



Hybridisering av mobila maskiner – översikt över teknikläget samt drivkrafter och begränsningar för framtida utveckling

Gunnar Larsson

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för energi och teknik

Hybridisering av mobila maskiner – Översikt av teknikläget samt drivkrafter och begränsningar för framtida utveckling

Gunnar Larsson

ISSN 1654-9392

2012:043

Uppsala 2012

Nyckelord: hybridisering, elektricitet, teknikbeskrivning, mobila maskiner, arbetsmaskiner, grävmaskiner, bulldozer, hjullastare, grävlastare, gaffeltruckar, jordbruksmaskiner, traktorer, skördetröskor, fälthackar, skogsmaskiner, skotare, skördare, hälsa, ekonomi, prestanda, fordonsgeometri, energianvändning, lagstiftning

SAMMANFATTNING

Denna rapport är en förstudie av faktorer som påverkar hybridisering av mobila maskiner. Studien har omfattat drivkrafter och begränsande faktorer för hybridisering samt en överblick av det nuvarande läget gällande forskning och utveckling inom området samt kommersialisering av hybridfordon.

Icke-väggående hybridfordon har till viss del samma för- och nackdelar som väggående hybridfordon. Detta gäller t.ex. minskad bränsleförbrukning och minskade utsläpp på bekostnad av ökade tillverkningskostnader. Samtidigt skiljer de sig inom andra områden. Detta gäller t.ex. i tekniskt hänseende där högt vridmoment vid låga hastigheter och ökad kontrollerbarhet är viktiga fördelar för hybridfordon, samtidigt som fordonen används i en tuffare miljö än vägfordon vilket kan göra hybridisering svårare. Hybridernas ekonomiska konkurrenskraft påverkas positivt av den ökade produktivitet som följer av det höga vridmomentet vid låga hastigheter, samtidigt är möjligheterna till grön PR begränsande jämfört med vägfordon.

Med undantag för vissa mindre sektorer (som gaffeltruckar) befinner sig hybridfordonen i en introduktionsfas för mobila maskiner. Många olika typer av topografier (serie, parallell, kombinationer), lagringsmedier (batterier, superkondensatorer) och styrregler prövas och få entydiga trender finns för dessa faktorer. Däremot är det relativt entydigt för vilka fordonsdelar som eldrift främst används. För grävmaskiner är det rotationen av överkroppen som främst elektrifieras, medan det för hjullastare är hjuldrivlinan som elektrifieras. Uppgifter om hur mycket bränsleförbrukningen kan minska varierar betydligt mellan olika forskargrupper och tillverkare, beroende på variation i hybridiseringsgrad, arbetscykel m.m. Utveckling av fordon drivna med bränsleceller förekommer inom gaffeltruckssektorn, men är i övrigt begränsat till konceptfordon och liknande.

ABSTRACT

This report is a pre-study of factors influencing hybridisation of non-road mobile machinery. The study has included incentives and constraints for hybridisation and an overview of the current state of research and development in the area as well as the commercialization of hybrid vehicles.

Non-road hybrid vehicles have to some extent the same advantages and disadvantages as hybrid road vehicles, such as reduced fuel consumption and reduced emissions at the expense of increased manufacturing costs. However, there are also differences. Concerning technical aspects important benefits of hybridisation specific to non-road vehicles include high torque at low speeds and increased controllability, while on the other hand the environment is tougher for electric components. The economic competitiveness of non-road hybrids is positively affected by the increased productivity originating from the higher torque at low speeds, while the possibility of green PR is limited in comparison with road vehicles.

With the exception of some minor sectors (such as forklifts) hybrid non-road mobile machinery are in an introductory phase. Many different types of topographies (serial, parallel), storage devices (batteries, super capacitors) and control strategies are tested and few clear-cut trends exist for these factors. However, it is quite clear which parts of the vehicles that are the focus for hybridisation. For excavators, it is the rotation of the upper body that is hybridised, while for wheel loaders it is the wheel drivetrain that is the focus of hybridisation. Information on how much fuel consumption can be reduced varies considerably between different research groups and manufacturers, corresponding to variation in degree of hybridisation, duty cycle etc. Development of vehicles powered by fuel cells take place in the forklift sector, but is otherwise limited to concept vehicles.

FÖRORD

Denna rapport har finansierats via forskningsprogrammet "STandUP for Energy", ett samarbete mellan Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala Universitet, Kungliga Tekniska Högskolan samt Luleå Tekniska Universitet. Det utgör även en del av projektet "Potential för energieffektivisering av tyngre arbetsfordon genom hybridisering" som finansierat av Trafikverket. Övriga delar av den senare studien finns presenterad i rapporten "Potential för bränslebesparingar genom hybridisering av hjullastare". Arbetet har i huvudsak genomförts under 2011.

Jag vill rikta ett varmt tack till Magnus Lindgren för som generöst delat med sig av information och erfarenheter.

Uppsala april 2012

Gunnar Larsson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INTRODUKTION	7
2.	MASKINBESKRIVNING	7
2.1.	Användning inom olika sektorer	7
2.2.	Tillverkning.....	8
2.3.	Fordonsflottans bränsleförbrukning och utsläpp.....	9
2.3.1.	Europa.....	9
2.3.2.	Sverige.....	9
2.4.	Viktiga skillnader jämfört med vägfordon	10
2.4.1.	Ekonomi	10
2.4.2.	Design	10
2.4.3.	Användning	11
2.5.	Grävmaskiner.....	11
2.5.1.	Aktuatorer/sammansättning	11
2.5.2.	Användning	12
2.6.	Bulldozer.....	13
2.7.	Hjullastare.....	13
2.8.	Grävlastare	14
2.9.	Gaffeltruckar	14
2.10.	Traktorer	15
2.11.	Skördetröskor och fälthackar	15
2.12.	Skotare	16
3.	HYBRIDISERINGSALTERNATIV	16
3.1.	Metoder att öka drivlinans effektivitet.....	17
3.1.1.	Drivlineeffektivitet.....	17
3.1.2.	Minskad outnyttjad energi.....	18
3.2.	Vanliga drivlinekonfigurationer.....	19
3.2.1.	Parallell	19
3.2.2.	Serie	19
3.2.3.	Power-split.....	20
3.3.	Energiöverföring	20
3.3.1.	Bränsle	21
3.3.2.	Laddning	21
3.4.	Energilagring.....	22
3.4.1.	Hydrauliska ackumulatorer.....	22
3.4.2.	Bränsleceller	23
3.4.3.	Batterier	23
3.4.4.	Superkondensatorer	24
3.4.5.	Svänghjul.....	24
3.5.	Energiomvandlare	25
3.5.1.	Förbränningsmotorer.....	25
3.5.2.	Elektriska motorer.....	26
3.5.3.	Hydrauliska pumpar och motorer	28
3.6.	Transmission	28
3.6.1.	Mekanisk transmission.....	28
3.6.2.	Hydraulik	30
3.6.3.	Elektricitet.....	30
4.	DRIVKRAFTER OCH BEGRÄNSNINGAR	30
4.1.	Säkerhet och påverkan på människors hälsa	30
4.1.1.	Lokala utsläpp.....	30
4.1.2.	Buller.....	31
4.1.3.	Bränder	31
4.1.4.	Toxicitet.....	32
4.1.5.	Skador orsakade av elektricitet.....	32
4.1.6.	Fysiska skador.....	32
4.2.	Ekonomi.....	33
4.3.	Liten påverkan på miljön	34
4.4.	Fordonsprestanda	36
4.4.1.	Hög effekt vid låga varvtal	36

4.4.2.	Bättre styrning av hjulen	36
4.4.3.	Kontrollerbarhet	36
4.5.	Fordonsgeometri	37
4.5.1.	Utrymme	37
4.5.2.	Balanserad vikt	37
4.6.	Samhällsfrågor	37
4.6.1.	Teknologisk osäkerhet	37
4.6.2.	Kunskapsnivå bland brukare och mekaniker	37
4.6.3.	Lagstiftning och påverkan från offentliga sektorn	38
4.7.	Energianvändning	38
4.8.	Lagstiftning och standardisering	38
4.8.1.	Komponentstandardisering	38
4.8.2.	Utsläppslagstiftning	38
4.9.	Känslighet för miljöfaktorer	39
5.	EXISTERANDE ANVÄNDNING AV ELEKTRICITET I MOBILA	
	ARBETSMASKINER	40
5.1.	Existerande elektriska system	40
5.2.	Grävmaskiner	41
5.2.1.	Drivlinekonfigurationer	41
5.2.2.	Kontrollstrategier	42
5.2.3.	Tillverkare	43
5.3.	Bulldozers	44
5.4.	Hjullastare	44
5.4.1.	Drivlinekonfigurationer	44
5.4.2.	Kontrollstrategier	45
5.4.3.	Tillverkare	45
5.5.	Grävlastare	46
5.6.	Dumprar och haul trucks	47
5.7.	Gaffeltruckar	47
5.8.	Traktorer	48
5.8.1.	Drivlinekonfiguration	48
5.8.2.	Traktortillverkare	49
5.8.3.	Academia	50
5.9.	Skördetröskor och fälthackar	50
5.10.	Skogsmaskiner	51
5.10.1.	Tillverkare	51
6.	SLUTSATSER	51
7.	REFERENSER	53
8.	INDEX	65

1. INTRODUKTION

Ett antal faktorer, däribland ökade kostnader för fossila bränslen och ökande miljömedvetenhet har inneburit en renässans för tanken på att använda elektricitet för att driva fordon efter avbrott på närmare 100 år. Mycket forskning har publicerats om hybridelektriska bilar, betydligt mindre om hybridelektriska mobila maskiner. Samtidigt är motiven liknande för att använda el i såväl icke-väggående som väggående fordon. Syftet med denna rapport är att ge en överblick av hur långt utvecklingen har kommit och vilken potential som finns för elektrifiering inom överskådlig framtid.

Rapporten omfattar mobila maskiner (enligt definitionen i EU-direktiv 2004/26/EG) där elektriska komponenter används i drivlinan för att minska bränsleförbrukningen. På grund av skillnader i fordonens ändamål och praktiska begränsningar undantas fordon som främst används för militära ändamål från denna rapport, liksom fartyg och fordon som används på järnväg (Szczyzny, 2010).

Ett mycket brett utbud av mobila maskiner finns. En del tillverkas i stora serier, andra i mycket korta serier. I denna rapport är fokus på maskiner vars storlek och/eller produktionsvolym innebär att de har en betydande inverkan på sektorns energianvändning och utsläpp. Fokus ligger på fordonen som sådana. Frågor där skillnaden mellan vägfordon (för vilka mycket data redan finns) och mobila maskiner är små täcks bara översiktligt. När det gäller lagstiftning, marknadsläge m.m. ligger fokus på situationen i Europa i allmänhet och i Sverige i synnerhet.

Rapporten syftar till att ge en översikt både för de som har en bakgrund inom el/hybridfordon och de med bakgrund inom mobila maskiner. Kapitel 2 tar därför upp de fordonstyper som finns och vilka krav som ställs på dessa, medan kapitel 3 omfattar den tekniska bakgrunden för elektrifiering. Kapitel 4 beskriver sociala, ekonomiska och tekniska drivkrafter och begränsningar för hybridisering. Slutligen tar kapitel 5 upp det aktuella läget vad gällande forskning och utveckling på mobila hybridmaskiner samt de marknadsintroduktioner som skett.

2. MASKINBESKRIVNING

Begreppet ”mobila maskiner” omfattar en mängd fordon som sinsemellan uppvisar stora variationer, från små gaffeltruckar och gräsklippare till gigantiska gruvmaskiner. De största maskinerna väger 100 gånger mer och använder 100 gånger mer energi än de minsta. Fordonen används i alltifrån logistiskt arbete inomhus i städer till gruvor, skogar och åkrar (Finpro, 2010).

Trots att sektorn omfattar mycket olika fordon kännetecknas den också av vissa gemensamma drag. Lagstiftningen är i många fall, t.ex. för utsläpp, gemensam för hela sektorn. Stora tillverkare som Caterpillar, Komatsu och Volvo CE är verksamma inom produktion av många typer av maskiner och fordon som använder liknande drivlinor för de olika fordonen. Det breda utbudet av verksamheter och den högre graden av specialisering resulterar i att fordonen tillverkas i korta serier jämfört med bilar.

2.1. Användning inom olika sektorer

Mobila maskiner används för de flesta av de processer genom vilka vi utviner, använder och återvinner eller deponerar råvaror, produkter och avfall. Jordbrukstraktor är grunden för mycket av det moderna jordbruket. Det används för att utnyttja ett brett sortiment av utrustning från plogar till såmaskiner. Under skörden används skördetröskor. Vid avverkning inom skogsbruket förekommer flera alternativa metoder. Den vanligaste i Europa är

kortvirkesavverkning, där skördare används för att kapa träd till stockar, vilka transporteras ut ur skogen av skotare (Sellgren, 2009).

Ett brett utbud av maskiner, ofta specialiserade, används vid gruvdrift. De inkluderar bl.a. bulldozrar (för att schakta jordmassor), lastmaskiner (för att lasta brutet material) och dumprar (för att transportera brutet material). De särskilda omständigheter som finns vid gruvdrift innebär att många speciella anpassningar måste göras. Maskinerna tenderar att vara mycket större än inom andra tillämpningsområden. Maskiner på upp till några hundra ton används. I vissa fall levereras el till fordon genom en kabelvinda ansluten till elnätet.

Mobila maskiner används allmänt inom byggsektorn. Bulldozers används för att förbereda mark. Grävmaskiner och grävlastare gör plats för fundament och rör. Lastmaskiner och kranar används för att flytta material. Inom logistiken används gaffeltruckar för att transportera varor från inleverans till lagring och från lagring till utleverans. Kranar användas för att överföra material mellan olika transportslag, liksom mellan förvaringsutrymmen och transportsätt. Kranar och grävmaskiner och bulldozers används för destruktionsarbete. Inom avfallshanteringen används bulldozrar vid deponier för att flytta och kompaktera material.

2.2. Tillverkning

En stor del av sysselsättningen vid tillverkning av mobila maskiner i Sverige sker inom ett begränsat antal stora företag: Volvo Construction Equipment, Atlas Copco och Sandvik. Dessa bolag sysselsätter över 1 000 personer i Sverige och många fler utomlands. De utvecklar drivlinor på egen hand.

Det finns också ett antal mindre tillverkare (mindre än 200 anställda) som producerar mer specialiserade fordon. De använder ofta komponenter från större tillverkare (och har i vissa fall tidigare varit tillverkare för dessa företag). Även om de är små bedriver de ofta avancerad forskning t.ex. på förarlösa maskiner. Särskilt inom skotaresegmentet har svenska fordonstillverkare en betydande andel av världsmarknaden.

Slutligen har några större utländska företag enheter i Sverige. Dessa är i allmänhet som resultatet av förvärv och enheterna tenderar att vara medelstora. En förteckning över de största företagen finns i tabell 1 (Atlas Copco, 2007; Atlas Copco 2009; Ratsit, 2011).

Tabell 1 Större tillverkare av mobila maskiner i Sverige

Företag	Anställda (2009)	Omsättning (2009)	Anställda (2007)	Omsättning (2007)
Volvo CE	3 858	10 050	4 734	23 627
Atlas Copco	3 863		4 415	
Sandvik	7 795	14 659	7 708	21 170
Komatsu Forest	289	973	385	2,091
Ecolog	46	261	76	470
Gremo	55	160	Inga data	
Rottne Industri	172	303	189	476
Huddig	76	185	115	321
Cargotec Sweden	1 839	9 275	Kalmar Industries	
Svetruck	2 178	572	208	526
Väderstad	549	1 268	457	1 251
Ljungby Maskin	92	251	84	312

Volvo Construction Equipment producerar ett brett utbud av mobila maskiner av olika storlekar och typ, inklusive grävmaskiner, dumprar och hjullastare samt en rad mer specialiserade fordon som rörläggare och asfaltsläggare. Företaget har fabriker i Eskilstuna (komponenter), Arvika (lastare), Braås (dumpers) and Hallsberg (komponenter) (Alfredsson & Elvén, 2010). Atlas Copco producerar ett brett sortiment av gruvutrustning. De äger också vältproducenten Dynapac, som sysselsätter 500 personer i Sverige och omkring 2 000 globalt. Sandvik arbetar inom ett antal områden, bland annat tillverkning av maskiner för gruvidrift. De sysselsätter omkring 7 000 personer i Sverige, mestadels i Sandviken.

I Sverige finns inga traktortillverkare, däremot är Väderstad en betydande tillverkare av jordbruksredskap. Komatsu Forest producerar skotare och skördare. De har sitt huvudkontor i Umeå och är helägda av japanska tillverkaren Komatsu (Komatsu Forest, 2011). Eco Log producerar skotare och skördare i Söderhamn, de tog över Caterpillars fabrik 2004 (Eco Log, 2011). Gremo tillverkar skotare i Ätran (Gremo, 2011). Rottne Industri tillverkar skotare och skördare. De har omkring 225 anställda, främst i Rottne, men även i Lenhovda och Stensele (Rottne Industri, 2011). Huddig producerar grävlastare i Hudiksvall där de har 100 anställda (Huddig, 2011). Kalmar Industries är ett dotterbolag till finska Cargotec. De producerar och säljer fordon för logistik som terminaltraktorer och gaffeltruckar (Kalmar Industries, 2011). Svetruck tillverkar tunga gaffeltruckar i Ljungby (Svetruck, 2011).

2.3. Fordonsflottans bränsleförbrukning och utsläpp

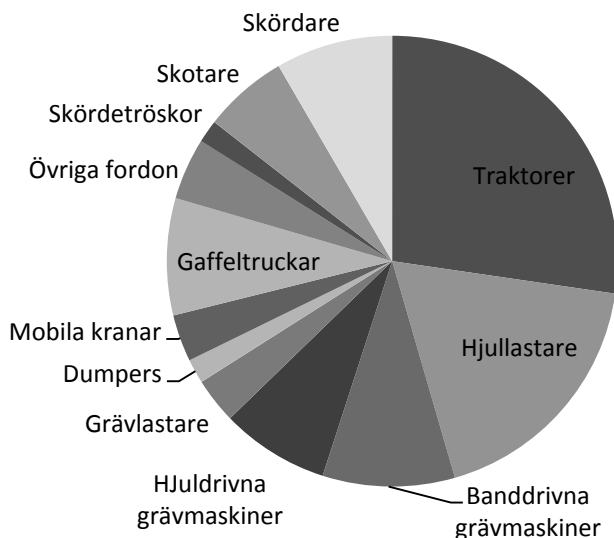
2.3.1. Europa

Utsläppen från mobila maskiner står för en betydande andel av de totala utsläppen av NO_x och partiklar. Bland SNAPE97-sektorerna som används för att redovisa utsläpp är det den fjärde största utsläppskällan för NO_x och den femte största för partiklar (PM₁₀). Inom EU15-länderna släppte fordonen 2005 ut 1 492 000 ton NO_x och 133 000 ton PM₁₀, vilket motsvarar 16 respektive 9 % av de totala utsläppen. Utsläppen av NO_x förväntas minska med 32 % och partikelutsläppen med 57 % mellan 2005 och 2020. Den största utsläppskällan är jordbruksmaskiner som står för 43 % av utsläppen från sektorn (Krasenbrink och Dobranskyte-Niskota, 2009).

Avseende antalet fordonen dominerar grävmaskinerna bland de mobila maskinerna (i det aktuella fallet exkluderande traktorer). De står för omkring 60 % av de sålda fordon, en andel som är ökande. I övrigt står hjullastare för något över 10 % (minskande), skid lastare och grävlastare står bägge för något under 10 % av alla sålda mobila maskiner. Totalt säljs omkring 150 000 mobila maskiner varje år (Tabei, 2008).

2.3.2. Sverige

I Sverige omfattar sektorn omkring 290 000 maskiner och släpper årligen ut omkring 2 800 000 ton CO₂, 6 000 ton CO, 2 200 ton HC, 23 000 ton NO_x, 1 000 ton PM och 1,8 ton SO_x samt förbrukar omkring 880 000 ton bränsle per år (Lindgren, 2007).



Figur 1. CO₂-utsläppens fördelning per fordonstyp i Sverige 2006

Som framgår av figur 1 är traktorer, hjullastare och grävmaskiner de största CO₂-utsläppskällorna bland de mobila maskinerna (Wetterberg et al., 2007). Trenderna för övriga föroreningar är överlag liknande, men kan variera något beroende på fordonspopulationens ålderssammansättning. Detta eftersom utsläppskraven för föroreningarna blivit betydligt tuffare sedan 1999, medans förändringen i motorernas verkningsgrad och därmed CO₂-utsläpp varit betydligt mindre.

2.4. Viktiga skillnader jämfört med vägfordon

Mobila maskiner och vägfordon skiljer sig åt i många avseenden vad gäller syfte, användning och sammansättning. Detta avsnitt presenterar några av de viktigaste skillnaderna. En djupare, mer specifik diskussion återfinns i kapitel 4.

2.4.1. *Ekonomi*

Entreprenörer får betalt för att utföra ett arbete med fordonen, till skillnad från personbilar där en stor andel av användningen kan ses som en form av konsumtion. Därför blir produktivitet en minst lika viktig faktor som bränsleekonomi vid val av fordon vid köp.

Mobila maskiner är oftast betydligt dyrare att köpa än bilar, men som med andra variabler är spridningen är stor. Eftersom fordonen inte används för kundkontakt i samma grad som bilar finns mindre möjligheter för grön PR jämfört med vägfordon (Finpro, 2010).

2.4.2. *Design*

Utbredd användning av larvband

De tunga fordonsvikterna ökar behovet av att sprida fordonets vikt för att minska trycket på marken (och därmed göra det lättare för tyngre fordon att färdas på mjukt underlag). Därför är det intressant att använda larvband med dess betydligt större kontaktyta med marken. För de typer av mobila maskiner där grepp (traktion) är viktigast är det därför vanligt att använda larvband istället för hjul.

Många aktuatorer

I ett vägfordon används kraften som motorn producerar för att accelerera fordonet. I mobila maskiner används kraften till åtminstone ytterligare ett ändamål utöver att accelerera fordonet. Till exempel finns i en vanlig grävmaskin sex aktuatorer (Lin et al, 2010).

Stor variation

Många mobila maskiner spåra sina anor tillbaka till (jordbruks)traktorer. Traktorerna försågs med olika typer av utrustning, varav en del utvecklats till att bli nya typer av maskiner. Processen att lägga till/byta ut komponenter med andra är inte på något sätt färdiga och för många typer av mobila maskiner är det mer eller mindre vanligt att byta ut objekt som skopor mot andra som är bättre lämpade för den specifika uppgiften, som grävmaskinen med grep i figur 2 (Contractors Plant & Equipment, 2011c).



2.4.3. Användning

Traktion viktigare än hastighet

Syftet med mobila maskiner är att utföra mekaniskt arbete snarare än transport.

Detta görs oftast mest effektivt genom att hantera stora massor/volymer samtidigt. Det är därför viktigare att fordonet har hög traktion än hög topphastighet då denna ändå kommer att ta i sammanhanget lång tid att nå (Komatsu, 2006).

Betydande effektvariationer

En bil på en motorväg har en nära konstant hastighet. Vridmoment och varvtal förändras bara långsamt. En bil i en stad å andra sidan upplever mycket större förändringar när den närmar sig och lämnar korsningar. Användningen av de flesta mobila maskiner liknar i detta avseende en stadsbil. De utför ofta upprepade handlingar som tar i storleksordningen tio sekunder och som innehåller stora effektvariationer (Ochiai & Ryu, 2008).

Många frihetsgrader vid användning

Det sätt ett vägfordon färdas på beror mest på ruten och inte på förarens skicklighet. När det gäller att gräva ett dike eller flytta en last av sand är operatörens färdigheter viktigare.

Å ena sidan är styrningen över en kortare tidsintervall ofta ganska förutsägbara. En skicklig lastare som fyller en dumper med sand från en sandhög kommer att göra det på ett förutsägbart sätt. Över ett längre tidsintervall är användningen mer slumpmässig: efter att ha fyllt en dumper varierar det varifrån föraren tar material för att börja fylla nästa last.

2.5. Grävmaskiner

Grävmaskiner används i alla typer av områden från städer till skogar och gruvor. De viktigaste användningsområdena är grävning, lyft/transport av tunga föremål korta sträckor samt vissa rivningsarbeten. Det kan röra sig om allt ifrån att gräva diken till att göra i ordning för husgrunder. Genom att ersätta skopan med andra typer av verktyg är det möjligt att använda den för ett brett spektrum av uppgifter som avfallshantering, pålning etc.

Maskinstorlekar kan variera från upp till 5 ton för kompakta minigrävare, till upp till 30 ton för konventionella grävmaskiner och upp till 1 000 ton för olika grävmaskiner som används i gruvor.

2.5.1. Aktuatorer/sammansättning

Grävmaskiner består av tre grundläggande delar: underrede, hus och arm. Underredet används för att transportera fordonet. Det innehåller hjul/band och transportdrivlinan.

Huset innehåller motvikt, hytt samt den del av drivlinan som används för att driva armen (motor, bränsletank, hydrauloljetank etc.). Den kan rotera helt (360°) runt underredet. Eftersom huset innehåller motvikten till armen (och innehållet i skopan) så roterar det i allmänhet med armen för att hålla fordonet balanserat. Rotationen av huset drivs vanligtvis med hydraulmotorer (Komatsu, 2008).

Armen består av bom, sticka och skopa. Mindre grävmaskiner kan ha en självständig bomsväng, vilken gör att armen kan röra sig horisontellt utan att huset roterar. Komponenterna styrs hydrauliskt via en gemensam hydraulisk ackumulator. Det har fördelen av att det är lättare att leverera tillräckligt med effekt. Samtidigt medför den gemensamma ackumulatören att den är svårare att kontrollera, vilket gör att pumpen regelbundet producerar ett energiöverskott som går förlorat som värme. Effektiviteten i hela systemet kan därför vara så låg som 20 % (Kagoshima et al., 2007). I konventionella grävmaskiner används inte den kinetiska och potentiella energin i bom, sticka och skopa, utan denna går förlorade i form av värme (Kagoshima et al, 2007).

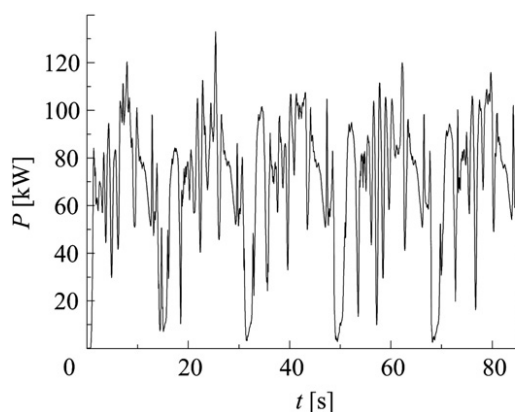
2.5.2. Användning

Eftersom grävmaskiner används för en lång rad ändamål är det svårt att ge en generell beskrivning av hur mycket de i snitt används för olika aktiviteter. Tabell 2 visar en cykelsammansättning som används av en stor tillverkare (Kagoshima et al, 2007).

En typisk grävmaskin cykel består av fyra faser: grävning, sväng, tömning och retur. Effektförbrukningen uppvisar stora variationer under denna cykel, som framgår av figur 3, med en hög konsumtion under grävningsfasen. (Lin et al. 2010). Cykellängden tenderar att vara i storleksordningen 10 sekunder; ibland något mindre, ibland upp till 30 sekunder (Xiao et al., 2008; Ochiai och Ryu, 2008; Komatsu, 2011b).

Tabell 2. Grävmaskinsanvändning

Operation	Cykellängd	Andel
Fyllning	45 s	18 %
Tömning	35 s	8 %
Utjämning	50 s	8 %
Lyftning	80 s	10 %
Materialhantering	75 s	7 %
Förflyttning	20 s	3 %
Tomgång	120 s	23 %
Stopp	80 s	23 %



Figur 3. Effektkurva för en grävmaskin under en typisk arbetscykel.

Hur energin i ett fordon utnyttjas beror mycket på användningen. Över 60 % av den till fordonet tillförda energin går förlorad på grund av förbränningsmotorns begränsade termiska verkningsgrad. En del går även förlorad i samband med tomgång, vilken kan minskas genom bra start/stopp-lösningar.

Av den mekaniska energi som motorn levererar används omkring 1/3 för nyttigt arbete, medan nästan lika mycket går förlorat i hydraulik, ungefär 1/6 behövs för att driva hjälputrustning och 1/6 går förlorad som icke återvunnen kinetisk eller potentiell energi (Inoue, 2008).

2.6. Bulldozer

En bulldozer har ett blad anslutet på fronten för att putta material (sand, grus etc.), plana ut mark och för rivning. Bulldozers använder ofta larvband, som i figur 4, p.g.a. behovet av att kunna hantera massor som är tunga i förhållande till fordonet. Formen på bladet varierar beroende på tillämpning, vanliga former är rak (som används för sortering och för att jämna ut material), U (används för att flytta material) och kombination (används för mindre tungt arbete än U-bladet) (Korane, 2009).



Figur 4 Bulldozer i arbete

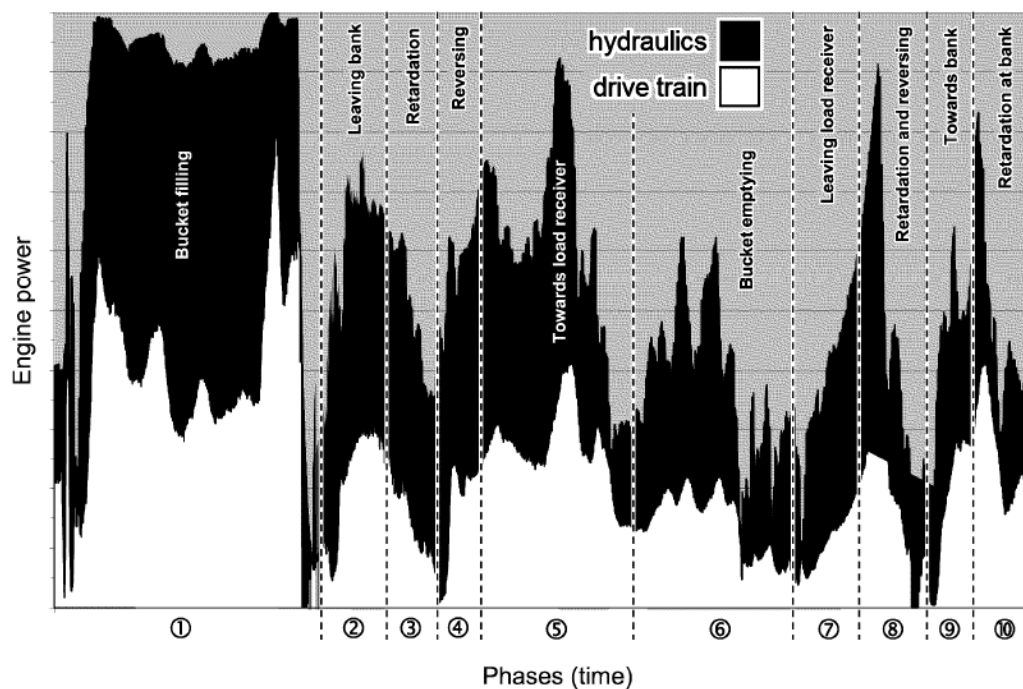
2.7. Hjullastare

Hjullastaren är en utveckling av traktorn som vanligen har en skopa monterad fram på två bommar. Maskinen används vanligtvis för att skyffla upp material (ofta från högar) och flytta det en relativt kort sträcka. Den används även för olika former av underhåll som t.ex. väggkantsslätter och snöröjning. Beroende på typ av operation kan skopan ersättas med andra verktyg såsom olika typer av gafflar för material- eller timmerhantering. Om lastaren har en grävskopa baktill räknas den som grävlastare. Lastare har två manöverdon för skopan: lyft och tilt. Tillsammans bildar de en så kallad Z-länk. Lyftcylindern används under hela cykeln för att ändra höjden på skopan, medan tiltcylindern används när skopan fylls eller töms (Cobo et al., 1998).

Vanliga arbetsoperationer är (Bohman, 2006):

- **Kort cykel.** Material tas från en hög för att fylla en dumper. Vanligtvis är dumpern positionerad så att avståndet lastaren måste köra minimeras.
- **Load and carry.** Liknar den korta cykeln, men platsen där skopan töms ligger på ett betydande avstånd från där den fylls.
- **Virkeshantering,** Inte lika repetitivt, mycket transport samt arbete för att hantera virket

Figur 5 visar energiförbrukningen under en typisk kort cykel (Filla, 2005). Som framgår är effektfördelningen mellan drivlinan och hydrauliken jämn och mycket av energin används vid påfyllning av skopan. Fordonshastigheten överstiger sällan 20 km/h vid vanlig körning (Grammatico et al., 2010).



Figur 5 Hjullastararbetscykel

2.8. Grävlastare

Grävlastare består av en lastskopa fram och en grävskopa bak. Last- och grävskoporna är kopplade till fordonet på samma sätt som för hjullastare respektive grävmaskiner. Fordonen är ofta relativt små. De används för samma uppgifter som grävmaskiner och lastare: grävning, lätta transporter, rivning m.m. Deras arbetskapacitet är mindre, men i gengäld är de mer flexibla. Hög körhastighet är viktigare än för hjullastare och grävmaskiner. Detta då det är viktigt för flexibiliteten att de inte bara kan arbeta med olika uppgifter utan också över ett större område. Precis som med andra mobila maskiner kan skoporna ersättas med andra verktyg såsom brytare, gripar, borrar m.m.

2.9. Gaffeltruckar

Gaffeltruckar används för att transportera material korta sträckor, som i figur 6. De skiljer sig från andra mobila maskiner i att helt elektriska drivlinor har använts i över ett sekel. De utnyttjar redan regenererad energi ifrån inbromsningar, men inte ifrån sänkningar av gaffelaggregatet. Elfordon dominerar de lättare segmenten (upp till omkring tre ton), medan dieselfordon hanterar tyngre laster. De användas i allmänhet inomhus och inom särskilda sektorer (t.ex. inom livsmedels-handeln), där elfordon är det enda tillåtna truckalternativet (Gaines et al., 2008).



Figur 6 Gaffeltruck i användning

Upp till 30 % av driftstiden kan bestå av tomgång, medan mycket av energianvändningen består av relativt korta perioder med mycket accelerationer/decellerationer och

höjningar/sänkningar av material (Linde Material Handling, 2008). Ytterligare information om elektriska truckar finns i avsnitt 5.7.

2.10. Traktorer

Traktorer kan användas för ett stort antal aktiviteter, främst inom jordbruket, detta tack vare möjligheten att koppla till många olika redskap. Effekt kan överföras till redskap mekaniskt, hydrauliskt och i viss mån elektriskt.

Det är vanligt att många komponenter i en traktor är mekaniskt kopplad till motorn, vilket gör att deras effektförbrukning är kopplad till motorns. Typisk maxeffektanvändning för olika enheter för en 125 kW traktor är: motorfläkt 15 kW, kompressor (luftkonditionering) 5 kW, kompressor (motor) 1,1 kW och hydraulsystem 20 kW (Sjzek, 2007).

Tidiga traktorer använde mekanisk transmission. För att kunna hantera stora hastighetsvariationer kom senare hydrauliska kraftöverföringssystem att införas (Prankl et al., 2010). Momentomvandlare började användas på 1960-talet, power-shift under slutet av 1970-talet och 1980-talet. I slutet av 1990, med början 1995 kom steglös transmission (Farkas et al., 2003; Cavalchini, 2010). Effektiviteten i överföringen (till hjulen) har varit föremål för ett antal uppsatser. Ryu et al. (2003) uppmätte förlusterna till 14-44 %, medan Reiter rapporterade värden på 10-40 % och Molari och Sedoni (2008) värden på upp till 25 %. Molari och Sedoni (2008) studerade överföring av en 140 kW traktor. De fann att förlusterna var störst i de högsta växlarna. Av förlusterna var 52 % förknippade med passivt motstånd och friktion i överföringen.

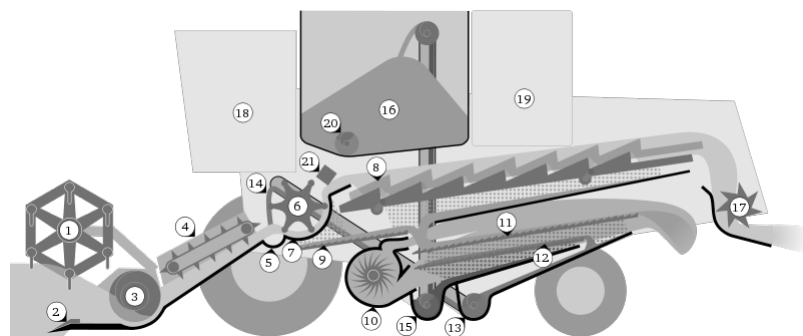
Effekt kan överföras till redskap med olika metoder: mekaniskt (kraftuttag och trepunktslyft), hydrauliskt (hydraulcylinder) och i begränsad utsträckning elektriskt. I redskapen tillkommer överförings- och omvandlingsförluster. Som ett exempel rapporterade tillverkaren Rauch förluster på 50-85 % med hydrauliska, 30-55 % med mekaniska och 30-35 % med elektriska system för deras gödnings-spridare (Rauch, 2010).

2.11. Skördetröskor och fälthackar

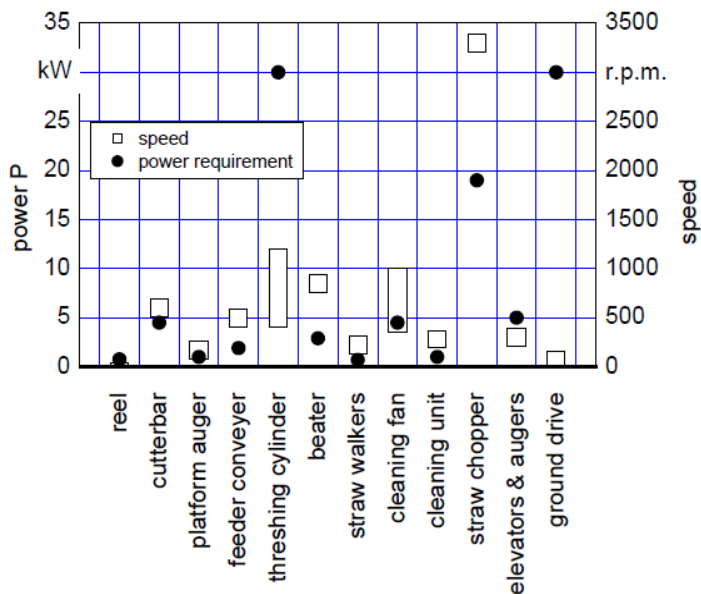
Skördetröskor består, som framgår av figur 7, av en stor mängd komponenter som avskiljer spannmålets olika delar så att sädeskornen och halmen kan användas separat.

Det mesta av energin i en skördetröska

används av de olika trummorna (47 %) och andra delar för bearbetning av spannmålet, endast 16 % används för att driva fordonet framåt (Gallmeier, 2009). De olika delarna kräver väsentligt olika vridmoment (16-3 000 Nm) och varvtal (180-3 200 rpm) (Gallmeier, 2009). De olika komponenternas effektbehov varierar beroende på spannmålskvalitet och flöde, vilket gör transmissionen till en mycket viktig del av fordonet. Remdrift används ofta (Gallmeier, 2009). Typiska värden på effektbehov framgår i figur 8 (Bernhard och Schlotter 2003). Fälthackar används för att hacka främst vall för att underlätta lagring. De kan vara både självdrivna och dragna av en traktor.



Figur 7 Komponenter i en skördetröska (illustration: Hans Wasthuber)



Figur 8 Effekt och varvtal för olika komponenter i en skördetröska

2.12. Skotare

En skotare används, som i figur 9, för att transportera och hantera sågade stockar och rör sig normalt med en hastighet på omkring fem kilometer i timmen, med en genomsnittlig energianvändning på 43,6 kW vid aktivt arbete. Under en typisk skotervända går 38 % av tiden åt för lastning, 13 % för körning under lastning, 15 % för lastkörning, 12 % för lossning, 4 % för avläggningskörning, 7 % går åt vid störningar/raster och 11 % är tomgång (Carlander et al., 2009). Fordonen som används för att ta ut stockarna delas i ett antal klasser baserat på vikten de transporterar:



Figur 9 Skotare i arbete

- 250-500 kg, transporteras m.h.a. fyrhjulingar
 - ~ 4 000 kg, traktorer
 - < 8 000 kg, skotare (små)
 - 12-14 000 kg, skotare (mellan)
 - < 20 000 kg, skotare (stora)
- } Används av specialister

Den svenska marknaden för skotare är på omkring 300 maskiner per år, medan världsmarknaden är på omkring 1 500 maskiner (Wetterberg et al., 2007; Advantage Environment, 2009).

3. HYBRIDISERINGSALTERNATIV

Flödet av energi i traditionellt drivna fordon är relativt enkelt: en förbränningsmotor producerar mekanisk kraft som överförs till den plats där den användas, t.ex. hjulen. I ett hybridfordon används fler alternativ för produktion, överföring och lagring av energi och det är möjligt att ha energiflöden i båda riktningarna mellan energilagring och energianvändning. Syftet med detta kapitel är att introducera de vanligaste alternativen, medan olika maskintypers specifika utformning täcks i mer detalj i senare kapitel.

Ett fordon är ett komplext system med ett brett sortiment av komponenter. I detta kapitel beskrivs existerande alternativ för energilagring, -omvandling och -överföring i hybriddrivlinor. Syftet med drivlinan är att omvandla den energi som levereras till fordonet, i form av bränsle eller elektrisk energi, till mekaniskt arbete.

3.1. Metoder att öka drivlinans effektivitet

Energi kan gå förlorad antingen i drivlinan eller genom en avsiktlig minskning av fordonets energi, t.ex. vid (icke-regenerativ) inbromsning. Den totala verkningsgraden (η_v) är därför beroende av drivlinans effektivitet (η_{pt}) samt hur mycket av den energi som omvandlats (E_{co}) som går till spillo (E_w):

$$\eta_v = \eta_{pt} - \frac{E_w}{E_{co}}. \quad (3-1)$$

Drivlinans verkningsgrad bestäms av motorns (η_{pp}) och transmissionens (η_t) verkningsgrad:

$$\eta_{pt} = \eta_{pp}(\tau, \omega)\eta_t(\tau, \omega), \quad (3-2)$$

vilken beror på dessas vridmoment (τ) och varvtal (ω). Sambandet mellan vridmoment/varvtal och verkningsgrad kan vara komplext då det inte bara beror på själva motorn utan även dess hjälpsystem som t.ex. turbo som kan drivas mer eller mindre oberoende av själva motorn.

Då mobila maskiner ofta har flera aktuatorer är många kombinationer möjliga där en eller flera av komponenterna kan vara del av en hybriddrivna, medan resten drivs konventionellt. Dessutom används en del av den tillförda energin till andra ändamål är mekaniskt arbete, t.ex. för att driva elektronik i förarhytten.

3.1.1. Drivlineeffektivitet

Dieselektrisk drivlina (η_{pp})

Det kan gå att öka effektiviteten i drivlinan genom att lägga till en elmotor i serie efter dieselmotorn i en s.k. dieselektrisk drivlina. Detta beror på elmotorns höga verkningsgrad ($\eta_{pp} \sim 90\%$, jämfört med 30-40% för dieselmotorer) och det faktum att dieselmotorns effektivitet vid många laster är betydligt lägre än vid optimal belastning. Genom att kombinera förbränningsmotorn med en elmotor är det möjligt att begränsa användningen av förbränningsmotorn till ett fåtal vridmoments- och varvtalskombinationer, där den har hög verkningsgrad och låga utsläpp. För att en dieselektrisk drivlina ska öka effektiviteten krävs att dieselmotorns ökade effektivitet är större än de ökade omvandlingsförlusterna som följer av det ökade antalet energiomvandlingar:

$$\eta_{ice}(\tau_{optimal}, \omega_{optimal})\eta_t(\tau_{optimal}, \omega_{optimal}, \tau, \omega)\eta_{emg}(\tau, \omega) > \eta_{ice}(\tau, \omega), \quad (3-3)$$

där verkningsgraderna som avses är förbränningsmotorns (η_{ice}), transmissionens (η_t) och den elektriska motor/generatorns (η_{emg}). Detta är särskilt relevant för mobila maskiner som oftast verkar vid låga hastigheter.

Motoreffektivitet (η_{pp})

Om, å andra sidan, elmotorn är placerad parallellt med förbränningsmotorn kan den komplettera förbränningsmotorn, vilket gör att en mindre förbränningsmotor kan användas. Detta kallas motorstöd. Eftersom förbränningsmotorer tenderar att vara mest effektiva vid höga tryck (motsvarande höga temperaturer för vilka värmemaskiner enligt Carnots teorem är mest effektiva) är det en fördel om de är så små som möjligt eftersom de oftare kommer att arbeta vid höga tryck.

$$\eta_{pp}(\tau_{needed}, \omega) = \eta_{ice}(\tau_{optimal}, \omega) + \eta_{emg}(\tau_{needed} - \tau_{optimal}, \omega) \quad (3-4)$$

Minskade transmissionsförluster (η_t)

Elektriska system har lägre transmissionsförluster än mekaniska och hydrauliska system när hänsyn är tagen till både transmissionens verkningsgrad och deras flexibilitet (vilken möjliggör att andra komponenter, som motorer, kan användas optimalt).

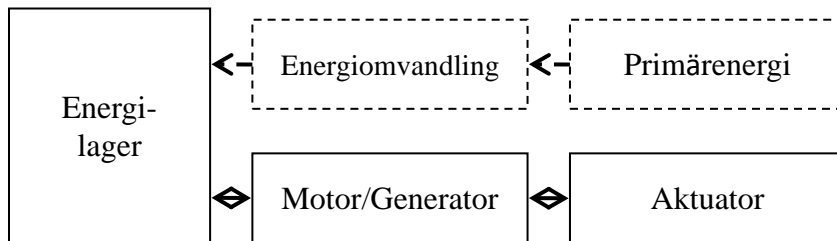
3.1.2. Minskad outnyttjad energi

För att minska den mängd energi som används, men inte utför nyttigt arbete, krävs att det går att lagra energi effektivt i fordonet. Om så är fallet går det att minska energianvändningen genom regenerering samt start/stopp-funktionalitet.

Regenerering

I många fall är det nödvändigt att minska den kinetiska och potentiella energin hos ett fordon eller en fordonskomponent. Inbromsning är ett typiskt exempel på den förra, medan sänkningen av en grävmaskinens arm ett exempel på det senare. I konventionella fordon tenderar detta att leda till en förlust av energi som annars kunde ha använts. Anledningen till detta är att en förbränningsmotor inte kan köras baklänges, d.v.s. använda den frigjorda energin för att skapa bränsle av avgaserna. Detta är dock möjligt med elektriska komponenter, då en elmotor även kan fungera som elgenerator, som framgår av figur 10.

För regenerering är det viktigt att de ingående komponenterna (för lagring av elenergi m.m.) har en tillräckligt hög effektkapacitet, vilken matchar den effekt med vilken fordonets eller fordonskomponentens kinetiska eller potentiella energi minskar. Energitätheten är däremot i allmänhet av mindre betydelse, eftersom energin bara behöver lagras en kortare tid. Som alltid bör processen vara så effektiv som möjligt.



Figur 10 Energiflöden i hybridfordon

Den återvinningsbara effekten (P_{re}) bestäms av generatorns effekt (P_{emg}) och verkningsgrad (η_{emg}):

$$P_{re} = P_{emg}(\tau, \omega)\eta_{emg}(\tau, \omega). \quad (3-5)$$

Behovet av elektrisk lagringskapacitet (E_{re}) är:

$$E_{re} = \int_{t_{j,start}}^{t_{j,end}} P_{emg}(\tau, \omega)\eta_{emg}(\tau, \omega)dt \quad (3-6)$$

där $t_{j,start}$ och $t_{j,end}$ är tidpunkterna för starten och slutet på den arbetsoperation under vilken energi regenereras. I allmänhet är det inte möjligt att helt fylla eller tömma lagringsmediet utan att försämra dess framtida kapacitet. Den användbara andelen av mediets kapacitet (q_{usable}) är:

$$q_{usable} = \frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{100\%} \quad (3-7)$$

, där SOC_{max} och SOC_{min} är batteriets maximala och minimala laddning. Behovet av nominell kapacitet (E_{st}) är därför:

$$E_{st} = \frac{E_{re}}{Q_{usable}}. \quad (3-8)$$

Start/stopp

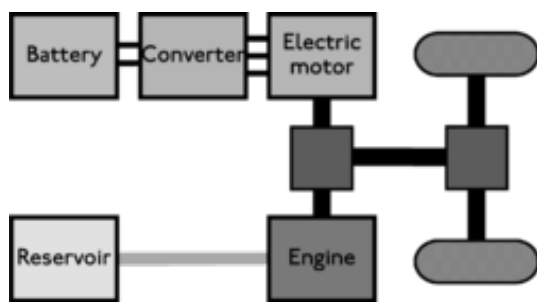
Mobila maskiner används vanligen ojämnt. Eftersom det tar tid för förbränningsmotorer att nå operativ effekt efter att ha varit avstängda får de ofta gå på tomgång. När de gör så förbrukar de bränsle utan att utföra något nyttigt arbete. Genom att stänga av förbränningsmotorn när den inte behövs och istället använda elmotorn för den inledande fasen när fordonet används igen förbrukas mindre bränsle utan att fordonets prestanda minskar. Denna funktion kallas för start/stopp.

Det bör noteras att samtliga dieselmotorer behöver (el)startmotorer, då bränsleblandningen måste komprimeras för att antändas. I en hybrid är dock elmotorn betydligt större än en vanlig startmotor.

3.2. Vanliga drivlinekonfigurationer

Antalet sätt att kombinera ihop en drivlina är nästan oändligt. Dock bygger de flesta på de tre grundläggande mönster beskrivna i detta avsnitt: parallell, seriell och power-split. För att underlätta beskrivningen antas i alla fallen energin användas för att driva hjulen.

3.2.1. Parallell



Figur 11 Parallell konfiguration

I ett parallellt system, visat i figur 11, är de konventionella och de elektriska delsystemen separerade fram till transmissionen.

Systemet har jämfört med andra hybridkonfiguration få komponenter. Det är därför lättare, kräver mindre underhåll och har mindre omvandlingsförluster.

Växellådan måste dock kunna matcha förbrännings- och elmotorns varvtal. Detta sätter begränsningar på växellådans design. Det

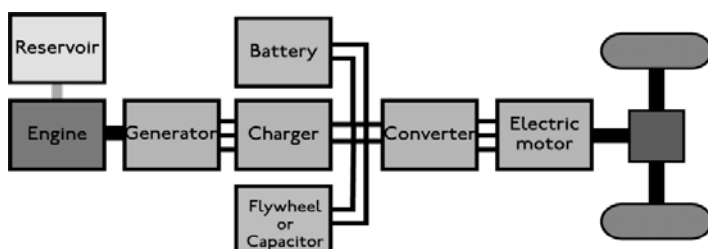
begränsar också hur elmotorn och förbränningsmotorn kan användas eftersom de alltid måste leverera samma hastighet. Möjlighet till effektiv användning av motorn genom att dra nytta av skillnaderna i form på de olika motorernas vridmoments/varvtalskurvor för de olika motorerna minskar därför (se avsnitt 3.5).

Eftersom systemet är parallellt är effekten som produceras (P_{tot}) summan av den från el- (P_{emg}) och förbränningsmotorn (P_{en}), med hänsyn tagen till effektiviteten i överföringen (η_t):

$$P_{tot}(\tau_{ac}, \omega_{ac}) = (P_{emg}(\tau_{pt}, \omega_{pt}) + P_{en}(\tau_{pt}, \omega_{pt})) \eta_t(\omega_{ac}/\omega_{pt}) \quad (3.9)$$

Storleken på förbränningsmotorn kan därför minskas jämfört med ett konventionellt fordon eller annan hybrid design.

3.2.2. Serie



Figur 12 Seriekonfiguration

I en seriekonfiguration, som i figur 12 drivs fordonet helt med en elmotor. Den får sin energi från lagringsmediet (ett batteri eller en kondensator) som i sin tur laddats av en

förbränningsmotor kopplad till en generator.

Antalet komponenter ökar jämfört med parallellkonfigurationen, liksom fordonets vikt och kostnad. På grund av det ökade antalet komponenter som den tillförda energin måste passera ökar även omvandlingsförlusterna, den totala verkningsgraden η_{tot} bestäms av verkningsgraden på de ingående komponenterna; förbränningsmotorn (η_{en}), elgeneratoren (η_{emg}), lagringsmediet ($\eta_{storage}$), växelriktaren ($\eta_{converter}$), elmotorn (η_{emg}) och transmissionen ($\eta_{t,e}$):

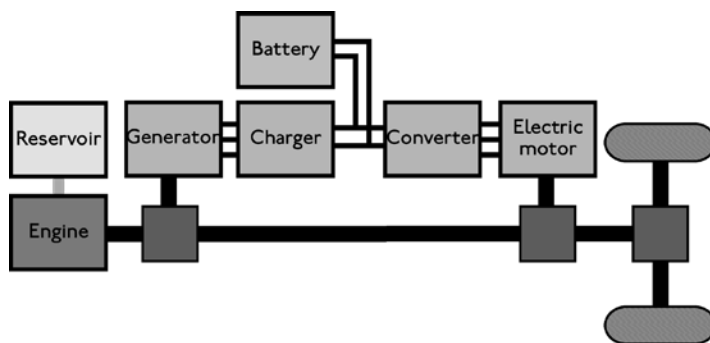
$$\eta_{tot} = \eta_{en}\eta_{emg}\eta_{storage}\eta_{converter}\eta_{emg}\eta_{t,e}. \quad (3.10)$$

Systemets stora fördel är att det ökande antalet komponenter gör systemet mer flexibelt. Eftersom el- och förbränningsmotorn kan fungera oberoende av varandra kan de arbeta vid de hastigheter och vridmoment där de har högst verkningsgrad. Av detta skäl används seriekonfiguration på tunga maskiner, t.ex. lokomotiv, fartyg och tunga mobila maskiner. Det är också lättare att designa transmissionen, då motorernas hastighet inte längre behöver matchas av transmissionen.

$$P = \max(P_{emg}(\tau, \omega), P_{en}(\tau, \omega)) \quad (3.11)$$

En nackdel är att prestandan är begränsad till att den elektriska motorn, som fungerar sämre vid högre hastigheter, vilket beskrivs i avsnitt 3.5.2.

3.2.3. Power-split



Figur 13 Power-split konfiguration

Ett sätt att minska omvandlingsförlusterna, men ändå dra nytta av flexibiliteten i seriekonfigurationen är att använda power-split, visad i figur 13. I detta fall kan effekten som förbränningsmotorn levererar antingen hanteras av den konventionella transmissionen eller ledas in i den elektriska delen av drivlinan. När strömmen leds över den elektriska delen återkommer samma frågeställningar som hanterats ovan. Då konfigurationen medför dubbla växellådor ökar konverteringsförlusterna något.

3.3. Energiöverföring

Energi kan levereras till ett fordon i två former, som (flytande eller gasformigt) bränsle eller som elektricitet. Om en del av energin levereras som el anses fordonet vara en "plug-in hybrid", om ingen energi kommer som el (och därmed de elektriska delarna av drivlinan endast används för att göra drivlinan mer effektiv) räknas det som en "hybrid".

Behovet av snabb energiöverföring varierar med omständigheterna. Om maskinen används dygnet runt (t.ex. en gaffeltruck på en distributionscentral) är det viktigt att den kan laddas snabbt. Om den å andra sidan bara används för ett skift om dagen kan den laddas under de resterande 16 timmarna.

3.3.1. *Bränsle*

Att tanka ett fordon går snabbt och sker med mycket små energiförluster. En typisk bränslepump kan leverera bränsle med en effekt på flera MW, då det kan överföra i storleksordningen 100 liter bränsle (vilket innehåller cirka 1 000 kWh) på några minuter. Tekniken är välbeprövad (Bechtold, 1997).

3.3.2. *Laddning*

Ett batteri kan i allmänhet laddas med en hastighet proportionell mot den med vilken den kan leverera el (d.v.s. urladdas). I vilken takt ett fordon kan laddas beror inte bara på den tekniska kapaciteten hos batterierna, den är också begränsad av tillgången av laddare med en given kapacitet. För att ett batteri ska tolerera snabbaddningar är det viktigt att laddningen är effektiv, så att så lite som möjligt av den tillförda energin omvandlas till spillvärme eftersom förluster inte bara minskar effektiviteten utan också laddningseffekten som kan utnyttjas utan att batteriet värms upp för mycket. Maximal laddningseffekt varierar mellan batterier. Fosfatlitiumbatterier har en effektivitet på 95 % och kan laddas till 90 % kapacitet på en timme (Nguyen, 2005).

Det bör noteras att kapaciteten för ett batteri är beroende av den hastighet med vilken det laddats. Med långsam laddning öka kapaciteten. Snabbare laddning är i allmänhet hårdare på batterier och orsakar större ohmska förluster.

Laddning av elfordon är fortfarande relativt nytt och arbete pågår fortfarande med att ta fram standarder. Ett antal konkurrerande standarder finns för snabbaddning, vilka visas i tabell 3. Deras socklar varierar i form och sammansättning och är därför inte kompatibla med varandra. Med undantag för den avvecklade SAE J1773 standarden använder de alla konduktiv laddning (d.v.s. genom kontakt).

För att säkerställa en optimal laddning för alla typer av batterier sker ett informationsutbyte mellan fordonet och laddaren så att laddaren ges rätt parametrar för optimal laddning som spänning, batterikapacitet etc. På grund av de höga spänningarna och effekterna är det viktigt att säkerställa att processen är säker. Detta inkluderar att se till att laddning bara sker när laddaren är korrekt ansluten och att isoleringen är rätt dimensionerad och fungerar under alla förhållanden (inklusive vid regn).

Tabell 3 Laddstandarder

Namn	Spänning, V_{ch} (max V)	Ström (max A)	Effekt P_{ch} (max kW)	Faser	Geografisk spridning	Ung. kostnad, C_{ch} (SEK)	Införd
SAE J1772	1 120	16	16.8	1	Nord-amerika		2001/2009
	2 240	32/80		Split			
CHAdeMO	500	125	62.5	1 DC	Japan+	120 000	2010
VDE-AR-E 2623-2-2 ¹	400	63	43.5	3	Europa		2009

¹ Även kallad IEC-62196-2/2.0

En analys av ekonomin för laddning och föreslagna affärsmodeller kan hittas i Grundfelt et al. (2009). Ett alternativ till att ladda batterierna i bilen är att ha ett överskott på batterier och byta urladdade batterier mot laddade när det behövs till. Detta förfarande är vanligt för elektriska gaffeltruckar. För vägtrafik utvecklar företaget Better Place ett system för batteribyte. Fördelen med detta förfarande är att det minskar den tid som behövs för att ladda fordonet. Dess nackdelar är att det är dyrare (eftersom fler batterier behövs) och att vikten på batterierna gör operationen komplicerad, men det kan hävdas att eftersom uppladdning är snabbare kan storleken på batterierna minskas. Ytterligare batterierna måste placeras så att de lätt kan bytas ut och utrustning för byte måste vara lätt tillgänglig. Om batterierna används i fordon från olika tillverkare eller i fordon som tillhör olika företag tillkommer svårigheten att säkerställa att batterierna används på ett av alla parter ansett korrekt sätt.

3.4. Energilagring

I en icke-plugin hybrid är syftet med ellagring att lagra regenererad energi. En ökad storlek på lagret gör det möjligt att återvinna mer regenererad energi, eftersom en större variation i laddningstillståndet kan tillåtas med längre perioder av nettoladdning eller nettourladdning. Det möjliggör en mer optimal användning av förbränningsmotorn som kan verka på färre (mer optimala) varvtal/vridmomentpunkter p.g.a. att de längre perioderna av nettoladdning/urladdning minskar behovet av att byta arbetspunkt.

Flytande bränsle (fossila eller förnybara) har en energitäthet på omkring 10 kWh/kg, vilket är tillräckligt högt för att storleken på bränsletanken inte ska vara någon begränsande faktor för markfordon. De flesta alternativen för lagring av elektrisk energi har betydligt lägre energitäthet. För att undvika ökad vikt (och därmed ökat rullmotstånd vilket ökar bränsleförbrukningen) måste energilagringen ha en hög energitäthet. Vidare måste den kunna ta emot och leverera energi med tillräcklig effekt så att så mycket av energin som skulle kunna regenereras också gör det. För att göra hybridfordon ekonomiska får produktionskostnaderna för lagringsmediet inte vara för höga och livslängden på komponenten måste vara tillräckligt lång. Dessutom får det inte självurladda i betydande omfattning, då det minskar drivlinans effektivitet.

De främsta alternativen att lagra energi i hybridarbetsmaskiner är superkondensatorer och batterier. De har olika styrkor och svagheter, beskrivna i tabell 4 och i följande avsnitt (Doucette och McCulloch, 2011). Andra alternativ är svänghjul och hydrauliska ackumulatorer.

Tabell 4 Alternativ för att lagra energi i fordon

Egenskap\Lagringsmedium	Batteri (Li-Ion)	Superkondensator	Svänghjul
Energitäthet (Wh/kg)	108	5.62	10
Effektthet (kW/kg)	3,3	4,3	4
Kostnad (\$/kW)	33-66	13- 51	42-75
Kostnad (\$/Wh)	1 000 – 2 000	10 000-39 000	17-30 000
Livslängd (cykler) (Juda, 2006)	~ 1 000	>5 * 10 ⁵	Lång

3.4.1. Hydrauliska ackumulatorer

Energien i hydrauliska ackumulatorer lagras genom att hålla hydraulvätska vid övertryck. Metoderna för att skapa detta tryck varierar, men fjädrar och komprimerad gas tillhör de vanligaste. Hydrauliska ackumulatorer kan leverera mycket höga effekter, beroende på typ normalt 10-100 kW/kg, medan energitätheten är mycket låg, omkring 1 Wh/kg (Miller, 2007). För att öka deras användning i mobila applikationer pågår forskning för att öka energitätheten till minst 30 Wh/kg (Pedchenko och Barth, 2009).

3.4.2. *Bränsleceller*

Bränsleceller erbjuder en intressant kompromiss mellan den höga effektiviteten och låga energitätheten hos batterielektriska drivlinor och den låga verkningsgraden och höga energitätheten hos konventionella drivlinor.

Bränslecellstekniken är dock mindre mogen än batteritekniken och kostnaderna betydligt högre (Doucette och McCulloch, 2011). Även om bränsleceller sannolikt kommer att spela en viktig roll i framtiden är det osannolikt att den kommer att uppnå en sådan position inom den närmaste framtiden som beaktas i denna rapport. Ett undantag är för gaffeltruckar där bränsleceller redan förekommer.

3.4.3. *Batterier*

Batterier kan lagra energi billigare än superkondensatorer och med högre effektivitet. De har dock begränsad livslängd och lägre effekttäthet. De kombineras därför ofta med superkondensatorer som har längre livslängd och effekttäthet, men är mindre bra på att lagra energi. Intensiv forskning pågår för att utveckla batterier med ökad kapacitet avseende bl.a. effekt- och energitäthet samt minska åldrandet. En enskild cell har en spänning på några volt. De är därför seriekopplade för att uppnå tillräckligt hög total spänning.

Icke litiumbaserade batterier

De vanligaste batterierna som inte är baserade på litiumjoner är bly- och NiMH-batterier. Blybatterier används som huvudsakligt energilagringssystem i elektriska truckar samt för elsystem i konventionella fordon. Batteritekniken är väl etablerad och batteriåtervinningsrutiner är i drift och effektiva (Frącz och Stachowic, 2010). Blybatteriernas huvudsakliga nackdel är deras låga energitäthet och att (explosiv) vätgas bildas vid elektrolys som kan ske vid felaktig behandling.

NiMH-batterier består av nickeloxhydroxid vid den positiva elektroden och väteabsorberande metallegeringar vid den negativa elektroden. Den vanligaste legeringen är AB₅, där A är en sällsynt jordartsmetallegering av lantan, cerium, neodym, praseodym och B är nickel, kobolt, mangan och/eller aluminium. De har högre energitäthet än blybatterier (men lägre än litiumjonbatterier), innehåller inga tungmetaller och är relativt säkra eftersom ingen fri vätgas produceras vid överladdning. De är dock förknippade med minneseffekter. NiMH-återvinning sker för närvarande (liksom för litiumjonbatterier) främst för att återvinna de mest värdefulla ingående metallerna och förekommer ännu inte i större utsträckning (Sullivan och Gaines, 2010).

Litiumjonbatterier

Litiumjonbatterier är intressanta på grund av deras höga energitäthet samt avsaknad av minneseffekter och självurladdning. Litiumjonbatterier har en katod som består av litiumoxider. De tre vanligaste katodalternativen är skiktad oxid (litiumkoboltoxid), poltanion (litiumjärnfosfat) eller spinell (litiummanganoxid). Beroende på det material som litium blandas med i katoden kan dess egenskaper kan variera kraftigt. Till exempel är det interna motståndet högt med kobolt, medan det är lågt med poltanion. Elektrolyten består av litiumjoner (LiPF₆, LiBF₄, LiClO₄) i ett organiskt lösningsmedel (karbonater). Vatten kan inte användas som elektrolyt eftersom litium skulle reagera med det och bilda LiOH och H₂. En fördel med poltanion är att ingen (brandfarlig) syrgas frigörs vid överladdning, vilket minskar risken för bränder (Johansson, 2010).

Som separator i litiumjonbatterier används en mikroporös film av polyolefiner. Perforation av separatorn kan leda till kortslutning, vilket leder till lokal överhettning. En sådan överhettning kan medföra ytterligare skador på separatorn, vilket medför en positiv återkoppling som ökar

skadan. Perforering kan orsakas av orenheter i cellerna eller av för snabb laddning (vilken leder till utfällning av litium som perforerar separator). Celler kan också bli direkt perforerade mekaniskt. Risken för mekanisk perforering kan minskas genom att använda cylindriska cellformer, då dessa har starkare yttre skal (Johansson, 2010).

Säkringar och positiva temperaturkoefficientsmotstånd används för att undvika kortslutning. (Johansson, 2010). Extern kontroll fungerar vanligtvis på packnivå snarare än på cellnivå. Därför är det möjligt att en defekt cell förblir upptäckt till dess problemet blivit av en sådan omfattning att det påverkar resultatet för hela packen. Som ett exempel kan en cell kan ha producerats med en lägre kapacitet än de andra cellerna, vilket medför att det blir fulladdat snabbare än de andra cellerna och därmed riskerar att bli överladdat (Chen et al., 2009).

För att inte i onödan förkorta batteriets livslängd, eller värre orsaka kortslutning som beskrivits ovan, är det viktigt att batteriet hålls vid en lämplig temperatur. Det är lättare att undvika för höga temperaturer om cellerna och dess förpackning har en större ytarea med stora temperaturgradienter (dvs. kalla icke-cell delar) och hög värmeledningsförmåga eftersom värmeflödet från batteriet då blir större i enlighet med Fouriers lag. Detta minskar dock den totala energitätheten. Det bör noteras att värmen inte bara leds konduktivt, strålning kan stå för så mycket som 50 % av värmetransporten.

Olika elektrolyter påverkas olika av temperaturen (Tikhonov och Koch, 2006). En typisk ledningsförmåga är på i storleksordningen 1 S/m vid 20 °C, något mindre vid 0 °C och omkring 30-40 % högre vid 40 °C (Wenige et al, 1998). Högre temperatur i cellen kan medföra kemiska reaktioner i cellen, vilket ytterligare ökar temperaturen och trycket i cellen. Detta kan leda till mekaniska fel och kortslutningar som beskrivits ovan. Säkerhetsventiler används för att minska risken för alltför höga tryck (Johansson, 2010). Ett problem är att de elektrolyter som används ofta har låg kokpunkt och flampunkt (Shukla och Prem Kumar, 2008), därför pågår forskning kring mindre farliga elektrolyter (Johansson, 2010).

3.4.4. *Superkondensatorer*

Superkondensatorer kan tillverkas av ett antal material där faktorer som kostnad, behov av hög effekt eller energitäthet påverkar valet. Den energi som kan lagras i en kondensator ges av ekvationen $E_{ca} = 0,5 CV^2$, där C är kapacitansen och V spänningen. Metalloxider har en hög kapacitans per massa (omkring 300-1 220 F/g), men är svåra att tillverka med stora ytareor. Kolmaterial som aktivt kol och kolnanorör har lägre kapacitans per gram (omkring 100 F/g), men kan mycket lättare produceras med mycket yta per massa. För att få en hög total kapacitans kombineras de ofta. Aktivt kol kan motstå en spänning på mellan 2,5 och 2,7 V över kondensatorn. Högre spänningar kan uppnås genom asymmetriska arrangemang, där den ena elektroden består av ett vanligt kondensatormaterial, medan den andra består av ett vanligt batterimaterial. Den förra ger hög effekttäthet, den senare hög energitäthet (Burke, 2007; Naoi och Simon, 2008).

Typiska superkondensatorer har en energitäthet på omkring 5 Wh/kg och en effekttäthet på några kW/kg, även om vissa undersökta materialet kan ha en energidensitet på över 35 Wh/kg (Naoi och Simon, 2008).

3.4.5. *Svänghjul*

Svänghjul används i konventionella fordon som en energibuffert så att den mekaniska energin som frigörs vid förbränning i förbränningsmotorn sprids ut över tiden för att undvika ett ryckigt beteende hos drivlinan. Det är dock möjligt att öka dess roll som energilagringsmedium i drivlinan. Svänghjul har en stor styrka i dess förmåga att ta emot och

leverera hög effekt. Eftersom energin lagras i kinetisk form är de dock känsliga för friktiva förluster. Med dagens teknik kan dessa förluster begränsas.

Ett svänghjul kan kopplas till resten av drivlinan på två sätt, antingen elektriskt eller mekaniskt. Om det kopplas elektriskt så drivs det av en elmotor/generator som är kopplad till den elektriska delen av drivlinan. Om det kopplas mekaniskt är det anslutet till den mekaniska delen av drivlinan. Om så är fallet måste det vara utformat tillsammans med andra komponenter (såsom växellåda och CVT) så att den mekaniska energin kan överföras energi- och kostnadseffektivt. Förlusterna är dock mindre än om en elektrisk anslutning används (City University London, 2011; Doucette och McCulloch, 2011).

3.5. Energiomvandlare

Två metoder används ofta för att omvandla energi till mekaniskt arbete: förbränningsmotorer och elmotorer. Dessa kan utöver att användas direkt även användas för att driva hydraulmotorer, som ofta används i mobila maskiner på grund av fördelarna med hydraulisk överföring under många omständigheter.

3.5.1. Förbränningsmotorer

Förbränningsmotorns verkningsgrad begränsas i teorin av Carnots teorem och praktiken även av risken för knockning, som avsevärt kan minska livslängden för en motor. I arbetsmaskiner används dieselmotorer. Dieselmotorer har högre termisk verkningsgrad än ottomotorer, eftersom de kan använda högre kompression. Under optimala förhållanden är verkningsgraden omkring 40 % för fordon i drift.

Jämfört med ottomotorer släpper dieselmotorer ut mer partiklar och kväveoxid, medan utsläppen av CO är lägre. De högre utsläppen av NO_x beror på den högre driftstemperaturen. Partikelutsläppen är högre på grund av en mer omfattande sotbildning orsakad av att förbränningen är icke-förblandad.

Transienta effekter

Om motorns driftförhållanden (varvtal eller vridmoment) ändras snabbt kan vissa komponenter ha svårigheter att verka optimalt. Detta gäller särskilt för turbon, som behöver tid att ändra sin egen rotationshastighet så att den kan leverera tillräckligt med luft vid tillräckligt högt tryck. Tiden det tar för turbon att komma upp i rätt rotationshastighet kallas turbolag. Vid turbolag är motorn antingen för rik (vid ökad effekt) eller för mager (vid minskad effekt) (Rakopoulos och Giakoumis, 2009).

Katalysatorer

Katalysatorer används för att minska utsläppen så att gällande utsläppskrav nås. SCR-katalysatorer injicerar en urealösning, vilken efter dissociation bildar ammoniak. Ammoniaken reagerar med NO_x och bildar ofarlig N₂. Mängden urea motsvarar ungefär 5 % av bränsleförbrukningen. Dieseloxidationskatalysatorer minskar utsläppen av CO, HC samt den organiska fraktionen av partikelutsläppen. De kombineras ofta med ett partikelfilter för att även minska övriga partikelutsläpp.

De olika efterbehandlingssystemen kan minska utsläppen avsevärt, men är också förhållandevis dyra, som framgår av tabell 5 vilken visar exempelprestanda och -kostnad för katalysatorer för en 75-130 kW motor (Lindgren, 2007). För att de ska kunna fungera effektivt måste avgaserna ha rätt (ofta hög) temperatur och sammansättning. Kravet på en hög temperatur inom ett visst temperaturintervall innebär att seriehybridskonfigurationer passar bra tillsammans med katalysatorer, då motorn arbetar vid en hög vridmoments-/varvtalskombination som genererar höga avgastemperaturer.

Tabell 5 Utsläppsminskning, temperaturintervall och kostnad för olika katalysatorer

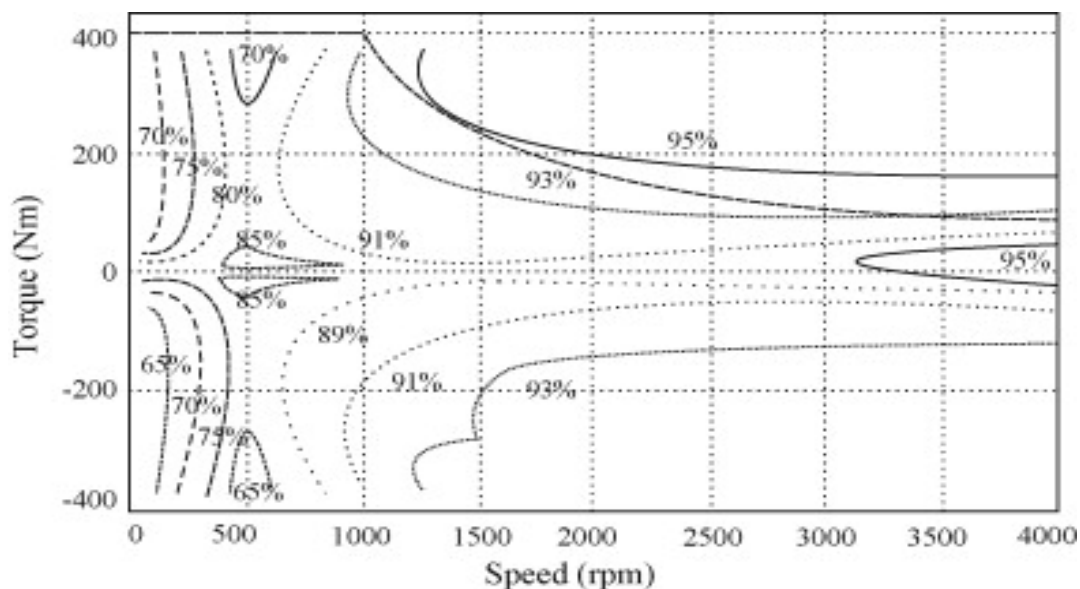
Katalysator	Utsläppsreduktion (%)				Temperaturintervall (°C)	Kostnad (SEK)
	CO	HC	NO _x	PM		
SCR	50-90	70	76	24	300 - 500	121 000
DOC	83	84	-	90	> 300	59 400
Partikelfilter	-	-	-	> 97		

3.5.2. Elektriska motorer

Elmotorer har en rad fördelar jämfört med förbränningsmotor, framförallt en hög effektivitet och högre vridmoment vid låga hastigheter. Vad det gäller system som publiceras i forskningstidskrifter dominerar asynkron- och permanentmagnetsmotorer, likströmsmotorer ligger något efter och reluktansmotorer har liten spridning (Zeraouia et al, 2006; Gallmeier, 2009). Zeraouia et al. (2006) har jämfört de olika motorens styrkor och svagheter, vilka framgår av tabell 6, där bäst prestanda motsvarar 5. Deras varvtals/verkningsgradskurvor visas i tabell 7 (Zeraouia et al., 2006) . Elektriska motorer och kraftelektronik behöver temperaturer under 50° C för att inte åldras i förtid (Gallmeier, 2009).

Tabell 6 Jämförelse mellan elektriska motorer

Motor (Ström/ Typ)	Effekttäthet	Verkningsgrad	Kontroll-erbarhet	Tillförlitlighet	Mognad	Kostnad
Likström	2.5	2.5	5	3	5	4
Växel-	Induktion	3.5	3.5	5	5	5
	Synkron	5	5	4	4	3
	Asynkron	3.5	3.5	3	5	4



Figur 14. Verkningsgrad för en elektrisk motor i motor/generator-läge

Asynkronmotorer

Asynkronmotorer är billiga och robusta motorer som kräver lite underhåll. De är dock mindre effektiva än permanentmagnetsmotorer och stannar om varvtalet är för högt, vilket begränsar deras maxvarvtal till under två gånger det synkrona varvtalet (Zeraoulia et al, 2006; Prankl et al, 2010).

Synkronmotor

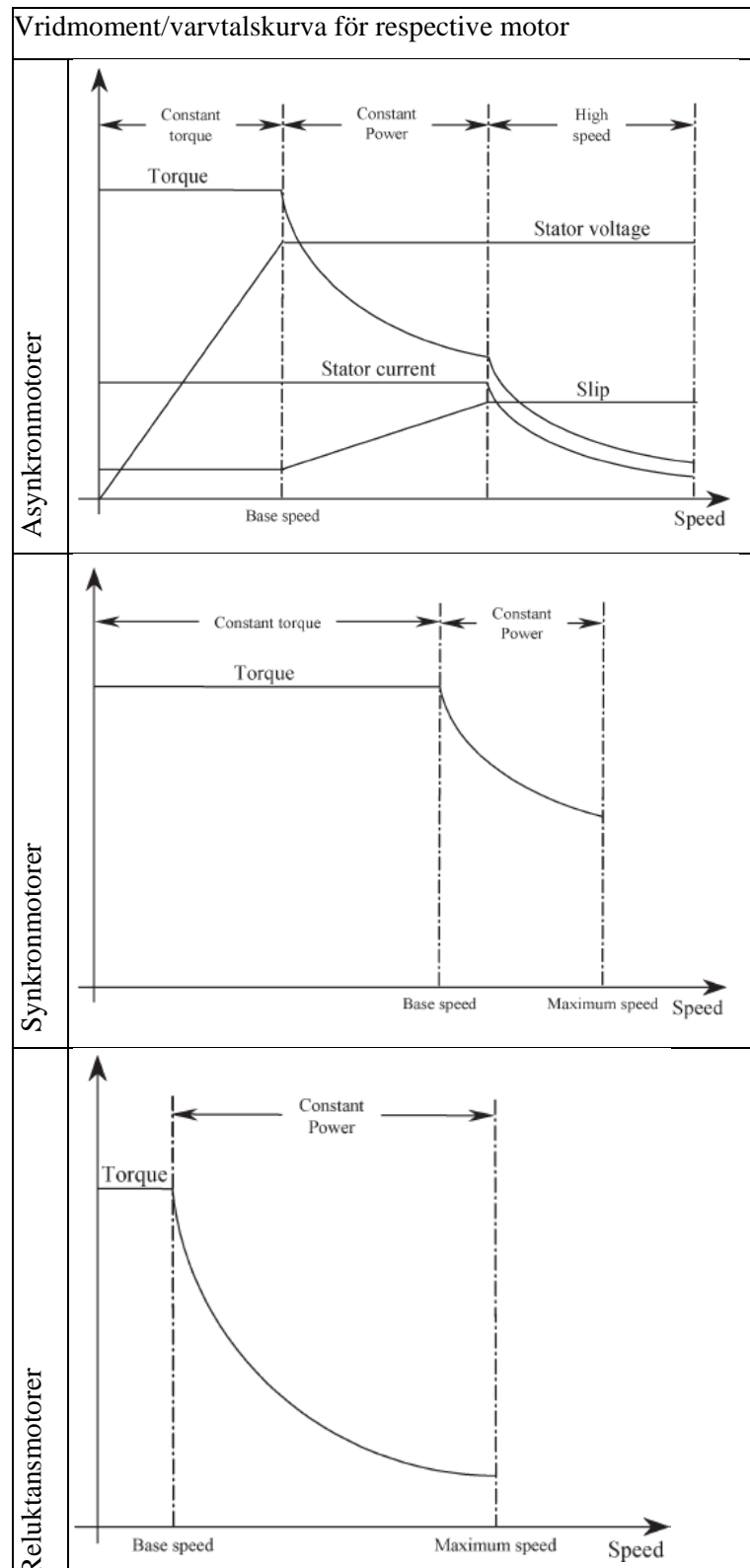
Synkronmotorer har en hög effekttäthet, vilket gör dem till en stark konkurrent till asynkronmotorer för hybridfordon (Bernhard & Schlotter, 2003; Zeraoulia et al, 2006). De har också en hög verkningsgrad och den värme som trots allt bildas är lätt att avleda. Den har dock ett begränsat varvtalsområde (Zeraoulia et al, 2006).

Reluktansmotorer

Reluktansmotorer är robusta och har ett brett varvtalsområde. De är dock även bullriga och ger upphov till elektromagnetiska störningar (Zeraoulia et al., 2006). De används av bland annat LeTourneau.

Verkningsgraden hos elektriska motorer är, som framgår av figur 14 betydligt högre än för förbränningsmotorer. Effektiviteten är något högre i motorläge (el → mekanisk rörelse) än i generatorläge (mekanisk rörelse → el).

Tabell 7 Varvtals/verkningsgrad förhållande för elektriska motorer



3.5.3. *Hydrauliska pumpar och motorer*

Hydraulpumpar omvandlar mekanisk rörelse till ökat hydraultryck, medan motorer konverterar tillbaka den till mekanisk rörelse. Pumpen kan drivas med antingen en dieselmotor eller en elektrisk motor. Effektiviteten i bägge fallen är omkring 93 % vid optimal belastning, men kan minska till omkring 80 % eller lägre vid låga laster (Achten, 2008; Minav, 2009; Hui, 2010).

3.6. Transmission

Transmissionen hos icke-väggående mobila fordon är viktig av flera skäl. Under typiska arbetscykler har fordonen mycket varierande hastighets- och kraftbehov, vilket gör att är det viktigt att transmission klarar av att omvandla motorns varvtal- och vridmoment till eftersträvd fordonshastighet och kraft på med så små förluster som möjligt. Dessutom används vanligen motorns effekt av flera aktuatorer, vilka har olika behov avseende t.ex. varvtal och vridmoment. Därför är systemen för överföring av energi från motor till aktuatorer mer komplexa och av större betydelse för effektiviteten i fordonen.

Tre typer av transmission förekommer i fordon: mekanisk, hydraulisk och elektrisk. De har olika styrkor och svaghet, som framgår av tabell 8 (Bernhard och Schlotter, 2003; Carlisle, 2008; Ochiai och Ryu, 2008). Inom den överblickbara framtid är det främst mekanisk transmission som kan komma att ersättas av elektrisk transmission, då den elektriska transmissionens effekttäthet inte kan konkurrera med den hydrauliska transmissionens.

Tabell 8 Jämförelse mellan olika transmissionstyper

	Mekaniska bälten	Hydrauliska cylindrar	Elektriska kablar
Inköpskostnad	Lågt	Högt	Delvis höga
Effekttäthet	Hög	Hög	Låg (vid konventionella spänningar)
Optimal geometri		Linjär	Roterande
Flexibel geometri	Nej	Nej	Ja
Verkningsgrad	90-98%, vanligen ~ 95%*	95 % +	Mycket hög

3.6.1. *Mekanisk transmission*

Mekanisk transmission har i allmänhet hög verkningsgrad, vilket framgår av tabell 9 (Heath, 2007). Eftersom de är stela och inte geometriskt flexibla kan det dock vara svårt att hitta bra plats för dem. Vidare är underhållsbehovet (bl.a. oljning) betydande, inte minst om bälten används. Användning av kedjor är även förknippat med betydande buller (Carlisle, 2008).

Tabell 9 Jämförelse mellan olika typer av mekanisk transmission

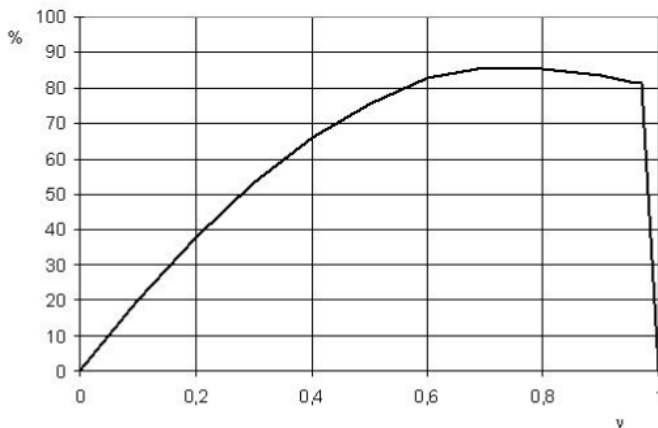
Typ av transmission	Effektivitet
Manuell	97%
Automatisk	86%
Bältesbaserad CVT	88%
Toroidalbaserad CVT	93%

Växellåda

Vanliga växlar är mycket effektiva, men saknar flexibilitet eftersom två kugghjul enbart kan producera ett visst förhållande mellan rotationshastigheten ut och in. Genom att öka antalet växlar ökar flexibiliteten, men är fortfarande begränsad jämfört med övriga alternativ.

Momentomvandlare

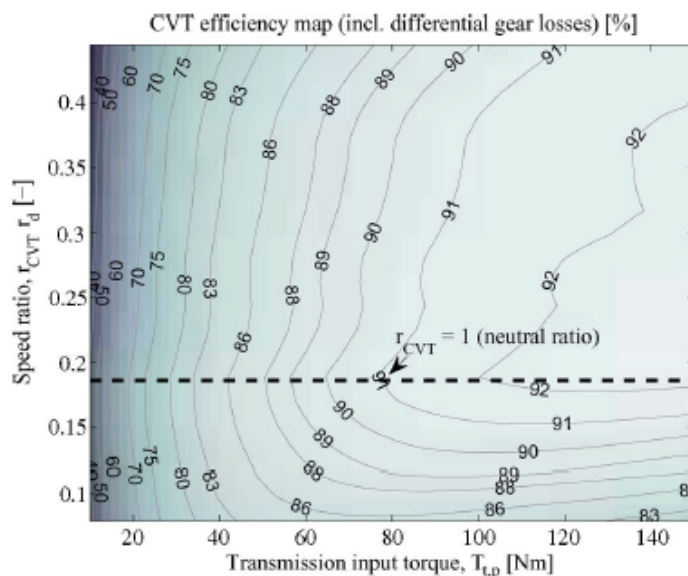
En momentomvandlare är en vätskekoppling som ökar vridmomentet och minskar varvtalet. Förhållandet mellan vridmoment och varvtal kan förändras kontinuerligt, vilket är en viktig fördel jämfört med mekaniska växlar. Verkningsgraden är högst vid rotationshastighetsförhållanden (ut/in) på omkring 0,6-0,9, då den är något över 80 %, som framgår av figur 15 (Bohman, 2006). När rotationshastighetsförhållandet närmar sig 0 respektive 1 närmar sig effektiviteten 0 %. Genom att montera en enkel lock-up som används när förhållandet är nära ett går det att undvika att effektiviteten minskar i det fallet (Bohman, 2006).



Figur 15 Verkningsgrad för momentomvandlare som funktion av varvtal ut/in

CVT

CVT (*Continuously variable transmission*) består av växlar där den effektiva storleken på växlar kan varieras, vilket leder till det att vridmoment/varvtalsförhållandet ändras. Effektiviteten varierar mellan som sämst 70 % och som bäst 97 % beroende på den typ av mekanism som används för att variera den effektiva storleken. Figur 16 visar hur verkningsgraden beror av hastighetsförhållande och vridmoment för en bältesbaserad CVT (Lang, 2000; Hofman et al., 2009).



Figur 16 Verkningsgrad för CVT som funktion av vridmoment och hastighetsförhållande

3.6.2. *Hydraulik*

Hydrauliska ackumulatorer har en storleksordning högre effekttäthet än elektriska system, men också betydligt lägre energitäthet (Lin et al., 2010). Cylindrar har normalt en verkningsgrad på omkring 95 %. Hydraulisk olja kan vara toxiskt. För närvarande dominerar mineraloljor, men biologiskt nedbrytbara alternativ finns, bl.a. rapsolja.

3.6.3. *Elektricitet*

Att använda elektricitet för överföring är eftersträvansvärt av flera skäl (Buning, 2010):

- Möjlighet att förse flera apparater med tillräckligt hög effekt
- Ökad flexibilitet då det är enklare att hantera kablar än t.ex. cylindrar eller kedjor
- Ökad kontrollerbarhet, vilket gör det möjligt att minska förlusterna från parasitiska förluster från hjälputrustning

Den överförda elektriska effekten ges av $P = VI$ samtidigt som resistansförlusterna ges av $P = I^2R$. Det är därför lättare att överföra högre effekt om spänningen är högre. Vid strömstyrkor på över 100 A uppstår flera problem. Den fysiska storleken på kablarna ökar. Likaså ökar kraven på isolering, vilket medför att PVC-belagda kablar inte går att använda och tuffare regler gäller för arbete med dem. Därför brukar så pass höga strömstyrkor undvikas (Bernhard och Schlotter, 2003; Gallmeier, 2009).

Om en växelströmsmotor används behöver strömmen från fordonets batterier omvandlas från likström till växelström med hjälp av en växelriktare. Verkningsgraden är beroende på belastningen och växelriktarens utformning, vanligtvis är förlusten några procent (Tolbert och Peng, 1998).

4. DRIVKRAFTER OCH BEGRÄNSNINGAR

För att veta inom vilka områden en viss teknik kommer att användas först och mest är det nödvändigt att känna till både drivkrafterna som finns för att använda den och teknikens sociala och tekniska begränsningar. Dess användning begränsas till de områden där dess starka sidor är viktiga och dess svaga sidor är mindre viktiga.

Detta kapitel börjar med "primära" drivkrafter och begränsningar, det vill säga de som är av betydelse när en entreprenör bestämmer vilken typ av fordon de ska köpa, när en köpare bestämmer vilken typ av krav som ska ställas i avtal med en entreprenör eller när en producent beslutar om hur fordonet ska designas. Dessa är: säkerhet, ekonomi, sociala aspekter, fordon geometri, påverkan på miljön och lagstiftningen.

De följs av "sekundära" drivkrafter och begränsningar. De är av betydelse eftersom de har en påverkan på en eller flera av de "primära" drivkrafterna/begränsningarna. Som ett exempel energiförbrukningen har en stor inverkan på både ekonomi och miljöpåverkan.

4.1. Säkerhet och påverkan på människors hälsa

4.1.1. *Lokala utsläpp*

Vissa av utsläppen från dieselmotorer, såsom CO, NO_x och PM, kan ha en betydande inverkan på människors hälsa. I områden där ventilationen är begränsad eller kostsam (som inom lager och i gruvor) blir fordon som släpper ut mindre föroreningar konkurrenskraftiga, eftersom föroreningsnivåerna annars skulle stiga oacceptabelt. Alternativen kan vara mindre miljöfarliga bränslen (t.ex. propan) eller drivlinor (t.ex. elektriska).

Denna drivkraft är starkare än de flesta andra då arbete under direkt hälsofarliga förhållanden inte är godtagbart av både juridiska och etiska skäl. Arbetsmiljöstyrelsens föreskrift om hygieniska gränsvärden och åtgärder mot luftföroreningar, AFS 2005:17, innehåller

gränsvärden för en stor mängd luftföroreningar, inklusive sådana som produceras av förbränningsmotorer. Arbetsmiljöstyrelsens föreskrift om hygieniska gränsvärden och åtgärder mot luftföroreningar, AFS 2010:01, anger att ”Motorer som inte avger förbränningsavgaser till omgivningen ska i möjligaste mån användas under jord”. Det är inte tillåtet att använda bensin, etanol eller gas som bränsle (med undantag för utryckningsfordon).

I gruvor kan ventilationskostnaderna utgöra upp till 50 % av elkostnaden, vilket gör att relativt drastiska åtgärder vidtas för att minska användningen av dieselmotorer, t.ex. genom att använda kabelupprullare för att förse fordon med elenergi (Poirier et al., 2008).

Människor drabbas av yrsel, illamående och kramper inom 45 minuter vid CO-nivåer på 800 ppm (Goldstein, 2008). Detta motsvarar ungefär 9,6 g/m³. Motorer som används i mobila maskiner får släppa ut 5 g/kWh. Om motorn körs i ett oventilerat utrymme på 1 000 m³ skulle detta medföra att motorn kan producera 192 kWh energi innan luften innehåller 800 ppm CO.

Även om ventilationen inte behövs kan påverkan på människors hälsa från diesellavgaser fortfarande vara betydande. I stora städer, där många människor påverkas och bakgrundsutsläppen från andra källor redan är hög, är det vanligt att ha speciella regler för att minska utsläppen från mobila maskiner; t.ex. kräver ”Local Law 77” i New York City att partikelfilter används på mobila maskiner (NYC, 2004). I London finns en ”Best Practice Guidance” som ställer krav på mobila maskiner vid arbeten som kräver bygglov; för platser som räknas som hög risk innebär detta krav på partikelfilter (London, 2006).

För att uppnå nuvarande och framtida gränser använder tillverkare efterbehandlingsystem, beskrivna i avsnitt 3.5.1. De kan vara kostsamma, en kostnad som elektriska fordon undviker.

4.1.2. *Buller*

Buller från förbränningsmotorn är en viktig bullerkälla för mobila maskiner, vilket framgår av tabell 10 (Ivanov et al., 2008). Detta är särskilt fallet för hjulförsedda fordon, där det är den dominerande källan, medan underredet är viktigare för fordon som använder bandaggregat (Hanson et al., 2006; Ivanov et al., 2008).

Tabell 10 Bullerkällor (till förarhytten)

Bullerkälla	Bullerkällans bidrag, dBA					
	Grävlastare	Hjullastare	Bulldozer	Scraper	Vibrationsvält	Banddriven grävmaskin
Avgassystemet	61	69	64	68	75	63
Motorn	71	73	71	74	74	61
Kylfläkt	65	64	63	64	63	58
Luftintag	65	68	54	64	67	57
Hydrauliska pumpar		65		66	-	62

4.1.3. *Bränder*

För att en brand att starta det måste både finnas en brandfarlig blandning och en källa som kan orsaka tillräckligt höga temperatur för att förbränningen ska börja. I fordon existerar bägge. Möjliga källor är elektriska apparater (som kan kortsluta), varma avgassystem, katalysatorer

och batterier. Lättantändliga material inkluderar bränsle (till exempel från läckande bränsleledningar) och ledningsmaterial.

I USA står fordonsbränder för 1/4 av alla bränder där brandkåren rycker ut. Nästan 1/5 av alla fordonsbränder anses vara avsiktliga (mordbränder, försäkringsbedrägerier etc.) och ytterligare 8 % orsakade av slarv (såsom rökning eller parkering över torra löv), medan resten är förknippade med mekaniska och elektriska problem. Vanliga orsaker är brutna bränsleledningar, felaktiga katalysatorer, elektriska fel och överhettningar. Material som fattade eld är elektriska ledningar (~ 30 %), bränsle (~ 30 %), stoppade säten (7-8 %), gas i rör eller behållare (~ 4 %) och däck (~ 2 %) (US Fire Administration, 2006). Risk för att batteriet kortsluts är beskrivet i avsnitt 3.4.3. Med fler battericeller ökar sannolikheten för fel i avsaknad av extra kontrollåtgärder (Ahrens, 2004). Fordon som används i en potentiellt explosiv atmosfär är föremål för hårdare lagstiftning än annars och omfattas av direktiv 94/9/EC.

4.1.4. *Toxicitet*

Hydraulolja kan oavsiktligt läcka och därigenom om mineralolja används orsaka skador p.g.a. dess toxicitet (Gustafsson, 2011). Det är dock osannolikt att elektriska komponenter kommer att kunna ersätta hydrauliska komponenter inom överskådlig framtid p.g.a. dess olika prestanda.

4.1.5. *Skador orsakade av elektricitet*

Risken den mänskliga kroppen utsätts för om den kommer i kontakt med el beror på hur elen levereras. Är det genom hudkontakt eller har någon del av elledningen trängt in i huden? Är det lik- eller växelström? Vilken är dess effekt, spänning och frekvens? Elektricitet kan orsaka skada både genom mängden tillförd energi och genom dess påverkans på kroppens egna elektriska kontrollsystem. I det förra fallet uppkommer brännskador, där skadan är relaterad till den mängd energi som deponeras i kroppen, i det senare fallet kan det ge upphov till hjärtflimmer.

Mindre spänningar än omkring 50 V är i allmänhet relativt ofarliga om huden inte har penetrerats. Eftersom hybrider ofta använder högre spänningar finns det risk för elektriska stötar och skador på grund av felaktig hantering kommer sannolikt komma att öka i avsaknad av förebyggande åtgärder.

För fordon är flera åtgärder möjliga, som att t.ex. ha automatisk brytning av kraftförsörjningen om spänning eller ström ändrar sig från det förväntade och att bygga fordonet så att eventuell kortslutning på grund av skador endast omfattar en mindre del av fordonet (Bernhard och Schlotter, 2003).

4.1.6. *Fysiska skador*

Studier av elektriska vägfordon har visat att de oftare är inblandade i olyckor än konventionella fordon. National Highway Traffic Safety Administration i USA rapporterade att 0,9 % av alla hybridfordon var inblandade i olyckor med fotgängare, jämfört med 0,6 % av samtliga konventionella fordon (Hanna, 2009). Det har föreslagits att detta beror på deras relativa ljudlöshet, vilket innebär att fotgängare inte märker dem (Simpson, 2008; Goodes et al., 2009). En potentiell risk är därför att helt eller delvis elektriska mobila maskiner kan vara mer olycksbenägna än konventionella mobila maskiner. I synnerhet som mobila maskiner har ett mindre tydligt avgränsat arbetsområde jämfört med vägfordon.

Omkring 15 % av alla dödsolyckor inom byggsektorn orsakas av fordon i rörelse (Haslam et al., 2005). I synnerhet personer som arbetar inom transport och logistik är i riskzonen. De maskintyper som enligt studien oftast var inblandade i dödsolyckor var: kranar (16 %),

grävmaskiner (15 %), traktorer (15 %) och hjullastare (7 %). I 30 % av fallen orsakades olyckan av någon blivit påkörd/överkörd av ett fordon, i 17 % av fallen hade fordonet vält, i 7,5 % av fallen hade bommen eller skopan slagit någon och i 6,8 % av fallen hade någon krossats av fordonet (Adolfsson och Otterborn, 2008).

4.2. Ekonomi

Ett antal faktorer påverkar om det är ekonomiskt att hybridisera mobila maskiner:

- **Produktiviteten** beror på drivlinan, då snabbare acceleration och högre toppfart innebär att mer kan göras på kortare tid. Hybrider kan ofta ha högre produktivitet eftersom elmotorn har högre vridmoment vid låga varvtal och därför är bättre på att accelerera vid låga hastigheter, vilket är viktigt då mobila maskiner ofta arbetar vid låga hastigheter.
- I vissa fall kan köparen av en tjänst vara villig att betala mer om jobbet är gjort på ett mer miljövänligt sätt. Inom sektorn räknas dock inte grön **PR** som något viktigt försäljningsargument (Finpro, 2010).
- **Arbetskraftskostnaderna** påverkas inte av drivlinan utöver den påverkan de har på produktiviteten.
- Hybridisering medför minskade **bränslekostnader** då effektivare fordon förbrukar mindre bränsle. Detta är ännu viktigare för plugin-hybrider då el från nätet är billigare än flytande/gasformigt bränsle.
- Hybrider har en högre **inköpskostnad** då elektriska komponenter, särskilt batterier, är dyra. Denna kostnad ökar om räntan ökar.
- **Underhållskostnaderna** förändras vid hybridisering, det är dock osäkert i vilken riktning och hur mycket.

Som beskrivet i avsnitt 3.5.2 kan elmotorer leverera mer vridmoment vid låga varvtal jämfört med dieselmotorer, vilket gör det möjligt att accelerera snabbare vid låga motorvarvtal. Hur stor betydelse en sådan ökad acceleration har på den totala produktiviteten beror på många faktorer som är svåra att mäta.

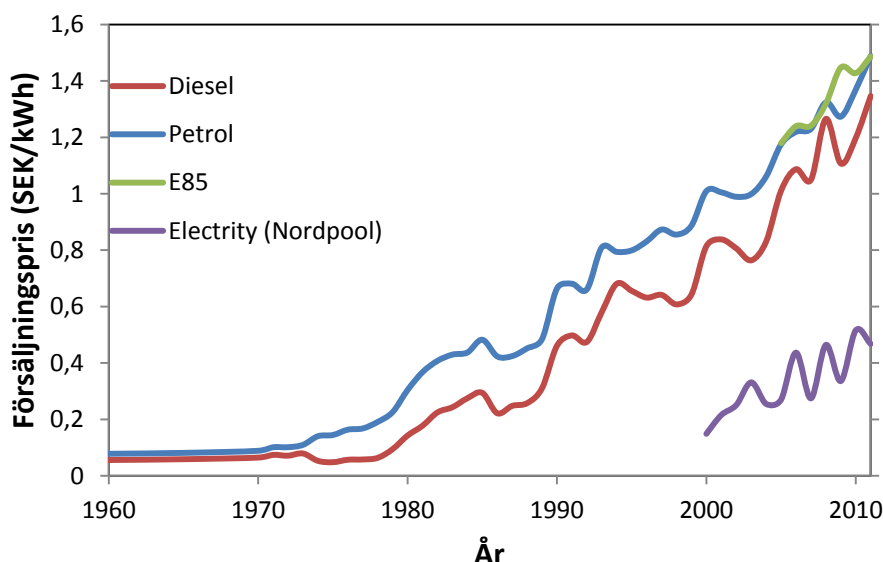
Som en uppskattning kan produktiviteten för standardcykler och hur dess påverkas av fordonets hastighet användas. Formler för dessa finns i tabell 11, där \mathbb{P} är produktiviteten per timme, \mathbb{p} är produktiviteten per arbetscykel, t_c tiden per arbetscykel, η_j arbetseffektiviteten (värde mellan 0 och 1 för att ta hänsyn till varierande svårighetsgrad), e en "grade faktor", \mathbb{p}_{bl} skopkapaciteten, a en fyllfaktor för skopan/bladet, D körsträckan, v_f hastigheten framåt, v_r hastigheten bakåt, t_z den som krävs för växling och $n = \mathbb{p}_{dumptruck}/(\mathbb{p}_{bu}a)$. Vid hybridisering kommer snitthastigheterna att öka, hur pass mycket beror på elmotorns prestanda och cykelns längd.

Tabell 11 Produktivitet för vanliga arbetscykler för olika fordon

	\mathbb{P}	\mathbb{p}	t_c
Generellt	$3600 \mathbb{p} \eta_j / t_c$		-
Bulldozer	$3600 \mathbb{p} \eta_j e / t_c$	$\mathbb{p}_{bl} a$	$D / v_f + D / v_r + t_z$
Hjullastare, kort cykel	$3600 \mathbb{p} \eta_j / t_c$	$\mathbb{p}_{bu} a$	$D / v_f + D / v_r + t_z$
Grävmaskin	$3600 \mathbb{p} \eta_j / t_c$	$\mathbb{p}_{bu} a$	-

Dumper	-	-	$n * t_{c,loader} + D/v_{loaded} + t_1$ $+ D/v_{empty} + t_2$
---------------	---	---	--

Som en följd av högre produktivitet i samband med kortare cykeltider minskar arbetskraftskostnaderna. För plug-in fordon tillkommer dock arbetskostnaden för tiden det tar för arbetaren att ladda fordonet. För plug-in fordon är samtidigt stora besparingar möjliga genom prisskillnaden mellan diesel och el, som framgår av figur 17 (NASDAQ Commodities, 2011; SPBI, 2011). Skillnaden i bränslekostnad är ännu större än vad figuren visar på grund av den högre effektiviteten hos elmotorn jämfört med förbränningsmotorn.



Figur 17 Kostnad för bränsle och elektricitet i Sverige

Den ökade produktivitet och minskad bränsleförbrukning behövs för att kompensera för det faktum att hybridfordon tenderar att vara dyrare att köpa än konventionella fordon på grund av att de innehåller fler komponenter än konventionella fordon (eftersom konventionella kompletteras med, snarare än ersätts av, elektriska). Några av dessa, såsom batterier är mycket dyra. På grund av begränsad spridning och användning av hybrida mobila maskiner saknas i dag kunskap om behovet av och kostnaden för underhåll. Det har föreslagits att hybridfordon kräver mindre underhåll eftersom de innehåller färre rörliga delar (Finpro, 2010).

4.3. Liten påverkan på miljön

Den totala miljöpåverkan ett fordon har beror på den resursförbrukning och de utsläpp som direkt eller indirekt orsakas av dess produktion/återvinning och användning (främst energiförbrukning i form av använt bränsle eller el). Ju mer fordonet används desto mindre påverkan har produktionen då t.ex. miljöpåverkan per kWh för ett batteri minskar desto mer batteriet används.

Om batteriet räcker i 1 000 cykler (laddningar/urladdningar) och 1 kg batteri kan lagra 0,1 kWh kommer det att under dess livslängd ha lagrat 100 kWh. Detta kommer att ha medför att fordonets bränsleförbrukning minskats med minst lika mycket (hur mycket beror på hur fordonet används).

För att det ska vara bättre miljömässigt att använda hybrider måste mängden resurser och mängden utsläpp som skedd vid produktionen/återvinningen av batteriet vara mindre än de utsläpp som hybridiseringen sparade in; d.v.s. kvoten minskad energianvändning (i kWh) per kg batteri måste vara större än kvoten mellan utsläpp per kWh ut ur motorn och utsläppen per kg batteri vid tillverkning/återvinning. Som ett exempel taget ur tabell 12 innebär detta att om

ett kg batteri minskar bränsleförbrukningen med mer än 17,5 kWh under batteriets livslängd blir CO₂ utsläppen mindre med batteriet än utan.

Som framgår av tabell 12, som visar värden för litiumjonbatterier respektive mobila maskiner, varierar denna kvot mellan utsläppen beroende på vilken förorening som avses (Lindgren et al., 2010; Sullivan & Gaines, 2010).

Tabell 12 Utsläpp från batteriproduktion relaterat till utsläpp från fordonsanvändning

	VOC	CO	NO _x	PM	SO _x	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Utsläpp från batteriproduktion och -återvinning (g/kg)	0,9	3,0	14,5	19,6	19,7	13,7	0,1	12 500
Utsläpp från konventionella fordon (g/kWh)	0,52	0,61	5,65	0,028				716
Kvot (kWh/kg)	1,7	4,9	2,6	700	-	-	-	17,5

Produktionen av batterierna kräver mellan 30 och 100 MJ/kg. Återvinning minskar energianvändningen med omkring 70 % (Tytgat, 2009; Sullivan och Gaines, 2010). Det är för närvarande inte ekonomiskt att återvinna litium från batterier, däremot kan det vara motiverat av värdet på andra metaller (som nickel och kobolt) som ingår i batteriet.

De flesta undersökningar om miljöpåverkan från el- och hybridbilar fokuserar på effekterna av batteriet. För närvarande är det ont om data gällande ökad resursförbrukning orsakad av produktionen av de övriga komponenterna som superkondensatorer, motorer, kraftelektronik och transmission samt minskad resursförbrukning orsakad av mindre konventionella komponenter.

Utöver ökad drivlineeffektivitet kan hybridisering minska utsläppen från fordonet av andra föroreningar än CO₂ under drift genom att använda motorn vid sådana varvtals/vridmomentskombinationer som ger upphov till låga utsläpp och genom att använda motorn mjukare. Vid snabba varvtals/vridmomentsförändringar kan annars betydande utsläpp ske av bl.a. partiklar och CO (Lindgren et al., 2010).

För plug-in hybrider är det även relevant att jämföra påverkan av den el som fordonet använder med det bränsle som det ersätter. Resultatet av sådana jämförelser beror dels på var i världen som fordonet laddas med el och dels på vilka antaganden som görs gällande vilka effekter som elanvändningen får på elen som produceras.

Sveriges elproduktion sker i dagsläget i huvudsak genom vattenkraft och kärnkraft, vilka står för över 75 % av den totala produktionen. Till detta kommer vindkraft (3 %, snabbt ökande), kraftvärme (11 %) och import (9 %) (SCB, 2011). Medan utsläppen av koldioxid per kWh är låg från kärnkraft och de förnybara energislagen så kan den vara över 1 000 g/kWh om elen kommer från koleldning, vilket kan vara fallet vid import (Kimming och Sundberg, 2011).

Vid bedömningen av miljökonsekvenserna av en viss åtgärd, t.ex. med livscykelanalys (LCA) är det vanligt att använda antingen den genomsnittliga påverkan eller den marginella effekten av att använda en viss resurs som el (Kimming och Sundberg, 2011). Den grundläggande skillnaden härrör från det faktum att marginella resurser till sin natur är av sämre kvalitet (generellt dyrare) än genomsnittsresurser (som annars skulle ha använts tidigare).

Fastställande av den genomsnittliga påverkan av elproduktionen i en region eller ett land är ganska enkel att beräkna med hjälp av tillgängliga statistiska uppgifter. Det är mycket svårare att avgöra den marginella effekten, eftersom den beror på förhållanden som förändras över tiden och varierar beroende på en mängd parametrar. Resultatet är också ofta mindre tydliga,

eftersom svaret på frågan "varifrån kommer de kWh som används av detta fordon" beror på många antaganden i större omfattning än insamlad energiproduktionsdata. Detta är särskilt fallet för el, eftersom de individuella kWh inte har någon identitet och därför inte kan inte följas från källa till användning på samma sätt som t.ex. en banan eller ett kylskåp.

Tidsramen i bedömningen är också viktig. På kort sikt medför en ökad elanvändning enbart att efterfrågan ökar, medan utbudet är oförändrad. Det innebär att el som produceras på det minst produktiva/dyraste sättet används eftersom de mer produktiva sätten redan används för att producera el och inte kan användas för att öka kapaciteten. På lång sikt tenderar en ökad efterfrågan att leda till ökade investeringar i elproduktion och därmed ökat utbud. Resultatet beror i ett sådant fall på vilka produktionsmetoder som förväntas användas i framtiden. Kimming och Sundberg (2011) har baserat på kända projekt och den osäkerhet som föreligger kring vilka slags kraftverk som kommer att byggas föreslagit att som en approximation använda fossilgas, som ger upphov till utsläpp på omkring 300-400 g/kWh.

4.4. Fordonsprestanda

4.4.1. Hög effekt vid låga varvtal

Många mobila maskiner är tunga och färdas med relativt låg hastighet. Det gäller inte minst under de mer effektkrävande delarna av deras arbetscykler, som t.ex. då en hjullastare tar upp material från en hög. Därför är det viktigare för fordonens produktivitet att de kan producera så mycket effekt som möjligt vid låga hastigheter, snarare än att ha hög topphastighet. Det är därför fördelaktigt att använda elmotorer i stället för förbränningsmotorer eftersom det högra vridmomentet vid låga varvtal, beskrivit i avsnitt 3.5.2, gör att de kan leverera mest effekt när det behövs som mest.

4.4.2. Bättre styrning av hjulen

Hjulspinn uppstår om dragkraft (F_t) är högre än friktionen, vilken bestäms av friktionskoefficienten (μ) mellan hjul och mark samt normalkraften (F_g):

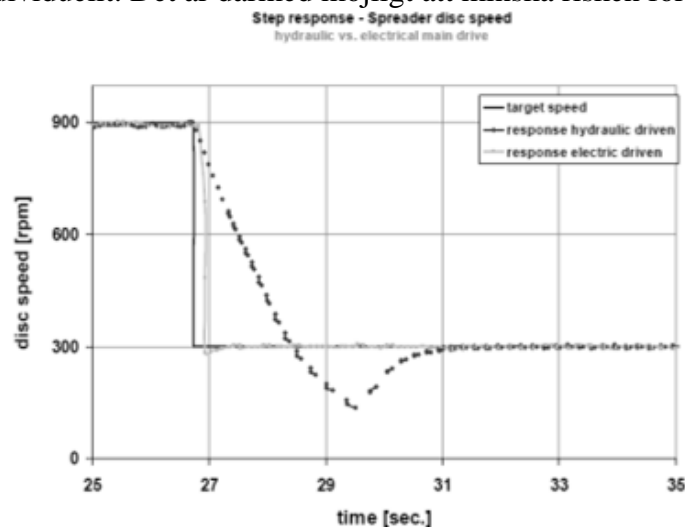
$$F_t < \mu F_g \quad (4-1)$$

Eftersom både vikten som belastar de olika hjulen samt yfriktionen kan variera beroende på fordonet och hur dess tyngdpunkt är positionerad är det fördelaktigt att kunna leverera olika effekt till de olika hjulen. Om motorerna är placerade i hjulen (eller direkt kopplade till dem) är det möjligt att styra varje hjul individuellt. Det är därmed möjligt att minska risken för hjulspinn. Det är därigenom möjligt att undvika onödiga energiförluster samt minska den påverkan som hjulen har på underlaget. Det senare är viktigt inte minst vid skogsbruk (El-forest, 2011).

4.4.3. Kontrollerbarhet

För många arbetsmoment är det önskvärt att öka kontrollmöjligheterna för att möjliggöra en mer specifik och snabbare kontroll.

Genom att använda el istället för hydrauliska komponenter är det



Figur 18 Responstid för gödningspridare med olika typer av kraftöverföring.

möjligt att minska svarstiden, som framgår av figur 18 (Rauch, 2010). För skogsbruket är som beskrivits ovan en viktig drivkraft möjligheten att minska markskadorna och därmed förbättra återväxten, vilket är möjligt genom den ökade kontrollerbarheten hos hybridernas hjul (Sellgren, 2009).

Genom att kombinera elektriska komponenter med modern elektrisk teknik, som t.ex. GPS är det möjligt att ytterligare öka produktiviteten (Bodria, 2010). Ett exempel på en trend inom jordbruket har varit att allt mer anpassa behandlingen av fält till de lokala förhållandena. Med bättre kunskap om den geografiska variationen i markens kvalitet, mängden ogräs etc. är det möjligt att anpassa mängden gödning och bekämpningsmedel för att exakt matcha vad som krävs för maximal produktivitet. En förutsättning för att kunna göra det är att kunna kontrollera den utrustning som levererar konstgödsel, bekämpningsmedel etc. exakt och snabbt, vilket är lättare att göra elektriskt (Rauch, 2010).

4.5. Fordonsgeometri

4.5.1. Utrymme

I områden med begränsat utrymme är det viktigt att maskinerna inte är för stora. Detta gäller särskilt för de mindre storlekssegmenten. En viktig anledning att mindre maskiner används är att de helt enkelt inte finns plats för större maskiner på arbetsplatsen.

De hybrider som hittills producerats har varit baserade av befintliga modeller, med samma begränsningar gällande storlek som standardvarianterna. Att hitta utrymme för batterier har rapporterats som ett av de allvarligaste problemen vid hybridisering (Wilkins, 2008). Det bör dock noteras att elektriska kablar kan dras friare än mekaniska och hydrauliska komponenter, vilket gör att det kan vara lättare att passa in de inblandade komponenterna, även om de är större.

4.5.2. Balanserad vikt

När maskinerna används för att hantera tunga vikter är det viktigt att säkerställa att dessa vikter inte ger ett netto vridmoment på fordonet som helhet och därmed får det att luta/välta. För att begränsa problemet innehåller maskinerna motvikter. För maskiner som hanterar tunga vikter finns därför en gräns för hur pass lätta de kan bli utan att tappa funktionalitet. Detta göra att t.ex. batteriers tyngd inte har samma negativa påverkan på fordonens prestanda som för bilar.

4.6. Samhällsfrågor

Med tanke på att hybridisering av mobila maskiner är i ett tidigt skede, med mestadels prototyper och mycket få fordon i kommersiellt bruk, finns det många sociala frågor som återstår att lösas.

4.6.1. Teknologisk osäkerhet

Då forsknings- och utvecklingsbudgetar är begränsade är det viktigt för företag att fokusera på den teknik som kan förväntas användas under många år framöver. Det finns idag en osäkerhet i vad som kommer att bli de främsta teknikvalen framöver, till exempel i vilken grad som superkondensatorer, batterier och bränsleceller kommer att stå för den elektriska energilagringen (Finpro, 2010).

4.6.2. Kunskapsnivå bland brukare och mekaniker

För att hybridisera mobila maskiner ska kunna användas med framgång är det viktigt att den tekniska kompetens som behövs för att underhålla och reparera dem finns. En viktig väg för kompetensutveckling är genom utbildning av förare. Genom gymnasieutbildning och

kompetensutveckling organiserad av arbetsförmedlingen utbildas varje år omkring 2 000 nya förare av mobila maskiner varje år.

För traktorer består kurserna vanligtvis av 40 timmars körning, 40 timmar service och 20 timmars träning tillsammans med erfarna förare. Det är möjligt för en förare att få ett "grönt kort" både i jord- och skogsbruk för visade färdigheter. För andra mobila maskiner finns kurser på ungefär 16-20 veckor, vilka innehåller totalt omkring 400 timmars praktisk och teoretisk utbildning (Häglund et al., 2010).

4.6.3. Lagstiftning och påverkan från offentliga sektorn

För närvarande sätter lagstiftningen för utsläpp från mobila maskiner utsläppskrav på motornivå snarare än på fordonsnivå som för bilar. Utsläppen mäts per kWh uteffekt från motorn (EU, 2004). Det finns därför inte några direkta juridiska incitament för hybridisering, eftersom det inte gör motorerna effektivare. Det är dock möjligt att införa tuffare villkor i offentlig upphandling eller genom att besluta om lokala utsläppszoner (t.ex. för större städer).

4.7. Energianvändning

Fordon behöver alltid kunna leverera den mekaniska energi som föraren eftersträvar. Som beskrivits i kapitel 2 har olika maskiner olika effektanvändning under drift, på grund av typen av arbete de utför. Om fordonen blir tyngre förbrukar de mer energi på grund av ökat rullmotstånd och om de blir större ökar luftmotståndet. För mobila maskiner är det i allmänhet rullmotståndet som är den största effektförbrukaren, då fordonen är tunga, medan luftmotståndet är litet p.g.a. de låga hastigheterna. Då fordonen använder energi även för arbeten som t.ex. schaktning är kopplingen mellan storlek/vikt och energianvändning inte lika stark som för vägfordon, men det är fortfarande viktigt att hybridfordonen inte är väsentligt större eller tyngre än konventionella fordon. Detta innebär att komponenterna måste ha hög energi- och effekttäthet och att inte fler komponenter än nödvändigt bör användas.

4.8. Lagstiftning och standardisering

För att ett införande av en ny teknologi, som hybridfordon, ska fungera bra krävs att det finns ett ramverk av regler och standarder så att användare kan vara säkra att fordonen beter sig som förväntat och är säkra att hantera.

4.8.1. Komponentstandardisering

På produktionssidan är två typer av företag inblandade vid hybridisering: fordonstillverkare och elektronikstillverkare. De har beroende på skillnaderna i de marknader där de vanligen verkar olika attityder till standardisering. Elektronikstillverkare har ofta stora företag som köpare, medan fordonsindustrin har enskilda konsumenter som köpare. Som en konsekvens har elektronikstillverkarna större intresse för standardisering då det är viktigt att komponenter från olika företag kan användas i samma system. Inom fordonsindustrin vill istället varje producent kunna bygga bästa möjliga bil med så lite restriktioner som möjligt samtidigt som behovet av att kunna kombinera olika delar är mindre då fordon inte kombineras samman på samma sätt som sker med elektriska komponenter. Standardiseringsprocessen för elektriska fordonskomponenter sker främst inom två organ: ISO hanterar fordonet som en enhet, medan IEC fokuserar på enskilda komponenter (van den Bossche et al., 2008; Grant, 2010).

4.8.2. Utsläppslagstiftning

Mobila maskiner täcks av lagstiftning både vad gäller själva fordonen, dess komponenter och de utsläpp och det buller som de ger upphov till. Ofta är denna baserad på EU-lagstiftning som implementerats i svensk lag.

Regler för typgodkännande finns i fordonslagen (2002:574) och fordonsförordning (2009:211). För att en komponent eller ett fordon ska bli godkänt krävs att det är tillverkat i enlighet med förordningen (1993:1067) om elektromagnetisk kompatibilitet, förordningen (1998:1709) om avgaskrav för vissa förbränningsmotordrivna mobila maskiner samt förordningen (2001:1084) om buller från viss utomhusutrustning. Dessutom finns arbetsmiljöverkets föreskrifter (AFS 2008:3) om maskiner, baserad på EU:s maskindirektiv (2006/42/EG).

Utsläpp från mobila maskiner omfattas av direktiv 97/68/EG, ändrat genom 2004/26/EG, 2010/26/EU och 2010/22/EU. De aktuella utsläppskraven framgår av tabell 13-15. De högsta tillåtna utsläppen reduceras steg för steg fram till åtminstone 2014. Testcykeln har traditionellt varit stationär (NRSC), men kompletteras med en dynamisk (NRTC) (EU, 2005).

Tabell 13 Steg IIIA utsläppskrav för icke-väggående mobila fordon

Kat.	Motoreffekt	Datum	CO	NO _x +HC	PM
	kW		g/kWh		
J	37 ≤ P < 75	2008.01	5.0	4.7	0.4
K	19 ≤ P < 37	2007.01	5.5	7.5	0.6

† dates for constant speed engines are: 2011.01 for categories H, I and K; 2012.01 for category J.

Tabell 14 Steg IIIB utsläppskrav för icke-väggående mobila fordon

Kat.	Motoreffekt	Datum	CO	HC	NO _x	PM
	kW		g/kWh			
L	130 ≤ P ≤ 560	2011.01	3.5	0.19	2.0	0.025
M	75 ≤ P < 130	2012.01	5.0	0.19	3.3	0.025
N	56 ≤ P < 75	2012.01	5.0	0.19	3.3	0.025
P	37 ≤ P < 56	2013.01	5.0	4.7†		0.025

† NO_x+HC

Tabell 15 Steg IV utsläppskrav för icke-väggående mobila fordon

Kat.	Motoreffekt	Datum	CO	HC	NO _x	PM
	kW		g/kWh			
Q	130 ≤ P ≤ 560	2014.01	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ≤ P < 130	2014.10	5.0	0.19	0.4	0.025

Lagstiftning för miljözoner gäller inte för anläggningsmaskiner. En färsk undersökning studerade möjligheten att inkludera anläggningsmaskiner, men föreslog att de fortsatt skulle lämnas utanför lagstiftningen. Motiveringen var att 1) en stor del av användningen av anläggningsmaskiner inom miljözoner omfattas av avtal med städerna själva och därför kan styras genom bestämmelser i avtalen och 2) att det skulle vara mycket svårt att övervaka att lagen följdes (Öhgren och Törnquist, 2010).

4.9. Känslighet för miljöfaktorer

Kemiska reaktioner, såsom de elektrokemiska som sker i ett batteri är till sin natur temperaturberoende. När de fortgår långsammare vid lägre temperaturer minskar effekten som

batteriet kan leverera (mängden lagrad energi påverkas dock inte). Vidare är enligt Brown (2008) (hög) temperatur är en viktig faktor vid åldrandet av litiumbatterier. Elektroniska komponenter påverkas även negativt av höga temperaturer, vilket medför att elektroniken i motorrummet behöver kylning (Feucht, 2005). Elektroniska komponenter kan också skadas av starka vibrationer (ELNA, 2011).

Den miljö som icke-väggående mobila fordon arbetar i kan vara tuffare än den som vägfordon verkar i, t.ex. behöver anläggningsmaskiner klara vibrationer på över 10 G, jämfört med 5-7 G för bilar (Ochiai och Ryu, 2008; Lin et al., 2010). Som krävande omgivningsfaktorer för jordbruksmaskiner listar Gallmeier (2009):

- Vibrationer, svängningar
- Temperaturer mellan -40 och +100 ° C
- Kondens (förstärks av intermitterent drift), vattenstänk, regn, dimma
- Frätande vätskor (t.ex. grönsaksjuice)
- Damm- och dammavlagringar
- Intermitterent drift: tuff skördesäsong följt av lång vinterlagring (upp till 8 månader) för skördetröskor.

5. EXISTERANDE ANVÄNDNING AV ELEKTRICITET I MOBILA ARBETSMASKINER

Möjligheterna och drivkrafterna för elektrifiering varierar betydligt mellan sektorer beroende på de faktorer som beskrivs i kapitel 4. I de flesta fall är elektrifieringen begränsad till prototyper, små testflottor eller begränsad marknadsintroduktion under de senaste fem åren. Men, mer omfattande användning finns användningsområden, i huvudsak där minst en av nedanstående förutsättningar gäller:

- **Begränsad ventilation** (gaffeltruckar inomhus, gruvutrustning) tvingar fram lösningar där användning av förbränningsmotorer är begränsat
- **Låg effekt/vikt-kvot** (gaffeltruckar, mindre maskiner) varigenom strömförbrukningen blir relativt liten, vilket minskar behovet av dyra batterier. Som en följd är omkring 50-60 % av alla gaffeltruckar i industriländerna elektriska (Finpro, 2010).
- Behov av **högt vridmoment** vid låga hastigheter (stora gruvmaskiner) kan göra dieselelektriska drivlinor konkurrenskraftiga.
- **Begränsad rörlighet/flexibilitet** (nätanslutning via pantograf eller rulle för gruvutrustning), för jämförelsevis stationära enheter är det möjligt att använda kablar för att kontinuerligt överföra elektrisk energi till fordonet, vilket lindrar behovet av dyra batterier och gör elektriska lösningar mer konkurrenskraftiga.

I kapitlet förekommer många uppgifter om hur mycket en viss modell sänkt bränsleförbrukningen. Det rör sig då om uppgifter från tillverkaren. Någon slags tredjepartskontroll förekommer inte. Ibland kan det förekomma mer specifika uppgifter om hur uppgifterna tagits fram, men oftast inte. På samma sätt som hybridisering påverkar utsläppen vid stads- och landsvägskörning olika beror effekterna av hybridisering av mobila maskiner också på hur de används. Det är därför inte nödvändigtvis så att ett fordon som påstås minska bränsleförbrukningen med 40 % är mer energieffektivt än ett fordon som minskat bränsleförbrukningen med 30 %.

5.1. Existerande elektriska system

Existerande elektriska system på mobila maskiner tenderar att använda antingen 12 eller 24 V, det senare främst för större fordon. Startmotorer har en effekt på upp till 7 kW för mobila maskiner (stora gruvmaskiner kan ha större), motsvarande upp till omkring 5 % av

motoreffekten (mer för mindre maskiner, mindre för större). Generatorer har vanligtvis effekter på 1/3 till 1/2 av detta. I konventionella mobila maskiner används elektricitet för en rad syften:

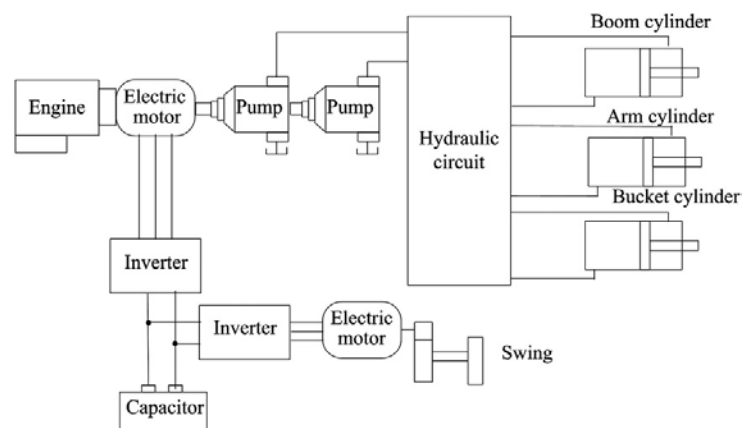
- **Startmotor:** kolven i diesel- och ottomotorer behöver en minimal rotationshastighet för att förbränningsprocessen i cylindern ska fungera normalt. För att nå denna används startmotorer.
- **Kontroll:** tills för några decennier sedan brukade komponenterna i drivlinan vara mekaniskt sammankopplade så att beteendet hos en del var kopplad till beteendet hos en annan. Sådana system är inte särskilt flexibla. Då en komponent används optimalt kan det medför att en annan används suboptimalt. Genom att kontrollera komponenterna elektriskt är det möjligt att optimera enskilda komponenter på ett sätt som medför en bättre total prestanda.
- **Kommunikationssystem:** ISO 11 783-protokollet (ISOBUS) används för kommunikation mellan olika delar av mobila maskiner (samt mellan traktor och redskap).
- **Sensorer:** mobila maskiner består av många komponenter som måste fungera. Genom att mäta prestanda och avgöra om de fungerar korrekt blir de lättare att felsöka.

5.2. Grävmaskiner

5.2.1. Drivlinekonfigurationer

Ett stort antal konfiguration kan användas i hybridgrävmaskiner. Layouten på husdelen av drivlinan som används av Komatsu, vilken visas i figur 19, är typisk för hybridgrävmaskiner.

Uppbyggnaden av drivlinan kan ske på många olika sätt, några viktiga designval framgår av tabell 16. Gemensamma drag tenderar att vara att en generator/motor är kopplad till



Figur 19 Komatsus grävmaskinsdrivlina

(som i en dieselektrisk konfiguration). Swingen drivs av en elmotor, medan en hydraulisk krets används för bom, skaft och skopa.

Tabell 16 Designalternativ för hybridgrävmaskiner

Designval	Fördel med val 1	Fördel med val 2
Energiomvandling 1. Dieselelektrisk 2. Diesel	<ul style="list-style-type: none"> • Kan använda en mindre Dieselmotor • Högre effektivitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Behöver inte någon generator (lägre kostnad)
Typologi 1. Parallell 2. Serie	Utförligt beskrivit i kapitel 3.2.	
Val av elektriskt energilager 1. Kondensator 2. Batteri	<ul style="list-style-type: none"> • Kan lagra med högre effekt • Mindre problem med åldrande 	<ul style="list-style-type: none"> • Kan lagra mer energi
Lagrar energilagret energi från hydrauliken? 1. Ja 2. Nej	<ul style="list-style-type: none"> • Elektricitet kan användas av fler aktuatorer 	<ul style="list-style-type: none"> • Mindre konverteringsförluster
Drivs hydraulisk pumpen av en elektrisk motor? 1. Ja 2. Nej	<ul style="list-style-type: none"> • Högre effektivitet • Kan användas för regenerering 	<ul style="list-style-type: none"> • Behöver inte någon motor (lägre kostnad)

5.2.2. Kontrollstrategier

Kontrollstrategier som beskrivs i litteraturen använder olika regelbaserade strategier, vilka utnyttjar olika antal optimala varvtals/vridmomentpunkter hos förbränningsmotorn (beskrivet nedan). För parallella topologier avser reglerna huvudsakligen under vilka förutsättningar motorn ska börja arbeta på en annan punkt. Detta styrs av:

- Hur stort är effektbehovet?
- Vilken är kondensatorns/batteriets laddningsnivå?
- Vilket är tillståndet i hydraulsystem (hur mycket energi som lagras antingen i en hydraulisk ackumulator eller som potentiell/kinetisk energi av den komponent som drivs av hydrauliken).

Energibesparingar på mellan 10 och 60 % har rapporterats för grävmaskiner (Kwon et al., 2008; Lin et al., 2010). Akademiska studier visar ingen konsekvent skillnad mellan parallell- och seriehybrider. Avsaknaden av tydliga skillnader är inte oväntad med tanke på att möjligheterna till variationer är mycket stora, dels i drivlinans exakta utformning, dels gällande den fordonscykel som används.

I enskilda studier kan skillnaderna mellan olika topologier dock vara anmärkningsvärda. Som ett exempel uppnådde Kwon et al. (2008) en reduktion av bränsleförbrukningen på enbart 11,2 % med en parallell topologi, medan de uppnådde en reduktion på 53,4 % med en serietopologi.

Vid tungt arbete är det möjligt att uppnå högre energibesparingar än vid lättare arbete. Lin et al. (2009) uppnådde en besparing på 41,7 % med en parallelltopologi och 35,2 % med en serietopologi vid hög belastning, mot 34,5 % respektive 28,0 % vid låg belastning. I en annan studie fann Wang et al. (2009) besparingar på 29,5% (parallell) och 28,3% (serie) vid tung belastning och 20,7% (parallell) och 15,7% (serie) vid lätt belastning. Vid modellering av en parallell hydraulisk hybrid fann Lin et al. (2009) en bränslebesparing på 41,7% vid tung belastning, 36,8% vid medeltung och 34,5% vid lätt belastning.

I ekonomiskt hänseende fann Kwon et al. (2008) att den blandade topologin hade kortast återbetalningstid. Denna var 20 % kortare än för serietopologin, med återbetalningstiden för parallelltopologin däremellan. Orsaken till den korta återbetalningstiden var att kostnaden för hårdvaran i det blandade alternativet bara vara 30-40 % jämfört med för serietopologi. Den parallella topologin hade ännu lägre kostnader för hårdvara på 20 % serietopologins kostnader, men detta uppvägdes av den lägre totala verkningsgraden. Wang et al. (2011) hävdar att de kunnat uppnå en 4,1 % minskning av bränsleförbrukning med hjälp av en fuzzy logic-kontroll jämfört med en regelbaserad strategi.

5.2.3. Tillverkare

Jämfört med andra mobila maskiner har det inom grävmaskinssektorn förekommit relativt många hybridmodeller. Dessa gör också anspråk på att kunna göra relativt stora bränslebesparingar, som framgår av tabell 17. Tillverkaren Doosan uppskattar att år 2020 kommer den globala hybridgrävmaskinsmarknaden att vara värd 730 miljarder Won, motsvarande omkring 4,2 miljarder SEK (Doosan, 2009).

Tabell 17 Elektriska grävmaskiner/hybridgrävmaskiner

Tillverkare	Modell	Segment	Lanse rad	Status	Drivlina	Citerad bränslebesparing
Sumitomo		“20-ton”	2005	Prototyp		
Kobelco/ New Holland	(based on) 70SR	“7-ton”	2006	Prototyp		40 %
Komatsu	PC200-8	Medium	2008	Kommersiell	Power-split	25 % +
	HB205 and HB215LC	Medium	2010	Kommersiell		
Case IH	Case CX210B hybrid		2009	Prototyp		up to 40 %
Sany	SY75C3E H	Small	2010	Kommersiell	Electrisk	-
Sunward	SWE230S		2010	Kommersiell	Parallel	24,7 %
Hyundai	225LC-9		2010	Kommersiell		25 %
	ZX70B	7-ton	2007 (test)/ 2011 (kommersiell)		Electrisk	70 %
Takeushi	TB117E			Prototyp	Electrisk	-
Doosan		22-ton	2012	Kommersiell		~35 %
Kobelco	SK80	8-ton	2010	Kommersiell		minst 40 %
Kobelco		6-ton		Prototyp		

Komatsu är en av de största tillverkarna av anläggningsmaskiner i världen. År 2008 presenterade de den första kommersiellt tillgängliga hybridgrävmaskinen, en hybridversion av en av deras mest sålda produkter (> 10 % av den totala omsättningen), den medelstora PC200 grävmaskinen.

Grävmaskinen rekupererar kinetisk energi från den roterande plattformen (Komatsu, 2008b). I slutet av oktober 2010 hade de sålt 650 grävmaskiner (Komatsu, 2010). De lanserade efterföljarna HB205 and HB215LC, vilka kommer att ersätta PC200-8, i december 2010 (Komatsu, 2011b). Arbete pågår på en 30-tons hybrid (Komatsu, 2010).

Den kinesiska tillverkaren Sunward, liksom den koreanska tillverkaren Hyundai släppte hybridgrävmaskiner i samma storleksklass 2010 (Direct Industry, 2010; Sunward, 2010; Hyundai, 2010; Hyundai EDGE, 2010).

Andra företag har byggt prototyper, men ännu inte släppt några fordon på marknaden. Sumitomo och Kabelco/New Holland har båda producerat prototyper som de visade på internationella mässor i mitten av 2000-talet (Asia Pulse News, 2004; Kobelco, 2006). Case CE byggde 2009 en hybridgrävmaskinsprototyp, med samma designval som Komatsu (CASE CE, 2009; DailyNews 2009; International Construction, 2009). Doosan planerar att släppa en 22-tons grävmaskin 2012, återigen med liknande teknikval som Komatsu (Construction Hire, 2009; Doosan, 2009).

Bland minigrävmaskinerna finns helt eldrivna fordon. Sany lanserade en helt elektrisk grävmaskin 2010 (SANY, 2010) och Hitachi har planerat att introducera en helt elektrisk grävmaskin 2011 (White, 2010; Hitachi, 2011b). Takeushi har tagit fram en ”pre-production” minigrävare, TB117E, som de planerar att sätta i produktion under 2012. Den väger 1 720 kg och går att köra 6 timmar på en laddning. Det tar 6 timmar att ladda den och det kommer att vara möjligt att ansluta grävmaskinen till elnätet (DailyNews, 2011; Contractors Plant & Equipment, 2011a). Terex har utvecklat en minigrävare som laddas från elnätet genom en 15 meters upprullbar kabel. Den väger 1 700 kg och innehåller både en 13 kW dieselmotor och en 7,5 kW elmotor (Contractors Plant & Equipment, 2011b).

5.3. Bulldozers

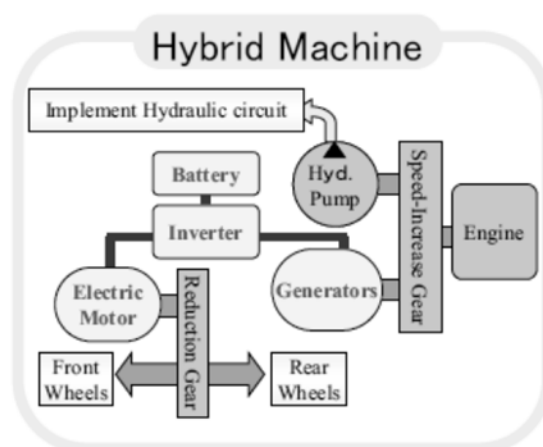
Den enda existerande hybridbulldozern (under utveckling eller kommersiell) är Caterpillars D7E som lanserades 2008. Den använder en seriedrivlina med en 235 hk motor som genererar 975 Nm vridmoment och två 80 kW elmotorer. Den har ett försäljningspris på 600 000 dollar, omkring 20 % mer än för en konventionell bulldozer. Samtidigt är den enligt tillverkaren 10 % mer produktiv (avseende mängd utfört arbete per timme), förbrukar 20 % mindre bränsle och har ett mindre underhållsbehov.

Den låga energiförbrukningen uppnås genom att drivlinan gjorts effektivare. Parasitiska förluster har minskat genom att motorbältet har tagits bort och tillbehör såsom ventilation, vattenpump etc. drivs elektriskt. Avsaknad av växellådor minskar omvandlingsförlusterna (Korane 2009; CAT 2011).

5.4. Hjullastare

5.4.1. Drivlinekonfigurationer

I figur 20 visas en typisk drivlina för hybridhjullastare (Ochiai och Ryu, 2008). För hjullastare är det framförallt av intresse att hybridisera hjuldrivlinan. Detta då den typiska körcykeln är relativt kort, med många accelerationer/inbromsningar på kort tid, vilket gör den optimal för hybridisering. Som för andra fordon är det



Figur 20 Typiskt hybriddrivlina för hjullastare

svårare att ersätta hydrauliken som används för att lyfta och luta skopan.

5.4.2. *Kontrollstrategier*

Grammatico et al. (2010) använde en serie-parallell drivlina, som fungerade i serieläge vid låga hastigheter och i parallelläge vid högre hastigheter. Vid låga hastigheter var fördelen att det gick att låta motorn köra på optimalt varvtal/vridmoment genom att låta elmotorn stå för variationen i varvtal/vridmoment som systemet levererade. I parallelläget passerade inte den energi som förbränningsmotorn frigjort genom elmotorn, däremot fungerade elmotorn som "top up" och tog hand om effektvariationer. Detta gjorde att förbränningsmotorn fortsatte att verka vid optimala varvtal/vridmoment med enbart mindre (och långsamma) förändringar i varvtal/vridmoment.

Hui och Junqing (2010) har simulerat en 17 tons hydraulisk hybrid, där en hydraulisk ackumulator fyllde samma funktion som batteriet/kondensatorn i en elhybrid och en hydraulisk pump/motor fyllde samma funktion som den elektriska generatoren/motorn. Beroende på hur pass hård inbromsning fordonet gjorde varierade effektiviteten med vilken den omvandlade rörelseenergi till lagrad energi i den hydrauliska ackumulatormellan 42 och 75,7 %. Sett över en cykel kunde fordonet lagra 60 % av den regenererbara energin, vilket motsvarade en total energibesparing på 33 %. Ochiai och Ryu (2008) utvecklade en hybridhjullastare med seriedrivlina (beskriven ovan i figur 20). Denna minskade bränsleförbrukningen vid lastning från hög med 25-30 %.

5.4.3. *Tillverkare*

Jämfört med grävmaskinssektorn har det funnits något färre hybridhjullastare, som framgår av tabell 18. De gör inte heller anspråk på att kunna göra riktigt lika stora bränslebesparingar som för grävmaskinerna. Ofta rör de sig om relativt stora modeller.

Tabell 18 Hybridhjullastare

Tillverkare	Modell	Lanserad	Status	Drivlina	Citerad bränslebesparing
Volvo	L220	2008		Parallell	10 %
Hitachi	L110	1998			
	L130	2008			30 %
Deutz, Atlas-Weyhausen and HEINZMANN	AR60	2007/ 2012	Prototyp/ Produktion	Serie	Upp till 30 %
Kawasaki	65 Z	2011	Koncept	Parallell	35 %
John Deere	944K	2012	Planerad	Serie	30 %
	644K	2013	Planerad	Serie	20 %

Volvo har producerat en hybridhjullastare som minskade bränsleförbrukningen med 10 % med ett system där en elmotor på 51 kW och med ett maxvridmoment på 700 Nm kompletterade en dieselmotor på 260 kW (Volvo, 2008).

Kawasaki har producerat en mindre hjullastare (skopvolym 1,9 m³) där energin lagras i en kondensator och sedan utnyttjas för att driva en motor som driver fordonet (constructionequipmentguide.com 2011; CPE, 2011b; KCMA, 2011). Hitachi (2011a) har byggt en hjullastare som likaså använder kondensatorer för att mellanlagra energi.

Atlas-Weyhausen producerade en seriehybrid prototyp 2007, vilket förväntas komma i produktion från 2012. Den vanliga 51 kW dieselmotor har ersatts av en på 37 kW. Den har

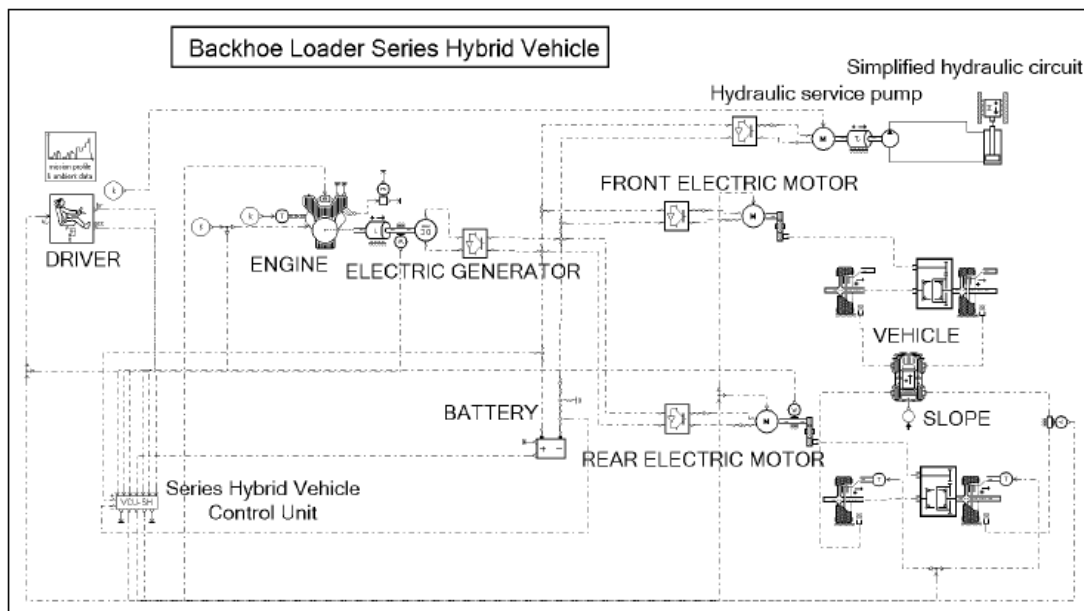
kompletterats med en elmotor som nominellt producerar 15 kW vid ett vridmoment på 100 Nm och har en toppkapacitet på 30 kW vid ett vridmoment på 200 Nm. Elmotorn/generatorn är placerad där svänghjulet annars sitter. Lastaren använder litiumjonbatterier (Brun, 2008; DailyNews, 2010).

John Deeres planerar att lansera dieselelektriska lastare under de kommande åren. De kommer att använda en optimal arbetspunkt för dieselmotorn som driver två generatorer, vilka i sin tur driver elmotorer som driver hjulen. De väntar med att använda batterier till dess prestanda blivit bättre (John Deere, 2011).

LeTourneaus hela produktserie använder dieselelektrisk drivlinor. De använder reluktansmotorer och energin lagras i kondensatorer. De hävdar att deras maskiner använder upp till 40 % mindre bränsle än konventionella hjullastare, vilket medför en kostnadsbesparing på upp till 100 dollar per timme (Geske, 2009; LeTourneau, 2011).

5.5. Grävlastare

Det italienska företaget Venieri har tagit fram en prototypgrävlastare, ET-400, som använder ett 35 kWh batteri (Forum Chantiers, 2003). Som en del av ett kunskapsöverföringsprojekt med JCB och Cambridge University som partners har Pióro et al. (2010) publicerats ett papper på simuleringar av en grävlastare med en 120 kW elektrisk generator, 150 kW elmotor och ett 50 Ah, 310 V batteri vid körning på väg ("roading") och vid lastning av en lastbil. Drivlinan för seriehybriden visas i figur 21. För lastbilslastning var cykeln liknande den som beskrivs ovan för hjullastare, seriehybriden hade för den cykeln en mycket bra bränsleekonomi (-70 %), även power-split hade bra bränsleekonomi (-40 %), medan parallellhybriden drog 10 % mer bränsle. För transportkörning hade seriehybriden däremot betydligt (70 %) sämre bränsleekonomi än konventionella fordon, då dess höga hastigheter innebar att den elektriska motorn arbetade på icke-optimala varvtal. Med parallell och power-split topologi var bränsleekonomin något bättre (up till 10 %) än för konventionella fordon (Pióro et al. 2010).



Figur 21 Använd grävlastardrivlina

5.6. Dumprar och haul trucks

Hybriddumprar och haul trucks är relativt vanliga och använder dieselektriska drivlinor. Sådana fordon har varit i bruk sedan åtminstone 1967 (CPE, 2011c). Med dieselektriska drivlinor är det möjligt att minska fordonets vikt, underhåll och driftskostnader och samtidigt öka produktiviteten (Komatsu, 2006).

Som ett exempel på vilka storleksordningar som är inblandade använder MT6300AC (ursprungligen tillverkades av Terex, men genom senare förvärv för närvarande en del av Caterpillar) en 2 800 kW fyrtakts dieselmotor, vilken driver en elektrisk AC-generator. Fordonet på 363 ton kan nå hastigheter på upp till 64 km/h fullastad (Bucyrus, 2010). Haul trucks särskiljer sig från de flesta andra fordon inte bara genom dess storlek, men också genom dess drivlina. De är tillsammans med minigrävare för närvarande de enda mobila maskinerna som kan drivas direkt från elnätet. Sådana lösningar används främst i Sydafrika (Siemens, 2006). Spänningen över nätet är 2 600 V. En fördel utöver den minskade bränsleförbrukningen är ökad produktivitet då hastigheten som fordonet kan köra uppför med ökar. Körning i motlut utgör oftast 70-80 % av den totala bränsleförbrukningen, eftersom lastbilen inte bara kör uppåt utan också bär en tung last. Vid körning nedför levererar fordonet energi till elnätet genom regenerering (Siemens, 2009).

5.7. Gaffeltruckar

El- och hybridgaffeltruckar konkurrerar med fordon drivna med bensen, diesel eller propan. De senare används på grund av dess låga utsläpp av ohälsosamma föroreningar, vilket är viktigt för fordonsanvändning som sker helt eller delvis inomhus.

Graden av elektrifiering beror på den vikt som fordonen kan transportera. Med ökad lyftkapacitet minskar förekomsten av eldrivna fordon (MHI, 2009; Ogawa et al., 2010). Kapaciteten i elektriska motviktstruckar är upp till omkring 5 000 kg (Solid & Hazardous Waste Education Center, 2011). För lägre lyftkrafter dominerar elgaffeltruckar.

Linde (2008) har utvecklat en hybrid som använder synkronmotor och litiumjonbatteri. Andra företag som har utvecklat hybridtruckar är, som framgår av tabell 19: Komatsu (Komatsu, 2008; Lu, 2009; Yoshida et al., 2009), Mitsubishi (Ogawa et al., 2010), Toyota (2011) och STILL (2011).

Tabell 19 Hybridgaffeltruckar

Tillverkare	Modell	Lanserad	Lyftkapacitet (ton)	Status	Citerad bränslebesparing
Linde	39x-series	2008	3,5	Koncept	Upp till 25 %
Komatsu	AE50	2008	1,5	Kommersiell	20 %
Mitsubishi	FD40,FD45,FD50	2009	4-5	Kommersiell	39 %
Toyota	8-series Geneo	2009	3,5	Kommersiell	50 %
Still	RX70	2011	3-3,5	Kommersiell	Upp till 11 %

Eftersom fordonen behöver en motvikt för att inte riskera att välta är vikt inte nödvändigtvis en begränsande faktor. Det gör att det är vanligt att truckarna använder blybatterier. Dessa tar dock ungefär 20 minuter att byta när de blivit urladdade, vilket gör att det finns intresse för att byta till alternativ som inte kräver lika mycket arbete med byte och laddning. Detta gäller framförallt för verksamheter där truckarna används dygnet runt, som t.ex. distributionscentraler och fabriker. I dessa fall har det därför blivit intressant att byta blybatterier mot

bränsleceller. Ett antal företag arbetar därför med att utveckla bränslecellsgaffeltruckar och har presenterat prototyper. Många forskningsprojekt pågår och mer än 1 000 system är i drift (National Renewable Energy Laboratory, 2007; McConnell 2010; US Department of Energy, 2011).

Forskningen fokuserar främst på (vätgasbaserade) polymerelektrolytsbränsleceller (National Renewable Energy Laboratory, 2007), men alternativ som alkoholbaserade bränsleceller förekommer också (Jungheinrich 2008; Pacific Material Handling Solutions 2009). Toyota visade 2005 en prototyp-bränslecellsgaffeltruck. Bränslecellerna hade en effekt på 30 kW, medan det elektriska systemet kunde leverera 20 kW. Den kunde lasta 2 500 kg och köra med en hastighet på 18 km/h (Abrahamsson, 2005). Crown (2010) certifierar för närvarande 20 av deras elektriska gaffeltrucksmodeller för bränslecellsanvändning. Linde har producerat en bränslecellsgaffeltruck baserad på deras 3-tons eltruck E30 (Oder, 2010).

5.8. Traktorer

5.8.1. Drivlinekonfiguration

Komponentelektrifiering

Genom att bara leverera ström till olika komponenter när så verkligen behövs, är det möjligt att spara bränsle. Detta kan ske genom att t.ex. enbart använda motorns fläkt när motorn är varm eller att tryckluftsbromsens kompressor drivs elektriskt oberoende av motorns varvtal (Buning, 2010; Rauch, 2010). Vidare innebär de elektriska motorernas vridmoment/varvtals-egenskaper att det är möjligt att förenkla systemen och minska kostnaderna för kraftöverföringen (Geißler et al., 2009; SAE, 2011).

Dessa förbättringar förekommer i vis mån i existerande fordon. Ytterligare utnyttjande av tillgången på elektrisk energi i form av t.ex. eldrivna kraftuttag (PTO) och handverktygsuttag är också möjliga, även om de inte förekommer i produktion ännu (Buning, 2010).

Generatorer

Ett antal förstärkta generatorer för användning i traktorer har utvecklats. John Deere använder en 20 kW AC induktionsgenerator i deras E-Premiumserie. ZF har utvecklat två generatorversioner: 50 och 70 kW. Belarus använder en 172 kW generator på deras dieselelektriska traktor. I framtiden är det möjligt att använda dessa högspänningsgeneratorer som startmotorer, men det är närvarande på konceptstadiet (Buning, 2010).

Redskapselektrifiering

För närvarande är 14 V standard för elektriciteten i traktorer (Bernhard och Schlotter, 2003). Som en följd är den effekt som kan levereras till jordbruksredskap kopplade till traktorn begränsad till omkring 1 kW ($14 \text{ V} \times 100 \text{ A} = 1\,400 \text{ W}$). Detta begränsar möjligheten att använda el för att driva, snarare än att bara kontrollera, jordbruksredskap. Om spänningen ökas skulle den överförda effekten kunna ökas och göra det möjligt att driva redskapen med el i stället för mekanisk effekt överförd via kraftuttaget. Även om det finns en standard för (elektriskt) informationsutbyte mellan traktor och redskap (ISOBUS) finns ingen sådan för elanslutningen mellan de bägge.

Vissa redskap använder den större elektriska effekten från John Deeres E-serie som nämnts ovan. Rauch (2010) har utvecklat en elektrisk version av deras AXIS gödselspridare, med en max effektförbrukning på omkring 20 kW. Genom att göra så har de lyckats öka energieffektiviteten avsevärt till 65-70%, jämfört med 45-70 för mekanisk och 15-50% hydraulisk effektförsörjning. Deras konkurrent Amazone (2009) har utvecklat en konceptspruta. Andra företag som har utvecklat elektriska redskap är John Deere som har

tagit fram en spruta och Kverneland (2009) som har presenterat en eldriven såningsmaskin, GEOseed.

Allmänna fördelar utöver ökad energieffektivitet är enklare effektdistribution, bättre feedback och ökad tillförlitlighet och diagnostiserbarhet. För gödselspridare innebär detta en mer exakt spridningsbild och mycket kortare responstid på 0,2 sekunder jämfört med 2 sekunder (Rauch, 2010).

5.8.2. Tillverkare

Tabell 20 Elektriska/hybrid traktorer

Tillverkare	Modell	Lanserad	Status	Drivlina	Citerad bränslebesparing
John Deere	Progator	2002	Prototyp	Bränslecell	
CASE IH	Pro Hybrid EECVT	2005	Koncept	Serie	
New Holland	NH2	2009	Koncept	Bränslecell	
John Deere	E-series	2009	Kommersiell	Power-split	3-5%
Belarus DE	MTS3522	2009	Prototyp	Serie	
AGCO	RoGator 1386	2010	Prototyp	Power-split	~20%

Elektrisk drivning av jordbrukstraktorer har en relativt lång bakgrundshistoria. En del av denna har rört traktorer som kopplats upp mot elnätet, dessa kommer dessa inte att behandlas i detta avsnitt, då det inte är sannolikt att framtida traktorer kommer att drivas så. International Harvester (en föregångare till Case IH) producerade en traktor som hade en 208 V AC, 10 kW generator som tillval 1954 (Buning, 2010). Några år senare, 1959, producerade Allis Chalmers en konceptbränslecellstraktor på 15 kW (Bowes, 2000). PJ Schmetz GmbH gjorde om en New Holland M135 till en seriehybrid i det s.k. Eltrac-projektet i slutet av 1990-talet (Bernhard, 2004). Mer moderna hybridtraktorer finns redovisade i tabell 20 och 21. New Holland (2009) har utvecklat en 75 kW konceptbränslecellstraktor (Niléhn, 2010). Case IH (2005) och Belarus har bägge presenterat koncept-dieselektriska traktorer. Belarus prototyp var på 234 hk och hade ett elektriskt kraftuttag (What's New in Farming, 2009).

Det mesta praktiska intresset för elektrifiering har varit i form av komponentelektrifiering och användning av elektrisk transmission till redskap (Bodria, 2010). Deeres E-premie fordon använder en högre spänning än de vanliga 14 V, vilken gör det möjligt att leverera 20 kW till redskap (Crummett, 2008; Buning, 2010; Niléhn 2010). Den kostar omkring 5 000 pund mer än konventionella versioner (Padfield, 2008). AGCO (2010) har tagit fram en självgående konceptsprutare (Elect)RoGator, för vilket drivlinan är elektrisk.

Bortsett från ovan nämnda traktorer har det också förekommit relativt många hobbyprojekt som resulterat i eltraktorer. Det har också förekommit en del användning av el för drift av små jordbruksmaskiner, till exempel för växthus och fruktträdgårdar (Cavalchini, 2010).

Tabell 21 Ytterligare detaljer för hybridtraktorer

Tillverkare	Modell	Batteristorlek (kWh)	Dieselmotor (kW)	Generator-effekt(kW)	Motor-effekt (kW)	Transmission-spänning- och ström
AGCO	ElectRo-Gator	-	330 kW			650 V
	ProGator	2.7 kg	0	67 hp		-
John Deere	E-series	-	180 hp	20	12.5	220, 380 V 300 A
	Pro Hybrid EECVT	11.5	120	50	50	456 V, DC
New Holland	NH2	-	0	88		-
Belarus	MTS3522	-	220	172	Ingen data	-

5.8.3. Academia

I Tyskland har AGCO-ägda traktortillverkaren Fendt, drivlinetillverkaren Sensortechnik Wiedemann, Fraunhoferinstitutet och universiteten i Regensburg och München (till 2002) samarbetat i MELA (Mobiler elektrisches Leistungs- und Antriebssystem) mellan 2001 och 2004. Syftet med projektet var att utveckla (dieselelektriska) hybriddrivlinor avsedda för användning inom jordbruket samt att utveckla komponenter drivna med högspänning. Sedan dess har flera universitet fortsatt forskningen (Sjazek, 2007).

Projektet resulterade i en vätskekyld permanentmagnetsmotor. Genom att vätskekyla motorn gick det att minska dess storlek med 40 %. Motorn använde sex faser och en spänning på 540 V för att begränsa behovet av stabilisering (Sjazek, 2007). Sensortechnik Wiederman har senare fortsatt utvecklingen och byggt en enhet som kan leverera 140 kW (Prankl et al., 2010)

5.9. Skördetröskor och fälthackar

Henry Parnell, designstudent vid Coventry University, skapade som examensarbete en konceptskördetröska tänkt för år 2030 åt Massey Ferguson. Den har en 65 hk (48 kW) elmotor och 700 hk (515 kW) förbränningsmotor (Farmers Guardian, 2010).

En skördetröska innehåller många komponenter, både för själva tröskningsprocessen och för att driva fordonet. Dessa brukar drivas med hjälp av mekanisk transmission och därmed i hög grad vara beroende av dieselmotorns varvtal och vridmoment. Bränsleförbrukningen kan minskas i en hybrid genom att de olika komponenterna kan styras oberoende av varandra och därmed optimeras i högre grad (Bernhard och Schlotter 2003; Kutzbach, 2000; Geißler et al., 2009). Universitetet i Hohenheim genomförde därför ett projekt för att undersöka möjligheten att ersätta den mekaniska drivlinan med en elektrisk. De utvecklade en dieselelektrisk skördetröska med en asynkronmotor vilken kunde leverera 65 kW märkeffekt och använde ett 42 V DC system för att driva små roterande enheter och servomotorer (Kutzbach 2000; Bernhard och Schlotter 2003).

Universitetet i München har utvecklat en hybridprototyp som de testades utan problem under fyra dagar under hösten 2006. De uppnådde ett högre materialflöde än en liknande konventionell tröska, trots att bredden på skärbordet var mindre för hybridprototypen (Gallmeier, 2009). De elektriska komponenterna vägda 21,9 % mer än motsvarande

hydrauliska komponenter och kostade 3,8 gånger så mycket. Kostnaden ökade med 46 000 € jämfört med en konventionell skördetröska. Kostnadsökningen var fördelad enligt följande på följande poster: 75,5 % för elektriska transformatorer (inklusive kraftelektronik), 11,4 % för skyddsåtgärder, 9,6 % för ett extra kylsystem och 3,5 % för tillbehör. Effektiviteten ökade med mellan 15,0 och 23,4 % (Gallmeier, 2009).

En elektrisk tröskcylinder har också utvecklats av John Deere. Deras cylinder har motorn inne i cylindern, vilket gör att den kan utnyttja utrymme som inte används tidigare; till skillnad från Hohenheimgruppen som hade en rotor inuti cylindern och stator utanför (Bernhard och Schlotter 2003).

Münchens tekniska universitet och Bernard Krone GmbH har i ett samarbete utvecklat en fälthack på 1,000 hk (735 kW), vilken hade 30 % lägre energiförbrukning än en konventionell fälthack (TU München, 2008).

5.10. Skogsmaskiner

5.10.1. Tillverkare

El-Forest är ett företag som grundades 2006 för att utveckla skotarehybrider. Det ägs för närvarande av grundarna, Volvo Technology Transer samt det statliga riskkapitalbolaget Fouriertransform (Fouriertransform, 2010). Det har levererat två skotare till statsägda Sveaskog (Sveaskog, 2011). Fordonet är en seriehybrid där bränsleförbrukningen minskas genom att använda en optimal verkningspunkt för motorn och regenerativ bromsning. Alla hjul styrs med individuella elmotorer (El-Forest, 2011).

John Deere har utvecklat ett koncept för skogsmaskiner som de visade vid Elmia Wood 2009. Detta använder en seriehybriddrivlina med en förenklad transmission som använder sig av två växlar. (Elmia Wood, 2009a & 2009b). I en systemteknisk kurs vid KTH 2008-2009 modellerades en hybridskotare ur åtskilliga tekniska aspekter, hur mycket bränsle den beräknades kunna spara är dock okänt (Carlander et al., 2009; Sellgren, 2009).

6. SLUTSATSER

Mobila maskiner används för många olika syften och deras utformning varierar i betydande omfattning. De drivkrafter och begränsande faktorer som finns kan därför också variera. Bland gemensamma drivkrafter och begränsningar finns:

- Elmotorns höga vridmoment vid låga varvtal är en betydande fördel för mobila maskiner som ofta är relativt långsamma. Då många accelerationer förekommer leder detta till ökad produktivitet.
- Ekonomin kan förbättras genom den ökade produktiviteten och de troligen mindre underhållskostnaderna, detta måste vägas mot de ökade komponentkostnader och en ovana vid att använda och handha hybridfordon. Det är osannolikt att entreprenörer kommer att ha någon större nytta av fordonen som grön PR.
- Hybridfordon medför minskad total miljöpåverkan och bränsleförbrukning p.g.a. fordonens ökade effektivitet. Vid plug-in beror detta mycket på vilka effekter som ökad efterfrågan på el får. Fordonen är även tystare än konventionella fordon.
- Ökad kontrollerbarhet genom snabbare respons och enklare kontroll kan beroende på arbetsform vara en stor fördel för specifika användningsområdet, t.ex. bättre hjulkontroll vid skogsbruk och ökad redskapskontroll vid jordbruk.
- Vikt är inte en lika begränsande faktor som för vägfordon. Utrymme är dock en viktig begränsande faktor då det är eftersträfvansvärt att fordonen är lika stora som konventionellt drivna fordon.

- I vissa fall kan den lokala hälsan vara en mycket stark drivkraft. I miljöer med bristande ventilation, som inomhusmiljöer och gruvor finns redan fordon med eldrivlinor.

Potentiella problem som kan uppstå vid hybridisering/elektrifiering och begränsa fordonens användning är:

- Det finns en risk att sannolikheten för bränder kan öka p.g.a. de höga spänningarna. Då risken för att dessa kommer i kontakt med lättantändligt material (t.ex. biologiskt material som rörts upp) är större än för vägfordon.
- Vid mer omfattande hybridisering kan fordonens minskande buller bli ett problem då de inte hörs och det kan finnas en ökad risk för olyckor. Detta inte minst då de rör sig i en miljö där det kan vara svårare att förutse att fordonen är verksamma än vid vägtrafik.
- De höga spänningarna och det höga energiinnehållet i elektriska lagringsmedia medför att det är viktigt att de som arbetar med fordonen har tillräckligt med kompetens för att undvika skador orsakade av elektriciteten.
- Lagstiftningen är i dagsläget ingen drivkraft för energieffektivare fordon, då lagstiftningen är på förbränningsmotornivå snarare än fordonsnivå.
- Maskinerna är utsatta för en tuffare miljö än vägfordon, bl.a. vad gäller vibration, kemisk miljö (kondens, frätande vätskor) och damm.

Gällande forskning och utveckling av fordonsmodeller samt kommersialisering av resultat gäller:

- Med undantag för vissa mindre sektorer (som gaffeltruckar) befinner sig hybridfordonen i en introduktionsfas för mobila maskiner. Många olika typer av topografier, lagringsmedier m.m. prövas. Antalet modeller på marknaden är begränsat, men ökar i rask takt.
- Tillverkare av grävmaskiner gör anspråk på att kunna minska utsläpp med upp till 40 % genom hybridisering. Detta sker främst genom att grävmaskinens överkropp roteras med hjälp av el. Det finns ett relativt begränsat antal hybridmodeller ute på marknaden. Det finns även ett fåtal helt elektriska grävmaskiner i det mindre segmentet.
- Tillverkare av hjullastare gör anspråk på att kunna minska utsläppen med upp till 35 %.
- För mycket stora fordon är dieselektriska drivlinor vanligt förekommande. Dessutom förekommer nätanslutna lösningar för gruvmaskiner, antingen genom pentografer eller genom rullspole.
- Mindre gaffeltruckar drivs sedan länge på el. Forskning och utveckling sker på hybridfordon samt bränslecellsdrivna fordon. Dessa har även introducerats på marknaden. Hybridfordonen tillverkas i det mellanstora segmentet medan bränslecellsdrivna fordon främst tillverkas för anläggningar med kontinuerlig drift där de ersätter blybatteridrivna fordon.
- Tillverkare av traktorer har dels byggt dieselektriska drivlinor, dels byggt fordon med betydligt större generatorer än hos konventionella traktorer, vilket möjligtgjort att ett ännu begränsat antal jordbruksredskap som kan drivas elektriskt har lanserats.
- Forskning pågår på elektriska komponenter för skördetröskor och fälthackar, där bl.a. tekniska lösningar för olika sorters trummor presenterats. Inga modeller finns på marknaden.

7. REFERENSER

Abrahamsson, Håkan (2005). "Toyota kör gaffeltruck med bränslecell." Ny Teknik. 12 oktober 2005. http://www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/bilar/article256129.ece (besökt 9 december 2011).

Achten, Peter A. J. (2008), "A serial hydraulic hybrid drive train for off-road vehicles." Las Vegas, Nevada: IFPE Technical Conference.

Adolfsson, Niklas och Otterborn, Mats (2008). "Pedagogiskt hjälpmedel för säkerhetsutbildning av maskinförare." Byggföretagens bransch- och arbetsgivareorganisation. 30 juni 2008.

<http://www.bygg.org/files/regionerna/bi%20mellan/0806%20Rapport%20saeker%20maskinf%20oerare.pdf> (besökt 8 mars 2011).

Advantage Environment (2009). "An Electric Hybrid for Forestry." Advantage Environment. November 2009. <http://advantage-environment.com/arbetsplatser/an-electric-hybrid-for-forestry/> (besökt 5 mars 2011).

AGCO (2010). "ElectRoGator™ concept propulsion system briefing document." AGCO. 20 januari 2010. http://www.agprofessional.com/DealerUpdate/agco_electrogator.pdf (besökt 8 mars 2011).

Ahrens, Marty (2004). "U.S. Vehicle fire trends and patterns." National Fire Protection Association. <http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/osvehicle.pdf> (besökt 19 maj 2011).

Alfredsson, Simone och Elvén, Lotta (2010). "Investeringskalkylering: En benchmarking av Volvo Construction Equipment." Karlstad University. <http://kau.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:331249> (besökt 3 november 2011).

Amazone (2009). "UX eSpray trailed sprayer - Concept study." Amazone. 2 november 2009. <http://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=14005> (besökt 15 mars 2011).

Asia Pulse News (2004). "SUMITOMO CONSTRUCTION MACHINERY TO TEST HYBRID EXCAVATOR IN '05." Asia Pulse News. 17 September 2004.

http://goliath.ecnext.com/coms2/gi_0199-767659/SUMITOMO-CONSTRUCTION-MACHINERY-TO-TEST.html (besökt 25 februari 2011).

Atlas Copco (2007). Årsredovisning

Atlas Copco (2009). Årsredovisning

Bechtold, Richard L. (1997), "Alternative Fuels Guidebook". Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers.

Bernhard, B. och Schlotter, V. R. (2003), "Electric drives for combine harvesters." Proceedings of the International Conference on Crop Harvesting and Processing, . Kentucky: <http://asae.frymulti.com/azdez.asp?JID=1&AID=15196&CID=chp2003&T=2,2003.1-7>.

Bernhard, Björn (2004). "FISITA World Automotive congress, Barcelona, 2004." Hybrid drives for off-road vehicles. <http://www.fisita.com/students/congress/SCpapers/sc26.pdf> (besökt 22 februari 2011).

Bodria, L. & Fiala, M.(2010) "Electric transmissions in our future?" Club of Bologna. december 2010.

<http://www.clubofbologna.org/ew/documents/Articolo%20BodriaFiala%2012.10.pdf> (besökt 4 mars 2011).

- Bohman, Mats (2006). On Predicting Fuel Consumption and Productivity of Wheel Loaders. Masters Thesis, Luleå, Sweden: Luleå University of Technology.
- Bowes, Danny (2000). "Experimental Tractors - Tractor technology appears to have nearly hit it's pinnacle of development." Yesterday's Tractors. <http://www.ytmag.com/articles/artint207.htm> (besökt 22 februari 2011).
- Brown, Shelley (2008). Diagnosis of the Lifetime Performance - Focus on Power-Assist Hybrid Electric Vehicle and Low-Earth-Orbit Satellite Applications. Stockholm, Sweden: Doctoral Thesis - Applied Electrochemistry, School of Chemical Science and Engineering, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Brun, Marco (2008). "Diesel Meets Electric." dSPACE Magazine 2, 2008: 26-31.
- Bucyrus (2010). "MT6300AC Electric Drive Truck." Webcite/Bucyrus. februari 2010. <http://www.webcitation.org/5oGChhU7M> (9 december 2011).
- Buning, Eckhard A. (2010), "Electric drives in agricultural machinery - approach from the tractor side." Club of Bologna, 21st Annual Meeting. 13-14 November 2010. http://www.clubofbologna.org/ew/documents/KNR_Buning.pdf (besökt 22 februari 2011).
- Burke, Andrew (2007). "R&D considerations for the performance and application." Electrochimica Acta 53, 2007: 1083-1091.
- Carlander, Erik, Tobias Haglund, Lovisa Stjernlöf, and Fredrik Holmberg (2009). "Super Single Forwarder 2009 - Förbränningsmotor, drivlina och regenerativ bromsning." KTH. 2009. http://www.kth.se/polopoly_fs/1.43988!Driveline.pdf (besökt 2011).
- Carlisle Power Transmission Products (2008), 28 februari 2008, http://www.cptbelts.com/pdf/misc/energy_loss_and_belt_efficiency.pdf, besökt 2011
- CASE CE (2009). "Hybrid drive at the forefront of Case environmental initiatives". 19 April 2009. http://www.casece.com/wps/portal/casece/aboutus/inthenewsdetail?brandsite_brand=CaseCE&brandsite_language=en&brandsite_geo=EU&contentPath=CaseCE/eu_en/aboutus/inthenews/aboutus_pr_04-09_environment (besökt 25 februari 2011).
- CAT (2011). "D7E Track-Type Tractor." CAT. 2011. <http://www.cat.com/cmms/17563146?x=7#subA0> (besökt 15 maj 2011).
- Caterpillar (2011). "Caterpillar. Technology Development". 2011. <http://www.caterpillar.com/cda/layout?x=7&m=402478&id=2531241> (besökt 28 mars 2011).
- Cavalchini, Antoniotto Guidobono (2010). "The Hybrid transmissions and their feasibility in agriculture." Club of Bologna. November 2010. http://www.clubofbologna.org/ew/documents/PPT_Cavalchini.pdf (besökt 4 mars 2011).
- Chen, Zonghai, Qin, Yan och Amine, Khalil (2009), "Redox shuttles for safer lithium-ion batteries", Electrochimica Acta 54 (24), 5605-5613
- Choi, Jaewoong, Kim, Hakgu, Yu, Seungjin och Yi, Kyongsu (2011). "Development of integrated controller for a compound hybrid excavator." Journal of Mechanical Science and Technology 25 (6), 2011: 1557-1563.
- City University London (2011). "Flywheel energy storage and transmission." City University London. 9 mars 2011. <http://www.city.ac.uk/engineering-maths/research/energy-and-transport-centre/energy-systems-and-engines-group/energy-systems-and-conversion/hybrid-vehicles/flywheel-energy-storage-and-transmission> (besökt 14 november 2011).

Cobo, Mike, Ingram, Richard och Cetinkunt, Sabri (1998). "Modeling, identification and real time control of bucket hydraulic system for a wheel type loader earth moving equipment." *Mechatronics* 7, 1998: 863-885.

Construction Hire (2009). "Construction Hire." Doosan to reveal hybrid excavator as early as 2012 . 7 April 2009. <http://production.constructionhire.com.au/products/doosan-to-reveal-hybrid-excavator-as-early-as-2012> (besökt 25 februari 2011).

constructionequipmentguide.com (2011). "Kawasaki Wheel Loaders Debut at ConExpo." [constructionequipmentguide.com](http://www.constructionequipmentguide.com). 3 februari 2011. <http://www.constructionequipmentguide.com/Kawasaki-Wheel-Loaders-Debut-at-ConExpo/15667/> (besökt 28 februari 2011).

Contractors Plant & Equipment (2011a). "Takeuchi to preview new electric mini", *Contractors Plant & Equipment* 1(3), 2011:12

Contractors Plant & Equipment (2011b). "Twin Drive mini excavator amongst Terex Construction highlights" *Contractors Plant & Equipment* 1(4), 2011:26

Contractors Plant & Equipment (2011c). "Diverse waste handlers." *Contractors Plant & Equipment*, 2(1), 2011: 14.

CPE (2011a). "Diverse waste handlers." *Contractors Plant & Equipment* (vol 2:1), 28 February 2011: 14.

—. (2011b) "Hybrid amongst new Kawasaki wheel loaders at Conexpo." *Contractors Plant & Equipment*, 28 February 2011: 5.

—. (2011c) "Komatsu celebrates production of 1000th 930E electric drive truck." *Contractors Plant & Equipment*, 28 February 2011: 5.

Crown (2010). "Crown's Fuel Cell Program Featured as "Early Market Success" at 2010 Fuel Cell Seminar & Exposition." Crown. 22 oktober 2010.

<http://news.crown.com/2010/crown%E2%80%99s-fuel-cell-program-featured-as-%E2%80%9Cearly-market-success%E2%80%9D-at-2010-fuel-cell-seminar-exposition> (besökt 9 december 2011).

Crummett, Dan (2008). "'E' Model Deere Means 'Electricity'." *Nebraska Farmer*, 17 January 2008: <http://nebraskafarmer.com/story.aspx/e/model/deere/means/electricity/15313>.

DailyNews (2009) "Case has revealed its first hybrid excavator." *DailyNews*. 22 April 2009. <http://archive.dailynews-online.com/intermat2009/demolition-recycling-and-materials-handling/case-shows-off-21tonne-prototype-excavator-with-hybrid-drive/> (besökt 25 februari 2011).

—. (2010). "AR 65 Super showcases Atlas plans for emission improvements." *DailyNews*. 2 mars 2010. <http://www.dailynews-online.com/bauma/story/maintenance-and-utility/ar-65-super-showcases-atlas-plans-for-emission-improvements> (besökt 28 mars 2011).

—. (2011) "Takeuchi launches world's first all electric mini excavator at CONEXPO-CON/AGG 2011." *DailyNews*. 2011. <http://www.previewnews-online.com/welcome/industry-news/takeuchi-launches-worlds-first-all-electric-mini-excavator/> (besökt 27 april 2011).

Direct Industry (2010). "Crawler hybrid excavator ." *Direct Industry*. <http://www.directindustry.com/prod/sunward/crawler-hybrid-excavators-br-operating-weight-56362-497134.html> (besökt 25 februari 2011).

Doosan (2009). "Doosan Infracore launches a project to develop hybrid excavator." Doosan. 5 februari 2009.

<http://www.doosan.com/en/pressRelease.do?cmd=viewPressRelease&no=20090220085433205843> (besökt februari 2011).

Doucette, Reed T. och McCulloch, Malcolm D. (2011), "A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle." *Journal of Power Sources*, 2011: 1163–1170.

Eco Log (2011). "Eco Log i Söderhamn." Eco Log. 2011. http://www.eco-log.se/sv/foretag/eco_log_i_soderhamn (besökt 6 mars, 2011).

El-Forest (2011). [El-forest.se](http://www.el-forest.se)

Elmia Wood (2009a). "John Deere introduces hybrid electric drive train concept." Elmia Wood 2009. 6 mars 2009. <http://www.elmia.se/en/wood/Press/Exhibitor-releases/John-Deere-introduces-hybrid-electric-drive-train-concept/> (besökt 2 mars 2011).

—. (2009b). "John Deere takes a stand: The future is electric." Elmia Wood. 6 maj 2009. <http://www.elmia.se/en/wood/press/fair-news/john-deere-puts-its-foot-downbrthe-future-is-electric/> (besökt 4 april 2011).

ELNA (2011). "Automotive aluminum electrolytic chip types." ELNA. 3 mars 2011. <http://www.elna.co.jp/en/capacitor/syasai.html> (besökt 28 november 2011).

Evans, Harry (2009). "Komatsu releases hybrid excavator to the world." SAE. 12 maj 2009. <http://www.sae.org/mags/sohe/6402> (besökt 25 februari 2011).

Farkas, Zsolt, Jóri, István J. och György, Kerényi (2003). "The application and modelling possibilities of CVT in tractor." 5th international multidisciplinary conference. 2003. 145-150.

Farmers Guardian (2010). "Massey Ferguson unveils combine of the future." *Farmers Guardian*. 19 augusti 2010. <http://www.farmersguardian.com/home/machinery/machinery-news/massey-ferguson-unveils-combine-of-the-future/33715.article> (accessed March 29, 2011).

Feucht, Dennis L. (2005) "Automotive Power Electronics." *AnalogZone*. 14 januari 2005. http://www.analogzone.com/col_0117.pdf (accessed April 11, 2011).

Filla, Reno (2005). "Operator and Machine Models for Dynamic Simulation of Construction Machinery." *LiU-Tek-Lic* . 2005:44.

Finpro (2010). http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/eve/documents/finpro_mobile_work_machinery_global_2011.pdf (besökt februari 2011).

Forum Chantiers (2003). "Les nouveautés 2000." *Forum Chantiers*. 4 september 2003. <http://www.forum-chantiers.com/sejtbases/forum/fc06/fc0006dos01.pdf>.

Fouriertransform (2010). "Nya generationens skogsmaskin." *Fouriertransform*. 30 juni 2010. <http://fouriertransform.se/vara-investeringar/223/el-forest-ab/> (besökt 2 mars 2011).

Frącz, Wiesław och Stachowic, Feliks (2010). "Materials recovery from used lead-acid batteries." *Buletin Stiintific*, 2010: 31-36.

Fröhlich, Hans-Georg (2010). *Durchstarten mit elektrischen Antrieben in mobilen Landmaschinen . funktionsintegrierte Drschtrummel*. <http://www.techtex->

verlag.com/fileadmin/powerworld/pdf/Beitr%C3%A4ge_2010/POW2-2010_S32-35_Durchstarten_mit.pdf (besökt 13 november 2011).

Gaines, L.L., Elgowainy, A. och Wang, M.Q. (2008), "Full Fuel-Cycle Comparison of Forklift Propulsion Systems." Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. oktober 2008. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/537.pdf> (besökt 10 november 2011).

Gallmeier, Michael (2009). "Deutsch National Bibliothek." Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. 2009. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=995844275&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=995844275.pdf (besökt 2011).

Geißler, Mike (2009). "Dieselelektrisches Antriebssystem in selbstfahrenden Landmaschinen." Fachtagung Baumaschinentechnik 2009. http://www.baumaschine.de/Portal/download.php?w=BmtT&p1=Dresden_2009&p2=thema2&n=a135_144.pdf (besökt 23 februari 2011).

Geske, Dawn M. (2009), "A diesel-electric design: LeTourneau introduces hybrid wheel loader for mining applications", Diesel Progress North American Edition.

Goldstein, Mark (2008). "Carbon Monoxide Poisoning." Journal of Emergency Nursing, 34:6, 2008: 538-542.

Goodes, Paul, Yun, Bryan Bai och Meyer, Everett (2009). "Investigation into the Detection of a Quiet Vehicle by the Blind Community and the Application of an External Noise Emitting System." SAE Technical Papers, 2009: 2009-01-2189.

Gover, James (2009), "A tutorial on Hybrid Electric Vehicles: EV, HEV, PHEV and FCEV", <http://www.midmichigansae.org/documents/DrGoverPresentationSAEApril20.pdf>

Grammatico, S., Balluchi, A., Cosoli, E., (2010), "A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles". Vehicle Power and Propulsions Conference

Grant, Casey C. (2010), "NFPA." US National Electric Vehicle Safety Standards Summit - Summary Report. <http://www.nfpa.org/assets/files/PDF/Research/RFUSNEVSSSummit.pdf>.

Gremo (2011). "Historia." <http://www.gremo.se/default.asp?ID=HISTORIA&sLang=sv-se>.

Grundfelt, Ellenor och Lundberg Fredriksson, Sophia (2009). Kostnadsanalys för utbyggnad av laddsystem samt inledande analys av några affärsmodeller. Elforsk rapport 09:113, Vattenfall.

Gustafsson, Hans (2011). "Hydraulvätskor." SP. 2011. <http://www.sp.se/km/hydraul> (besökt 19 maj 2011).

Hanna, Refaat (2009). Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. Washington D.C., USA: US NHTSA.

Hanson, Carl E., David A. Towers, and Lance D. Mesiter (2006). Transit noise and vibration impact assessment. Burlington, USA: Office of Planning and Environment Federal Transit Administration.

Haslam, R.A. (2005), "Contributing factors in construction accidents." Applied Ergonomics 36, 2005: 401-415.

Heath., R. P. G. (2007) "Seamless AMT offers efficient alternative to CVT." JSAE Annual Congress. JSAE Annual Congress, 20075013.

Hitachi Construction Machinery (2011a), "Development of a hybrid large wheel loader", <http://www.hitachi-c-m.com/global/company/csr/environment/research/loader.html>

— (2011b). "Development of battery excavators." Hitachi Construction Machinery. <http://www.hitachi-c-m.com/global/company/csr/environment/research/battery.html> (besökt 25 februari 2011).

Hofman, Theo; Steinbuch, Maarten; van Druten, Roëll och Serrarens; Alex F. A. (2009), "Design of CVT-Based Hybrid Passenger Cars", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58:2, 572-587.

Huddig (2011). "Om Huddig." <http://www.huddig.se/Show/object.asp?oid=99&lng=>.

Hui, Sun (2010). "Multi-objective optimization for hydraulic hybrid vehicle based on." Engineering Applications of Artificial Intelligence 23, 2010: 27-33.

Hui, Sun och Junqing, Jing (2010). "Research on the system configuration and energy control strategy for parallel", Automation in Construction 19, 2010: 213-220.

Hyundai (2011). "HCE at Bauma China 2010, Shanghai ." Hyundai. 31 December 2010. <http://www.hyundai-ce.com/ENGLISH/WEB/WEB0061.aspx?idx=679> (besökt 25 februari 2011).

Hyundai EDGE (2010). "HCE at CONEX Korea 2010." , <http://english.hhi.co.kr/press/PDF/edge25-web.pdf> (besökt 25 februari 2011).

Häglund, Gugge, Lindgren, Magnus, Enghag, Olof, Lagerkvist Tolke, Camilla, Öberg, Arne och Hammarqvist, Jarl (2010). "Regeringsuppdrag att främja sparsam körning med arbetsmaskiner." Trafikverket. 9 februari 2010. http://www.trafikverket.se/PageFiles/21524/ru_rapporten_tryck.pdf (besökt 7 mars 2011).

Inoue, Hiroaki (2008). "Introduction of PC200-8 Hybrid Hydraulic Excavators." Komatsu Technical Report (Komatsu Technical Report) 54, no. 161 (2008): 1-8.

International Construction (2009). "International Construction." Case hybrid concept revealed . 15 april 2009. <http://www.khl.com/magazines/international-construction/detail/item35214/> (besökt 22 februari 2011).

Ivanov, Nickolay, Copley, David och Tyurina, Natalia (2008), "Prediction of exterior noise in earth-moving machines." 15th International Congress on Sound and Vibration. Daejeon, Korea: ICSV, 2008. 966-973.

Johansson, Martin (2010). Säkerhetsaspekter vid laddning av elfordon innehållande litium-jon ackumulatörer. Luleå: Luleå tekniska universitet.

John Deere (2011), "944K & 644K Diesel/Electric Hybrid Loaders", <http://www.forconstructionpros.com/product/10243562/john-deere-construction-and-forestry-division-944k-644k-diesel-electric-hybrid-loaders>

Juda, Zdzislaw (2006). "Ultracapacitors as an advanced energy source for braking energy recovery in electric vehicles." Environment Protection Engineering 32 (1).

Jungheinrich (2008). "Jungheinrich presents the study of a direct methanol fuel cell for industrial trucks. 27 maj 2008. <http://www.jungheinrich.com/en/com/index-de/presse/press-releases/all-news/press/774.html> (besökt 15 april 2011).

Kagoshima, Masayuki, Komiyama, Masayuki, Nanjo, Takao och Tsutsui, Akira (2007). "Development of New Hybrid Excavator." Kobelco Technology Review, 27, 2007: 39-42.

- Kalmar Industries (2011). "Om Kalmar." Kalmar Industries. 2011.
<http://www.kalmarind.se/show.php?id=2101>.
- KCMA (2011). 65Z HYBRID Wheel Loader.
<http://www.forconstructionpros.com/product/10226329/kcma-corporation-65z-hybrid-wheel-loader>
- Kimming, Marie, and Cecilia Sundberg. (2011). "A simplified approach to marginal electricity production in life cycle assessment" (opubliserad).
- Kobelco (2006). "Prototype HYBRID excavator to be exhibited at INTERMAT 2006."
 Kobelco. 18 April 2006. <http://www.kobelco-kenki.co.jp/english/corporateinfo/news/2006/apr18.html> (besökt 25 februari 2011).
- Komatsu (2006) "Siemens cooperates with Komatsu on Drive Systems for Mining Haul Trucks." Komatsu. 2 November 2006.
<http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2006110214270222514.html> (besökt 9 november 2011).
- . (2008a). "AE50 Hybrid Electric Lift Truck Receives Minister's Award for Energy-Saving Machinery." Komatsu. <http://www.komatsu.com/ce/currenttopics/v08214/index.html> (besökt 9 december 2011).
- . (2008b). "Komatsu Introduces the World's First Hybrid." Komatsu. 2008.
<http://www.komatsu.com/CompanyInfo/csr/2008/pdf/04.pdf> (besökt 25 februari 2011).
- . (2010a) "Business Results for Three and Six Months ended September 30, 2010 and Tasks and Projection for FY2010 ending March 31, 2011." Komatsu. 28 oktober 2010.
<http://www.komatsu.com/CompanyInfo/ir/results/2011032q/presentation.pdf> (besökt 15 mars 2011).
- . (2010b) "Komatsu Ready for Worldwide Launches of New HB205 and HB215LC Hybrid Hydraulic Excavators". Komatsu. 29 november 2010.
<http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2010112911374014646.html> (besökt 25 februari 2011).
- . (2011a) "Consolidated Business Results for Nine Months of the Fiscal Year Ending." Komatsu. 27 januari 2011.
<http://www.komatsu.com/CompanyInfo/ir/library/financial/pdf/1103q3.pdf> (besökt 25 februari 2011).
- . (2011b) . "Making Inroads in Hybrid Technology to Power the Future." Komatsu.
<http://www.komatsu.com/ce/highlights/v09214/index.html> (besökt 24 oktober 2011).
- Komatsu Forest (2011). "About Komatsu Forest." Komatsu Forest. 2011.
<http://www.komatsuforest.com/default.aspx?id=1166>.
- Korane, Kenneth J. (2009) "Hybrid Drives for Construction Equipment."
 MachineDesign.com. 7 juli 2009. <http://machinedesign.com/article/hybrid-drives-for-construction-equipment-0707> (accessed March 15, 2011).
- Krasenbrink, A. Och Dobranskyte-Niskota, A. (2009), "2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC." European Commission . 30 juni 2009. 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC (besökt 16 mars 2011).

Kutzbach, Heinz Dieter (2000). "Einsatzverhalten stufenloser elektrischer Wandler in Mähreschern." Universität Hohenheim. 2000. <https://www.uni-hohenheim.de/1597.html?typo3state=projects&lsfid=1304>

Kverneland (2009). "Electric drive GEOseed Offers New Opportunities." 15 september 2009.

Kwon, Tae-suk, et al (2008). "Power control algorithm for hybrid excavator with super capacitor." Industry Applications Society Annual Meeting. Edmonton, Canada, 1-8.

Lang, Kevin R. (2000), "Continuously Variable Transmissions - An Overview of CVT Research Past, Present, and Future." Lasercannon.com. 12 May 2000. <http://www.lasercannon.com/Murano/Files/cvt.pdf> (besökt 18 maj 2011).

LeTourneau (2011), "LeTourneau hybrid loader with LINCS II control", <http://heg.baumpub.com/products/6988/letourneau-hybrid-loader-with-lincs-ii-control>

Lin, Tianliang, Wang, Qingfeng, Hu, Baozan och Gong, Wen (2010). "Development of hybrid powered hydraulic construction machinery." Automation in Construction, 11-19.

Lin, Tianliang, Wang, Qingfeng, Hu, Baozan och Gong, Wen (2010). "Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators." Automation in Construction 19, 1016–1026.

Lin, Xiao, Pan, Shuang-xia och Wang, Dong-yun (2009). "Dynamic simulation and optimal control strategy for a parallel hybrid hydraulic excavator." Journal of Zhejiang University Science A 9(5), 624-632.

Linde Material Handling (2008), "Hybrid recommended for use in trucks." Linde Material Handling. 26 maj 2008. http://www.linde-mh.com/en/main_page/news/pressreleases/pressreleases_1_81.jsp (besökt 2 mars 2011).

Lindgren, Magnus (2007). A methodology for estimating annual fuel consumption and emissions from non-road mobile machinery. Uppsala: SLU, 2007.

Lindgren, Magnus (2007), Optimal measures in order to reduce total emissions from non-road mobile machinery in a national economic perspective - Annual emissions from the non-road mobile machinery sector in Sweden for 2006 to 2020. Uppsala SLU, 2007

Lindgren, Magnus, Gunnar Larsson, and Per-Anders Hansson (2010). "Evaluation of factors influencing emissions from tractors and construction equipment during realistic work operations using diesel fuel and bio-fuels as substitute." Biosystems Engineering, 2010: 123-130.

London (2006). "The control of dust and emissions from construction and demolition Best Practice Guidance". http://static.london.gov.uk/mayor/environment/air_quality/docs/construction-dust-bpg.pdf

Lu, Tina (2009). "Tianli and Komatsu Held Promotion Conference of New Hybrid Forklifts." Forklift Online. 20 maj 2009. http://www.forkliftnet.com/news/html/newshtml/news_1514.html.

McConnell, Vicki P. (2010). "Fuel cells in forklifts extend." Fuel Cell Bulletin, 2010: 12-19.

MHI (2009). "MHI Markets World's First Engine/Battery Hybrid Forklift Trucks." Mitsubishi Heavy Industries. 5 oktober 2009. <http://www.mhi.co.jp/en/news/story/0910051316.html> (besökt 9 december 2011).

Miller, Stan (2007). "AQMD Hydraulic Hybrid Vehicle Forum and Technical Roundtable." AQMD. 15 november 2007.

<http://www.aqmd.gov/tao/conferencesworkshops/HydraulicHybridForum/MillerSlides.pdf>
(besökt 20 november 2011).

Minav, Tatiana (2009). "The effect of a permanent magnet synchronous machine in the electric energy recovery system's efficiency in a hydraulic forklift." Prizztech. 13 November 2009. <http://www.prizz.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=2&id=430&sid=726> (besökt 15 november 2011).

Molari, G. och Sedoni, E (2008). "Experimental evaluation of power losses in a power-shift agricultural tractor transmission." Biosystems Engineering, 177-183.

Naoi, Katsuhiko och Simon, Patrice (2008). "New Materials and New Configurations for Advanced Electrochemical Capacitors." Journal of The Electrochemical Society 17 (1), 34-37.

NASDAQ Commodities (2011). NASDAQ Commodities. 10 november 2011. <http://www.nasdaqomxcommodities.com/marketinfo/powersystemdata/> (besökt 10 november 2011).

National Renewable Energy Laboratory (2007). "Energy Markets: Fuel Cells for Material Handling Equipment." Nuvera Fuel Cells. June 2007. http://www.nuvera.com/pdf/Early_Markets-Forklifts.pdf (besökt 9 december 2011).

New Holland (2009). "NH2." New Holland. http://agriculture.newholland.com/PublishingImages/cnhimg/we/Hydrogen/NH2_90014_INB.pdf (besökt 2 mars 2011).

Nguyen, John (2005). "Performance of Phosphate Lithium-Ion Batteries in Motive Applications." Battcon Stationary Battery Conference. 2005. <http://www.battcon.com/PapersFinal2005/NguyenPaper2005.pdf> (besökt 29 april 2011).

Niléhn, Anders (2010). "Trög utveckling för energieffektiva traktorer." Lantbrukets affärer, 2 December 2010: <http://www.lantbruketsaffarer.se/tabid/1284/ItemID/492/View/Details/AMID/3660/Default.aspx>.

NYC (2004), "Use of Ultra Low Sulfur Diesel Fuel by Nonroad Vehicles", <http://www.nyc.gov/html/dep/html/news/lowsulfur.shtml>

Ochiai, Masami och Ryu, Shohei (2008). "Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008 Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008." HYBRID IN CONSTRUCTION MACHINERY. 18 September 2008. <http://www.jfps.jp/proceedings/toyama2008/pdf/k-6.pdf>.

Oder, Heike (2010). "Linde MH delivers first trucks with fuel cells." Linde Material Handling. 20 januari 2010. http://www.linde-mh.com/en/main_page/news/pressreleases/pressreleases_1_512.jsp.

Ogawa, Kiyomitsu, Futahashi, Kensuke, Teshima, Teppei och Akahane, Fumihiro (2010). "Development of the World's First Engine/Battery Hybrid Forklift Truck." Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 47:1, 2010: 46-50.

Pacific Material Handling Solutions (2009). "Fuel Cells for Forklifts." Pacific Material Handling Solutions. 19 september 2009. <http://www.pmhsi.com/images/oorja/OorjaPac-GreenPaper.pdf> (besökt 9 december 2011).

- Padfield, Emily (2008). "Deere's E-Premium range available from spring 2009." *Farmers Weekly*, 12 december 2008: <http://www.fwi.co.uk/Articles/2008/12/12/113456/Deere39s-E-Premium-range-available-from-spring-2009.htm>.
- Pedchenko, Alexander och Barth, Eric J. (2009). "Design and validation of a high energy density elastic accumulator using polyurethane." *ASME Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power & Motion Control*.
- Pióro, D.; Shepherd, J., J. och Maciejowski, J. M. (2010), "Simulation and analysis of powertrain hybridisation for construction equipment." *Int. J. Electric and Hybrid Vehicles* 2:3, 2010: 240-258.
- Poirier, Sylvie, Lacroix, Roger och Ouellette, Sylvain (2008). "The "SCOOP" on the world's first hybrid mining loader." *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1-9.
- Prankl, H., Nadlinger, M., Demmelmayr, F., Schrödl, M., Kalteis, T. och Colle, G. (2010). "Mobile Electric Power Supply for Agricultural Machinery and Implements." *International Conference on Agricultural Engineering*. Clermont-Ferrand, France, 1-10.
- Ralopoulos, C.D och Giakoumis, E.G. (2009). *Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis*. Springer, London
- Rauch, Norbert (2010). "Electric drives in agricultural machinery - Experiences and visions of an implement manufacturer." *Club of Bologna*. 13 november 2010. http://www.clubofbologna.org/ew/documents/PPT_Rauch.pdf (besökt 4 mars 2011).
- Rottne Industri (2011). "Företaget." *Rottne Industri*. <http://www.rottne.com/se/>.
- Ryu, I.H., Kim, D.C. och Kim, K.U. (2003), "Power Efficiency Characteristics of a Tractor Drive Train." *Transactions of the ASAE* 46 (6), 1481–1486.
- SAE (2011). "Electromechanical drivetrain for tractors trialed." *SAE*. 29 juli 2011. <http://ev.sae.org/article/10062> (besökt 8 december 2011).
- SANY (2010). "Sany's First Electric Excavator Rolled Off the Production Line." *SANY*. 9 December 2010. http://www.sanygroup.com/group/en-us/media/22485_for_news_text.htm (besökt 25 februari 2011).
- SCB (2011). *Elförsörjning månadsvis – Statistiska centralbyrån*. www.scb.se/Pages/TablesAndChart___52958.aspx
- Sellgren, Ulf (2009). "Super Single Forwarder hybrid engineering - Systems Engineering project 2009-2010." *KTH*. http://www.kth.se/polopoly_fs/1.59720!SSFproject2009.pdf (besökt 2011).
- Shukla, A. K. och Prem Kumar, T. (2008), *Materials for next-generation lithium batteries*, *Current Science* 94(3), 314-331
- Siemens (2006). "Who's using trolley assist today." *Siemens*. 15 augusti 2006. http://www.sea.siemens.com/us/Industry_Solutions/Mining/mining-solutions/Pages/Trolley-Assist-Users.aspx (besökt 9 december 2011).
- . (2009) "Boost your productivity with Trolley Assist." *Siemens*. 12 augusti 2009. http://www.sea.siemens.com/us/Industry_Solutions/Mining/mining-solutions/Pages/Trolley-Assist-Haul-Trucks.aspx (besökt 8 mars 2011).
- Simpson, Sarah. "Didn't Hear It Coming." *Scientific American*, August 2008: 22-23.

Sjazek, A. (2007) "Motivation und Konzepte zum Einsatz elektrischer Antriebstechnik im Ackerschlepper am Beispiel MELA." (Tagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen), 2007: 97-105.

Solid & Hazardous Waste Education Center (2011)
"http://www4.uwm.edu/Dept/shwec/publications/cabinet/p2/Forklifts1.pdf." University of Wisconsin, Solid & Hazardous Waste Education Center .
http://www4.uwm.edu/Dept/shwec/publications/cabinet/p2/Forklifts1.pdf (besökt 7 mars 2011).

SPBI (2011). Priser & skatter. 10 november <http://spbi.se/statistik/priser> (besökt 10 november 2011).

STILL (2011). "New STILL HYBRID Lift Truck: Start of Production." STILL. 18 februari 2011. <http://www.still.co.uk/3495+M55406b6ea18.0.0.html>.

Sullivan, J. L., and Gaines. L. (2010), "A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs". Chicago, USA: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory.

Sunward (2010). "First Hybrid Excavator in China Independently Innovated by SUNWARD Rolled off the Line." Sunward. 2 September 2010.
<http://www.sunward.com.cn/english/aboutus/20100902144926.htm> (besökt 25 februari 2011).

Sveaskog (2011). "Sveaskog's second El-forest in operation." Sveaskog. 14 januari 2011.
<http://www.sveaskog.se/en/Press-and-news/News/2011/Sveaskogs-second-El-forest-in-operation/> (besökt 2 mars 2011).

Svetruck (2011). "When Svetruck begun in 1977 ..." Svetruck.
<http://www.svetruck.se/AboutSvetruck/tabid/128/Default.aspx>.

Szczesny, Joseph (2010). "Military sees big role for hybrid, electric vehicles." The Oakland Press. 8 October 2010.
<http://www.theoaklandpress.com/articles/2010/10/08/business/doc4cad0bfc6a3962969606.txt> (besökt April 6, 2011).

Tabei, Mitsuhiro (2008). "Hitachi Construction Machinery (Europe) NV DUJAT Japan Update on October 30, 2008." Dujat. 19 November 2008.
http://www.dujat.nl/PDFdocs/DJU08_Presentation_Tabei.pdf (besökt 28 mars, 2011).

Thuring, Patrik (2008). "LTH (Master Thesis)." Model Predictive Control Based Energy Management Algorithm for a Hybrid Excavator. n.d.
<http://www3.control.lth.se/documents/2008/5825.pdf>.

Tikhonov, K., and V. R. Koch (2006). "Li-ion Battery Electrolytes Designed For a Wide Temperature Range." Covalent Associates. 24 April 2006.
<http://www.covalentassociates.com/Li-ion%20Battery%20Electrolytes%20Designed%20For%20a%20Wide%20Temperature%20Range.pdf> (besökt 14 november 2011).

Tolbert, Leon M. och Peng, Fang Z. (1998), "Multilevel Inverters for Electric Vehicle Applications", WPET '98, Dearborn, Michigan, October 22-23, 1998, pp. 79-84.

Toyota Industries (2011). "Diesel-Powerd Hybrid Forklift 88-7FD 3.5ton." Toyota Industries.
http://www.toyota-industries.com/csr/environment/product/eco5_6.html.

TU München (2008). "Wie ein Elektromotor selbstfahrende Arbeitsmaschinen effizienter macht",

[http://www.wzw.tum.de/index.php?id=185&L=0&tx_ttnews\[tt_news\]=170&cHash=8c5199cb22e91113e3b84a98c9b76afb](http://www.wzw.tum.de/index.php?id=185&L=0&tx_ttnews[tt_news]=170&cHash=8c5199cb22e91113e3b84a98c9b76afb)

Tytgat, Jan (2009). Li-ion and NiMH battery recycling at Umicore. 23 June 2009.

<http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=li-ion%20and%20nimh%20battery%20recycling%20at%20umicore&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.smart-systems-integration.org%2Fpublic%2Felectric-vehicle%2Fbattery-workshop-documents%2Fpresentations%2FJan> (accessed November 14, 2011).

US Department of Energy (2011). "Early Markets: Fuel Cells for Material Handling Equipment." US Department of Energy. 11 februari 2011.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/pdfs/early_markets_forklifts.pdf

US Fire Administration (2006). "Highway Vehicle Fires." US Fire Administration. 27 October 2006. <http://www.usfa.dhs.gov/downloads/pdf/statistics/v2i4-508.pdf> (accessed April 12, 2011).

van den Bossche, Peter, van Mulders, Frederik, van Mierlo, Joeri och Timmermans, Jean-Marc. (2008) "The Evolving Standardization Landscape for Electrically Propelled Vehicles." *The World Electric Vehicle Journal* 2 (4), 2008: 41-48.

Volvo (2008). "Volvo Wheel Loader L220F Hybrid." Volvo. 12 mars 2008.

http://www.volvo.com/nr/rdonlyres/064a91d5-18b4-4bb0-8111-3eb4d259cbbd/0/brochurehybridloader_21a1004471_200802.pdf (besökt 16 mars 2011).

Wang, Dongyun, Cheng Guan, Shuangxia Pan, Minjie Zhang, and Lin Xiao. "Performance analysis of hydraulic excavator powertrain hybridization." *Automation in Construction*, 2009: 249-257.

Wang, Dongyun, Xiao Lin, and Yu Zhang (2011). "Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm." *Automation in Construction*, 2011: 581-587.

Wenige, R., M. Niemann, U. Heider, M. Jungnitz, and V. Hilarius (1998). "Liquid electrolyte systems for advanced lithium batteries." *Chemical Engineering Research Information Center*. 30 June 1998. <http://www.cheric.org/PDF/Symposium/S-J2-0063.pdf> (besökt 14 november 2011).

Wetterberg, Christian, Roger Magnusson, Magnus Lindgren, and Stefan Åström. *Engine exhaust gas emissions from non-road mobile machinery equipped with diesel engines* (2007). Report, Uppsala: SLU, 2007:03.

What's New in Farming (2009). "Belarus: Silver medal for 230hp diesel-electric tractor". 22 November 2009. <http://www.wnif.co.uk/articles/359/1/Belarus-Silver-medal-for-230hp-diesel-electric-tractor/Page1.html> (accessed March 2, 2011).

White, Stephen (2010). "Hyundai to break through \$3 billion sales barrier."

ConstructionWeekOnline.com. 11 november 2010.

<http://www.constructionweekonline.com/article-10126-hyundai-to-break-through-3-billion-sales-barrier/> (besökt 25 februari 2011).

Wilkins, Becca (2008). "Digging the dirt: hybrid technology in the earthmoving equipment sector." *International Construction*. 16 december 2008.

<http://www.khl.com/magazines/international-construction/detail/item29803/Digging-the-dirt-hybrid-technology-in-the-earthmoving-equipment-sector/> (besökt 11 november 2011).

www.ratsit.se (2011). <http://www.ratsit.se> (besökt 2011).

Xiao, Qing, Wang, Qingfeng och Zhang, Yanting (2008), "Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator." *Automation in Construction* 17, 361-367.

Yoshida, Masashi, Tsukamoto, Yasuo, Matsuda, Tsuyoshi, Dougan, Yoshihiro och Ueno, Kazunori (2009). "Introducing Electric-powered Forklift Truck." Komatsu. 20 januari 2009. http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/159-06_E.pdf (besökt 9 december 2011).

Zeraoulia, Mounir, El Hachemi Benbouzid, Mohamed och Diallo, Demba (2006). "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study." *IEEE Transactions on vehicular technology* 55:6, 1756-1764.

Öhgren, Per, and Svante Törnquist (2010). *Analys av möjligheten för kommuner att införa miljözoner för olika typer av fordon*. Stockholm: Transportstyrelsen.

8. INDEX

-A-

aktuatorer

antal, 11

typ, 12

användning

grävmaskiner, 13

avfallshantering, 9

-B-

backhoe loaders

hybrid, 47

batterier, 24

blybatterier, 24

Li-Ion, 24

NiMH-batterier, 24

brandrisk, 32

bränsleceller, 23

bulldozers, 13

hybrid, 45

buller, 32

byggsektorn, 9

-C-

companies

AGCO, 50

John Deere, 50

Linde, 48

crawlers. *See* continuous tracks

-D-

dieselektrisk drivlina, 18

Dieselmotorer, 26

drivkrafter, 31

drivlina

grävmaskin, 42

drivlinekonfigurationer

power-split, 21

serie, 20

drivlinekonfigurationer,

20

parallel, 20

-E-

ekonomi, 11, 34

elektrisk motor

temperaturberoende, 27

emission test cycles

NRTC, 40

energianvändning, 39

energitäthet, 23

-F-

fälthackar, 16

fartyg, 8

förbränningsmotorer, 26

fordonsdesign, 11, 38

företag

Atlas Copco, 10

Case CE, 44

Doosan, 44

Dynapac, 10

Ecolog, 10

El-forest, 52

Gremo, 10

Hitachi, 46

Huddig, 10

Hyundai, 44

John Deere, 46, 52

Kalmar Industries, 10

Kawasaki, 46

Kobelco, 44

Komatsu, 42, 44

Forest, 10

New Holland, 44

Rottne Industri, 10

Sandvik, 10

Sumitomo, 44

Sunward, 44

Svetruck, 10

Väderstad, 10

Volvo, 10, 46, 52

försäljning, 10

frihetsgrader, 12

-G-

gaffeltruckar, 15

hybrid/elektriska, 48

generatorer, 49

grävlastare, 15

grävmaskiner, 12

gruvdrift, 9

-H-

haul trucks

hybrid, 47

HB205, 44

HB215LC, 44

hjulastare, 14

hydraulics, 31

hydrauliska

ackumulatorer, 23

-I-

Isobus. *See* Standards:ISO 11783

-J-

jordbruk, 8
tillverkning, 10
jordbruksredskap
elektrifiering, 49

-K-

katalysatorer, 26
komponenter
elektrifiering, traktorer,
49
standardisering, 39
kontrollerbarhet, 37

-L-

laddstandarder, 22
lagstiftning, 39
2004/26/EG, 8
2006/42/EG, 40
94/9/EC, 33
AFS 2008
3, 40
larvband, 11
Lifespan, 23
logistik, 9
tillverkning, 10

-M-

Magne Charge. *See*
Standards:SAE J1773
mänsklig hälsa, 31
militärfordon, 8
miljöfaktorer, 40

-O-

olyckor, 33
elektriska, 33

-P-

PTO. *See* Power take-off

-S-

skogsbruk, 8
tillverkning, 10
skördare, 17
skördetröskor, 16
skotare, 17
start/stopp, 19
superkondensatorer, 25
svänghjul, 25

-T-

tåg, 8
toxicitet, 33
toxicity, 31

tractors

hybrid, 49
traktion, 11, 12
traktorer, 15
transienta effekter, 26
transienter, 12
transportation, 14

-U-

utsläpp
CO, 10, 32
CO₂, 10
HC, 10
lokala, 31
NOX, 26
NO_x, 10
partiklar, 10
PM, 10
SO_x, 10

-V-

varvtalsberoende, 37
verkningsgrad
elektriska motorer, 27
förbränningsmotor, 18
volym, 38

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000