

Direkt Metall

Direct metal

Mats Vikström, Börje Andersson, Ingvar Wikström, Torbjörn Larsson, Martin Ödlund, Peter Isberg, Björn Hellholm, Per-Olof Danielsson, Joel Andersson, Niklas Eriksson, Mikael Schuisky, Jörgen Andersson och Björgvin Hjørvarsson

Projektnummer: 10915 Publicerad: 2019-05-14

Distribution

Denna rapport är öppen.

Med stöd från



Strategiska
innovations-
program

Sammanfattning

Projektet DirektMetall genomfördes för att undersöka den potentiella betydelsen av "Additive Manufacturing" (AM) för tillverkning av metalliska komponenter och dess inverkan på framtida konkurrenskraft. Området transport med olika farkoster identifierades som lämpligt område för analysen. Konkretisering av frågeställningarna erhöles genom detaljerad analys av farkostkomponenter där några valdes för framställning som demonstratorer. Detta angreppssätt tillät analys av möjligheter och begränsningar relaterade till både form och funktion av AM tillverkade komponenter. Utgående från denna erfarenhet identifierades möjligheter och utmaningar kopplade till implementeringen av AM i industriella sammanhang och dess inverkan på befintliga och framtida värdekedjor. Studien demonstrerar möjligheten att avsevärt reducera vikt per funktion (minst 50%) för lastbärande komponenter. Dessutom förutses helt nya möjligheter att integrera funktionalitet i komponenter med framtida AM-produktionsteknologi. Potentialen demonstreras tydligt i de identifierade möjligheter som framkom i analyser av demonstratorer framställda med AM.

Vi har identifierat följande områden som centrala med avseende på nödvändiga insatser för att skapa förutsättningar för effektivt utnyttjande av AM i svensk metallindustri:

Material: Utbudet av tillgängliga material för AM är mycket begränsat. Betydande satsningar på utveckling av befintliga materialklasser för AM behövs. För framtida konkurrenskraft behövs dessutom även utveckling av helt nya material för AM, t. ex amorfa material och keramiska material.

Design och konstruktion: Maskinassisterat design och konstruktion behöver utvecklas för AM. Resursflödet kan påverkas på ett mycket märkbart sätt och kan dessutom möjliggöra resurscopypling och därmed realisera avsevärda framsteg inom återbruk.

Tillverkning: Tillgång till skalbara tillverkningsprocesser bedöms vara avgörande för effektiv implementering av AM. För närvarande domineras den europeiska och amerikanska marknaden av pulverbäddbaserade metoder. Framställning av ytterst små eller mycket stora komponenter är nära omöjlig att uppnå på detta sätt. Avsevärda insatser inom utvecklingen av generering och hantering av smälta är därför nödvändiga. Dessutom är kontroll av kemisk sammansättning av tillverkade komponenter en förutsättning för många potentiella tillämpningar. Kontroll av metalliska materials mikrostrukturer, AM-tillverkade produkters restspänningstillstånd, förmåga att effektivt kunna addera ytskikt av bi-material och att kunna producera tunna isolerande elektriska skikt internt i 'materialet' utgör andra centrala delar i att skapa verkliga tekniska genombrott baserade på AM-teknik.

Validering: Tillgång till effektiva lösningar för jämförelse av designad och tillverkad komponent är en förutsättning till kostnadseffektiv validering. Övervakning av smältan under tillverkning och återkoppling med automatisk styrningen av tillverkningsprocessen och justering av defekter är en mycket sannolik förutsättning för en kostnadseffektiv helhetslösning.

Förutsatt att de utmaningar som föreligger kan lösas, kommer AM att få mycket stor inverkan på tillverkningsindustrier inom vitt skilda områden. Förändringar i värdekedjor kan dessutom ge upphov till möjligheter för att ändra effektiviteten i resursflödet (material och energi). Dessa förändringar kan nyttjas för att skapa ett mer resurseffektivt samhälle, förutsatt att insatser drivs, koordineras och nyttjas på ett ändamålsenligt sätt.

DirektMetall är ett komplement till projektet Ramp-Up.

Summary

The DirektMetall project was conducted to investigate the potential significance of "Additive Manufacturing" (AM) for the manufacture of metallic components and its impact on future competitiveness. The area of transport with different vessels was identified as a suitable area for the analysis. Concretization of the issues was obtained through detailed analysis of craft components where some were selected for production as demonstrators. This approach allowed analysis of possibilities and limitations related to both the form and function of AM manufactured components. Based on this experience, opportunities and challenges related to the implementation of AM were identified in industrial contexts and its impact on existing and future value chains. The study demonstrates the possibility of significantly reducing weight per function (at least 50%) for load-bearing components. In addition, completely new opportunities are expected to integrate functionality into components with future AM production technology. The potential is clearly demonstrated in the identified opportunities that emerged in analyzes of demonstrators produced with AM.

We have identified the following areas as central with regard to the necessary efforts to create the conditions for efficient use of AM in the Swedish metal industry:

Material: The range of materials available for AM is very limited. Significant investments in the development of existing material classes for AM are needed. In addition, for future competitiveness, development of completely new materials for AM, such as amorphous materials and ceramic materials, is needed.

Design and construction: Machine-assisted design and construction need to be developed for AM. The resource flow can be influenced in a very noticeable way and can also enable resource cycling and thereby realize considerable progress in reuse.

Manufacturing: Access to scalable manufacturing processes is deemed to be crucial for efficient implementation of AM. Currently, the European and American markets are dominated by powderbased methods. The production of extremely small or very large components is nearly impossible to achieve in this way. Substantial efforts in the development of generation and handling of melt are therefore necessary. In addition, chemical composition control of manufactured components is a prerequisite for many potential applications. Control of the microstructures of metallic materials, the residual stress state of AM-manufactured products, the ability to effectively add surface layers of bi-material and to be able to produce thin insulating electrical layers within the "material" constitute other central parts in creating real technical breakthroughs based on AM technology.

Validation: Access to effective solutions for comparing designed and manufactured components is a prerequisite for cost-effective validation. Monitoring of the melt during manufacture and feedback with automatic control of the manufacturing process and adjustment of defects is a very likely condition for a cost-effective overall solution.

Provided that the challenges that exist can be solved, AM will have a very large impact on manufacturing industries in widely differing areas. Changes in value chains can also give rise to opportunities for changing the efficiency of the resource flow (materials and energy). These changes can be used to create a more resource-efficient society, provided that initiatives are run, coordinated and used in an appropriate manner.

DirektMetall is a complement to the Ramp-Up project.

Nyckelord:

Additive Manufacturing

BAKGRUND.....	2
UTVECKLINGSSTATUS	2
MÅLSÄTTNING	2
ANGREPPSSÄTT.....	4
AVGRÄNSNING.....	4
ANALYS.....	4
EXEMPEL PÅ ANALYS AV KOMPONENTER	5
VÄRDEKEDJOR OCH ARBETSFLÖDEN	7
IDENTIFIERADE BEHOV.....	8
SLUTSATSER.....	9
VISION	9
MÅL.....	10
STRATEGI	11
SLUTORD	11
BILAGA 1.....	12
BILAGA 2 (KONFIDENTIELLT ARBETSMATERIAL)	13
BILAGA 3.....	13
BILAGA 4.....	13
BILAGA 5.....	13
BILAGA 6.....	13

BAKGRUND

Additiv tillverkning (Additive Manufacturing, AM, på engelska) är en metod som börjar användas för direkttillverkning av mekaniska konstruktionsdetaljer. I förhållande till traditionell tillverkningsteknik erbjuder AM en rad fördelar som t.ex. konstruktion utifrån funktion, möjlighet till en av kostnadsskäl ej tidigare möjlig kundanpassning, möjlighet till viktsbesparing, kortare design- och tillverkningscykler, minskad resursanvändning och inte minst möjligheter i form av nya affärs- och logistikmodeller.

UTVECKLINGSSTATUS

De länder som leder utvecklingen inom AM har tagit fram nationella visioner och målbilder¹. Industri och undervisningsinstanser har i de länderna långt drivna AM-initiativ där många är finansierade av omfattande statliga program. Redan idag har de länderna exempel på realistiska tillämpningar där man påvisat exempel på:

- 90% reduktion av råmaterial vid tillverkning
- 90% reduktion av tillverkningskostnader ("printningen")
- 75% reduktion av produktionskostnader (design + konstruktion + print)
- 90% reduktion av vikt²

Redan nu ser vi att direkttillverkning av metalliska komponenter ökar i omfattning och utvecklingen går snabbt emot att använda AM för tillverkning av lastkritiska komponenter. I jämförelse med värdekedjan för traditionell tillverkning ser vi nu kortare ledtider samt ökad funktionell anpassning av AM-tillverkade detaljer. Kortare ledtider och möjligheten till lägre tillverkningskostnader med AM som tillverkningsmetod medför därför att stora delar av värdekedjorna för traditionell tillverkningsmetodik kommer att påverkas.

MÅLSÄTTNING

Projektets målsättning utgår från att:

1. Visa på framtida möjligheter med AM för utvalda konstruktioner med transportanknytning.
2. Föreslå möjlig plan för hur och var metallindustrin kan bygga kompetens och/eller teknisk förmåga för att utnyttja AM-tillverkningens möjligheter maximalt.
3. Utveckla förslag till arbetsprocesser och design- och konstruktionsmetodik anpassade för ett scenario där AM är integrerat i de metalliska materialens värdekedjor.

Utöver att synliggöra nämnda möjligheter förväntades även projektet resultera i förslag till möjlig strategi för hur och var metallindustrin kan bygga kompetens och/eller teknisk

¹ <https://www.csis.org/analysis/made-china-2025>, <https://3dprint.com/6800/korea-3d-printing>, https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/AMCapstone_Final.pdf, <https://3dprintingindustry.com/news/uk-additive-manufacturing-national-strategy-2018-25-published-3d-printer-122461/>,

² <http://www.3ders.org/articles/20140207-china-developing-world-largest-3d-printer--prints-6m-metal-parts-in-one-piece.html>

förmåga för att utnyttja AM-tillverkningens möjligheter maximalt och undvika potentiella fallgropar.³

³ Svensk metallindustri lämnar ca 40 miljarder i handelsöverskott per år, baserat på värdekedjan för traditionell tillverkning. AM är disruptivt till naturen och har således potentialen att påverka svensk industri på ett kännbart sätt.

ANGREPPSSÄTT

Den bärande idén bakom målsättningen är att synliggöra de möjligheter som finns till stärkt konkurrenskraft som uppstår när produkt- och funktionsutveckling drar fördelar av AM baserad tillverkning. För att identifiera hur dessa förändringar kan åstadkommas formulerades följande frågor:

1. Vilka förändringar av värdekedjorna kommer att uppstå och därmed,
2. Vilka förmågor behöver svensk industri utveckla?
3. Vad behöver svensk industri klara av för AM av metalliska material?
4. Hur kommer värdekedjan att se ut med AM som tillverkningsmetod?

För att få svar på dessa frågor inventerades vad material- och komponenttillverkare måste prestera för att vara konkurrenskraftiga när AM integreras i industriell produktion. Svaret beror delvis av vilka slutprodukter som avses, t.ex. om en elmotor, en flygplansvinge eller om ett helt fordon skall tillverkas. Samtidigt fanns det många aspekter som var gemensamma och därmed oberoende av vilket industrisegment som avsågs.

AVGRÄNSNING

Projektet avgränsades till transportsystem och produktgruppen farkoster. De ingående farkosterna delades ner i olika funktionsområden som t.ex. kraftgenerering, kraftöverföring, lastbärande, etc. Inom funktionsområdena identifierades problemställningar (materialkrav, tillverkningsproblem, o.s.v.) som är gemensamma mellan de olika farkosttyperna. De gemensamma problemställningarna användes som grund för att identifiera möjligheter, flaskhalsar och konkreta behov av att bygga kompetens och teknisk förmåga. Resultaten kan generaliseras, dock måste det betonas att generaliseringen innebär en begränsning med avseende på slutsatser inom till exempel nyttjandet av andra material än metalliska.

ANALYS

Projektets genomförande baserades på analys av transportscenarier för att möjliggöra identifiering av gemensamma nämnare i farkosterna från medverkande industriparter. Enkla transportscenarios formulerades för att konkretisera gemensamma nämnare och välja väsentliga komponenter i farkosterna för studien:

1. *Persontransport på väg*
2. *Transport av last i terräng*
3. *Transport med en luftfarkost*

Framdrift av en farkost genereras oftast genom vridande kraft. Därför analyserades också delscenariot ”vridande kraft”, exemplifierat med en elmotor i denna studie.

Alla farkoster som analyserades behöver, med olika motiveringar, minska vikt per funktion för att minska totala vikten med 50%. Farkosternas användningsområde och funktion medför olika prioritering av vikt per funktion, som inte berörs i studien.

EXEMPEL PÅ ANALYS AV KOMPONENTER

Det valda framtidsscenariot var att *AM har industrialiserats* och därmed antog vi att *AM maskiner kan användas för att:*

- Tillverka önskade geometrier
- Framställa samma/bättre komponentkvalité som traditionella metoder
- Tillverkning av stora och små komponenter (ingen övre eller nedre gräns definierades)
- Använda flera material i en och samma komponent

De två första kriterierna ansågs avgörande för initiering av nyttjandet av AM för befintlig komponenttillverkning. De två senare betraktades som nödvändiga för att skapa framtida konkurrenskraft.

I utvalda fall framställdes demonstratorer för att påvisa möjligheterna med AM och för att identifiera utmaningar. Resultat från en av dessa studier, ny rotordesign för elektriska motorer, visas i *Figur 1*. Möjligheter för att skapa strukturer av önskad form samtidigt som tillkortakommanden med avseende på fysikaliska egenskaper tydligen identifierades.

Dagens AM teknologi medger inte framställning av funktionsoptimerade komponenter av detta slag. Bland de tillkortakommanden som identifierades är de magnetiska egenskaperna av tillgängliga material för AM. Med rätt materialegenskaper förväntas den form som studerades ge mycket gynnsamma egenskaper. Vidare identifierades begränsningar med avseende på kombination av olika material i en och samma komponent. Vidareutveckling av AM förväntas möjliggöra integrering av yttre form och *flerfaldig funktionalitet genom kombination av olika material* med vitt skilda egenskaper. Till exempel, möjligheten av att skapa skiktade strukturer, där olika skikt har specifika fysikaliska egenskaper, förväntas medföra stora framsteg inom området.

Ett andra exempel på komponent som designades och tillverkades med nuvarande "state-of-the-art" metoder (både beräkning och tillverkning) var ett stag för en personbil. Utfallet gör det troligt med en viktbesparing på 50% med AM metoder. För att nå det målet krävs dock en utveckling vilket beskrivs kortfattat nedan och mer utförligt i bilagor.



Figur 1. Helt ny typ av rotordesign framställd med AM (med tillstånd från ABB)



Figur 2. State-of-the-art topologioptimering av en konstruktionskomponent (med tillstånd från Volvo Cars)

Analysen visar bland annat att höggradigt maskinassisterad⁴ design och konstruktionsmetodik, i kombination med numerisk analys, behöver vidareutvecklas för att resurseffektivt kunna tillverka AM-produkter med önskade egenskaper. Exempel på egenskaper som behöver inkluderas i ovan nämnda analys är t.ex. elektriska, elektromagnetiska och mekaniska egenskaper. Vidare behöver verkningsgrad med en fastställd ekonomisk livslängd optimeras. Certifiering behöver även beaktas i vissa fall, till exempel för vissa lastbärande strukturer.

Flera stora mjukvaruföretag saluför idag lösningar som delvis uppfyller de ovan nämnda behoven. För att kunna använda avancerad storskalig simulering krävs ytterligare utveckling av validerade modeller som tillförlitligt förutsäger multifysikaliska skeenden under tillverkningsprocessen. Ett omfattande arbete kommer även att krävas för att utveckla materialdatabaser för olika produktionsparametrar och material på ett kostnadsoptimalt och samtidigt funktionssäkert sätt. Samarbete med certifierande myndigheter krävs för att accelerera ett genombrott i nyttjande av AM-tillverkade produkter, exempelvis inom området flygfarkoster.

I ett längre tidsperspektiv måste målsättningen inkludera utveckling av ändamålsenlig AM infrastruktur⁵ inklusive instrumentering. Med instrumentering avses hårdvara kombinerat med ett AI/expert-system som under tillverkning av produkter styr och samtidigt optimerar form och (material-) egenskaper, en "AM-maskin". Materialegenskaper kan till exempel styras genom val av mikrostruktur (mikro-meso) med skräddarsydda (lokala) temperaturcykler. Restspänningstillstånd behöver därför vara kända för styrning av eventuell efterbehandling. Produktionsparametrar måste därför vara styrbara och kopplas till in-situ övervakning av processen.

Bilagan design & konstruktion beskriver delar av DirektMetalls benchmarkstudier syftande till en första identifiering av svagheter och utvecklingsbehov i närtid med en horisont på cirka 5 år. Vidare görs där ett försök till en detaljerad analys av vilka forsknings- och utvecklingssteg som krävs för byggande av en nästa generation av "AM-maskiner".

Ovan nämnda exempel och analys har resulterat i att involverade designers och konstruktörer fått insikt i vilka nya möjligheter som står till förfogande med AM

⁴ Användning av AI inom detta sammanhang är mycket tidsenligt, se till exempel: "What can machine learning do? Workforce implications", Erik Brynjolfsson, Tom Mitchell, Science 22 Dec 2017: Vol. 358, Issue 6370, pp. 1530-1534

⁵ Med infrastruktur avses vi alla delar i flödet från behovsformulering till färdigtillverkad komponent

metoderna. Med den insikten som grund genomfördes en analys av skillnader i processer mellan traditionellt och AM baserat tillverkningsflöde. Skillnaderna användes för att identifiera kritiska steg i den förväntade värdekedjan för AM.

VÄRDEKEDJOR OCH ARBETSFLÖDEN

Befintliga och möjliga framtida arbetsflöden analyserades. Analysen baserades på samtal med projektets industriparter kring komponenter framställda inom nuvarande värdekedja. Resultaten användes för identifiering av uppenbara/nödvändiga förändringar i samband med industrialiseringen av AM.

Värdekedjan för aktuell traditionell metalltillverkning kan formuleras som:

1. Producera legering
2. Forma konstruktionselement (plåt, rör, balk, tråd, etc.) i standardkvalité
3. Design & konstruktion utgående från konstruktionselement
4. Tillverka komponenten från konstruktionselement
5. Kvalitetskontroll på tillverkad komponent

Värdekedja baserad på AM-tillverkning, inom 5–10 år, kan formuleras som:

- A. Design & konstruktion av (flerfunktionell) komponent utgående från möjligt intervall på materialegenskaper (multifysik)
- B. Identifiering av lämpliga material efter intervall på materialegenskaper
- C. Framställning av råmaterial för AM-processer (pulver, tråd, ...)
- D. AM-tillverkning av komponent inkl. processmonitorering
- E. Validering av egenskaper i tillverkad komponent mot resultat från design & konstruktion

Mot bakgrund av den förväntade förändringen av värdekedjan för AM-tillverkning av metallkomponenter förväntas också arbetsflödet förändras från:

Traditionell arbetsgång:

1. Erfarenhetsbaserad design av geometri baserat på tillgängliga tillverkningsmetoder
2. Analys av designad funktion av komponenter
3. Tillverkning baserad på konstruktionselement som sätts samman till önskad form och funktion alternativt bearbetas fram ur materialblock
4. Eventuellt användning av olika typer av provning för att verifiera kvalité i tillverkad komponent
5. Komponenten planeras för utbytes- eller underhållsintervall

Till ett möjligt arbetsflöde med AM metoder:

- a. Maskinassisterad design baserad på krav från multifysik parameterrymder vilket inkluderar även vald tillverkningsmetod och aktuell maskins prestanda
- b. Form och materialegenskaper på komponenten styrs under tillverkningen
- c. Jämförelse mellan beräknad lösning och tillverkad lösning som grund för kvalificering och certifiering för användning av komponenten
- d. Komponentens användning övervakas och livslängdsberäknas "in-situ" för planering av underhåll/repairation/ utbyte efter individuell driftprofil

Delar av ovanstående steg (i flödet) finns i tidiga versioner redan idag. Med insikten om befintliga begränsningar i mänskliga och monetära resurser behöver svensk industri

aktivt delta i de identifierade förändringsarbetet. Nyttjandet av samspel mellan flera och olika aktörer kan med fördel användas för att ge industriella kunskapsmässiga konkurrensfördelar.

I analysen av värdekedjor och arbetsflöden noterades också att i jämförelsen av traditionell tillverkning behöver den multiflexibla naturen av AM baserad infrastruktur beaktas. AM infrastruktur kan användas för tillverkning av vitt skilda komponenter utgående från olika material. Inom traditionell tillverkningsteknik är detta mycket sällsynt. Som ett exempel kan vi nämna traditionell tillverkning av en rotor som utgår från stansning av plåt. Verktyget som används för stansning kan endast användas för att stansa en profil och storlek vilket medför multipla verktygskostnader för olika storlekar på rotern. Med AM kan en maskin tillverka rotorerna inom ett storleksintervall och flera olika storlekar i ett och samma tillverkningspass, såväl som andra komponenter inom det aktuella storleksintervallet.

Beskrivningen ovan illustrerar den inneboende flexibiliteten i AM-framställning av komponenter i farkoster och dess ingående funktioner samt de transportsystem som farkosterna ingår i. Denna flexibilitet kan generellt antas att gälla för all AM produktion och behöver beaktas vid transformation av värdekedjor och arbetsflöde.

IDENTIFIERADE BEHOV

Med ovan nämnda (sannolika) förändring av värdekedjan samt rimlig utveckling av arbetsflödet som grund kan en mer detaljerad analys göras av vilka delar i AM flödet som generellt blir kritiska för utveckling av förmågenivå inom metallbaserat AM:

Material

- *Förståelse/kunskap av/om* hur skapande och styrning av smältan kan användas för att *kontrollera materialegenskaper*. Till exempel, mekaniska egenskaper bestäms i stor utsträckning av mikrostruktur och restspänningar i materialet. Med kunskap om hur dessa kan styras möjliggörs nya angreppssätt för att optimera fysikaliska egenskaper och därmed optimering av resulterande komponentegenskaper. Denna kunskap möjliggör bättre nyttjande av traditionellt utvecklade material i AM.
- *Nya material* behöver utvecklas för att ge möjligheter att tillverka ändamålsenliga komponenter. Antalet tillgängliga materialklasser för AM processer är mycket litet jämfört med konventionell produktionsteknologi. Utveckling av nya material med önskade egenskaper är därför av yttersta vikt för framsteg inom området.

Design & konstruktion

- *Modellering av fysiska fenomen och integrering i designverktyg*. Till exempel, mekaniska och elektromagnetiska egenskaper är delvis kopplade eftersom restspänningar påverkar den magnetiska koerciviteten. Därför kan inte dessa egenskaper frikopplas från varandra. Modellering av fysikaliska egenskaper är därför av stor betydelse för utvecklingen av design och konstruktion för AM.
- *Arbetsflöde för design & konstruktion*. Komplexiteten som öppnas med antalet frihetsgrader som kan inkluderas i AM kräver att många kunskapsdiscipliner samverkar. Digitala modeller ger möjlighet att kombinera fysikaliska fenomen på ett helt nytt sätt och öppnar för nyttjandet av nya maskinassisterade lösningar. AI förväntas därför vara en viktig komponent i framtida AM infrastrukturer.

Tillverkning

- *Möjlighet att kontinuerligt styra den kemiska sammansättningen.* Den kemiska sammansättningen utgör basen för den parameterrymd som är tillgänglig med avseende på fysikaliska egenskaper. Styrning av den kemiska sammansättningen behöver därför utvecklas, t.ex. för framställning av skiktade strukturer i en rotor.
- *Principer för processteknologin.* Användning av elektronstråle eller laser i kombination med pulverbädd är de dominerande teknikerna i Europa och USA. Utveckling av andra byggtekniker för till exempel framställning av komponenter i meterskalan, kräver andra lösningar. Det samma gäller tillverkning av små strukturer (mikro till millimeter).
- *Renhet och kemisk kontroll.* Den utveckling som vi har bevittnat inom materialområdet bygger i stor utsträckning på kontroll av den kemiska sammansättningen av framställda delar. Föroreningar i form av oxider kan till exempel påverka metallers egenskaper på ett mycket märkbart sätt. Vidareutveckling och nya angreppssätt för materialhantering behövs därför inom AM.
- *Monitorering av avgörande parametrar i printprocessen.* Styrning av processparametrar för att uppnå önskade materialegenskaper kräver ändamålsenlig övervakning.

Kvalité/validering

- *Integrering av dataflöde i hela kedjan.* Både värdekedja och arbetsflödet utmärks idag av ”stand-alone” verktyg med mänsklig överföring av information mellan faser och steg. Av resurs- och tidsskäl behövs en arkitektur som tillåter integrering av informationsflöde mellan olika faser och steg.
- *Kvalitetsstyrningen* kräver spårbarhet i hela flödet.
- *Hantering av stora datamängder.* Volymen data som genereras och överförs i arbetsflödet är idag gränssättande. Både arkitektur, datatransport och analys behöver utvecklas med resurseffektivitet som mål.

SLUTSATSER

Utnyttjandet av AM är ett disruptivt steg inom tillverkningsindustrin. Den övergripande internationella analysen visar att AM representerar en världsomspännande förändring för tillverkning. Här nedan ges förslag på visioner, mål och strategi för svenska industri som kan möjliggöra framgångsrik utveckling och implementering av AM:⁶

VISION

AM nyttjas för tillverkning inom alla relevanta delar av näringslivet.

Det är två perspektiv på AM som är av särskilt intresse för Sverige som nation: (1) De produkter som kommer att tillverkas med AM och (2) de möjliggörande nationella

⁶ Detaljerat underlag ges i bilagor 1 & 2.

infrastrukturerna. Den möjliggörande nationella infrastrukturen är uppbyggd av det s.k. STEM komplexet, ”Science, Technology, Engineering och Mathematics”. Den nationella funktionen för STEM behöver exempelvis innefatta utbildning och bildning som möjliggör rätt kunskap hos den framtida arbetsstyrkan, i kombination med tillgång till ändamålsenlig instrumentering. En hög nivå på STEM behövs för att Sverige skall kunna tillgodogöra sig potentialen och *nyttja AM inom alla relevanta delar av näringslivet* som grund för nationell konkurrenskraft

MÅL

Maximera förutsättningarna för att svenska AM aktörer skall bli i världsklass (inom för svensk industri relevanta områden).

För att svenska företag själva skall kunna styra egen utveckling som bygger på AM, är Sverige⁷ i behov av att utveckla avancerad kunskap i strategiskt viktiga delar inom AM-värdekedjan. Den strategi vi föreslår bygger på de behov som identifierades under projektets gång. Dessa behov kan användas som vägledning för insatser för att uppnå det uppsatta målet.

⁷ Svensk industriell konkurrenskraft är byggd utifrån egen förmåga att själva styra vilka produkter som framställs och hur de skapas.

STRATEGI

Författarna använder här Clausewitz definition av strategi⁸ som formulerades utgående från definierad vision och mål med förståelsen att: ***Skapa nationell industriell konkurrenskraft baserat på egen kunskap och förmåga***. Strategin baseras på de ”Identifierade behov” som anges ovan.

Material: Forma förutsättningar för att existerande och nya material kan användas optimalt i AM tillverkning

Design & Konstruktion: Skapa resurseffektiva metoder för maskinassisterad design & konstruktion

Tillverkning: Utveckla effektiva reglersystem för hantering av fysiska och kemiska förlopp i *skalbara* printprocesser

Validering: Skapa effektiva lösningar för jämförelse av designad och erhållen funktion

För att strategins olika delar skall ge avsedd effekt föreslås en övergripande koordinering av insatser. Det andra av projektets mål var att ta fram en plan för hur och var metallindustrin bör bygga kompetens och/eller teknisk förmåga för att utnyttja möjligheterna med AM maximalt och undvika potentiella fallgropar. Planen återfinns som konfidentiella bilaga.

SLUTORD

Den disruptiva kraft som AM teknologin innebär leder sannolikt till mycket snabb utveckling inom metall och tillverkningsindustrin. De ekonomiska effekterna är svåruppskattade samtidigt som förväntningarna är stora. Vi har god kunskap om hur ny teknologi sprids⁹ och de fördelar som tidiga nyttjare erhåller är välkända. Det är därför av stor betydelse att skapa en snabb och effektiv uppbyggnad av den nationella förmågan inom AM området. Användning av effektiva insatser för att uppnå uppsatta mål är av stor betydelse, framför allt för Sverige som har relativt begränsade resurser.¹⁰ De finansiella verktyg som traditionellt används för att sporra forskning och utveckling baseras i stor utsträckning på relativt många och små projekt.¹¹ Det finns anledning att nu överväga andra angreppssätt för uppbyggnad inom AM, på grund av de väl definierade behov och mål som föreligger. Blandning av större insatser för utveckling av de utmaningar som är väl kända i kombination av mindre projekt för renodlade forskningsprojekt bedöms vara ett mycket effektivt sätt att sporra den nationella förmågan. Stora synergieffekter identifierades och samspel mellan civila och militära aktörer förutspås kunna ge avsevärda vinster.

⁸ Taktik är konsten att använda trupper i strid medan strategi är konsten att välja strider för att vinna kriget.

⁹ Se till exempel, M. Braun, *Differential equations and their applications*, ISBN 978-1-4684-0164-6

¹⁰ Medvetenheten om detta har till exempel utveckling av spjutpetsteknologi inom Sverige genom användningen av utmanande målstyrda uppgifter som drivkraft för kunskapsutvecklingen tillämpats med framgång inom till exempel JAS-projektet.

¹¹ Till exempel hos Vinnova, VR, STEM och STINT.

BILAGA 1

1. Demonstratorer
2. Internationell utblick
3. Förslag på strategi för direkttillverkning av metalliska material

FÖRORD

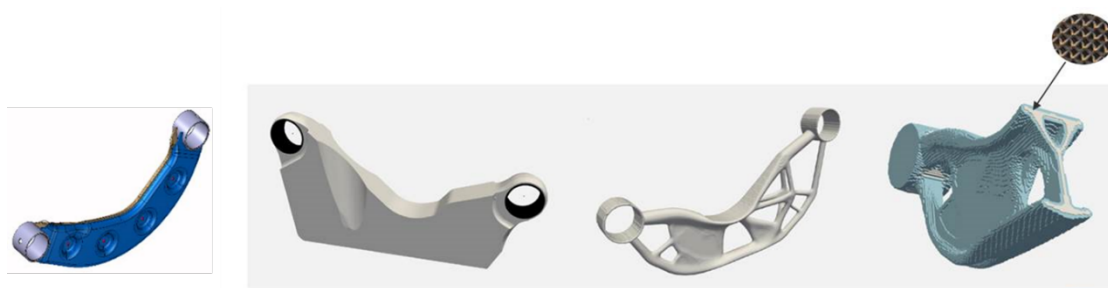
För att möjliggöra tillgång till industriellt relevanta frågeställningar valde vi att skriva sekretessavtal med de ingående industriparterna. Baserat på förståelsen att ingen information skulle föras vidare utan skriftlig överenskommelse genomfördes separata dialoger och arbetsinsatser med respektive industripart. Den erhållna informationsbilden gav ett perspektiv på möjligheter och begränsningar som nyttjades för analys och rekommendationer. Beskrivningar i Bilaga 1 återges generella aspekter som inte begränsas av de ingångna sekretessavtalen.

Demonstratorer

Vi valde att designa och tillverka demonstratorer för att skapa realistiskt underlag för analys av befintliga AM verktyg och tillverkningsmetoder. Detta steg gav insikt om hur dagens AM verktyg fungerar och vilka möjligheter och begränsningar som föreligger. Alla steg i AM processen jämfördes med flöde, verktyg och processer för konventionell tillverkning.

Stag

En av de komponenter som valdes för denna studie var ett stag som Volvo Cars i dag har i produktion och som är "genomanalyserad", bl.a. komponentens livslängd (denna typ av stag har använts länge). Staget är en relativt enkel komponent med en väl definierad funktion och dess utformning och design är därför mycket lämplig för jämförelsen med topologioptimerad design och optimering. Topologioptimeringen utfördes av AdiMant (Danmark), ett företag som har en ledande ställning inom området.



Figur 1. Topologiformad "upper control arm" med styvhets som mål. Längst till vänster är dagens lösning och till höger därom olika steg i beräkningen. Med tillstånd från Volvo Cars

Topologioptimering användes för att generera en styvhetsdimensionerad lösning. Två olika angreppssätt användes: Den ena för att skapa yttre geometri och den andra för att analysera hur inre stödjande strukturer kan genereras. De inre strukturerna visade sig vara avgörande för lösningens stabilitet vid belastning. Denna aspekt diskuteras i detalj i kapitlet om "Detaljer angående design & konstruktion" i Bilaga 2.

För att värdera den framtagna lösningens realiserbarhet överfördes lösningen av staget till DM projektparten BARE för djupare analys avseende skadetålighet och livslängdsanalys. Skadetålighets- och livslängdsanalysen var central för det övergripande målet med projektet: att minska vikten på lastbärande struktur med 50% eller mer.

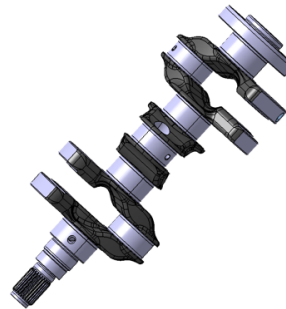
Den topologiframtagna lösningen är uppenbart mycket lämplig för AM produktion. Framställning av komponenter med denna utformning med traditionella metoder är mer krävande än de konventionella utformningarna och belyser därmed skillnaderna mellan AM och traditionella produktionstekniker. Det kvarstår dock omfattande arbete för att få AM lösningar till en mognadsnivå som är nödvändig för serieproduktion. Omfattande analyser med avseende på hållfasthet och producerbarhet behöver genomföras för att nå dit. Speciellt tids- och kostnadsaspekter behöver analyseras och förbättras. Den detaljerade analysen avseende hållfasthet och livslängd finns i Bilaga 2, "Detaljer angående design & konstruktion"

Vevaxel

Det första exemplet som beskrivs ovan är en mycket enkel design, med en mycket enkel och väl definierad funktion. Det andra exemplet vi belyser, en vevaxel, har ett antal ytterligare krav med avseende på design och funktion. För det första, en vevaxel är en roterande komponent med stort krav på balansering. Dessutom är det avsevärt högre krav på slitytor på en vevaxel jämfört med ett stag. En vevaxel är därför ett mycket bra exempel på en komponent som har mångfasetterade men väl definierade mekaniska krav.



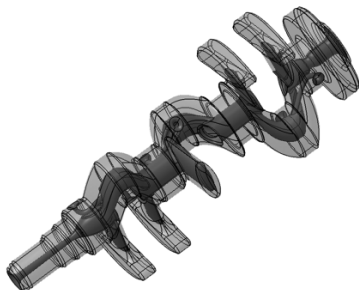
Forged blank



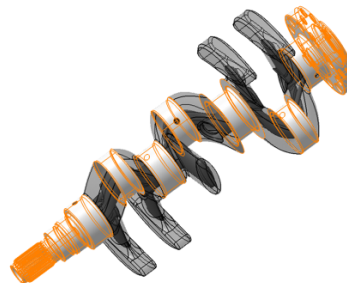
20 operations to finalized crank shaft

Figur 2. Dagens tillverkningsmetod, smide, för en vevaxel har formbegränsningar. Med tillstånd från Volvo Cars.

Figur 2 illustrerar en klassiskt utformad vevaxel. De tillverkas i dag genom smide och kräver 20 arbetsmoment i efterbearbetning innan vevaxeln slutligen kan monteras i en motor.



3D-printed blank



15 operations to finalized crank shaft

Figur 3. AM producerad vevaxel. I det här fallet användes pulverbäddsteknik. Med tillstånd från Volvo Cars.

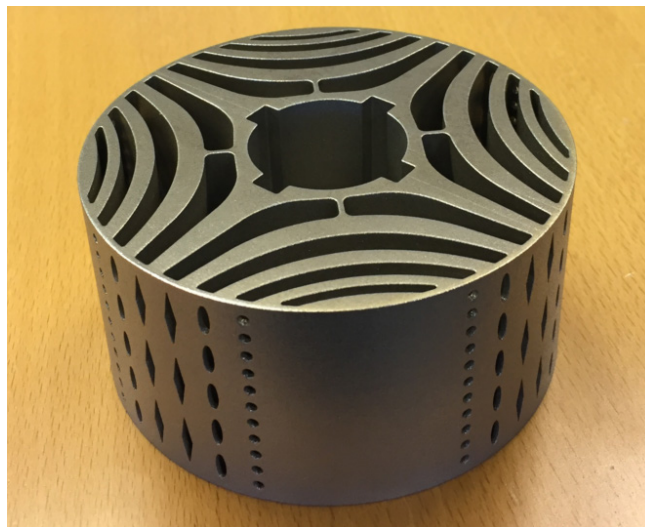
Figur 3 visar vevaxel som har konstruerats för tillverkning med AM. Den största skillnaden jämfört med traditionell tillverkning är antalet steg i efterbearbetningen: 15 för AM komponent jämfört med 20 för traditionellt sätt. Detta exempel visar att det är möjligt att utveckla nya arbetssätt för traditionella komponenter. Med relativt enkla medel kan design av komponenter anpassade för traditionell tillverkning justeras för att passa AM. På så sätt kan antalet påföljande arbetsmoment minskas. Stora tillverkningsresurser kan potentiellt sparas förutsatt att kostnaden för AM inte överstiger den traditionella framställningen. Att reducera dagens tillverkningslösning från 20 steg till 15 i efterbearbetning med AM kan därför ge stora besparingar.

Ovan nämnda exempel indikerar att med AM ser s.k. "netshape"-produktion ut att bli möjligt. Utveckling för att reglera materialkvalité i komponenten och dess ytjämnhet behöver dock genomföras för att AM skall bli ett alternativ till traditionell tillverkning. Även design & konstruktionsverktygen behöver vidareutvecklas för att möta möjligheterna till formdesign för AM. Det här exemplet ger en indikation på vad som kommer att bli möjligt med design av funktioner och komponenter för AM samt vilka steg som behöver vidareutvecklas för att ta till vara hela potentialen som ligger i AM inom området mekaniska komponenter.

Rotor i en elmotor

Demonstratorerna som beskrivs ovan exemplifierar optimering av en funktion utgående från mekaniska egenskaper. Komponenter av detta slag kan beskrivas som *en-funktionella*, dvs, de har endast en funktion som t.ex. "mekanisk", i kontrast till *fler-funktionella* komponenter. Även om AM har stor potential som framtida tillverkningsmetod för en-funktionella komponenter, den stora revolutionen förväntas inom utveckling och tillverkning av fler-funktionella komponenter. Här använder vi en elektrisk rotor för att demonstrera möjligheter och för att identifiera tillkortakommanden av AM för tillverkning av fler-funktionella komponenter.

En lämplig storlek på motor identifierades för tillverkning i en s.k. Powder Bed Fusion, PBF-maskin (pulverbäddsmaskin). Som leverantör valdes företaget ExMet som involverades tidigt i analysen av rotordesign, framför allt för att inkludera synsätt för tillverkningsbarhet. Efter några iterationer med tillverkningstekniska frågeställningar fastställdes design som ansågs uppfylla de krav som förelåg. En bild av en av de tillverkade komponenterna visas i figur 4.



Figur 4. Helt ny typ av rotordesign framställd med AM (med tillstånd från ABB)

De multifysikparametrar (fler-funktionella krav) som var involverade i designen av denna rotorprofil var:

- Elektriska
- Magnetiska
- Värmeledning och kylning
- Hållfasthet

- Tillverkningsprocess (val av)

Analys av AM tillverkningen lyfter i detta fall fram ytterligare parametrar som:

- Användning av flera material vid tillverkning en komponent
- Livscykelanalys som drivande för geometri och materialegenskaper
- Nya affärsmodeller för detaljerad kundanpassning
- Simultanproduktion av stator/rotor

Resultatet påvisade möjligheter för att skapa yttre strukturer av önskad form samtidigt som tillkortakommanden med avseende på fysikaliska egenskaper identifierades. Dagens AM teknologi tillåter inte framställning av funktionsoptimerade komponenter av detta slag. Bland de tillkortakommanden som identifierades är de magnetiska egenskaperna av tillgängliga material för AM. Även begränsningar med avseende på kombination av olika material i en och samma komponent noterades. Vidareutveckling av AM förväntas möjliggöra integrering av yttre form och flerfaldig funktionalitet genom kombination av olika material. T.ex., möjligheten av att skapa skiktade strukturer, där olika skikt har specifika fysikaliska egenskaper, förväntas medföra stora framsteg inom området.

AM som tillverkningsmetod och dess möjligheter påvisade i den här tillämpningen behovet av helt nya lösningar för multifysik/multiparameter optimeringslösningar för att forma en rotor som ger maximal verkningsgrad. ExMet har utvecklat en metod att printa amorfa konstruktioner utan geometriska begränsningar i tjocklek. Det öppnade ytterligare möjligheter för design av elmotorer. Den här demonstratorn ger en uppfattning om vilka verkningsgrader på elmotorer och generatorer som ligger inom räckhåll med AM. I kombination med amorfa och fler-skikts material kan en helt ny kategori motorer och generatorer skapas.

Slutord

Det finns stora möjligheter att nyttja AM för tillverkning av komponenter som i dag framställs med andra tillverkningsmetoder. Införandet av AM i detta sammanhang kommer i stor utsträckning att bestämmas av ekonomiska och inte tekniska faktorer: Kan AM göras tillräckligt kostnadseffektivt för den aktuella produktionen och livscykelkostnaden för aktuell komponent? Vid första anblick tyder mycket på att enkla metalliska produkter som kan framställas med traditionell tillverkningsteknik inte kommer att utgöra basen för masstillverkning med AM. Däremot kommer AM att vara relativt mycket starkare inom tillverkning av små serier av metalliska material. Vilken väg som kommer att vara den vanligast förekommande är inte av intresse i det aktuella perspektivet. Att AM kommer att vara en av de viktiga teknikerna för framställning av metalliska komponenter räcker för att motivera satsning på området. Noteras bör att ekonomiska jämförande analyser¹ är svåra att balansera p.g.a. olika mognadsgrad av de ingående infrastrukturerna och att dagens designer har traditionell tillverkning som kompetensområde.

När möjligheter för design och framställning av multi-funktionella komponenter realiseras kommer AM att få en mycket stark position, delvis på grund av att den initialt kommer att vara utan konkurrens och på grund av att vid den tidpunkten kommer AM baserat design att möjliggöra helt andra tekniska lösningar än de som tillämpas idag.

¹ Douglas S. Thomas and Stanley W. Gilbert, Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing - A Literature Review and Discussion, NIST Special Publication 1176

Internationell utblick

I den internationella utblick som genomfördes ses att flertal nationer har inventerat, utvärderat och implementerat åtgärder som alla bottenar i att möjliggöra införandet av AM. Omfattande investeringar har gjorts i ett flertal länder i samband med framtagning av strategier och praktiska program för realisering av implementeringen. Här nedan ges en övergripande orientering av insatser i de länder som bedömts kommit längst inom olika delar av AM.

Kina

Den kinesiska statsmakten verkar hålla de historiska misstagen från opiumkriget (UK 1840) i färskt minne¹. Det nesliga nederlaget berodde på att Kina inte följt med i den tekniska utvecklingen. När Kina för ca 25 år sedan utvärderade AM som tillverkningsteknik resulterade i en koordinerad nationell samling kring "nästa generations" tillverkningsparadigm. Därav formulerade Kina en vision som bygger på "5 any's"²;

AM kommer att driva fram "mass-customisering" genom att realisera de fem "Any's":

1. *use of almost **any** material to*
2. *fabricate **any** part in*
3. ***any** quantity and*
4. *at **any** location*
5. *for **any** industrial field*

Kina har en nationellt koordinerad utveckling av AM baserad på ovan "5 any's" sedan 25 år. Inom metall-AM har man fokuserat på DED-tekniken där man synbarligen lyckats skapa kontroll på materialkvalité och geometri. Som ett exempel kan det nämnas att en kinesisk AM leverantör är certifierad av Boeing att leverera titanbalkar till storlek och kvalitet som är unik i världen. Boeing indikerar att man avser byta ut allt som går mot de kinesiska titankonstruktionerna. Exempel på aktiviteter inom området illustreras i figurer 1-

Figur 1. En kinesisk AM-maskin för direkttillverkning för dimensioner på tillverkad komponent 2 – 6 m i diameter med max 10 meters längd och komponentvikter upp till 300 ton³.



¹ ANDERSON, Eric, May 2013, *Additive Manufacturing in China: Threats, Opportunities, and Developments (Part I)*, Institute on Global Conflict and Cooperation (IGCC), University of California

² Bingheng Lu*, Dichen Li, Xiaoyong Tian, 2015, *Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing, Research 3D Printing—Perspective, Engineering 2015*, 1(1): 85–89, DOI 10.15302/J-ENG-2015012

³ <http://www.3ders.org/articles/20140207-china-developing-world-largest-3d-printer--prints-6m-metal-parts-in-one-piece.html>



Figur 2. Ett exempel på DED metodik för tillverkning av en propeller som förberedes för skärande bearbetning till önskad geometri. Kombinationen av DED och skärande bearbetning kan ge stora fördelar i tillverkningen av stora komponenter⁴.



Figur 3. Exempel på en 6 meter lång titanbalk tillverkad med DED metodik och en bild på maskinen som tillverkar balken. Balken på bilden anges ha minskat materialåtgången med 91,5% relativt om den skulle tillverkats med traditionella metoder⁵.

⁴ <http://www.3ders.org/articles/20160725-revolutionary-chinese-all-in-one-casting-and-forging-metal-3d-printer-used-for-stealth-jet-fighters.html>

⁵ <http://www.3ders.org/articles/20140207-china-developing-world-largest-3d-printer--prints-6m-metal-parts-in-one-piece.html>

USA

I USA har man på federal nivå skapat ett nationellt center, "America Makes"⁶, för att fokusera kunskapsutvecklingen inom AM mot alla delar av US tillverkningsindustri för att generellt öka konkurrenskraften. Angreppssättet för America Makes är att samnyttja resurser som kan användas tvärs över alla branscher. I nätverket av kompetenser som ingår i America Makes ingår också 2 st. nationella laboratorier (Oakridge och Lawrence Livermore).



Figur 4 ORNL 3D printad bil, Shelby Cobra⁷

Oak Ridge National Lab, ORNL, har utvecklat teknologi för att styra lokal kornorientering i Inconel material tillverkade med Arcam EBM system. ORNL fortsätter arbetet tillsammans med Arcam för att kommersialisera lösningen så att artiklar med styrd mikrostruktur kan framställas.

Universitet och Högskolor

*Pennsylvania State University*⁸ driver forskning om termiska processcykler, mikrostruktur och mekaniska egenskaper. Studien inkluderar titanlegeringar, stållegeringar och deras fastransformationer i avkylningsfasen. Målet är att utveckla plasticitetsmodeller som inkluderar termisk historia, resulterande mikrostruktur, mikrostrukturutvecklingen och lokala plasticitetsegenskaper.

*Universitetet i Pittsburg*⁹ undersöker sambandet mellan multiskala strukturer och mekaniska egenskaper. Modellerna inkluderar kombinationer av datorsimuleringar och oförstörande provningstekniker.

*Virginia Tech*¹⁰ forskar på on-linemetodik för att identifiera defekter under tillverkningsprocessen och möjligheterna att åtgärda den uppkomna tillverkningsavvikelsen. Man försöker koppla processvariabler till tillverkningsdefekter och skapa monitoreringssystem som kan detektera sådana defekter i tillverkningsytan. Man ämnar skapa "closed loop control" system som skall implementeras i framtida AM system.

⁶ <https://www.americamakes.us/>

⁷ Manufacturing Demonstration Facility, Innovations in Manufacturing, Oak Ridge National Laboratory, www.ornl.gov

⁸ <http://www.matse.psu.edu/research-topics/additive-manufacturing>

⁹ <http://additivemanufacturing.com/tag/university-of-pittsburgh/>

¹⁰ <http://seb199.me.vt.edu/dreams/>

Iowa State Universitet i samarbete med Carnegie Mellon Univ., University of North Texas, Georgis Tech Research Corporation har fått finansiering för utveckling av nya legeringar för AM. Fokus kommer att ligga på krypresistenta beta-aluminiumlegeringar.

Universitetet i Arizona undersöker tillverkning av godtyckliga elektromagnetiska strukturer. Man siktar på funktionell elektronik, speciellt strukturer i radio och mikrovågsfrekvenser. Avsaknaden av printbara material med eftersökta mikrovågsegenskaper och att integrera högkvalitativa ledaregenskaper kommer att vara fokus.

University of Texas at El Paso har fått finansiering för korrelationen mellan avkylning, mikrostrukturer och dimensionsstabilitet i EBM tillverkade detaljer. Olika nätverks och cellulära strukturer har möjliggjorts med AM vilka kan användas för att öka styvheten och därmed hållfasthet-till-vikt förhållandet som bl.a. är intressant i flygtillämpningar.

Konsortium

USA har också flera industriella konsortier som samarbetar om konkurrensneutral kunskapsutveckling för direkttillverkning med AM. Ett sådant är "AM consortium"¹¹ som drivs och koordineras av EWI.

Statliga initiativ (USA)

I USA har den offentliga sektorn skapat ett nätverk som kallas Government Organization on Additive Manufacturing, GO Additive¹². GO Additive har som mål att undersöka utpekade områden och identifiera utmaningar för AM som är områdesöverskridande. GO Additive kommer också att föra dialog direkt med de nationella instituten som driver AM utvecklingen med avsikten att skapa tvärkommunikation inom offentlig förvaltning för gemensamma frågor som AM kan ha svaret på. D.v.s. USA har organiserat en tvärdepartemental organisation som har till uppgift att identifiera saker eller funktioner som kan förbättras med hjälp av AM. Detta skall ses som en behovsframställning från den offentliga sektorn. I februari 2015 var det totalt 130 utpekade individer från primärt federala organisationer som arbetade med dessa frågor.

Tyskland

AMs fördelar har gjort att AIRBUS i Tyskland identifierat AM som en konkurrensavgörande faktor för produktion av större delen av ingående delar i ett flygplan oberoende av material¹³. Med det som grund organiserar sig utvecklingscentra kring helhetsuppgiften att kunna tillverka flyg och rymdapplikationer med AM för att uppnå produktionskapacitet, speciellt med metalliska material.

Universitet i Paderborn i Tyskland har bildat något som de kallar "Direct Manufacturing Research Center", DMRC¹⁴. De har bjudit in företag att i samverkan med akademi utveckla AM teknologin för direkttillverkning av komponenter med fokus på metaltillverkning. I skrivande stund är det 18 st. företag som är med i konsortiet bland annat Boeing.

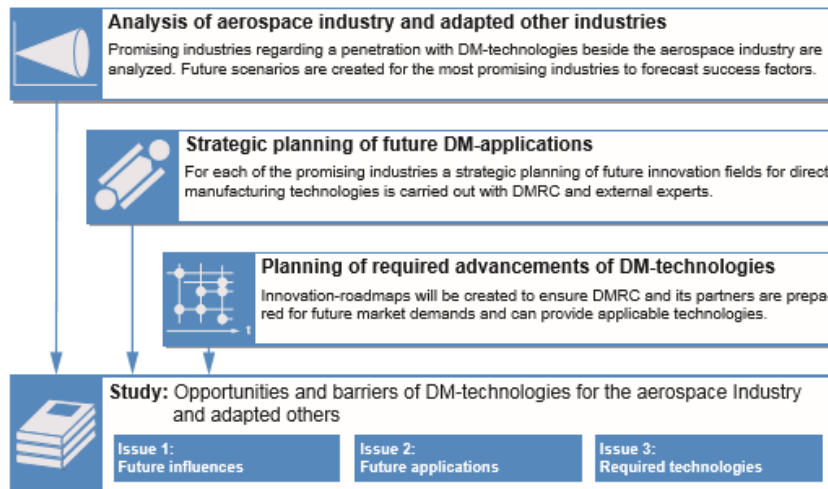
¹¹ <https://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/>

¹² Zina Merritt, October 2015, DEFENSE ADDITIVE MANUFACTURING, DOD Needs to Systematically Track Department-wide 3D Printing Efforts, Report to Congressional Committees, GAO-16-56

¹³ Bernhard Langefeld, June 23rd, 2015, Additive Manufacturing (AM) – Opportunities in a digitalized production, Additive Manufacturing European Conference, Roland Berger, Principal Engineered Products/High Tech, OpernTurm, Bockenheimer Landstraße 2-8, D-60306 Frankfurt

¹⁴ <https://dmrc.uni-paderborn.de/>

Det övergripande konceptet för konsortiet är att företagen får identifiera områden och utmaningar som de vill ha utvecklade i enlighet med sin affärsutvecklingsstrategi etc. Sammanställningen av utvecklingsbehovet blir forskningsagendor. Man har inventerat behoven och möjligheterna grundligt samt identifierat utvecklingsvägar och vad som krävs av utvecklingen inom de olika områdena. Detta har gjorts i en rapportserie som visas schematiskt nedan.



Figur 5. Den officiella rapportstruktur som DMRC tagit fram för att utveckla direkttillverkning med AM

Insatserna inom materialkvalité, funktionella och nya material är centrala för utvecklingen av direkttillverkade metallkomponenter. Designregler och tillverkningstoleranser samt viktoptimering är bedömt väsentliga för utvecklingen.

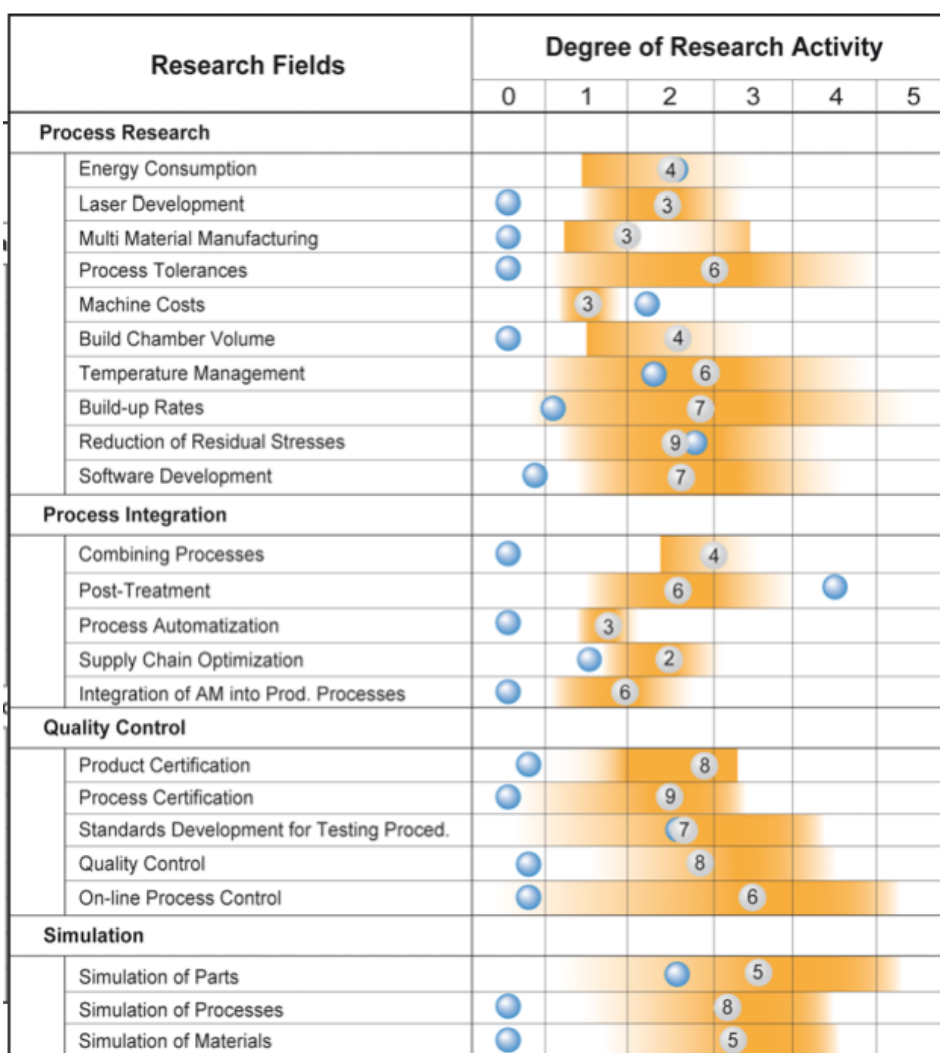
Centralt i analysen var att ställa dagens FoU insatser mot relevansen av insatserna i skenet av framtida behov för att få direkttillverkningen av metaller till erforderliga kvalitetsnivåer. Analysen visade också vilka områden som saknas i relation till vad som behövdes för att hela kedjan av AM arbetsflödet skall utvecklas till en realistisk tillverkningsmetod i industriell skala.

Områden med stort behov men ännu inte utvecklad forskning, s.k. "vita fläckar" har identifierats som;

- designregler
- processautomatisering
- multimaterialtillverkning
- utveckling av standarder och
- certifieringsmetoder

De vita fläckarna anses generera "hävstångseffekter" för direkttillverkning av metallkomponenter. Kombinationen av "vita fläckar och identifierade framgångsfaktorer ger en indikation på strategier med "hävstångseffekt". De två strategierna som för tillfället kombineras är;

- Närmare samarbete mellan företag i hela värdekedjan
- Närmare och starkare samarbeten mellan ingående FoU instanser



Figur 6 Sammanställningen från DMRC över FoU insatser och intensiteten inom dem.

För närvarande har Tyskland flest tillverkare i världen av AM maskiner för metall

UK

Den brittiska regeringen fortsätter att visa sitt stöd för utveckling och tillämpning av AM teknologi. Ibland utlysningar med AM-relaterade forskningsförslag ingår titlar som; Re-distributed Manufacturing Networks, Design the Future, Future Manufacturing Research Hubs, 3D-printing feasibility studies och Creating Smart Products from Smart Materials. Mer än £26 miljoner i finansieringen har allokerats i nämnda utlysningar¹⁵.

I februari 2015 lanserades Nationella strategiarbetet för Additiv Tillverkning¹⁶. Det markerade början av en 18-månaders process som leddes av branschen som syftade till att maximera

¹⁵ Update Report 3, Comparison of international approaches to public support for additive manufacturing/3D printing, UK National Strategy for Additive Manufacturing, www.amnationalstrategy.uk

¹⁶ <https://3dprintingindustry.com/news/uk-additive-manufacturing-national-strategy-2018-25-published-3d-printer-122461/>

företagens tillväxt och långsiktigt ekonomiskt värde genom framgångsrik industrialiseringen av AM.

UK har också belyst AM ur flera vinklar än många andra. T.ex har man studerat de potentiella ekonomiska effekterna och vilka marknadsvolymer det kan röra sig om¹⁷. Klart är att man i UK har engagerat både UoH och skapat speciella centra för AM utveckling. Nedan ett exempel.

National Centre for Net Shape & Additive Manufacturing

I UK har man skapat ett nätverk av forskningscentra liknande. Det nationella centret för Net Shape och Additiv Tillverkning, NSAM har placerats på Manufacturing Technology Centre¹⁸. NSAM erbjuder integrerade lösningar till slutanvändare, logistikföretag eller utrustningsleverantörer. NSAM erbjuder tjänster i tre steg:

Fas 1 - Discovery

- Pragmatiskt och objektivt stöd till organisationer är intresserade av NSAM processer
- Förklaring av styrkor och svagheter med NSAM processer
- Val av lämpligaste processen för aktuell komponent

Fas 2 - Demonstration

- Omdesign av komponenter för att maximera nyttan av tillverkningsprocessen
- Testtillverkning av komponenten för hela NSAM processkedjan i industriell skala
- Validering av testkomponenter

Fas 3 - För-produktion

- Identifiera och hantera tekniska utmaningar för att möjliggöra fullskalig produktion
- Utveckla arbetsrutiner, specifikationer och standarder
- Simulering och validering av hur NSAM processen kan integreras i en fabrik/på företagsnivå
- Stöd med tillverka-kontra-köp beslut, logistikflödesutveckling och/eller införandet av NSAM processer in-house.

En fullständig förståelse av alla steg av NSAM värdeflödet är grundläggande för att möjliggöra framgångsrik processanpassning. NSAMs kärnforskningsområden är:

- Design
- Förproduktion och simulering
- Pulverhantering
- Smältprocessen
- Pulveråteranvändning
- Efterbehandling
- Verifiering och validering
- Informatik

¹⁷ David Brackett, *Overview of AM technology, Additive Manufacturing National Centre for Net Shape & Additive Manufacturing, Manufacturing Technology Centre, the-mtc.org*

¹⁸ www.the-mtc.org

Sydkorea

Sydkorea har identifierat AM som en kritisk nationell kunskap på nationell nivå¹⁹. Som en följd av det har man tagit fram en strategi för 10 branscher som omfattar 15 identifierade teknikområden som skall kombineras för att underbygga konkurrenskraften inom de 10 utpekade branscherna. Målsättningen är att bli världsledande inom de olika branscherna baserat på AM som tillverkningsteknik.

¹⁹ November 25, 2014 – The Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and the Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIP) held a public briefing today at the Hilton Hotel in Seoul to release the 3D printing technology roadmap, MOTIE

Förslag på strategi för direkttillverkning av metalliska material

Övergång till nyttjandet av AM är ett disruptivt steg inom tillverkningsindustrin. Den genomförda analysen visar att införandet av AM kan innebära världsomspännande förändring för tillverkningsindustrin. Sveriges välstånd är i stor utsträckning baserat på tillverkning av avancerade produkter. Väl utvecklad industri utgör därför en av hörnstenarna för ett positivt handelsutbyte och välstånd. Om vi skall kunna åtnjuta den ställningen i framtiden behöver vi nyttja de möjligheter som industriella framsteg, som till exempel AM, erbjuder.

Den möjliggörande nationella infrastrukturen är uppbyggd av det s.k. STEM komplexet.¹ Den svenska funktionen för STEM behöver innefatta både utbildning och bildning för att ge adekvata förutsättningar för den framtida arbetsstyrkan. En hög STEM nivå behövs för att Sverige skall kunna tillgodogöra sig potentialen i framtida AM som grund för nationell konkurrenskraft.

Övergripande strategier

Det finns ingen instans (universitet, institut eller industri) som har erforderlig kompetens inom AM området. Kunskapen inom både metall och plastbaserat AM är spridd och ojämn. Det finns starka initiativ av olika slag inom landet, till exempel på Chalmers och vid Uppsala Universitet. På den industriella sidan kan vi nämna satsningar på AM hos Sandviken² och det center som Wallenbergfären står bakom i Karlskoga.³

Vi noterar att till exempel USA använder regional specialisering som en strategi för kunskapsuppbyggnad och utveckling. Till exempel, *Pennsylvania State University*⁴ driver forskning om termiska processcykler, mikrostruktur och mekaniska egenskaper och *Iowa State Universitet i samarbete med Carnegie Mellon Univ., University of North Texas, Georgis Tech Research Corporation* utvecklar nya legeringar för AM.

Satsningar inom det industriella segmentet, forskningsinstitut, högskolor och universitet är en förutsättning för långsiktig kompetensutveckling och framgångsrikt innovationslandskap. Sektorsspecifika satsningar i kombination med samverkansdrivna satsningar ser ut som en effektiv väg för att uppnå de uppsatta målen. Strategi för att stimulera utvecklingen måste därför vara riktat mot **områden** och lämpliga **aktörer**. Här nedan ger vi konkreta strategier för identifierade områden inom AM, som möjliggör att skapa förutsättningar för att uppnå målet att: **Maximera förutsättningarna för att svenska AM aktörer skall bli i världsklass.**

¹ STEM står för: "Science, Technology, Engineering och Math."

² <http://www.metalliskamaterial.se/sv/fakta/sandvik-okar-sitt-fokus-pa-additiv-tillverkning/>

³ Se till exempel artikel i Ny Teknik: <https://www.nyteknik.se/automation/industrijattar-satsar-gemensamt-pa-3d-labb-6891585>

⁴ <http://www.matse.psu.edu/research-topics/additive-manufacturing>

Kunskapsinriktad strategi

Skapa utlysningar för forskningsprojekt inom områden av relevans för nödvändig kunskapsuppbyggnad: Nya material för AM, utveckling av processer, design och konstruktion samt kvalitet & validering. Mer utförlig beskrivning områdena finns under "Delområdesstrategier". Medel skall endast erbjudas till aktörer inom högre utbildning, samarbete med institut och tillverkningsindustri skall uppmuntras. Målet med kunskapsstrategin är att bygga upp inomvetenskaplig kompetens och skapa förutsättningar för utbildning/bildning av hög kvalitet (grundutbildning och avancerad nivå). Aktiviteten kommer även att ge upphov till ny kunskap som kan leda till patent och kunnande som ger ökat konkurrenskraft. Därför måste samverkan med industriella partners uppmuntras. Långsiktig bärlighet av konkurrenskraft inom AM beror i stor utsträckning av utfallet inom den kunskapsorienterade satsningen.

Utvecklingsinriktad strategi

Bilda väl finansierade centra med all adekvat utrustning och utvecklingspotential för metodutveckling. En förutsättning för effektiv satsning är beaktandet av både intresse- och geografisk-fördelning (inom landet). Det är därför av stort värde att begrunda vilka aktörer skall specialiseras inom vilka områden. Ett mycket intressant angreppssätt är att dela AM området i några segment och ge uppdraget till de som anses inneha den bästa kompetensen att bilda kritisk massa inom respektive område att verkställa insatsen. Detta angreppssätt tillämpas till exempel i viss utsträckning i USA. Samverkan mellan industri och högre utbildning är förutsättning för långsiktig framgång och måste därför uppmuntras genom adekvata finansieringsmodeller i genomförandet och bildandet av centra.

Delområdesstrategier

Avancerad kunskap inom strategiskt viktiga delar av AM-värdekedjan behöver inhämtas och utvecklas. Här nedan återger vi delmål som konkretiserar de övergripande strategierna och kan utgöra basen för beskrivning av verksamheter inom båda. Delmålen kan därför betraktas som områdesstrategier, nödvändiga för att uppnå det övergripande målet: **Maximera förutsättningarna för att svenska AM aktörer skall bli i världsklass.**

Material

- *Utveckla nya material för AM*
- *Öka förståelse/kunskap av/om hur smältprocessen kan användas för att styra materialegenskaper.*

Materialutbudet (metall) för AM processer är mycket begränsad jämfört med konventionell produktionsteknologi. Dessutom råder det monopolliknande situation där maskinleverantörer även levererar typgodkända material för egna maskiner. Detta återspeglas tydligt i den prisbild som råder. Utveckling av nya material fyller därför två funktioner: Ger möjligheter till nya AM baserade lösningar och ökar konkurrensen. Utveckling av nya material med ändamålsenliga egenskaper är även av yttersta vikt för framsteg inom området. Betydelsen av processtyrd kontroll av mekaniska egenskaper kan möjliggöras genom styrning av mikrostruktur och restspänningar i materialet. Med kunskap om hur dessa kan påverkas möjliggörs nya angreppssätt för att optimera fysikaliska egenskaper och därmed optimering av resulterande komponentegenskaper. Forskning och utveckling av nya "AM-kompositer" i form av skiktade strukturer eller annan lämplig strukturering är av mycket stort strategiskt värde i ett längre perspektiv.

Design & konstruktion

- *Utveckla modeller som möjliggör integrering av materialegenskaper i designverktyg.*
- *Utveckla relevanta arbetsflöden för design & konstruktion.*

Mekaniska och elektromagnetiska egenskaper är ofta kopplade eftersom restspänningar påverkar t.ex. magnetiska egenskaper. Med att möjliggöra multifysikbaserad design öppnas nya vägar för att optimera komponentegenskaper inom vitt skilda områden. Detta angreppssätt kräver att många kunskapsdiscipliner samverkar och vi noterar att digitala modeller ger möjlighet att kombinera fysikaliska fenomen på ett helt nytt sätt och öppnar för användningen av nya maskinassisterade lösningar. Betydelsen av samlad kompetens i form av "centra" bedöms vara stor.

Tillverkning

- Utveckla ny AM utrustning
 - möjliggör tillverkning av stora (10 m) och små (ner till μm skalan) delar
 - *möjliggör kontinuerlig styrning av kemisk sammansättningen*
 - *utveckla och utvärdera nya sätt att skapa smälta i AM processer*
 - *utveckla angreppssätt som tillåter tillräcklig renhet och kemisk kontroll i processen*
 - *utveckla möjligheter för kontinuerlig justering/korrigerig av processen samt analys/beräkning av erhållna komponentegenskaper*
 - utveckling av processer för befintliga material

Tillgång till ändamålsenlig utrustning är en förutsättning för framtida konkurrenskraft med AM. För närvarande domineras den europeiska och amerikanska marknaden av pulverbäddbaserade metoder. Framställning av ytterst små eller mycket stora komponenter är nära omöjlig att uppnå på detta sätt. Vidare, den kemiska sammansättningen utgör basen för den parameterrymd som är tillgänglig med avseende på att styra fysikaliska egenskaper. Styrning av den kemiska sammansättningen måste därför utvecklas och styrning av processparametrar för att uppnå önskade materialegenskaper kräver ändamålsenlig övervakning. Utveckling av processer för befintliga material förväntas innebära stora konkurrensfördelar, framför allt i nära framtid.

Kvalité/validering

- *Utveckla system som tillåter integrering av relevant dataflöde.*
- *Utveckla system som tillåter spårbarhet och kvalitetsstyrningen för hela flödet.*

Både värdekedja och arbetsflödet utmärks idag av "stand-alone" verktyg med mänsklig överföring av information mellan faser och steg. Av resurs- och tidsskäl behövs en arkitektur som tillåter integrering och nyttjande av relevant information, t. ex. data från processövervakning. Både arkitektur, datatransport och analys behöver utvecklas med resurseffektivitet som mål.

Observationer

Projektets uppgift var att analysera AM och dess påverkan på tillverkning med metalliska material. I analysen framgår det tydligt att effekterna av AM, om det realiserar på det som sätt som föreslås här, kan få avgörande inflytande på hur t.ex. strategier inom miljö och sysselsättning kan realiserar. Det ligger dock utanför det här projektets uppgift att gå djupare in på de områdena här.

BILAGA 2 (KONFIDENTIELLT ARBETSMATERIAL)

1. Nationellt perspektiv
2. Förslag på utveckling av nationell förmåga för metalliska material
3. Simuleringar
4. Detaljer angående design & konstruktion

BILAGA 3

BILAGA 4

BILAGA 5

BILAGA 6

Bilaga 3 Projektorganisation och medverkande

a) Lista på medverkande forskare och industrirepresentanter

Mats Vikström, Citan Consulting AB, Nacka
Börje Andersson, BARE Börje Andersson Research & Engineering AB, Västerås
Ingvar Wikström, Citan Consulting AB, Nacka
Torbjörn Larsson, Volvo Personvagnar AB, Torslanda
Martin Ödlund, Volvo Personvagnar AB, Torslanda
Peter Isberg, ABB AB, Robotics and Motion, Västerås
Björn Hellholm, BAE Systems Hägglunds AB, Örnköldsvik
Per-Olof Danielsson, Volvo Construction Equipment AB, Braås
Joel Andersson, Högskolan Väst, Trollhättan
Niklas Eriksson, Saab Aeronautics, Linköping
Mikael Schuisky, Sandvik Machining Solutions AB, Sandviken
Jörgen Andersson, Bergsskolan, Luleå tekniska universitet
Björgvin Hjärvarsson, Materialfysik, Uppsala Universitet

b) Kort beskrivning av projektorganisationen

Projektet DirektMetall genomfördes på uppdrag av Jernkontoret inom programmet Metalliska Material med stöd från Vinnova.

Projektet avser att skapa en grupp med landets absoluta specialister inom material, design, konstruktion, beräkning

Projektledare med övergripande ansvar för projektet. Expert Materialvetenskap

- Björgvin Hjärvarsson Professor i materialfysik vid Uppsala Universitet

Samordning av arbetet i projektet, arbetsmetodik och administration. Expert produktsystem.

- Mats Vikström, Citan, Ansvarig för kompositstrukturen inom JAS39. Ledare för kunskapsutveckling till absolut världsklass. Idag verksam inom effektiva sätt att hantera komplexa saker med ett livscykelperspektiv

Expert systemmetodik och modellering

- Ingvar Wikström, Citan, Ansvarig för ett delsystem inom JAS39. Ledare för kunskapsutveckling till absolut världsklass. Idag verksam inom effektiva sätt att hantera komplexa saker med ett livscykelperspektiv

Expert materialteknik

- Mikael Schuisky, Sandvik AB, Ledare för AT labbet inom Sandvik och har tillgång till världsledande materialkunskap samt driver kunskapsutveckling för användning av AT med Sandviks pulver

Expert maskinprestanda

- Ulric Ljungblad, Konsult (underleverantör till Citan). Tidigare ansvarig maskinkonstruktör inom Arcam, vars maskiner är unika och i absolut världsklass.

Expert beräkningsteknik

- Börje Andersson, BARE AB, Världsauktoritet inom beräkningsmetodik. Har varit central i utvecklande av den svenska förmågan att designa lastbärande strukturer med

skadetålighetskonceptet. Är världsledande inom den typ av beräkningar som ska genomföras inom projektet och har ett mycket brett nätverk inom den här kunskapsdisciplinen.

Expert konstruktionsteknik

- Daniel Hilding, Dynamore Sverige AB. Ansvarar för ett företag som besitter god insikt i dagens praktiska konstruktions- och beräkningsmetoder inom flertalet branscher inklusive fordonsbranschen. Kommer att medverka med personer som har 15-20 års erfarenhet av design och konstruktion.

Projektet kommer att samverka med farkosttillverkare i Sverige (Saab, Scania, Volvo, BAE Systems Hägglunds, VCE, Bombardier, etc.) och tillsammans med dem identifiera lämpliga konstruktionskomponenter att ingå i projektet.

Projektets resultat kan omsättas av företag i de metalliska materialens värdekedjor. Dessa involveras i projektet genom deltagande (se ovan) och genom spridning av resultaten i programmets kanaler.

Bilaga 4 Publikationer

- a) Granskade publiceringar (publicerat eller accepterat för publicering av tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning eller liknande)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
A1			
A1			
A3			

- b) Manuskript skickade till granskad publicering (inskickat till tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
B1			
B2			

- c) Manuskript under bearbetning (avsett för publicering i tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare
C1		
C2		

- d) Avhandlingar (både publicerade och under utarbetande)

Nr	Titel	Författare	Datum
D1			
D2			

- e) Delrapporter och interna rapporter

Nr	Titel	Författare	Rapportnummer
E1			
E2			

- f) Övrig dokumentation

Nr	Titel	Författare	Beskrivning
F1			
F2			

Bilaga 5 Annan resultat- och kunskapsförmedling

- a) Tekniska och populärvetenskapliga publiceringar (utan vetenskaplig förhandsgranskning)

Nr	Titel	Författare	Tidskrift
G1			
G2			

- b) Ogranskade internationella konferenspublikationer

Nr	Titel	Författare	Konferens
H1			
H2			

- c) Ogranskade svenska konferenspublikationer

Nr	Titel	Författare	Konferens
J1			
J2			

- d) Seminarier etc.

Nr	Titel	Författare	Datum, plats
K1			
K2			

Bilaga 6 Beskrivning av programmet

Projektet 10915 DirektMetall är en del av det strategiska innovationsprogrammet

Metalliska material

Det strategiska innovationsprogrammet **Metalliska material** är ett samverkansprogram mellan Jernkontoret, Svenskt Aluminium och Gjuteriföreningen som delfinansieras av VINNOVA och löper under åren 2013–2019.

Programmets syftar till att förverkliga den strategiska innovationsagendan **Nationell samling kring metalliska material** vars långsiktiga vision är att svensk metallindustri ska vara ett centralt element i världens strävan att forma en bättre framtid. Det innebär att dess erbjudanden till kund måste ligga i den absoluta tekniska, ekonomiska och miljömässiga framkanten och utvecklas av drivna och engagerade människor. Samtidigt ska tillverkningsmetoderna ha ett så litet miljömässigt fotavtryck som det bara är möjligt.

Programmet stödjer insatser inom sju insatsområden för förnyelse, tillväxt och ökad konkurrenskraft:

1. Utveckla erbjudandet!
2. Öppna värdekedjan!
3. Öka materialutvecklingstakten!
4. Öka flexibiliteten!
5. Öka resurseffektiviteten!
6. Minska miljöpåverkan!
7. Öka kompetensen och attraktiviteten!

Programmets insatser består förutom FoU-projekt som valt i öppna utlysningar, även av strategiska projekt och aktiviteter.

Programkontor, med ansvar för ledning och administration av programmet, är Jernkontoret.

Den svenska stålindustrins branschorganisation

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt transportfrågor. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

Besöksadress

Kungsträdgårdsgatan 10

Telefon

+46 (0)8 679 17 00

E-post

office@jernkontoret.se

Organisationsnr

802001-6237

Postadress

Box 1721, 111 87 Stockholm

Webbplats

www.jernkontoret.se