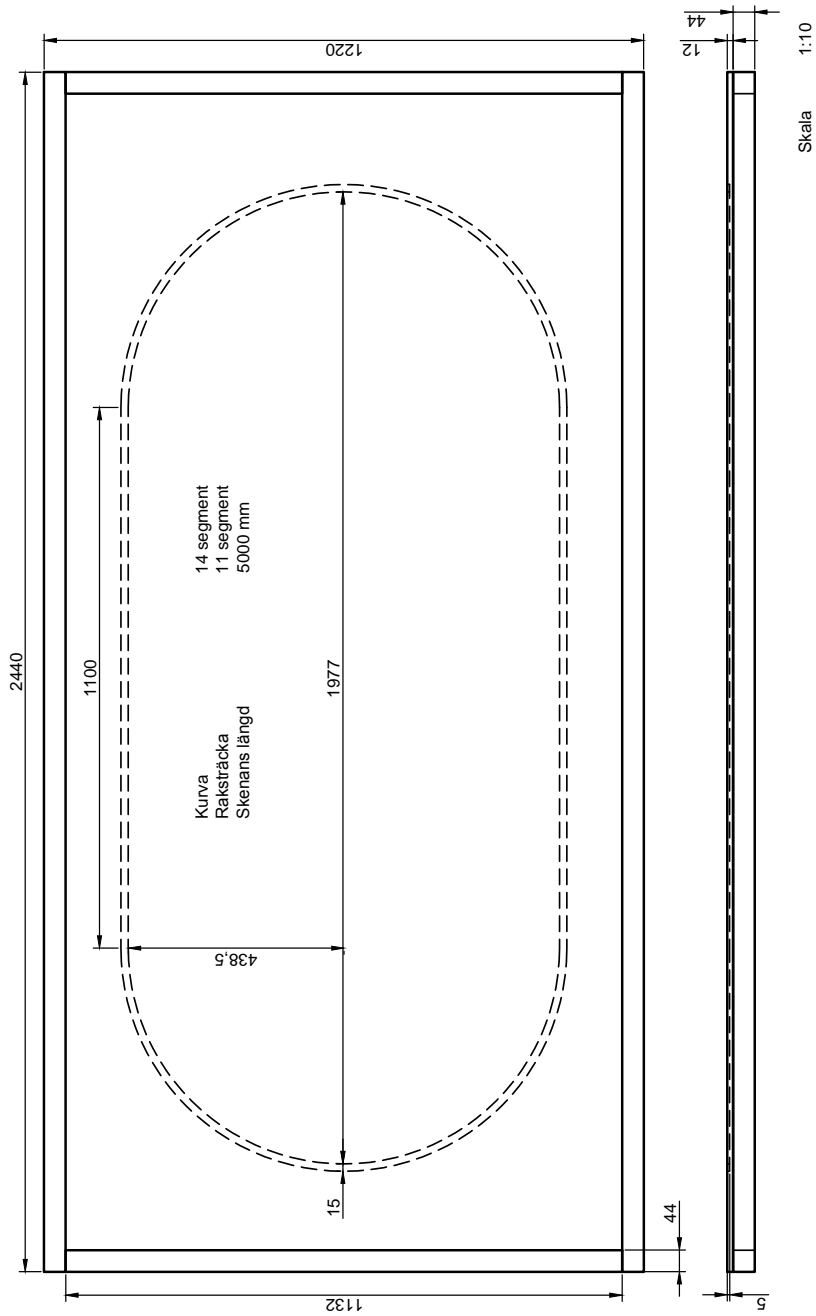
Presentation av medelhastigheter

		Dag (06:00 - 22:00)				Natt (22:00 - 06:00)				Hela mätperioden				
2002-07-16 09:00 - 2002-07-17 09:00		Antal fordon												
		Hastighet												
2002-09-17 22:00 - 2002-09-18 22:00		Antal fordon	19162	562	1423	1187	1204	9	117	257	20366	571	1540	1444
		Hastighet	101	84	91	84	107	99	92	86	101	84	91	84
2002-12-06 09:00 - 2002-12-09 09:00		Antal fordon	47857	1035	2370	1633	5100	39	337	406	52957	1074	2707	2039
		Hastighet	104	85	94	86	106	89	97	88	104	86	95	86
2002-12-09 09:00 - 2002-12-10 09:00		Antal fordon	18693	402	1418	1277	1154	3	115	269	19847	405	1533	1546
		Hastighet	102	85	93	86	108	85	94	87	103	85	93	86
2006-02-24 09:00 - 2006-02-27 09:00		Antal fordon	50862	1273	2594	1892	4502	23	294	410	55364	1296	2888	2302
		Hastighet	105	88	95	86	109	89	97	86	105	88	95	86
2006-02-27 09:00 - 2006-02-28 09:00		Antal fordon	19929	480	1622	1374	1092	9	118	253	21021	489	1740	1627
		Hastighet	101	83	92	84	110	96	95	86	102	84	93	85
2006-04-18 23:00 - 2006-04-19 23:00		Antal fordon	21894	510	1619	1476	1318	21	152	316	23212	531	1771	1792
		Hastighet	100	82	91	84	106	93	94	86	100	82	91	84
2006-07-20 12:00 - 2006-07-21 12:00		Antal fordon	22046	931	1483	872	2060	66	199	214	24106	997	1682	1086
		Hastighet	105	86	95	86	111	89	98	88	106	86	95	86
2006-07-21 12:00 - 2006-07-24 12:00		Antal fordon	68185	3059	2924	1188	6163	149	371	349	74348	3208	3295	1537
		Hastighet	105	87	95	86	110	88	98	87	105	87	95	86
2010-05-11 12:00 - 2010-05-14 12:00		Antal fordon	71604	3296	4770	3082	4595	96	465	742	76199	3392	5235	3824
		Hastighet	91	73	88	81	108	91	96	86	92	74	88	82
2010-07-27 12:00 - 2010-07-28 12:00		Antal fordon	24780	1005	1639	934	1977	47	179	267	26757	1052	1818	1201
		Hastighet	102	87	94	85	108	89	96	86	103	87	94	85
2010-10-28 00:00 - 2010-10-29 00:00		Antal fordon	23608	652	1977	1565	2056	24	164	331	25664	676	2141	1896
		Hastighet	91	76	88	81	106	92	97	86	92	77	88	82
		Hastighet												

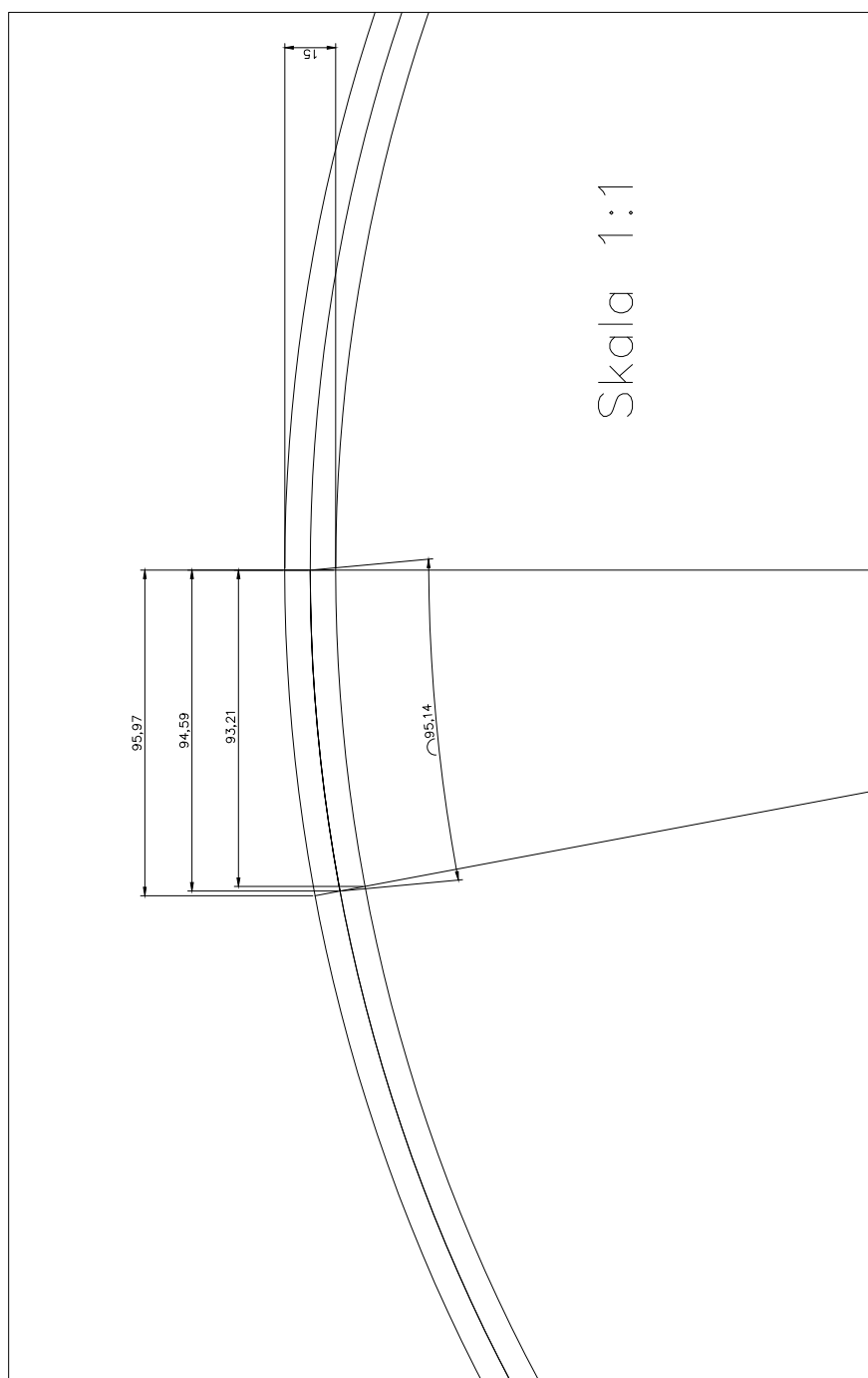
C Pughs beslutsmatris

	Kat. vikt	Vikt	AC Enfas	AC Högfrekvent	DC Brytare	DC LS-omriktare	DC Intermittent
Säkerhet	100	100	3	1	6	6	6
Tillförlitlighet	120	50	3	1	6	6	6
Personssäkerhet		100	300	100	600	600	600
Timing		50	6,4	4	10,1	10,1	6,9
Kontaktkänslighet för arm		50	8	2	8	8	4
Nätbelastning		50	4	4	9	9	9
Realiserbarhet	150	20	2	5	8	8	2
Simplicitet		50	8,0	4,5	10,0	9,0	9,5
Storlek		50	10	3	8	6	7
Spänningsreglering		50	1	1	7	7	7
		50	5	5	5	5	5
Total	370		17,4	9,5	26,1	25,1	22,4

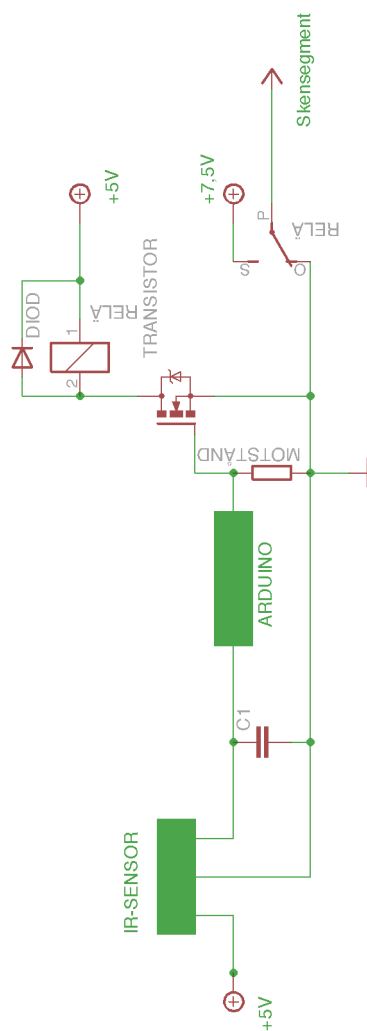
D Ritning bilbanan



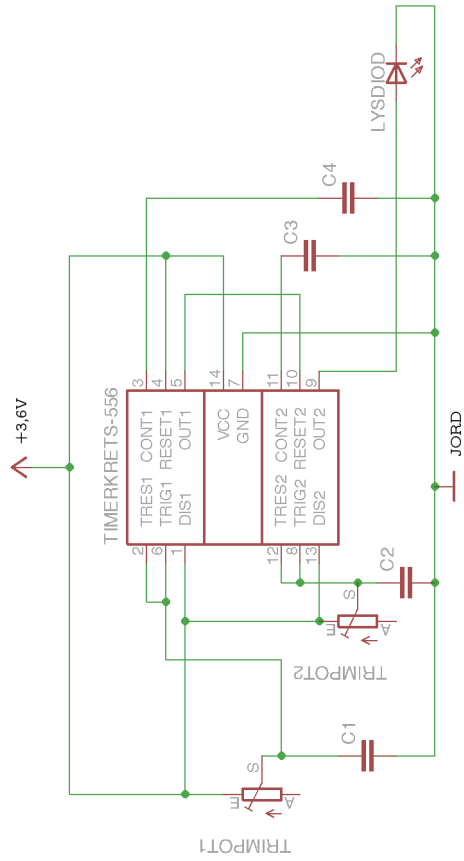
E Ritning kurvsegment



F Kopplingschema styrsystem



G Kopplingschema timerkrets 556



H Kopplingschema indikatorkrets

