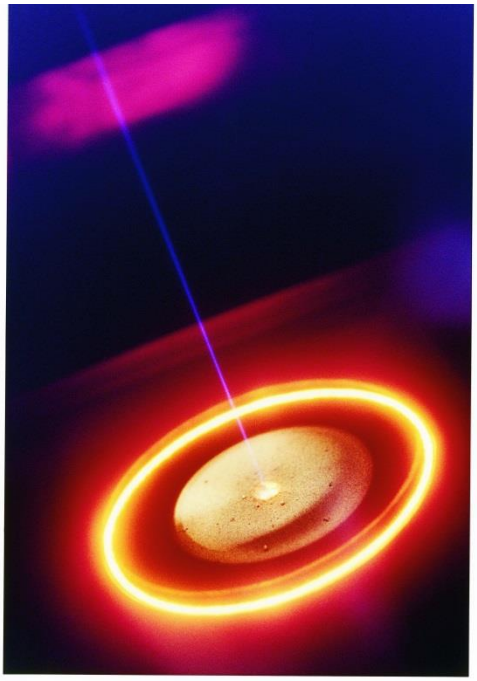
CHALMERS



3D skrivare till sjöss

En studie om möjligheten att använda additiv tillverkning ombord på fartyg

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

RIKARD KARLSEN

PAUL STUBBE

Institutionen för sjöfart och marin teknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2013

Rapportnr. Si-13/111

RAPPORTNR. Si-13/111

3D skrivare till sjöss

En studie om möjligheten att använda additiv tillverkning ombord på fartyg

RIKARD KARLSEN
PAUL STUBBE

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2013

3D skrivare till sjöss

En studie om möjligheten att använda additiv tillverkning ombord på fartyg

3D-printers within the maritime industry

A study about the possibility to use Additive Manufacturing onboard sea going vessels.

RIKARD KARLSEN

PAUL STUBBE

© RIKARD KARLSEN, 2013.

© PAUL STUBBE, 2013.

Rapportnr. Si-13/111

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

EBM smältpol (Arcam, 2013a).

Tryckt av Chalmers

Göteborg, Sverige, 2013

3D skrivare till sjöss

En studie om möjligheten att använda additiv tillverkning ombord på fartyg

RIKAD KARLSEN

PAUL STUBBE

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker och diskuterar möjligheten att använda 3D skrivare ombord på fartyg. Studien utforskar tekniken additiv tillverkning (hädanefter benämnt AT) där objekt byggs upp genom att material sammanfogas lager på lager. Till grund för detta arbete ligger en litteraturstudie samt intervjuer med personer på företag och fakultet vilka är kunniga inom området.

Studien beskriver AT och de fördelar tekniken erbjuder i förhållande till traditionell tillverkning. Arbetet visar på tillämpningar som finns idag hos additiv tillverkning samt potential och problematik inom området. Olika tekniker inom AT presenteras och även en genomgång av hur design genomförs genom 3D modellering.

Arbetet visar på att för mindre sidoprojekt skulle en extruderingsbaserad AT maskin för plast kunna vara ett andvändbart verktyg för en engagerad besättning. Samtidigt visar studien att det är fullt möjligt att tillverka reservdelar ombord men ett AT system ombord är inte att betrakta som en realistisk lösning för att ersätta delar av fartygs reservdelslager eller att tillverka verktyg. Fördelen ett AT system kan erbjuda är ökad tillgänglighet då möjligheten att tillverka delar ombord gör fartyget mindre beroende av levererade reservdelar vid hamnbesök. Dessutom är det tänkbart att arbete med AT tekniken kan verka positivt för uppfinningsrikedom och problemlösning.

Nyckelord: 3D skrivare, additiv tillverkning, sjöfart.

Abstract

This bachelor thesis examines and discusses the possibility of using 3D printers onboard sea going vessels. The study explores additive manufacturing where objects are built up by materials in a layer by layer principle. The basis for this work is a literature study and interviews conducted with experts in businesses and faculty in the field.

This paper describes the concept of additive manufacturing (AM) and the benefits the technology provides compared to traditional manufacturing. The project shows the applications currently available in AM and potentials and problems in the field. The various techniques of AM is presented and also an examination of how the design is implemented through digital modeling.

The study shows that for smaller side project, an extrusion based AM machine for plastic could be a valued tool for a committed crew. The thesis also shows that it is possible to produce spare parts onboard, but an AM system onboard is not considered to be a realistic solution regarding replacing the spare parts inventory or the crafting of tools. The thesis shows that the advantage of an AM system today is that it can offer increased availability by manufacturing parts that makes the organization less dependent on delivered parts during port visits. Moreover, it is possible that work with AM technology can be positive for ingenuity and problem solving.

Keywords: 3d printing, additive manufacturing , shipping.

Förord

Idéen till ämnet vilket behandlas i denna rapport föddes vid kontakt med en tidningsartikel i KLMs Inflight magazine under en transatlantflygning i september 2013. Valet av ämnesområdet kändes relevant då det på sistone (2012-2013) uppmärksammats som en teknik med stor och bred potential idag samt med svindlande möjligheter i framtiden. Arbetet har gett en djup insikt och förståelse för möjligheterna med teknologin vilket varit både lärande och intressant.

Författarna tackar Chalmers bibliotek med Christina Johansson, Yommine Hjalmarsson, Mona Wernbro och övrig personal för hjälp med referens skrivandet samt litteratursökning. Tack riktas även till examinator Ida-Maja Hassellöv, Helene Helldner och Betty Martinsson för ett givande mittenmöte. Fackspråks Claes Ohlsson tackas för ett berikande handledningstillfälle och Fia Börjesson för värdefulla fackspråks föreläsningar. Författarna är mycket tacksamma för det stöd familj och vänner gett under det ångestladdade skrivarbetet.

Ett stort tack riktats till Ian Gibson, Wim Michiels, Rachel Park, Anders Snis och Terry Wohlers för att de ställde upp på intervju och kom med värdefull information till rapporten. Sist men inte minst riktas ett stort tack till handledare och mentor Mats Isaksson för givande samtal, konstruktiv kritik och idéer under arbetets gång.

Innehållsförteckning

Sammanfattning iv
Abstract iv
Förord v
Innehållsförteckning vi
Förkortningar viii
Figurförteckning viii
1 Introduktion 1
1.1 Syfte 2
1.2 Frågeställning 2
1.3 Avgränsningar 2
2 Metod 2
2.1 Litteraturstudie 2
2.1.1 Insamling av data 3
2.1.2 Seminarier 4
2.1.3 Bearbetning av material 4
2.2 Intervjuer 4
2.2.1 Intervjumetod 4
2.2.2 Undersökningsgrupp (Urval) 5
2.2.3 Genomförande 5
2.2.4 Analysmetod 5
2.3 Källkritik 5
3 Bakgrund 6
3.1 Vad är additiv tillverkning? 6
3.2 Fördelar med AT 7
3.2.1 Snabbhet 7
3.2.2 Pris 8
3.2.3 Struktur 9
3.2.4 Viktreducering 11
3.3 Praktiska tillämpningar 12
3.4 Material 13
3.5 Trender 14

3.5.1 Politiskt incitament 15
3.5.2 Visioner 16
3.5.3 Forskning 18
3.6 Miljö 18
4 Teori 19
4.1 Teknologier 19
4.1.1 Extruderingsbaserad teknik 19
4.1.2 Stereolithography 21
4.1.3 Tvåfotoninducerad fotopolymerisation 22
4.1.4 Pulverbädds-principen 23
4.1.4.1 Laser 24
4.1.4.2 Electron beam melting 24
4.1.5 Direkt metalldeponering 26
4.1.6 Laminerad objekttillverkning 26
4.2 Scanners 27
4.2.1 Omvänd ingenjörskonst 28
4.3 Mjukvara 28
5 Resultat 29
6 Diskussion 31
6.1 Relevant teknik ombord 31
6.2 Kan ATs fördelar tillgodogöras ombord gällande tillverkning av reservdelar och verktyg 32
6.3 Ombord tillverkning av metalldelar 32
6.4 Ombord tillverkning av plastdelar. 34
6.5 Övrigt 34
6.6 Metoddiskussion 35
6.6.1 Validitet 36
7 Slutsats 36
8 Förslag på vidare studier 36
9 Referenser 37
10 Bilaga 1 42

Förkortningar

2PP	Två foton inducerad fotopolymerisation
AI	Artificiell intelligens
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, teckenkodning
ASTM	American Society for Testing and Materials, ideell standardiseringsorganisation
AT	Additiv tillverkning
CAD	Computer Aided Design, design mjukvara
CNC	Computerized numerical control, datorstyrd verktygsmaskin
DMD	Direkt metall deposition
DMLS	Direkt metall laser smältning
EBM	Electron beam melting
LOM	Laminerad objekt tillverkning
PLC	Programmable Logic Controller, programerbart styrsystem
UV	Ultra violett

Figurförteckning

Figur 1. Larmfästet tillverkad i en Fortis 400 mc, till höger på bilden. De två övriga delarna är tillverkade enligt formsprutning (Fagerberg, 2012). 8

Figur 2. Smycke med komplex struktur (Karlsen, 2013a). 9

Figur 3. Skiftnyckel utskriven i ett stycke (Stubbe, 2013). 10

Figur 4. Bränsleventil till raketmotor från NASA (NASA/MSFC, 2013) 10

Figur 5: Flödesoptimerad värmeväxlare (Hauge, 2013b). 11

Figur 6. Aluminiumblock med motsvarande fäste utarbetat med CNC (Wohlers, 2013d). 12

Figur 7. Bild på airduct (Karlsen, 2013b) och bältesspänne (3T RPD, 2013). 13

Figur 8. Topologioptimerad flygplanskomponent (Karlsen, 2013c). 16

Figur 9. Robotarm (Festo AG & Co. KG, 2010) och (3ders.org, 2012). 17

Figur 10. Hydralmanifold (Feenstra, 2012). 17

Figur 11. Topologioptimerad regel med inre gitterstruktur (Karlsen, 2013d). 18

Figur 12. Exempel på tillverkningsorientering (Fernández et. al., 2013) 20

Figur 13. Objekt med överhäng och stödstrukturer, utskrivet med extruderingsteknik (Karlsen, 2013e). 21

Figur 14. Komplex 3D struktur (Cicha et. al., 2011b) 23

Figur 15. Schematisk EBM princip (Arcam, 2013b). 25

1 Introduktion

Oavsett fartygstyp är alla fartyg för att betraktas som fullt funktionsdugliga beroende av en mängd olika system som exempel; framdrivningsmaskineri, navigationsutrustning, el-generering. Dessa system består i sin tur av olika undersystem uppbyggda av en mängd komponenter. Dessa komponenter oavsett mekaniska eller elektriska kan komma att vara föremål för haveri, eller rutinmässig överhalning (Kuiken, 2008). När en komponent är föremål för reparation, service eller inspektion är det vanligt förekommande att någon del kan komma att behövas bytas ut eller repareras med anledning av som exempel; naturligt slitage, felanvändande eller haveri. Generellt byts den uttjänta delen ut mot i bästa fall en ny från reservdelslagret i sämre fall får den uttjänta delen gå på övertid (Johansson, 1997). För att öka fartygets driftsäkerhet som helhet är medhavda ersättningskomponenter och slitage-delar ombord i ett reservdelslager en vanlig verklighet. Då mängden och variationen på system, komponenter och utrustning ombord är massiv ställs det höga krav på utbudet i reservdelslagret för att det ska betraktas som tillförlitligt (Johansson, 1997; Kuiken, 2008).

Beroende på komponent och reservdelens komplexitet kan även en ombord tillverkad reservdel vara aktuell. Vilket leder oss till verkstaden ombord som fyller en viktig funktion när det kommer till service och reparationsarbetet ombord (Johansson, 1997). Verkstaden ombord (beroende på fartygstyp och storlek) är ofta utrustad med en mängd verkstadsmaskiner som exempel; svarv, svets, slipmaskiner, pelarborr samt diverse material vilket möjliggör konstruktion eller modifiering av reservdelar och verktyg (Kuiken, 2008). Många skulle också ge medhåll åt påståendet att verkstaden ombord med sin utrustning fungerar som en tankesmedja och experimentverkstad där många idéer till förbättring och effektivisering föds (Anderson, 2012).

En teknik som förvisso inte är ny men som de senaste åren kraftigt expanderat och utvecklats är ”additiv tillverkning”, populärt också kallat 3D-printing (Grace, 2013). Samlingsnamnet additiv tillverkning innefattar en mängd olika tekniker som har gemensamt att utifrån en digitalritning förverkligar dessa digitala objekt genom att bygga upp dem steg för steg i tunna lager. Denna teknik möjliggör "utskrift" av synnerligen komplexa objekt, många gånger objekt som är "omöjliga" att skapa genom traditionella industrier och verkstadstekniker som exempel gjutning, CNC-bearbetning (Andersson, 2012; Barnett, 2013; Gibson et al., 2010; Lipson och Kurman, 2013). De material som additiv tillverkning idag kan arbeta med är som exempel; en mängd plaster med olika egenskaper, syntetiskt trä, keramik, vax, glas, titan, rostfritt stål, cement, för att nämna några material (Andersson, 2012; Barnatt, 2013; Lipson et al., 2013; Reichental, 2013; Wohlers, 2009).

Ombord på fartyg är det dagliga arbetet med service, underhållsarbete samt normal drift ofta fyllt av improvisation och "egna lösningar". En teknologi som enligt uppgift har potential att tillverka objekt med attribut mer komplexa än vanlig verkstadsteknik kan åstadkomma, i en uppsjö av olika material anser författarna av denna rapport väl värd att undersöka.

1.1 Syfte

Arbetet syftar till att ge läsaren grundläggande kunskap i additiv tillverknings (hädanefter benämnt AT) teknik samt att undersöka användbarheten av att idag använda additiv tillverkning ombord på fartyg.

1.2 Frågeställning

Med detta arbete ämnas följande frågeställning besvaras:

- Kan en AT maskin vara ett användbart verktyg ombord på ett fartyg?
- Är det möjligt att tillverka reservdelar eller verktyg ombord på fartyg med ett AT system?
- Vilka fördelar skulle användet av AT maskiner ombord på fartyg kunna ge?

1.3 Avgränsningar

Denna studie avser främst att redogöra för de tekniska möjligheterna samt problematik med additiv tillverkning där en direkttillverkad slutprodukt är resultatet. Arbetet ämnar inte att i detalj redogöra för problematiken gällande patent, garanti, certifikat och klassning utav produkter vilka är AT tillverkade. Rapporten kommer ta upp ekonomiska aspekter men inte göra en omfattande ekonomisk analys på området. Studien begränsar sig till fartyg inom handelsflottan som är utrustade med verkstad ombord samt där underhåll och reperationer sköts utav besättningen ombord. Arbetet riktar sig till personer insatta i arbete ombord fartyg och i maskin. För att öka aktualiteten och riktigheten på denna rapport undviks användande av källor äldre än 2010.

2 Metod

Som grund för att besvara frågeställningen baseras undersökningen på en litteraturstudie samt intervjuer.

2.1 Litteraturstudie

Genomförandet av en litteraturstudie valdes för att få bakgrundsinformation till arbetet samt att få en fördjupad kunskap inom ämnet. Litteraturstudien fortlöpte genom hela arbetet och låg även till grund för intervjuerna som genomfördes. Under den inledande faktasökningen konstaterades att utvecklingen inom området går snabbt jämfört med många andra ämnen och studien ämnar använda så aktuella källor som möjligt vilket är nämnt i avgränsningar ovan.

Kontakt med företag inom branschen bekräftade vikten av aktuella källor där Protech Sverige svarade att det *är essentiellt att läsa 'Wohlers Report 2013'* på frågan vilken litteratur de rekommenderar i syfte att lära sig om AT tekniken (Risberg, 2013). Wohlers Report är en högt respekterad och välrenommerad rapport om AT branschen vilken ges ut årligen. Via ”Summon” supersök gick Wohlers Report 2009 att finna på Chalmers huvudbibliotek. Som

nämnt i avgränsningar så är ett mål med denna rapport att använda så aktuella källor som möjligt i syfte att styrka rapportens relevans och trovärdighet, därför gjordes en utökad sökning i förhoppning att finna en senare version på bibliotek utanför Chalmers. Denna utökade sökningen ledde inte till erhållande av modernare upplaga. Ett inköpsförslag ställdes till Chalmers bibliotek enligt föreskriven rutin (2012-09-12), vars avslag meddelades 2013-09-13.

National Library Singapore besöktes 2013-10-06 för en litteratursökning i jakt efter en aktuellare utgåva av Wohlers Rapport än den på Chalmers bibliotek. Litteratursökningen på National Library Singapore gav att Wohlers Rapport ej förekom i deras katalog.

Litteratursökning och besök gjordes på The British Library 2013-11-06 i syfte att få tillgång till Wohlers Rapport. Sökning gav träff, dock var utgåvan från år 2009 samma som exemplaret tillgängligt på Chalmers Bibliotek. I samband med studiebesök på Arcam 2013-11-25 gavs möjligheten att studera Wohlers Rapport, 2013 vilken där fanns tillgänglig.

Under initialskedet av rapporten insåg författarna att konferensbesök och kontakt med personer involverade i AT branschen fyller ett relevant syfte för rapporten, vilket rapportens handledare Mats Isaksson instämde i under ett handledarmöte 2013-09-23. I syfte att få aktuell förstahands information och nya uppslag genomfördes ett besök på 'Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, oktober 1-2, 2013'. Under konferensen/mässan besöktes fyra seminarier och samtal/intervjuer hölls med personer vars expertis ansågs värdefull för denna rapport.

Konferensbesöket “Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, oktober 1-2, 2013” ansågs vara i hög grad värdefullt för rapporten och ett beslut togs att även besöka “3D Printshow, London, november 7-9, 2013”. Under 3D Printshow besöktes ett antal seminarium ihop med en mängd samtal med utställare och föreläsare.

Studiebesök hos Arcam vilka utvecklar och tillverkar metall AT system skedde 2013-11-25. Under besöket visades deras produktionsanläggning samt utvecklings enhet. Samtal/intervju hölls med anställda samt demonstration av utskrivna produkter.

2.1.1 Insamling av data

Under litteraturstudien gjordes sökningar på bibliotek, bokhandel, media och internet för att hitta relevant information. Litteratur har inhandlats från Adlibris online och lånats från Chalmers bibliotek. Tidskrifter, konferensartiklar och e-böcker samlades ihop. Informationen i ovan nämnda medier började gå igenom. Företag kontaktades, nya infallsvinklar uppkom. Seminarier besöktes, samtidigt som informationsmängden sållades ut, expanderade och gicks igenom. Under seminariebesök fördes anteckningar som grund till bearbetningen av data.

Under litteraturstudien skedde informationsinhämtning främst med hjälp av Chalmers Biblioteks söktjänst ”Summon”, även sökning på Göteborgs Bibliotek och Google användes. Fortsatt söktes på bokhandeln och via kontakt med företag. Vidare besöktes seminarium och branschmässor. Vid sökning i elektroniska sökmotorer så som ”Summon”, gotlib, google och bokhandeln användes söktermer så som; 'Additive Manufacturing', '3D-Printing', 'Stereolithography', 'CAD', 'STL', 'Rapid Prototyping', 'Selective Laser Sintering', 'Metal additive manufacturing' osv. i olika kombinationer och varianter.

2.1.2 Seminarier

I samband med litteraturstudien genomfördes besök på konferenseren och mässan “Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, oktober 1-2, 2013” och "3D Print Show, November 7-9, London, 2013". Under besöken besöktes ett flertal seminarier presenterade i bilaga 1, vilka ligger till grund för en stor del av faktainsamlingen.

2.1.3 Bearbetning av material

Materialet bearbetades under litteraturstudien genom; att snabbläsa igenom materialet, avfärda eller godkänna materialet och till sist studera materialet. Vidare viktades trovärdigheten utav materialet med användbarheten.

2.2 Intervjuer

Ett flertal intervjuer genomfördes i denna undersökning. Intervjuerna skedde under konferensen och mässan “Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, Oktober 1-2, 2013” samt under studiebesöket på Arcam.

2.2.1 Intervjumetod

Efter genomgång av ett flertal metod och intervjuböcker däribland Ryen (2004) Svenning; (2003) och Trost (2010) där information om data insamling, analys och presentation införskaffades gjordes val av metod för intervjuer. Det finns många sätt och benämningar att förklara intervjumetodik, metodiken för denna studie är hämtad från Trost (2010).

Intervjuerna genomförda i denna studie var kvalitativa intervjuer. Intervjuerna genomfördes med låg grad av standardisering med följd att den intervjuade får vara med och bestämma ordningsform utav intervjun samt att följdfrågor anpassas efter svar. Detta för att få en bred bild i form av att svaren reflekterade de intervjuades erfarenheter och kunskap.

Intervjumetoden var öppen i mening att inga svarsalternativ var givna för att inte begränsa intervjun till att besvara frågor utan öppna för diskussion. Intervjuerna var strukturerade i avseende på att ämnet var förbestämt med ett antal möjliga underämnen. Detta tog form i att intervjuerna öppnades med en bred fråga om vilka möjligheter AT tekniken har idag och fortsatte med olika följdfrågor beroende på vart intervjun ledde och vilken expertis den intervjuade besatte. Områden som diskuterades var områden så som möjligheterna och begränsningar med AT tekniken idag, material, kunskapsbehov, kostnader och vad som tillverkas idag.

2.2.2 Undersökningsgrupp (Urval)

Undersökningen genomfördes via intervjuer med personer med lång erfarenhet inom branschen. Samtliga är tekniskt kompetenta inom branschrelaterade företag eller fakultet. Kriterier för urvalet av intervjuobjekt följer nedan:

- Villiga att ställa upp på en intervju.
- Lång erfarenhet inom området.
- Hög expertis inom området.
- Publicerat material inom området.

2.2.3 Genomförande

Datainsamlingen under de inledande intervjuerna skedde med inspelning av ljud parallellt med anteckningar. Tekniska problem ledde till mindre lyckat resultat av ljudupptagningen. Efter intervjun nedtecknades upplevelsen parallellt, dessa anteckningar tillsammans med anteckningarna gjorda under intervjun utgör rådata.

2.2.4 Analysmetod

Efter genomförandet av intervjuerna sammanställdes rådata individuellt. Intervjuerna analyserades individuellt och resultat antecknades. Vidare diskuterades intervjuerna och resultat i grupp för att säkerhetsställa att relevant data presenteras i rapporten samt att minska risken för personliga åsikter påverkade tolkningen utav intervjuerna. Detta gjordes genom att data som var oväsentlig utifrån frågeställningen sållades bort, dessutom jämfördes anteckningarna som gjordes individuellt för att säkerställa enighet. Utöver detta diskuterades validiteten utav intervjuerna i avseende att bestämma vilken data som presenterats i resultatet. Validiteten diskuterades med utgångspunkt från information inhämtad via litteraturstudien samt samtal med företag, utställare från mässor och seminarieföreläsare.

2.3 Källkritik

I denna rapport har det gjorts försök att nyttja så aktuella källor som möjligt då det snabbt sker förändring och utveckling i branschen, vilket tydligt är identifierbart då Wohlers Rapport från 2009 jämförs med Wohlers Rapport från 2013. Detta genererar dock problematik då information ständigt blir obsolet och att det ger begränsat med lämpliga källor. En ambition har varit att använda källor med hög trovärdighet och all information har analyserats kritiskt och jämförts mellan källor.

Ett problem som uppstått har varit motsägelser i information främst vid samtal med företag och insatta personer. Detta kan bero på både förändringar i utvecklingen och egenintressen hos enskilda personer. Mycket resurser har lagts ner under arbetets gång för att reda ut och värdera informationen som inhämtats.

Fler uppdaterade källor skulle vara välkommet inom området och kommer troligen att finnas inom snar framtid. Som exempel kommer Ian Gibson att publicera en andra utgåva utav sin bok ”Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing” vilken kommer vara en värdefull framtida källa.

3 Bakgrund

Detta inledande kapitel tjänar att ge läsaren en bättre förståelse för AT tekniken.

3.1 Vad är additiv tillverkning?

När ett objekt ska tillverkas genom en industriell verkstadsprocess har dessa objekt oftast skapats med hjälp av två grund principer, antingen genom gjutning eller via tekniker som involverar materialreducering. Gjutning syftar på tillverkningsteknik där flytande eller semi-flytande material pressas till önskad form med hjälp av mallar eller formar, enkelt exempel; stöpning av tennsoldater. Materialreducering syftar på att form och design uppnås genom att subtrahera bort material från ett initial stycke till önskad form genom borrning, slipning, svarvning, CNC bearbetning. Kombination av de båda teknikerna är naturligtvis tänkbart, som exempel att bearbeta ett gjutet motorblock med borr (Gibson et al., 2010; Wohlers, 2013b). Denna rapport ska beröra ett tredje tillverkningsalternativ kallat additiv tillverkning.

Additiv tillverkning är en benämning som refererar till en grupp av tillverkningstekniker som i sin enklaste princip går ut på att objekt byggs upp genom att addera material i tunna lager i en upprepande process. En digital design över ett tredimensionellt objekt delas upp i flera tunna tvådimensionella tvärsnitt vilka fungerar som mallar enligt vilka material adderas i lager på lager för att successivt bygga upp objektet. Tänk en brödlimpa vilken är uppbyggd av många brödskivor där varje enskild brödskiva representerar ett tvärsnitt. Tekniken att bygga upp objekt i flera lager möjliggör former, detaljer och interna strukturer i objektet som med traditionella tillverkningstekniker som exempel; gjutning och CNC-bearbetning skulle vara svårhanterliga eller rent utav omöjliga (Andersson, 2012; Barnatt, 2013; Gibson et al, 2010; Lipson och Kurman, 2013; Wohlers, 2009).

Det finns en mängd olika material som kan användas i AT som exempel; cement, choklad, olika metaller och metallegeringar, hundratals plaster med olika egenskaper, syntetiskt trä, vax, stamceller för att nämna några (Andersson, 2012; Barnett, 2013; Lipson och Kurman, 2013; Reichental, 2013; Wohlers, 2009). Teknologin är känd under många namn dock är additiv tillverkning det uttrycket som används i formella industriella eller vetenskapliga sammanhang och har sedan 2010 ATSM (American Society for Testing and Materials) godkännande. 3D skrivare/3D printing är dock den benämning vilken betraktas som en mer universell standard vilken majoriteten använder sig av och kommer vinna ytterligare mark (Barnett, 2013; Gibson et al., 2010; Wohlers, 2013b). Kina erkänner uttrycket 3D printing som sin nationella standard (Wohlers, 2013c). Då författarna av denna rapport har en önskan att göra rapporten så tillgänglig som möjligt används uttrycket ”3D skrivare” i titeln i förhoppning att öka tillgängligheten samt locka läsare vilka inte är familjära med additiv tillverkning som benämning på tekniken.

3.2 Fördelar med AT

> *”AT teknologin kommer att förändra design och produktion för alltid, vi står inför en ny era.”* (Reichental, 2013)

> *”Många personer har beskrivit denna teknik som revolutionerande för produktutveckling och tillverkning. Många går även så långt att de påstår att tillverkning, som vi känner till den i dag, inte kanske komma att existera om vi följer AT teknologins potential till fullo”* (Gibson et al, 2010, s. 8).

Ovanstående citat anser författarna av denna rapport vara starka, ihop med att de är yttrade av personer med högt anseende inom branschen gör uttalandena mer intressanta. Vad är det med AT tekniken som uppmuntrar folk till dessa starka påståenden? Efter genomgång av litteratur, artiklar och material inhämtat under intervjuer har författarna identifierat några återkommande teman som används när AT styrkor kommuniceras. Vanliga fördelar som lyfts fram är som exempel; viktreducering, mindre materialåtgång, komplex struktur, klimatsmart. Nedan följer en kort redogörelse av fördelar och verkliga exempel som förekommer i diskursen kring AT tekniken.

3.2.1 Snabbhet

Den ökade hastigheten AT teknologin kan erbjuda när det gäller att transformera en digital design till ett verkligt objekt jämfört med traditionella tekniker är en fördel som ofta lyfts fram i bland annat litteratur (Andersson, 2012, Barnatt, 2013, Lipson och Kurman, 2013; Wohlers, 2009). Tidseffektivisering var även en gemensam nämnare vid de olika seminarier under 3D-skrivarkonventet där resultat av olika fallstudier presenterades (Jagholm, 2013; Michiels, 2013a; Reichental, 2013; Wohlers 2013b). Beväpnad med en digital design och en AT maskin kan unika objekt skrivas ut på några timmar, med traditionella tillverkningsprocesser kan samma process ta betydligt längre tid. Att använda 3D modeller i syfte att förenkla kommunikation mellan designers, utvecklare, konstruktörer, investerare och kunder verkar positivt för att minska ledtiden hos produktutvecklingen i många branscher (Wohlers, 2009).

Generellt tar en produktionsomställning inom tillverkningsindustrin lång tid. CNC-programmering är en tidsödande process där mycket manuellt planeringsarbete är nödvändigt. Industriella tillverkningsprocesser består inte sällan av många olika tillverkningssteg som exempel, kan ett materialstycke som är under bearbetning behövas flyttas mellan olika verkstadsmaskiner eller byta greppunkt i en CNC process, medan AT inte är beroende av lika många steg (Gibson et al., 2010).

Vad som är viktigt att uppmärksamma hos de exempel som lyfts fram där AT tekniken lovordas ur tidsoptimeringsperspektiv är att det ofta rör sig om hastigheten för produktutveckling där testmodeller skrivs ut och inte tillverkning av själva slutprodukten.

Alternativt så rör det sig om produktion av en liten serie där tiden för tillverkning av gjutform och produktionsomställningen läggs till i totaltiden. Exempel på tillverkningstid av en platsdetalj; larmfästet (fig 1) tillverkas enligt traditionell teknik (formsprutning) på 35 sekunder. Samma larmfäste tog 68 minuter att skriva ut med AM i en Fortus 400 mc (Fagerberg och Osbakk, 2012).

Figur 1. Larmfästet tillverkad i en Fortis 400 mc, till höger på bilden. De två övriga delarna är tillverkade enligt formsprutning (Fagerberg, 2012).

Det finns fall där tillverkningstiden av slutprodukt kan erfara en tidsreduktion, då rör det sig om komplexa delar där mycket handarbete tidigare varit en del av tillverkningen. GE Aviation tillverkar bränslemunstycken till sin nya LEAP jetmotor med hjälp av AT. Istället att för manuellt svetsa ihop 20 stycken delar vilket är ett tidkrävande arbete tillverkas munstycken enligt AT tekniken Direkt Metall Laser Smältning (DMLS) (3ders.org, 2013; GE Aviation, 2013).

3.2.2 Pris

> *"Enkelt summerat, vår 3D skrivare sparar oss tid, pengar och tillåter oss arbeta mer fritt"* -Christian von Koenigsegg, CEO Koeningsegg (Dimention 3D Printers, 2010).

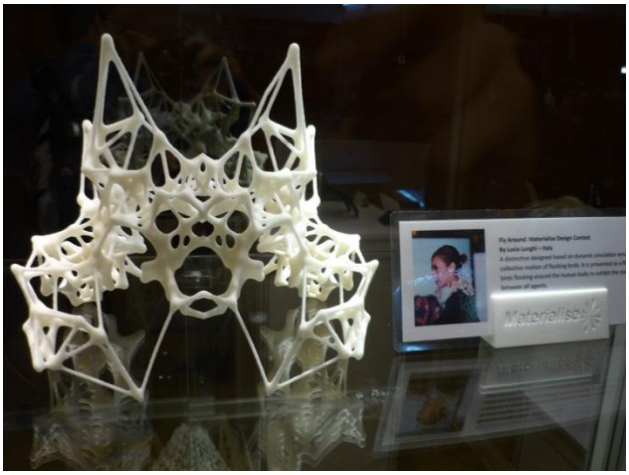
Fallstudier som påvisar inslag av kostnadsbesparingar är troligen de studierna det finns flest av. Ett faktum som är lätt förklarat då ekonomiska fördelar ofta kan kopplas ihop med kortare ledtider i produktutveckling eller diffusa påståenden om förbättrad kommunikation mellan parter. I litteraturen är man även slående överens; implementering av AT har god potential att vara fördelaktigt ur ett ekonomiskt perspektiv (Andersson, 2012; Barnett, 2013; Gibson et al., 2010; Lipson och Kurman, 2013; Wohlers, 2009). Många exempel grundar sig i att AT används ihop med traditionell tillverkningsteknik där AT används framför allt som ett verktyg för att billigare utveckla och tillverka "offermallar" eller gjutformar. Sevens (2013) håller med gällande att AT tekniken som ett ytterligare verktyg kan erbjuda kostnadsfördelar i många avseenden. Det finns dock exempel på tillverkning av slutprodukt via AT där kostnads fördelar är dokumenterade. Dessa exempel är oftast tillverkning av högt individualiserade produkter så som tandskenor, tandhättor, proteser och hörapparater vilka är speciellt utformade efter användarens hörkanal (Gibson et. al., 2010; Jones, 2013; Wohlers, 2009).

Det finns hundratals delar i interiören hos Boeings 787 vilka är direkt tillverkade med AT maskiner. Där delarna förvisso inte är billigare i tillverkning jämfört med formgjutning men ger en ekonomisk fördel ur ett livscykelperspektiv tack vare den viktreduktion uppnådd med hjälp av ATs möjlighet till komplex struktur vilket minskar bränslekonsumtionen (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013c). En egenskap AT besitter är att det nödvändigtvis inte blir billigare med massproduktion. Utskriftskostnaden per enhet är mer ”fast” jämfört med dagens tillverkningsteknologier där det kostar stora summor att ställa om produktionen i en tillverkningsindustri. Om det medför samma styck pris att tillverka en enhet som tiotusen stycken så finns det goda chanser att individualiserad tillverkning erfar ökat intresse (Michiels, 2013a).

Vanligt ABS plastmaterial som används i 3D skrivare är mellan 53 och 104 gånger dyrare än likvärdigt plast material anpassat för formgjutning (Wohlers, 2013b). Ett flertal patent har de senaste åren gått ut och fler kommer att följa. Detta ger förutsättningar för billigare AT teknik som exempel är AT maskiner för privatbruk en direkt följd av just utgångna patent (Hauge, 2013a; Stevensson, 2013; van Gils, 2013).

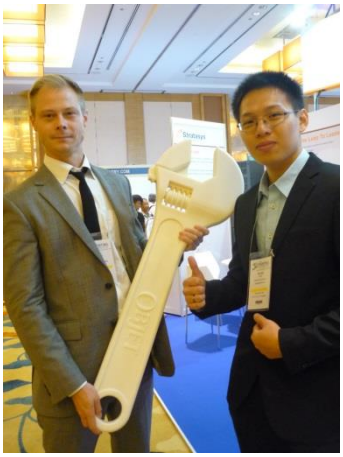
3.2.3 Struktur

Då AT maskiner bygger upp objekt lager för lager finns helt andra möjligheter till geometrisk struktur i objekt då det som tillverkas inte är beroende av att gjutmallar måste kunna göras fria efter stöpning eller att vinklar och utrymmen begränsar CNC maskiners åtkomst (Andersson, 2012; Barnatt, 2013; Gibson et al, 2010; Lipson och Kurman, 2013; Wohlers, 2013b). Att skapandet av objekt med komplex geometrisk struktur har blivit mer lättillgänglig via AT har i allra högsta grad nyttjats av smyckeskonstnärer och övriga designers när det gäller skapandet och utformning av diverse modeaccessoarer och häpnadsväckande inredningsobjekt (fig. 2). För den som finner figur 2 fascinerande rekommenderas en internet sökning på "3D printing design" eller liknande.

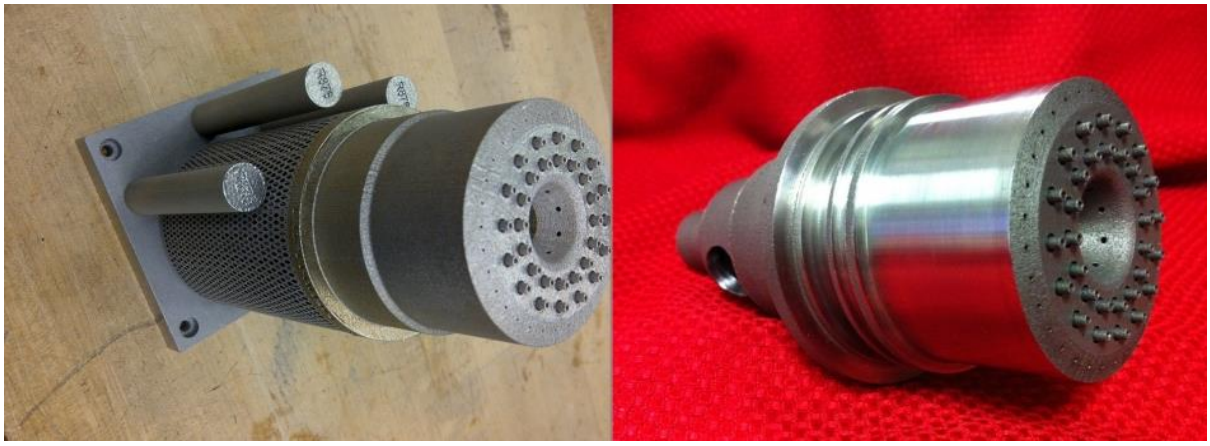


Figur 2. Smycke med komplex struktur (Karlsen, 2013a).

Tillverkning av objekt eller komponenter som vanligtvis är tvunget att bestå av flera olika delar kan med AT många gånger tillverkas i ett stycke eller åtminstone i färre delar. Vilket kan underlätta mer kompakta designs men också reducera behovet av olika steg i produktionskedjan samt eftermontering vilket är förknippat med en kostnad i tid och pengar (fig. 3) (Barnatt, 2013; Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013b). NASA har som exempel använt sig av AT teknik för att uppgradera en bränsleinsprutare (fig. 4) som tidigare var tillverkad enligt traditionella verkstadsprinciper och bestod av 15 delar. Efter design optimering och tillverkning med hjälp av AT blev resultatet en reducering från de ursprungliga 15 delarna till 2 delar (Wohlers, 2013b). Skapandet av komplex struktur via AT är nödvändigtvis inte en egenskap som vid utskrift är mer kostsam eller tidsödande. Denna egenskap kan användas som exempel till flödesoptimering i värmeväxlare eller manifoldrar för hydralik (fig. 5). Enkelheten till komplex struktur öppnar upp för unika möjligheter till skapandet av inre struktur vilket kan erbjuda möjligheter till viktreduktion (Hauge, 2013a, Vilbrandt, 2013).



Figur 3. Skiftnyckel utskriven i ett stycke (Stubbe, 2013).



Figur 4. Bränsleventil till raketmotor från NASA (NASA/MSFC, 2013)

Figur 5: Flödesoptimerad värmeväxlare (Hauge, 2013b).

3.2.4 Viktreducering

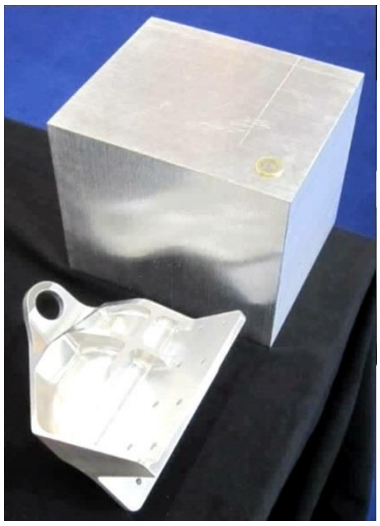
Möjligheten till mer avancerad inre struktur hos objekt tillverkade med hjälp av AT ger att viktreducering ofta kan åstadkommas hos objektet utan att kompromissa med styrka, manöverförmåga eller funktion (Hague, 2013a; Reichental, 2013). GE Aviation har konstruerat ett bränslemunstycke som tillverkas med hjälp av AT tekniken Direct Metal Laser Melting (DMLS) till sin nya jetmotor LEAP. Resultatet, ett bränslemunstycke som kunde erfara en 25 % viktreduktion samt en ökning av hållbarheten med 5 gånger jämfört med tidigare version (GE Aviation, 2013; Wohlers, 2013b). Detta sker genom att nyttja AT teknikens möjligheter till komplex design vilket tillåter optimering av bränslemunstycket som därmed erfar en ökning i styrka. Viktreduceringen uppnås genom designoptimering samt att munstycket tillverkas i ett stycke jämfört med tidigare där det bestod av flera delar vilka löddes och svetsades samman manuellt (GE Aviation, 2013). Resultatet har bistått GE Aviation i övertygelsen att tekniken har potential och är värd att utforska ytterligare, varför GE Aviation kommer investera 3,5 miljarder US dollar löpande i AT projekt under 5 års tid. (Wohlers, 2013b). Robert McEwan, General Manager Airfoils & Manufacturing GE Aviation tror att inom vår livstid att minst 50 % av delarna i deras jetmotorer kommer vara tillverkade med AT (Wohlers, 2012). Något som Professor Richard Hague på Nottingham University anser vara en synnerligen ambitiös målsättning (Hague, 2013a).

Det finns stora förhoppningar angående potentialen hos AT som tillverkningsteknik för flygplanskomponenter. Många flygplansdelar kan erfara en 40-70 % viktreduktion beroende på del med hjälp av AT teknik. Viktreduktion kan kraftigt gynna flyg och rymdindustrin i och med att minskad vikt medför en reduktion i bränsleförbrukning vilket både ekonomer och miljövänner gemensamt kan jubla över (Barnatt, 2013; Rayna, 2013; Reichental, 2013; Wohlers, 2013b). Även om AT tekniken idag inte är i närheten av att skriva ut större delar av en flygplanskropp arbetar redan en design grupp hos Airbus med att utveckla ett flygplan för konventionell flygtrafik som beräknas vara 65 % lättare än dagens flygplan. Airbus har också givit forskningsanslag till Exeter Universitet vars mål är att undersöka samt utveckla flygplansdelar lämpliga att tillverka via AT (Barnatt, 2013).

Då tillverkning med hjälp av AT sker enligt principen att material endast läggs till där det behövs ihop med större möjligheter till skapandet av inre struktur med ihåligheter. Argumenteras det ofta att vikt ihop med materialåtgång kan minska vid användandet av AT

som tillverkningsteknik jämfört med traditionella tekniker (Andersson, 2012; Barnett, 2013; Colombo et al., 2013; Lipson och Kurman, 2013).

En mindre smickrande omständighet som råder vid tillverkning av vissa delar till flygplan är att tillverkningen börjar med ett stort stycke synnerligen kostsamt flygplans aluminium där material därefter svarvas, borras, slipas, CNC bearbetas bort i sådan grad att många delar vid slut bearbetning endast besitter 10-20% av materialstyckets initial vikt (fig. 6) (Wohlers, 2013b). Att tillverka delar som genererar 80-90% skrot metall är inte sällan att betrakta som vare sig ekonomiskt fördelaktigt eller miljövänligt.



Figur 6. Aluminiumblock med motsvarande fäste utarbetat med CNC (Wohlers, 2013d).

3.3 Praktiska tillämpningar

Under många års tid användes AT endast till att tillverka modellprototyper varför AT tekniken i sin begynnelse benämndes Rapid Prototyping. Dessa modeller var ömtåliga och sköra och kunde mest användas som visuella hjälpmedel i olika sammanhang. Även om AT fortfarande flitigt används för tillverkning av visuella modeller så har AT teknikens utveckling breddat användningsområdena för AT tillverkade prototyper (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2009).

Idag används AT för att tillverka fullt fungerande metallprototyper, som exempel använder sig fordonstillverkarna BMW och Daimler av AT maskiner från Concept Laser för tillverkning av motordelar i metall för pilotserier och motorutveckling (Concept Laser, 2010). Det finns idag möjlighet att tillverka metallkomponenter med AT som klarar höga termiska och mekaniska påfrestningar (Concept Laser, 2010; McMahan, 2013; Michiels, 2013a).

Ytterligare ett stort användningsområde för AT är tillverkning av verktygskomponenter, gjutformar, formmallar, mönster vilka sedan används inom tillverkningsindustrin. Tillverkning med AT ämnat för slutprodukt finner vi i dentalindustrin där tandhättor

tillverkas patient specifikt (Barnett, 2013; Snis, 2013; Wohlers, 2013b). Flygindustrin där interiördelar tillverkas och används idag (fig. 7).

Figur 7. Bild på airduct (Karlsen, 2013b) och bältesspänne (3T RPD, 2013)

För att koka ner det till sin essentiella kärna används AT idag för att tillverka högt specialiserade eller individualiserade delar alternativt något som har en liten produktions serie. Tandskenor, ortopediska implantat, proteser, hörselapparater, delar till Formula 1 bilar, motorkomponenter till koncept bilar, patient anpassade kirurgverktyg, verktygskomponenter för tillverkningsindustrin är några exempel där AT med förmån används. Att tillverka något idag enligt gammal design som med lätthet går att tillverka med hjälp av traditionella tekniker finns det inget incitament för (Gibson, 2013; Stevenson, 2013; Wohlers, 2013c).

Det finns andra områden där AT används för att tillverka slutprodukter, däribland smycken, konst, plastfigurer, lampor (Wohlers, 2009), solglasögon, leksaker och proteser (Barnatt, 2013). Det finns en stor potential att använda AT för tillverkning av specialanpassade produkter (Reichental, 2013).

3.4 Material

Den konventionella plastindustrin har under många år arbetat med och utvecklat en uppsjö av plastmaterial med olika egenskaper ur perspektiven; draghållfasthet, styvhet, brandrepellerande. Av detta följer naturligt att det finns en mängd olika plast filament/pulver till AT (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013c). Under rätt förutsättningar gällande AT utrustning, råmaterial, design, kunskap hos operatör och konstruktör, kan plastdelar tillverkas med AT vilka erfar materialegenskaper i samma klass som traditionellt tillverkade plastdelar (Gibson, 2013; Jagholm, 2013; Wohlers, 2013b). Ordinära plastfilament anpassade för bruk i industriell AT utrustning säljs för 1000 – 1700 SEK/ kg. Detta kan jämföras med liknande plaster för formsprutning vilka säljs för 15-20 SEK/ kg (Wohlers, 2013a).

Metall-AT enligt pulverbädds-principen har kapacitet att skriva ut i som exempel; verktygsstål, rostfriastål, titan, kobolt-krom, aluminium, nickel, koppar-legeringar, guld, silver. Materialkapacitet beror på AT maskinens tillverkare och serie. Utvecklingen av AT hårdvara och metallegeringar är en ständigt pågående process och möjligheterna och materialvalen breddas kontinuerligt (Hauge, 2013a; Vilbrandt, 2013; Wohlers, 2013a).

Många tillverkare av metall AT system sammarbetar med sina kunder gällande materialutveckling och tester av dessa. Hos många metall-AT system finns goda möjligheter att övervaka och styra tillverkningsprocessen gällande solidifiering och mikrostruktur. Denna övervakning och styrning ger möjligheten att tillverka metall delar vilka besitter materialegenskaper överträffande gjutna delar. Verktygsstål, rostfritt och aluminiumlegeringar i pulverform ligger på 600-1000 SEK/kg, titanlegeringar 2000 – 6000 SEK/kg (Wohlers, 2013a).

3.5 Trender

Den utveckling och de framsteg som gjorts inom AT är starkt kopplat till utveckling och genombrott hos andra tekniska områden som exempel; datorprestanda, datalagring, 3D grafik, designmjukvara, PLC, Laser, sensorer (Gibson et al, 2010; Wohlers, 2013a). Något som i dag är underutvecklat och håller tillbaka möjligheterna är de brister som finns hos designmjukvara vilka framförallt är anpassade till design och konstruktion av statiska, solida objekt med hjälp av traditionella tekniker (Hauge, 2013a; Seven, 2013; Vilbrandt, 2013; Wohlers, 2013a).

Den komplexitet som AT tillåter öppnar upp för nya tankar gällande materialdesign och skapande av materialstrukturer vilket tidigare inte varit möjligt. Detta tillåter konstruktion av delar som kan mekaniskt ”programmeras” att bete sig på ett önskvärt sätt som exempel material som expanderar eller komprimeras olika beroende på introducerade krafter i olika led och vinklar. Komplex materialstruktur implementerad hos industriella komponenter kan ge fördelar hos applikationer som exempel komplexa filter till avgasrening och katalysatorer (Hauge, 2013a; Vilbrandt, 2013).

Utveckling inom metall AT betraktas som viktig då genombrott inom denna gren starkt kan påverka andra teknik- och industriområden (Gibson, 2013; Hauge, 2013a; Wohlers, 2013b). Värt att notera är att metallutskrift i pulverbädd är en relativt ny teknik jämfört med andra AT tekniker och utvecklingen inom detta område har gått snabbt. Trots sin unga ålder används pulverbäddstekniken idag frekvent för direkttillverkning av slutprodukter i metall vilket för bara några år sedan inte var möjligt (Wohlers, 2013a).

En faktor som hämmar bruket och spridningen av AT tekniken är det höga priset för industriella system samt den höga kostnaden för byggmaterialet. För tillfället liknar utvecklingen inom AT Moores lag i avseende på att tekniken förbättras samtidigt som priset sjunker (Hauge, 2013; Rayna, 2013). Det som talar för fortsatt prisreduktion är att många utgående patent är att vänta samt fortsatt spridning av tekniken kommer locka fler aktörer till materialtillverkning för AT (Rayna, 2013; Wohlers, 2013a).

Det som har tillåtit uppkomsten och expansion av lågpris-maskiner är framför allt att diverse patent inom AT teknologin blivit obsoleta. Vissa personer inom branschen vågar till och med påstå att patentutformning och designskydd som det ser ut idag hämmar den tekniska utvecklingen i allmänhet och AT utvecklingen i synnerhet (Pettis, 2013; Stevensson, 2013).

Vilket får betraktas som intressanta åsikter då etablissemanget ofta hävdar motsatsen och många gånger önskar en utveckling mot ökat skydd för intellektuellegendom generellt.

Bristen på erkända standarder hos material och AT processer kan argumenteras verka avskräckande för spridning och tillämpning av tekniken. Industrin önskar luta sig mot erkända standards, speciellt för direkttillverkning av slutprodukt. Idag saknas till stor del verifierad och generellt accepterad fakta gällande relevanta kvaliteter som exempel mekaniska, termiska, elektriska egenskaper hos AT tillverkade produkter. Hur AT produkter beter sig över sin livslängd och hur temperaturskillnader, fuktighet, solljus påverkar behöver också studeras (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013a). Med anledning av detta bildades den internationella kommittén F42 hos ASTM (American Society for Testing and Materials) i januari 2009. Hittills har kommittén enats om en terminologistandard, filformatsstandard (AMF) samt en materialstandard gällande metallegeringen Ti6Al4V (ASTM, 2013a; Wohlers, 2013a). Utöver brist på erkända standards finns andra problem gällande ytkvalitet, toleranser och repeterbarhet hos många AT metoder (Gibson, 2013; Wohlers, 2013a).

3.5.1 Politiskt incitament

I syfte att påvisa AT teknikens relevans vill författarna nämna att AT teknologin inte bara intresserar designers och personer med futuristiska tankar utan har under de senaste åren även fångat politiker och myndighetspersoners intresse runt om i världen. I som exempel; Kina, Tyskland, Storbritannien, Singapore och USA finns det politiska initiativ att utveckla AT tekniken vidare (Reichental, 2013). Singapore ska investera 500 miljoner S$ motsvarade 2,6 miljarder SEK i additiv tillverkning under de fem kommande åren (Gibson, 2013; Reichental, 2013; Wohlers, 2013b). Bland annat ska 157 miljoner SEK ska gå till National Technical University (NTU) för forskning inom området. Ytterligare projekt är att bygga och utveckla ett AT ekosystem (Wohlers, 2013b). Wohlers (2013b) visade under sitt seminarium upp en bild på en stor industrihall där det stod en mängd 3D skrivare uppradade i storleksordningen 3m höjd x 3m bredd x 5m djup. Fotografiet vilket tyvärr inte fick spridas kommer från Wohlers besök i den kinesiska staden Hefei i industriprovinsen Anhui. Maskinhallens ändamål, kapacitet samt övrig detaljinformation var ej tillgänglig med anledning av sekretess. De officiella personer Wohlers träffade under sitt besök i Hefei ska ha sagt sig vara övertygade om att AT teknik är framtiden för produktionsindustrin.

> *”3D skrivare har potentialen att revolutionera sättet vi tillverkar nästan allt”* (Barack Obama, USAs president (Jaglom, 2013, Rayna, 2013, Wohler, 2013))

Uttalandet ansågs vara något radikalt med tanke att uttalandet kommer från USAs president. Jaglom (2013) kommenterade uttalandet under ett seminarium under Inside 3D Printing Conference & Expo Singapore med *”Jag undrar vem som betalade honom för att säga det”.* Tankar finns att AT har potential att locka tillbaka viss tillverkningsindustri till väst från låglöneländer då det med AT teknik finns möjlighet att tillverka lokalt i mindre skala utan att vara en ekonomisk omöjlighet (Reichental, 2013).

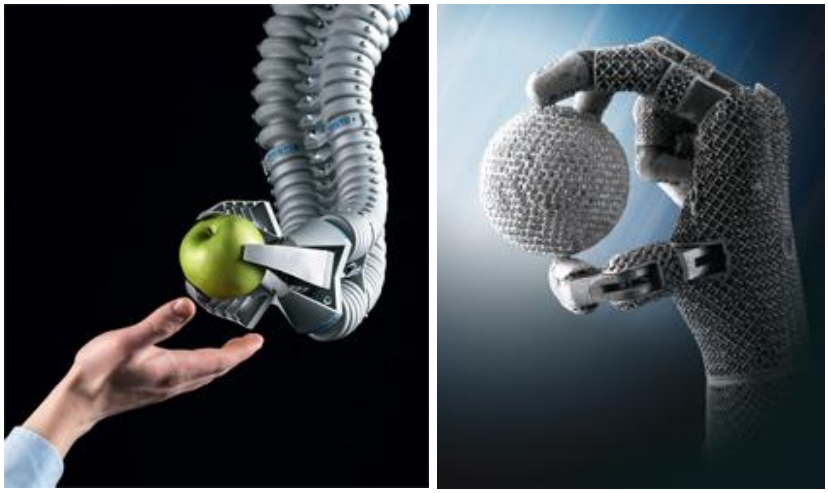
3.5.2 Visioner

Det finns gott om visioner och extrema uppslag inför framtiden som involverar AT tekniken. Verklighetsförankringen i dessa visioner är kraftigt varierande och att redogöra för eller spekulera kring dessa känns mindre relevant för denna rapport. Dock finns det domäner vilka författarna anser är intressanta ur ett ingenjörsperspektiv. I och med AT teknikens utveckling kan områden som topologioptimering och biomimetik börja implementeras i tillverkning vilket ger att fler branscher och teknikområden kan tillgodogöra sig dessa domäners fördelar.

Topologioptimering är en metod vilken via matematiska algoritmer beräknar optimal material deponering utifrån angivna förutsättningar. Metoden ger möjligheter till avancerade designoptimeringar gällande materialåtgång och viktreducering. Design som reformeras med topologioptimering kan ofta ta sig absurda former vilket tidigare varit svåra att tillverka med hjälp av traditionella tekniker (fig. 8) (Bendsøe och Sigmund, 2004 ; Hauge, 2013a, Vilbrandt, 2013; Wohlers, 2013b). Mjukvarusystem för topologioptimering kostar mellan 230,000 – 950,000 SEK (Wohlers, 2013a).

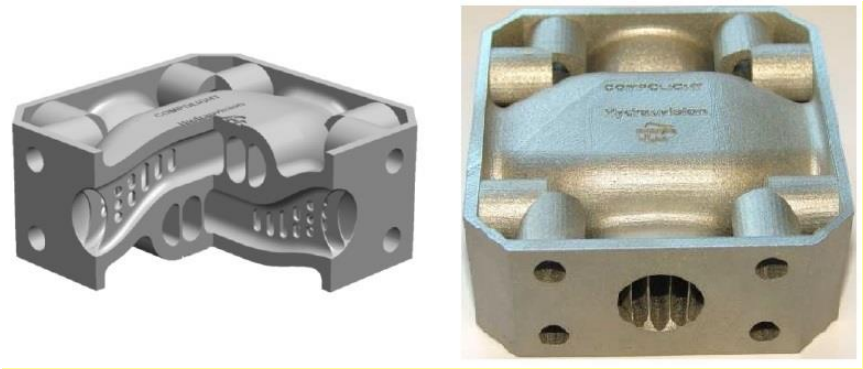
Figur 8. Topologioptimerad flygplanskomponent (Karlsen, 2013c).

Biomimetik är en vetenskaplig genre där naturens struktur och funktion studeras vilken sedan fungerar som modell och inspirationskälla för tekniska design och lösningar. Naturen presenterar ofta intressanta och funktionella lösningar vilka är resultatet av miljontals år av evolution. Som exempel; strukturen i en bikakas gitter är en struktur vilken kan användas som inre struktur hos AT tillverkade delar i syfte att reducera vikt utan att kompromissa med styrka (Bar-Cohen, 2011; Hauge, 2013a; Vilbrandt, 2013). Organiska former och intelligent komplexitet vilket nu är lättare att ta efter med AT teknik har visat sig vara fördelaktigt för bland annat robotutvecklingen (fig. 9) (Reichental, 2013).



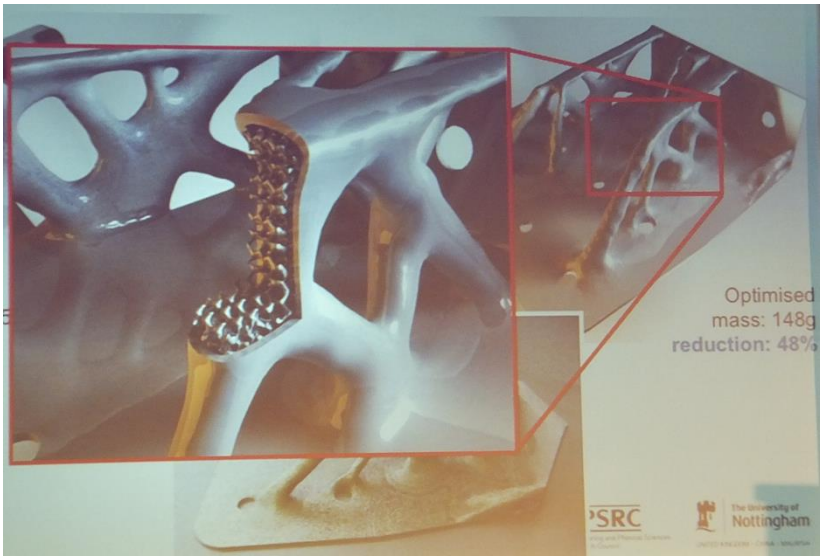
Figur 9. Robotarm (Festo AG & Co. KG, 2010) och (3ders.org, 2012).

Studier är pågående hur man kan implementera optimal design med AT som exempel flödesoptimering genom värmeväxlare, hydralikelement och i pumpar (fig. 10). Detta kan ske genom att designa komponenter utifrån målet att minska inre turbulens och friktion (Hauge, 2013a; Vilbrandt, 2013).



Figur 10. Hydralmanifold (Feenstra, 2012).

Vissa väljer att lägga ihop utveckling inom många områden så som Reichental (2013) 3D systems CEO. Han argumenterar att vi idag befinner oss i den mest intressanta tidsepoken i människans historia tack vare utvecklingen inom många olika vetenskapliga områden. Där många olika tekniker nu börjar sammanstråla och ge helt nya möjligheter för mänskligheten. Några av de områden som nämns är data, sensorer, robot, AI, biomedicin, nanoteknologi och genmanipulation.



Figur 11. Topologioptimerad regel med inre gitterstruktur (Karlsen, 2013d).

3.5.3 Forskning

Forskning och utveckling inom AT är bred och internationell. Det finns många fält där det forskas inom som exempel; biomedicin, ”utskriven” elektronik, mikroprodukter och inbyggda sensorer. Forskning sker även på material och då mycket på metallprocesser och kompositer. Det forskas på flera nya system vilka behärskar flera material, höghastighetssystem och infraröd sintring (Wohlers, 2013a). Det finns ett stort antal institut som ägnar sig åt forskning och utveckling av AT teknologin. Ett exempel som kan nämnas är att det vid Nottinghams Universitet forskas på metall extrudering, där de utvecklar ett munstycke som ska klara att extrudera metall (Hauge, 2013a). Vid intresse om forskning och utveckling inom området rekommenderas Wohlers Rapport, 2013.

3.6 Miljö

Gällande AT och miljöaspekten förekommer det missförstånd där framtidsvisioner ofta förekommer som argument gällande ATs gröna status (Park, 2013; Wohlers, 2013b). De verkliga exemplen som kan påvisa att AT tekniken är fördelaktiga för miljön är teoretiska livscykelanalyser gjorda på trafikflyg vilka kan visa på bränslebesparingar på grund av viktreduceringar hos AT tillverkade delar (Hauge, 2013a).

När miljöargumentet tas upp tillämpas det ofta på framtiden där visionen är att AT teknologin ska erfarit sådan spridning och utveckling att besitta kraften att minska behovet eller ersätta stora produktlager. Där önskad produkt eller reservdel skrivs ut enligt efterfrågan istället för att produceras i förväg i stora serier enligt uppskattad efterfrågan. Denna vision skulle undvika överproduktion där stora passiva värden blir liggande på lagerhyllor som möjligtvis aldrig kommer till användning. Att skriva ut enligt efterfrågan och på lokalnivå skulle ha möjlighet att öka tillgängligheten samt minska behovet för transporter vilket sparar transportkostnader och växthusgasutsläpp (Michiels, 2013a; Barnatt, 2013).

Att gentemot traditionell tillverkning minska materialåtgång vid tillverkning med hjälp av AT är en värdefull egenskap AT tekniken besitter. Dock kan AT tekniken inte jämföra sig med energiåtgången hos traditionell teknik. Plastdetaljer tillverkade enligt AT använder 10-50 gånger mer energi än formtillverkning. Metallutskrifter kräver cirka 100 gånger mer energi än metalldelar tillverkade enligt gjutning och CNC bearbetning (Wohlers, 2013a).

4 Teori

4.1 Teknologier

Det finns en mängd olika uttryck och förkortningar inom AT beroende på specifik teknik och material som används. Samma teknik kan gå under olika benämningar då en mängd företag myntat samt varumärkesskyddat eller patenterat olika uttryck och teknik. I princip betyder många uttryck exakt samma sak och fyller endast en förvillande funktion (Jaglom, 2013; Barnatt, 2013) . För denna rapport används standarden angivet i ASTM (Wohlers, 2013a).

Det finns olika tekniker att använda sig av för att distribuera och sammanfoga materiallagerna under utskrift. Material- och teknikval kommer att påverka faktorer så som kostnad, utskriftstid, upplösning, styrka, behov av efterbehandling, toleranser m.m (Gibson et al., 2010).

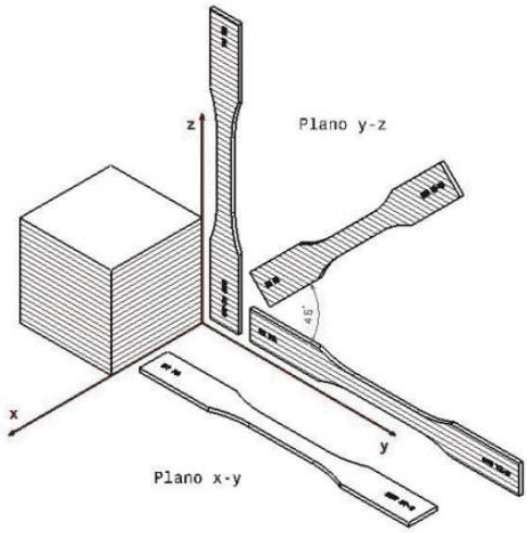
4.1.1 Extruderingsbaserad teknik

Extruderingsbaserad teknik kan inom AT branschen benämnas på många olika sätt i och med att olika tillverkare av AT maskiner på detta vis undviker varumärkesskydd och patent (Jagholm, 2013). I januari 2012 lanserade ASTM en terminologistandard för AT branschen där samlingsnamnet för tekniken som nedan ska beskrivas benämns materialextrudering (Wohlers, 2013a). I sin enkelhet fungerar tekniken enligt följande princip oberoende maskintillverkare. Ett extruderingsmunstycke är monterat i byggkammaren vilket mekaniskt flyttas med hjälp av axlar, kugghjul, drivremmar (olika tillverkare använder olika tekniska lösningar). Detta munstycke applicerar semiflytande material enligt aktuellt tvärsnittsdata. Byggplattformen sänks alternativt munstycket höjs och processen upprepar sig tills objektet är färdigutskrivet (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013a).

En enkel liknelse kan vara att betrakta tekniken som en radiostyrd limpistol eller en glasyrspruta för pepparkakor och tårtor. Den mest använda metoden för att uppnå den fasförändring som sker från applicering av flytande material till att det solidifierar i byggkammaren är temperaturskillnad. Fast material (oftast olika ABS plaster) matas in i extruderingsmunstycket vilket innehåller en uppvärmningskammare vilken smälter plasten. Väl introducerat i byggkammaren via munstycket övergår plasten till fastform i och med den lägre temperatur byggkammaren håller.

Parametrar så som bygghastighet, lagertjocklek, byggmönster, temperaturdifferens mellan munstycke och byggkammare påverkar alla slutresultatet. Ej optimerade inställningar kan

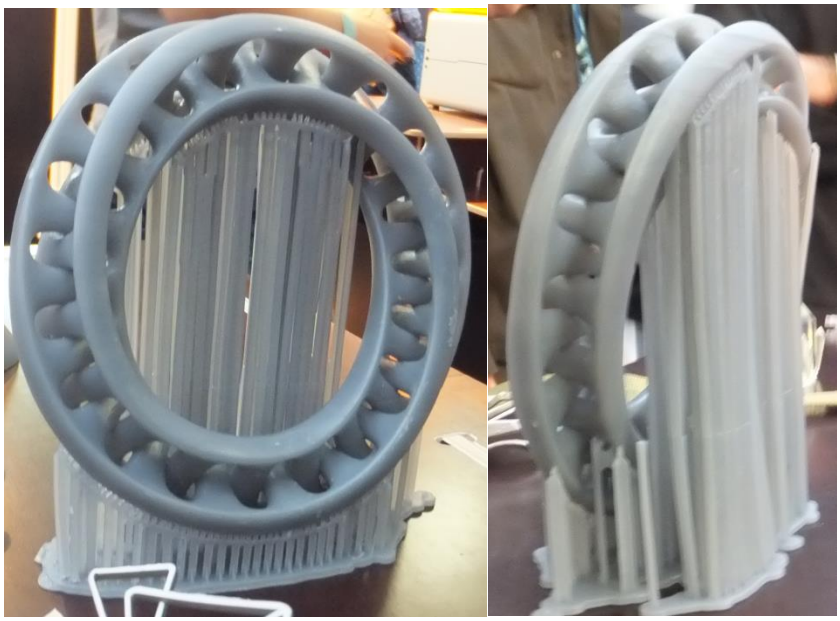
resultera i vridning, krympning, porösitet och allmänna lager defekter. Även om inställningar är korrekta kan designen som sådan orsaka utmaningar. Massiv struktur svalnar och solidifierar långsammare än tunn struktur vilket kan innebära att olika delar av utskriften beter sig på olika sätt under utskriften. Denna beteendeskillnad kan orsaka glapp och små hålrum vilket kan påverka lager-fusionen. Ett defekt lager kan vara tillräckligt för att kraftigt försämra det utskrivna objektets egenskaper (Gibson et. al., 2010). Generellt gäller också att styrkan är svagast i z led (fig. 12).



Figur 12. Exempel på tillverkningsorientering (Fernández et. al., 2013)

Med anledning av gravitation finns det begränsningar i vilka vinklar material kan appliceras. För att lösa problematiken med överhäng bör designorienteringen optimeras. Om överhäng eller orimliga vinklar ej går att undvika hanteras denna utmaning bäst genom att introducera stödstrukturer i designen, dessa stödstrukturer (fig. 13) avlägsnas under efterbehandlingen. Beroende på AT maskin kan stödstrukturen bestå av samma material som utskriften alternativt ett annat material vilket kan vara vattenlösligt i syfte att förenkla efterarbetet (Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013a). Maskinens/skrivarens upplösning är beroende på mekaniken så som axlar, kugghjul och även extruderingmunstyckets diameter. Generellt gäller att upplösningen och därmed möjligheten till detaljer är beroende av utrustningens prislapp. Den svaghet dessa system har är förväntad repeterbarhet i utskrifterna då det är svårt att exakt förutse hur det extruderade materialet kommer att bete sig (Gibson et. al., 2010).

Avancerad utrustning kan tillverka användbara slutprodukter vilka är i samma klass som formgjuten plast. I Stratasys AT system Fortus 900mc finns 32 delar vilka är tillverkade av en annan Fortus maskin (Jagholm, 2013; Jones, 2013). Prisspannet för lågprisskrivare vilka tillämpar materialextrudering ligger mellan 4,000 – 30,000SEK och industriella system mellan 70,000 – 3,500,000SEK (Wohlers, 2013a).



Figur 13. Objekt med överhäng och stödstrukturer, utskrivet med extruderingsteknik (Karlsen, 2013e).

4.1.2 Stereolithography

Stereolithography är en av de förstfödda teknikerna inom AT området och använder sig av vätskor med fotopolymeriska-egenskaper som byggmaterial. Dessa vätskor har egenskapen att de stelnar när de exponeras för UV-ljus. Den tekniska principen för AT maskiner som arbetar enligt fotopolymerisation metoden ska nedan beskrivas i sin enkelhet.

AT maskinen är försedd med en behållare innehållande byggmaterial i form av flytande fotopolymerisk vätska. Vätskebehållaren är försedd med en byggplattform som är flyttbar i höjdled, vid utskriftsstart befinner sig byggplattformen i ytskiktet av vätskebehållaren. En UV-ljuskälla som exempel; UV-projektor eller UV-laser exponerar selektivt byggbehållaren och fotopolymeriska-vätskans ytskikt enligt de former det första tvärsnittet utskriftsobjektet har. UV-ljus exponeringen gör att vätskan övergår till fast form, därefter sänks byggplattformen en aning. Beroende på skrivarmodell förs ett nytt vätskelager över det nu solida tvärsnittet via gravitation eller med hjälp av en mekanisk skrapa, varav ny UV-exponering enligt nästa tvärsnitt sker. Denna process upprepas lager efter lager, tills dess att objektet är färdigutskrivet. Därefter efterbehandlas objektet, vilket innebär att utskriften rengörs, sköljs och ofta ”bakas” i en UV-ugn (Gibson et al., 2010; Barnett, 2013; Lipson och Kurman, 2013; Wohlers, 2013a). Ytterligare ytbehandling kan vara aktuell beroende på använd polymervätska och objektets användningsområde (Barnett, 2013; Gibson et al., 2010).

Stereolithography principen har möjligheten att nyttja flera UV-källor vilka kan arbeta

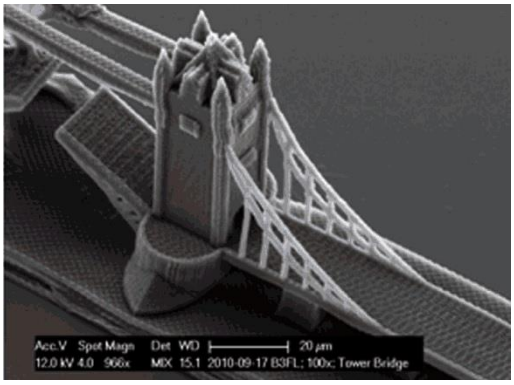
parallellt, detta ger möjlighet att reducera utskriftstiden. Något som är karaktäristiskt för Stereolithography är den höga upplösning som kan uppnås hos utskrifterna, maskiner med upplösning på 0,05mm i z-led (lagertjocklek) och 0,025mm precision i x och y-led finns på marknaden. Hög precision ihop med mycket god yt-finish på utskrivna objekt möjliggör utskrifter av objekt med mycket komplexa detaljer, struktur och geometri (Barnett, 2013; Gibson et. al., 2010; Wohlers, 2013b) Materialutvecklingen inom området går framåt och fler fotopolymer med olika egenskaper går att finna idag än bara för några år sedan. Generellt är objekt utskrivna i fotopolymerer mer sköra än andra plastmaterial som exempel extruderade ABS plaster (Wohlers, 2009). Värt att nämna är att de ångor den fotopolymeriska lösningen genererar kan vara av toxisk natur (Lipson och Kurman, 2013). Industriella system ligger mellan 60,000 – 5,500,000 SEK (Wohlers, 2013a).

4.1.3 Tvåfotoninducerad fotopolymerisation

En AT teknik som vars princip är liknande den ”Stereolithography” är ” Tvåfotoninducerad fotopolymerisation” hädanefter benämnd 2PP efter det den engelska benämningen ”two photon induced photopolymerization”. Denna process använder sig precis som stereolithography av material med fotopolymeriska egenskaper. Fotopolymer-lösningen innehåller speciella molekyler som när dessa träffas av minst 2 fotoner samtidigt reagerar med sin omgivning och solidifierar (Barnatt, 2013; Cicha et al., 2011a). Fotonkoncentrationen är endast tillräckligt hög i närheten av fokuspunkten på lasern för att ge förutsättningarna att en ”initiator-molekyl” ska träffas av två fotoner samtidigt och därmed reagera med omgivningen. Detta innebär i praktiken att utskrifterna ges möjlighet till mycket hög upplösning, långt skarpare än det vi med blotta ögat kan uppfatta och närmar sig skalan nanoteknologi.

I experiment på Vienna University of Technology har man skrivit ut komplexa mikrostrukturer (fig. 14) med bland annat överhäng utan användande av stödstruktur med karaktäristik på 700 nanometer (Cicha et al., 2011a). Uppgift på upplösningar ner till 100-200 nanometrar (0,0001-0,0002mm) finns (Barnett, 2013). AT teknik som använder sig av 2PP har en spännande potential i framtiden med tänkbara applikationer inom mikromekanik, optiska datorer, optisk-informationslagring, biomedicin, digitalteknik på nano-nivå m.m (Cicha et al., 2011a).

2PP teknologin är ett föremål för forskning samt under utveckling och är idag inte en tillverkningsmetod som används inom något industriområde i kommersiellt syfte (Vaezi et al., 2013). En faktor som kraftigt begränsar tekniken är den mycket långsamma utskriftsprocessen (Cicha et al., 2011a; Vaezi et al., 2013).



Figur 14. Komplex 3D struktur (Cicha et. al., 2011b)

4.1.4 Pulverbädds-principen

De AT maskiner som arbetar enligt pulverbädds-principen är de system som anses som mest seriösa ur ett industriellt perspektiv för metallutskrift. Pulverbädds-principen har möjlighet att tillverka metallkomponenter med hög materialdensitet vilka besitter materialegenskaper motsvarande delar tillverkade på konventionellt vis. Detta gör att tekniken med fördel kan användas för att tillverka slutprodukter i metall. Material som är aktuella för pulverbädds-principen är olika plaster, keramik och en mängd olika metallegeringar (Hauge, 2013a; Gibson et. al., 2013; Park, 2013; Wohlers, 2013b).

Den största skillnaden hos de olika tekniker som bygger på pulverbädds-principen är typ av värmekälla vilken används för att smälta ihop byggmaterialet med. Skillnader som exempel hur materialet introduceras till byggkammaren, övervakning av utskriftsprocessen, materialvidd m.m. skiljer sig åt beroende på tillverkare och maskin serie. AT maskiner vilka tillämpar pulverbädds-principen arbetar i sin enkelhet enligt följande. En mekanisk skrapa eller roller sprider ut byggmaterial i pulverform över hela byggplattformen vilken befinner sig i en byggkammare. Atmosfären i byggkammaren är noggrant kontrollerad med hjälp av vakuum eller tillförd inert gas i syfte att utskriften eller byggmaterialet inte ska reagera med luftens syre vilket kan försämra materialets egenskaper. Temperaturen i byggkamaren hålls strax under byggmaterialets smältpunkt då det reducerar kraven på den kraft värmekällan måste introducera för att smälta ihop pulvret. Inre spänningar samt risk för deformation och vridningar minskar även då temperaturen hålls nära smältpunkten. Värmekällan (laser eller elektronstråle) sveper över pulverytan och selektivt smälter materialet enligt aktuellt tvärsnitt. Därefter sänks byggplattformen, ett nytt material lager appliceras, tvärsnittet smälts enligt ritning, omliggande pulver ligger kvar i byggkammaren och fungerar som stöd för nästa material lager. Processen upprepar sig tills dess att utskriften är klar. Utskriften tillåts svalna varefter den rengörs och är redo för efterbehandling så som att avlägsna eventuella stödstrukturer samt förbättra ytfinishen om önskat. Oanvänt pulver som blivit introducerat till byggkammaren under utskrift kan till stor del återanvändas (Gibson et.al., 2010; Snis, 2013; Wohlers, 2013a).

De AT maskiner som är anpassade för tillverkning av slutprodukt i metall är avancerad utrustning och är till viss del känsliga för sin yttre miljö. Optimala parameterinställningar är mycket viktigt för att nå ett gott resultat hos utskriften. Några exempel på parametrar vilka påverkar byggprocessen; laserintensitet, laserfokus, pulslängd, frekvens, pulverbäddens temperatur, lagertjocklek, materialegenskaper, partikelform hos materialet, värmeabsorberingsegenskaper hos materialet. Även om alla parametrar är individuella påverkar olika parametrar varandra och i olika hög grad. För att nå bästa resultat är det klokt med provutskrifter när en ny design ska skrivas ut eller ny material batch används. Dessa provutskrifter bör analyseras och utöver djup förståelse av alla parameterinställningar är det gynnsamt med kunskap i fysik, mekanik och termodynamik (Gibson et. al., 2010). För att minska inre spänningar i utskriften kan "smältsvep" och smältmönster optimeras för aktuell utskrift. Pulverbäddssystem är generellt dyra system framför allt gällande system vilka behärskar metallutskrifter där prisnivå ligger från 1,100,000 – 14,000,000 SEK (Wohlers, 2013a).

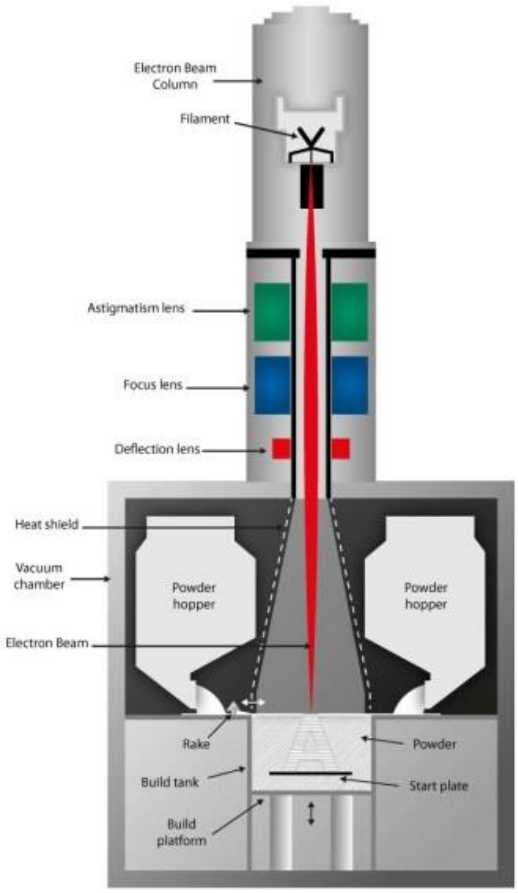
4.1.4.1 Laser

Det finns en mängd tekniker vilka går under olika benämningar beroende på maskintillverkare och tillämpbara material, som exempel; Lasersintring, selektiv lasersintring, selektiv lasersmältning, direkt metall-lasersmältning (Wohlers, 2013a). Gemensam nämnare är att de arbetar enligt pulverbädds-principen där en laser representerar värmekällan vilken smälter samman eller delvis smälter samman pulvermaterialet. Laserstrålen kontrolleras av system uppbyggda av speglar och linser vilka styrs av finmekanik (Gibson et. al., 2010).

Material som kan användas i olika varianter av laserbaserade system är som exempel; plast, nylon, metall, keramik, sand och vax. I vissa system finns potential att kombinera olika material vid utskrifter, detta gör det möjligt att använda två material med olika smältpunkt där bara ett av materialet smälts och binder samman objektet. Detta görs bland annat för att framställa delar i materialet som kallas "alumide" vilket är en blandning av plast och aluminium (Barnatt, 2013). System vilka använder laser som värmekälla ger generellt en bättre ytfinish jämfört med system vilka tillämpar elektronstrålar för att smälta samman materialet (Wohlers, 2013a).

4.1.4.2 Electron beam melting

Electron beam melting i fortsättningen benämnt EBM är en AT teknik utvecklad ihop med Chalmers och lanserades på marknaden 1997 av företaget Arcam. Tekniken använder sig av en elektronstråle som värmekälla vilken smälter ihop byggmaterial med elektriskt ledande egenskaper till en slutprodukt med 100 % material densitet (fig. 15). EBM arbetar med material i pulverform enligt pulverbädds-principen, vilket innebär att utskriftsobjektet byggs upp i tunna lager i en pulverbädd (Barnatt, 2013; Snis, 2013; Wohlers, 2013a).



Figur 15. Schematisk EBM princip (Arcam, 2013b).

Vid utskrift sveper elektronstrålen först över pulverbädden i syfte att värma upp byggarean till optimal utskriftstemperatur, förvärmningen syftar till att minimera inre materialspänningar i objektet och risk för vridning under utskriftsprocessen. Därefter skrivs de yttre konturerna i tvärsnittet ut, efter att de yttre konturerna är fixerade smälter elektronstrålen ihop strukturen innanför de yttre plottade konturerna. Processen upprepar sig efter ett nytt pulverlager har applicerats. I syfte att uppnå en utskrift med så goda materialegenskaper som möjligt sker utskriften i en kontrollerad vakuummiljö. Alternativ är att introducera helium till byggkammaren för att underlätta värmeöverföring (Wohlers, 2009).

EBM är en avancerad teknik som använder sig av elektromagnetisk böjning (spolar styr elektronstrålen) för att dirigera elektronstrålen över pulverbädden. Istället för mekanisk styrning som exempel selektiv lasersmältning använder där lasern styrs av speglar och linser vilka är kontrollerade av mekanik så som kugghjul och axlar. I och med att värmekällans fokus styrs av elektromagnetisk böjning istället för mekanik möjliggör detta en 5-6 gånger högre utskriftshastighet jämfört med vanliga laserbaserade tekniker (Wohlers, 2013a). Ytterligare en funktion som EBM besitter vilket tillåter den höga utskriftshastigheten är möjligheten att variera elektronstrålens brännpunkt mellan 0,1mm och 1mm, jämfört med många lasertekniker som har fast brännpunkt. Denna funktion lämpar sig då smältfokuset kan

anpassas efter vart i utskriften processen befinner sig i, lämpligtvis smalare när detaljerade konturer ska skrivas och bredare när stora grova ytor ska smältas ihop (Vayre et al, 2012). De senare modellerna av Arcams skrivare besitter en funktion vilken är kallad MultiBeam vilket ger förmågan att splittra elektronstrålen i flera mindre strålar(1-100), vilket möjliggör snabbare utskrift och bättre ytstruktur (Arcam, 2013; Wohlers, 2009).

I syfte att garantera hög precision och kvalitet hos utskriften loggas information från utskriftsjobbet som operatören i efterhand kan granska för att detektera eventuella avvikelser mellan ritning och utskrivet objekt (Wohlers, 2009). Krympning av utskriftsobjektet kan förekomma då stora mängder energi absorberas av utskriften i fråga (Vayre et al, 2012). Vid komplicerade utskrifter så som objekt med överhäng behövs stödstrukturer läggas till för att inte delar av utskriften förvrängs eller snedvrids (Wohlers, 2013a).

EBM tekniken är en avancerad AT metod vilken kan leverera komplexa delar med avancerad geometrisk struktur, hög upplösning (0,1mm) (Arcam, 2013; Barnatt, 2013). Slutprodukten ställer inga större krav på efterbearbetning och besitter materialegenskaper i klass med CNC-bearbetade delar (Vayre et al, 2012).

4.1.5 Direkt metalldeponering

Direkt metalldeponering hädanefter benämnd DMD är en teknik vilken använder laser eller plasmasvets som värmekälla och metallpulver som material. Metallpulver tillförs via munstycken till smältfokuset genererat av värmekällan vilket möjliggör uppbyggnad av lager. Möjlighet finns att skifta metallpulver under pågående utskrift, vilket tillåter uppbyggnad av delar bestående av flera olika material. Tekniken används för att restaurera metallkomponenter inom industrin som exempel skadade axlar (Vayre et. al, 2012).

Värmefokuset är justerbart vilket tillåter snabbare materialuppbyggnad i stora områden samt smalare fokus för områden där detaljrikedom är av vikt. DMD tekniken skiljer sig från andra additiva metall tillverknings tekniker då skrivarhuvudet är monterat på en industriellrobot (Wohlers, 2013a). Det råder delade meningar huruvida denna teknik ens bör klassificeras som en AT teknik (Gibson, 2013; Michiels, 2013b). Tekniken är kostsam och används mest för reparation av dyra industrikomponenter (Park, 2013). Prisbild för ett DMD system 2,400,000 – 10,000,000 SEK (Wohlers, 2013a).

4.1.6 Laminerad objekttillverkning

Laminerad objekttillverkning (Hädanefter LOM efter engelskans Laminated Object Manufacturing) är en AT teknologi där materialark läggs ihop i lager för att forma objekt. Processen sammanfogar materialark för att sedan skära ut formen på objektet eller så skärs materialarken ut enligt designen för att sedan sammanfogas. Det som skiljer processen där materialarken sammanfogas och sedan skärs ut med CNC är att varje lager skärs ut separat (Gibson et al., 2010).

Det finns ett flertal olika sammanfogningstekniker inom LOM som innefattar lim eller klister, termisk bindning, mekanisk fastspänning och ultraljudsvetsning. Det finns dessutom ett antal material som kan användas inom LOM så som papper, plast, keramik, kommpositmaterial eller metall (Gibson et al., 2010). Kommersiellt används främst material utav papper men även aluminium, koppar, stål rostfritt och metallkombinationer (Wohlers, 2013a).

Processen kan skära ut arken på flera olika sätt med både laser och mekanisk kniv samt i kombination med CNC. Då materialarken sammanfogas först och sedan skärs ut så krävs mycket precision vid utskärningen då inte underläggande material får skäras i. Vid utskärning först och sedan sammanfogning krävs det mycket precision vid placeringen utav arket som skurits ut (Gibson et al., 2010).

En fördel och även nackdel med LOM är att processen får en stödstruktur utav arkets omläggande material. Denna stödstruktur skärs oftast upp i kuber för att lättare kunna avlägsnas vid efterbehandlingen. Fördelen är att det alltid finns en stödstruktur som möjliggör överhäng och komplicerade geometrisk figurer och nackdelen är att inre strukturer eller kanaler kan vara mycket svårt eller omöjligt då det inte går att få bort stödstrukturerna. En annan nackdel är efterarbetet med att ta bort stödstrukturen kan vara arbetsam och ge sämre precision, samt att det ofta blir mycket materialspill i processen (Gibson et al., 2010).

4.2 Scanners

3d scanners används för att generera en digital bild utav ett verkligt objekt. Det finns flera olika typer av scanners, däribland siluettavläsning (silhouette digitilizers), tidsmätande avläsning (time-of-flight (TOF)), projekterad mönsteravläsning (projectedpattern scanners), stereoskopisk avläsning (stereoscopic degitalizer) och CT scanners (computed tomography) (Wohlers, 2009). Samtliga typer av scanners har olika för- och nackdelar men gemensamt för de flesta 3D scanners är att de samlar in en stor mängd av data i form av punkter som representerar föremålets form, dessa data kallas för punkt moln (point cloud) (Sevens, 2013).

Det finns problematik med scanners, det kan vara svårt att avläsa hela objektet när det finns djupa fickor, konkava ytor, ihåligheter, hål och djupa spår i objektet. Det kan också förekomma problem om objektet har mörka ytor, skarpa kanter, reflekterande ytor eller blankpolerade ytor. Detta kan leda till förvrängd data eller att data fattas i form av hål i representationen (Wohlers, 2009).

Punktmolnet omvandlas till en ytmodell (service mech eller mech model) som måste bearbetas med algoritmer alternativt manuellt för att undvika missad data eller andra felläsningar. För att sedan kunna skriva ut denna modell med en AT maskin måste modellen omvandlas till en solid modell. Denna modell måste sedan i sin tur omvandlas för att kunna skrivas ut till en representation av de lager som ska skrivas ut. Detta betyder att det finns flera kritiska mjukvaror som måste användas för att 3d scanners ska kunna användas (Sevens, 2013).

Ett flertal har yttrat däribland MacCormack (2013) och Pettis (2013) att 3D scanners är ett användbart hjälpmedel främst då CAD många gånger är komplicerat att använda. Tuck (2013) anser att både CAD mjukvara och 3D scanners idag är underutvecklat.

4.2.1 Omvänd ingenjörskonst

Reverse engineering, svensk översättning omvänd ingenjörskonst (Reverse engineering, 2013) är ett område som kan dra nytta av utvecklingen inom AT teknik och 3D scanners. Omvänd ingenjörskonst är en process vilken syftar till återskapandet av ett objekt genom att studera och analysera originalobjektet i den grad att en kopia kan skapas utifrån insamlad information. Som exempel kan äldre reservdelar vilka är betraktade som utgångna vara tacksamma föremål för omvänd ingenjörskonst (Wang, 2010).

Fallstudie finns där Amerikanska ubåtsflottan tog hjälp av just omvänd ingenjörskonst ihop med AT för att snabbt, enkelt och prisvärt återskapa en vakuumkompressortopp (Exone, 2013). Att med hjälp av en 3D scanner "scanna" av ett föremål vilket direkt kan genereras som en datormodell kan i vissa fall innebära fördelar jämfört med traditionella mätmetoder, speciellt om det rör sig om ett objekt med otacksamma och svårmätta former (Sevens, 2013). Att därefter använda datormodellen som underlag för tillverkning av gjutmall eller direkt tillverkning med AT kan under vissa förutsättningar vara fördelaktigt.

4.3 Mjukvara

För att kunna skriva ut en 3D produkt från en 3D-skrivare måste först produkten designas som en 3D modell i en mjukvara, oftast används en CAD (Computer-aided design) mjukvara. Det går även att använda ett färdigt föremål som avläses med scanners för att göra en 3d modell av föremålet som ska skrivas ut, som nämns ovan (Barnatt, 2013).

Det finns två huvudkategorier av CAD mjukvara, "solid modeling" och "surface modeling", där solid modeling används av ingenjörer och industriella designers och surface modeling används till animerad film, datorspel och grafik. Solid modeling utvecklades för industriell design och tillverkningsindustrin och är ett effektivt verktyg med inbyggda bibliotek med färdiga standardobjekt som kan kombineras och modifieras. Surface modeling utvecklades till animatörer och illustratörer och är en teknologi där objekt ytor omsluts av av ett nät av polygoner som kan fyllas av detaljer. De flesta CAD program kan använda båda teknikerna och det går ganska lätt att konvertera en solid model till en surface model men det är svårt idag att konvertera en surface model till en solid model (Lipson och Kurman, 2013).

Nästan alla 3d skrivare använder en stl fil (vilket kommer från STereoLithography) som indata, stl filen är en representation av CAD objektets yttre ytor. Stl filen kan vara beskriven i ASCII eller binärt, ASCII används oftast bara för att visa uppbyggnaden i lärande syfte. Invärderna till AT systemet är en lista utav trianglar som representerar objektets yttre sidor. Information från CAD programmet om färg, material, skala, eller olika skikt samt punkter och linjer som inte tillhör objektets utsidor ignoreras vid skapandet av stl filen. Detta gör att operatören av AT systemet måste vara införstådd i vad stl filen representerar och själv mata

in övrig data (Gison et al., 2010).

Varje triangel i listan av trianglar är beskriven av en normal vektor och de tre pukter vilka motsvarar hörnerna på triangeln. Normalvektorn som används är en linje vilken är vinkelrätt till triangeln och har längden 1. Den angivna normalvektorn används som referens för att veta vilken sida utav triangeln som är utsidan.

Skalan på objektet, längden på normalvektorn bestäms och kan vara vilken måttstorlek som helst så som mm och tum. Som nämnts ovan ingår inte skalan i stl filen och operatören av AT systemet måste veta skalan, mindre skala ger högre upplösning men större stl fil. Det är viktigt att notera att skalan inte behöver vara mindre än den möjliga upplöningen för AT systemet. För liten skala kan leda till trianglar saknar area efter numerisk trunkering där alla punkter i triangeln har samma läge eller att triangeln saknar höjd och blir en linje.

För att kunna skriva ut stl filen i en skrivare krävs bearbetning utav stl filen, den måste delas upp i lager som ska skrivs ut. Varje plan beskrivs med en x och y axel där z ökas för att få de olika planen. En algoritm i AT systemet så som den Vatani et al. (2009) har utarbetat används. Hur varje plan skrivs ut är beroende på 3d skrivarens teknik (Barnatt, 2013).

Det finns kritik riktad mot den äldre metoden där stl-filer används även om detta är standard inom branschen idag (Gibson et al. 2010, Hauge, 2013a). Det finns andra metoder som kan användas så som bitmaps (Tuck, 2013). ASTM har även utarbetat en ny standardmetod additive manufacturing file (AMF) (ASTM, 2013b).

Enligt Sevens (2013) är det relativt dyrt med CAD mjukvara även om det finns enklare gratis program där design är mer användarvänlig. Sevens (2013) nämner även att det finns många mjukvaror för konvertering utav CAD filer till stl-filer.

5 Resultat

Intervju med Terry Wohlers:.

- Det finns begränsningar vad som går att göra med dagens teknologi
- Kostnaderna skulle vara mycket stora vid reservdelsproduktion idag.
- Material för 3D utskrift är dyrt.
- Tekniskt möjligt men ej ekonomiskt.
- Utveckling för delar i metall kräver hög expertis.
- AT delar i plast är starka och visar på goda egenskaper nära i klass med formgjutning.
- AT är generellt försvarbart vid specialtillverkning och/eller vid mycket låg tillverkningsvolym.

Terry Wohlers (Principal Consultant and Presedent, Wohlers Associates, Inc) intervjuad av författarna den 2 oktober 2013.

Intervju med Ian Gibson:

- Pulverbädds-principen är den teknik som idag är den enda lämpliga för metallutskrift av industriella komponenter.
- Idag finns inte tillräckligt utvecklade standarder för AT processer och material.
- Vibrationer kan påverka AT systems prestanda framför allt system vilka fungerar enligt pulverbädds-principen.
- De tekniska utmaningarna samt kostnaderna ökar kraftigt vid ökad byggvolym hos metall AT system.

Ian Gibson (Assosiate Professor, Engineering Design and Innovation Centre, National Univerity of Singapore) intervjuad av författarna den 1 oktober 2013.

Intervju med Rachel Park

- Enklare delar i plast utan komplex geometri ställer inte höga krav på designer, designmjukvara och hårdvara(AT maskin).
- Design och utskrift av komplexstruktur, överhäng, interna kylkanaler ställer höga krav på designer, CAD mjukvara och hårdvara(AT maskin).
- Tillverkning av metall delar med hjälp av AT är betydligt mer komplicerat jämfört med plast.
- Direkttillverkning av funktionell slutprodukt med hjälp av AT är idag begränsat till komplicerade unika produkter/komponenter med högt värde.

Rachel Park (Editor in Chief, 3D Printing industry) intervjuad av författarna 2 oktober 2013.

Intervju med Wim Michiels:

- Enklare delar utan komplex geometri kan en novis lätt designa.
- Tillverkning av metalldelar med AT kräver expertis inom CAD mjukvara och god förståelse för AT processen och hårdvaran(AT maskin).
- Fördel att expertis kan finnas på distans.
- Teknik för AT tillverkning av industriella komponenter finns men är dock inte utbrett.

Wim Michiels (CEO, Materialise Malaysia and Executive Vice President, Materialise NV) intervjuad av författarna den 2 oktober 2013.

Intervju med Anders Snis

- De som tillverkar AT system kan uppleva problematik med andra systemtillverkares patent vid utveckling men dessa går oftast att arbeta runt.
- Utbildning för att operera ett AT system är enkel och kort.
- Designers, konstruktörer och utvecklare inom metall AT kräver expertis.
- Metall AT är idag ett smalt nischat område vilket riktar sig till specialtillverkning.

Anders Snis (Team leader simulation, process and software development, Arcam) intervjuad av författarna den 25 november 2013.

6 Diskussion

6.1 Relevant teknik ombord

Som berört i bakgrund och teorikapitel finns olika AT system vilka behärskar olika typer av material. De material som anses mest intressanta för denna rapports resonemang är metall samt plast. Gällande AT vilken klarar att hantera metall har fyra olika tekniker redogjorts för i teorikapitlet; materialextrudering, direkt metalldeponering, laminerad objekttillverkning och pulverbädd.

Extruderingsbaserade system vilka kan behandla metall på en seriös nivå ligger i dagsläget på forskningsstadiet och kommer inte nå marknaden innan många svårigheter övervunnits. De system som finns på marknaden idag vilka fungerar enligt extruderingsprincipen och argumenterar att metall finns i deras materialarsenal syftar på kemisk två-komponents metalliknande plastic padding.

DMD system används främst till rekonditionering av skadade metallkomponenter eller tillverkning av metalldelar med högt värde som exempel består av olika metallegeringar då det är möjligt att under utskriften introducera flera olika metallpulver. DMD besitter fördelar gällande stor byggvolym, tekniken är samtidigt dyr, avancerad och kräver stort utrymme. LOM är en relativ ny process inom metall AT och är ingen beprövad industriell tillverkningsprincip, dessutom genererar LOM stora mängder materialspill.

Pulverbädds-principen är den som av många anses som den mest pragmatiska principen gällande tillverkning av metalldelar för industriellt bruk. Denna teknik presterar i dagsläget bra i kategorier som; materialtäthet, upplösning, toleranser och repeterbarhet.

I plastkategorin finner vi stereolithography, pulverbädd och extruderingsbaserad teknik. Stereolithography vilken påstås vara den första AT tekniken har styrkor i utskriftshastighet, fin ytkvalitet och hög upplösning, sammantaget är denna teknik att betrakta som bäst gällande precision. Dock kan det med denna teknik föreligga ett behov för extra utrustning gällande efterbehandlingen som sker i UV-kammare/ugn. Delar tillverkade enligt denna teknik kan besitta viss skörhet och nedbrytning vid exponering för solljus.

Utskrifter i plast enligt pulverbädds principen har som främsta karaktärsgrad att tillåta synnerligen komplex geometri då stödstrukturer inte behöver solidifieras i utskriften då underliggande pulver fyller denna funktion. Utan solida stödstrukturer underlättas efterarbetet då dessa ej behöver avlägsnas från utskriften. Observera att detta endast gäller plast, metallutskrifter i pulverbädd har ett behov av fasta stödstrukturer då metall har en tendens till att vrida sig om inte ankare och fasta stödstukturer inkluderas.

Material extrudering kan hantera en mängd olika plastmaterial samt gummiliknande material. Tekniken arbetar inte med UV-källor eller lasrar för att sammanfoga lager vilket enligt uppgift är mer känslig utrustning samt dyrare jämfört med material extrudering.

Insamlad information från litteraturstudien samt material från intervjuer pekar mot att materialextrudering är den lämpligaste tekniken för ombord bruk. Industriella extruderingssystem är generellt uppbyggda av enklare teknik jämfört med stereolithography och pulverbädd vilket ger ett robustare och mer tillförlitligt system. Materialutbudet är rikt samt att systemen allmänt är billigare i jämförelse med de andra teknikerna. Varför författarna valt att närmare analysera material extruderings teknik gällande plast utskrifter. Gällande metallutskrifter pekar indikatorerna tydligt mot pulverbädds teknik som lämpligt val.

6.2 Kan ATs fördelar tillgodogöras ombord gällande tillverkning av reservdelar och verktyg

Litteratur, föreläsare och intervjuobjekt argumenterar att AT i många tillverkningssituationer kan ge fördelar i förhållande till traditionell tillverkning under förutsättningar som låg tillverkningsvolym, komplex geometri och specialanpassad tillverkning. Författarna anser att låg tillverkningsvolym och specialanpassad tillverkning är synonymt då specialanpassad tillverkning oftast innebär tillverkning av unika objekt i liten skala. Vilket ger fördelarna låg tillverkningsvolym och komplex geometri.

Delar till förbränningsmotorer, pumpar, ventiler, kompressorer, hydralik för att nämna några komponenter som förekommer ombord på fartyg baseras ofta på gammal teknologi som idag tillverkas enligt traditionella tekniker och är inte beroende av den komplexa geometrin som AT erbjuder. Gällande låg tillverkningsvolym är det enkelt att förstå att AT tekniken kan skänka fördelar åt rymdindustrin och Formula 1 stall (nämnt i kapitlet praktiska tillämpningar) då det som exempel bara finns en ISS station och färre Formula 1 bilar än fartyg i världshandelsflottan. Mycket av den utrustningen som finns ombord återfinns också i industrier runt om i världen vilket innebär att tillverkning av avgasventiler och skruvmejslar ej sker i låg volym. Ett tänkbart argument är att ett AT-system ombord kan öka tillgängligheten på reservdelar ombord då möjligheten finns att tillverka enligt efterfrågan istället för att vara beroende av ombord leveranser i besökta hamnar.

6.3 Ombord tillverkning av metalldelar

Trots de utmaningar och begränsningar som är förknippade med AT tekniken finns möjlighet

att med rätt utrustning och förutsättningar tillverka delar jämförbara med delar tillverkade enligt traditionella metoder, som går att utläsa i teori- och resultatkapitlet. Vilket ger att det teoretiskt sett finns alla möjligheter att ombord tillverka metallkomponenter enligt efterfrågan. Ur ett praktiskt perspektiv föreligger en del hinder.

De flesta utskrivna metalldelar är beroende av någon form av efterbehandling som exempel att avlägsna stödstrukturer samt förbättra ytfinishen. Att uppnå en ytfinish vilken är god nog för som exempel ett avgasventilsäte krävs mekanisk efterbehandling med precision. Byggvolymen hos metallsystem är generellt relativt blygsam vilket begränsar storleken på tillverkade delar. Ombordmiljö anses inte som den bästa miljön för AT system speciellt i avseende på vibrationer som har stor potential att påverka utskriftens resultat vilket resultatkapitlet visar. I ett objekt som är uppbyggt av hundratals lager kan det räcka med att ett av dessa lager är defekt för att hela objektet inte längre uppfyller ställda förväntningar. Hur känslig utrustning så som lasrar och fin-mekanik vilken styr speglar och linser påverkas av vibrationer är oklart men en risk för minskad precision hos utrustningen är inte otänkbart.

Existerande ritningar till reservdelar är allmänt inte anpassade till AT förutsättningar så som tillverkningsparametrar, stödstrukturer, objektorientering. En revidering av ritningar är en gedigen arbetsinsatts vilken även kräver expertis. Frågan är om det finns incitament överhuvudtaget till att AT tillverka reservdelar i metall då delar tillverkas alldeles utmärkt idag avseende på repeterbarhet, jämn kvalitet, erkända standarder, beprövade och tillförlitliga tillverkningsmetoder. En annan aspekt är klasskrav och garantier vilket utgör en utmaning då det idag finns brister gällande erkända standards för processer och material för AT, vilket trend- och resultatkapitlet visar.

Även om ovan nämnda problem vore behandlade föreligger fortfarande den höga kostnaden som AT tekniken innebär vilket kan utläsas i trend- och resultatkapitlet. Erbjudandet att använda dyr avancerad utrustning vilken till viss del kräver expertis i syfte att tillverka piratdelar vilka troligen blir dyrare än originaldelar i en miljö som inte är lämplig för AT torde locka få.

Att använda metall-AT system för tillverkning av metalldelar i allmänhet eller basala verktyg kan betraktas som en enklare utmaning än tillverkning av reservdelar. Aspekter som efterbehandling, materialstandard, förväntad gång tid, klassning behöver då inte tas hänsyn till i samma grad. CAD expertis kan med lätthet erhållas på distans om internetuppkoppling finns tillgänglig ombord, som resultatet pekar på. Operatörsutbildning hos AT system tillverkaren brukar ingå vid köp av en maskin i miljonklassen.

Angående metall-AT system ombord anser författarna att utmaningarna är många, fördelarna få och priset högt. Finns en önskan om att öka möjligheterna för tillverkning av metalldelar ombord får traditionella verkstadsmaskiner för metallbearbetning anses som en klokare investering.

6.4 Ombord tillverkning av plastdelar.

Användningsområdet ombord för ett plast AT system bör anses som större än ett system för metallutskrifter. Detta bland annat med anledning av de svårigheterna som finns gällande tillverkning av reservdelar i metall via AT samt de höga kostnaderna i allmänhet.
Ofta saknas också utrustning för tillverkning av plastdelar ombord medan verktyg för metallarbete så som vinkelslip, svets, svarv många gånger finns i verkstaden. Ur detta perspektiv breddar ett plast system möjligheterna i verkstaden mer än ett metall system i och med möjligheten att tillverka i ett ”nytt” material. Generellt går det att argumentera att kraven är mindre ställda på plastdelar än metalldelar varför brister i standarder inte är ett lika stort problem för plast.

Rätt utskriftsparametrar är viktigt för utskriftsresultatet hos alla AT system dock är dessa mer lätthanterliga hos plastsystem än för metall, vilket går att utläsa i teorikapitlet. Att designa ett objekt anpassat för AT utskrift kräver kunskap i designmjukvara. Men då förväntningar på plastdelar ofta är mindre än på metalldelar kan det argumenteras att det inte krävs samma expertis hos en designer av plastdelar till toaletter jämfört med turbinblad i kobolt kromlegering. Möjlighet finns att helt undvika design och CAD problematiken med att införskaffa ett digitalt ritningsbibliotek innehållande färdiga objekt som exempel; kabelklipps, hållare, eldosor. I dagsläget är dock införskaffandet av en AT maskin svårmotiverat ur praktiska och ekonomiska perspektiv. Värt är att hålla sig uppdaterad i ämnet då den tekniska och administrativa utvecklingen går framåt samt priser sjunker. I och med framgångar i prestanda, allmän acceptans, standarder, användarvänlighet och prisutveckling är det inte otänkbart att i framtiden fördelarna överträffar nackdelarna.

6.5 Övrigt

Att shipping kan dra nytta utav AT teknik och dess utveckling indirekt bör betraktas som troligt då tillverkare av industriell utrustning har ytterligare ett verktyg i sin arsenal för jakten efter bättre och billigare produkter. Precis som utvecklingen inom halvledarteknik tillåtit prisvärd utrustning för frekvensstyrning av elmotorer vilket kan erbjuda energieffektivisering hos som exempel pumpar till kylsystem ombord.

AT teknik ihop med 3D scanning ur ett omvänt ingenjörskonst perspektiv kan säkerligen ge fördelar åt äldre fartyg vilka är försedda med äldre utrustning och komponenter till vilka reservdelar kan vara svårt att finna. Om en obsolet reservdel är det enda hindret till att ett system inte kan användas till sin fulla kapacitet är det tänkbart att en AT tillverkad kopia av reservdelen är en väg att gå. Jämfört med att byta ut hela komponenten, uppgradera systemet eller handtillverka delen ifråga kan 3D scanning ihop med AT säkerligen många gånger erbjuda en kostnadseffektiv lösning. Detta borde rimligtvis ske via teknikkonsulter och 3D studios i land och inte med hjälp av en AT maskin ombord.

Som nämnt är det osannolikt att ett AT system ombord i dagsläget kan motiveras ur en ekonomisk eller praktisk synvinkel gällande tillverkning av reservdelar och verktyg. Dock finns ett stort utbud av lågpris 3D skrivare i 10,000 – 20,000 SEK klassen (”lågpris” 3D

skrivare finns även utanför denna prisangivelse). Enklare designmjukvara samt färdiga nerladdningsbara digitala ritningar finns vilka många är gratis att använda. Om ett argument förs varför en 3D skrivare bör köpas in och installeras ombord skulle dessa argument troligen behöva vara av mer abstrakt natur då det är tänkbart att 3D skrivare ombord kan vara fördelaktig ur mer svår mätta avseenden. En 3D skrivare ombord kan ha potential att verka positivt för ingenjörsandan hos besättningen samt bidraga till att besättningen känner engagemang och stolthet över att arbeta ombord ett fartyg med ”den senaste tekniken”. Möjligheten finns att det nytänkandet en 3D skrivare kan väcka i sin tur framkallar positiv utveckling och nytänkande inom andra områden så som säkerhet, arbetssätt m.m. En lågpris 3D skrivare kan även ses som ett utvecklingsverktyg för besättningen i avseende på ritningsteknik, konstruktion, design, problemlösning osv.

Även om värdet av ökad skaparglädje och uppfinningsrikedom hos besättningen kan vara svårbedömt är det sannolikt få som ser det som något negativt. Förhållningssättet mot en 3D skrivare är troligen olika hos olika besättningar beroende på intresse, tolerans och attityder . Tänkbart är att en del personer känner sig hotad av den nya tekniken i och med att den inte förstås vilket kan utlösa ytterligare teknikfientlighet.

6.6 Metoddiskussion

Metoder som används i denna rapport har varit litteraturstudien samt öppna kvalitativa intervjuer. Litteraturstudien har varit essentiell och arbetet skulle inte kunna genomförts utan den. Dock skulle studien genomförts annorlunda om den påbörjades efter litteraturstudien, då främst i mindre problematik kring utgångspunkt.

Intervjuerna som genomfördes har gett bättre substans till rapporten, dock skulle eventuellt mer erfarenhet och kunskap inom intervjuteknik kunnat vara fördelaktig. Intervjuerna har varit mycket värdefulla och metodvalet kvalitativa intervjuer var väl motiverat. För denna studie skulle dock en förstudie varit fördelaktig för att hitta personer till intervjuerna med AT kunskaper aktiva inom sjöfartssektorn.

Vidare skulle ett flertal andra metoder kunnat användas för rapportens ändamål, metoder så som fälttest, enkäter och kvantitativa intervjuer. Ett fälttest skulle kunna ge mycket värdefull data, det fanns dock ingen möjlighet i denna studie att använda denna metod till följd av bristande resurser. Enkäter och kvantitativa intervjuer är möjliga metodval som avfärdades då svar på direkta frågor skulle kunna leda till felvisande eller bristande resultat om frågorna skulle tolkas fel av de svarande.

När data samlas in är det mycket viktigt att granska informationen då det är av stor betydelse att den samma är riktig och inte missvisande eller felaktig. I denna studie har det varit extra viktigt vid intervjuer och vid källor från hemsidor. Vid kontakt med företag är det viktigt att reflektera över företagets eller personens egenintresse. Detta i syfte att inte använda vinklad information alternativt påpeka att partisk källa är använd. Det samma gäller för källor från

internet.

Information från böcker och vetenskapliga artiklar måste anses som källor med hög validitet även om all information är vinklad ur något perspektiv. Källor som valts till denna rapport har valts med ett kritiskt omdöme för att eftersträva riktighet och vetenskaplig standard.

6.6.1 Validitet

Det är svårt att mäta slutsatsens validitet inför framtiden då förändring ständigt sker inom AT området tack vare utveckling, detta gör att de resultat som presenterats idag har potential att vara förlegade inom några år. Däremot anser författarna att slutsatserna är riktiga idag. Något värt att nämna är att många inom branschen har ett egenintressen inom området. Författarna har jämfört och kontrollerat information mot olika källor i syfte att stärka validiteten på informationen vilken är använd. I syfte att undvika användandet av ensidigt vinklad information har det eftersträvats att få en bredd hos intervjuobjekten i validitets syfte.

7 Slutsats

Kan en AT maskin vara ett användbart verktyg ombord på ett fartyg?

Hos en engagerad besättning kan en extruderingsbaserad AT maskin för plast vara ett användbart verktyg till mindre sidoprojekt ombord.

Är det möjligt att tillverka reservdelar eller verktyg ombord på fartyg med ett AT system?

Det är möjligt men ett AT system ombord är inte att betrakta som en realistisk lösning för att ersätta delar av fartygs reservdelslager eller att tillverka verktyg.

Vilka fördelar skulle användande av AT maskiner ombord på fartyg kunna ge?

Fördelen ett AT system kan erbjuda är ökad tillgänglighet då möjligheten att tillverka delar ombord gör fartyget mindre beroende av levererade reservdelar vid hamnbesök. Tänkbart är att arbete med AT tekniken kan verka positivt för uppfinningsrikedom och problemlösning.

8 Förslag på vidare studier

Under arbetet med denna rapport har det uppkommit en del frågetecken och intressant problematik som varit för stora för att behandla i denna rapport. Dessa uppslag ges här som förslag för vidare studier inom området; ekonomisk analys mellan AT producerade produkter och produkter tillverkade på traditionellt vis, analys över miljöpåverkan utav AT producerade produkter, möjligheten att använda AT under skeppskonstruktion samt problematik gällande patent, garanti, certifikat och klassificering för produkter tillverkade med AT.

9 Referenser

3ders.org (2013) GE to mass-produce critical jet engine part use 3D printing. *www.3ders.org - 3D printer and 3D printing news*. http://www.3ders.org/articles/20130426-ge-to-mass-produce-critical-jet-engine-part-use-3d-printing.html. (2013-10-14).

Anderson, C. (2012) Makers: *The new industrial revolution*. New York, NY: Crown Business.

Arcam (2013) *Arcam Q10*. Mölndal: Arcam AB.

ASTM (2013a) Technical Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. *ASTM International*. http://www.astm.org/COMMIT/F42%20Factsheet%202013revised.pdf. (2013-12-01).

ASTM (2013b) ASTM F2915-12. Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1. *ASTM International*. http://www.astm.org/Standards/F2915.htm. (2013-12-01). (DOI: 10.1520/F2915-12).

Bar-Cohen, Y. (2011) *Biomimetics Series: Biomimetics : Nature-Based Innovation*. Boca Raton, FL: CRC Press, Tayler & Francis Group.

Barnatt, C. (2013) 3D Printing: *The next industrial revolution*. explainingthefuture.com

Bendsøe, M. och Sigmund, O. (2004) *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

Cicha, K., Li, Z., Stadlmann, K., Ovsianikov, A., Markut-Kohl, R., Liska, R. och Stampfl, J. (2011a) Evaluation of 3D structures fabricated with two-photon-photopolymerization by using FTIR spectroscopy. *I Journal of Applied Physics*, vol. 110, nr 6.

Colombo, P., Dunand, D. och Kumar, V. (2013) Advances in the Synthesis, Characterization, and Properties of Bulk Popous Materials. *I Journal of Materials Research*, vol. 28, Nr 17, ss. 2187-2190.

Concept Laser (2010) *Fast! Direct components in vehicle construction*. Lichtenfels: Concept Laser GmbH (Produktblad: AUTOMOTIVE 10/2010).

Dimention 3D Printer (2010) *Koenigsegg speed ahead with dimension*. Eden Prairie, MN: Stratasys Inc. (Case study: AP-KOENIGSEGG 10/10).

ExOne (2013) *Reverse Engineer Compressor Pump Casting with 43 Week Reduction in Lead*

Time and 40% Cost Savings, ExOne. http://www.exone.com/resources/case-studies. (2013-11-27).

Fagerberg, W. och Osbakk, A. (2012) *Additiv tillverkning för serieproduktion*. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan. (Examensarbete inom Institutionen för industriell teknik och management).

GE Aviation (2013) GE Aviation Signs Additive Manufacturing Cooperative Agreement with Sigma Labs. *GE Aviation*. http://www.geaviation.com/press/other/other_20130524.html. (2013-10-14).

Gibson, I., Rosen, D. W. och Stucker, B. (2010) *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. [Elektronisk] New York, NY: Springer (oi:10.1007/978-1-4419-1120-9).

Grace, R. (2013) Wohlers report says 3-D printing exploding. *Plastics News*, vol. 25 nr 15 ss. 1-1.

Hauge, R. (2013a) Printing Multifunctional Parts. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Jaglom, J. (2013) 3D Printing - The Future is Now. *I Inside 3D Printing Conference & Expo*, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Johansson, K-E. (1997) *Driftsäkerhet och underhåll*. Lund: Studentlitteratur AB.

Jones, J. (2013) Explore the widest range of materials in the 3D printing world. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Kuiken, K. (2008) *Diesel Engines II; for ship propulsion and power plants*. Onnen: Target Global Energy Training.

Lipson, H. och Kurman, M. (2013) *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons.

MacCormack, C. (2013) Mcor: The Role of 3D Printing in Democratising Innovation. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

McMahan,T. (2013) Hot-Fire Tests Show 3-D Printed Rocket Parts Rival Traditionally Manufactured Parts. *NASA*. http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html#.Uptt9OJoVyL. (2013-11-15).

Michiels, W. (2013a) Setting Up 3D Printing Production Enivronment in Industrial Scale. *I Inside 3D Printing Conference & Expo*, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Pettis, B. (2013) Opening Keynote. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Rayna, T. (2013) Looking ahead – The long term economic impact of 3D printing. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Reichental, A. (2013) Morning Keynote: Manufactoring The Future. *I Inside 3D Printing Conference & Expo*, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Reverse engineering (2013) *I* Nationalencyklopedin. [Online]. http://www.ne.se/engelsk-ordbok/reverse+engineering/1958257 (2013-12-05).

Ryen, A. (2004) *Kvalitativ intervju : från vetenskapsteori till fältstudier*.
Malmö : Liber ekonomi.

Sevens, H. (2013) Autodesk: How 3D Scanning is changing the 3D Printing Landscape. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Stevenson, K (2013) The Lifecycle of 3D Printing. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Svenning, C, (2003) *Metodboken : [samhällsvetenskaplig metod och metodutveckling] : [klassiska och nya metoder i informationssamhället] : [källkritik på Internet]*. Upplaga fem. Eslöv : Lorentz.

Trost, J. (2010) *Kvalitativa intervjuer*. Upplaga fyra. Lund: Studentlitteratur AB.

Tuck, C. (2013) University of Nottingham: The Science of 3D Printing. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Vaezi, M., Seitz, H. och Yang, S. (2013) A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *I The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, nr 5, ss. 1721-1756.

van Gils, H. (2013) Keynote. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Vatani, M., Rahini, A. R., Brazandeh, F. och Sanatinezhad, A. (2009) An enhanced slicing algorithm using nearest distence analysis for layer manufactoring. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 37, ss 721-726, Januari 2009.

Vayre, B., Vignat, F. och Villeneuve, F. (2012) Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, vol. 13, nr 2, ss. 89.

Vilbrandt, T. (2013) Design at the bottom. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Wang, W. (2010) *Reverse Engineering: Technology of Reinvention*. Boca Raton, FL: CRC Press, Tayler & Francis Group.

Wohlers, T. (2009) *Wohlers Report: State of the Industry*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

Wohlers, T. (2012) *Additive Manufacturing in the United States*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates. (TCT Report).

Wohlers, T. (2013a) *Wohlers Report: State of the Industry*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

Wohlers, T. (2013b) Global Market Update. *I Inside 3D Printing Conference & Expo*, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Muntliga källor

Ian Gibson (2013) (Assosiate Professor, Engineering Design and Innovation Centre, National Univerity of Singapore) intervjuad av författarna den 1 oktober 2013.

Wim Michiels (2013b) (CEO, Materialise Malaysia and Executive Vice President, Materialise NV) intervjuad av författarna den 2 oktober 2013.

Rachel Park (2013) (Editor-in-Chief, 3D Printing Industry) intervjuad av Rikard Karlsen den 2 oktober 2013.

Daniel Risberg (daniel.risberg@protech.se) (2013-09-06) Angående era frågor om 3D skrivarteknologi. Personlig e-post till R. Karlsen (karlsen.rikard@gmail.com).

Anders Snis (2013) (Team leader simulation, process and software development, Arcam) intervjuad av författarna den 25 november 2013.

Terry Wohlers (2013c) (Principal Consultant and Presedent, Wohlers Associates, Inc) intervjuad av författarna den 2 oktober 2013.

Bilder

3ders.org (2012) *3D printed lightweight robotic hand*. [digital] www.3ders.org 3D printer and 3D printing news. http://www.3ders.org/articles/20120809-3d-printed-lightweight-robotic-hand-wins-2012-RD-100.html. (2013-12-01)

3D RPD (2013) *Titanium AM buckle alongside original buckle*. [elektronisk] RD RPD Building Success Layer By Layer. http://www.3trpd.co.uk/portfolio/saving-project-saving-

litres-of-aviation-fuel/gallery/case-studies/. (2013-12-01).

Arcam (2013a) *Arcam Electron Beam Melting Pool*. [digital] Arcam. http://ir.arcam.se/om-arcam/pressmaterial/. (2013-11-25).

Arcam (2013b) *Schematic EBM setup*. [digital] Arcam. http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/. (2013-11-25).

Cicha, K., Li, Z., Stadlmann, K., Ovsianikov, A., Markut-Kohl, R., Liska, R. och Stampfl, J. (2011b) *Complex 3D struktur* [digital] Från tidskriftartikeln: Evaluation of 3D structures fabricated with two-photon-photopolymerization by using FTIR spectroscopy. I Journal of Applied Physics, vol. 110, nr 6.

Fagerberg, F. (2012) *Fäste till larm*. [fotografi] Från examensarbetet: Additiv tillverkning för serieproduktion. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan.

Feenstra, F. (2012) *Redesign Hydraulic Manifold*. [digital] Från Fórum Prpdutech 2012, 21 november 2012, Expinor.

Fernández, F., Artigues, M. M., Ballester, M., Canela, J. Molera R. och Mora A. (2013) *Samples construction orientations*. Från konferensartikeln: Characterisation of test results of the performance of additive manufacturing parts obtained by selective laser sintering processes incorporating glass and carbon fibres. I *Proceedings of the 37th International MATADOR Conference*; Juli, 2013, London. s. 339-342

Festo AG & Co. KG (2010) *Bionic Handling Assistant* [fotografi] Festo. http://www.festo.com/net/en_corp/SupportPortal/press.aspx?tab=11&s=t. (2013-12-01).

Hauge, R. (2013b) *Example- conceptual heat exchanger.* [digital] Från seminarie: Printing Multifunctional Parts. *I 3D Printshow*, 7-9 November, 2013, London.

Karlsen, R. (2013a) *Smycke med komplex struktur*. [fotografi] Taget under konferensen och mässan: Inside 3D Printing Conference & Expo, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Karlsen, R. (2013b) *Bild på airduct*. [fotografi] Taget under konferensen och mässan: Inside 3D Printing Conference & Expo, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Karlsen, R. (2013c) *Topologioptimerad flygplanskomponent*. [fotografi] Taget under mässan: 3D Printshow, 7-9 November, 2013, London.

Karlsen, R. (2013d) *Topologioptimerad regel med inre gitterstruktur*. [fotografi] Taget under mässan: 3D Printshow, 7-9 November, 2013, London.

Karlsen, R. (2013e) *FDM utskrivet objekt med överhäng och stödstrukturer*. [fotografi] Taget

under mässan: 3D Printshow, 7-9 November, 2013, London.

NASA/MSFC (2013) *Rocket Engine Injector Manufactured With 3-D Printing Machine*. [fotografi] NASA. http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/gallery/3d_printer_2.html#.UptvEuJoVyI. (2013-11-15).

Stubbe, P. (2013) *Skiftnyckel utskriven i ett stycke*. [fotografi] Taget under konferensen och mässan: Inside 3D Printing Conference & Expo, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

Wohler (2013d) *Buy to fly ratio*. [fotografi] Från seminarie: Inside 3D Printing Conference & Expo, 1-2 Oktober, 2013, Singapore.

10 Bilaga 1

Seminarier besökta under arbetet:

Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, 2013-10-01
Morning Keyote: Manufactoring The Future, Avi Reichental, President and CEO, 3D Systems.
Setting Up 3D Printing Production Environment in Industrial Scale, Wim Michiels, CEO, Materialise Malaysia and Executive Vice President, Materialise NV.

Inside 3D Printing Conference & Expo, Singapore, 2013-10-02
3D Printing - The Future is Now, Jonathan Jaglom, General Manager, Asia Pacific & Japan, Stratasys.
Global Market Update, Terry Wohlers, Principal Consultant and President, Wohlers Associates, Inc.

3D Print Show, London, 2013-11-07
Opening keynote, Bre Pettis, VD Makerbot.
Keynote, Tim Heller, VP Global Channel Development, Stratasys.
Keynote, Henk van Gils, CEO Ultimaker.
Looking ahead – The long term economic impact of 3D printing, Proffessor Thierry Rayna, ESG Management school, Paris.
The role of 3D printing in democratising innovation, Dr. Conor Maccormack, CEO Mcor Technologies LTD.
Printing multifunctional parts, Proffessor Richard Hague, University of Nottingham.
Industrial & Medical Applications of 3D Printing, Dr. Phil Reeves, Econolyst.
Large Scale 3D printing systems and applications, Kevin Smith, Managing director Voxeljet.
What can you make with a 3D printer? Jonathan Rowley, Design Director, Digits2Widgets.

3D Print Show, London, 2013-11-08
Making the Future, Jesse Harrington AU, Autodesk.
B2B – 3D, Sander Van Geelen, Ultimaker.

Explore the widest range of materials in the 3D printing world, John Jones, EMEA Material business group manager, Stratasys.
The science of 3D printing, Dr. Chris Tuck, University of Nottingham.
Creative Digital Anarky, Ann Marie Shillito, Anarkik 3D.

3D Print Show, London, 2013-11-09
Design for printing / printing for design, Yoav Reches, Industrial designer, FormLabs.
How to 3D print your way out of a box. Talare: Hilde Sevens, Director of buiness development Autodesk.
The Artist in the Tech Era, Joshua Harker.
The lifecycle of 3D printing, Kerry Stevenson, Chief Technology officer
How the 3D scanning is changing the 3D printing landscape, Hilde Sevens, Director of business development, Autodesk.
URBEE: The 3D Printed Car, Jim Kor.
Design at the bottom, Turlif Vilbrandt, CTO Uformia.