



# CHALMERS

---

## **Additiv tillverkning i metall**

### **Analys och jämförelse av metoderna**

Kandidatarbete inom material- och tillverkningsteknik

Alexander Osika  
Andreas Lavesson  
Josefine Svegborn

Additiv tillverkning i metall  
Analys och jämförelse av metoderna

Alexander Osika  
Andreas Lavesson  
Josefine Svegborn

© Alexander Osika, 2015  
© Andreas Lavesson, 2015  
© Josefine Svegborn, 2015

Examinator: Lars Nyborg  
Handledare: Mats Norell  
Kandidatuppsats: MTTX02-15-05

Chalmers tekniska högskola  
Institutionen för material- och tillverkningsteknik  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Institutionen för material- och tillverkningsteknik

Göteborg, Sverige, juni 2015

### ***Förord***

Detta kandidatarbete är skrivet som en del av civilingenjörsprogrammet på Chalmers tekniska högskola under våren 2015 och är initierat av Institutionen för material- och tillverkningsteknik. Arbetet är genomfört av två studenter från programmet Teknisk Design och en student från Maskinteknik, och vi vill speciellt tacka vår handledare Mats Norell för allt stöd vi har fått under processens gång. Vi vill också tacka vår examinator Lars Nyborg, samt rikta ett tack till de personer både inom näringslivet och den akademiska världen som tog emot oss på de studiebesök som genomfördes.

# Sammandrag

Additiv tillverkning, ofta kallat 3D-printing, har varit ett mycket omskrivet ämne de senaste åren. I de flesta fallen grupperas hobby- och industrimaskiner samt plast- och metallmaskiner ihop till en enda grupp. Detta skapar en del missförstånd eftersom maskinerna skiljer sig åt mycket. Denna rapport syftar till att utreda additiv tillverkning i metall, vilket endast görs med avancerade industrimaskiner. De fem mest etablerade metoderna Selective Laser Sintering, SLS, Selective Laser Melting, SLM, Electron Beam Melting, EBM, Beam Metal Deposition, BMD, och Binder Jetting, BJ beskrivs ingående och jämförs med avseende på begränsningar och tillämpningsmöjligheter. Information om dessa har inhämtats från litteraturstudier och intervjuer under studiebesök, både hos maskintillverkare och forskande högskolor. Alla metoderna utom BMD använder en pulverbädd, i vilken komponenterna byggs upp lager för lager genom att delar av varje pulverlager antingen smälts med laser eller elektronstråle, eller binds samman med bindemedel. BMD bygger också upp komponenter lager för lager men åstadkommer detta genom att smälta metallpulver eller metalltråd som sedan deponeras. Valet av metod beror på vilka krav och förutsättningar som finns. I jämförelsen framgår att EBM ofta är snabbare än de andra metoderna men ger sämre yt- och detaljfinhet. BMD kan addera detaljer på färdiga komponenter och har utvecklade parameterset för flest material men de pulverbaserade, som är mest utbredda är oftast de långsammaste av metoderna. BJ kan utföras i rumstemperatur och ge mycket fina detaljer, men komponenterna måste sintras och får mer porer än flertalet av de andra metoderna. SLS ger mest porer och har därför i stor utsträckning ersatts av den liknande, men fullsmältande, lasermetoden SLM. Detta är den mest justerbara metoden och den pulverbäddsmetod med framtagna parameterinställningar för flest material. Dock gör termiska spänningar från processen att mycket stödstrukturer behöver byggas och omöjliggör stapling av komponenter i byggkammaren. Att tillverka det finkorniga metallpulver som behövs är så dyrt att även om spillmaterial sparas vid additiv tillverkning krävs oftast fler fördelar för att metoden ska vara motiverad. För additiv tillverkning i stort gäller att särskilda krav i form av komplexa geometrier, inbyggd funktionalitet och små serier behöver ställas för att det ska vara ett lönsamt alternativ till konventionella tillverkningsmetoder. Detta speglas i de branscher där additiv tillverkning främst har tagit fäste: implantattillverkningsindustrin och flygindustrin. Eftersom additiv tillverkning skiljer sig från konventionella metoder på så många sätt bör den som vill ta vara på alla fördelar ha denna metod i åtanke redan under produktutvecklingsfasen.

# Abstract

Additive manufacturing, often called 3D printing, has been a topic of much public interest in recent times. In many cases, machines for home and industrial use, as well as machines for plastic and metal manufacturing are grouped together. This creates some confusion, since the machines are very dissimilar. This report aims to investigate additive manufacturing of metal, which is done only with advanced industrial machines. The five most established methods are Selective Laser Sintering, SLS, Selective Laser Melting SLM, Electron Beam Melting, EBM, Beam Metal Deposit, BMD, and Binder Jetting, BJ will be described in detail and compared with respect to the limitations and application possibilities. The information for this report is taken from literature and interviews during study visits, to both machine manufacturers and universities. All methods except BMD use a powder bed in which the components are built up layer by layer by parts of each powder layer either melted by laser or electron beam, or bonded together with adhesive. BMD also builds up components layer by layer but by depositing metal powder or wire, which is then melted with a laser. The choice of method depends on the requirements and prerequisites that exist. The comparison shows that EBM is often faster than the other methods, but gives poorer surface and details. BMD can add details on finished components and has developed the parameter sets for the most materials, but is usually the slowest of the methods. BJ can be performed at room temperature and provide very fine tolerances, but the components must be sintered and may get more pores than the other methods. SLS creates the most pores and therefore have largely been replaced by the similar, but full melting, laser method SLM. This is the most adjustable method and the powder bed method with parameter settings for the most materials. Because of thermal stresses from the process, support structures needs to be built, which prevents stacking of components in the build chamber. To manufacture the fine grained metal powder needed is so expensive that even if the amount of material scrapped in additive manufacturing is lower compared to for example milling, more benefits are often required for the technology to be justified. For additive manufacturing in general terms, special requirements in the form of complex geometries, integrated functionality, and small series need to be the case for it to be a viable alternative to conventional manufacturing technologies. This is reflected in the industries in which additive manufacturing has been used more extensively: medical implant manufacturing and the aerospace industry. As additive manufacturing differs from conventional methods in so many ways, someone who wants to take advantage of all the benefits of the technology must have the method in mind during the product development phase.

# Innehåll

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Inledning .....                                                | 9  |
| 1.2 Förkortningar .....                                          | 9  |
| 1.3 Översikt av rapporten .....                                  | 10 |
| 1.4 Bakgrund .....                                               | 10 |
| 1.5 Syfte .....                                                  | 11 |
| 1.6 Avgränsningar .....                                          | 11 |
| 2 Metod.....                                                     | 12 |
| 2.1 Litteraturstudie.....                                        | 12 |
| 2.2. Intervjuer och studiebesök.....                             | 12 |
| 2.3 Jämförelsemetoder .....                                      | 13 |
| 3 Introduktion till additiv tillverkning i metall.....           | 14 |
| 3.1 Processen .....                                              | 14 |
| 3.1.1 Förberedelse.....                                          | 14 |
| 3.1.2 Tillverkning.....                                          | 14 |
| 3.1.3 Efterbehandling .....                                      | 15 |
| 4 Teori om bakomliggande tekniker .....                          | 17 |
| 4.1 Metallpulver .....                                           | 17 |
| 4.2 Sintring .....                                               | 18 |
| 4.3 Svetsning.....                                               | 19 |
| 4.3.1 Likheter mellan svetsning och additiv tillverkning .....   | 19 |
| 4.3.2 Skillnader mellan svetsning och additiv tillverkning ..... | 19 |
| 4.3.3 Gemensamma fenomen med additiv tillverkning .....          | 19 |
| 5 Metoder för additiv tillverkning i metall.....                 | 20 |
| 5.1 Selective Laser Sintering och Selective Laser Melting .....  | 20 |
| 5.1.1 Historia för Selective Laser Sintering.....                | 21 |
| 5.1.2 Historia för Selective Laser Melting .....                 | 21 |
| 5.1.3 Variationer över marknaden .....                           | 21 |
| 5.1.4 Beskrivning av processen .....                             | 21 |
| 5.1.5 Sintring i fast fas.....                                   | 22 |
| 5.1.6 Smältfas-sintring .....                                    | 23 |
| 5.1.7 Fullständig smältning .....                                | 23 |
| 5.1.8 Begränsningar.....                                         | 24 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.9 Parametrar .....                                                | 25 |
| 5.1.10 Tillämpningar .....                                            | 26 |
| 5.2 Electron Beam Melting.....                                        | 26 |
| 5.2.1 Historia.....                                                   | 26 |
| 5.2.2 Teknik .....                                                    | 26 |
| 5.2.3 Begränsningar.....                                              | 28 |
| 5.2.4 Tillämpningar .....                                             | 29 |
| 5.3 Beam Metal Deposition.....                                        | 29 |
| 5.3.1 Historia.....                                                   | 30 |
| 5.3.2 Variation över marknaden .....                                  | 30 |
| 5.3.3 Begränsningar.....                                              | 31 |
| 5.3.4 Parametrar .....                                                | 33 |
| 5.3.4 Tillämpningar .....                                             | 35 |
| 5.5 Binder Jetting .....                                              | 35 |
| 5.5.1 Historia.....                                                   | 35 |
| 5.5.2 Teknik .....                                                    | 36 |
| 5.5.3 Begränsningar.....                                              | 36 |
| 5.5.4 Tillämpningar .....                                             | 38 |
| 6 Jämförelse och Diskussion.....                                      | 39 |
| 6.1 Begränsningar .....                                               | 39 |
| 6.1.1 Material .....                                                  | 39 |
| 6.1.2 Produktionshastighet.....                                       | 39 |
| 6.1.3 Kostnad.....                                                    | 39 |
| 6.2 Möjligheter .....                                                 | 40 |
| 6.2.1 Formfrihet.....                                                 | 40 |
| 6.2.2 Material .....                                                  | 40 |
| 6.2.3 Tillämpningar .....                                             | 40 |
| 6.3 Additiv tillverkning jämfört med andra tillverkningsmetoder ..... | 41 |
| 6.3.1 Gjutning .....                                                  | 41 |
| 6.3.2 Skärande bearbetning.....                                       | 41 |
| 6.3.3 Pulvermetallurgi .....                                          | 42 |
| 6.3.4 Smide.....                                                      | 42 |
| 6.3.4 Sammanfattning .....                                            | 42 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.4 Jämförelse mellan de olika metoderna för Additiv tillverkning ..... | 42 |
| 6.4.1 Bygghastighet .....                                               | 43 |
| 6.4.2 Ytfinhet och detaljfinhet.....                                    | 44 |
| 6.4.3 Material och hållfasthet .....                                    | 45 |
| 6.4.5 Tillämpningar .....                                               | 45 |
| 7 Slutsats .....                                                        | 47 |
| Referenser .....                                                        | 48 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGUR 1 VISAR HUR TVÅ KOMPONENTER TILLVERKAS I PULVERBÄDD. ENERGISTÅLEN SMÄLTER DET ÖVERSTA PULVERLAGRET INNAN NÄSTA SPRIDS ÖVER. KOMPONENTEN TILL VÄNSTER BEHÖVER INGA STÖDSTRUKTURER FÖR ATT BÄRAS UPP, MEN KOMPONENTEN TILL HÖGER ÄR SÅ PASS VINKLAD ATT DEN BEHÖVER BYGGAS MED STÖDSTRUKTURER. ....                                                                                                                                                                        | 15 |
| FIGUR 2 VISAR HUR EN KOMPONENT BYGGS UPP GENOM ATT MATERIAL, HÄR I FORM AV METALLPULVER, DEPONERAS UR MUNSTYCKEN OCH SVETSAS FAST PÅ KOMPONENTEN. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 15 |
| FIGUR 3 VISAR EN SMÄLT- OCH ATOMISERINGSKAMMARE, DÄR SMÄLTAN RINNER GENOM EN DYSA OCH UTSÄTTS FÖR STRÅLAR AV GAS FÖR ATT SEDAN ANSAMLAS I BOTTEN AV ATOMISERINGSKAMMAREN. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 17 |
| FIGUR 4 VISAR HUR PULVERPARTIKLAR SOM LIGGER PACKADE (1) VID VÄRMNING KOMMER ATT SKAPA SINTRINGSHALSAR (2) OCH ETT SINTRAT MATERIAL MED PORER KOMMER ATT SKAPAS. VID FORTSATT VÄRMNING (3) FORTGÅR DIFFUSIONEN OCH PORERNA MINSKAS ELLER FÖRSVINNAR HELT. ....                                                                                                                                                                                                                 | 18 |
| FIGUR 5 VISAR EN PRINCIPSSKISS FÖR KOMPONENTTILLVERKNING I EN SLS-MASKIN. I DENNA ANVÄNDS EN Roterande VALS FÖR ATT DISTRIBUTERA PULVER ÖVER BYGGPLATTAN MELLAN DE OLIKA LAGREN. DET OSINTRADE PULVRET KAN EVENTUELLT ÅTERANVÄNDAS EFTER PROCESSEN, MEN I FIGUREN SYNS INGET AUTOMATISKT SYSTEM FÖR DETTA. ANVÄNDARGRÄNSSNITTET TILL DATORN SOM STYR OPTIKEN OCH DÄRMED UTGÖR LASERSTYRNINGSSYSTEMET UTGÖRS OFTA AV EN INBYGGD SKÄRM OCH INTE HELLER DENNA SES I FIGUREN. .... | 20 |
| FIGUR 6 VISAR HUR ELEKTRONSTRÅLEN I EN EBM-MASKIN GÅR IGENOM EN ASTIGMATISM-, FOKUS- OCH STYRSPOLE INNAN DEN TRÄFFAR DET PULVER SOM SKA SMÄLTAS. I DEN NEDRE DELEN AV FIGUREN VISAS DEN BYGGPLATTFORM SOM SÄNKS NER FÖR VARJE LAGER SOM BYGGS. ....                                                                                                                                                                                                                            | 27 |
| FIGUR 7 VISAR HUR MUNSTYCKEN BLÅSER EN BLANDNING AV METALLPULVER OCH SKYDDSGAS IN I FOKUSPUNKTEN PÅ EN LASERSTRÅLE, OCH PÅ SÅ SÄTT SMÄLTER PÅ MATERIAL. DET ÄR INTE OVANLIGT ATT FLER ÄN TVÅ RADIELLT SYMMETRISKA MUNSTYCKEN ANVÄNDS FÖR TILLFÖRSEL AV PULVER. ....                                                                                                                                                                                                            | 30 |
| FIGUR 8 VISAR ETT TEST SOM GJORTS PÅ HÖGSKOLAN VÄST, DÄR EN TUNN OCH HÖG GEOMETRI BYGGTS UPP. I MITTEN AV BILDEN KAN FÖRSKJUTNINGAR MELLAN DEPONERINGSLAGER SES. DETTA VISAR PÅ ATT ANTINGEN DET MEKATRONISKA SYSTEMET ELLER TERMISKA EFFEKTER HAR SKAPAT EN AVVIKELSE. ....                                                                                                                                                                                                   | 34 |
| FIGUR 9 VISAR HUR SKRIVARHUVUDET RÖR SIG ÖVER PULVERBÄDDEN OCH APPLICERAR BINDEMEDEL. OBJEKTET SOM SKAPAS ÄR EN GRÖNKROPP OCH HAR ALLTSÅ INTE DE EGENSKAPER SOM DEN SLUTGILTIGA KOMPONENTEN KOMMER ATT HA. ....                                                                                                                                                                                                                                                                | 36 |
| FIGUR 10 VISAR PÅ ETT FÖRENKLAT SÄTT HUR DE OLIKA TEKNIKERNAS PRESTERAR MED AVSEENDE PÅ OLIKA OMRÅDEN. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 45 |

# Tabellförteckning

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELL 1 BESKRIVER NÅGRA AV DE FÖRKORTNINGAR SOM KOMMER ATT ANVÄNDAS I RAPPORTEN.                                                                                          | 9  |
| TABELL 2 BESKRIVER DE STUDIEBESÖK SOM GJORDES FÖR ATT SAMLA IN INFORMATION TILL RAPPORTEN.                                                                                 | 12 |
| TABELL 3 VISAR VILKA MATERIAL SOM KAN ANVÄNDAS I SLM-MASKINER.                                                                                                             | 24 |
| TABELL 4 SAMMANSTÄLLER DATA FÖR SLS- RESPEKTIVE SLM-MASKINER.                                                                                                              | 25 |
| TABELL 5 SAMMANSTÄLLER DATA FÖR EBM-MASKINER.                                                                                                                              | 28 |
| TABELL 6 BESKRIVER VILKA MATERIAL SOM KAN ANVÄNDAS I EBM-MASKINER.                                                                                                         | 29 |
| TABELL 7 SAMMANSTÄLLER DE MATERIAL SOM KAN ANVÄNDAS I BMD-MASKINER.                                                                                                        | 31 |
| TABELL 8 SAMMANSTÄLLER DATA FÖR BMD-MASKINER.                                                                                                                              | 34 |
| TABELL 9 SAMMANSTÄLLER VILKA MATERIAL SOM KAN ANVÄNDAS I BJ-MASKINER. EXONE STÅR IDAG FÖR<br>NÄSTAN ALLA MATERIAL, MEN HÖGANÄS DIGITAL METAL JOBBAR MED ATT UTVECKLA FLER. | 37 |
| TABELL 10 SAMMANSTÄLLER DATA FÖR BJ-MASKINER. MÖJLIG DETALJFINHET OCH YTFINHET ÄR UTMÄRKANDE<br>FÖR ATT VARA EN AM-METOD.                                                  | 38 |
| TABELL 11 SAMMANSTÄLLER DATA FÖR ALLA UNDERSÖKTA AM-TEKNIKER.                                                                                                              | 43 |

# 1 Inledning

Under de senaste åren har olika typer av additiv tillverkning, ofta kallat 3D-printing, blivit allt mer omskrivet i media och den allmänna kännedomen om tekniken har ökat kraftigt. Även om majoriteten av de metoder som finns idag för additiv tillverkning enbart arbetar med olika typer av plast så finns ett antal företag som har utvecklat maskiner som tillverkar i metall. I denna rapport undersöks de olika metoder som används för additiv tillverkning i metall för att bedöma vad de har för möjligheter och vad de har för begränsningar.

## 1.2 Förkortningar

Detta arbete innehåller en del förkortningar, och många av de tekniker som avhandlas kommer att benämnas med akronymer. Då flera av dessa akronymer är vedertagna uttryck kommer dessa att representera de engelska översättningarna, även i de fall där svenska akronymer skulle vara möjliga. Förkortningarna som används beskrivs i *Tabell 1*.

*Tabell 1 beskriver några av de förkortningar som kommer att användas i rapporten.*

| Förkortning | Betydelse                  | Förklaring                                                                                                |
|-------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AM          | Additive Manufacturing     | Additiv tillverkning.                                                                                     |
| SLS         | Selective Laser Sintering  | AM-teknik som sintrar pulver med hjälp av laser.                                                          |
| SLM         | Selective Laser Melting    | AM-teknik som smälter pulver med hjälp av laser.                                                          |
| EBM         | Electron Beam Melting      | AM-teknik som använder elektronstråle för att smälta ihop pulver.                                         |
| BMD         | Beam Metal Deposition      | AM-teknik som deponerar metall som svetsas fast med laser- eller elektronstråle.                          |
| BJ          | Binder Jetting             | AM-teknik som använder bindemedel för att binda ihop pulver.                                              |
| PM          | Powder Metallurgy          | Pulvermetallurgi.                                                                                         |
| HIP         | Hot Isostatic Pressing     | PM-teknik där komponenter pressas samman under mycket högt tryck och hög temperatur.                      |
| MIM         | Metal Injection Molding    | PM-teknik där metallpulver blandat med bindemedel formsprutas.                                            |
| CAD         | Computer Aided Design      | Mjukvara som används för att modellera digitalt.                                                          |
| CNC         | Computer Numerical Control | Maskiner där ett digitalt system ger styrinformation till mekatronik. Syftar ofta på avverkande maskiner. |

### 1.3 Översikt av rapporten

Rapporten är uppbyggd så att läsaren i kapitel 1.3, Bakgrund, kan hitta information om de grundläggande principerna för vad additiv tillverkning är och hur arbete i metall skiljer sig från plast. Kapitel 2 berör de metoder som användes för att samla in data till denna rapport. I kapitel 3, Introduktion till additiv tillverkning i metall, sammanfattas de gemensamma processtegen. För att kunna studera metoderna djupare krävs en grundläggande förståelse för tekniken bakom. Därför är kapitel 4, Teori om bakomliggande tekniker, ägnat åt att gå igenom det läsaren behöver känna till om tillverkning och materialteknik för att kunna ta till sig kommande kapitel. I kapitel 5, Metoder för additiv tillverkning i metall, ges utförliga beskrivningar av varje metod och i kapitel 6, Jämförelse och Diskussion, görs en jämförelse med avseende på metodernas begränsningar och möjliga tillämpningsområden. I detta kapitel görs även en kort jämförelse mellan AM och relevanta konventionella tillverkningsmetoder.

### 1.4 Bakgrund

Additiv tillverkning syftar till processer där ett objekt byggs upp direkt från en digital 3D-modell genom att modellen konverteras till tvådimensionella tvärsnittsmönster, som sedan kan byggas upp lager för lager i en autonom process. Detta skiljer sig exempelvis från skärande bearbetning genom att komponenten byggs upp från ingenting, jämfört med att utgående från ett arbetsstycke avverka material i olika steg. De första metoderna för additiv tillverkning utvecklades under 80-talet och bygger på att en ljuskänslig vätska stelnar till en hård plast då ljus appliceras på ett kontrollerat sätt för att uppnå den efterfrågade formen (Gibson, et al., 2010). Sedan dess har flera nya metoder utvecklats, där de som används nästan uteslutande kan delas in i tre grupper. Den första gruppen är utvecklade varianter av den ursprungliga metoden där en vätska används som får stelna med hjälp av ljus. Den andra gruppen utgörs av tekniker där pulver binds ihop med hjälp av värme eller bindemedel och den tredje gruppen består av de tekniker där en tråd eller ett pulver smälts ner och appliceras lager för lager i enlighet med den digitala 3D-modellen.

Dessa metoder har en gemensam nämnare i att alla lager byggs längs en vertikal axel, eller ett fleraxligt system, där matningsmunstyckets avstånd från komponenten kan varieras efter varje byggt lager. Ett viktigt begrepp för AM blir därför lagertjocklek, det vill säga höjden på varje tvådimensionellt tvärsnitt som byggs. I många av de vedertagna processerna kan lagertjockleken varieras för att skapa en passande avvägning mellan bygghastighet och detaljprecision. Den typ av process som de senaste åren har blivit populär även bland privatpersoner bygger på att en tråd av plast smälts ner och extruderas på en byggplatta (Gibson, et al., 2010). Maskinerna för privat bruk är ofta tillräckligt små för att kunna stå på ett skrivbord, medan industrimaskinerna är betydligt större, snabbare och kan arbeta med högre toleranser.

Tillverkning i metall kräver högre temperaturer och generellt maskiner med mer avancerad teknologi. Därför finns idag bara industrimaskiner för AM i metall. Metoderna baseras oftast på att metallpulver sammanfogas med hjälp av en värmekälla eller bindemedel, och de flesta av de undersökta teknikerna arbetar med så kallad pulverbädd. Denna pulverbäddsteknik fungerar genom att ett plant lager av pulver sprids ut, varpå det pulver som motsvarar det tvådimensionella tvärsnittet solidifieras. När detta är gjort läggs ett nytt lager av pulver över bädden, och processen upprepas. De metoder som undersöks i denna rapport är relativt nya, där de första maskinerna kom till marknaden under 90-talet, och sedan dess har flera olika metoder börjat synas i industrin. I media grupperas AM-metoder för plast och metall ofta ihop när de diskuteras trots att de tekniska förutsättningarna är mycket olika. Därför finns ett behov av tekniska jämförelser som endast ser till en av materialtyperna.

## **1.5 Syfte**

Syftet med detta projekt är att undersöka de metoder som används idag för additiv tillverkning i metall. Tekniska begränsningar och möjligheter med additiv tillverkning ska sammanställas och skillnader mellan de olika metoderna för additiv tillverkning ska utredas. Målet blir således att skapa ett underlag som kan användas för att bedöma om och i så fall vilka metoder av additiv tillverkning som kan passa för ett specifikt tillverkningsfall.

## **1.6 Avgränsningar**

AM kan göras med en mängd olika metoder och arbetsmaterial, som polymerer, vaxer och metaller. För att ge möjlighet till djupare studier, kommer denna rapport enbart att behandla de metoder och användningsområden som är tillämpbara vid direkt arbete i metaller. Alltså kommer inte möjligheter att exempelvis additivt tillverka gjutformar för metallkomponenter, maskinverktyg eller andra framställningsmetoder där additiv tillverkning spelar en sekundär roll i tillverkningen att utredas i det här projektet. Detta innebär också att prototypbyggande inte heller räknas som direkt tillverkning av metallkomponenter. De metoder som kommer att jämföras i rapporten är Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Beam Metal Deposition och Binder Jetting.

## 2 Metod

Då de ekonomiska och praktiska kraven vid AM i metall försvårade empiriska jämförelser mellan de olika AM-metoderna så har rapporten istället baserats på intervjuer och litteraturstudier, där den största delen av informationen har tagits fram under litteraturstudierna.

### 2.1 Litteraturstudie

För att hämta information om bakomliggande tekniker har främst kända material- och ingenjörss databaser använts. Dessa valdes i samråd med handledare Mats Norell (Univ. lektor, yt- och mikrostukturteknik). För informationsinsamling om AM har i största möjliga mån facklitteratur i form av vetenskapliga artiklar, avhandlingar och läroböcker använts. Som tidigare nämnt är AM i metall en relativt ny tillverkningsmetod och på många områden saknas standardmått och forskning. Därför har en del kompletterande information hämtats från tillverkarnas hemsidor eller intervjuer med tillverkarna och forskare på högskolor.

### 2.2. Intervjuer och studiebesök

För att samla in så mycket relevant information som möjligt till projektet genomfördes ett antal studiebesök och intervjuer. Detta för att ge en tydligare bild av hur de olika metoderna används och för att ge möjlighet att ställa specifika frågor. Studiebesöken var både hos företag som tillverkar AM-maskiner och hos högskolor som har AM-maskiner för forskning.

Urvalet av vilka företag som besökts eller intervjuats har utgått från två olika faktorer, dels vilka företag som ur ett praktiskt perspektiv gått att stämma möte med, men också så att samtliga metoder på något sätt skulle täckas in. Ingen tillverkare av SLS-maskiner kunde kontaktas, men då SLM använder en mycket lik teknik kunde information från dessa studiebesök oftast gälla för båda fallen. Studiebesöken visas i *Tabell 2*.

*Tabell 2 beskriver de studiebesök som gjordes för att samla in information till rapporten.*

| Företag/Högskola             | Teknik | Ort         | Kontaktperson     | Datum   |
|------------------------------|--------|-------------|-------------------|---------|
| Höganäs Digital Metal        | BJ     | Höganäs     | Ralf Carlström    | 18/3-15 |
| Arcam                        | EBM    | Göteborg    | Fredrik Bäckström | 25/3-15 |
| EOS                          | SLM    | Göteborg    | Björn Björnström  | 24/3-15 |
| Stockholms universitet       | SLM    | Stockholm   | Jon Olsén         | 1/4-15  |
| Högskolan Väst               | BMD    | Trollhättan | Joel Andersson    | 12/3-15 |
| Återförsäljare Concept Laser | SLM    | Göteborg    | Martin Nielsen    | 27/1-15 |
| Återförsäljare 3D Systems    | SLM    | Göteborg    | Ulf Qviberg       | 5/2-15  |

## 2.3 Jämförelsemetoder

De data för maskinparametrar och produktprestanda som samlats in är i vissa fall angiven på olika sätt i det källmaterial som använts. Eftersom det saknas standard för hur olika maskin- och produktspecifikationer anges har detta i vissa fall försvårat jämförelsen mellan olika metoder. Detta då variationen över marknaden ibland varit stor för en och samma metod, samtidigt som dessa specifikationer angivits på olika sätt.

Dataspecifikationer presenteras ändå i jämförande tabeller både i kapitel 5, Metoder för Additiv Tillverkning och i kapitel 6, Jämförelse och Diskussion, eftersom det bidrar till förståelse för vad som kan uppnås med metoderna. De företag vars information har använts anges i samband med respektive tabell.

Parametrarna som valts för jämförelsen är de som oftast anges i maskinspecifikationer och anses viktigast för val av metod. I vissa fall gör måttenheten för en parameter att viktiga aspekter frånses. Därför förs en diskussionen kring dessa aspekter i samband med jämförelsen. De faktorer som är viktigast för kostnad och lämplighet bedöms vara bygghastighet, yt- och detaljfinhet, material, hållfasthet och tillämpningar. Därför görs jämförelsen primärt med avseende på dessa.

## 3 Introduktion till additiv tillverkning i metall

Idag finns ett antal områden där AM används i industrin. En uppdelning kan göras mellan de fall där tekniken används för prototypbyggnad och de fall där AM är tillverkningsmetoden för en serieproducerad produkt. För den första gruppen finns ett brett användningsområde men eftersom det inte leder till en kommersiell slutprodukt brukar detta benämnas som Rapid Prototyping snarare än Additive Manufacturing. För fallen med serieproduktion är komponenttyperna som tillverkas inte lika många eftersom andra krav ställs när resultatet är en färdig slutprodukt. Detta kan mer korrekt kallas additiv tillverkning och är det som avses med begreppet AM. De olika metoderna följer en gemensam AM-process vars steg presenteras i följande kapitel.

### 3.1 Processen

Processen för AM beror på vilken metod som används, men i det här kapitlet presenteras de processteg som är gemensamma för majoriteten av metoderna. När någon av teknikerna avviker betydande kommenteras detta. Informationen till denna sammanfattning är hämtad från, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* (Gibson, et al., 2010). En mer detaljerad beskrivning av processen för varje metod finns i kapitel 5, *Metoder för additiv tillverkning i metall*.

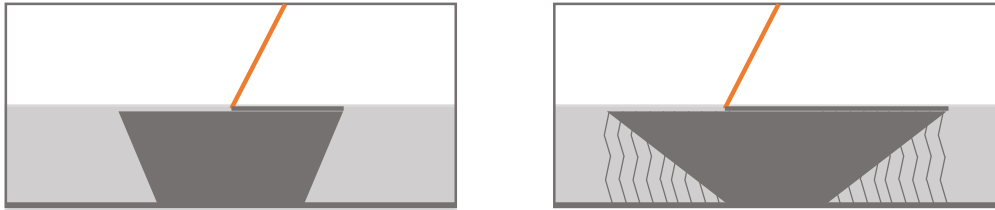
#### 3.1.1 Förberedelse

Vid både AM och andra typer av automatiserad tillverkning utgår arbetet från en 3D-modell av komponenten som ska tillverkas, ofta refererad till som en CAD-modell, (*Computer Aided Design*). Dessa typer av modeller kan skapas i en mängd olika program, där olika arbetsflöden används för att skapa de geometrier som önskas. När en geometri är skapad konverteras den till ett filformat som enbart sparar information som beskriver komponentens yta. För att dessa typer av filer ska kunna tolkas korrekt av de kommande stegen krävs dock att ytgeometrin är sluten, alltså att en insida och en utsida på objektet kan definieras. Denna fil kan sedan behandlas i mjukvara för att dela upp objektet i de tvådimensionella tvärsnitt som kommer att bygga upp den färdiga komponenten. Beroende på vilken teknik som används så kan det sista steget se olika ut, men generellt kan sägas att dessa tvärsnitt tolkas om till maskinkod i form av koordinater och kommandon, som sedan kan användas för att styra de mekatroniska systemen i maskinen. I fallet av serieproduktion behöver detta steg alltså bara göras en gång, och maskinerna kan därefter fortsätta producera samma geometri utan att arbete med mjukvaran behöver ske.

#### 3.1.2 Tillverkning

De metoder som bygger på användande av en pulverbädd baseras på sammanfogning via laser, elektronstråle eller bindemedel. Det sistnämnda skapar enbart en svagt sammanhållen komponent, kallad grönkropp, vid utskriften. Processens steg blir att ett tunt lager pulver läggs ut över byggytan, varefter det pulver som ingår i det tvådimensionella komponenttvärsnittet smälts eller binds samman. Pulverbädden sänks sedan ner sträckan av lagrets tjocklek och ett nytt lager pulver kan sedan läggas ovanpå detta. För pulverbäddstekniker som använder en energistråle behöver stödstrukturer byggas om geometrin är mycket vinklad från z-axeln. Detta görs genom att mer pulver än det som ingår i komponenten smälts, se *Figur 1*.



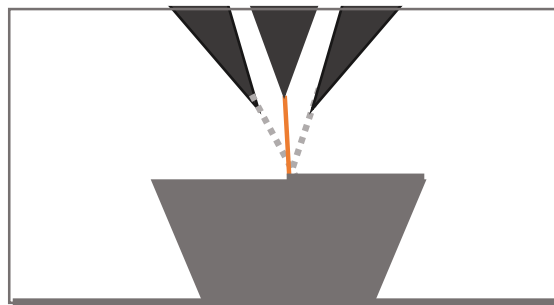


*Figur 1 visar hur två komponenter tillverkas i pulverbädd. Energistålen smälter det översta pulverlagret innan nästa sprids över. Komponenten till vänster behöver inga stödstrukturer för att bäras upp, men komponenten till höger är så pass vinklad att den behöver byggas med stödstrukturer.*

Stödstrukturerna kan dels användas för att stödja upp komponenter som har få kontaktpunkter mot byggplattan men också för att motverka deformationer från termiska spänningar eller stödja upp geometrier som annars skulle byggas utan underlag i byggvolymen.

I de fall där komponenten smälts är det vanligt att en byggplatta i rostfritt stål monteras i botten av byggkammaren och att komponenten som tillverkas sedan får sågas eller slås loss från plattan när den är färdig. Dessa byggplattor kommer således efter användning att vara något ojämna, då spår av de tidigare tillverkade komponenterna ofta lämnas kvar. Plattorna behöver därför ofta planslipas för att repeterbarhet i processen ska kunna uppnås. Byggplattor och stödstrukturer är inte nödvändigt för de metoder som använder sig av bindemedel och komponenterna kan istället byggas helt fritt i pulverbädden.

Den metod som inte använder pulverbädd bygger på att material deponeras och smälts med en energistråle, se *Figur 2*. Med ett konstant flöde matas materialet, i form av pulver eller tråd, fram ur ett mekatroniskt styrt munstycke. Materialet smälts kontinuerligt ner med en energistråle och svetsas på så sätt fast vid geometrin som byggs upp. Komponenten som byggs svetsas fast i byggplattan och måste avlägsnas från denna.



*Figur 2 visar hur en komponent byggs upp genom att material, här i form av metallpulver, deponeras ur munstycken och svetsas fast på komponenten.*

### 3.1.3 Efterbehandling

Vad som behöver göras med en komponent efter att den lämnat AM-maskinen skiljer sig mellan de olika metoderna. För metoder som arbetar med en pulverbädd brukar ett system för att återvinna det pulver som inte smälts ihop användas. Dessa är i vissa fall en integrerad del av maskinen och i andra en separat modul där pulverbäddslådan kan placeras. I denna används ofta ett dammsugarsystem för att det fortfarande lösa pulvret ska kunna avlägsnas från den tillverkade komponenten.

När enbart bindemedel använts under AM-processen värms först komponenterna upp i en ugn för att bindemedlet ska brännas ur. Efter detta placeras de i en sintringsugn där de sintras ihop och blir färdiga komponenter, vilket beskrivs närmare i kapitel 4.2. I de AM-metoder som använder laser är det vanligt att man placerar komponenterna i en ugn i efterhand för att de spänningar som kan ha uppkommit i materialet ska släppa och för att uppnå högre hårdhet. I de fall där AM-processen har genomförts i hög temperatur finns ofta inget behov att eftervärma och komponenterna kan därför direkt gå till blästring eller andra typer av ytbearbetning.

Komponenter som tillverkats med AM och ska användas i tillämpningar med höga hållfasthetskrav behöver behandlas för att bli av med eventuella porer i materialet. För detta används en efterbehandling som utnyttjar en kombination av högt tryck och temperatur. Tekniken kallas HIP, *Het Isostatisk Pressning*, och beskrivs närmare i kapitel 4.2.

## 4 Teori om bakomliggande tekniker

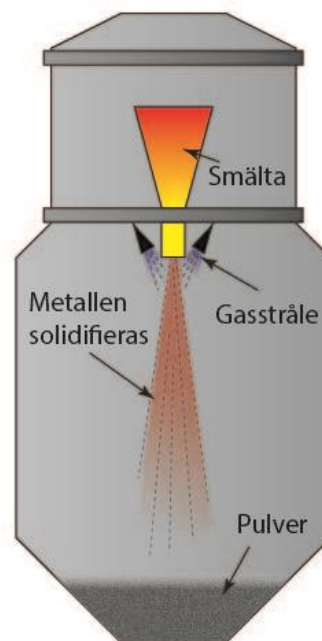
De undersökta AM-metoderna baseras på olika sätt på delar av tidigare kända tillverkningsmetoder. Alla tekniker utom deponering med tråd använder någon form av metallpulver. Därför behövs grundläggande kunskaper om metallpulvertillverkning och pulvermetallurgi. Metoderna Selective Laser Sintering, SLS, och Binder Jetting, BJ, sammanbinder pulvret till komponenter med hjälp av sintring. Övriga metoder - Selective Laser Melting, SLM, Electron Beam Melting, EBM, och Beam Metal Deposition, BMD – sammanbinder pulvret med hjälp av en sorts svetsning. I detta kapitel presenteras därför relevant teori om metallpulver, sintring och svetsning.

### 4.1 Metallpulver

Pulvermetallurgi, det vill säga läran om framställning av metalliska pulver och komponenter från metallpulver, är en välutvecklad gren inom tillverkningstekniken. Slutresultatet hos komponenterna vid de klassiska pulvermetallurgiska teknikerna, så väl som vid de pulverbaserade AM-metoderna, påverkas mycket av vilken typ av pulver som används. Partiklarna kan ha olika form och storlek. Detta beror i sin tur på vilken pulverframställningsmetod som använts. Pulver kan tillverkas genom atomisering eller med mekaniska, elektrolytiska och kemiska metoder. Den mest använda pulverframställningsmetoden är atomisering och det är även den som är vanligast för att tillverka det pulver som används för AM. Grundprincipen för atomisering är att en metallsmälta hålls genom en dysa, där den utsätts för jetströmmar av högt tryck som gör att smältan fördelas i små droppar. Dessa solidifieras till små pulverpartiklar som faller ner till botten av behållaren (Dunkley, 1998). En principskiss på detta kan ses i *Figur 3*.

Jetströmmarna kan vara av vatten eller inert gas, vilket påverkar pulverpartiklarnas form. Vid vattenatomisering fås en oregelbunden pulverform. Detta beror på att vattnet får metallsmältan att stelna fortare än ytspänningen hinner göra så att droppen antar en sfärisk form. Vattenatomisering brukar också leda till en högre syrehalt i pulvret. Därför lämpar sig inte vattenatomisering för reaktiva metaller. Vid gasatomisering stelnar partiklarna långsammare och får därför en sfärisk form. Det blir också mycket färre oxider i pulvret än vid vattenatomisering. Ett tredje alternativ är plasmaatomisering, vilket fungerar på liknande sätt, men istället för en smälta som solidifieras, så matas en tråd fram. Denna tråd smälts sedan och pulveriseras av två plasmabrännare. Denna process ger det renaste och mest sfäriska pulvret, därför passar plasmaatomisering för mycket reaktiva metaller. Vattenatomisering är den billigaste framställningsmetoden, medan gas- och plasmaatomisering är betydligt mycket dyrare. Dock gör de höga kraven på pulverkvalitet vid AM att de dyrare metoderna ändå används (Anthony & Reddy, 2003).

En annan faktor som påverkar resultatet är partikelstorleken på pulvret. Liten pulverstorlek är bra för att minska risken för inneslutningar, samt för att möjliggöra tunnare och jämnare lager. Pulver med liten partikelstorlek är dock dyrare att framställa och därför görs alltid avvägning av vilken storlek som behövs.

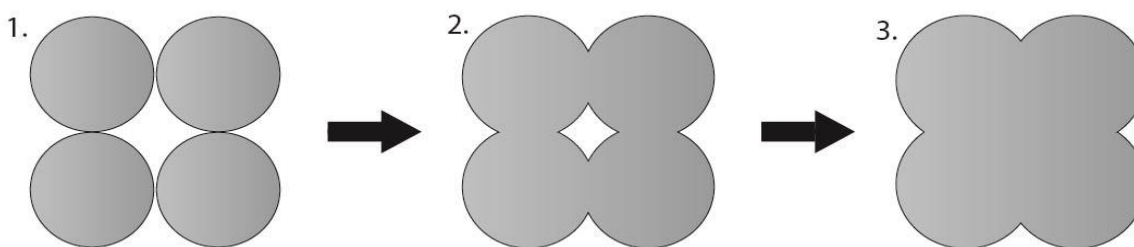


*Figur 3 visar en smält- och atomiseringskammare, där smältan rinner genom en dysa och utsätts för strålar av gas för att sedan ansamlas i botten av atomiseringskammaren.*

## 4.2 Sintring

Sintring är en metod för att skapa komponenter av pulverkroppar utan att basmetallen i metallpulvret smälts. Genom att temperaturen i en sintringsugn höjs, oftast så att den ligger en liten bit under legeringens lägsta smälttemperatur, påskyndas diffusion mellan partiklarna. Atomer vandrar över partikelgränserna och pulverkroppen bildar en solid komponent.

Atmosfären i ugnen utgörs av en gas där val av gas beror på vilket material som sintras. Temperaturen i ugnen anpassas också efter materialet, men alla sintringsugnar följer samma process. Grönkropparna som består av pulver som sammanfogats med tryck eller bindemedel placeras i ugnen. I det första steget bränns eventuellt bindemedel bort. Detta kan även göras i en separat ugn. I det andra steget sker själva sintringen då partiklarna bildar den solida komponenten, se *Figur 4*. Om komponenten inte värms till full smältning kan det finnas porer kvar i materialet, och metallens fulla densitet kommer inte att uppnås. I det tredje och sista steget kyls komponenterna ner och är därefter klara. Beroende på hur väl sammanpressad grönkroppen blivit innan sintringen kommer en viss grad av krympning att ske. Krympningen beror också av materialet och behöver tas med i beräkningen vid förberedelserna (Fergusson & German, 1998)



*Figur 4 visar hur pulverpartiklar som ligger packade (1) vid värmning kommer att skapa sintringshalsar (2) och ett sintrat material med porer kommer att skapas. Vid fortsatt värmning (3) fortgår diffusionen och porerna minskar eller försvinner helt.*

Ett sätt att undvika krympning är infiltrering av en annan metall med lägre smältpunkt. Denna metall fyller då porerna i den komponent som sammanpressats av basmetallen innan sintringen. På detta sätt får komponenten högre densitet och krymper inte under sintringen (Goetzel, 1998). Nackdelen med infiltration för ökad densitet är att det oftast blir dyrare då materialkostnaden för den infiltrerande metallen ofta är högre. Det infiltrerande materialet blir också oftast det som sätter gränserna för komponentens prestanda. Därför är infiltration främst att föredra då den infiltrerande metallen ger komponenten speciella önskvärda egenskaper.

De vanligaste pulvermetallurgimetoderna för att tillverka komponenter är konventionell Press och Sintring (P&S), Metal Injection Molding (MIM) och Hot Isostatic Pressing (HIP). De två första går ut på att metallpulver, ofta tillsammans med bindemedel, pressas samman och bildar en så kallad grönkropp. Vid konventionell press och sintring sker sammanpressningen mekaniskt, medan den vid MIM sker genom att pulverblandningen sprutas in i en form. Den sammanpressade pulverkroppen, grönkroppen, som fås med P&S och MIM sintras för att uppnå full styrka och blir en färdig komponent. För HIP placeras pulvret i en form, där det under högt tryck pressas samman till en färdig komponent. Med denna teknik uppnås full densitet direkt. Med begreppet full densitet menas att förekomsten av porer i materialet är väldigt låg, på gränsen till obefintlig. De porer som ändå tenderar att uppstå i varierande grad kan bland annat bero på gaser som innesluts när materialet stelnar, kemiska reaktioner i materialet som ger oxider när det värms upp, eller föroreningar i processen. Tillverkning av nya komponenter med HIP ska inte förväxlas med HIP som efterbehandling. Som efterbehandling används HIP genom att en komponent som tillverkats på annat sätt utsätts för mycket högt tryck för att bli av med porer i materialet. Detta är dyrt och används bara då mycket höga prestandakrav ställs på komponenten (Fergusson & German, 1998).

### **4.3 Svetsning**

Tre av de metoder som omskrivs i arbetet sammanfogar material genom fullständig smältning. Detta leder till att komponenterna i viss mån utsätts för fenomen som traditionellt förknippas med svetsning. De svetsmetoder som har flest likheter med de AM-metoder som beskrivs i arbetet är elektronstrålesvetsning, som har vissa likheter med EBM, och lasersvetsning, som påminner om SLM samt BMD. Därför kommer tekniska likheter, skillnader och gemensamma fenomen översiktligt att diskuteras nedan.

#### **4.3.1 Likheter mellan svetsning och additiv tillverkning**

De partiklar som i de nämnda AM-processerna ska utgöra komponenten smälts fullständigt och en jämförelse kan göras med smältan som uppstår vid svetsning. Omkringliggande pulver i de metoder som använder pulverbädd kan till viss del liknas med den värmepåverkade zonen, där pulvrets egenskaper i nära anslutning till smältan påverkas av att befinna sig i ett uppvärmt tillstånd.

#### **4.3.2 Skillnader mellan svetsning och additiv tillverkning**

En betydande skillnad mellan pulverbäddsteknikerna – EBM och SLM – jämfört med vanlig svetsning är att svetsning utförs på ett redan färdigproducerat material medan AM-metoderna istället utgår från ett råmaterial. Dessa tekniker har alltså inget “utgångsmaterial” i den traditionella bemärkelse som svetsning är beroende av. Vid svetsning är utgångsmaterialet nästan uteslutande solida komponenter, medan AM-teknikerna utgår från små pulverpartiklar som snarare är att betrakta som en fluid. Detta är viktiga skillnader, då man vid svetsning ofta negativt påverkar de mekaniska egenskaperna hos redan färdiga komponenter, samtidigt som AM-processerna används vid tillverkning för att ge en komponent dess mekaniska egenskaper. De materialtekniska nackdelar som kan förknippas med svetsning är därför inte direkt överförbara till AM-processerna.

#### **4.3.3 Gemensamma fenomen med additiv tillverkning**

Trots olika syften och förutsättningar vid svetsning och komponenttillverkning med AM så uppstår vissa jämförbara fenomen. Inneslutningar och porositeter i smältan är ett problem som i båda fallen måste hanteras. Inneslutningar uppstår när exempelvis oxider bildas vid kraftig uppvärmning och innesluts i smältan (Kalpakjian, et al., 2007). Oxiderna skapar inhomogenitet i materialet och kan ge upphov till spänningskoncentrationer eller bidra till korrosionsproblem och på så vis försämra de mekaniska egenskaperna för svetsen eller komponenten.

Ofullständig sammanfogning är ett annat gemensamt problem, men tillvägagångssättet för att hantera detta skiljer sig något. I additiv tillverkning måste parametrar rörande laserns eller elektronstrålens styrka, fokusdjup och skanningshastighet kontrolleras för att motverka problemet.

Som vid de flesta typerna av stålbearbetning uppkommer restspänningar vid svetsning och AM. Problemen kan bli extra stora i just dessa två fall då mycket värme krävs och denna värme fokuseras väldigt lokalt. Samtidigt är avsvalningshastigheterna höga; för BMD fås ofta avsvälning på 1000-5000°C/s (Gibson, et al., 2010). Restspänningarna kan ge upphov till distorsioner, sprickor och försämrad utmattningsbeständighet (Kalpakjian, et al., 2007).

## 5 Metoder för additiv tillverkning i metall

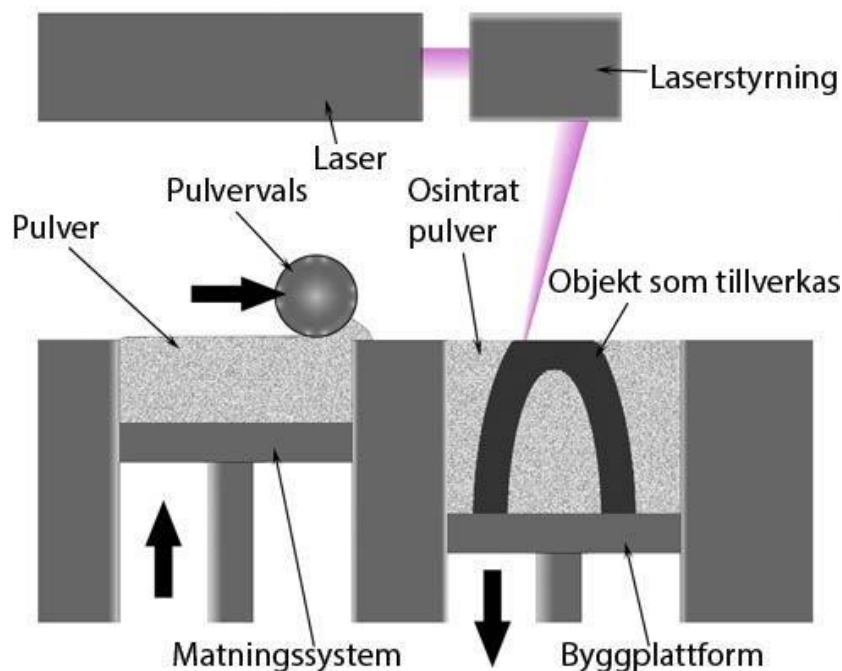
I detta kapitel ges en djupare beskrivning av de vanligaste metoderna för AM i metall. Varje del är upplagd sådan att en övergripande förklaring av hur metoden fungerar presenteras först. Därefter ges en kort beskrivning av historia och marknadsvariation för att sedan gå in på mer detaljer, så som begränsningar, material, maskinparametrar och vanliga tillämpningar.

Med anledning av de många likheterna mellan *Selective Laser Sintering* och *Selective Laser Melting* grupperas dessa ihop i ett kapitel.

### 5.1 Selective Laser Sintering och Selective Laser Melting

*Selective Laser Sintering* samt *Selective Laser Melting*, förkortat till SLS respektive SLM, är två additiva tillverkningstekniker som använder pulverbädd vid konstruktion av komponenter. Pulvret sintras eller smälts samman till den tänkta komponenten med hjälp av en laser i en atmosfär av inert gas. I *Figur 5* visas en principskiss av en SLS-maskin. I figuren ses byggvolymen täckt av pulver, vilket alltså utgör pulverbädden. Vidare ses matningsbädden till vänster och den roterande vals som distribuerar pulvret över pulverbädden för varje nytt lager.

Som namnet antyder så sintras pulvret i en *Selective Laser Sintering*-maskin, i enlighet med beskrivningen i kapitel 4.2. SLM-maskiner smälter däremot pulvret fullständigt, i likhet med en svetsoperation. Trots att de rent maskintekniska skillnaderna är små, så är de materialtekniska aspekterna hos slutprodukten ändå såpass betydande att båda teknikerna diskuteras i mer ingående detalj.



*Figur 5* visar en principskiss för komponenttillverkning i en SLS-maskin. I denna används en roterande vals för att distribuera pulver över bygglattan mellan de olika lagren. Det osintrade pulvret kan eventuellt återanvändas efter processen, men i figuren syns inget automatiskt system för detta. Användargränssnittet till datorn som styr optiken och därmed utgör laserstyrningssystemet utgörs ofta av en inbyggd skärm och inte heller denna ses i figuren.

### 5.1.1 Historia för Selective Laser Sintering

SLS utvecklades för framställning av polymera komponenter vid University of Texas, Austin, USA under mitten av 80-talet och kommersialiserades först av DTM Corporation (numera 3D Systems) i USA år 1992 (Grosvenor & Lou, 2012). Tre år efter detta lanserade det tyska företaget EOS den första kommersiella maskinen för metaller. De kallade tekniken för Direct Metal Laser Sintering (DMLS) och inledningsvis låg fokus på att tillverka verktyg för andra industrier (Shellabear, 2004). Denna ursprungliga maskin använde en sammanfogningsteknik som kallas för smältfassintring (Gibson, 2010, s.122), vilken beskrivs i detalj senare i arbetet. Idag tillverkar de flesta företagen, inklusive de ovan nämnda, maskiner som smälter metaller fullständigt. Det finns dock fortfarande företag vars maskiner sintrar metallpulver. Till exempel kan nämnas franska Phenix Systems SA, som enligt sin hemsida använder en teknik kallad sintring i fast fas, vilken kommer diskuteras vidare i kapitel 5.1.5.

### 5.1.2 Historia för Selective Laser Melting

Utvecklingen av SLM tog fart under mitten av 90-talet genom ett samarbete mellan Fraunhoferinstituten ILP och IPT, EOS och ytterligare ett antal företag (Shellabear, 2004). Patent DE1996149865, vilket utgjorde grunden för de första SLM-maskinerna, beviljades år 1998 (Google Patents). Först ut att tillverka en maskin för SLM var Dr. Dieter Schwarze och Dr. Matthias Fockele vid Fraunhofer Institute for Laser Technology i Aachen, Tyskland. Företaget F&S Stereolithographietechnik GmbH bildades för att vidareutveckla tekniken. Det kom dock att dröja till år 2000 innan tekniken lanserades på marknaden via ett samarbete mellan F&S Stereolithographietechnik GmbH och MCP HEK GmbH (Scribner, 2013). Den del av MCP Group som fokuserade på additiv tillverkning kom senare att döpas om till MTT Technologies Group, som i sin tur efter gemensam överenskommelse delade upp sin brittiska och tyska avdelning i MTT Technologies Ltd, respektive MTT Technologies GmbH. Den brittiska filialen köptes upp av Renishaw plc (Renishaw, 2011), medan den tyska filialen har döpts om till SLM Solutions GmbH (SLM Solutions, 2015). Den ena av de ursprungliga utvecklarna, Dr. Dieter Schwarze jobbar idag för SLM Solutions GmbH, medan Dr. Matthias Fockele har startat ett konkurrerande företag vid namn Realizer GmbH (Scribner, 2013).

De största aktörerna på marknaden, enligt 2012 år försäljningsstatistik, är 3D Systems, EOS och det tyska företaget Concept Laser GmbH (Scribner, 2013). Det bör dock påpekas att 3D Systems och EOS även säljer maskiner för tillverkning i plast, vilket i helhet höjer deras omsättning.

### 5.1.3 Variationer över marknaden

Bland maskiner på marknaden kan ett antal variationer ses, exempelvis olika storlekar på byggkammare, där större byggkammare oftast har kraftigare laser för att hålla nere produktionstiderna. Vissa system har även flera lasrar för att påskynda processen. Olika system har även varierande grader av automation. Mindre varianter har ofta processer som sköts manuellt, där byte av platta, avlägsnande och eventuell återanvändning av överblivet pulver sköts av en operatör. Större maskiner har ofta inbyggda system för gastillförsel samtidigt som utbyte av byggplatta och återanvändning av material kan ske automatiserat. Även metod för pulverdistribution skiljer sig mellan olika tillverkare, där vanliga tekniker är en motroterande vals (Gibson, et al., 2010) eller en raka (Shellabear, 2004).

### 5.1.4 Beskrivning av processen

Tillverkningsprocessen börjar med att byggplattformen täcks av det material som skall användas och en inert gas, ofta argon eller kväve, fyller byggkammaren. När ett lager är färdigsintrat eller färdigsmält så sänks byggplattan en lagertjocklek och nytt pulver distribueras från matningskassetten. Denna process upprepas sedan tills alla tvådimensionella tvärsnitt har sintrats eller smälts och därmed är den tredimensionella komponenten färdig. När detta skett plockas byggplattan ut ur maskinen och eventuell

stödstruktur avlägsnas (Gibson, 2010, s.103). Byggplattorna måste vara helt plana för att processen ska fungera, det är därför vanligt att dessa slipas om för att kunna användas igen. Det är vanligt att kraven på komponenterna är såpass stora att efterbehandling krävs. Värmebehandling och blästring kan då vara aktuellt för att få den hållfasthet och ytfinitet som eftersträvas. Vissa sammanfogningstekniker kan ge en densitet runt 99%, och värmebehandling är därför inte alltid nödvändig av den orsaken (Fraunhofer ILT, 2014). Däremot uppstår ofta starka termiska spänningar i komponenterna eftersom den värmepåverkade zonen generellt är mycket liten. Dessa termiska spänningar är även en av orsakerna till att robusta byggplattor och stödstrukturer kan behövas för att motverka deformationer i komponenten till följd av spänningarna.

### 5.1.5 Sintring i fast fas

Sintringen som är aktuell vid SLS kan delas upp i tre undergrupper: sintring i fast fas, kemisk bindning och smältfas-sintring. De grupper som är relevanta för detta arbete är den första och sista gruppen, alltså sintring i fast- och smält fas.

Sintring i fast fas är den som oftast syftas på vid tal om sintring som ett generellt begrepp. Det är dock den minst använda formen av sintring när det talas om AM i SLS-maskiner. Sintring i fast fas innebär, som beskrivs i kapitel 4.2, att pulver hettas upp och så kallad sintringshals som sammanbinder närliggande partiklar uppkommer. Detta sker i ett temperaturintervall mellan cirka halva smälttemperaturen för materialet till strax under denna. Förenklat kan sägas att minskning av den fria energin då blir den starkast drivande kraften för de sammanfogade partiklarna och på detta sätt uppstår bindningen som håller samman komponenten (Kruth, 2005). Fördelar med denna teknik är att den fungerar för väldigt många material om temperaturen bara är tillräckligt hög. Diffusion i sig är dock en ganska långsam process och det ställs därför höga krav på uppvärmning av pulvret för att få acceptabla bygghastigheter. Phenix Systems är en av de aktörer som tillämpar denna teknik och deras byggkammare kan, enligt Kruth (2005), nå temperaturer upp till 900°C, där en laser sedan ser till att värma materialet till den grad att sintring sker enligt vad CAD-modellen angett.

Det finns dock betydande nackdelar med att använda denna teknik, enligt Gibson (2010). Sintringen sker snabbare ju mindre pulverpartiklarna är och mindre pulver betyder högre materialkostnader. Som tidigare nämnt så sker denna sintring också snabbare vid högre temperaturer och att hålla byggkammaren varm under en längre tid medför vissa problem. Optimal diffusionshastighet uppnås nära smältpunkten för materialet, men denna höga temperatur påverkar även det pulver som finns i byggkammaren som egentligen inte är avsett att utgöra en del av den producerade komponenten. Värmen från lasern påverkar bland annat det pulver som är i anslutning till komponentens konturer via värmeledning. Detta kan leda till att pulver sintras i större utsträckning än avsett och man får på så sätt ett skal runt sin komponent, som måste bearbetas. Parametrar så som lägre temperatur i byggkammaren, kompensation i CAD-modellen och justering av lasern kan dock minska denna skalbildning.

Material som ligger utanför skalbildningszonen kan även påverkas av temperaturen och sammanfogas. Fenomenet kallas för lössintring och kan påverka det närliggande pulvrets partikelstorlek. Som tidigare nämnt så ökar sintringshastigheten vid små pulverpartiklar och lössintring är därför generellt att anse som icke önskvärd i SLS-maskiner. Lössintringen kan dock påverka komponenten på ett positivt sätt, då bädden får en något högre brottgräns och deformationsmotstånd. På så vis minskar riskerna för att komponenten deformeras under tillverkningen.

Gibson (2010) påpekar också att andra problem förknippade med sintring i fast fas är att komponenterna sällan blir helt kompakta och inneslutningar eller porositet ofta uppstår i komponenten om den inte efterbehandlas på ett korrekt sätt. Detta kan dock avhjälpas till viss del genom att till exempel behålla komponenten i byggkammaren efter färdigställandet eller på andra sätt värmebehandla så att korntillväxt sker och materialdensiteten i komponenten ökar. Korntillväxt i materialet vid en hög omgivningstemperatur kan antingen vara ett problem eller en fördel, beroende av vad som efterfrågas hos



komponenten. De nedersta lagren utsätts för denna förhöjda temperatur under längre tid än de övre och detta kan leda till en komponent som har högre densitet i de delar som produceras först. Detta behöver dock inte enbart vara negativt då viss mått av styrning finns och man således kan konstruera produkter där man efterfrågar en ojämn densitet.

Kemisk bindning har hittills främst utförts i akademiska syften och framför allt har keramer studerats, exempelvis vid Fraunhofer Institute for Production Technology (Kruth, 2005). Då tekniken inte är aktuell för industriella syften kommer den inte beskrivas vidare (Gibson, 2010, s.108).

### 5.1.6 Smältfassintring

Vanligare vid tillverkning av metallkomponenter via sintring är smältfas-sintring, som i vissa fall kallas för delvis smältning eller *partial melting*. Tekniken går ut på att pulvret delvis smälts, medan andra delar behåller sin fasta fas och sintras i den klassiska bemärkelsen. Detta för att smältan ska sammanbinda de sintrade delarna av komponenten. En fördel med detta tillvägagångssätt är att metaller med höga smältpunkter kan sintras och sedan bindas samman av material med lägre smältpunkt. Denna procedur kan användas för en mängd olika typer av pulver och uppdelningen av dessa kommer ske på samma sätt som föreslagits av Kruth (2005).

Ena huvudgruppen består av pulver med ett distinkt bindemedel och den andra gruppen utgörs av pulver som antingen saknar bindemedel eller där den del som bidrar till bindningen är mer svårdefinierad. Pulver som har ett tydlig bindande komponent kan i sin tur delas upp i tre separata grupper enligt följande: material med separata bindemedelspartiklar, kompositpartiklar och belagda partiklar. Den första av dessa grupper innehåller således två separata material som pulveriserats och sammanförts till en homogen blandning. Det ena har till uppgift att utgöra strukturen för komponenten medan det andra ämnet har lägre smältpunkt och avser att sammanbinda de sintrade partitionerna. Vid tillverkning i metall kan bindemedlet vara en polymer, keram eller annan metall. Nästa grupp av pulver består av kompositpartiklar där partiklarna består av en sammansättning av både det strukturella materialet och bindemedlet. Pulver av denna typ ger ofta komponenter med bättre ytfinhet. Även denna typ av pulver kan ha en polymer, keram eller metall som bindemedel. Den sista av dessa undergrupper består av belagda partiklar, där metallpartiklar innesluts av det material som ska utgöra bindemedel. Detta kan bland annat ge bättre flödeskaraktäristik, vilket är fördelaktigt vid exempelvis distribution av nya lager. Materialtypen kan även bidra till komponenter där det strukturella ämnet binds samman ännu mer effektivt än vid användande av de andra materialtyperna. Slutligen så kan de belagda partiklarna även absorbera energin från lasern bättre än icke-belagda och detta innebär att mindre energi går till spillo samtidigt som bygghastigheterna tenderar att öka (Gibson, 2010, s.108).

De pulvertyper som saknar bindemedel består av ett enda material där framförallt parametrarna skanningshastighet, lasereffekt och skanningsmönster används för att smälta materialet på utvalda ställen och andra parameterset används i andra delar av snittet för att enbart sintra materialet. Samma mekanism kan även användas när legeringar har beståndsdelar med en lägre smältpunkt. Genom att styra processparametrarna runt smältpunkten på legeringens beståndsdelar fås delvis smältning av legeringen och områden i pulvret som innehåller större beståndsdel av komponenten med lägst smältpunkt tenderar att smälta först. På så vis kan man styra processen till att ge delvis smältning (Gibson, 2010, s.112).

### 5.1.7 Fullständig smältning

En avsikt att producera komponenter som inte behöver värmebehandlas för att uppnå fullständig densitet låg bakom utvecklingen av *Selective Laser Melting*. Vid SLM omvandlas alltså allt pulver som ska ingå i komponenten från fast fas till flytande när lasern appliceras (Gibson, et al., 2010). Den snabba uppvärmningen och avsvälningen av metallen leder till materialegenskaper som skiljer sig från de som uppstår vid konventionell gjutning eller smide. Ofta kan de mekaniska egenskaperna som fås vid SLM mäta sig med andra framställningsformer och kan ibland även bli bättre (Nannan & Ming, 2013).

Skillnaden mellan delvis smältning och fullständig smältning är ganska liten och teoretiskt sett kan de flesta av de ovanstående sammanfogningsteknikerna uppnås med merparten av de kommersiella maskinerna som finns idag. Vid framställning av metallkomponenter är fullständig smältning klart dominerande idag, trots att SLS eller andra namn som innefattar sintring ofta används (Gibson, et al., 2010).

### 5.1.8 Begränsningar

Principiellt finns få begränsningar gällande vilka material som kan användas. Då produktionen sker i en atmosfär av inert gas så kan material som är reaktiva vid uppvärmning i vanlig atmosfär användas, samtidigt som lasereffekten i de större maskinerna är kraftiga nog att sintra eller smälta material med hög smälttemperatur såsom volfram. Vad som däremot är begränsande är de höga utvecklingskostnader som förknippas med framtagning av användbara parametrar för materialen. Möjligheten till användbara processparametrar är något mindre vid SLM-processer eftersom vissa problem är förknippade med de höga energinivåerna som krävs för att fullständigt smälta materialet (Nannan & Ming, 2013). Bland annat finns det tendenser till högre inbyggda spänningar, vilket kan leda till deformationer i komponenterna. Dessutom kan smältan bli diskontinuerlig, då de höga energinivåerna leder till att små sfärer av smälta bildas istället för en sammanhängande smältpool. Detta fenomen kallas för *balling* i den engelska litteraturen (Gibson, 2010, s.136). På grund av utvecklingskostnaderna är de för serieproduktion användbara materialen än så länge begränsade till de som kan utläsas i *Tabell 3* nedan. För SLS hittades inga specificerade legeringar, varför dessa har utelämnats. Övriga SLM-företag som nämnts kan konstruera i några av de material som finns i tabellen. Av utrymmesskäl nämns dock inte alla i kolumnen ”Företag”. Det bör även tilläggas att de sätt att identifiera legeringarna, som ses i tabellen nedan, är baserade på tillgänglig information från tillverkarna och därför inte helt konsekvent.

*Tabell 3 visar vilka material som kan användas i SLM-maskiner.*

| Material                    | Legering                             | Företag           |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| <b>Aluminiumlegering</b>    | AlSi10Mg                             | EOS               |
|                             | CL 30AL (AlSi12)                     | Concept Laser     |
|                             | CL 31AL (AlSi10Mg)                   | Concept Laser     |
| <b>Bronslegering</b>        | CL 80CU                              | Concept Laser     |
| <b>Kobolt-Krom-Molybden</b> | MP1 (UNS R31538)                     | EOS               |
|                             | SP2 (certifierat enligt CE0537)      | EOS               |
| <b>Kobolt-Krom-Volfram</b>  | remanium® star CL (EN ISO 9693)      | Concept Laser     |
| <b>Nickellegering</b>       | HX (UNS N06002)                      | EOS               |
|                             | IN625 (UNS N06225)                   | EOS/Concept Laser |
|                             | IN718 (UNS N07718)                   | EOS/Concept Laser |
| <b>Rostfritt stål</b>       | GP1 (1.4542)                         | EOS               |
|                             | PH1 (UNS S15500)                     | EOS               |
|                             | 316L (UNS S31673)                    | EOS               |
|                             | CL 20ES (1.4404)                     | Concept Laser     |
|                             | CL 91RW                              | Concept Laser     |
|                             | CL 92PH (UNS S17400)                 | Concept Laser     |
| <b>Titan</b>                | Ti64 (Ti6Al4V)                       | EOS               |
|                             | Ti64ELI (Ti6Al4V)                    | EOS               |
|                             | CL 41TI (Ti6Al4V enl. ASTM F136-02a) | Concept Laser     |
|                             | CL 42TI (ASTM F67 och ASTM B348)     | Concept Laser     |
|                             | rematitan® CL (EN ISO 9693)          | Concept Laser     |
| <b>Verktysstål</b>          | MS1/CL 50WS (1.2709)                 | EOS/Concept Laser |

### 5.1.9 Parametrar

De påverkbara maskinparametrarna kan delas upp i laser-, skannings-, pulver- och atmosfärrelaterade (Gibson, 2010, s.133). Bland de laserrelaterade kan nämnas lasereffekt och fokusdiameter, medan skanningsparametrar består i exempelvis skanningshastighet och skanningsmönster. Som tidigare nämnts så finns det många pulverrelaterade parametrar att beakta, men flertalet av de avvägningar som måste göras sker innan pulvret har nått maskinen. Väl i maskinen är lagertjockleken den främsta pulverrelaterade parametern som kan justeras. För ett fullgott resultat krävs även noga kontroll av atmosfären i byggkammaren, där aspekter som kammartemperatur, luftfuktighet och gaskoncentration är viktiga.

Om dessa parametrar kan nämnas att tjockare lager leder till snabbare uppbyggnad, men även sämre detaljprecision. Det samma gäller för högre lasereffekt och skanningshastighet, vilka leder till snabbare byggprocess men samtidigt att komponentkvalitén försämras. För hög hastighet kan ge otillräcklig sintring och för hög lasereffekt kan ge komponenten ytdefekter. Olika mönster för hur lasern appliceras används bland annat för att minska de termiska spänningar som byggs in i komponenterna, samtidigt som de kan ge en ökad produktionshastighet eftersom materialet inte riskerar att överhettas. Vissa system erbjuder även fotografering av varje enskilt lager för kvalitetskontroll. I *Tabell 4* följer en sammanställning över de parameterspann som finns på marknaden idag. Det ska dock noteras att det finns en mängd olika aktörer som ofta erbjuder flera olika maskiner som alla har olika spann. Därför kan inte alla kombinationer av värden uppnås. De som ses nedan är extremvärden tagna från de största tillverkarna och priserna är beräknade utgående från rådande valutakurs (Scribner, 2013).

*Tabell 4 sammanställer data för SLS- respektive SLM-maskiner.*

|                                         | SLS                         | SLM                       |
|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>Bygghastighet [cm<sup>3</sup>/h]</b> | i.u.                        | 1-120                     |
| <b>Energibehov [kW]</b>                 | 3 - 15                      | 1 – 20,2                  |
| <b>Lagertjocklek [µm]</b>               | 20+                         | 15-200                    |
| <b>Pulverdiameter [µm]</b>              | 6-9                         | 10-60                     |
| <b>Fokusdiameter [µm]</b>               | i.u.                        | 20-700                    |
| <b>Strålstyrka [W]</b>                  | 50 - 500                    | 50 – 2x1000               |
| <b>Byggvolym [mm]<br/>(LxWxH)</b>       | 100x100x80 -<br>250x250x300 | 70x70x40 -<br>800x400x500 |
| <b>Detaljfinhet [µm]</b>                | > 20                        | > 40                      |
| <b>Ytfinhet Ra [µm]</b>                 | i.u.                        | i.u.                      |
| <b>Maskinkostnad [miljoner sek]</b>     | ~ 1,2-4,1                   | ~ 1,1-15                  |

### 5.1.10 Tillämpningar

SLS och SLM används i dagsläget mestadels för tillverkning av komponenter där en kombination av en snabb process och hög ytfinhet, relativt många av de andra AM-metoder, krävs. Exempel innefattar bland annat komponenter såsom turbinhjul, bränsleinjektorer och komponenter med inbyggda kylsystem till gasturbiner (Nannan & Ming, 2013). Olika strukturella detaljer till flygplan kan konstruerats i material som klarar krav på de mekaniska egenskaperna men som också har kunnat göras lättare (EOS, 2015). Det finns även en stor marknad för tillverkning av dental- och ortopedikomponenter. Additiv tillverkning används då till specialanpassade kronor och bryggor inom tandvården, samt implantat såsom höftkulor inom sjukvården (Nannan & Ming, 2013). Även smyckesindustrin har i viss omfattning börjat använda sig av SLS, samtidigt som verktyg med specialfunktioner har skapas för tillverkande industrier.

## 5.2 Electron Beam Melting

Electron Beam Melting, eller EBM, är en pulverbäddsteknik som bygger på att en elektronstråle används för att smälta metallpulver. Metoden utmärker sig för att vara snabbare än exempelvis de metoder som använder laser, men att ytor och detaljrikedom då inte håller samma kvalitet (General Electric, 2014).

### 5.2.1 Historia

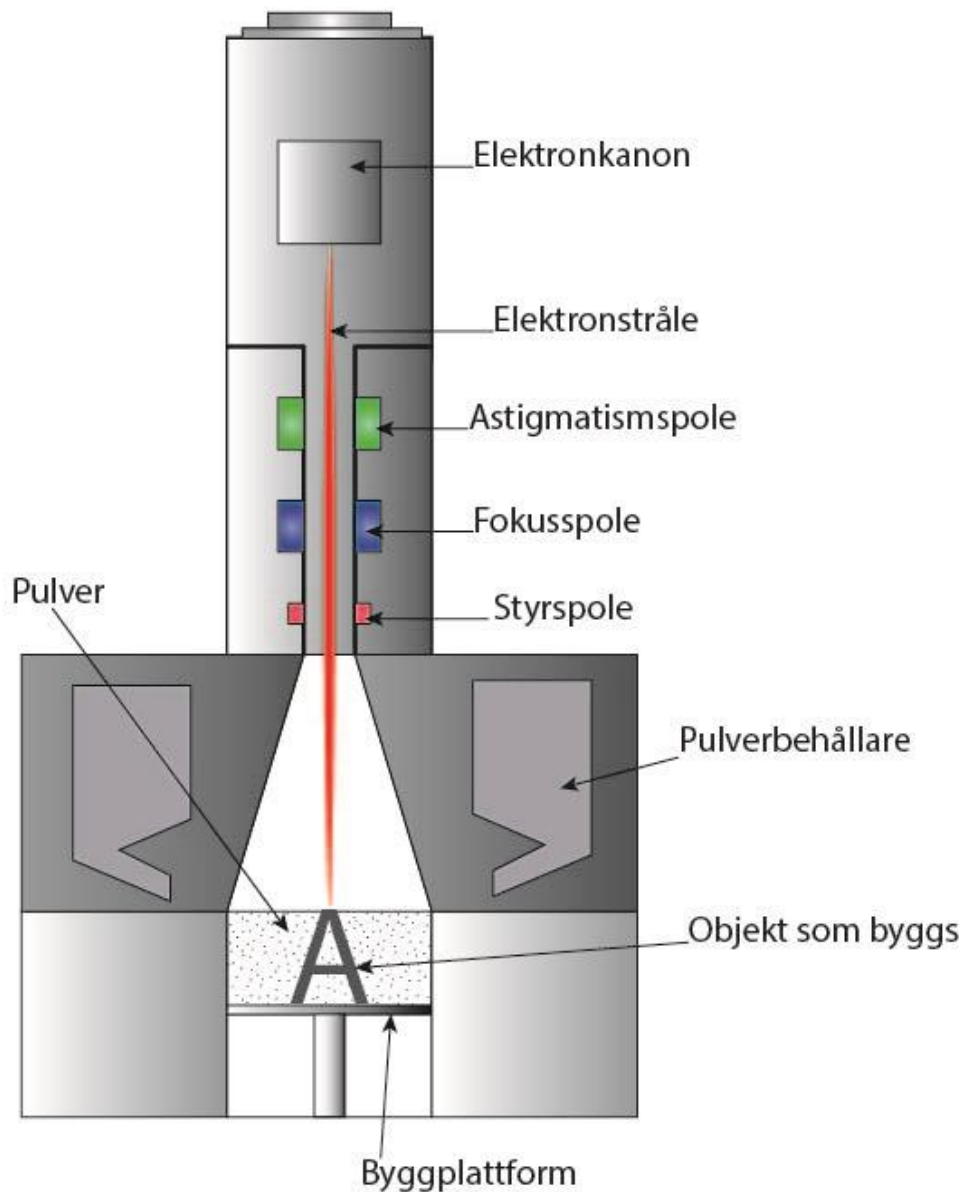
Tekniken utvecklades från 1993, då det första patentet på den tekniken som kom att utvecklas till dagens EBM, togs. Aktiebolaget Arcam grundades 1997 och är sedan dess ensam på marknaden med att utveckla och sälja denna typ av teknik. År 2002 levererades de första maskinerna till klienter och modellen S12 lanserades på EuroMold. År 2007 började Adler Ortho Group använda deras maskiner för att tillverka ett CE-certifierade höftledsimplantat, och flera flygindustriföretag har sedan dess i olika grad börjat använda sig av tekniken. (Arcam, 2015)

### 5.2.2 Teknik

Eftersom tekniken använder sig av en elektronstråle istället för en laser särskiljer den sig på ett antal viktiga sätt. En av dessa skillnader är att en elektronstråle kan styras mycket snabbare än en laserstråle. Detta beror att laserstrålar kontrolleras av speglar som rör sig mekaniskt; ett system som alltid kommer att ha ett tröghetsmoment när det ska förflyttas. Elektronstrålar kan däremot styras med hjälp av elektromagnetiska spolar, och förflyttningen av fokuspunkten kan därför ske med en hastighet över 8000 m/s, vilket i sammanhanget gör att förflyttningstider kan försummas. Detta gör att upp till 100 stycken smältpooler kan vara under värmning samtidigt, genom att strålen med hög effekt värmer de olika platserna sekventiellt. Detta värmningsmönster benämns Multibeam och möjliggör att hög effekt används utan de risker för deformationer som annars kan uppkomma. Eftersom processen använder sig av en relativt stor fokuspunkt och med en hög temperatur på det omgivande materialet skapas inte heller några synliga svetslinjer (Arcam, 2015).

De spolar som används är inte bara till för att flytta fokuspunkten i x- och y-led, utan också en separat spole för att fokusera strålen, samt en spole för att motverka "astigmatism", det vill säga att fokuspunkten inte är cirkulär när fokuspunkten appliceras mot kanterna av byggytan. Astigmatismspolen kan alltså kompensera fokuspunkten på ett sådant sätt att den inte blir elliptisk när strålen träffar pulvret i något annat än en rät vinkel. I *Figur 6* visas en schematisk bild av hur denna typ av maskin är uppbyggd och i *Tabell 5* redovisas data kring dessa maskiner.

Då många parametrar kan ändras snabbt ges också möjligheten att manipulera vilken mikrostruktur och därför även vilka egenskaper materialet får i olika delar av komponenten. Exempel på vad detta skulle kunna åstadkomma är komponenter som har högre styvhet i vissa delar av komponenten, men mer flexibilitet i andra delar (Oak Ridge National Laboratory, 2014).



Figur 6 visar hur elektronstrålen i en EBM-maskin går igenom en astigmatism-, fokus- och styrspole innan den träffar det pulver som ska smältas. I den nedre delen av figuren visas den byggplattform som sänks ner för varje lager som byggs.

Tabell 5 sammanställer data för EBM-maskiner.

|                                    | EBM                         |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Bygghastighet [cm <sup>3</sup> /h] | 55 – 80                     |
| Energibehov [kW]                   | < 7                         |
| Lagertjocklek [μm]                 | 50-100                      |
| Pulverdiameter [μm]                | 50-100                      |
| Fokusdiameter [μm]                 | 180                         |
| Strålstyrka [W]                    | < 3000                      |
| Byggvolym [mm] (LxWxH)             | 200x200x380<br>- 350(∅)x380 |
| Detaljfinhet [μm]                  | > 180                       |
| Ytfinhet Ra [μm]                   | > 25                        |
| Maskinkostnad [miljoner sek]       | ~ 5-15                      |

### 5.2.3 Begränsningar

En viktig skillnad som uppstår mellan de maskiner som använder laser och de som använder elektronstråle är att elektronstrålen störs av gaser, och därför krävs en evakuerad kammare med mycket lågt tryck för att processen ska fungera. Detta medför ofta extra komplexitet för att det låga trycket ska kunna hållas, samt att processen kan behöva längre ställtid i början och slutet av processen, då atmosfärens tryck ska ändras.

En annan viktig aspekt vid användandet av elektronstråle är att pulvret som används måste ha en god ledningsförmåga, då det i praktiken måste skapas en elektrisk ström från fokuspunkten och ner i jordningen i maskinen. Om detta inte uppnås kommer fokuspunkten att störas av att smältpoolen blir negativt laddad, och därför repellerar de inkommande elektronerna, vilket leder till sämre precision. En annan värre konsekvens som kan uppkomma är att de repellerande krafterna mellan de negativt laddade pulverpartiklarna blir så stor att de frigörs från pulverbädden och sprids som damm i byggkammaren. Detta kan i sin tur störa både olika typer av sensorer, men också sprida sig upp i elektronkanonen, och på så sätt skada maskinen. En faktor som ökar ledningsförmågan genom pulvret är att värme appliceras jämnt på varje lager, vilket innebär att även pulver som inte smälts kommer att sintras lätt och därför bli hårdare. På grund av aspekten av ledningsförmåga kommer EBM heller aldrig att kunna användas för icke ledande material, som polymerer eller keramer. (Mahale, 2009)

De material som kan användas i EBM-maskiner presenteras i Tabell 6. Det bör noteras att de fyra första materialen i listan av Arcam kallas för "standardmaterial", vilket betyder att de bland annat verifierat egenskaperna hos de byggda komponenterna. Inconel 718, som alltså inte är ett standardmaterial, rekommenderas också för användning i maskinmodellen A2X, då den är bättre anpassad för arbete i mycket höga temperaturer.

Tabell 6 beskriver vilka material som kan användas i EBM-maskiner.

| Material              | Företag |
|-----------------------|---------|
| Titan Ti6Al4V         | Arcam   |
| Titan Ti6Al4V ELI     | Arcam   |
| Titan Grade 2         | Arcam   |
| Kobolt-Krom, ASTM F75 | Arcam   |
| Inconel 718           | Arcam   |

#### 5.2.4 Tillämpningar

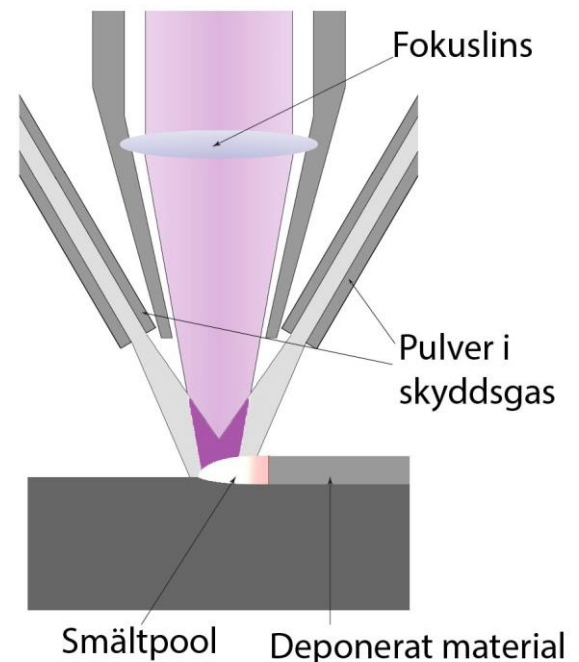
EBM har med få undantag hittat tillämpningsområden inom tillverkning av medicinska implantat samt komponenter för aerospaceindustrin. Detta beror dels på det att maskinernas varma process leder till en viss sintring av omkringliggande pulver, vilket möjliggör att komponenter staplas. På så sätt kan en hel byggvolym fyllas med mindre komponenter, och den totala produktionstiden per komponent kan på så sätt bli låg. Detta blir speciellt fördelaktigt vid tillverkning av höftledskoppar, då dessa på grund av sin skålförm även kan staplas överlappande i varandra. Då titan är ett fördelaktigt ämne att använda till bland annat medicinska implantat på grund av dess förmåga till osseointegration, det vill säga skapandet av en strukturell förbindelse till mänskligt ben, är det just det som Arcam utarbetat parameterset till.

Vad gäller aerospaceindustrin gör teknikens förmåga att relativt snabbt tillverka stora komponenter att exempelvis turbinblad blir rimliga att tillverka på detta sätt. Eftersom dessa komponenter måste efterbearbetas till en hög ytfinhet oavsett tillverkningsteknik blir de grova ytor som fås av EBM inte upphov till en extra kostnad (Nannan & Ming, 2013).

### 5.3 Beam Metal Deposition

En metod som inte använder pulverbädd kommer i detta arbete kallas för Beam Metal Deposition, förkortat BMD. Detta är inte en standardiserad beteckning, vilket gör att många olika förkortningar används för att beskriva denna metod av additiv tillverkning. Andra beteckningar på tekniken som tillhör de mest vanliga är: Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD®), LasForm, Laser Engineered Net Shaping (LENS®), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM®).

Beam Metal Deposition går ut på att ett metallpulver eller en metalltråd matas in med skyddsgas i en högenergetisk stråle. Genomsnittet av ett typiskt munstycke för pulverdeponering kan ses i *Figur 7*. Metallen smälts av energistrålen och smältan distribueras över antingen en byggplatta eller en färdig geometri, via ett 3- till 5-axligt mekatroniskt system. Det fleraxliga systemet uppnås antingen genom att deponeringshuvudet, byggbordet eller båda två rör sig i förhållande till varandra. När första lagret smälta har stelnat, så adderas nästa lager fram till dess att komponenten är färdigproducerad (Gibson, 2010, s.239). Metoden påminner om så kallad laserpåsvetsning, *laser cladding*, och andra former av automatiserad svetsning, med den skillnaden att man använder BMD för att bygga funktionella tredimensionella komponenter och addera funktionalitet till komponenter snarare än för att reparera skador, sammanfoga komponenter och applicera beläggningar. Ytterligare en skillnad är att de data som styr mjukvaran vid BMD matas in i form av en tredimensionell CAD-fil, vilket inte är lika vanligt vid automatiserad svetsning. Det skall dock nämnas att ett flertal av de aktörer som fokuserar på de ovan nämnda marknaderna också producerar maskiner som även kan användas till att reparera och belägga existerande komponenter.



*Figur 7 visar hur munstycken blåser en blandning av metallpulver och skyddsgas in i fokuspunkten på en laserstråle, och på så sätt smälter på material. Det är inte ovanligt att fler än två radiellt symmetriska munstycken används för tillförsel av pulver.*

### 5.3.1 Historia

Bland de första kommersialiserade BMD-processerna är LENS, som utvecklades vid Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico och kommersialiserades av Optomec, Inc. som lanserade sin första maskin år 1997 (Gibson, 2010, s.245). Den snarlika tekniken DMD utvecklades ungefär samtidigt vid University of Michigan under ledning av Professor Jyotirmoy Mazumder (DM3D Technology, 2015) och kommersialiserades av POM Group, Inc. som idag köpts upp av DM3D Technology, LLC.

### 5.3.2 Variation över marknaden

Skillnader mellan olika BMD-aktörer består bland annat i typ av energikälla, där laser är den vanligaste källan, medan vissa använder elektronstrålar. Exempel på de senare är EBF<sup>3</sup> som utvecklades runt år 2000 av NASA Langley Research Center (Lineberry, 2011) och EBAM, som enligt Sciaky Inc., utvecklades från 1995 och kommersialiserades år 2009. Även bland de laserbaserade aktörerna finns det skillnader, såsom vilken typ av laser de använder, dess effekt och storlek på fokuspunkt. Som tidigare nämnt använder de flesta aktörerna ett pulverbaserat leveranssystem av metallen, men exempelvis Sciaky, Inc. använder sig av ett system där metallen matas fram i form av tråd. Ytterligare skillnader består i om byggkammaren är gastätt försluten eller inte. Slutligen skiljer antalet axlar som deponeringen kan ske längs mellan olika tillverkare och hur man går till väga för att uppnå rörelsefriheten.

Oavsett om tråd eller pulver används så distribueras alltid materialet via en bärgas som samtidigt har till uppgift att förhindra att materialet oxiderar. Användande av pulver medger bättre ytfinhet och en högre repeterbarhet, då toleranserna blir något bättre. En av de viktigaste fördelarna är dock förmågan att reglera flödet i större utsträckning än om tråd används. Fördelar med tråd är att materialet är billigare samtidigt som deponeringshastigheten kan vara avsevärt mycket högre. Om det ställs höga krav på



processhastighet eller om komponenter enbart skall beläggas så kan det alltså vara aktuellt att använda sig av trådmatning (Gibson, et al., 2010). En av de främsta anledningarna till att trådmatning utvecklades var dock NASA:s försök att platstillverka kritiska komponenter i rymden istället för att behöva skicka dem direkt till rymdstationer och satelliter. I en låggravitationsmiljö lämpar sig tråd bättre än pulver, då små partiklar generellt utgör en risk (Gibson, et al., 2010). Det har gjorts vissa försök att använda system som matar både pulver och tråd, men detta är inte en teknik som börjat användas industriellt (Syed, et al., 2006).

Ett system som använder rörligt deponeringshuvud medger större byggvolym relativt maskinens storlek samtidigt som det är lättare att positionera vid bygge av stora komponenter, jämfört med ett system som använder ett rörligt bord. Andra fördelar består i möjligheten att enkelt kunna vrida huvudet och därmed bygga i fler riktningar än bara vertikalt och horisontellt. Detta är möjligt i de maskiner som kan mata fram råmaterialet med sådan kraft att inverkan från gravitationen blir försumbar (Gibson, et al., 2010). Det ska dock noteras att sådan funktionalitet i nuläget är sällsynt. Att ha ett rörligt bord har också fördelar, främst i att detaljkvaliteten och reproducerbarheten ökar. Stora maskiner för industriellt bruk tenderar att kombinera ett rörligt deponeringshuvud med ett rörligt byggbord.

### 5.3.3 Begränsningar

Oavsett tekniskillnaderna så medger metoden, eftersom materialet smälts fullständigt, tillverkning av komponenter med full densitet och det finns således oftast inget behov av HIP-behandling för densitetens skull. Viss efterbehandling krävs dock för att avverka bygglattan, om den inte skall ingå i konstruktionen. Ytterligare efterbehandling kan bli aktuell vid användande av material där man vill öka hållfastheten genom värmebehandling, samt om kraven på ytfinhet är såpass höga att produkten behöver blästras eller avverkas maskinellt.

Begränsningar hos BMD är bland annat behovet av att bygga stödstrukturer då komplexa geometrier eftersträvas. Tekniskt sett ges stor frihet vid materialval, med en potentiell begränsning i material som reflekterar mycket av laserstrålarna och på så vis värmer upp optiken inuti deponeringshuvudet. Även material med hög termisk konduktivitet och sådana som lätt bildar oxider kan vara problematiska. Trots förmågan att processa många olika material, så är de idag kända material som finns utprovade av tillverkarna begränsade. Det finns dock fler utprovade material än för övriga AM-metoder. I *Tabell 7* finns en sammanställning över de material som finns namngivna hos några av de större aktörerna.

*Tabell 7 sammanställer de material som kan användas i BMD-maskiner.*

| Material                       | Legering   | Företag                      |
|--------------------------------|------------|------------------------------|
| <b>Aluminium</b>               | 2319       | Sciaky                       |
|                                | 4043       | Sciaky                       |
|                                | 4047       | Optomec/Joiniechnologies     |
| <b>Eldfasta mtrl. W, Mo, N</b> | i.u.       | Optomec                      |
| <b>Kobolt</b>                  | Stellit 6  | Joining Technologies         |
|                                | Stellit 21 | Optomec/Joining Technologies |

|                           |              |                                     |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------|
| <b>Koppar</b>             | Cu-Ni        | Optomec                             |
|                           | 70/30 Cu-Ni  | Sciaky                              |
| <b>Nickel</b>             | IN100        | Joining Technologies                |
|                           | IN625        | Optomec/Joining Technologies/Sciaky |
|                           | IN718        | Optomec/Joining Technologies/Sciaky |
|                           | 70/30 Ni-Cu  | Sciaky                              |
|                           | Waspalloy    | Optomec/Joining Technologies        |
| <b>Nickel-Krom karbid</b> | i.u.         | Joining Technologies                |
| <b>Niob</b>               | i.u.         | Sciaky                              |
| <b>“Titanlegeringar”</b>  | i.u.         | Joining Technologies                |
| <b>Titankarbid</b>        | i.u.         | Optomec/Joining Technologies        |
| <b>Tantal</b>             | i.u.         | Sciaky                              |
| <b>Titan</b>              | CP Ti        | Optomec                             |
|                           | Ti 6Al-4V    | Optomec/Joining Technologies/Sciaky |
|                           | Ti 6-2-4-2   | Optomec                             |
| <b>Rostfritt stål</b>     | 13-8         | Optomec                             |
|                           | 17-4PH       | Optomec/Joining Technologies        |
|                           | ”300 serien” | Sciaky                              |
|                           | 304 SS       | Optomec/Joining Technologies        |
|                           | 316 SS       | Optomec/Joining Technologies        |
|                           | 347 SS       | Joining Technologies                |
|                           | 410 SS       | Optomec/Joining Technologies        |
|                           | 420 SS       | Optomec                             |
| <b>Stål</b>               | 4140         | Joining Technologies                |
|                           | 4340         | Sciaky                              |

|                         |              |                              |
|-------------------------|--------------|------------------------------|
| <b>Verktogsstål</b>     | H13          | Optomec/Joining Technologies |
|                         | S7           | Optomec                      |
| <b>Volfram</b>          | i.u.         | Sciaky                       |
| <b>Volframkarbid</b>    | i.u.         | Optomec/Joining Technologies |
| <b>Zirkonium</b>        | Zirkaloy     | Sciaky                       |
| <b>Under utveckling</b> |              |                              |
| <b>Koppar</b>           | GRCop-84     | Optomec                      |
| <b>Kromkarbid</b>       | i.u.         | Optomec                      |
| <b>Nickel</b>           | IN690        | Optomec                      |
|                         | Hastelloy X  | Optomec                      |
|                         | MarM247      | Optomec                      |
|                         | Rene 124     | Optomec                      |
| <b>Titan</b>            | Ti 6-2-4-6   | Optomec                      |
|                         | Ti 48-2-2    | Optomec                      |
|                         | Ti 22Al-23Nb | Optomec                      |
| <b>Rostfritt stål</b>   | AM355        | Optomec                      |
|                         | 15-5PH       | Optomec                      |
|                         | 309          | Optomec                      |
|                         | 416          | Optomec                      |
| <b>Verktogsstål</b>     | A-2          | Optomec                      |

### 5.3.4 Parametrar

BMD-maskiner finns i en mängd olika konfigurationer: från modeller med liten byggvolym som lämpar sig för konstruktion och reparation av små komponenter till stora för industriellt bruk. Bygghastigheten tenderar att vara högre i större maskiner eftersom de är konstruerade för att producera större komponenter och måste därmed kunna jobba fortare för att produktionstakten inte ska bli orimlig. Som tidigare nämnts så brukar användande av tråd istället för pulver resultera i avsevärt mycket snabbare bygghastighet, vilket även kan utläsas i *Tabell 8*. Lagertjockleken påverkar bygghastigheten, men även detaljkvaliteten hos produkten. Vid höga lagertjocklekar kan en given geometri byggas snabbare, men då ökar risken för att

det uppstår förskjutningar mellan lagren vilket leder till att komponenten blir skev. I *Figur 8* visas försök från Högskolan Väst där det uppstått viss förskjutning mellan lagren.



*Figur 8 visar ett test som gjorts på Högskolan Väst, där en tunn och hög geometri byggts upp. I mitten av bilden kan förskjutningar mellan deponeringslager ses. Detta visar på att antingen det mekatroniska systemet eller termiska effekter har skapat en avvikelse.*

Ytterligare en aspekt som påverkar både bygghastigheten och detaljkvalitén är val av laser, då vissa har ställbar fokusdiameter medan andra har fasta. Större diameter leder till bredare lager och snabbare byggtid, medan mindre diameter ger motsatt effekt. Generellt fås bättre precision då ett rörligt byggbord används än om ett rörligt deponeringshuvud används. Detta gäller främst då maskinerna med rörligt deponeringshuvud byggs av industrirobotar, då dessa vanligtvis inte är lika optimerade för precision som till exempel en CNC-maskin med rörligt bord, vilken påminner mycket om en BMD med rörligt bord. I *Tabell 8* visas spannet hos de största tillverkarnas processparametrar med uppdelning i pulver- och trådbaserade om nödvändigt. Data är tagna från BeAm, Optomec, Sciaky och Scribner (2013).

*Tabell 8 sammanställer data för BMD-maskiner.*

|                              | BMD                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Bygghastighet [cm³/h]</b> | 3 - 50<br><i>Pulver</i><br><br>< 850 *<br><i>Tråd</i> |
| <b>Energibehov [kW]</b>      | < 42                                                  |
| <b>Lagertjocklek [µm]</b>    | 100 -1500                                             |
| <b>Pulverdiameter [µm]</b>   | 20-150                                                |

|                                                       |                                 |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Fokusdiameter [<math>\mu\text{m}</math>]</b>       | > 800                           |
| <b>Strålstyrka [W]</b>                                | 300 - 4000                      |
| <b>Byggvolum [<math>\text{mm}</math>]<br/>(LxWxH)</b> | 100x100x100 -<br>5791x1219x1219 |
| <b>Detaljfinhet [<math>\mu\text{m}</math>]</b>        | i.u.                            |
| <b>Ytfinhet Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>         | > 25                            |
| <b>Maskinkostnad<br/>[miljoner sek]</b>               | ~ 3 - 15                        |

### 5.3.4 Tillämpningar

Maskiner för BMD har en särställning då de förutom att bygga nya objekt och addera funktionalitet på färdiga metallkonstruktioner även kan användas för exempelvis reparationer. Exempel inom flygindustrin innefattar komponenter till satelliter, helikoptrar och jetmotorer samt reparation av kritiska komponenter i gasturbiner. Andra exempel innefattar komponenter till upphängning och drivaxlar i racingbilar, samt höftimplantat (Nannan & Ming, 2013).

## 5.5 Binder Jetting

*Binder Jetting*, BJ, även kallat *Powder bed and InkJet Precision printing*, *Drop-on Powder* och *Three-dimensional printing*, är en pulverbäddsteknik som istället för laser eller annan direkt värmekälla skriver ut bindemedel under byggprocessen. Detta sker i rumstemperatur och först när hela formen är utskriven och en grönkropp bildats värms denna upp i en sintringsugn för att skapa den färdiga produkten. Processen går enligt följande steg: byggprocess i maskin, avpulverisering, sintring, eventuellt infiltration, svalning och efterbehandling.

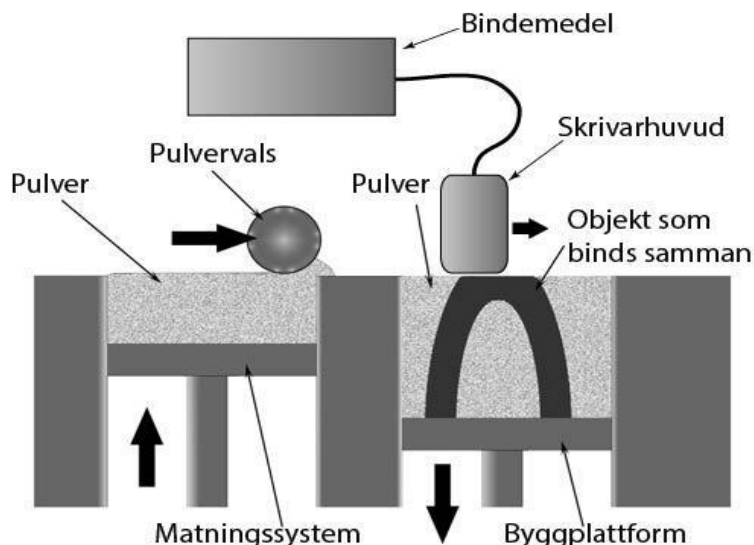
### 5.5.1 Historia

Grunderna för BJ utvecklades på Massachusetts Institute of Technology år 1990 (Gibson, et al., 2010). Tekniken licensierades ut till företaget ExOne från Tyskland som sedan tidigare använt sig av en liknande teknik för att tillverka sandformar för gjutning. År 2010 kommersialiserade de metoden för metall och sedan dess har ExOne hunnit bli den största aktören inom BJ. Det stora svenska metallpulvertillverkarföretaget Höganäs har dock nyligen tillverkat egna maskiner för tekniken och tar nu beställningar på metallkomponenter.

De två företagens affärsidéer skiljer sig åt eftersom ExOne säljer AM-maskiner medan Höganäs Digital Metal tillverkar egna maskiner men säljer produkter tillverkade i maskinerna eller licensierar ut maskinerna. Höganäs har också valt att specialisera sig på små detaljrika komponenter. (Kristiansson, 2014) Utöver dessa finns företag som HP MultiJet Fusion vars maskiner bara kan tillverka i polymera material men som har meddelat att de håller på att utveckla maskiner som kan tillverka i metall (Weiss, 2015).

### 5.5.2 Teknik

Systemet är uppbyggt av en pulverbädd, en matningsbädd, en pulvervals, en torkningsenhet och ett skrivarhuvud med en stor mängd InkJet-munstycken, vilket visas schematiskt i *Figur 9*. Att skrivarhuvudet har tätt flera placerade munstycken på en rad gör att det bara behöver förflyttas i en riktning. Detta till skillnad från tidigare nämnda metoder som endast har ett munstycke och därför behöver förflyttas i minst två olika riktningar.



*Figur 9 visar hur skrivarhuvudet rör sig över pulverbädden och applicerar bindemedel. Objektet som skapas är en grönkropp och har alltså inte de egenskaper som den slutgiltiga komponenten kommer att ha.*

Under processen sprids ett pulverlager ut från matningsbädden till printerbädden med hjälp av en utspridningsmekanism, ofta i form av en motroterande vals. Denna komprimerar och slätar ut pulvret så att ett jämnt lager fås. Från munstyckena i skrivarhuvudet appliceras bindemedel ut på det lösa pulverlagret enligt lagerprofilen. När ett lager är klart torkas det, till exempel via elektrisk uppvärmning. Precis som i andra pulverbäddsmetoder sänks pulverbädden ner sträckan av ett lagrets tjocklek och ett nytt lager sprids ut på det förra. Processen upprepas sedan tills hela geometrin är klar (Meteyer, et al., 2013).

Den färdiga formen som avlägsnas från pulverbädden är då endast en grönkropp med cirka 60% densitet. För att uppnå hög densitet, över 95%, krävs efterbehandling i form av sintring i en sintringsugn (Privat kommunikation Höganäs, 2015). Vissa företag använder även infiltration av en metall med lägre smälttemperatur under sintringsprocessen. Precis som för övriga metoder krävs olika typer av efterbearbetningar då höga krav på ytfinitet ställs.

### 5.5.3 Begränsningar

De krav som ställs på materialen eller legeringssystemen vid Binder Jetting är att de kan atomiseras, formas till en grönkropp med hjälp av bindemedel och sintras. Då infiltration används behöver det också finnas en lämplig metall att infiltrera den första metallen med och oftast blir det då den som sätter begränsningarna. De nämnda kraven kan uppfyllas av väldigt många metaller och legeringssystem så de avgörande faktorerna vid val av material blir istället ekonomi, konstruktion och efterfrågan. Trots att mängden metaller som bör vara möjliga att använda med denna teknik är stor har bara ett fåtal hunnit beprövas industriellt. Detta beror på att tekniken kommersialiserades först 2010 och maskinparametrar för bästa produktprestanda behöver undersökas. De metaller och legeringssystem som idag används industriellt presenteras i *Tabell 9* nedan.

Tabell 9 sammanställer vilka material som kan användas i BJ-maskiner. ExOne står idag för nästan alla material, men Höganäs Digital Metal jobbar med att utveckla fler.

| Material                   | Legering     | Infiltrerande metall | Företag               |
|----------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| <b>Rostfritt stål</b>      | 317L SS      | -                    | Höganäs Digital Metal |
|                            | 316 SS       | -                    | ExOne                 |
|                            | 17-4 SS      | -                    | ExOne                 |
|                            | 316 SS (60%) | Brons (40%)          | ExOne                 |
|                            | 420 SS (60%) | Brons (40%)          | ExOne                 |
| <b>Järn</b>                | Järn (60%)   | Brons (40%)          | ExOne                 |
| <b>Järn-Krom-Aluminium</b> | i.u.         | -                    | ExOne                 |
| <b>Kobolt-Krom</b>         | i.u.         | -                    | ExOne                 |
| <b>Nickel</b>              | IN Alloy 625 | -                    | ExOne                 |
|                            | IN Alloy 718 | -                    | ExOne                 |
| <b>Under utveckling</b>    |              |                      |                       |
| <b>Titan</b>               | i.u.         |                      | Höganäs Digital Metal |
| <b>Silver</b>              | i.u.         |                      | Höganäs Digital Metal |
| <b>Koppar</b>              | i.u.         |                      | Höganäs Digital Metal |

Maskinspecifika begränsningar som bygghastighet eller energibehov varierar på marknaden. Dock orsakar tekniken i sig vissa allmängiltiga begränsningar. Med en InkJet fördelas bindemedlet ur flera olika munstycken parallellt. Därför påverkas bygghastigheten inte av geometrin längs den axel munstyckena är placerade utan endast av geometrin för den andra axeln. Eftersom processen sker i rumstemperatur behöver ingen hänsyn till termisk konduktivitet tas och byggkammaren kan fyllas helt med komponenter. Av dessa anledningar blir Binder Jetting som mest tidseffektivt då byggkammaren är fylld med så många komponenter som möjligt. De två stora aktörerna Höganäs Digital Metal och ExOne använder tekniken på olika sätt. ExOne har större byggkammare och använder ofta infiltration under sintringen för att undvika krympning. Digital Metal använder istället av en liten byggkammare i vilken de tillverkar många små komplexa komponenter. Under sintringen används då inte heller någon infiltrerande metall, vilket resulterar i att komponenterna krymper med 20 procent. Denna metod påminner på många sätt om Metal Injection Molding, MIM, och produkterna följer även de standards som skapats för MIM.

Tabell 10 sammanställer data för BJ-maskiner. Möjlig detaljfinhet och ytfinhet är utmärkande för att vara en AM-metod.

| Maskinparameter                    | Min - Max                                         |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Bygghastighet [cm <sup>3</sup> /h] | 25 – 1200*<br><i>Tid för sintring tillkommer.</i> |
| Energibehov [kW]                   | < 8                                               |
| Lagertjocklek [µm]                 | 42 - 150                                          |
| Pulverdiameter [µm]                | 10 - 40                                           |
| Fokusdiameter [µm]                 | < 65                                              |
| Strålstyrka [W]                    | -                                                 |
| Byggvolum [mm]<br>(LxWxH)          | 150x100x60 - 800x500x400                          |
| Detaljfinhet [µm]                  | 35 - 100                                          |
| Ytfinhet Ra [µm]                   | > 6                                               |
| Maskinkostnad<br>[miljoner sek]    | ~ 1,6 - 10                                        |

\* Eftersom bygghastigheten inte beror av komponentens tvärsnitt anges den ofta som 30-60 sekunder/lager istället. När bygghastigheten är angiven i cm<sup>3</sup>/h bör geometrins påverkan tas i beaktning.

Tabell 10 visar inom vilka spann de olika maskinparametrarna för Binder Jetting ligger idag (ExOne, 2015), (Aniwa, 2015), (Irwin, 2013), (Privat kommunikation Höganäs, 2015). Tabellen anger gränsvärden och dessa kan variera beroende på andra maskinparametrar. Det är alltså inte möjligt ange exakta värden som gäller för alla fall.

### 5.5.4 Tillämpningar

Enligt Höganäs Digital Metal lämpar sig Binder Jetting särskilt bra för små icke-kritiska komponenter med komplex form (Powder Metallurgy Review, 2013). Exempel på större komponenter som har tillverkats med ExOne's maskiner är turbinblad och impellrar för flygindustrin. Ett annat exempel är de filter som tillverkats av metall i ett enda stycke och då har lyckats förbättra hållbarheten och förlänga komponentlivslängden.



## 6 Jämförelse och Diskussion

För att bedöma om additiv tillverkning är ett bra alternativ i ett tillverkningsfall, så behöver för- och nackdelar med metoderna utredas. I det här kapitlet diskuteras begränsningar och möjligheter både för AM i förhållande till konventionella tillverkningsmetoder och för de olika AM-metoderna i förhållande till varandra.

### 6.1 Begränsningar

Utvecklingen av AM har pågått under flera år och även om tillverkningsmetoderna under det senaste decenniet har börjat kommersialiseras allt mer, så verkar det fortfarande vara svårt att hitta stora branscher där de kan utnyttjas på ett konkurrenskraftigt sätt. Vad är det då som begränsar AM från att spridas vidare? I detta avsnitt utreds frågan utifrån material-, produktionshastighets- och kostnadsaspekter.

#### 6.1.1 Material

Principiellt sett så tycks den huvudsakliga begränsningen inte vara brist på vilka material som kan användas. Så länge metallen kan atomiseras och smältas är den i teorin möjlig att använda vid AM. I praktiken är dock läget mer komplext än så. Då samtliga AM-processer är mycket styrbara med en stor mängd justerbara parametrar, så måste dessa anpassas specifikt till materialets och komponentens önskade egenskaper. Utvecklingen av ett tillhörande parameterset till varje legering är kostsam och tar lång tid, vilka utgör de faktorer som främsta begränsar förekomsten av möjliga material. Om korrekt parameterset inte används så kan komponenterna inte kvalitetssäkras och risk för termiska spänningar, porer och diverse andra problem uppstår.

#### 6.1.2 Produktionshastighet

Det som främst hindrar AM från att användas i fler branscher är att de i många fall är långsamma och dyra tillverkningsmetoder. Den låga produktionshastigheten beror av flera faktorer, men ett grundläggande faktum är att komponenterna byggs upp lager för lager, där tunnare lager ger bättre ytfinitet och toleranser. Även om hastigheten för smältning eller bindning av ett lager sker fort så måste smältan stelna och vid användande av pulverbädd måste ett nytt lager spridas ut innan nästa smältoperation kan genomföras. Varje steg kan gå fort men även 30 sekunder per lager blir lång tid när det måste upprepas cirka 2000 gånger för att fylla en 100 millimeter hög byggkammare. En del företag säljer maskiner med två laserstrålar, men då flera steg än bara värmandet påverkar hastigheten så dubbleras inte bygghastigheten på grund av detta. För att öka bygghastigheten per komponent bör byggkammaren fyllas med så många komponenter som möjligt och komponenterna bör placeras så att inget onödigt arbete i höjdled sker.

#### 6.1.3 Kostnad

Den låga bygghastigheten bidrar till att kostnaden stiger, men det finns fler orsaker än detta. En bidragande anledning till kostnaden är att nästan alla tekniker behöver fint metallpulver. Lagertjockleken ligger oftast i intervallet 20 – 200 mikrometer. För detta används pulver i storleksordningen 10 – 100 mikrometer. Dessutom kräver nästan alla tillverkare att pulvret är sfäriskt och har god renhet, vilket gör att det måste tillverkas med gas- eller plasmaatomisering (Se kap. 4.1 Metallpulver). Denna typ av pulvertillverkning är dyr och kilopriset för en metall i pulver av den kvalitet som krävs kan inte alls jämföras med metallens skrotpris. För att minska materialanvändningen har många AM-processer ett återvinningssystem som tar vara på det pulver som inte används i själva komponenten, så att det kan

användas på nytt. Det blir mycket mindre spillmaterial än vid exempelvis skärande bearbetning, men för att AM ska vara lönsamt måste besparingen av spillmaterial väga upp av bland annat pulvertillverkningens kostnad. En annan kostnadsfaktor är maskinerna, vars inköpspris kan ligga mellan en och cirka femton miljoner kronor.

## **6.2 Möjligheter**

Med AM kommer dock möjligheter som inte är genomförbara i samma utsträckning bland konventionella tillverkningsmetoder. De som främst lyfts fram av tillverkare i branschen är formfrihet och tillverkning i särskilda material.

### **6.2.1 Formfrihet**

Möjligheten att tillverka komplexa former i metall är mycket god för alla metoderna. För vissa former och metoder behöver stödstrukturer byggas för att hålla uppe överhäng, men då det ofta finns bra datorstöd för att göra detta brukar det inte vara en begränsning för formmöjligheterna. Det krävs dock att stödstrukturerna kan arbetas bort i efterhand. Möjligheten att tillverka komplexa former kan utnyttjas på flera sätt. Konstruktioner kan optimeras med avseende på hållfasthet och låg vikt utan att hänsyn till begränsningar hos konventionella tillverkningsmetoder behöver tas. Genom konstruktion av exempelvis geometriskt komplexa fackverk kan material besparas och komponenter viktoptimeras. Formfriheten kan också utnyttjas för att addera funktionalitet till komponenter. Ett exempel på detta är tillverkning av verktyg och komponenter med inbyggda kylkanaler. Något som också bör nämnas är att formfriheten kan ge nya estetiska möjligheter, vilket är intressant för exempelvis smyckesbranschen.

### **6.2.2 Material**

Med AM blir det möjligt att tillverka i material som kan orsaka problem för andra tillverkningsmetoder. Särskilt reaktiva material och material med hög smältemperatur kan vara lämpliga för AM då atmosfären i byggkammaren och intensiteten i värmestrålningen kan anpassas. Hos flera AM-företag undersöks just nu möjligheter att designa varierade mikrostrukturer i en och samma komponent genom att justera maskinparametrar under tillverkningen. Detta skulle i så fall kunna ge varierande egenskaper i olika delar av en komponent, trots att den är tillverkad i ett steg med ett material.

### **6.2.3 Tillämpningar**

Eftersom de flesta typer av komponenter kan tillverkas med AM, så länge de passar i byggkammaren, är det sällan relevant att fråga om det är möjligt att tillverka en produkt med AM. Det som snarare bör undersökas är om det är lönsamt att tillverka produkten med AM. Det finns ett antal branscher där AM snabbt har blivit populärt eftersom det varit ett lönsamt alternativ till tidigare tillverkningsmetoder. De största är flygindustrin, implantattillverkning, tillverkning av industriella verktyg och smyckesbranschen. Dessa branscher har fått användning av AM då tillräckligt många kriterier uppfyllts för att AM ska vara lönsamt. De viktigaste kriterierna är: små serier, komplexa former, höga prestandakrav, svårbearbetade material, möjlighet att addera funktionalitet eller möjlighet att minska antalet tillverkningssteg. Oftast måste flera av dessa kriterier vara uppfyllda samtidigt för att det ska väga upp för den låga produktionshastigheten och den höga fasta-, samt rörliga kostnaderna. AM möjliggör att en geometriskt komplex konstruktion kan tillverkas i lätta, hållfasta material som kan vara svårt genomföra med andra tillverkningsmetoder.

### 6.3 Additiv tillverkning jämfört med andra tillverkningsmetoder

Utifrån de presenterade begränsningarna och möjligheterna med AM framgår att det finns både för- och nackdelar gentemot konventionella tillverkningsmetoder. För att skapa en tydligare bild av dessa jämförs AM översiktligt i detta avsnitt med de tekniker som oftast är konkurrerande: gjutning, skärande bearbetning, pulvermetallurgi och smide. Då det starkaste motivet för att välja AM utgörs av möjligheten att tillverka komponenter med komplex form ligger ett fokus i denna jämförelse på formfrihet.

#### 6.3.1 Gjutning

Gjutning innefattar tekniker som i vissa tillämpningar kan fungera likvärdigt med AM. I de fall då hög geometrisk komplexitet måste uppnås kan sandformsgjutning med flera kärnor, eller vaxursmältning vara de tekniker som bäst konkurrerar. Trots att komplexa geometrier kan gjutas, så är dock formfriheten generellt sett ännu högre vid AM. Även om en mycket billigare produktionskedja går att uppnå vid gjutning så är investeringskostnaden för att designa och tillverka gjutformer ofta hög. Därför kan AM vara ett lönsamt alternativ vid låga seriestorlekar.

#### 6.3.2 Skärande bearbetning

Eftersom skärande bearbetning är vanlig vid lågserieproduktion, då man minimerar investeringskostnaderna, är det ofta ett alternativ till AM. För att uppnå den geometriska komplexitet som AM kan tillhandahålla krävs dock skärande verktyg med fem eller sex axlar, och även då finns många former som enbart går att uppnå med AM.

Dock blir möjligheterna att uppnå jämnare ytor mycket större med skärande bearbetning, därför används det ofta som en efterbearbetning till AM för att få bättre toleranser och ytfinhet. Fördelen med att först använda AM för att sedan behandla med skärande bearbetning ligger bland annat i att mindre mängd råvara behöver användas, då bara små mängder av materialet behöver avverkas. För att det ska vara lönsamt krävs dock att materialbesparingen täcker pulverkostnad.

Den förberedande processen innan tillverkningen kan initieras kallas för CAM (Computer Aided Manufacturing), och skiljer sig på flera punkter från hur arbetet med additiva system ser ut. Bland de grundläggande skillnaderna finns dels det faktum att man vid AM inte behöver ta hänsyn till varken ett fysiskt arbetsstycke som ska bearbetas eller att olika skärande verktyg lämpar sig för både olika material och olika steg i processen. När den digitala modellen ska översättas till maskinkod krävs därför att en operatör avgör i vilka steg skärningen ska ske, i vilken ordning och med vilka verktyg. För ett fall där material- och maskinparametrar redan är utarbetade kan det därför bli färre manuella steg vid förberedande av AM än av typisk subtraktiv tillverkning.

Med avseende på vilka geometrier som kan skapas så finns också stora skillnader mellan additiv- och subtraktiv tillverkning, då en modell som ska tillverkas subtraktivt exempelvis inte kan ha interna kaviteter eller komplexa tredimensionella strukturer i lika stor utsträckning. Detta beror dels på det faktum att verktygen som används har begränsad åtkomst, men också på att högre komplexitet i komponenten kommer öka bearbetningstiden.

Vad gäller materialegenskaper som kan uppnås blir skillnaden att skärande bearbetning kan använda ett helt solitt och homogent stycke metall utan porer och defekter när processen ska påbörjas, och på så sätt säkerställa att komponenten presterar på ett förutsägbart sätt. När AM används ökar i många fall risken för att porer och andra defekter kommer att inneslutas.

### 6.3.3 Pulvermetallurgi

Pulvermetallurgi, PM, är i jämförelse med AM mer anpassad till små och medelstora komponenter som ska tillverkas i stora serier. Eftersom ytfinheten vid press och sintring är liknande den för AM kan dock AM vara ett lämpligt alternativ för prototypframtagning, eller för komponenter där den önskade komplexiteten inte går att uppnå med ett pressverktyg. En skillnad mellan metoderna är att komponenter tillverkade med press & sintring har en relativt hög grad av porer och en densitet runt 90% är inte ovanligt. Med AM är möjligheterna att få nära fullt solida material ofta hög, och exempelvis beständigheten mot utmattning blir därför högre.

Vad gäller Metal Injection Molding, eller MIM, så kan AM vara ett alternativ för att tillverka små serier. Detta gäller speciellt när komponenterna är små i storlek, då många kan tillverkas i en körning. För MIM är verktyg ofta mycket dyra, och samma typ av kvalitet kan uppnås med vissa typer av AM, exempelvis BJ.

### 6.3.4 Smide

Precis som för pulvermetallurgi lämpar sig smide bättre för just stora serier och komponenter med relativt låg komplexitet. Eftersom smide också lämpar sig bra för riktigt stora komponenter, samtidigt som mycket hållfasta metallprodukter med materialegenskaper som skiljer sig från komponenter tillverkade med AM, så är det relativt sällan som dessa tekniker är utbytbara. De fall som kan vara aktuella gäller till exempel tillverkning av turbinblad, där både smide och AM kan vara relevanta metoder. En avgörande faktor kan då vara hur smidbart materialet som ska användas är; då hårda material med låg duktilitet generellt fungerar dåligt för smide kan denna teknik i vissa fall uteslutas.

### 6.3.4 Sammanfattning

Eftersom det i jämförelse med AM finns både för- och nackdelar med samtliga diskuterade tillverkningsmetoder, så ser inte AM ut att kunna ersätta någon av dem på alla plan. AM bör istället ses som ett komplement till de konventionella teknikerna som kan vara ett bättre alternativ då särskilda produktkrav, så som komplexa former eller små serier, ställs. Eftersom formförutsättningarna är så annorlunda för AM jämfört med andra metoder bör design och konstruktion anpassas redan i produktutvecklingsfasen om alla möjligheter med AM ska utnyttjas.

## 6.4 Jämförelse mellan de olika metoderna för Additiv tillverkning

Utöver de gemensamma egenskaperna för AM så finns variationer mellan de olika metoderna. I *Tabell 11* sammanställs teknisk data för de olika metoderna. Det blir tydligt att det är en marknad där flera företag provar olika sätt för att utnyttja tekniken då siffrorna ibland varierar mer mellan olika maskiner inom samma metod än mellan metoderna. Vissa företag har valt att nischa sig så att de prioriterar högre bygghastighet men sämre ytfinhet eller tvärtom. I vissa fall, särskilt för SLM, kan parametrarna i en om samma maskin varieras inom stora spann. Därför är det minst lika viktigt att den som ska använda sig av AM jämför olika maskiner inom samma metod som att metoderna jämförs med varandra.

Tabell 11 sammanställer data för alla undersökta AM-tekniker.

|                                         | SLS                      | SLM                    | EBM                      | BMD                                               | BJ                                                 |
|-----------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Bygghastighet [cm<sup>3</sup>/h]</b> | i.u.                     | 1-120                  | 55 – 80                  | 3 - 50<br><i>Pulver</i><br>< 850 *<br><i>Tråd</i> | 25 – 1200**<br><i>Tid för sintring tillkommer.</i> |
| <b>Energibehov [kW]</b>                 | 3 - 15                   | 1 - 20,2               | < 7                      | < 42                                              | < 8                                                |
| <b>Lagertjocklek [µm]</b>               | 20+                      | 15-200                 | 50-100                   | 100 -1500                                         | 42 - 150                                           |
| <b>Pulverdiameter [µm]</b>              | 6-9                      | 10-60                  | 50-100                   | 20-150                                            | 10 - 40                                            |
| <b>Fokusdiameter [µm]</b>               | i.u.                     | 20-700                 | 180                      | >800                                              | < 65                                               |
| <b>Strålstyrka [W]</b>                  | 50 - 500                 | 50 - 2x1000            | < 3000                   | 300 - 4000                                        | -                                                  |
| <b>Byggvolum [mm] (LxWxH)</b>           | 100x100x80 - 250x250x300 | 70x70x40 - 800x400x500 | 200x200x380 - 350(ø)x380 | 100x100x100 - 5791x1219x1219                      | 150x100x60 - 800x500x400                           |
| <b>Detaljfinhet [µm]</b>                | > 20                     | > 40                   | > 180                    | i.u.                                              | 35 - 100                                           |
| <b>Ytfinhet Ra [µm]</b>                 | i.u.                     | i.u.                   | > 25                     | > 25                                              | > 6                                                |
| <b>Maskinkostnad [miljoner sek]</b>     | ~ 1,2-4,1                | ~ 1,1-15               | ~ 5-15                   | ~ 3-15                                            | ~ 1,6 - 10                                         |

\* Sciaky Inc. vars BMD-maskiner använder tråd för att tillverka stora flygdelar använder elektronstråle för att komma upp i denna bygghastighet. Den typen av enhet för hastighetsbestämning är inte standard för BMD.

\*\* För BJ tar varje lager lika lång tid, oavsett form. Att ge ett exakt antal kubikcentimeter per timme är därför omöjligt.

Trots variationen som finns så ger ändå tekniken bakom de olika metoderna vissa särskilda egenskaper. Hur dessa påverkar bygghastighet, yt- och detaljfinhet, hållfasthet samt tillämpningar diskuteras i följande avsnitt.

### 6.4.1 Bygghastighet

I Tabell 11 visas spann för bygghastigheten i kubikcentimeter per timme baserat på rekommenderad lagertjocklek. Denna kan ge en viss överblick, men för att ge en rättvis bild av produktionshastigheterna behöver hänsyn tas till fler aspekter. För samtliga tekniker utom BJ så är produktionshastigheten beroende

av formen som tillverkas, eftersom energistrålen bara rör sig över de ytor som ska smältas. För BJ, som använder en inkJet-teknik under utskriften, så tar varje lager lika lång tid oavsett form på komponenten. Därför blir det extra viktigt att utnyttja hela byggkammaren vid användning av denna metod.

Även för de andra metoderna påskyndas produktionstiden per komponent om hela byggkammaren utnyttjas, eftersom ställtid mellan körningarna då besparas. För tillverkning av mindre komponenter är stapling av komponenterna ett bra sätt att utnyttja byggkammaren. För SLS och SLM är detta inte möjligt eftersom den punktvisa uppvärmningen orsakar termiska spänningar som måste motverkas med stödstrukturer. För BMD är stapling omöjligt på grund av avsaknaden av pulverbädd, men för både EBM och BJ kan komponenter staplas på varandra i byggkammaren. För BJ, som inte använder någon värmekälla under utskriftsprocessen, så behövs inga stödstrukturer då pulverbädden har tillräcklig bärighet. Vid EBM behövs stödstrukturer i vissa fall, men ofta går det ändå att stapla. Detta beror på att den höga kammartemperaturen minskar de termiska spänningarna och gör så att det sker en svag sintring mellan allt pulver i kammaren. På så sätt fungerar pulverbädden som ett stöd som kan kompletteras med mindre stödstrukturer. För mindre komponenter i större serier kan därför produktionshastigheten per komponent bli lägre för EBM och BJ jämfört med SLS, SLM och BMD än vad siffrorna i *Tabell 11* antyder.

Den totala produktionstiden beror också av hur mycket efterbehandling som krävs. Borttagning av byggplatta och stödstrukturer är en sådan efterbehandling som bör räknas med i den totala produktionstiden. I *Tabell 11* syns att BJ jämfört med de andra metoderna kan komma upp i höga hastigheter vid själva byggprocessen, men efter processen är endast en grönkropp byggd. För att få en färdig komponent behöver en sats sintras i cirka tio timmar och sedan svalna i lika många timmar till. SLS och SLM ger färdiga komponenter direkt efter byggprocessen men de behöver ofta värmebehandlas i efterhand för att de termiska spänningarna ska försvinna.

För pulverbaserad BMD är bygghastigheten ofta låg, men då det är möjligt att bygga tillägg på komponenter som tillverkats med annan tillverkningsmetod kan detta utnyttjas så att endast de mest komplexa delarna av en komponent byggs med BMD. På så sätt minskas den totala produktionstiden för komponenten. Trådbaserad BMD kan hantera klart högre bygghastigheter, men efterbearbetningsbehovet blir då stort.

#### 6.4.2 Ytfinhet och detaljfinhet

Ytfinhet för AM beror främst av pulvrets kvalitet och storlek, material, lagertjocklek, samt maskinens stråleffekt och fokusdiameter. För BJ, som använder InkJet, blir fina ytor möjligt om pulver och lager är tillräckligt fint eftersom ingen smältpool finns att påverka. För de andra teknikerna spelar effekt och fokusdiameter stor roll. EBM, som utförs med hög stråleffekt och stor stråldiameter, ger komponenter med grova ytor. Det beror på att pulver bredvid smältpoolen hettas upp så att det sintras fast på komponentens yta. För att undvika detta med SLS och SLM så kan fokusdiameter och strålstyrkan justeras till lägsta möjliga värden, men när det görs så sänks bygghastigheten. BMD ger oftast ingen bra ytfinhet, vilket beror på hög lagertjocklek och att pulverpartiklar fastnar på ytorna. För samtliga metoder rekommenderar tillverkarna efterbehandling med skärande bearbetning, blästring eller putsning, men om de ytor som önskas kan uppnås direkt ger det givetvis en stor tidsbesparing.

Möjlig detaljfinhet beror främst av lagertjocklek och fokusdiameter. Mindre lagertjocklek sänker bygghastigheten, så mellan dem finns ett direkt samband. För alla strålbaserade metoder kan fokusdiameter också behöva minskas, vilket även leder till sänkt bygghastighet. För BJ är upplösningen på InkJet oftast så fin att endast lagertjockleken blir avgörande. I *Tabell 11* framgår att minsta detaljfinhet för BJ är mindre än minsta rekommenderade lagertjocklek. Detta beror på att sintring utan infiltration ger en krympning.

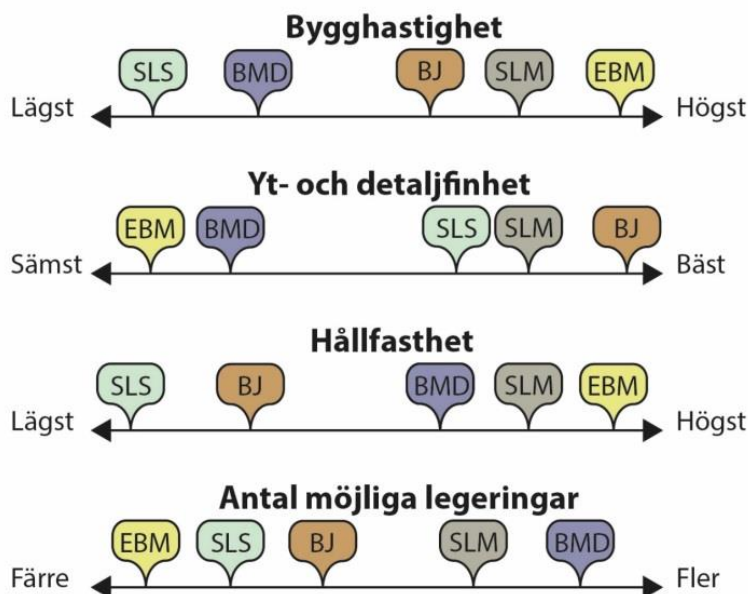
### 6.4.3 Material och hållfasthet

Hållfastheten beror först och främst av material och pulverkvalitet, vilket i teorin inte styrs av metodval. I praktiken krävs dock att det finns utvecklade parameterset för legeringen. BMD är den metod med utvecklade parameterset till flest metaller, men även för SLM finns ett flertal legeringar att välja på. Att utvecklingen kommit längst för dessa metoder beror på att de är metoder som varit kommersialiserade under lång tid. EBM är den teknik med lägst antal utvecklade parameterset. Det kan till stor del antas bero på att endast ett företag, Arcam AB, använder sig av tekniken. De har till en början valt att specialisera sig på vissa branscher och därför har ett fåtal legeringar varit nog. Utveckling för metallmaterial vid SLS är låg eftersom de flesta företagen har övergått till SLM. För BJ pågår utveckling av parameterset till fler material, men eftersom det är den senast kommersialiserade tekniken så har utvecklingen inte hunnit ikapp BMD och SLM.

Bortsett från material avgörs hållfastheten av hur väl metoden undviker porer och inneslutningar. SLM, EBM och BMD kan ge över 99 procent densitet och atmosfären i byggkammaren skyddar mot inneslutningar. SLS och BJ ger inte full densitet. Vid tillräckligt pulverkvalitet och tunna lager kan BJ komma upp i cirka 95 procent densitet efter sintring utan infiltration. Om processen inte utförs med särskilt hög exaktheten så kan sintring med infiltration ändå användas för att uppnå 95 procent densitet.

### 6.4.5 Tillämpningar

Genom att enbart se till värdena i *Tabell 11* så kan det alltså vara svårt att avgöra vilken metod som lämpar sig för ett särskilt tillverkningsfall. I jämförelsen framgår tydligare hur olika metoder har varierande svagheter och styrkor. De omnämnda försöken att nisch metoderna har bland annat framgått vid intervjuer med maskintillverkare och forskare. Det illustreras i *Figur 10* hur metoderna oftast förhåller sig till varandra med avseende på bygghastighet, yt- och detaljfinhet, hållfasthet och legeringar med utvecklade parameterset.



Figur 10 visar på ett förenklat sätt hur de olika teknikerna presterar med avseende på olika områden.

Metodernas olika styrkor och svagheter gör att de kan vara mer eller mindre aktuella för olika tillverkningsfall. Fortfarande spelar val av maskin inom metoden stor roll, men diskussionen om tillämpningar sker utifrån de praktiska skillnaderna mellan metoderna och hur de oftast är nischade.

SLS är som tidigare nämnt inte längre någon vanlig teknik för metall och utmärker sig inte i någon av de diskuterade aspekterna. Istället är den vanligaste lasertekniken SLM. SLM utmärker sig inte som den bästa metoden i någon av aspekterna men kan prestera bra i samtliga. Detta beror på att SLM-maskinerna är styrbara och utbudet av maskiner är stort. Därför är det särskilt viktigt att inte likställa alla SLM-maskiner med varandra. SLM passar för små serier och höga hållfasthetskrav där bättre detalj- och ytfinhet än hos EBM önskas. Eftersom det inte är möjligt att stapla komponenter är det lämpligt med större komponenter så att hela byggkammaren utnyttjas. Det är också den pulverbäddsteknik med flest tillgängliga material.

EBM, med styrkorna bygghastighet och hållfasthet, kan passa i branscher för tillverkning av större komponenter eller, för AM sett, stora serier med medelstora komponenter. Denna teknik passar inte för fina detaljer och skärande bearbetning krävs för att ytorna ska uppnå hög kvalitet. De tillgängliga materialen passar särskilt bra för implantat och hållfasta lättviktskomponenter.

För BMD är möjligheten att göra tillägg på färdiga detaljer en aspekt som påverkar dess lämpliga användningsområden. Flest tillgängliga material och hög hållfasthet gör metoden lämplig för reparation av hårt belastade komponenter, exempelvis turbinblad. Tekniken kan även användas för att snabbt tillverka komponenter, som sedan måste efterbehandlas för att bra ytor ska uppnås.

Med möjlighet att tillverka fina ytor och detaljer med en bygghastighet som är konstant för varje körning passar BJ bäst för små detaljrika komponenter. Större komponenter i former som inte kan ha stödstrukturer kan också passa BJ. Eftersom densitet över 95 procent sällan uppnås får inte allt för höga hållfasthetskrav ställas.



## 7 Slutsats

Det har visats att additiv tillverkning i metall generellt passar bäst då särskilda krav i form av komplexa geometrier, särskild funktionalitet och små seriestorlekar ställs. Mellan de olika metoderna för additiv tillverkning i metall finns en differentiering sådan att olika metoder är bäst lämpade för olika krav. Olika avvägningar mellan hastighet, storlek, yt- och detaljfinhet, hållfasthet och justerbarhet gör att en metod kan passa bättre för en viss komponent eller bransch än de övriga. Av denna anledning räcker det inte med att bedöma om en komponent passar för tillverkning med additiv tillverkning, utan en analys av vilken metod som passar måste också utföras.

Den äldsta tekniken Selective Laser Sintering, SLS, ger mycket porositer och har därför i stor utsträckning ersatts av den fullsmältande lasermetoden Selective Laser Melting, SLM. För denna metod finns en mycket stor variation mellan olika maskiner, men generellt gäller att metoden kan uppnå god hållfasthet till relativt hög bygghastighet. Det är också den pulverbäddsmetod med flest tillgängliga material. Elektronstrålemetoden Electron Beam Melting, EBM, kan med hög hastighet bygga komponenter med hög hållfasthet men låg yt- och detaljfinhet. Beam Metal Deposition, BMD, är den enda tekniken som inte är pulverbäddsbaserad, vilket kan utnyttjas vid reparation av komponenter eller för att skapa detaljer med komplex form på färdiga komponenter. Till denna metod finns idag flest tillgängliga material, vid användande av pulver, men pulverbaserade maskiner är vanligtvis bland de mest långsamma metoderna. Trådbaserade maskiner är betydligt mycket snabbare, men tekniken är inte lika utbredd och det finns inte lika många utprovade material. Binder Jetting, BJ, är med sin InkJet-teknik för bindemedel den metod som kan ge bäst yt- och detaljfinhet till relativt hög hastighet. Eftersom komponenterna sintras ihop istället för att smältas blir dock densiteten och därmed hållfastheten lägre än för de andra metoderna.

För samtliga metoder gäller att de sällan fungerar som ett allmängiltigt substitut för konventionella tillverkningsmetoder, utan snarare som ett komplement för tillverkning av särskilda produkter. Detta eftersom pulvertillverkningen och den tidskrävande processen gör så att additiv tillverkning sällan är lönsamt för produkter som kan tillverkas med konventionella metoder. För att additiv tillverkning ska vara lönsamt måste flera av metodens fördelar utnyttjas och detta görs bäst genom att ta med tillverkningsmetoderna redan i produktutvecklingsfasen.

## Referenser

Aniwaa, 2015. *Aniwaa*. [Online]

Available at: <http://www.aniwaa.com/?s=exone&x=0&y=0>

[Accessed 15 05 2015].

Anthony, L. & Reddy, R., 2003. Processes for Production of High Purity Metal Powder. *JOM*, 55(3), pp. 14 - 18.

Arcam, 2015. *About Arcam*. [Online]

Available at: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>

[Accessed 19 Maj 2015].

Arcam, 2015. *Q10 Technical Data*. [Online]

Available at: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Q10.pdf>

[Accessed 19 Maj 2015].

DM3D Technology, 2015. *DM3D Technology: About us*. [Online]

Available at: <http://www.dm3dtech.com>

[Accessed 27 03 2015].

Dunkley, J., 1998. Atomization, Metal Powder Production and Characterization. In: *Vol 7, Powder Metal Technologies and Applications*. s.l.:ASM International, pp. 35 - 52.

EOS, 2015. *Light-weight bracket*. [Online]

Available at: [http://www.eos.info/industries\\_markets/aerospace/interior](http://www.eos.info/industries_markets/aerospace/interior)

[Accessed 18 05 2015].

ExOne, 2015. *ExOne - Digital Part Materialization*. [Online]

Available at: <http://www.exone.com/Systems/Production-Printers>

[Accessed 17 03 2015].

Fergusson, B. & German, R., 1998. Powder Shaping and Consolidation Technologies. In: *Vol 7, Powder Metal Technologies and Applications*. s.l.:ASM International, pp. 313 - 320.

Fraunhofer ILT, 2014. *Selective Laser Melting*. [Online]

Available at:

[http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product\\_and\\_services/laser\\_material\\_processing/B\\_Selective\\_Laser\\_Melting\\_2014.pdf](http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/laser_material_processing/B_Selective_Laser_Melting_2014.pdf)

[Accessed 28 04 2015].

General Electric, 2014. *GE Reports*. [Online]

Available at: <http://www.gereports.com/post/94658699280/this-electron-gun-builds-jet-engines>

[Accessed 19 Maj 2015].

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 1 ed. New York: Springer.

Goetzel, C., 1998. Infiltration, Shaping and Consolidation Technologies. In: *Vol 7, Powder Metal Technologies and Applications*. s.l.:ASM International, pp. 541-564.

Grosvenor, C. & Lou, A., 2012. *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. Mechanical Engineering at The University of Texas at Austin*. [Online]

Available at: [http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712\\_sls\\_history.php](http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php)

[Accessed 05 05 2015].

Irwin, P., 2013. *Additive Manufacturing*. [Online]

Available at: <http://additivemanufacturing.com/2013/06/06/exone-rapid-growth-of-additive->

[manufacturing-am-disrupts-traditional-manufacturing-process/](#)

[Accessed 12 05 2015].

Kalpakjian, S., Schmid, S. & Kok, C.-W., 2007. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. 5 ed. New Jersey: Pearson Education.

Kristiansson, M., 2014. *3dp.se*. [Online]

Available at: <http://3dp.se/stort-intresse-for-sma-detalljer-hos-hoganas-digital-metal/>

[Accessed 20 02 2015].

Kruth, J.-P. e. a., 2005. Binding Mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), pp. 26-36.

Lineberry, 2011. *NASA - Electron Beam Freeform Fabrication*. [Online]

Available at: <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html>

[Accessed 31 03 2015].

Mahale, T. R., 2009. *Electron Beam Melting of Advanced Materials and Structures*, Raleigh, North Carolina: North Carolina State University.

Meiners, W., Wissenbach, K. D. & Gasser, A. D., 1998. *Shaped body especially prototype or replacement part production*. Germany, Patent No. DE19649865.

Meteyer, S., Xu, X., N., P. & Zhao, Y., 2013. Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing processes. *Procedia*, Volume 15, pp. 19 - 25.

Nannan, G. & Ming, C., 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*., 8(3), pp. 215-243.

Oak Ridge National Laboratory, 2014. *ORNL - News*. [Online]

Available at: <http://www.ornl.gov/ornl/news/news-releases/2014/ornl-research-reveals-unique-capabilities-of-3-d-printing->

[Accessed 19 Maj 2015].

Phenix Systems, 2015. *Phenix Systems: Presentation*. [Online]

Available at: <http://www.phenix-systems.com/en/phenix-systems>

[Accessed 02 03 2015].

Powder Metallurgy Review, 2013. *Powder Metallurgy Review*. [Online]

Available at: <http://www.ipmd.net/articles/002466.html#sthash.WLziz3SE.dpuf>

[Accessed 03 03 2015].

Renishaw, 2011. *Renishaw acquires MTT Investments Limited*. [Online]

Available at: <http://www.renishaw.com/en/14897.aspx>

[Accessed 17 02 2015].

Sciaky, 2015. *Sciaky: About*. [Online]

Available at: <http://www.sciaky.com/about-us>

[Accessed 31 03 2015].

Scribner, S., 2013. *Deutsche Bank Markets Research: Printing a colorful future..* [Online]

Available at: <http://www.wisburg.com/wp-content/uploads/2014/09/Deutsche-Bank%EF%BC%88IC%EF%BC%89-3D-Printing-Printing-a-colorful-future.pdf>

[Accessed 19 02 2015].

Shellabear, M. N. O., 2004. *DMLS - Development History and State of The Art*. Erlangen, Germany, Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE) Conference .

SLM Solutions, 2015. *SLM Solutions: Company history*. [Online]  
Available at: [http://stage.slm-solutions.com/index.php?history\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?history_en)  
[Accessed 17 02 2015].

Syed, W., Pinkerton, A. & Lin, L., 2006. Combining wire and coaxial powder feeding in laser metal deposition for rapid prototyping. *Applied Surface Science*, 252(13), pp. 4803-4808.

Weiss, T., 2015. *eWeek*. [Online]  
Available at: <http://www.eweek.com/mobile/hp-plans-3d-printing-line-looks-to-future-innovation-2.html>  
[Accessed 22 04 15].