

FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

## Innovativ och resurssnål Transmissionskomponenttillverkning



Författare:Hans Hansson  
Datum:130120  
Delprogram:Hållbar produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Syfte.....</b>	<b>5</b>
<b>4. Genomförande.....</b>	<b>5</b>
<b>5. Resultat .....</b>	<b>12</b>
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	12
<b>6. Spridning och publicering.....</b>	<b>13</b>
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning.....</b>	<b>14</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner .....</b>	<b>15</b>

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi)

## **1. Sammanfattning**

Projektet är huvudsakligen adresserat mot komponenttillverkning och Hållbar Produktionsteknik som är ett av 9 prioriterade inriktningar inom FFI. Den övergripande målsättningen med projektet har varit att praktiskt visa fördelar och möjligheter med kugghjul tillverkade med PM-tekniken jämfört konventionellt tillverkade kugghjul. Vid projektstart planerades 5 huvudaktiviteter. Dessa har genomförts och visar ett antal möjligheter som bla lägre material och tillverkningskostnad för PM-kugghjul, mindre energiåtgång vid komponenttillverkning och lägre komponentvikt och därmed lägre bränsleförbrukning vid nyttjande av PM-kugghjul i fordon samt nya konstruktionsmöjligheter .

Bilden på första sidan visar en av Vicura konstruerad elbilsväxellåda som Vicura i detta projekt konverterat från konventionellt tillverkade kugghjul av sätthädat stål till en ljudoptimerad design med PM-kugghjul. Prototypen har tillverkats av SwePart Transmission AB med sintrade ämnen från Höganäs AB.

1. Slut användare har besökts och informerats före och under projekttiden tex vid den årliga FFI-konferensen i Katrineholm. Kunskapsnivån har höjts under projektet och då vi visat potentialen med PM-tillverkade kugghjul har intresset hos slut användare ökat markant.
2. En växellåda för en mindre personbil och en växellåda för elbilar ursprungligen konstruerad med konventionellt tillverkade kugghjul från smide har konverterats till PM-kugghjul för att visa att PM-kugghjul med fördel kan ersätta konventionellt tillverkade kugghjul i tex växellådor. Ett antal prototyper har byggts.
3. Konventionellt tillverkade kugghjul i en rallybilsväxellåda har ersatts med PM-kugghjul. Växellådan har fungerat problemfritt. Punkt 2 och 3 bevisar att PM kan ersätta stålkugghjul även i mycket krävande applikationer.
4. Både rakskurna och snedskurna cylindriska kugghjul har under serieproduktionsmässiga förhållanden pressats, sintrats och härdats samt slutbearbetats med gott resultat. Vi har konstaterat att åtminstone de testade materialkvaliteterna A85Mo och Hipaloy ställer andra krav på skärverktygen i de fall skärande bearbetning

görs före härdning. Man får ett ökat slitage men positivt är att problemet med spånbrytning är obefintligt.

Vi har också konstaterat att formförändringarna vid sätthärdning är mycket mindre och stabilare jämfört ståluggkugghjul. Detta är en mycket stor fördel vid tillverkning av tex tunnväggiga ringhjul.

5. Produktkalkyler är gjorda för ett antal olika kugghjul och produktkostnaden förväntas bli upp mot 30% lägre för sätthärdade och finbearbetade PM-kugghjul jämfört konventionellt tillverkade kugghjul. Besparingen är volym och komplexitetsberoende. Generellt ökar besparingen för mer komplexa geometrier.

Vi har i projektet studerat både motorkugghjul och kugghjul för konventionella växellådor och hybridväxellådor. Utan hållfasthetshöjande åtgärder som ytförtätning eller HIPning (Hot Isostatic Pressing) kunde ungefär hälften av de konventionellt tillverkade och sätthärdade ståluggkugghjul till en lastbilsdieselmotor ersättas med PM-kugghjul.

Bättre formstabilitet vid härdning och bättre dämpning i materialet gör att PM-kugghjul kan vara speciellt fördelaktigt att använda i tex växellådor till el och hybridbilar där låg ljudnivå är extra viktigt.

Vi har i projektet visat att PM-kugghjul i många applikationer är ett tekniskt och kostnadsmässigt konkurrenskraftigt alternativ till konventionellt tillverkade kugghjul från smide. Intresset från tänkbara kunder, främst inom fordonsindustrin, är påtagligt större nu jämfört med när projektet startade. Vi har ett antal förfrågningar på prototypkugghjul tillverkade med PM-tekniken.

Framtagning av S/N-kurvor pågår men det är ett mycket tidsödande arbete. Dock är det nödvändigt att det finns materialdata tillgängligt för att kunna dimensionera PM-kugghjul. Brist på materialdata och erfarenhet från dimensionering och tillverkning samt att det inte finns någon fullskalig produktionsanläggning för tillverkning av PM-kugghjul begränsar användandet. PM-kugghjul framstår än mer positivt efter detta projekts genomförande.

## 2. Bakgrund

Höganäs AB har under lång tid arbetat med att ta fram pulverblandningar som närmar sig egenskaperna hos stål. Industrin har under många år använt sintrade kugghjul i lågt påkända applikationer som tex handhållna elverktyg och trädgårdsredskap. Med nya pulverblandningar och ny tillverkningsteknik ser Höganäs AB möjlighet att använda PM-kugghjul även i högt påkända applikationer som motorer och växellådor till fordon. SwePart Transmission och Höganäs AB har samarbetat med ta fram kugghjul för att ersätta konventionellt tillverkade kugghjul med PM-kugghjul i olika applikationer bla personbilsväxellådor. Försöken har fallit väl ut vilket praktiskt visar potentialen för PM-kugghjul. Vi har tillsammans också jämfört produktkostnad för konventionellt tillverkade

kugghjul med PM-kugghjul vilket visat stor potential för lägre produktkostnad för PM-kugghjul.

### 3. Syfte

Projektet syftar till att öka vår egen och slutanvändarnas kunskap om PM-kugghjul vad gäller dimensionering, tillverkning och kostnad.

För dimensionering av stålkugghjul finns klara dimensioneringskriterier i form av standarder, lång erfarenhet och framtagna S/N-kurvor för vanliga kugghjulsmaterial. Allt detta saknas för PM-kugghjul men måste göras tillgängligt för att möjliggöra framtida konstruktioner av PM-kugghjul.

En mycket viktig faktor för möjligheten att införa nya material och tillverkningstekniker är produkt och investeringskostnad. Projektet har därför också som mål att verifiera tillverkningskostnad för PM-kugghjul jämfört stålkugghjul under serieproduktionslika förhållanden.

### 4. Genomförande

Vid projektstart besöktes ett antal slutanvändare för att pejla intresset och informera om statusen för PM-tekniken map användning för kugghjulstillverkning.

Projektets framskridande har löpande redovistas vid kontakt med både svenska och utländska slutanvändare samt bla vid den årliga FFI-konferensen i Katrineholm.

#### **PM vs konventionellt tillverkade kugghjul**

Vi har studerat möjligheten att ersätta konventionellt tillverkade kugghjul med PM-kugghjul i bla motortransmissioner till tunga fordon och växellådkugghjul till personbilar.

Denna studie visade att i båda applikationerna kunde hållfasthetsmässigt drygt hälften av kugghjulen ersättas med PM-kugghjul i nu kommersiellt tillgängliga materialkvaliteter utan hållfasthetshöjande påtgärder som ytförtätning (rullning) eller HIPning.

#### **Konvertering av växellåda**

Vicura har konstruktionsmässigt konverterat en elbilsväxellåda från stål till PM och en Opel-växellåda (M32) som bla sitter i nya SAAB 9-5.

För M32-lådan blev viktreduktionen 1,1 kg.

Prototyper av elbilsväxellådan har tillverkats och den konverterade M32 –växellådan är under tillverkning och beräknas sitta i bil under försommaren 2013.

För de mest påkända kugghjulen, växel 1 och 2 kommer convoloid resp asymmetrisk kugg att användas för att kompensera PMs lägre hållfasthet.

Med PM-tekniken kan man optimera kuggroten för ökad hållfasthet jämfört avvalsningsfräsning där metoden begränsar utformningen av kuggroten. Beräkningar visar att kuggrothållfastheten kan öka 8 - 15% genom ”fri” utformning av kuggroten.

### **Praktiska försök med PM-kugghjul**

För att bevisa funktionen ersattes kugghjulen till växelsteg 3, 4, 5 samt backen i en SMART-bil med PM-kugghjul, bild 1. Denna bil har i dagsläget rullat 12'000 mil och växellådan har fungerat utan problem. Provet kommer att pågå till 20'000 mil innan det avbryts.

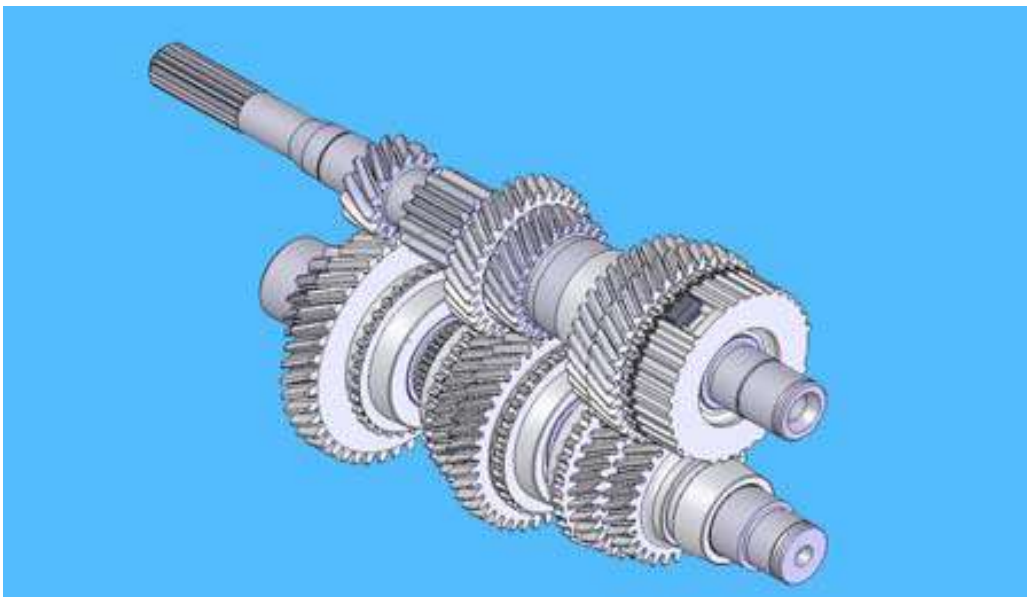


Bild1. Layout på kugghjul till växellåda för SMART-personbil.

Teoretisk reduktion av bränsleförbrukning vid acceleration beräknades för SMART-bilen bli 6% på grund av lägre masströghet för PM-kugghjulen jämfört original kugghjul av stål. PM har lägre densitet och möjliggör dessutom viktbesparing genom nya designmöjligheter som inte är lönsamma eller tillverkningstekniskt möjliga vid skärande bearbetning. Positivt är också att lägre masströghet innebär mindre belastning på synkroniseringsytorna och snabbare växling.

För att också bevisa att PM-kugghjul kan vara hållfasthetsmässigt jämförbara med konventionellt tillverkade kugghjul ersattes kugghjulen i en rallybil Mitsubishi EVO9, bild 2, med HIPade PM-kugghjul.

Bilen har körts 3 säsonger utan problem och vid demontering syntes inga skador på kuggen. Slitaget på kopplingstånderna som tillhör PM-kugghjul var synbart mindre jämfört slitaget på kopplingstånderna för stål kugghjulen. Noterbart är också att kopplingståndens bredd för PM-kugghjulet bara är 10 mm jämfört bredden på motgående kopplingsdetalj av stål vars tandbredd är 15 mm bred. Hade PM-kugghjulets tand också

varit 15 mm hade sannolikt ingen urflisning vid kanten skett. Bild 3 och 4 visar kopplingstånderna efter 550 km körning.

Kopplingsdelarna har gått mot varandra varför de med säkerhet utsatts för samma belastning.



Bild 2. Mitsubishi EVO9 med PM-kugghjul i växellådan.



Bild 3. Kugghjul i sätthärdat A85Mo5.



Bild 4. Kopplingshylsa i sätthärdat stål.

### **Materialegenskaper**

För att framtagning av materialdata, S/N-kurvor har i projektet en FZG-provmaskin av fabrikat Strama köpts, bild 5.

Vicura har beräknat och konstruerat FZG-kugghjul för pulsator och FZG-riggsprov.

Tillgängliga materialdata är ett absolut måste för att möjliggöra dimensionering av PM-kugghjul. Bild 6 visar resultat från pågående framtagning av materialdata.

Denna utrustning kommer även att användas i ett projekt med bidrag från energimyndigheten där vi studerar verkningsgrad, slitage och inkörningsförlopp för olika bearbetningsmetoder för PM vs stål samt olika smörjoljor.



Bild 5. FZG-provmaskin för framtagning av S/N-kurvor.



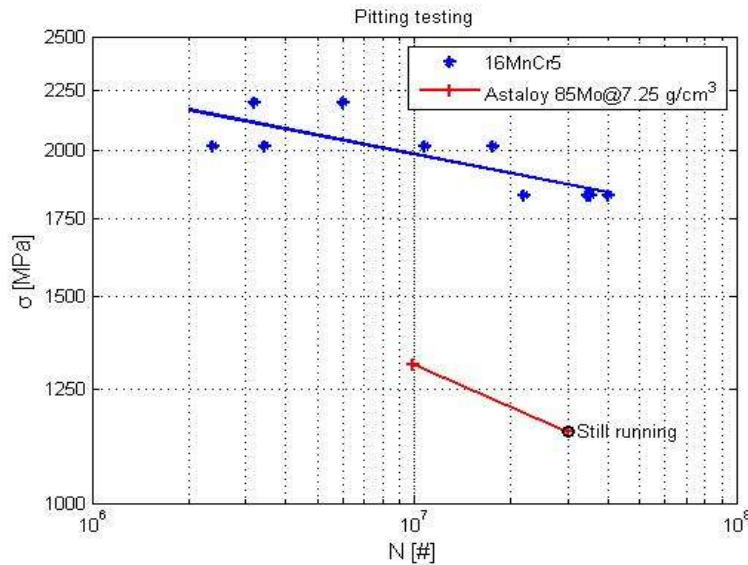


Bild 6. Pågående framtagning av S/N-kurva för 16MnCr5 vs A85Mo.

Med tanke på att PM är helt isotropt jämfört stål så kan man förvänta sig att PM är mer formstabil vid tex sätthårdning. Vi har därför jämfört formförändringen vid konventionell sätthårdning i en pusherugn av 10 mycket slanka kugghjullar, bild 7, av vardera A85Mo och stål.

GEAR DATA		
Number of teeth	z	118
Normal Module	$m_n$	1,5
Gear width	B	15
Pressure angle	a	15°
Helix angle	b	15°
Direction of Helix		
Helix at base circle	$b_p$	
Normal profile shift coefficient	x	
Reference diameter	d	183,24
Base diameter	$d_b$	
Tip diameter	$d_a$	186,25 h10
Root diameter	$d_f$	179,5
Span width/ over K teeth	W/k	66,95/15
Measurement over balls	$M_d$	186,57
Ball diameter	$d_M$	2,5
Involute start diameter	SCP	



Bild 7. Kugghjul för bestämning av formförändring vid sätthårdning.

Resultatet framgår av tabell 1. Maximala orundheten blev mindre än hälften för PM-kugghjulen och spridningen i diameterförändring blev också mycket mindre. Med bättre fixturer samt lågtrycksuppkolning och gaskylning blir formförändringarna med säkerhet ännu mindre.

	<i>PM</i>		<i>Steel</i>	
	<i>Change Diameter</i>	<i>Change Roundness</i>	<i>Change Diameter</i>	<i>Change Roundness</i>
<b>Average 10 parts</b>	0,04069	0,0717	-0,21106	0,12558
<b>Max</b>	0,0553	0,1228	-0,1856	0,2236
<b>Min</b>	0,0169	0,0151	-0,2909	0,0533
<b>Variation</b>	0,0384	0,1077	0,1053	0,1703

Tabell 1. Distortion of ring gear at case hardening .

Med tanke på ökade krav på lägre ljud i el och hybridbilar där planetväxlar med tunna ringhjul är en vanlig komponent så finns det mycket stor potential för PM-kugghjul. Finbearbetning av ringhjul med invändig kugg är mycket kostsamt om stora geometriska fel ska korrigeras. Kuggslipning är då enda alternativet. Våra försök tyder på att formförändringarna för tunna ringhjul i PM är så pass små att tex kugggrullning eller kuggghening är tillräckligt för att nå tillräcklig kuggkvalitet. Försök tyder också på att PM dämpar ljud bättre än stål vilket också är positivt, speciellt för elbilar.

### **Produktkostnad och ekonomi**

Produktkostnads-kalkyl har gjorts för ett antal kugghjul där målsättningen är att kugghjul pressas till färdig geometri. Sintring och sätthårdning görs i samma process, lågtrycksuppkolning och gaskylning. Därefter görs konventionell finbearbetning tex hålslipning och kuggslipning alt kuggghening. Ett exempel framgår av bild 8.



Bild 8. Konventionellt tillverkat och sätthärdat kugghjul.

Processflöde konventionell tillverkning:

Smitt ämne – Svarvning – Kuggfräsning – Driftning av kilspår – Sätthårdning –  
Finbearbetning av hål – Kuggslipning

Processflöde PM-kugghjul:

Sintrat och sätthärdat ämne – Finbearbetning av hål – Kuggslipning

I vissa fall kan någon mjukbearbetningsoperation behövas som komplement till pressningen.

Materialspillet blir bara några enstaka procent att jämföra med typiskt runt 30% spån vid konventionell kugghjulstillverkning.

För studerade kugghjul kalkylerades produktkostnaden till 10-30% lägre kostnad jämfört konventionellt tillverkade kugghjul.

Ur kostnadsperspektiv är det också mycket positivt att investeringskostnad och lokalyta blir avsevärt lägre jämfört vid konventionell kugghjulstillverkning eftersom taktiden i pressoperationen (motsvarande mjukbearbetningen) är avsevärt lägre och att geometrin färdigställs i en operation.

Den allmänna uppfattningen att pressverktyg är dyra och kräver mycket stora seriestorlekar måste bedömas från fall till fall. Även konventionell kugghjulstillverkning kräver ganska stora verktygsinvesteringar och våra studier visar att vid årsvolymer på 10'000 kugghjul kan återbetalningstiden för PM-kugghjul jämfört med konventionellt tillverkade kugghjul vara under ett år beroende på komplexitet och verktygsbehov.

Nya konstruktionsmöjligheter som inte är bearbetningstekniskt möjligt eller ej ekonomiskt försvarbart som för viktoptimering, bild 9, att ersätta två komponenter med en komponent eller design som förhindrar felmontering har inte beaktats.



Bild 9. Viktoptimerat kugghjul i PM

**Bearbetbarhet**

SwePart har tagit fram FZG-kugghjul i stål och olika PM-kvaliteter

Ett större antal FZG-kugghjul i konventionellt sätthärtningsstål och PM-kvalitet A85Mo och Hipaloy har bearbetats fram på konventionellt sätt från sintrade puckar.

För både stål och båda PM-kvaliteterna valdes vid svarvning vändskär från Seco och moderata skärdata: Skärhastighet=240 m/min, matning=0,3 mm/varv och skärdjup 3 mm. Vid svarvning av A85Mo fann vi att skär WNMG080412 med spånbrytare MR6 fungerade bäst. Skäret fick bytas efter 8 minuters ingreppstid att jämföra med 30 minuters ingreppstid för motsvarande bearbetning i stål.

Skäregenskaperna för A85Mo liknar bearbetning av segjärn med små korta spån.

Hipaloy liknar mer rostfritt stål och skär med beteckningen WNMG080408 med spånbrytare MF3 användes. Även här fick skäret bytas efter 8 minuters ingreppstid. Spånorna var små och korta men viss löseggsbildning konstaterades.

Endast A85Mo kuggfrästes med konventionell snabbstålshob i material ASP2030 och Alcrona-beläggning. Antalet detaljer var för litet för att tydligt se någon skillnad mellan stål och PM men frästadsstoppen fick en mörkare toning på spånsidan där PM-kugghjulen frästs vilket vi tolkar som högre värmebelastning.

Vi vill mycket tydligt betona att vi inte lagt tid på att optimera skärdata eller prova skär med bäst livslängd. Positivt är att problem med spånbrutning inte existerar.

Möjligen kan också PM-kvaliteter som inte är legerat med Molybden ha bättre skärbarhet.

Vid hårdsvavning av hål och kuggslipning noterades heller ingen skillnad för PM jämfört stål. Åtminstone vid hårdsvavningen borde skillnaden i slitage av vändskären kunnat noteras om skillnad i bearbetbarhet existerat.

Med tanke på mycket hög produktivitet vid pressning av PM-kugg så reduceras investeringskostnad och erforderlig produktionsyta kraftigt jämfört med konventionell kuggjulstillverkning.

## 5. Resultat

### 5.1 Bidrag till FFI-mål

- Materialåtgången vid tillverkning av PM-kugghjul är upp mot 30% lägre jämfört konventionell kugghjulstillverkning. Följaktligen blir energiåtgången vid tillverkning av PM-kugghjul lägre också pga att mindre maskinbearbetning krävs. En generell bedömning är att även energiåtgången blir 30% lägre för framställning av kugghjul i PM jämfört tillverkning i i stål. Sätthärkning, vilket är en energikrävande process, kan göras i samband med sintringsprocessen vilket också sparar energi. Med tanke på PMs lägre densitet och möjlighet till viktbesparingar

i konstruktionen beräknas energiåtgången vid acceleration av en personbil kunna reduceras 8-22% .

- Baserat på att Höganäs är världsledande vad gäller framställning av högkvalitativa metallpulverblandningar lämpade bla för kugghjulsframställning samt material och processkunnande så finns stora möjligheter för svensk industrin att bli ledande med att använda och utveckla tekniken att tillverka PM-kugghjul vilket erbjuder en mycket stor potential inte minst med tanke på att antalet kugghjul tenderar att öka i framtida fordon som är el och hybriddrivna.
- Att ersätta konventionellt tillverkade kugghjul av sätthärdat stål med PM-kugghjul innebär både lägre produktkostnad, lägre vikt och lägre energiförbrukning samt nya konstruktionsmöjligheter vilket är till gagn för de som anammar möjligheterna.
- För fortsatt kompetens och forskning inom PM-tillverkade kugghjul har detta projekt har resulterat i:
  1. Anställning av doktorand på KTH som arbetar med tribologiska egenskaper för kugghjul tillverkade av PM-material.
  2. Anställning av civilingenjör på SwePart Transmission för kunskapsuppbyggnad inom tillverkning och dimensionering av PM-kugghjul.
  3. Fortsatt projekt finansierat av energimyndigheten där även LTH och Borg Warner deltar för att studera verkningsgrad och slitage av kugghjul beroende på material, tillverkningsmetod och smörjmedel.

## 6. Spridning och publicering

Resultat från detta projekt har löpande presenterats vid den årliga klusterkonferensen i Katrineholm samt även bla vid Bodycotes värmebehandlingsseminarium 2012 och vid presentationer i Transmissionsklustret.

Projektets slutresultat kommer att presenteras på klusterkonferensen i år, 2013.

Både svenska och internationella slutanvändare har informerats vid besök.

## **7. Slutsatser och fortsatt forskning**

Vi har i detta projekt verifierat att det är möjligt att ersätta konventionellt tillverkade kugghjul med PM-kugghjul i både motorer till person- och lastbilar samt i växellådor till främst personbilar.

PM-tekniken erbjuder ett antal fördelar:

- Lägre komponentkostnad
- Mindre distortion vid värmebehandling och bearbetning
- Mindre materialåtgång i tillverkningsprocessen
- Mindre energiåtgång i tillverkningsprocessen
- Lägre investeringskostnad och lokalbehov
- Lägre fordonsvikt
- Lägre energiförbrukning i fordon
- Nya konstruktionsmöjligheter
- Lägre ljud

Mycket viktigt för ökad användning av PM-kugghjul är tillgång till materialdata och dimensioneringsregler för kugghjul motsvarande tex ISO6336 för konventionellt tillverkade kugghjul.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

### Höganäs

Kontaktperson Höganäs AB: Anders Flodin tel 0705698062



Kontaktperson KTH: Ulf Olofsson tel 087906304, Stefan Björklund tel 087906302



Kontaktperson Vicura AB: Peter Karlsson tel 0520290044



Kontaktperson SwePart Transmission AB: Hans Hansson tel 047620913