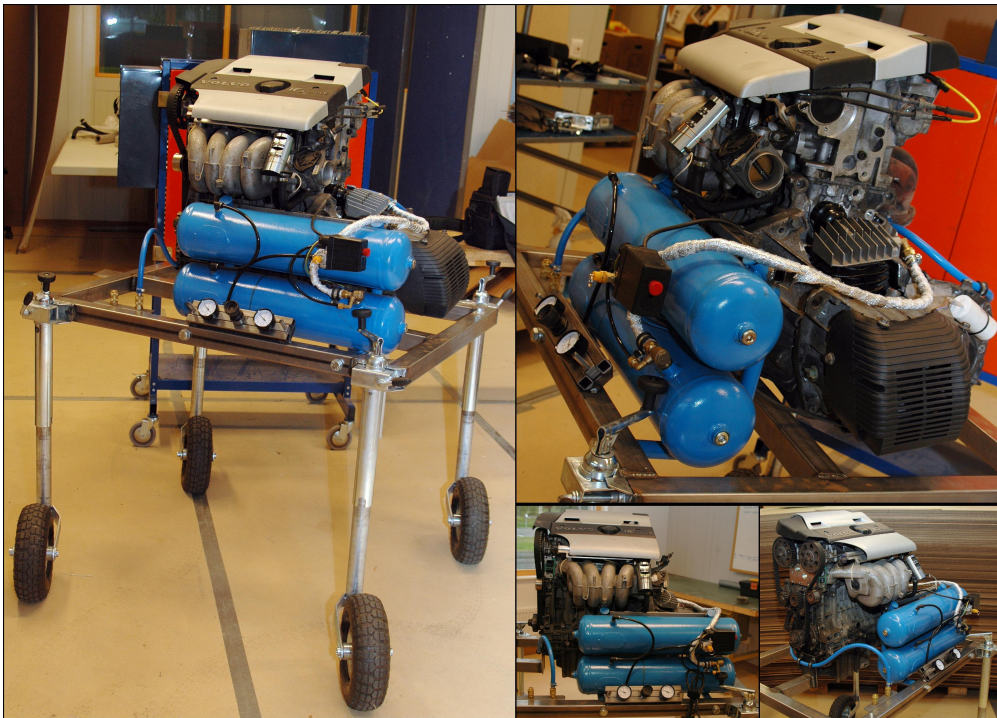


## Analys och utveckling av drivsystemoberoende energiåtervinning



Ramin Gilani

Högskoleingenjörsexamen  
Bilsystemteknik

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för teknikvetenskap och matematik

## Förord

Priset på energi som vi förbrukar är väldigt högt oavsett om det är elektricitet, bensin eller någon annan form av bränsle. Tillsammans med den ökade befolkningen och varje individs stegrande energiförbrukning finns det ingenting som uttyder på att den senare tidens energiprisutveckling inte kommer att fortsätta även i framtiden.

Energipriset tillsammans med samhällets ökade miljömedvetenhet är två stora faktorer som föranleder utvecklingen inom fordon, bygg, transport, kemi och skogsindustrin för att nämna några. Energi, miljö och nytänk är på allas läppar idag och är en hetare industri än någonsin.

Inom bilindustrin började fokus på lägre bränsleförbrukning och koldioxidutsläpp eskalera allt mer under 80-talet och markant under 1990–2000 talet<sup>1</sup>, vilket senare visade sig vara en trend som är här för att stanna. En absolut avgörande satsning för företagens utveckling i form av marknadsandel. Ett bra exempel är Toyotas tidiga satsning Prius som fick företaget att gå om General motor som världsledande. Många företag är därför väldigt lyhörda och satsar på energibesparande teknik.

Detta examensarbete behandlar energiåtervinning i fordonsapplikationer där ett pneumatiskt energiåtervinningssystem ska utvecklats. Med detta examensarbete knyter jag ihop säcken på min högskoleingenjörsutbildning inom bilsystemteknik och ger läsaren en möjlighet att bilda sig en uppfattning om mina färdigheter i att lösa problem och tänka ingenjörsmässigt samt genomföra ett självständigt arbete. För detta formulerade jag detta examensprojekt så att i genomförandet kunna förenkla komplexa problemställningar genom att bland annat konstruera relevanta modeller. Intentionen vid formulering av detta examensprojekt ”analys och utveckling av drivsystemsberoende energiåtervinning” var att både fördjupa mina kunskaper inom energi som jag har ett brinnande intresse för samt inkludera så många moment som ingick i min utbildning som möjligt.

Idén att återvinna energi pneumatiskt dök upp då jag sökte ett alternativ till energiåtervinning då den dåvarande lösningen var och är fortfarande under sekretess och aktuell för patentering.

Jag vill ta tillfället i akt för att tacka min examinator Ove Isaksson vid Luleå tekniska universitet för den handledning samt verkstad och förvaringslokal som han

---

<sup>1</sup>[www.toyota.com/esq/articles/2010/Lithium\\_Ion\\_Battery.html](http://www.toyota.com/esq/articles/2010/Lithium_Ion_Battery.html) -(2010-10-02)

bidragit med. Vill även tacka Arvidsjaur kommun och lärcentra med Anne Åberg och Mikael Renberg för att dem aktivt stöttat mitt projekt och även finansierade med bland annat hyrbilar. Jag vill även rikta ett tack till forskningsingenjör Martin Lund för hjälpen med den smarta anslutningen till luftmotorn. Slutligen vill jag rikta ett stort tack till mina sponsorer Almi företagspartner i Luleå, LTU-Innovation i Luleå, Norrbottens bildemontering i Älvsbyn, Jula i Luleå, Ojanperä i Arvidsjaur och Järnia i Arvidsjaur för finansiering och material.

Ramin Gilani  
Luleå, Januari 06, 2011

## Sammanfattning

Drivsystemoberoende energiåtervinning är kärnan i detta examensarbete. Målet har varit att analysera pneumatikens potential att återvinna energi och agera som en gemensam plattform för alla fordonstillverkare oavsett inriktning på drivsystem. En kompressor har används för energiformsombildning, lufttankar för energilagring och luftmotor för återombildning till kinetisk energi. Utgångspunkten för systemet har varit att utföra så stora delar av bromsarbetet som möjligt. Hållfasthetsberäkningarna styrker att måttlig energiåtervinning är möjlig utan anpassning av belastade komponenter, så som drivaxlar. Drivaxlarna kan hantera en extra belastning upp till den belastning de utsätts för av motorn. Dock är en separat analys av drivknutarna nödvändig. Kompressorn ska lämpligast placeras nära utgående axel på växellådan. Detta både med hänsyn till utrymme och också minskad sträcka för transporter av energi. En inbromsning är likgiltigt med att göra sig av med dyrt förvärvat rörelseenergi. Förekommer det en inbromsning så är det bevisat att ett pneumatiskt energiåtervinningssystem kan utföra delar av bromsarbetet och då lagra energin.

Endast fordon med ett delvis eller helt elektriskt drivsystem återvinner bromsenergi i fordon idag men faktum är att långt ifrån alla fordon ute i trafik är elektriskt drivna på grund av bland annat tekniska och infrastrukturella begränsningar. För majoriteten av fordonsparken som inte är elektriska eller elektriska hybrider saknas motsvarighet till den elektriska lösningen för energiåtervinning. En drivsystemoberoende lösning talar för goda framtidsutsikter då en eventuell övergång till andra drivsystem inte skulle resultera i något bakslag för tekniken. En positiv bieffekt av systemets ingrepp är mindre slitage på bromsarna men detta är trots allt bara en bieffekt. En lägre energiförbrukning gynnar både miljö och plånbok oavsett om det är bensin, diesel, elektricitet eller någon annan typ av energi fordonet använder som drivmedel. Marknadsundersökningen som genomförts talar för att tekniken ligger helt rätt i tid och har goda möjligheter att tas emot väl av marknaden.

## **Abstract**

Limitations in energy recovery technology require extended research for development of existing and alternative solutions. This thesis project has treated valuing pneumatic drivetrain independent energy recovery system as a potential solution. The prototype built during this project uses a piston compressor to transform kinetic energy into compressed air. The compressed air was then stored in two air tanks and transformed into kinetic energy with an air motor on demand. The prototype was built on a rig using a high power electrical engine to simulate energy input from the wheels during braking. The air motor was then used to rotate a Volvo S40 engine simulating energy output to the wheels. To further illustrate how the technology can be implemented in vehicles and to emphasize the variety of pneumatic energy recovery solutions a 3D CAD model was designed and other components was reflected. Such as using a screw compressor instead of piston and also using the compressor as a motor reducing the number of components optimizing the system. The system storing the kinetic energy does not mean that the vehicle can manage without an ordinary brake system. The regenerative braking effect rapidly reduces at lower speeds; therefore friction brake is still required in order to bring the vehicle to a complete halt.

Analyses of strength of strained components acknowledge that limited energy recovery is possible without redimensioning the driveshaft 's. The limitation is regulated by the original dimension for engine load, with subject to the CV joint. Optimum positioning of the compressor due to the limited space in a modern vehicle is behind the gearbox in conjunction with the gearbox outgoing pinion for short energy transportation.

Electrical energy recovery system is the solution with the highest potential on the market today but electrical vehicles covers just a fraction of the vehicle industry doe to technical and infrastructural limitations. Drivetrain independent pneumatic, hydraulic or mechanical energy recovery systems lay the foundation of a common ground for all vehicles and other waste energy machinery to use one energy recovery technology. The market research indicates that this type of technology is up-to-the-minute.

© 2011 Ramin Gilani

Luleå 2011

Department of Applied Physics and Mechanical Engineering  
Division of Functional Product Development  
Luleå University of Technology  
SE-971 87 Luleå  
SWEDEN

ISSN:

[www.ltu.se](http://www.ltu.se)

Printed by Universitetstryckeriet 2011

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Initiering av projekt</b>	<b>2</b>
1.1	Bakgrund & motiv för projektet . . . . .	2
1.2	Syfte och mål . . . . .	3
1.3	Avgränsningar . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Metod</b>	<b>6</b>
2.1	Konstruktion och FE-analys . . . . .	6
2.2	Dimensionering av drivaxlar . . . . .	6
2.3	Teknisk kravspecifikation . . . . .	6
2.4	Marknadsundersökning . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Förstudie &amp; Teori</b>	<b>8</b>
3.1	Konstruktion & FE-analys . . . . .	8
3.2	Dimensionering av drivaxlar . . . . .	9
3.3	Teknisk kravspecifikation . . . . .	10
3.4	Fysikaliska samband . . . . .	11
3.5	Pneumatisk energiåtervinning . . . . .	13
3.6	Kompressionsteknik . . . . .	17
3.7	Konkurrerande teknik . . . . .	18
3.8	Marknadsundersökning . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>20</b>
4.1	Konstruktion . . . . .	21
4.2	FE-analys . . . . .	22
4.3	Dimensionering av drivaxlar . . . . .	24
4.4	Prototyp . . . . .	28
4.5	Marknadsundersökning . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Diskussion &amp; Slutsats</b>	<b>35</b>
5.1	Prototyp . . . . .	35
5.2	Projekt . . . . .	37
5.3	Slutsats . . . . .	38

<b>6 Vidare arbeten</b>	<b>39</b>
<b>7 Bilaga</b>	<b>40</b>
<b>A Marknadsundersökning</b>	<b>40</b>
A.1 Resultat och statistik från marknadsundersökning . . . . .	41
<b>B Teknisk data</b>	<b>43</b>
<b>C Testkörning av prototyp</b>	<b>44</b>



## Variabellista

$E$	-	Energi [J]
$m$	-	Massa [kg]
$F$	-	Kraft [N]
$v$	-	Hastighet [m/s]
$\rho$	-	Luftdensitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$s$	-	Sträcka [m]
$t$	-	Tid [s]
$a$	-	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
$Q$	-	Värme [J]
$W$	-	Arbete [J]
$U$	-	Inre energi [J]
$T$	-	Temperatur [K]
$P$	-	Tryck [pa]
$V$	-	Volym [ $m^3$ ]
$A$	-	Area [ $m^2$ ]
$H$	-	Entalpi [J]
$\eta$	-	Verkningsgrad [-]
$K_B$	-	Boltzmanns konstant [J/K]
$N_A$	-	Avogadros tal [ $mol^{-1}$ ]
$\tau$	-	Skjuvspänning [pa ( $N/m^2$ )]
$M_V$	-	Moment, vridande [Nm]
$W_V$	-	Böjmotstånd [Nm]
$\omega$	-	Radianer [rad]

# 1 Initiering av projekt

Under inledningen av projektet listas följande fem frågor som bygger på den klassiska retorikens fem nyckelord och bör reflekteras över vid initiering av ett projekt.

- Vem är beställaren och vem är kund?
- Varför ska projektet genomföras?
- Vad ska göras?
- När ska projektet vara klart?
- Hur ska projektet utföras?

Svaren på dessa frågor avgör om det finns förutsättningar att genomföra projektet<sup>2</sup>

## 1.1 Bakgrund & motiv för projektet

Fordonsindustrin står inför en stor utmaning med att utveckla nya lösningar för framtidens krav på drivsystem. Forskning på alternativa drivsystem pågår och för närvarande finns det ingen teknik som löser problemet tillfredsställande. Utvecklingstrenden har den senaste åren pekat mot drivsystem med elektriska motorer. Svårigheten med ett elektriskt drivsystem är lagring av tillräcklig mycket energi för att uppfylla ställda krav kopplat till räckvidd, livslängd hos batteri samt laddningstid. Batteriets begränsningar har gjort det svårt att överge förbränningsmotorn. Detta har tvingat fram hybridtekniken som är en kompromiss<sup>3</sup>.

Vid drivkoncept som bygger på bränslecellteknik produceras elektricitet i fordonet men såväl lagringen av väte som infrastrukturen för vätedistributionen är ett problem som fordonsindustrin brottas med<sup>4</sup>. Energiåtervinningssystem<sup>5</sup> förknippas idag med hybridfordon. Detta då den befintliga tekniken tillgängligt för trafikfordon endast kan återvinna bromsenergi via elektriska motorer. Installation och underhåll av dessa system är väldigt kostsamma<sup>6</sup>, således lönar sig energiåtervinning bara i fordon som redan har en elektrisk motor och ackumulator<sup>7</sup>.

---

<sup>2</sup>Tonnquist, Bo, (2008) Projektledning. Stockholm ISBN 978-91-622-9318-5

<sup>3</sup>[www.spinovation.com/images/infoPHEV\\_ENG.pdf](http://www.spinovation.com/images/infoPHEV_ENG.pdf) -(2010-10-02)

<sup>4</sup>[fy.chalmers.se/~np97magr/reports/10p\\_1999.pdf](http://fy.chalmers.se/~np97magr/reports/10p_1999.pdf) -(2010-10-02)

<sup>5</sup>Ett system som omvandlar spilloenergi till nyttig energi

<sup>6</sup>[formula1.com/inside\\_f1/understanding\\_the\\_sport/8763.html](http://formula1.com/inside_f1/understanding_the_sport/8763.html) -(2010-10-02)

<sup>7</sup>[www.toyota.com/upcoming-vehicles/prius-plug-in/](http://www.toyota.com/upcoming-vehicles/prius-plug-in/) -(2010-10-02)

Det finns en handfulla andra energiformer som rent tekniskt fungerar för denna typ av energiåtervinning med flera olika metoder att omvandla och lagra spillenergi. Vissa av metoderna förkastades under konceptstadiet. Andra har stannat inom motorsporten och bedöms som under utveckling av fordonsindustrin. Undantaget är en KERS<sup>8</sup> lösning kallad Flybrid som fastän sin höga komplicitet nu erbjuds till marknaden<sup>9</sup>. Majoriteten av fordonen ute på vägarna drivs med fossila bränslen men olika hybrider och elfordon blir allt vanligare<sup>10</sup>. Därför behövs en energiåtervinningsteknik som är helt oberoende av maskintyp eller en som kan tillfredställa marknadens förfrågan på energiåtervinning i fordon utan elektriska drivsystem.

## 1.2 Syfte och mål

Detta avsnitt syftar till den effekt projektet är tänkt att skapa och förtydligar varför projektet genomförs<sup>11</sup>. Detta med strävan mot god tydlighet, realism, mätbarhet och förankring för att projektet ska ge önskad effekt. Tillgången av individuell bekväm transporter kommer även finnas i framtiden. Detta förhoppningsvis oavkortat dagens utmaningar som fordonsindustrin brottas med. Ingenjörer utvecklade dem fordon som omger oss idag och ingenjörer kommer att lösa framtidens energiproblem. Genom att lyfta upp ämnet och skapa en diskussion hoppas jag på att öka intresset kring alternativa energiåtervinningssystem. Då jag innerligt tycker att alldeles för lite fokus ligger på alternativa lösningar. Med detta avser jag, värdera min idé utifrån valda kriterier om att lösa problemet med begränsad energiåtervinning. Detta i form att högre verkningsgrad samt tillämpningsbarhet i alla fordon och maskiner.

*”Den bästa energiåtervinningen är den som inte behövs. Den näst bästa är den som lagrar energin och återger utan några omvandlingar.”*

Arbetet innefattar de steg som krävs för att gå från idé till att bedöma ett färdigt koncept och att genomföra tester på en färdig prototyp. Målet med detta är att vedertaget styrka beräkningar med ett tillräckligt starkt underlag för att resultatet skall betraktas som trovärdigt och väl motiverat.

---

<sup>8</sup>Kinetic Energy Recovery System

<sup>9</sup>[www.myninesigma.com/sites/public/\\_layouts/RFPs/NineSigma\\_RFP\\_60095.pdf](http://www.myninesigma.com/sites/public/_layouts/RFPs/NineSigma_RFP_60095.pdf) -(2010-10-02)

<sup>10</sup>[www.scb.se/Statistik/TK/TK1001/Fordon\\_2008.pdf](http://www.scb.se/Statistik/TK/TK1001/Fordon_2008.pdf) -(2010-10-02)

<sup>11</sup>Målet är uppsatt efter S.M.A.R.T målformulering (Specifikt, Mätbart, Acceperat, Realistiskt och Tidssatt)

Ett av huvudmålen är att besvara nedan listade frågeställningar:

- Hur hög verkningsgrad har ett pneumatiskt energiåtervinningsystem?
- Hur ser energiåtervinningscykeln ut?
- Hur kan den implementeras i dagens fordon?
- Kan systemet komma att överbelasta vissa komponenter i fordonet? och i så fall vilka, varför och hur mycket?

Allt detta kan summeras till en målformulering: ”Att bedöma pneumatikens potential för energiåtervinning.

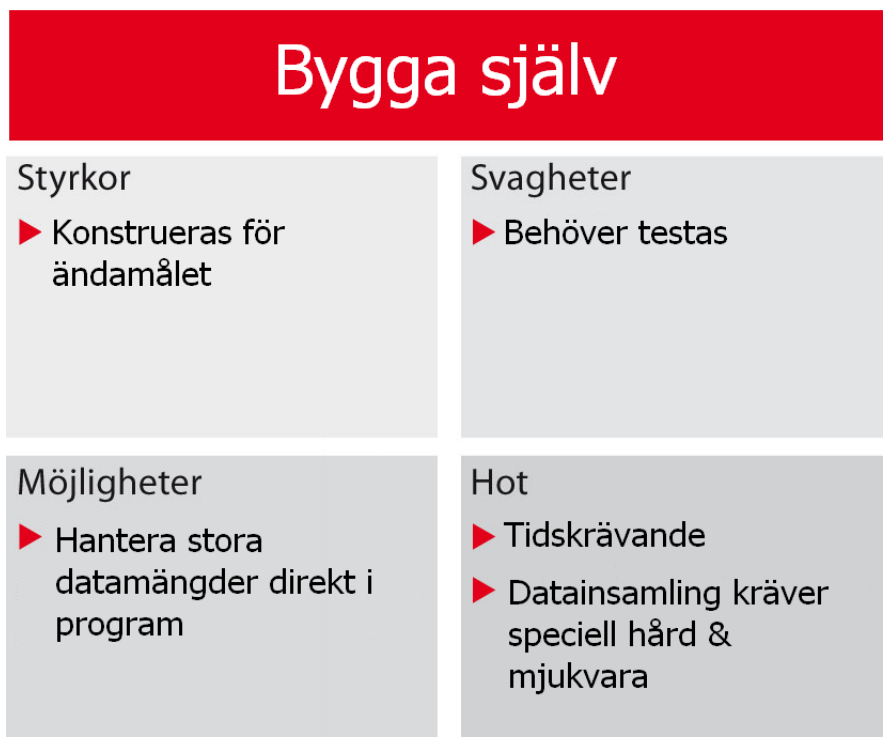
### 1.3 Avgränsningar

Genom en tydlig avgränsning förtydligas vad projektet inte innefattar. Det är inte alltid lika självklart och förtydligas därför under detta avsnitt. Genom att specificera avgränsningarna i projektets dokumentation undviks missförstånd kring vad som ska levereras. Syftet är att undvika ogrundade förhoppningar hos projektets olika intressenter.

Ett in och urkopplingssystem kommer inte att byggas in riggen där prototypen har möjlighet att kopplas in under inbromsning och kopplas ur direkt efter. Prototypen kommer alltid vara inkopplad. Detta då in och urkopplingssystemet är tänkt att styras med fordonets befintliga bromssystem och prototypen har inget bromssystem utan all energi skickas direkt till prototypen. In och urkopplingssystemet kan betraktas som ett extra bromsok som klämmer åt kopplingen och på så vis mjukt kopplar in kompressorn helt mekaniskt med styrning från fordonets ordinarie färdbröms. Detta blir alltså ett tvåstegsbromssystem där det ordinarie bromssystemet endast ingriper vid inbromsningar kraftigare än energiåtervinningsystemet kan hantera.

Då den här tekniken inte finns ute på marknaden innefattar projektet ombyggnation och anpassning av komponenter för ändamålet. Detta med syfte att skapa en funktionsduglig prototyp. Optimering av komponenter hamnar dock utanför projektets avgränsar. Detta kommer leda till en låg verkningsgrad i prototypen då komponenterna är ombyggda men inte optimerade för ändamålet. Prototypens verkningsgrad kan således räknas om till ett optimalfall där anpassade komponenter används. Prototypen syftar till att bevisa existensen av en verkningsgrad samt till att påvisa möjligheten och enkelheten med att omvandla och lagra kinetisk energi pneumatiskt.

Många av avgränsningarna som inte presenteras här rör projektet indirekt eller har en låg inverkan på projektet som helhet. Vissa syftar till att begränsa projektets omfattning medan andra kan handla om smådetaljer i prototypen som uppstår under projektets gång. För beslut kring sådana frågor tillämpas bland annat SWOT-analys<sup>12</sup>. Ett exempel på en snabb SWOT-analys som genomfördes berörande val av mätutrustning för sampling av förlorad energi i form av värmeutveckling syns i figur 1.



Figur 1: SWOT-analys som underlag för beslut att bygga mätutrustning för temperaturmätning eller avgränsa detta och införskaffa färdig utrustning

Beslut: Färdig mätutrustning kommer att köpas.

<sup>12</sup>SWOT "Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats"

## 2 Metod

### 2.1 Konstruktion och FE-analys

Komponenterna är konstruerade separat och hoppmonterade i flera steg, så kallade ”subassemblies”. För genomförandet av FE-analys konstruerades en drivaxel i Unigraphics NX 7.5. Drivknuten förenklades bort genom kraftig förstärkning av området.

### 2.2 Dimensionering av drivaxlar

Tillvägagångsättet för att bedöma hur drivaxlarna hanterar laster har varit att välja en viss procentandel av maximal motoreffekt (67 procent), beräkna ifall valt procentandel medför statisk eller dynamisk haveri för att sedan göra en bedömmning utifrån resultat. Både det statiska och dynamiska fallet har bedömts utifrån vilkor (se resultat). Påvisar dem dynamiska beräkningarna en förkortning av drivaxlarnas livslängd måste mängden energiåtervinning sänkas ytterligare. Dynamiken i fråga behandlar alltså utmattningsförlopp och kan delas upp i två stadier - initiering av en liten spricka följt av - tillväxt av sprickan till kritisk storlek då brott inträffar. Bilindustrins ingenjörer dimensionerar drivaxlar för en oändlig livslängd ( $> 10^6$  *cykler*)<sup>13</sup>. Det effektiva sättet att beräkna hur mycket energi som får återföras via drivaxlarna utan att livslängden påverkas har varit att fastställa antalet lastcykler till mer än  $10^6$  st och genom baklängesberäkning erhålla maximala tillåtna belastning som uppfyller detta krav på antal cykler. Samtliga beräkningar och siffervärden har avsett endast en drivaxel.

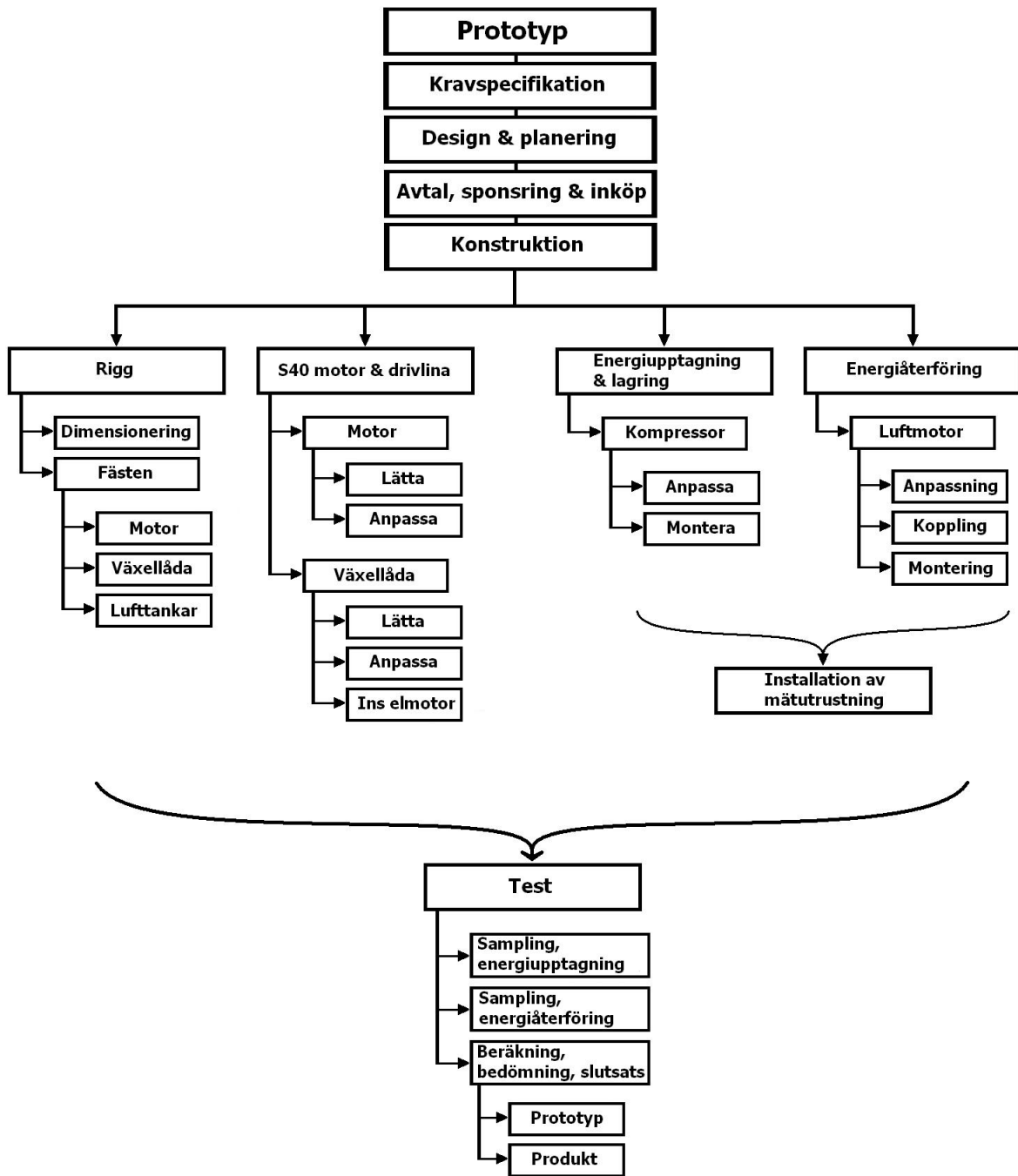
### 2.3 Teknisk kravspecifikation

Det har varit tydligt vilken effekt som projektet strävat till att uppnå, men inte exakt vad som behövt göras för att nå dit. För att lösa detta utan att basera kravspecifikationen på vaga grunder fick projektet specificeras och genomföras stegvis. Kraven specificerades då i takt med att kunskap och erfarenhet inhämtades. Denna metod lämpar sig för de flesta forskningsprojekt och uppdrag som baseras på kreativa processer<sup>14</sup>. Kraven rangordnades efter - ”MoSCoW-prioritering” som baserades på kundunderlag. Arbete och produkt bröts ner i dess beståndsdelar enligt PBS (Product Brakedown Structure) för att erhålla en bättre övergripande bild av arbetets steg, följd och nödvändiga detaljer i kravspecifikationen.

---

<sup>13</sup>Lund, Hans, (2007) Grundläggande hållfasthetslära. Stockholm ISBN 978-91-972860-2-2

<sup>14</sup>Tonnquist, Bo, (2008) Projektledning. Stockholm ISBN 978-91-622-9318-5



Figur 2: PBS för prototypframtagningsprocess med viss tillämpning av Vattenfallsmetoden

## 2.4 Marknadsundersökning

För att undersökningen skulle inneha viss statistiskt värde och ge en fingervisning om vad gemene man tycker var målet att frågorna skulle besvaras av så många som möjligt, i olika åldersgrupper och olika geografiska hemvister.

1. Vad är informationen som söks?
2. Är målgruppen tydligt definierad?
3. Vilken kunskap/fördom(ar) finns om kunderna?
4. Hur ska informationen nyttjas, för vilka typer av beslut?

Genom tydlig kännedom kring frågorna ovan skapades klarhet i vad som eftersöktes i projektet och relevanta frågor kunde formuleras. Genom så tydliga och neutrala (icke ledande) frågor som möjligt formulerades frågorna, där frågorna gick från allmänna till specifika för att ringa in intresseområdet. Det näst sista steget var att genomföra en miniundersökning innan den riktiga undersökningen publicerades, för att säkerställa kvalitet. Undersökningen offentliggjordes på internet där vem som helst anonymt hade möjlighet att skicka in svar en gång.

## 3 Förstudie & Teori

### 3.1 Konstruktion & FE-analys

Prototyp som under detta examensarbete byggdes hade ett rent tekniskt orienterat syfte med avsikt att påvisa funktionalitet. Prototypens utseende efterliknar följaktligen inte tänkt slutprodukt. För att inte helt utelämna den visuella delen och öka helhetsuppfattningen har yt- och solidmodellering i 3D tillämpats. Med en design i modelleringsprogrammet Unigraphics NX 7.5 eftersträvas att förmedla en illustration av hur en slutprodukt kan komma att se ut samt var dess komponenter är tänkt att monteras. Förstudien återkopplar till att utrymme är en bristvara under huven på en modern bil. En effektiv placering av komponenter är vitalt.

Med beräkningsverktyget NX Nastran som är implementerat i NX7.5 har drivaxlarna approximativt undersökts. Genom en FE-analys av en drivaxel syftade denna del av projektet till att öka förståelsen kring var spänningskoncentrationer kan uppstå. Belastningen bestod av ett vridande moment på 1200 Nm jämnt fördelat på drivaxelns splines. Drivaxeln i FE-analysen har fått utstå en mycket högre belastning än vad den är dimensionerad för. Detta för att tydligt urskilja dem svaga områdena.



## 3.2 Dimensionering av drivaxlar

Konstruktioner som utsätts för upprepade belastningar kan råka ut för haveri. Detta även om den aktuella belastningen  $\sigma_{max}$  inte överstiger maximala tillåtna belastning  $\sigma_{sv}$ . För att reda ut hur denna ändring i lastfall från endast accelerationslast som drivaxlarna utsätts för idag till acceleration och retardationslast påverkar drivaxlarna både statistiskt och dynamiskt krävs materialdata om hur olika lasttyper påverkar just detta material. Data för normaliserat kolstål SS1450-1 anpassat för maskinkonstruktioner, axlar m.m. har fått stå till grund för beräkningar. Metallstrukturen i detta kolstål kan antas vara linjärt elastiskt isotropt, vilket förenklar dem matematiska uppställningarna för statisk last avsevärt. Denna beräkning är intressant då den avslöjar om drivaxlarna kommer haverera vid dem allra första energiåtervinningscyklerna. Då materialet är isotropt är det relativt enkelt att anpassa mängden energiåtervinning för att undvika statisk brott.

Den dynamiska uppställningen är däremot mer komplex och av stort intresse. Efter att mängden energiåtervinnig har sänkts till att statiskt brott inte kommer inträffa är nästa fråga: kommer drivaxlarnas livslängd påverkas av denna extra last?

Materialdata från utmattningsprov för SS1450-1<sup>15</sup>

$$\left\{ \begin{array}{ll} E = 205 \text{ Gpa} & E - \text{modul} \\ R_m = 470 \text{ Mpa} & \text{Brottspänning} \\ \tau_{Vs} = 160 \text{ Mpa} & \text{Sträckgräns, skjvuspänning} \\ \tau_{Vvmax} = \pm 120 \text{ Mpa} & \text{Växlande vridning} \\ \tau_{Vvpmax} = \pm 120 \text{ Mpa} & \text{Pulserande vridning} \end{array} \right.$$

Säkerhetsfaktorn är inte inkluderad i materialdata. Detta beror på att drivaxlarna inte ska dimensioneras med avseende på säkerhetsfaktorn utan säkerhetsfaktorn ska appliceras utöver för att säkra hållbarheten. Samma säkerhetsfaktor används oavsett om energiåterföring<sup>16</sup> sker eller inte. Säkerhetsfaktorn kommer därmed kunna förkortas bort då den inte kommer ha någon inverkan på resultatet. Notera att materialets utmattningsgräns för växlande vridning är densamma som pulserande vridning, detta ger en vink om att materialets hållfasthet inte bör påverkas av hur den vridande lasten appliceras utan endast av amplitud.

<sup>15</sup>Sundström, Bengt, (2007) Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära. Stockholm, femte tryckningen

<sup>16</sup>Första steget i energiåtervinningscykeln, absorbering av bromsenergi

### 3.2.1 Statisk belastning

Ingen dimension av drivaxlar har antagits vid beräkningar. Detta för att inte begränsa informationen till en viss bilmodell. Fokus ligger på spänning i materialet istället för kraften som verkar på komponenten. Då drivaxlar alltid är dimensionerade efter motoreffekt kan man med kännedom om en viss motoreffekt beräkna hur stor spänningen i drivaxlarna är med ekvation (2) och dimensionera energiåterföringen därefter.

Förhållande mellan spänning och kraft:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Skjuvspänning:

$$\tau = \frac{M_V}{W_V} \quad (2)$$

Drivaxelns vridmotstånd:

$$W_V = \frac{\pi(\frac{d}{2})^4}{2\frac{d}{2}} \rightarrow \frac{\pi d^3}{4} \quad (3)$$

Vilkor för att statisk haveri inte ska inträffa.

$$\|\tau_{min}\| < \tau_{sv} \quad (4)$$

## 3.3 Teknisk kravspecifikation

Hög funktionalitet, oberoende av fordonstyp, hög prestanda, låg vikt och att det är en robust lösning är alla krav som har ställts på tekniken. Krav som uttrycks i termer som hög, låg, ökad, bättre, större är svåra att bedöma då de saknar tydliga gränser och är därmed svåra att mäta. Kravspecifikationen utformades för en prototyp och en slutprodukt med en teknisk höjd mot marknaden. Detta på grund av den kraftigt begränsade informationstillgången inom området. Detta komplicerade ansättningen av konkreta siffror på kriterierna. Samtliga kriterier relaterar även till varandra, även om varje enskild punkt bedöms enskilt så ska den slutgiltiga domen beslutas utifrån en slutprodukt. Detta är en matris som kunde lösas först när den första prototypen var i drift och behöver lösas på nytt för varje ändring av någon parameter.

Ett förtydligande exempel: Visar sig systemet ha en tillfredställande låg massa kan det väga upp för en måttlig verkningsgrad då det lönar sig energimässigt att montera in systemet.

### 3.4 Fysikaliska samband

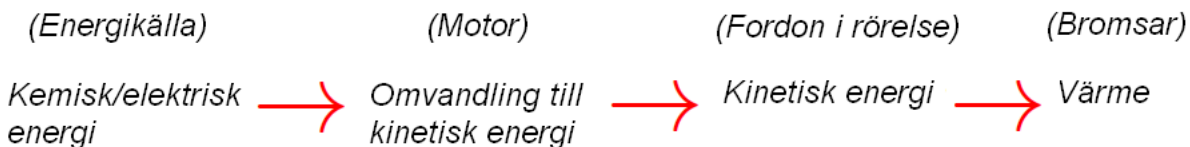
För att kunna återvinna energi är det nödvändigt att förstå och tolka vad det är som händer med energin under en bilfärd. För detta behöver vi tillämpa Newtons rörelselagar och Energiprincipen. Newtons tredje rörelselag lyder:

*"The mutual forces of action and reaction between two bodies are equal, opposite and collinea"*

vilket säger att två kroppar alltid påverkar varandra med lika stora men motriktade krafter och den korta versionen av energiprincipen lyder:

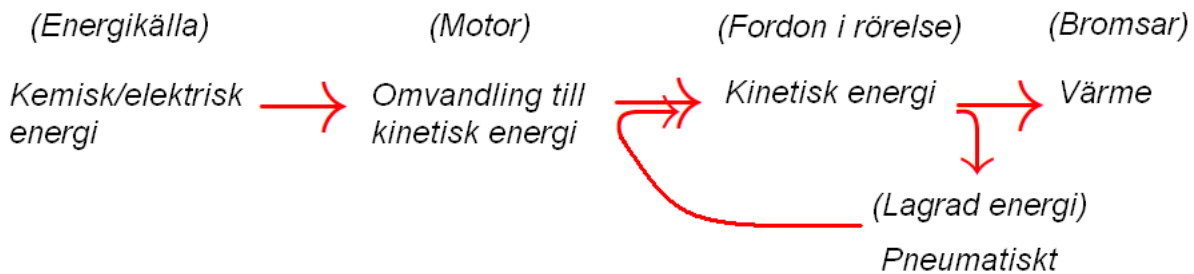
*"The total amount of energy in an isolated system remains conserved over time"*

Energiprincipen är den viktiga naturlagen som säger att energi inte kan skapas och heller inte förstöras utan bara omvandlas mellan olika former. Det är alltså ett språkligt misstag att tala om, energiförbrukning eller energikonsumtion. Energianvändning, energiomvandling eller energiomsättning är därför termologin som används i denna rapport. Med vetskap om dessa två naturlagar kan man fråga sig, varför behöver exempelvis en bensindriven bil tankas mer än en gång? Verkningsgrad, luftmotstånd, friktion (oönskad värmeutveckling) och inbromsningar (önskad värmeutveckling) bidrar samtliga till att systemet som vid idealfall är slutet, nu istället avger energi till omgivningen. Energiomvandling som sker vid en inbromsning idag illustreras i figur 3.



Figur 3: Energiomvandlingssekvens i fordon utan energiåtervinnig

Vid retardation omvandlas dyrt förvärvat rörelseenergi till värme i fordonets bromsar. Värme är i sig en nyttig energi men kan i sammanhanget inte tas tillvara på effektivt. Tidigare har man, åtminstone inom termodynamiken, via experiment valt att indela överföringen av energimängder i kvantiteterna värme och arbete. Denna indelning är väldigt användbar då den anger vad som blir värme och vad som går att nyttja. Energiåtervinning innebär således att rörelseenergin vid retardation lagras för att vid nästa acceleration återföras till fordonet och återskapa en del av den annars tillspillogivna rörelseenergin. Hur detta händelseförlopp skulle kunna se ut illustreras i figur 4.



Figur 4: Energiomvandlingssekvens i fordon med pneumatisk bromsenergiåtervinnig

### 3.5 Pneumatisk energiåtervinning

Pneumatisk energilagring används överallt idag. Vanligast förekommande i industrin där en elektrisk motor omvandlar elektricitet till kinetisk energi som i sin tur är via en rem eller direkt ansluten till en kompressor. Den komprimerade luften består av potentiell energi och kan betraktas som en progressiv fjäder. Energin lagras i lufttankar och kan när som helst via en luftmotor återomvandlas till kinetisk energi. I detta projekt är processen isokor och strävar mot att vara adiabatiskt med hjälp av isolering då det är allmänt känt att arbetet kompressorn utför bidrar till en adiabatisk uppvärmning. Fysikaliska mätningar av luftens uppförande när den komprimeras har lett till flera givna slutsatser.

1. Volymen ( $V$ ) är proportionell mot antalet mol ( $n$ ), vilket innebär att en fördubbling av antalet mol samtidigt som trycket ( $p$ ) och temperaturen ( $T$ ) bevaras konstant medför en fördubbling av volymen.
2. Volymen är omvänt proportionellt mot det absoluta trycket. En fördubbling av trycket medans temperatur och antalet mol hålls konstant medför att luften komprimeras till halva volymen.
3. Trycket är proportionellt mot den absoluta temperaturen. Vid fördubbling av den absoluta temperaturen samtidigt som volym och antalet mol hålls konstant medför en fördubbling av trycket.

Slutligen den allmänna gaskonstanten  $R$  är baserad på Boltzmanns konstant och Avogadros tal och kan därför motiveras som nedan:

Boltzmanns konstant

$$K_B = 1,380650 * 10^{-23} \text{ J/K} \quad (5)$$

Avogadros tal

$$N_A = 6,0221420 * 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (6)$$

$$K_B * N_A = R \quad (7)$$

Insättning av (5) och (6) i (7) ger:

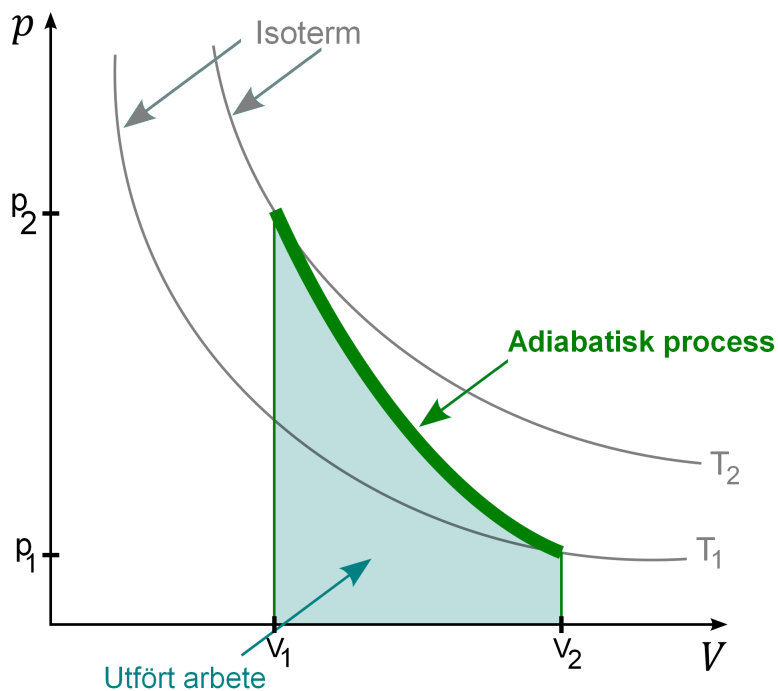
$$(1,380650 * 10^{-23} \text{ J/K}) * (6,0221420 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 8,31447 \text{ J/K} * \text{mol}^{-1} \rightarrow$$

$$R = 8,31447 \text{ J/(K*mol)}$$

Dessa tre samband tillsammans med substansmängd  $n$  och den allmänna gaskonstanten  $R$  kan kombineras och på så vis forma ideala gaslagen som är nödvändig för att verifiera testresultat från prototypen.

Ideala gaslagen

$$pV = nRT \quad (8)$$



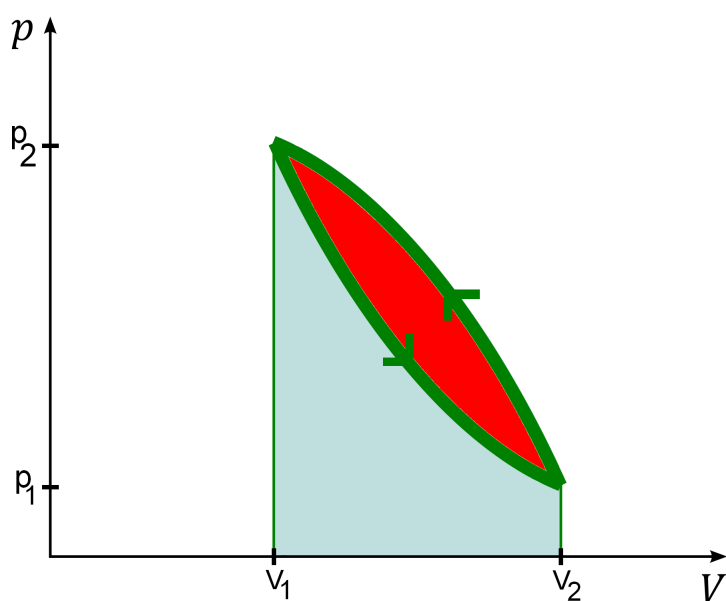
Figur 5: Principiell illustration av ekvation (8) där det tredimensionella förhållandet mellan P-V-T beskrivs i två dimensioner för två olika isotermer  $T_1$  och  $T_2$  där  $T_2 > T_1$

Utfört arbete på systemet och av systemet beräknas med ekv (9)<sup>17</sup>

$$W = \int_{V_2}^{V_1} p dV \quad (9)$$

<sup>17</sup>Young & Freedman (2006) University Physics. San Francisco ISBN 0-8053-9180-0  
 Nordling, Carl & Östman, Jonny (2006) Physics Handbook. Lund ISBN 978-91-972860-2-2

Förhållandet mellan tryck, volym och temperatur i ekvation (8) tyder på en omöjlighet att ändra en parameter utan att påverka dem andra. Paradoxalt nog är det inte möjligt att komprimera luft utan att bieffekten värme skapas. För att minimera värmeväxling med omgivningen som är en ren energiförlust bör material med låg värmeledningsförmåga väljas. pV-diagrammet i figur (5) illustrerar en adiabatisk process där energiförluster i bl.a. form av värme approximerats bort. Hela syftet med regenerering av bromsenergi är att undvika en omvandling till värme. Med hjälp av figur (6) och ekvation (12) kan energiförluster tas med i beräkningarna.



Figur 6: pV-diagram, för en ickeadiabatisk process ( $Q \neq 0$ ). Då gasen luft som är den arbetande substansen expanderar,  $V_1 \rightarrow V_2$  avger den energi ( $W_{ut}$ ) till omgivningen. Systemets entalpi sjunker ( $\Delta U = -W$ ) och temperaturen sjunker även här  $T_2 \rightarrow T_1$ . Den röda arean representerar värmeutveckling

Integrering från  $V_1$  till  $V_2$  ger arbete ( $W_{in}$ ) utfört på systemet i form av tillförd energi.

$$W_{in} = \int_{V_2}^{V_1} p dV \quad (10)$$

Integrering från  $V_2$  till  $V_1$  ger arbete ( $W_{ut}$ ) utfört av systemet, avgiven energi.

$$W_{ut} = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (11)$$

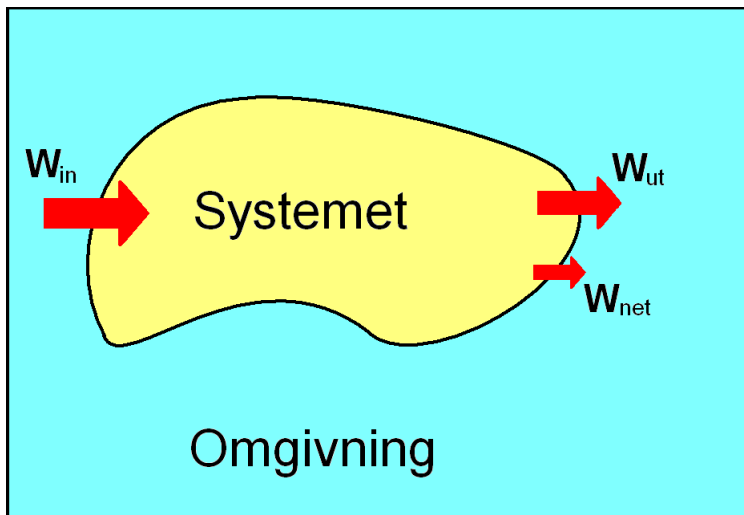
Absolutbeloppet av ekv (10) - (11) ger nettoarbetet som beskriver energiförlusten.

$$W_{net} = \left| \int_{V_2}^{V_1} p dV \right| - \left| \int_{V_1}^{V_2} p dV \right| \quad (12)$$

Genom kännedom om hur mycket energi som tillförs systemet samt förmedlas av systemet är det möjligt att både mäta och teoretiskt beräkna hela systemets verkningsgrad.

Beräkning av verkningsgrad

$$\frac{\int_{V_1}^{V_2} p dV}{\int_{V_2}^{V_1} p dV} \rightarrow \frac{W_{ut}}{W_{in}} = \eta \quad (13)$$



Figur 7: Illustrerar en arbetscykel. Arbete utfört på ett system samt arbete utfört av systemet där  $W_{in}$ ,  $W_{ut}$  och  $W_{net}$  beräknas med ekvation (10-12)

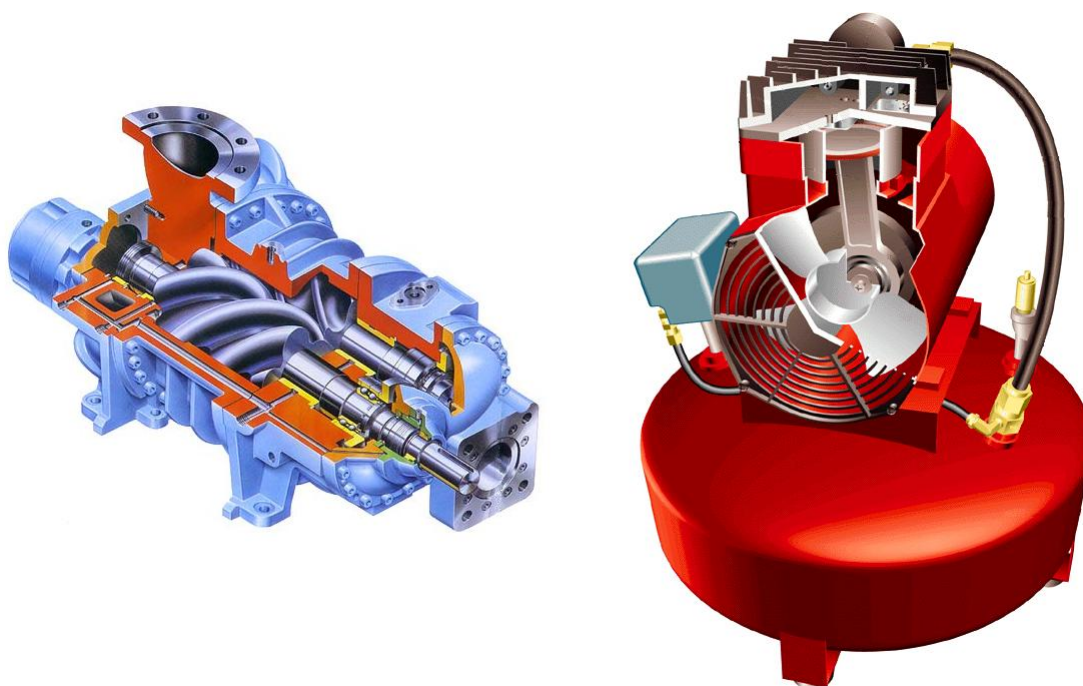


### 3.6 Kompressionsteknik

I brist på komponenter anpassade för den här typen av användningsområde är det nödvändigt att öka förståelsen för vilka komponenter som finns på marknaden idag, för och nackdelar med dessa samt möjlighet att anpassas för ändamålet. Utveckling av komponenter hamnar utanför projektets avgränsningar men genom kännedom om dem olika alternativen som finns ökar möjligheten att förstå potentialen och begränsningarna med en slutprodukt. Kompressorn är den vitala komponenten i den här tekniken där skruv och kolvkompressorn är dem allmänt kända.

Skruvkompressorn har ett bredare arbetsregister än kolvkompressorn. På så vis krävs en mindre utväxlingsomfång för att optimalt tillgodogöra höghastighet och låghastighetsinbromsningar. En skruvkompressor består av två rotorerna vilka skruvar fram luften mellan sig. Detta leder till mindre vibrationer och mindre slitage vid snabba varvtalsändringar. Skruvkompressorn är konstruerad för att deplacera stora volymer och skall klara att arbeta för full effekt oavbrutet utan risk för överhettning och är därför redan vanligt förekommande inom bilindustrin och används för ökad effekt genom överladdning.

Kolvkompressorn är däremot en billigare lösning och har en längre livslängd än skruvkompressorn om den får jobba på ett konstant och optimalt varvtal med en kylande fläkt. Kolvkompressorn är därför ett bättre alternativ i verkstadsmiljöer för att driva tryckluftswerktyg.



Figur 8: Skruvkompressor till vänster och kolvkompressor till höger i figur

### 3.7 Konkurrerande teknik

Mängden energi som finns tillgänglig för lagring är i kvadrat proportionell mot minskningen av fordonets hastighet.

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (14)$$

Val av ett mindre fordon är därmed inte en konkurrent för den här tekniken. Det är viktigt att skilja på minskad energiförbrukning och energiåtervinnig även om båda tjänar samma syfte. En lättare bil förbrukar mindre energi, därmed finns det mindre energi att återvinna. I förhållande till vikt sparar fordonet med lägre massa lika mycket energi som den tyngre. Hybridtekniken har därför visat sig vara den enda konkurrenten ute på marknaden. Precis som detta system lagrar hybridfordonen rörelseenergi.

El-hybridfordon som finns ute på marknaden idag är fastän sin låga effektivitet på 34 procent<sup>18</sup> mycket eftertraktad. Detta beror på att tekniken är helt ensam på marknaden med att tillvarata bromsenergi. Det finns en handfull alternativa sätt att tillvarata den här typen av spilloenergi men dem flesta lösningar har stannat på konceptstadiet. Med tanke på den stora efterfrågan bör en av dem existerande lösningarna lyckas anpassas för att stimulera efterfrågan inom en snar framtid. En av kandidaterna som i nuläget försöker slå sig in i marknaden är Flybrid<sup>19</sup> KERS. Tekniken bygger på att lagra energin i dess befintliga form. Detta ger stora fördelar då omvandling mellan olika energiformer i regel innebär stora energiförluster. Tekniken utvecklades först för bruk inom formel 1, säsong 2009. Tillverkaren Flybrid jobbar aktivt med att försöka implemetera tekniken i personbilar. Den tekniska lösningen som flybrid jobbar med gör systemet komplext och dyrt. Flybrid planerar dock att kunna leverera en personbilsanpassad produkt till Jaguarar under 2013.

En annan nämnvärd konkurrent är Parker Hannifin's RunWise hydrauliska lösning<sup>20</sup>. Den tekniska höjden i Parkes' lösning gentemot den som detta examensarbete behandlar är användandet av mediet olja istället för luft i systemet. Tekniken testas i tunga fordon i form av testflottor i tre olika områden i södra Florida och är en åtgärd i ledet att främja utvecklingen av ett miljövänligare samhälle. Forskning och utveckling av tekniken har sponsrats av Houston Advanced Research Center med anslag från Texas Environmental Research Consortium och finansiering från Texas Commission on Environmental Quality. Parkers hävdar att deras hy-

---

<sup>18</sup> Racecar engineering Vol 17 No 12

<sup>19</sup><http://www.flybridsystems.com/>

<sup>20</sup><http://www.hydraulicspneumatics.com/200/Issue/Article/False/86501/Issue>

drauliska energiåtervinningssystem minskar utsläppet med 20 procent och minskar slitage på bromsarna med 300 procent. Det är okänt hur Parker ställer sig i frågor gällande en pneumatisk lösning då inga testresultat eller jämförelser teknikerna sinsemellan är tillgängliga på deras webbplats. Detta kan mycket väl bero på att tekniken är under utveckling och testas i nuläget. Mina direkta frågor till Parker's Runwise Advanced Hybrid Technology var bland annat: Varför dem endast satsar på energiåtervinning i tunga fordon?

Då varken denna eller någon annan av frågorna besvarades är det okänt ifall begränsningen till tunga fordon är kopplat till den ökade vikten som hydrauloljan medför eller något annat. Att ta del av Parker's forskning inom området är väsentligt med tanke på att den kan användas som viktig beslutsunderlagen gällande pneumatikens framtid för energiåtervinning. Vidare kontakt med Parker angående deras Runwise Advanced Hybrid Technology är inte aktuellt i nuläget men helt nödvändigt längre fram.

### **3.8 Marknadsundersökning**

Biltillverkare och underleverantörer är alla att betrakta som kunder. Denna industri styrs till stor del av efterfrågan från deras kunder, som är gemene man. En marknadsundersökning har därför genomförts där män och kvinnor i olika åldrar fått chansen att svara på frågor rörande energiåtervinning i bilar. Syftet med undersökningen var att bedöma hur stort stöd det finns för alternativa lösningar, hur högt det prioriteras jämt mot andra viktiga faktorer samt bilda en uppfattning kring individernas miljömedvetenhet.

## 4 Resultat

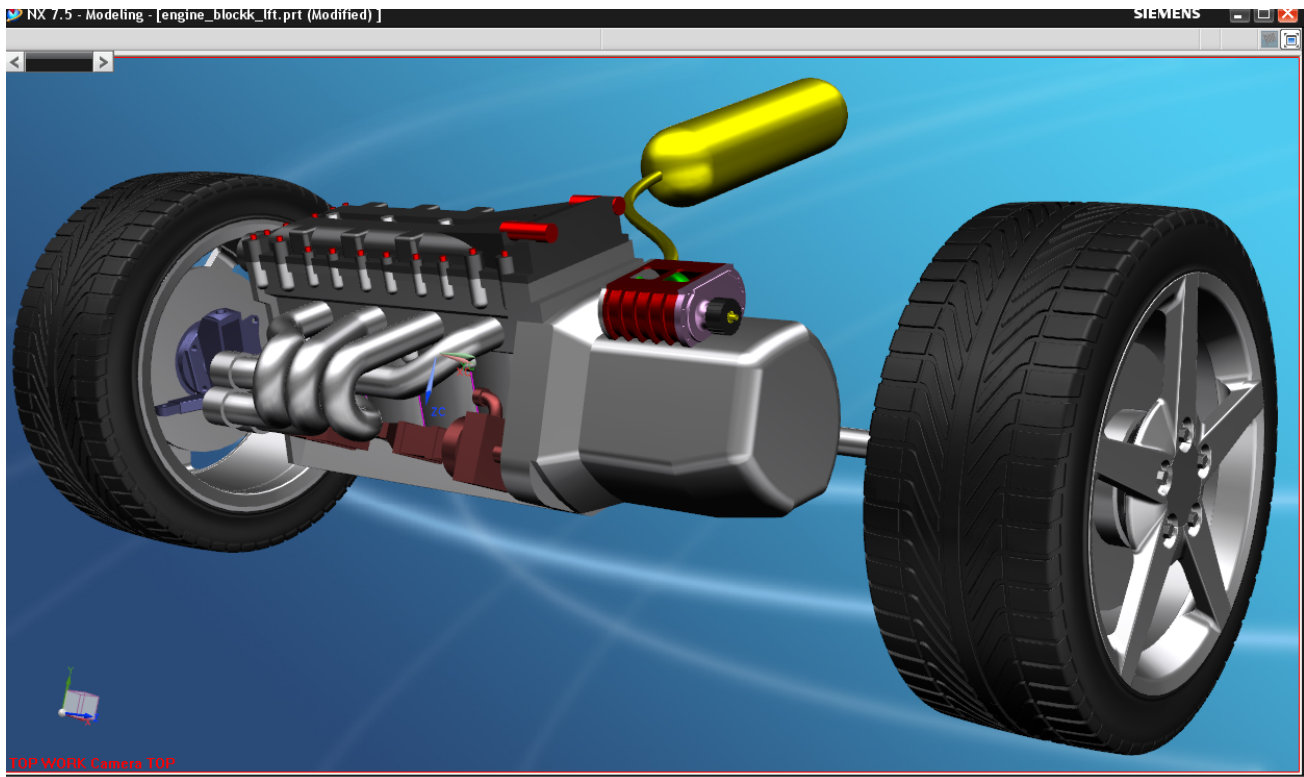
Frågorna som formulerades i avsnitt ”syfte och mål” ska här besvaras i olika etapper. Bestämda kriterier på det potentiella energiåtervinningssystemet ligger till erforderlig grund för att möjliggöra en jämförelse mellan tekniken i fråga och annan teknik för energiåtervinning. Genom att samtliga fordonsspecifika parametrar har uteslutits ur både beräkningar och prototyp har det varit möjligt att beräkna en generell verkningsgrad av den här typen av energiåtervinnig för alla fordonstyper. Därefter sker en bedömning med avseende på subjektiv bestämd lämplighet och informationstillgång.

Detta tillvägagångssätt har varit absolut nödvändigt till skillnad från teknik som är utvecklad för endast en bilmodell eller fordonstyp. För att kunna beräkna tillförd energi och avgiven energi för på så vis beräkna verkningsgrad behövde systemet i fråga identifieras tydligt. Drivaxlar<sup>21</sup> på fordon är oftast konstruerade för endast accelerationslast där den inbromsade lasten aldrig passerar drivaxlarna. Med reservation för motorbroms. Förutom detta finns några få undantag. Ett exempel är Alfa Romeo som experimenterade tidigt med att placera bromsskivorna mellan differential och drivaxlarna. Detta har exakt samma effekt på drivaxlarna som den här energiåtervinningen. En vital del av projektet har därför varit att illustrera hur energiåtervinningscykeln ska gå till. Hur systemet kan komma att se ut samt analysera hur drivaxlarna påverkas genom FE-analys samt hållfasthetsberäkningar.

---

<sup>21</sup>För bakhjuls- eller fyrhjulsdrivna fordon impliceras kardanaxel

## 4.1 Konstruktion



Figur 9: Konstruktionen representerar fullskalig modell

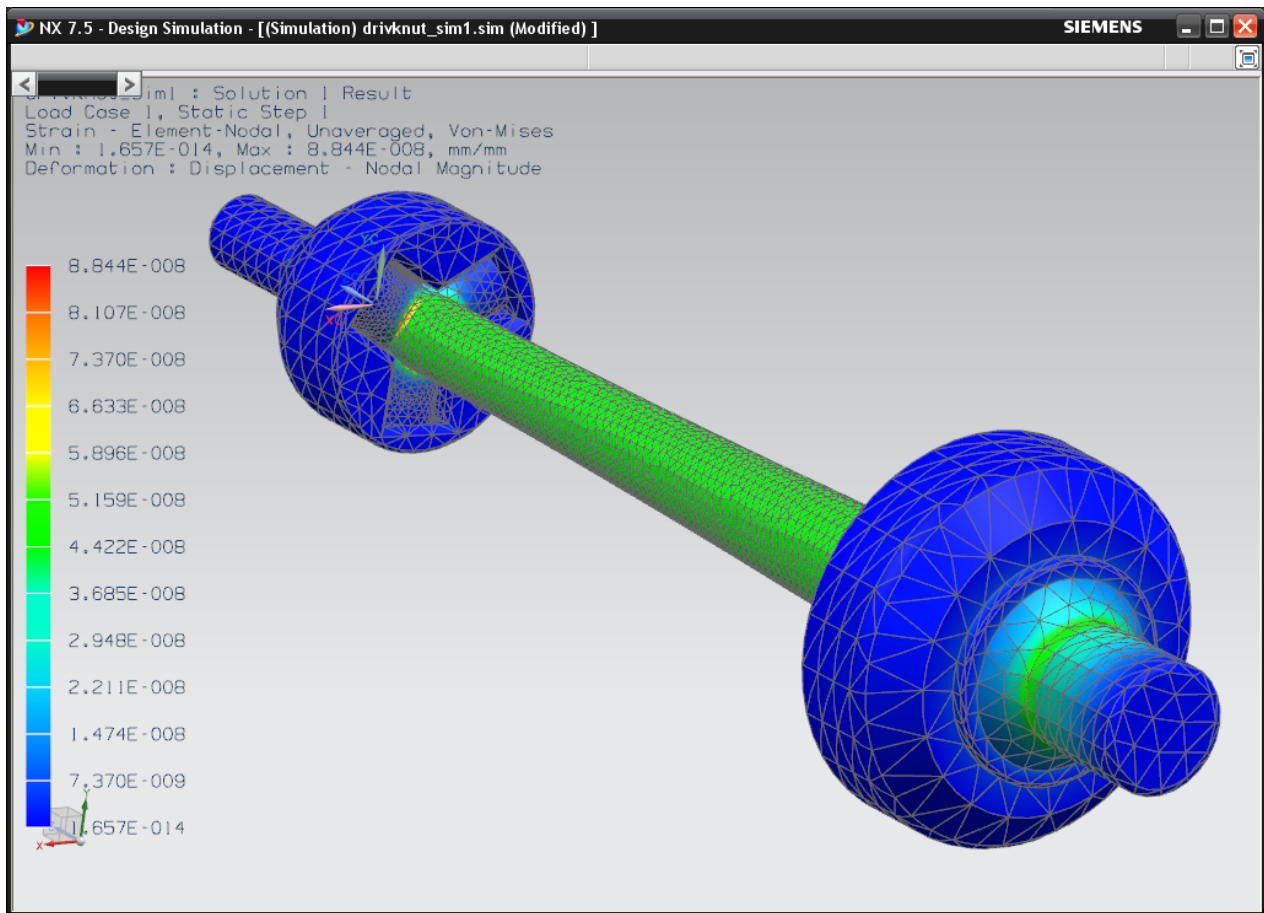
Utöver kompressor och lufttank syns även hjul, motor och växellåda. Färdriktningen i figur är sydväst. Lufttankens position är flexibel och därför har ingen större vikt lagts på placering. Kompressorn bör placeras på baksidan av växellådan på grund av utrymmesbrist samt för att vara placerad närmare transmissionens plats för integrering med drivaxlarna. En positiv bieffekt av detta blir även en kortare transportsträcka för den komprimerade luften mellan kompressor och lufttank. I figuren är kompressorn dock placerad ovanför växellådan. Detta för att bättre bidra till en helhetsbild för placering i förhållande till andra landmärken.

## 4.2 FE-analys

Resultatet från FE-analysen syns i figur (10) och antyder på hög spänningskoncentration vid drivknutens anslutning till drivaxeln. En annan i analysen dold svag länk är insidan av drivknutarna. Lagrena i drivknuten ger upphov till att glapp som i en verklig belastningssituation troligen leder till förkortad livslängd vid den här typen av energiåtervinning. Fokus ligger dock på att analysera själva drivaxeln. Därför har drivknuten förenklats vid konstruktion på ett sådant sätt att höga spänningskoncentrationer i drivknuten inte åsöns i figur. Drivaxeln i sig har en jämnt fördelad spänningskoncentration för ett vridande moment approximerat med Von-Mises. Då spänningskoncentrationen är densamma längst med hela axeln kan dimensionering utifrån denna spänningskoncentration göras. Hur hög spänning drivaxeln får utsättas för vid statisk och dynamisk last behandlas med hållfasthetsanalys under ”dimensionering av drivaxlar”.

Kort fakta om denna FE-analys:

- Endast statisk vridande last ansatt, lasten angriper på hela spline-ytan. Splinsen på andra änden av drivaxeln är fixerad.
- 3D Tetrahedral Mesh med 30 000 noder är applicerade på ytan. Noderna är inte jämnt fördelade utan är mer koncentrerade kring intresseområdet på själva axeln.
- Material SS1450-1 (Stål). För detaljerad materialdata se avsnitt 2.2
- Förenkling i form bortseende av glapp.



Figur 10: FE-analys av en drivaxel

### 4.3 Dimensionering av drivaxlar

Då utgångspunkten för energiåterföringen är bestämd till  $2/3 \approx 67\%$  av maximala motoreffekten erhålls:  $M_{Vvmin} = -\frac{2}{3}M_{Vv}$  och  $M_{Vvmax} = M_{Vv}$ .

En förlängning med faktorn 3 kommer medföra jämnare siffror längre fram i beräkningarna. Förlängning med faktor 3 ger:  $M_{Vvmin} = -2M_{Vv}$  och  $M_{Vvmax} = 3M_{Vv}$ . Insättning av  $W_V$ ,  $M_{Vvmin}$  och  $M_{Vvmax}$  i ekv (2) ger:

$$\begin{aligned}\tau_{min} &= \frac{-2M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \\ \tau_{max} &= \frac{3M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \\ \tau_{sv} &= \frac{3M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}}\end{aligned}$$

Insättning av  $\tau_{min}$  och  $\tau_{sv}$  i villkoret för att statistiskt haveri inte skall inträffa, ekv (4)

$$\left\| \frac{-2M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \right\| < \frac{3M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \quad \mapsto 2 < 3 \quad \text{Sant!}$$

Maximala tillåtna skjuvspänning för sträckgränsen  $\tau_{sv}$  är 160 Mpa enligt materialdata. Då denna extra bromsspänning som drivaxlarna utsätts för är lägre än maximala tillåtna spänning kommer inte statistiskt haveri att inträffa. Beräkning av statisk last påvisar även att en högre energiåterföring än de 67 procent av motorns maximala belastning på drivaxlarna som använts som utgångspunkt i beräkningarna är möjlig. Detta ger utrymme för en ny dimensioneringsvillkor för statisk hållbarhet vid belastning av axlar.

För SS1450-1 gäller, så länge belastningen av återföringsenergin är mindre än motorns belastning av drivaxlarna behöver inte drivaxlarna dimensioneras om.

#### 4.3.1 Dynamisk belastning

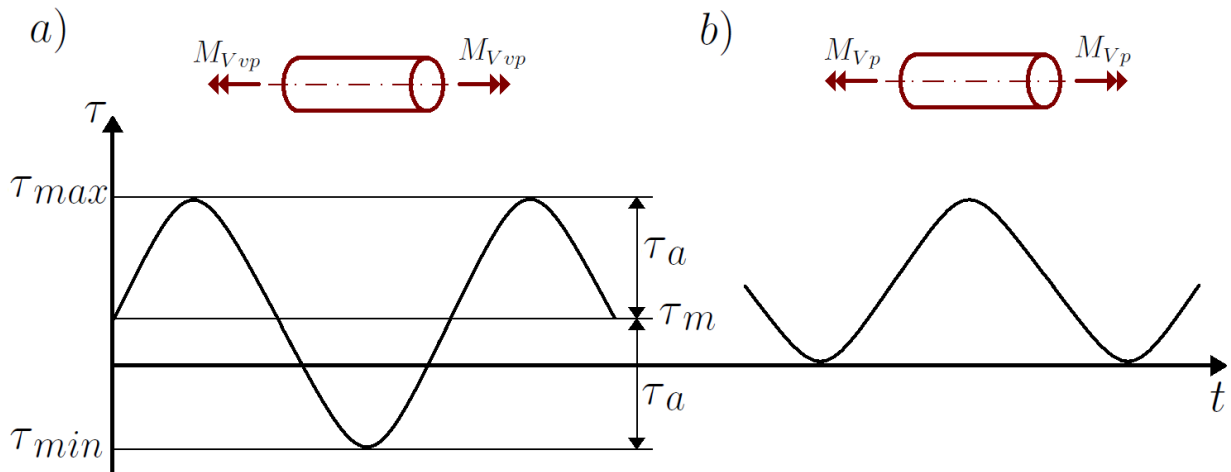
En matematisk beskrivning av drivaxlarnas belastning, med samt utan energiåterföring är avgörande för att påvisa eller avfärda en eventuell utmattning<sup>22</sup>. Målet med kommande beräkningarna är att erhålla värdesiffror för den växlande och pulserade belastning som energiåterföringen

---

<sup>22</sup>Livslängden är ett mått på antalet cykler som respektive lastfall presterar innan haveri





kommer bidra med. En jämförelse mellan beräknade värdesiffror för utmattning och materialdata kommer uppdaga om 67 procent energiåterföring via drivaxlarna kommer medföra en nedsättning av drivaxlarnas hållfasthet på längre sikt.



Figur 11: Tidsberoende torsionslast definierat för utmattningsstorheter. a) illustrerar det nya lastfallet. b) illustrerar det gamla, där drivaxlarna endast utsätts för en positiv vridande last. Den sinusformade spänningens maximala och minimala värde betecknas  $\sigma_{max}$  respektive  $\sigma_{min}$ .

Det vridande moment uppstår av hastighetsskillnad mellan utgående axel på växellåda och fordonets hjul. Med dynamisk hållfasthetsberäkning ska skillnaden mellan lastfall a) och lastfall b) jämföras. Lastfall b) beskriver en rent pulserande last som drivaxlar i fordon utan energiåtervinning utsätts för idag och simulerar endast acceleration medans lastfall a) även beskriver ett negativt vridande moment (energiåterföring). Simuleringen består av rent sinusformade pulserande och växlande laster.

Belastning		
	växlande + pulserande	rent pulserande
Vridning	$\tau_m \pm \tau_a$	$\tau_{Vp} \pm \tau_{Vp}$

Figur 12: växlande och pulserande lastfall vänster samt endast pulserande till höger

Mittspänning

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\tau_{max} + \tau_{min}) \quad (15)$$

Amplitudspänning

$$\tau_a = \frac{1}{2}(\tau_{max} - \tau_{min}) \quad (16)$$

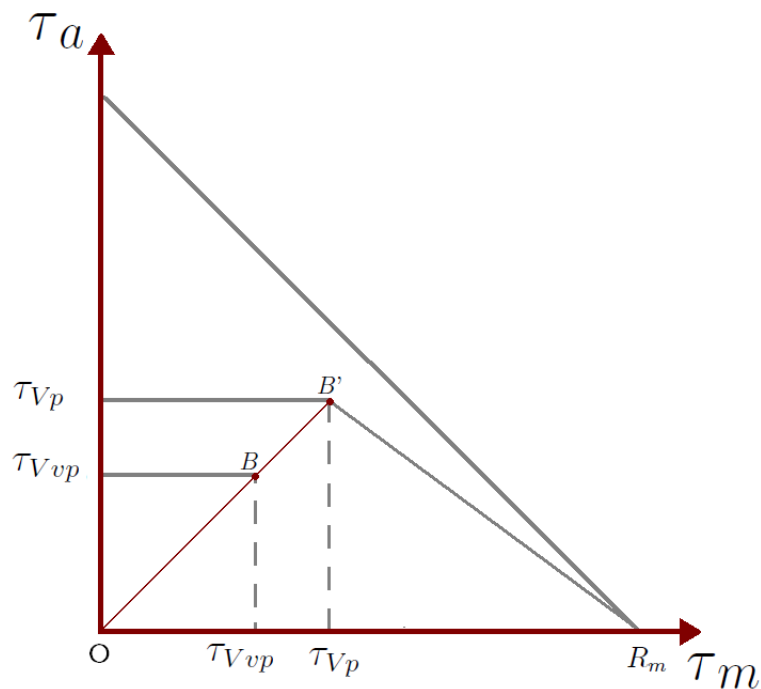
Insättning av  $\tau_{max}$  och  $\tau_{min}$  som beräknades med ekv (2) i ekv (15) & (16) för att erhålla mittsamt amplitudspänningen. Observera att samtliga värden förlängdes med faktor 3 tidigare för jämna och lätthanterliga siffror. Då förhållandet mellan både med och utan energiåtervinning förlängts med faktorn 3 kommer detta inte att påverka slutresultatet.

$$\tau_m = \frac{1}{2} \left( \frac{3M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} + \left( \frac{-2M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \right) \right) \longrightarrow \tau_m = 0,5 \tau_{max} \text{ Mpa}$$

$$\tau_a = \frac{1}{2} \left( \frac{3M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} - \left( \frac{-2M_{Vv}}{\frac{\pi d^3}{4}} \right) \right) \longrightarrow \tau_a = 2,5 \tau_{max} \text{ Mpa}$$

$\tau_m$  och  $\tau_a$  har beräknats fram för det nya lastfallet.  $\tau_{Vp}$  är däremot en referens i form av ett identiskt fordon men utan energiåtervinning. Kravet på  $\tau_{Vp}$  som referens är därmed att i intervall sträcka sig till samma maximala positivt vridande spänning (acceleration) men aldrig utsättas för en negativt vridande spänning. Resterande beräkningar är normaliserade då endast olika förhållande är av intresse och därmed enhetslösa. Vald energiåtervinning gav  $\tau_{Vp} = 1,5$ . Med insättning av värdesiffror erhålls följande Sinus funktioner.

$$\begin{cases} a) & \text{Växlande och pulserande last} & \tau_{Vvp} = 0,5 + 2,5 \sin \omega t \quad (-2 < \tau_{Vvp} < 3) \\ b) & \text{Rent pulserande last} & \tau_{Vp} = 1,5 + 1,5 \sin \omega t \quad (0 < \tau_{Vp} < 3) \end{cases} \quad (17)$$



figur 13: High-diagram, jämförelse mellan de olika lastfallen

Utifrån nu kända värden kan ett Haigh-diagram konstrueras. High-diagrammet förtydligar hur alla nu kända värden hänger ihop och samspelar. Diagrammet är ett viktigt verktyg och används vanligtvis för att reducera tillåten spänning utifrån materia, tillverkningsmetod samt geometri och används även för att beräkna säkerhetsfaktorer.  $\tau_{Vp}$  som representerar det tidigare lastfallet (Skjuvning, vrid, pulserande) och kan direkt jämföras med det nya lastfallet  $\tau_{Vvp}$  (Skjuvning, vrid, växlande+ pulserande) i samma diagram.  $B$  och  $B'$  markerar det största avståndet till obefintlig last (origo). Avståndet till origo är i det här fallet en skalär enligt materialdata då en positivt eller negativt vridande last är exakt lika ansträngande för materialet. Det är tack vare den materialegenskapen som den negativa spänningen i materialet direkt kan jämföras med maximal spänning drivaxlarna utsätts för. Observera att detta endast gäller för skjuvning.

Kvoten  $\frac{B'O}{BO}$  kan beräknas eller mätas direkt ur grafen

$$\frac{B'O}{BO} = \frac{9}{6} = 1,5 \quad (18)$$

Ekv (18), antyder på en säkerhetsökning med 50 procent vid maximal energiåterföring. Maximal

energiåterföring användes som utgångspunkt som tidigare nämnt till  $\sim 67$  procent av det drivaxlarna maximalt utsätts för vid acceleration. En invers på säkerhetsökning ger:  $\frac{1}{1,5} = \frac{2}{3} \approx 67\%$ .

Då industrin redan applicerat en säkerhetsfaktor är det hållbart ur materialsynpunkt att belasta drivaxlarna lika mycket som fordonets motor gör. Detta är en liknande slutsats som för statisk last. Med andra ord tyder beräkningarna ovan på att drivaxlarna i fordon inte på något sett behöver anpassas för att klara av denna extra belastning som energiåtervinning vid inbromsning medför. Förutsatt att skjuvspänningen drivaxlarna utsätts för vid energiåterföring är lägre än skjuvspänningen orsakad av fordonets drivande motor. Ifall det lönar sig att förstärka drivaxlarna för större energiåtervinning lämnas till vidare arbeten.

## 4.4 Prototyp

### 4.4.1 Teknisk kravspecifikation på prototyp

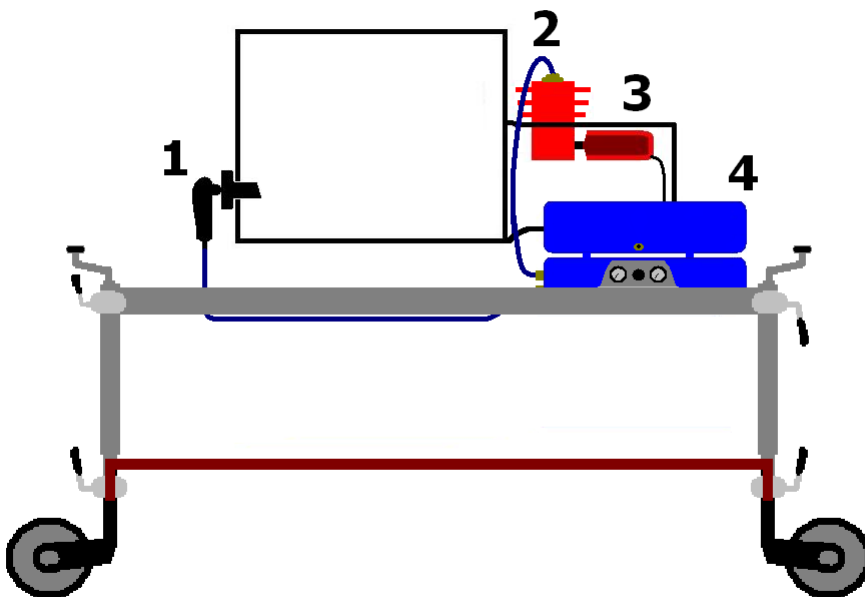
Kravspecifikationen utformas utefter vad prototypen syftar till. Detta är inte att beblanda med projektets syfte. Prototypen är ett subprojekt i projektet med ett eget syfte och mål och ämnar till att bidra med mätdata på hela energiomvandlingscykeln och dess verkningsgrad. Förutom att bidra med mätdata avser prototypen även till att på ett så tydligt och enkelt sätt som möjligt demonstrera energilagringscykeln *rörelseenergi  $\implies$  komprimerad luft  $\implies$  rörelseenergi*. Detta kan kännas trivialt då omvandlingen rörelseenergi till lufttryck sker varje gång du exempelvis pumpar din cykel. Prototypens komponenter är tänkta att placeras i en liknande miljö som motorutrymmet där lekman kan identifiera och förstå hur energi utvinns, transporteras, lagras och återförs till drivlinan, pedagogiken är en viktig del av prototypens uppgift och görs bäst med riktiga komponenter. En logisk struktur för tillvägagångsättet gjordes med hjälp av ”MoSCoW-prioritering”

Förutom dem tekniska finns även praktiska krav. Hela rigg med prototyp ihop monterat måste vara tymplig nog att det ska räcka med en person för att förflytta ekipaget utomhus mellan byggnader och även inomhus. Vad gäller längre transporter ska det inte krävas mer än en person och personbil. Det ska således vara möjligt att enhänt fälla ihop prototypen och lasta i en personbil för smidig transporter.

Tabell 1: Maximala tillåtna mått på prototyp tillsammans med rigg

(Begränsning i mm)	Höjd	Bredd	Djup
Byggnad	2000	1000	-
Bil	980	1130	1500

De bredare ytterdörrarna på Luleå tekniska universitet begränsar prototypen till 1000 mm i bredd och standardmått på en större kombi personbil begränsar höjd och djup till 980 respektive 1500 mm.



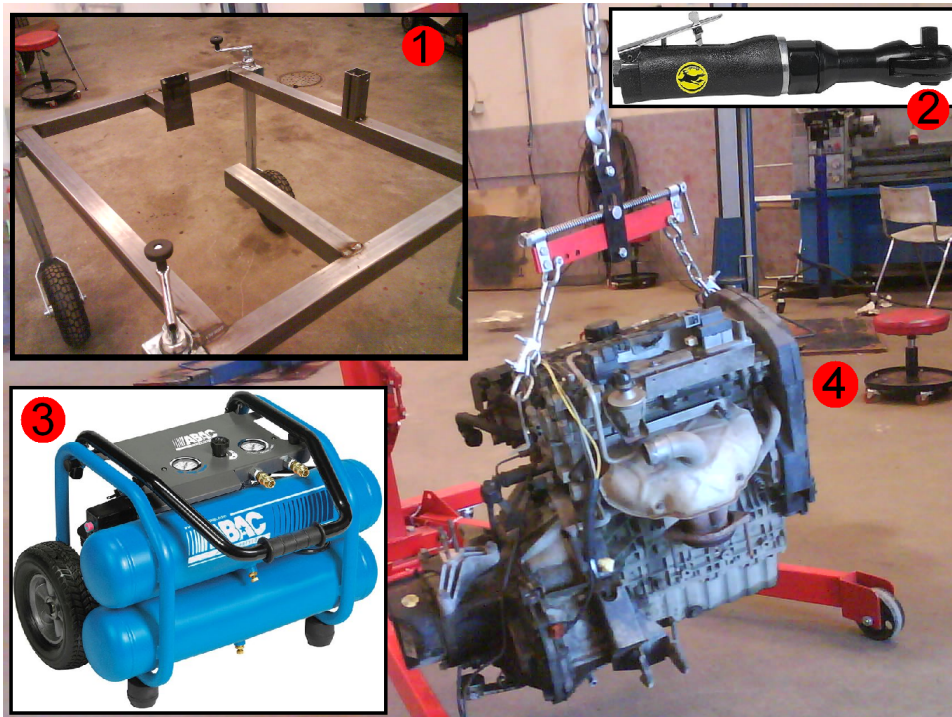
Figur 14: Tidig skiss på prototyp och rigg. (1) luftmotor, (2) kompressor, (3) elmotor, (4) lufttankar

#### 4.4.2 Finansiering

För den kostsamma delen av projektet, tilldelades en budget på 30000 kr av LTU-innovation och ALMI företagspartner. Med hjälp av dessa starka profiler tillsammans med en rad andra sponsorer kunde en budget upprättas och den praktiska delen av projektet finansieras. En exakt siffra på vad projektet har omsatt finns tyvärr inte då vissa utgifter aldrig passerade mitt skrivbord för dokumentation. Hyrbilar är ett exempel på detta.

### 4.4.3 Komponenter & tillverkning

I detta avsnitt presenteras komponenterna i prototypen, deras uppgift, hur dem samverkar, likheter och eventuella olikheter med slutprodukt.



Figur 15: Prototypens fyra olika huvuddelar. (1) Rigg, (2) luftmotor, (3) lufttankar, (4) Bilmotor & kompressor

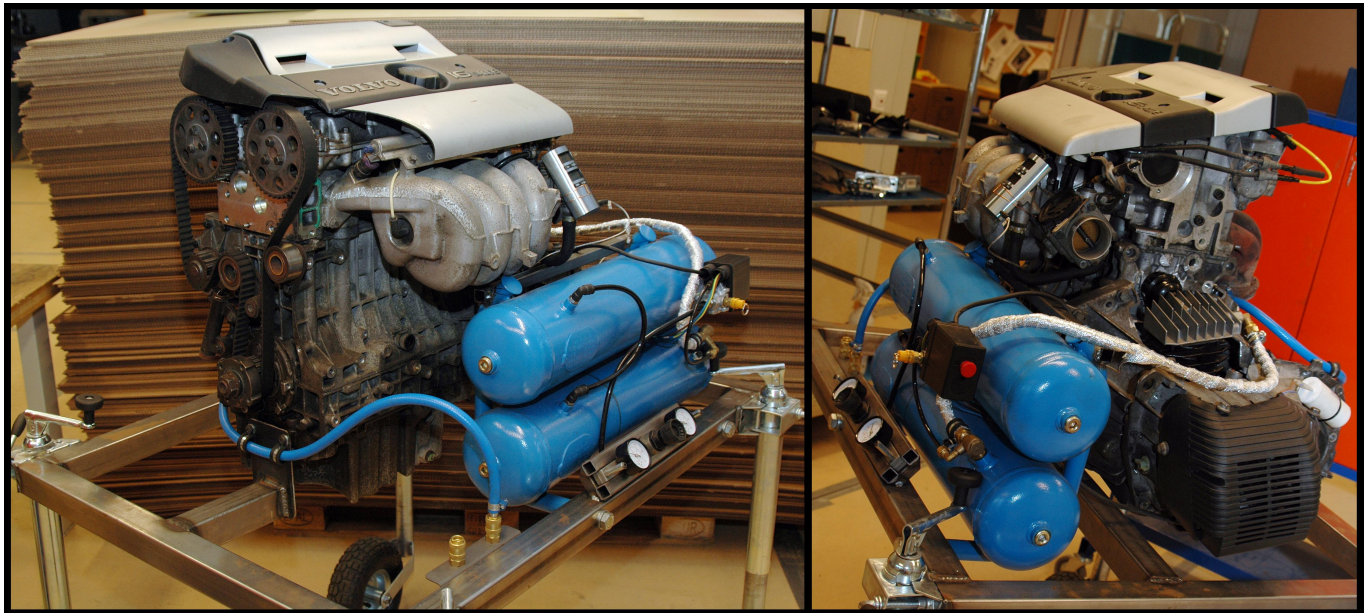
För att bära prototypen med dess olika komponenter konstruerades först en rigg. Till följd av dem praktiska kraven vad gäller mått och med hänsyn på belastning användes relativt grova dimensioner, fyrkantsprofil (50x50x3 mm) och jämbördigt grova svetsfogar för själva ramen. Riggens ben är ställbara i höjdlid (300-700 mm), med hjul och kan med hjälp av klämhylsor helt kopplas bort utan verktyg för smidig transportering.

Motor och växellåda kommer från en Volvo S40 1.8i 1998 års modell. Då S40 motorn inte längre har till uppgift att driva en bil fick den genomgå omfattande ombyggnationer och förenklingar. Några exempel på detta är att AC-kompressorn med rem och tillbehör togs bort och växellådan tömdes på innehåll då dessa komponenter inte är annat än onödig vikt i sammanhanget.

För att simulera en nedskalad energiåtervinningscykel av ett fordon som decelererar behövs en energikälla. Energiupptagning vid deceleration sker som tidigare nämnts med en kompressor via växellådans utgående axel. Därför monterades för decelerations fasen av simuleringen en elektrisk motor på 3 hk i växellådan. En elektrisk motor som driver kompressorn och drivs med vanliga 230V via eluttag var det självklara valet med tanke på ljudnivå, pålitlighet, inga avgaser samt simpliciteten att mäta avgiven energi till systemet. I teoriavsnittet diskuterades för och nackdelar mellan olika tekniska lösningar för att komprimera luft. För prototypen kommer en kolvkompressor att användas. Precis som dem flesta verkstadskompressorer är den här självkörande och därför mycket smidig att använda till en inomhusprototyp. Kolvkompressorn är encylindrig och fungerar lika väl som skruvkompressorn för det den ämnar till att påvisa. Som tidigare nämnts finns inga komponenter anpassade för ändamålet, utan en teoretisk verkningsgrad på slutprodukt kan vidare beräknas. Kompressorn är monterat ovanför fordonets växellådan i prototypen fastän det är tänkt att kompressorn ska monteras bakom växellåda i slutprodukten. Även detta för att komponenterna ska synas bättre precis som i CAD designen.

Kompressorn i prototypen kan användas som luftmotor. En framtida slutprodukts möjlighet att använda kompressorn som luftmotor styrs av många faktorer som kompressortyp och dimensionering. Då antalet komponenter sjunker i och med att energin skickas tillbaka samma väg som den kom är detta ett bra alternativ. För att kunna visuellt demonstrera arbetet utträtt av återvunnen energi används dock en extern luftmotor som driver bilmotorn i prototypen. Detta är i enlighet med prototypens syfte. Beslut kring kompressortyp för slutprodukt baseras på framtida efterforskningar. Slutligen används den simulerade återvunna energin till att sätta bilmotorn i rotation istället för att som tänkt i slutprodukt, direkt skickas tillbaka till utgående axel på fordonets drivlina.

För att transportera den komprimerade luften till lufttankarna används isolerad kopparrör. Kopparrör lämpar sig väl tack vare dess låga längdutvidgningskoefficient med avseende på den termiska och pneumatiska lasten som röret utsätts för. Koppar har tyvärr än väldigt hög värmeledningsförmåga, ungefär 15000 gånger bättre än luft. För att minimera värmeväxling med omgivningen har kopparröret isolerats med keramiska fibrer. Den här tekniken används ofta i bl.a. högprestandabilar dock med ett annat syfte.



Figur 16: Färdig prototyp

#### 4.4.4 Tester & datainsamling

Testuppställningen syftar till att styrka existensen av en verkningsgrad.

Villkoret för detta innefattar verkningsgraden ( $\mu$ ). Där villkoret är  $\mu > 0$ . Uppställningen strävar mot ett adiabatiskt system men är i synnerhet isokor med dessa ombyggda komponenter. Prototypen testkördes tio gånger där tillförd och återförd energi samplades tillsammans med temperatur under processen, se bilaga C. Vid energiupptagning samplades tiden det tar att öka systemtrycket från ett grundtryck på 5 bar till ett maxtryck på 8 bar.

Då värmeutveckling innebär energiförlust samplades även detta för att tydligare kartlägga energin. Lufttemperaturen i tankarna ger en god approximation på systemets värmeutveckling vid uppladdning. Med hjälp av en termometer direkt applicerat på tryckröret under isolering kunde lufttemperaturen i lufttankarna beräknas som medelvärdet av temperaturökningen. På grund av begränsning i noggrannhet presenteras inga decimaler i tabellen. Tio samplingar med god repeterbarhet och låg standardavvikelse står till grund för kommande beräkningar av verkningsgrad.



Given samt uppmätt data för energiupptagning:

$$\begin{cases} E_k = & 3Hk (2.2Kw) \\ t = & 17.1s (medelvärde) \\ \Delta p = & 3 \text{ bar } (3 * 10^5 pa) \\ \Delta T = & 24, 8^\circ C \end{cases}$$

Ekvationerna (9-11) i teoriavsnittet förutsätter variation av volym för vilket trycket verkar. Energiåtervinningsystemet använder två stycken parallellkopplade lufttankar med den sammanlagda konstanta volymen 22L. Energiupptagning (kompression) genomförs av kompressorn, energiåterföring (dekompression) sker med luftmotorn. Med ekvationerna (10) och (11) kan verkningsgraden från kompression till dekompression beräknas. Dessa beräkningar ger inte systemets totala verkningsgrad, vilket söks. Totalt arbete utfört på systemet mot total arbete utfört av systemet ger systemets sanna verkningsgrad. Se figur (6).

Tillförd energi

$$W_{in} = \frac{943 * 8 + 39600 * 2}{10} = 37840, 0J$$

Återförd energi

$$W_{net} = \frac{943 * 8 + 848 + 1037}{10} = 942, 9J$$

Beräkning av verkningsgrad

$$\frac{W_{net}}{W_{in}} = \frac{942, 9J}{37840, 0J} = 0, 024918$$

Prototypen styrker ett medelvärde av verkningsgrad på 2,5 procent vid tio kompletta energiåtervinningscykler. Villkoret för existens av verkningsgrad  $\eta > 0$  är uppfyllt.

## 4.5 Marknadsundersökning

Resultatet av undersökningen visar inte helt överraskande att miljömedvetenheten är hög men plånboken styr fortfarande. Se bilaga A.1

Marknadsanalysen understryker hur olika parametrar kopplade till miljö och kostnader ska prioriteras. Referensgruppen fick vid två tillfällen möjlighet att välja mellan miljö och plånbok med formuleringen att ge skenat av att dessa två inte kan uppnås tillsammans.

Sex av nio personer valde en billigare lösning framför en miljövänligare enligt fråga sju i marknadsundersökningen medans dem resterande tre är beredda att göra ett ekonomiskt missgynnande val för miljöns skull. Energiåtervinning medför lägre energiförbrukning och sänker proportionerligt både belastningen på miljö och ekonomin. Referenspersonernas två högt prioriterade parametrar kan med andra ord uppnås tillsammans och det är inte nödvändigt att välja den ena framför den andra. Dessa två blir de mest betydelsefulla kriterierna att ta hänsyn till vid konceptutvecklingen. För att utifrån resultatet av marknadsundersökningen adressera rätt parametrar för att uppnå kundkraven behöver uppgiften brytas ner. Detta kan kort formuleras som följande:

Produkten av verkningsgrad ( $\eta$ ) och inversen för tillverkning och underhållskostnader ( $TU$ ) för den nya tekniken ( $ny$ ) ska förhålla sig på ett sådant sätt att investeringen blir lönsam inom tre år<sup>23</sup>.

Ifall konkurrerande teknik inom området drivsystemoberoende energiåtervinnig eller en effektiv lösning för just fordon med förbränningsmotorer når marknaden kan dem olika lösningarna jämföras på följande vis:

Produkten av verkningsgrad ( $\eta$ ) och inversen för tillverkning och underhållskostnad ( $TU$ ) för den nya tekniken ( $ny$ ) ska vara högre än för den befintliga tekniken på marknaden.

$$(\eta_{ny} * \frac{1}{TU_{ny}}) > (\eta * \frac{1}{TU}) \quad (19)$$

I ekvation (19) värderas verkningsgrad lika högt som tillverkningskostnad fastän kunden värderar låg kostnad högre beror på resultatet från fråga nummer två i marknadsundersökningen, som lyder:

*”Både miljö och plånbok tjänar på en minskad bränsleförbrukning. En bil med ett energiåtervinningssystem är i regel dyrare vid köp:*

*Hur många år får det maximalt ta att tjäna in denna extra kostnad för att du vid nybilsköp ska överväga att välja en bil med ett energiåtervinningssystem?”*

Som bekant medför en hög verkningsgrad lägre energiförbrukning och en direkt följd av detta blir, en lägre miljöpåverkan. Därför gäller ekvation (19). Några andra kriterier som inte inkluderades i marknadsundersökningen men likväl betraktas är: Robusthet, minimal påverkan av faktorer som körstil och väder, Komfort samt att energiåtervinningen inte ska påverka bromsverkan.

---

<sup>23</sup>Beslut utifrån marknadsundersökning, bilaga A.1

## 5 Diskussion & Slutsats

### 5.1 Prototyp

Prototypen styrker att alla fordon ute i trafik har möjlighet att återanvända sin rörelseenergi. Alternativa lösningar finns inom dem mest exklusiva motorsportklasserna så som formel 1. Dessa lösningar som exempelvis KERS är dyra vid både tillverkning och underhåll och har därför inte slagit igenom i fordonsmarknaden. Prototypen för pneumatisk energiåtervinning tillhörande detta projekt är hopsatt med enkla, billiga och lättillgängliga komponenter och avfärdar därmed motorsport som enda användningsområde för alternativ energiåtervinning. Samtliga fordon ute i trafik kan återvinna energi och detta med betydligt högre verkningsgrad än dessa 2,5 procent som denna första prototyp visat sig klara. Detta med komponenter utvecklade för ändamålet. Prototypen lever upp till förväntningar tidigare formulerade så som hög funktionalitet, oberoende av drivsystem, och en robust lösning. Även krav rörande vikt samt verkningsgrad togs med i åtanke. Genom att ha bedrivit projektet med ett agilt förhållningssätt har det under hela projektets gång funnits möjlighet att förflytta fokus allteftersom förståelsen inom projektets olika områden ökade.

I avsnitt 2.1 förklarades det komplicerade förhållningssättet mellan olika parametrar för lönsamhet där även vikt och verkningsgrad ingick. Då prototypen inte innehåller samma komponenter som en eventuell slutprodukt existerade därför inte någon anledning till att optimera just dessa komponenter för att öka verkningsgraden.

Vikt är omvänt proportionellt till kostnad i detta fall. Exempelvis kan dem billiga lufttankar i stål bytas mot en mindre högtryckstank i kolfiber. Vilket sparar utrymme och vikt på bekostnad av pris. Hur dem olika parametrarna prioriteras varierar för varje fordonstyp och modell. Då projektet inte fokuserade på en enskild fordonstyp eller prisklass var det inte aktuellt att ta ställning till sådana frågeställningar.

Vad gäller dem praktiska faktorerna krävs det aldrig mer än en person för att hantera prototypen. Tack vare dem svängbara hjulen kan prototypen enkelt förflyttas för hand. Maxbredd på 940 mm ökar framkomligheten avsevärt och gör det möjligt att demonstrera prototypen i nästan alla salar. Inför längre transporter ryms prototypen tack vare dem demonterbara benen i dem allra flesta kombibilar. Tyngdpunkten är placerad så att prototypen står upprätt även med ett av benen fränkopplat. Den kan då sänkas ner till transportfordonets höjd och sedan skjutas in allteftersom benen monteras bort. Detta gör det enkelt samt väldigt kostnadseffektivt att transportera hela projektet tillsammans med presentationsmaterial även längre sträckor.

Generellt ämnade prototypdelen av projektet till att påvisa hur enkelt ett pneumatiskt en-

ergiåtervinningsystem kan implementeras i dagens fordon, demonstrera hela energi- upptagning och återföringscykeln, illustrera var komponenterna förslagsvis kan placeras och hur dem samverkar med varandra och fordonet. Slutligen styrka existensen av verkningsgrad under processen.

## 5.2 Projekt

Implementering av energiåtervinningssystemet i ett fordon ställer höga krav på god samverkan mellan fordonet och det implementerade systemets respektive komponenter. Tre olika subprojekt konstruerades för att behandla just detta. Med hjälp av CAD programmet UGS NX7.5 designades ett förslag på hur komponenterna kan placeras. Det implementerade systemet belastar fordonets befintliga komponenter. Energin som fordonet avyttrar vid inbromsning är av väldigt stor magnitud och riskerar att överbelasta vissa komponenter så som drivaxlarna. FEM-analysen styrkte en jämnt fördelad spänningskoncentration för ett vridande moment. Då spänningskoncentrationen är densamma längst med hela axeln kunde dimensionering utifrån denna spänningskoncentration göras med hjälp av hållfasthetsberäkning. Beräkningarna i avsnitt 3.4 styrkte att drivaxlarna i ett fordon inte behöver anpassas för att klara av denna extra belastning som energiåtervinning vid inbromsning medför. Förutsatt att skjuvspänningen drivaxlarna utsätts för vid energiåterföring är lägre än skjuvspänningen orsakad av fordonets drivande motor.

Ifall det lönar sig att förstärka drivaxlarna för större energiåtervinning lämnas till vidare arbeten då en gräns statistiskt behöver beräknas fram utifrån statistik på hur stor andel av vardagliga inbromsningar som är av större magnitud än drivaxlarna kan hantera. Ett beslut att inte förstärka drivaxlarna vid implementering av detta system skulle medföra att det ordinarie bromssystemet kopplas in tidigare vid kraftiga inbromsningar för att undvika överbelastning av drivaxlar. Detta kan mycket väl vara rätt beslut ifall statistiken kan styrka att en så pass låg andel av vardagliga inbromsningar är överbelastande att det inte lönar sig att dimensionera för upptagning av dem kraftigare inbromsningarna.

Resultatet från marknadsundersökningen genomförd av 64 personer (se bilaga A.1) mellan 2010-09-15 och 2010-09-18 med syfte att ge en riktlinje kring hur angeläget gemene man finner den här typen av forskning samt hur miljö prioriteras i förhållande till kostnader. 54 personer av dem tillfrågade prioriterade utveckling av alternativa energiåtervinningssystem till viktigt eller till och med mycket viktigt. Att hålla kostnaderna nere prioriterades nästan dubbelt så högt som miljö samtidigt som testpersonerna var beredda att investera i ett energiåtervinningssystem vid nybilsköp som skulle ta 3 år innan investeringen börjar löna sig. Dessa personer måste välja mellan elbil/elhybrid eller att inte kunna återvinna bromsenergi i dagsläget. Detta vittnar om goda marknadsutsikter för den teknik som med god verkningsgrad och låg tillverkning och underhållskostnad kan återvinna rörelseenergi i dem fordon som inte är av typen elbil/elhybrid då största marknadsandelen inte är tillhörande denna kategori.

### 5.3 Slutsats

Inledningsvis i rapporten önskade jag att lyfta upp ämnet och skapa en diskussion med mål att öka intresset kring alternativa energiåtervinningssystem. Resultatet är tillfredställande och bör motivera till en satsning inom drivsystemoberoende energiåtervinning och alternativa lösningar. Prototypens verkningsgrad på 2.5 procent kan med enkla medel höjas och på så vis ytterligare motivera. Kunder och en väldigt stor orörd marknadsandel finns, och en produkt bör därför erbjudas. Den stora efterfrågan återspeglar sig i den teknik som utvecklas. Start/stopp-teknik är ett av dessa som tjänar till att sänka bränsleförbrukningen. Fastän dess begränsade inverkan på bränsleförbrukningen och begränsning i tillämpningsbarhet till endast förbränningsmotorer marknadsförs tekniken stort och tas emot väl. Biltillverkarna söker ständigt ny teknik för att marknadsföra sina produkter med. De biltillverkare som väljer att förflytta viss fokus till drivsystemoberoende energiåtervinning kan med en färdig produkt återvinna bromsenergi från alla fordon. Företaget som presenterar den allra första färdiga produkten bryter ny mark, där detta examensarbete bara är ett exempel på hur pneumatik kan tillämpas.

Det här projektet har anammat agile<sup>24</sup> arbetsmetoder. Ett exempel på hur arbetssättet har tillämpats är uppdelning av projektet i delprojekten där varje delprojekt tilldelas milstolpar med tekniska, tidsmässiga och kostnadsmässiga kvalitetskrav. Detta ökar möjligheterna att slutföra projektet genom att delleverera små resultat ofta. Med denna arbetsmetod har det varit möjligt att stanna upp, utvärdera och enkelt förändra projektet under arbetets gång. Detta handlar alltså om att öka flexibiliteten utan att förlora kontrollen över projektet.

---

<sup>24</sup>Det finns i dagsläget ingen vedertagen svensk motsvarighet till ordet "agile" men beskrivs av Tomas Gustavsson forskare inom informatik vid Karlstads universitet som konsten att hantera större, komplicerade och flexibla projekt där det är svårt att se tydligt från början hur slutresultatet kommer att se ut. Gustavsson, Tomas, (2008) Konsten att slutföra projekt. Karlstad ISBN 978-91-976217-1-7

## 6 Vidare arbeten

Utifrån resultat är det aktuellt med en fullskalig prototyp i fordon för vidare testning och demonstration. En sådan prototyp öppnar upp för nya frågeställningar. En av dessa är möjligheten att som i den första prototypen använda en separat luftmotor. Ifall det beslutas att använda en separat luftmotor bör det monteras ett frihjul mellan kompressorn och anslutningen till fordonets drivlina detta utöver koppling. Frihjulet har för avsikt att förhindra kompressorn från att rotera baklänges vid inbromsning då man backar.

En vidare analys på hur drivknutar och andra belastade komponenter hanterar denna extra belastning tillsammans med en lönsamhetsanalys för förstärkning av belastade komponenter som drivaxlar och drivknutar för större energiåtervinning är aktuellt.

I den första prototypen är kompressorn alltid ihopkopplad med det som ska simulera fordonets ”hjul” nämligen elmotorn. I en fullskalig prototyp behövs en koppling som integrerar kompressorn vid inbromsning. Det finns ett flertal olika tekniker för detta. Ett av dem enklaste metoderna som rekommenderas för en första fullskalig prototyp är hydraulisk återkoppling från bromssystemet integrerat före ABS pumpen. Lämpligast direkt anslutet till fordonets huvudbromscylinder. Detta kan ses som ett extra bromsok. Denna extra ”bromsok”, installerat i fordonets ordinarie bromssystem klämmer ihop kopplingen som integrerar kompressorn med fordonets hjul via växellåda och på så vis styr föraren kompressorn och ordinarie bromssystem samtidigt.

En djupare undersökning kring exakt var kompressorn ska integreras med fordonets växellåda rekommenderas. I detta examensarbete har det ständigt varit tal om integrering vid fordonets utgående axel på växellådan. För att nyttja fordonets växellåda optimalt och undvika dubbla utväxlingar bör möjligheten att integrera kompressorn med växellådan, på motorsidan undersökas. Detta skulle minska varvtalsintervallet för kompressorns växellåda avsevärt då rotationshastigheten i den punkten är anpassad till motorn och det tidigare nämnda frihjulet behövs inte då negativ rotation aldrig inträffar.

Utifrån beslut rörande exakt var energiåtervinningssystemet ska integreras med kompressorn bör typ av växellåda vidare undersökas. CVT, variator eller en vanlig automatlåda är några att fundera på. Utifrån beslut kring kompressortyp och ifall kompressorn även ska agera luftmotor eller inte behöver ventiltyper väljas. En skruvkompressor är väldigt ineffektiv som luftmotor. Ifall skruvkompressor används behövs en extra tryckslang mellan lufttank och luftmotor. Lufttanken behöver kompletteras med två ventiler. En enkel ventil vid inloppsröret från kompressor och en mekanisk eller elektrisk ventil med återkoppling från gasspjället.

## 7 Bilaga

### A Marknadsundersökning

I dagens informationssamhälle är inte problemet att det finns för lite information, utan alldeles för mycket. Gemene man är väldigt duktig på att sortera ut den information som kan vara intressant. Drastiska åtgärder för att dra uppmärksamhet till undersökningsformuläret bland all reklam ute på nätet har varit nödvändigt. Frågeformuläret skickades ut till vissa samt of-fentliggjordes som en klickbar länk på nätet.

**64 personer under 4 dagar valde att svara på nedanstående frågor.**

1. Varje gång du bromsar med din bil gör du dig av med dyrt förvärvat energi. Ser du någon lönsamhet i att försöka spara den här förlorade energin till senare, för dig som bilägare?
2. Både miljö och plånbok tjänar på en minskad bränsleförbrukning. En bil med ett energiåtervinningssystem är i regel dyrare vid köp. Hur många år får det maximalt ta att tjäna in denna extra kostnad för att du ska vid nybilsköp överväga att välja en med energiåtervinningssystem ?
3. Idag återvinns energi i el-hybridbilar. Hur viktigt tycker du att det är att kunna återvinna bromsenergi från vanliga bensin/disel fordon också?
4. Hur viktigt tycker du att det är att fordonsindustrin även satsar på utveckling av alternativa energiåtervinningsystem än elektriska?
5. Hur viktigt är det att kunna öka hastigheten av ett fordon efter att ha bromsat utan att: Öka bränsleförbrukningen?
6. Vad är viktigast för dig: Miljö eller plånbok?
7. Om du får välja mellan en bil som släpper ut 10 % minde koldioxid eller en som är 10 % billigare i drift, vilken väljer du?



## A.1 Resultat och statistik från marknadsundersökning

SurveyMonkey™
Ramin Gilani | Logga ut | Hjälp

Mina enkäter | Adressbok | Mitt konto
+ Skapa enkät

---

**Ramin Gilani** Redigera

- Visa sammanfattning
- Bläddra bland svar
- Filtrera svar
- Korstabulera svar
- Ladda ner svar
- Dela svar

Designa enkät | Samla svar | Analysera svar

Standardrapport ▾
+ Lägg till rapport

### Sammanfattning svar Totala enkätstart: 64 Totala enkätavslut: 64 (100%)

**SIDA: STANDARDSEKTION**

**1. Varje gång du bromsar med din bil gör du dig av med dyrt förvärvat energi** Skapa diagram ▾ Ladda ner

	Inte alls		Utan tvekan		Medelrankning	Antal svar
Ser du någon lönsamhet i att försöka spara den här förlorade energin till senare, för dig som bilägare?	1,6% (1)	6,3% (4)	25,0% (16)	67,2% (43)	3,58	64
					besvarad fråga	64
					skippad fråga	0

**2. Både miljö och plånbok tjänar på en minskad bränsleförbrukning. En bil med ett energiåtervinningssystem är i regel dyrare vid köp** Skapa diagram ▾ Ladda ner

	1år	2år	3år	4år	5år	6år	Medelrankning	Antal svar
Hur många år får det maximalt ta att tjäna in denna extra kostnad för att du ska vid nybilsköp överväga att välja en med energiåtervinningssystem?	12,5% (8)	28,1% (18)	31,3% (20)	12,5% (8)	4,7% (3)	10,9% (7)	3,02	64
							besvarad fråga	64
							skippad fråga	0

**3. Idag återvinns energi i el-hybridbilar** Skapa diagram ▾ Ladda ner

	Inte alls		måttligt		mycket	Medelrankning	Antal svar
Hur viktigt tycker du att det är att kunna återvinna bromsenergi från vanliga bensin/diesel fordon också?	0,0% (0)	1,6% (1)	20,6% (13)	23,8% (15)	54,0% (34)	4,30	63
						besvarad fråga	63
						skippad fråga	1

4. Hur viktigt tycker du att det är att fordonsindustrin även satsar på utveckling av alternativa energiätterningsystem [Skapa diagram](#) [Ladda ner](#)

	Inte alls		måttligt		mycket	Medelrankning	Antal svar
Än elektriska?	3,1% (2)	1,6% (1)	10,9% (7)	25,0% (16)	59,4% (38)	4,36	64
	besvarad fråga						64
	skippad fråga						0

5. Hur viktigt är det att kunna öka hastigheten av ett fordon efter att ha bromsat utan att [Skapa diagram](#) [Ladda ner](#)

	Inte alls				Mycket viktigt	Medelrankning	Antal svar
Öka bränsleförbrukningen?	1,6% (1)	7,8% (5)	23,4% (15)	21,9% (14)	45,3% (29)	4,02	64
	besvarad fråga						64
	skippad fråga						0

6. Vad är viktigast för dig [Skapa diagram](#) [Ladda ner](#)

	Miljö	Båda är lika viktiga		Plånbok	Medelrankning	Antal svar	
Miljö eller plånbok?	4,7% (3)	6,3% (4)	43,8% (28)	23,4% (15)	21,9% (14)	3,52	64
	besvarad fråga						64
	skippad fråga						0

7. Du får välja mellan en bil som släpper ut 10 % mindre koldioxid eller en som är 10 % billigare i drift [Skapa diagram](#) [Ladda ner](#)

	10% mindre utsläpp	10% billigare i drift	Medelrankning	Antal svar
Vilken väljer du?	34,4% (22)	65,6% (42)	1,66	64
	besvarad fråga			64
	skippad fråga			0

Skicka svar

Tack för ditt bidrag!

Ett fordon som släpper ut 10 % mindre koldioxid är också billigare i drift. Så förutom den extra kostnaden vid inköp av fordonet är det en vinn vinn situation för dig och miljön.

Figur 17: Marknadsundersökning genomförd mellan 2010-09-15 och 2010-09-18

## B Teknisk data

Tabell 2: Teknisk data för rigg

Rigg	
Material	Stål
Dimension	50x50x3 mm
Längd	1070 mm
Bredd	940 mm
Höjd totalt	Justerbart 990 - 1490 mm
Höjd hopfälld	690 mm

Tabell 3: Teknisk data för kompressor och lufttankar

Portabel direktdriven byggkompressor med dubbla tankar	
Antal cylindrar	1
Avgiven luftmängd	200 l
Arbetsstryck	9,9 bar
Varvtal	2850 v/min
Cylindervolym:	280 l/min
Säkring	16 A
Effekt	3 Hk
Energikälla	230 V
Tankvolym	2x11 l
Totalvikt	39 kg
Längd	660 mm
Bredd	570 mm
Höjd	530 mm

Tabell 4: Teknisk data för luftmotor

Luftmotor	
Varvtal	6080 v/min
Luftförbrukning	250 l/min
Vridmoment	69 Nm
Vikt	2 kg
Längd	260 mm
Diameter	50 mm

## C Testkörning av prototyp

Tabell 5: samplingsresultat vid energiupptagning med 5 bar som grundtryck i systemet

Test nr	Samplingstid (s)	Tryck före (bar)	Tryck efter (bar)	Temp före ( $^{\circ}C$ )	Temp efter ( $^{\circ}C$ )
1	17	5	8	21	47
1	17	5	8	21	47
2	17	5	8	22	47
3	17	5	8	22	47
4	18	5	8	22	48
5	17	5	8	22	47
6	17	5	8	24	48
7	17	5	8	23	47
8	18	5	8	26	49
9	17	5	8	24	48
10	17	5	8	24	48

Tabell 6: Samplingsresultat vid energiåterföring

Test nr	Antal varv (n)	samplingstid (s)
1	10	14
2	10	14
3	9	14
4	10	14
5	10	14
6	10	14
7	10	15
8	11	15
9	10	14
10	10	14

Tillförd energi för simulering av en inbromsning är 2,2 kW, med försumbar energiförlust i elmotorn. Detta i förhållande till ett fullskaligt fordon med massan 1800 kg som bromsar mjukt från 90-30 km/h under 17 ger att prototypen tillförs en nedskalning till 7.5 procent av en identisk men fullskalig inbromsning. Med kännedom kring detta tillsammans med samplingstiderna kan energi tillgänglig beräknas som  $W_{in}$ . Återförd energi beräknas som:

$$W_{ut} = Nm * 2\pi n \quad (20)$$

Kraft (vid konstant vinkelhastighet):  $15N$

Hävarm: 1m

Insättning av givna, uppmätta samt beräknade värdesiffror i tabell 7.

Tabell 7: Sammanställning av resultat från tillförd och återförd energi med  $W_{in}$  samt  $W_{ut}$  beräknat

Tillförd energi			Återförd energi		
Samplingstid	Watt/s	$W_{in}$ (J)	$Nm$	Antal varv ( $2\pi n$ )	$W_{ut}$ (J)
17	2200	37400	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$18\pi$	848
17	2200	37400	15	$20\pi$	943
18	2200	39600	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$22\pi$	1037
18	2200	39600	15	$20\pi$	943
17	2200	37400	15	$20\pi$	943