

Design for Performance

Prosjektoppgave ved IPM, høsten 2011

av Marius Einang

19.12.11



Veileder: Knut Aasland

Medveileder: Klas Boivie

DESIGN FOR PERFORMANCE – NYE PRODUKTMULIGHETER FRA NY PRODUKSJONSTEKNOLOGI

I de siste åra har det vært arbeidd med å utvikle ”additive” produksjonsprosesser; prosesser der mekaniske deler bygges opp av pulver, i stedet for å lages ved tradisjonelle, materialfjernende prosesser som fresing, dreining og erodering. I første omgang kunne det bare produseres i plastmaterialer, noe som nå begynner å bli etablert teknologi, men de siste åra har det også kommet løsninger som tillater et bredt utvalg av metallpulver, og også noe i keramisk materialer.

Ved å kombinere disse prosessene med tradisjonelle, ”subtraktive” teknologier, får vi det som kalles hybrid tilvirkning. Dette arbeidet har nå kommet så langt at disse prosessene kan settes inn i ordinær produksjon.

Disse prosessene gir helt nye muligheter for utforming av komponenter. Det betyr at mange av de kompromissene man har vært nødt til å gjøre av produksjonstekniske grunner ikke lenger er nødvendige, og man kan konsentrere seg om å gi komponenter og produkter gode egenskaper og høy ytelse.

Hva betyr dette for produktutviklere og konstruktører? Kan vi sette opp noen regler for når slike prosesser bør brukes? Gir de muligheter for tekniske løsninger vi hittil ikke har kunnet realisere?

I denne oppgaven skal slike spørsmål utredes, som et forarbeid til videre arbeid med en metodikk for ”design for ytelse”.

Spesielt er det ønskelig å komme fram til:

- Retningslinjer for å velge ut hvilke komponenter og produkter som egner seg for hybrid tilvirkning
- Retningslinjer for god utnyttelse av denne teknologien
- Retningslinjer for fordeling mellom additive og subtraktive prosesser i komponenter

Arbeidet vil foregå i samarbeid med Geminisenter IDAM (SINTEF Raufoss Manufacturing, IPK, SINTEF Materialteknologi og IPM), som har forskningsprosjekter innenfor additiv produksjon og som har nyanskaffet utstyr for det.

I tillegg til prosjektrapporten, skal det leveres en PU-journal i instituttets A3-format.

Ved bedømmelsen legges det vekt på at problemstillingen presenteres klart, at besvarelsen er skikkelig gjennomarbeidet og at kandidaten gir en selvstendig framstilling av stoffet med egne vurderinger, der også de egne bidragene i samarbeidsprosjektet gjøres rede for.

Besvarelsen skal ha med oppgavetekst og skal forsynes med innholdsfortegnelse. I forord skal det stå hvilke fordypningsemner kandidaten tar. Rapporten innledes med en klar formulering av problemstillinger bearbeidet i prosjektet, et sammendrag av viktige resultater, og konklusjoner. Rapporten skal være på maksimum 30 sider, inklusive skisser innarbeidet i tekst. Eventuelle tabeller, tegninger, detaljerte skisser, fotografier, med videre, kan medtas i et bilag som regnes i tillegg til de 30 sider. I besvarelsen henvises til de respektive steder i vedleggene, men besvarelsen skal skrives slik at den kan leses uten vedlegg.

Figurer og tabeller skal inneholde alle nødvendige påskrifter. Litteraturhenvisninger skal være fullstendige med angivelse av forfatter, bok (artikkel), tittel, forlag, årstall og sidenummer. Henvisninger foretas ved nummer i teksten og dette refererer til en nummerert litteraturliste bak i rapporten.

Tre (3) uker etter utlevering av prosjektoppgaven innleverer kandidaten et A3-ark med tekst og bilder som beskriver hva oppgaven går ut på (en papirversjon og et elektronisk eksemplar i pdf-format). Mal for arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen undervisning.

Senest 3 uker før innlevering av prosjektoppgaven skal kandidaten innlevere et A3 ark som illustrerer resultatet av arbeidet (en papirversjon og et elektronisk eksemplar).

Prosjektarbeidene presenteres som muntlige foredrag 21.oktober 2011. Det er obligatorisk frammøte for alle prosjektkandidater under foredragene.

Innleveringsfrist for prosjektbesvarelsen er 20.desember 2011. Besvarelsen leveres i to papirversjoner og elektronisk på CD eller DVD.

Kontaktperson i IDAM: Klas Boivie

Knut Aasland

Faglærer

Forord

Om oppgaven:

Denne oppgaven gir en oversiktlig og konkret beskrivelse av hvilke effekter en hybrid produksjonscelle kan gi innenfor rekke produktområder. Jeg har samlet informasjon ifra et bredt område for å kunne gi en tilstrekkelig god beskrivelse av et svært omfattende tema. Denne beskrivelsen legger grunnlaget for retningslinjer for god bruk av denne teknologien, som skal føres videre, utviklers og testes i min masteroppgave. Fordypningseminene mine dette semester; TMM1 Produktmodellering og TMM2 Produktsimulering komplimenterer elementer av denne oppgaven, især førstnevnte emne som har fått sitt eget avsnitt. Pensum i TMM2 kunne i svært liten grad knyttes opp imot temaet for denne oppgaven, men metodikken *concurrent design* beskrevet i TMM2 sammenfaller med konseptet *Design for Performance*.

Om arbeidsmetode:

For å sitere Albert Einstein: "If I had an hour to save the world I would spend 59 minutes defining the problem and one minute finding solutions". I tråd med denne filosofien og arbeidsmetodikk beskrevet i emnet TMM1 har jeg brukt mesteparten av tiden i denne oppgaven på å samle og bearbeide informasjon om emnet. Dette var et bevisst valg siden dette stoffet behøvde litt modningstid før jeg kunne begynne drøftingen. Underveis noterte jeg meg spørsmål som jeg ønsket å drøfte i konklusjonen. Når informasjonen var på plass jobbet jeg med å sortere den på best mulig måte, konkretisere den for så å finne en god måte å presentere den. Jeg opplevde at den gode oversikten over materialet gjorde det enklere å hente fram informasjon fra de forskjellige kildene, samt at jeg lettere kunne se problemstillingen fra flere synspunkt.

Jeg retter en stor takk til medveileder Klas Boivie som har vært til stor hjelp i å finne og diskutere materialet til denne oppgaven gjennom hele semesteret.

Sammendrag

Additiv tilvirkning gjør det mulig å lage svært avanserte komponenter av metaller. Materialstruktur og materialkomposisjon kan bestemmes slik at komponenter kan skreddersys for dens oppgave. I kombinasjon med subtraktiv tilvirkning kan man lage komponenter av høy kvalitet som er laget for ytelse. Dette er av stor betydning for produkter hvor egenskaper disse er viktige:

- Lavt vekt-styrke-forhold
- Bearbeiding
- Svinn
- Skreddersøm
- Modulisering
- Indre kaviteter
- Sammenstilling

En *"alt er lov"* framgangsmåte under konseptutviklingsfasen gir fokus på ytelse. Dermed utvikles konsepter som åpner for nye og innovative løsninger. Retningslinjer for konseptevaluering brukes som en metode for å velge ut komponenter som egner seg for hybrid tilvirkning. Samtidig kan de brukes for å finne undersystemer som med fordel kan slås sammen én eller noen få ved hjelp av hybrid tilvirkning, samt for å avdekke muligheter for utvidet funksjonalitet. To enkle regler; *"bruk additivt kun der du trenger det"* og *"bruk materiale kun der du trenger det"*, kombinert med metoder for formvariasjon og modulisering gir produkter som gir god utnyttelse av begge tilvirkningsmetoder.

Innhold

Introduksjon.....	1
Hva er mulig å lage ved hjelp av denne teknologien?	1
Hvordan oppnå god utnyttelse av denne teknologien?	4
Den hybride cellen	5
Eksempel på en hybrid celledes virkemåte.....	5
Additiv tilvirkning	7
Pulverbeddmaskiner	7
Pulverinjeksjonsmaskiner-maskiner	9
Hovedområder hvor hybrid tilvirkning er aktuelt.....	11
Materialer; svinn, struktur og ”lokalt materialvalg”	11
Hvordan oppnå god utnyttelse av materiale?	11
Vektreduksjon	13
Sammenstilling.....	15
Medisinske implantater	17
Produktfamilier, modulering og skreddersøm.....	18
Eksempel	18
Logistikk	19
Plasto, et eksempel ifra sprøytstøpeindustrien	20
Problemstilling	20
Løsning	21
Oppsummering og drøfting.....	23
Konsept 1:	24
Konsept 2	25
Konsept 3	26
Fordeling mellom additiv og subtraktiv tilvirkning	27
Konklusjon.....	28
Litteraturliste	30
Vedlegg	31

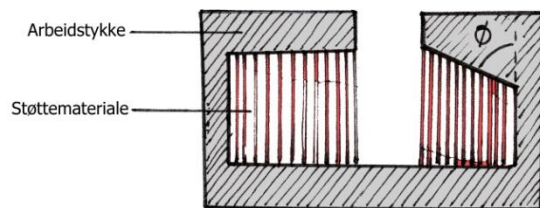
Introduksjon

Hva er mulig å lage ved hjelp av denne teknologien?

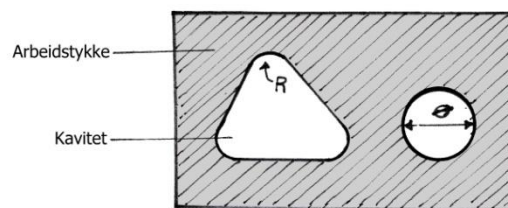
Første steg i å få god utnyttelse av denne teknologien er å forstå hvilke muligheter den tilbyr, hva man er i stand til å lage. Når dette er kjent vet man hvilken frihet man har; frihet til å bestemme en komponents geometri, både utvendig form og innvendig struktur. Dette er essensen av konseptet *design for performance*: Optimalisering av komponenters form for best mulig ytelse. På lengre sikt er det også mulig med optimalisering av materialkomposisjonen.

Første del av denne oppgaven er å kartlegge hvilke muligheter som finnes. På neste side er noen eksempler som viser forskjellige geometrier som har blitt laget med additiv tilvirkning. Dette er eksempler på både metallkomponenter og mer sammensatte produkter av plast. De illustrer noe av det som er mulig ved hjelp av additiv tilvirkning. Det må påpekes at det i noen tilfeller er mer utfordrende å lage metallkomponenter enn plastkomponenter, på grunn av metallers høyere vekt og smeltepunkt.

Det finnes mange forskjellige prosesser for additiv tilvirkning og dermed varierer også betingelsene. Likevel er det to tommelfingerregler som gjelder i de fleste tilfeller:



Illustrasjon 1: Eksempler på overheng/underkutt



Illustrasjon 2: Eksempler på kaviteter

Underkutt:

Ved underkutt med helninger som er større enn $\Theta=45$ grader må en støttestruktur lages, og man må ta høyde for fjerning av denne. Lukkede lommer i en komponent vil bety at pulver er innestengt i komponenten, noe man vil unngå pga unødvendig høy vekt og bruk av pulver.

Kaviteter:

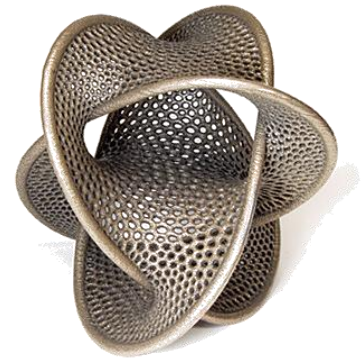
Sirkulære kaviteter på opptil $\varnothing=8\text{mm}$ krever ingen støttestruktur. Større kaviteter er mulige så lenge største helning er mindre enn 45 grader og en eventuell radius i øvre del av kaviteten ikke er større enn $R = 4 = \frac{\varnothing}{2}$. Det finnes også en nedre grense for diameter på sirkulære kanaler i en komponent, siden pulver skal kunne fjernes etter tilvirkning. Denne er avhengig av mediet som skal gå gjennom kanalen, samt lengden på kanalen. ⁽¹⁾



Bilde 1: Anheng til smykke



Bilde 2: Flaskeåpner



Bilde 3: Matematisk skulptur

Dette er eksempler på metalliske skulpturer, smykker og andre matematiske geometrier laget av en skulptør. Her er det tydelig fokus på form i stedet for funksjon, og bildene viser noen geometrier som er mulig å lage med litt kreativitet.

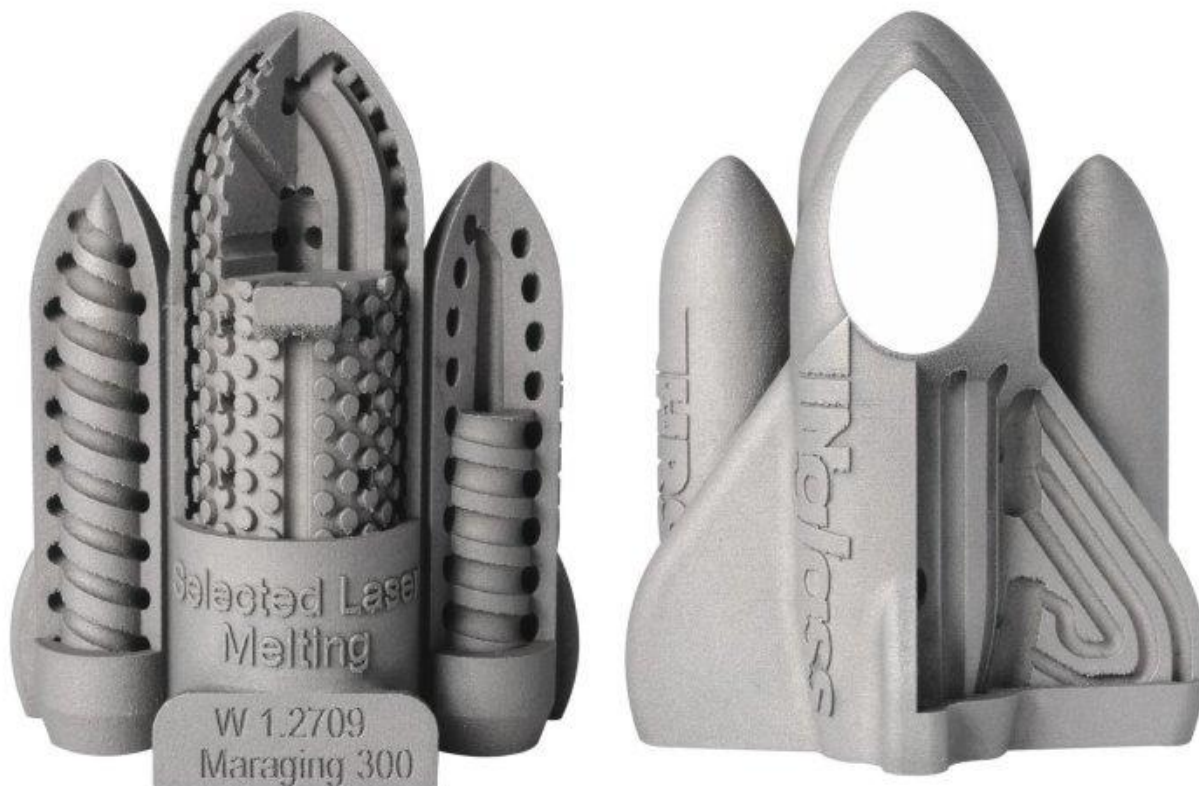


Bilde 4: Forsiden av *The Economist*



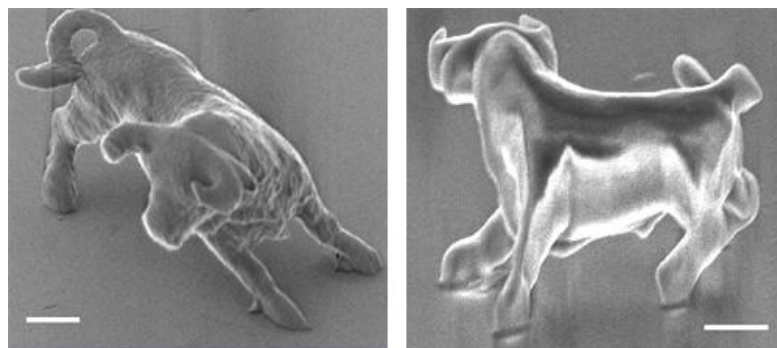
Bilde 5: Hanske av sammensatte ringer

The Economist har hatt flere artikler hvor additiv tilvirkning har vært temaet. I disse har det blant annet blitt trukket fram kompliserte plast-produkter som har blitt additivt tilvirket i én prosess: En fungerende stradivarius (uten strenger), en ringbrynje-hanske og en bestefarsklokke. ^(2, 3) For bilde av bestefarsklokken, se vedlegg 1.



Bilde 6: Gjenstand med eksempler på kjølekanaler og overflatekjøling

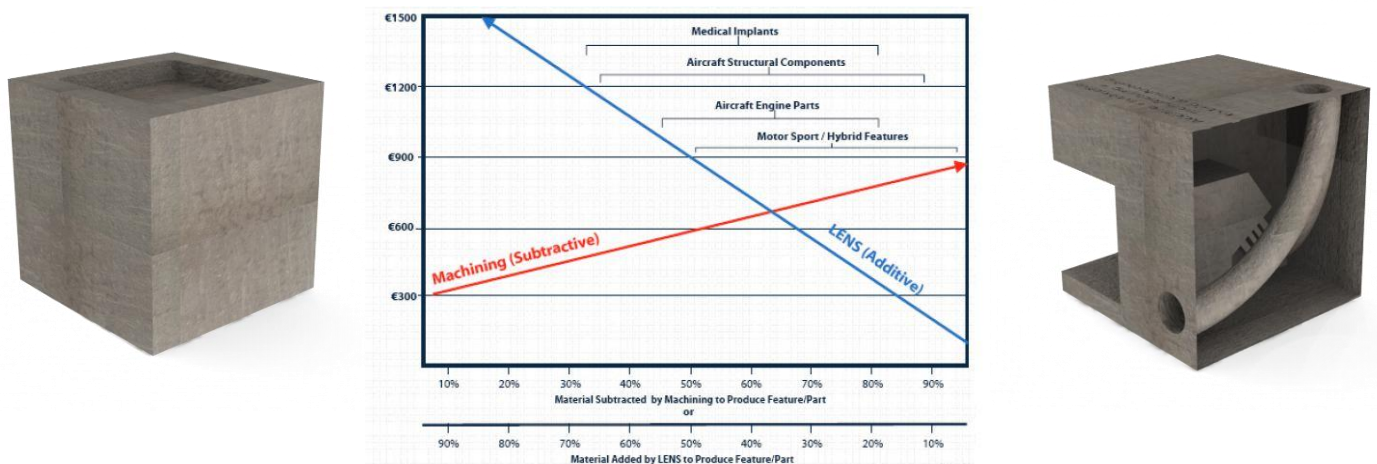
Disse metallkomponentene med innvendige kjølekanaler viser en mer praktisk anvendelse av denne teknologien, eksempelvis kjøling av sprøytestøpeverktøy. Senere i denne oppgaven vil et eksempel i fra Plasto, et norsk selskap som produserer sprøytestøpte komponenter vise en reell anvendelse av dette.



Bilde 7: Mikro tyr, målestreken er 2µm lang

Denne mikrotysten metallskulptur som er 10µm lang og 7µm høy, laget ved *Osaka university* i Japan. Dette er like stort som en rød blodcelle. Til sammenligning er tykkelsen på et hårstrå 17 til 181µm. Dette eksempelet viser hvor små detaljer som kan lages. En tenkt anvendelse av dette er små maskiner som kan sendes inn i kroppen gjennom blodårene. Dette er aktuelt for blant annet kreftbehandling.^(4, 5)

Hvordan oppnå god utnyttelse av denne teknologien?



Illustrasjon 3: Sammenhengen mellom kostnaden av subtraktiv og additiv tilvirkning

Svaret på dette spørsmålet er noe sammensatt. Ved additiv tilvirkning er kostnaden koblet til volumet av det som skal tilvirkes. Hvor komplisert gjenstandens geometri er øker ikke kostnaden. Faktisk vil kostnaden bli mindre, da volumet som skal tilvirkes vil bli mindre. Kostnaden av subtraktiv tilvirkning på sin side øker jo mer komplisert geometrien er, og synker når volumet som skal avvirkes synker. Over illustreres sammenhengen mellom kostnaden av additiv og subtraktiv tilvirkning.

I ene enden av skalaen ligger komponenter som uten tvil bør tilvirkes med konvensjonelle subtraktive metoder, og i den andre enden av skalaen ligger komponenter som kun er mulige ved additiv tilvirkning. Et sted i mellom ligger komponenter som er aktuelle for hybrid tilvirkning.

Videre kommer problemstillinger som berører vekt, materialstruktur, bearbeiding, sammenstilling, skreddersøm Dette er de områdene hvor hybrid tilvirkning har størst effekt. Dermed blir det vanskelig å vurdere hvilken tilvirkningsmetode som vil være mest lønnsomt. Om man har funnet ut at hybrid tilvirkning vil lønne seg gjenstår det fortsatt å finne den beste fordelingen mellom additiv og subtraktiv tilvirkning. En annen problemstilling er om én hybrid tilvirket komponent kan erstatte flere komponenter og dermed gi et bedre og mer lønnsomt produkt. Dette er problemstillinger som skal drøftes i denne oppgaven for å kunne gi svar på følgende spørsmål:

Hvordan kan man effektivt finne ut om hybrid tilvirkning er aktuelt?

Hvordan finner man en god fordeling mellom subtraktiv additiv tilvirkning?

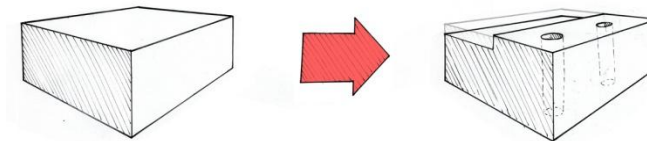
Hvordan gjøre en god lønnsomhetsvurdering på systemnivå?

Den hybride cellen

En hybrid celle vil bestå av en additiv og en subtraktiv del. En fem-akset fres utgjør den subtraktive delen, den additive delen kan finnes i flere former. Additiv tilvirkning, altså prosessen hvor metallpulver gjøres om til en fast gjenstand kan gjøres på flere måter. En detaljert beskrivelse av de forskjellige vil være for omfattende for denne oppgaven. Disse er allerede godt dokumentert i annen litteratur.⁽⁶⁾

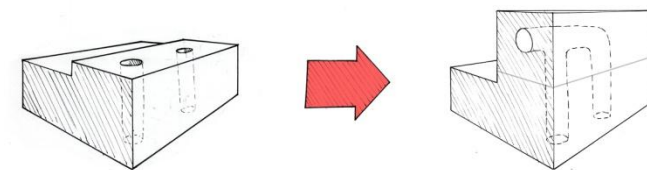
Jeg har likevel tatt med en overordnet forklaring av virkemåten til to utvalgte systemer i denne oppgaven, siden noe innsikt i teknologien er nødvendig for å forstå hvordan man kan oppnå fordelene ved bruk av hybrid tilvirkning. Samtidig er det lettere å forstå grunnlaget for tommelfingerreglene på side 7. Jeg har valgt å beskrive to av systemene på grunn av det går et hovedskille mellom det som kalles pulverbedd-maskiner og pulverinjeksjons-maskiner. Disse forklares nærmere på de neste sidene.

Eksempel på en hybrid celles virkemåte



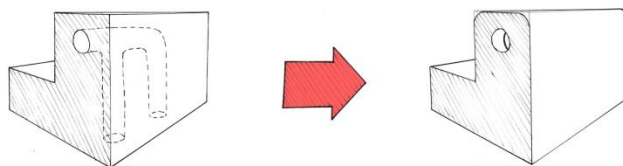
Illustrasjon 4: Arbeidestykke blir frest

Et arbeidsstykke monteres på en palett i den subtraktive delen og noe materiale avvirkes. På dette stadiet får komponenten den generelle formen den skal ha, og lange rette hull bør også tilvirkes på dette stadiet.



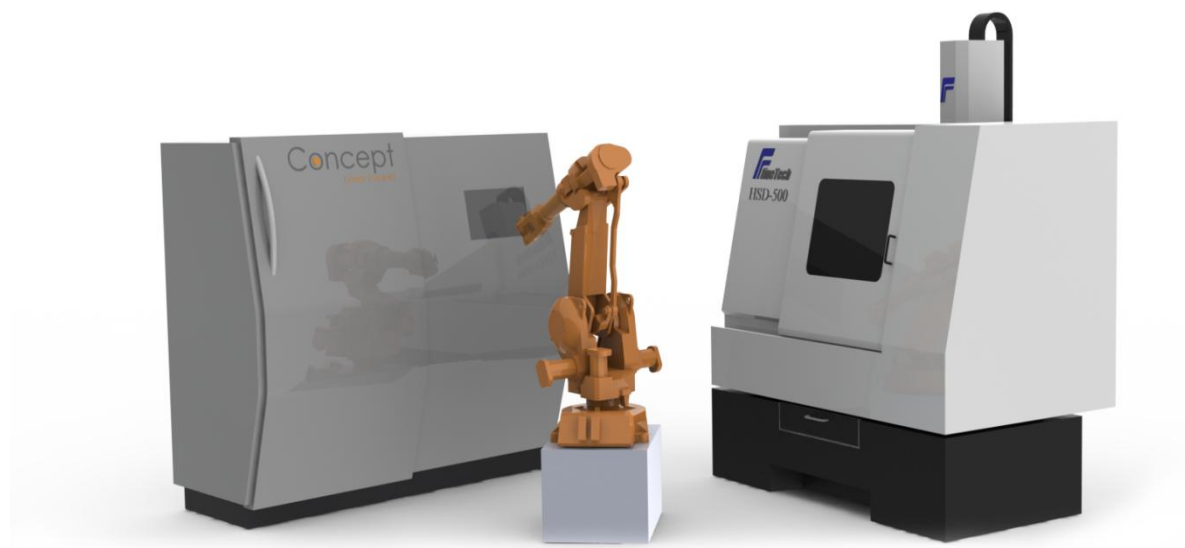
Illustrasjon 5: Materiale blir lagt til additivt

Deretter flyttes paletten over til den additive delen, hvor noe materiale legges til. Denne delen har den komplekse geometrien som ellers ikke kan tilvirkes med konvensjonelle metoder.

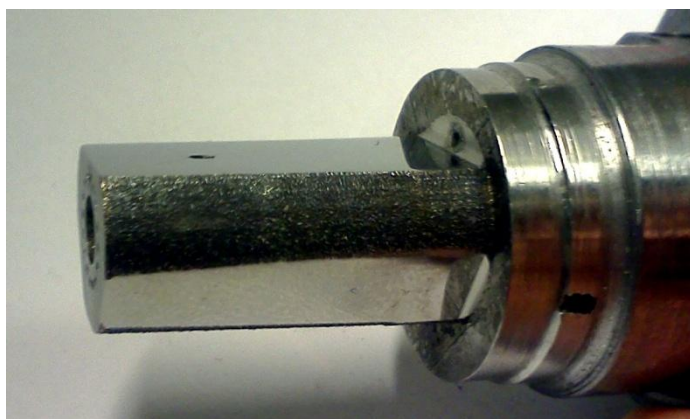


Illustrasjon 6: Additivt tilvirket materiale får ønsket overflate og nøyaktighet

Overflaten til en additivt tilvirket komponent er avhengig av parametrene for tilvirkningen, men kan i beste fall sammenlignes med presisjonsstøping, ca 100-300 μ m.⁽⁶⁾ Vridning pga temperaturforandring er også en kilde til unøyaktighet i henhold til toleranser. Dermed flyttes paletten tilbake til den subtraktive delen, hvor komponenten får ønske overflate og nøyaktighet.



Illustrasjon 7: Robotcelle med additiv og subtraktiv tilvirkning



Bilde 8: Additiv overflate før maskinering

Dette bildet viser en gjenstand med både ubehandlet og polert overflate.

Additiv tilvirkning

Pulverbeddmaskiner

Virkemåte:

Pulver mates inn i et lukket kammer med en ikke-reaktiv gass. Pulveret fordeles jevnt utover en flate og punktvis smelter en laser om pulveret til nært flytende metall. Metallet stivner umiddelbart, og lag for lag gjentas denne prosessen.

Hovedpunkter:

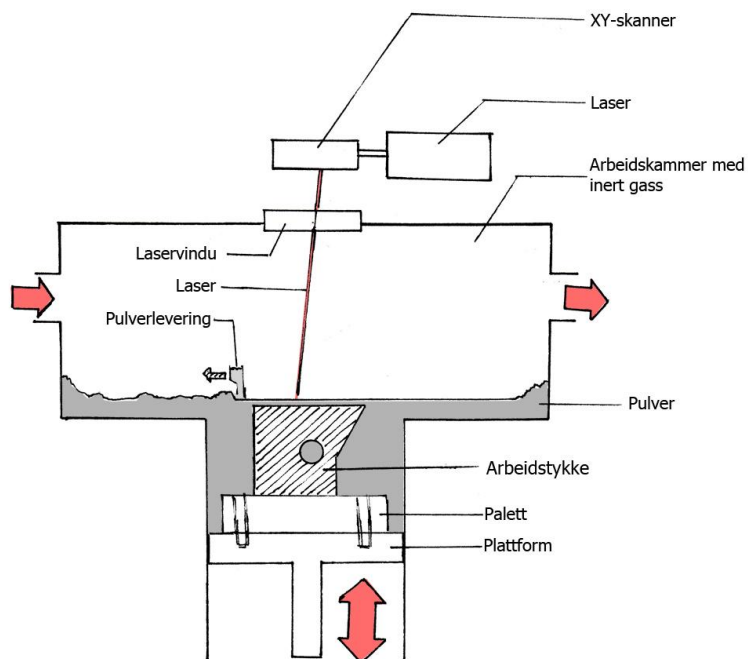
- Høy nøyaktighet i x-y-planet
- Størrelsen på kammeret bestemmer største mulig størrelse av komponenter
- Få bevegende deler
- Stillegående

Materialer: Høyfast stål, Rustfritt stål, aluminiumlegeringer, titanlegeringer, rent titan, kobolt-krom legering, nikkellegeringer og flere

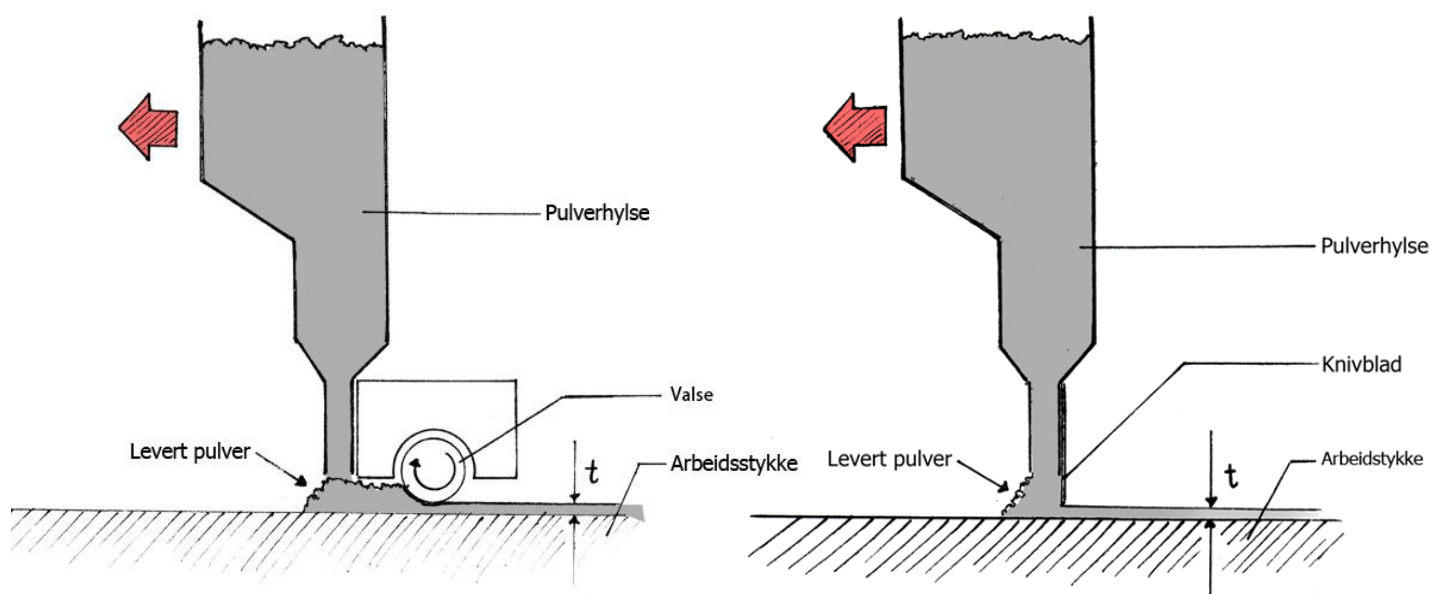
Dette er den vanligste typen maskin i Europa. Det som definerer denne typen maskin er hvordan pulveret behandles, dvs. at pulver legges til over hele arbeidsflaten, lag på lag. Tiden disse maskinene bruker på tilvirkning er i stor grad bestemt av tiden det tar å fordele pulveret. Med andre ord, tilvirkningstiden per komponent synker med antall komponenter.

Smeltingen av ett lag med pulver tar forholdsvis liten tid. Laserens styrke kombinert med det tynne pulverlaget gjør at dette skjer raskt. I tillegg kan laserstrålen flyttes raskt fra punkt til punkt uten å måtte flytte laseren. At maskinen har få bevegende deler gjør at disse maskinene er stillegående og har en høy grad av nøyaktighet i x-y-planet. Nøyaktigheten i z-planet er bestemt av finheten av pulveret og tykkelsen av pulverlaget, som normalt er rundt $t = 0,1\text{mm}$.⁽⁶⁾

Kammeret er fylt med en ikke-reaktiv gass for å motvirke oksidering av pulveret. Dette er for eksempel et kjent problem ved sveising av komponenter i titan, hvor argon benyttes for å bevare kvaliteten av materialet. Med pulver er dette ekstra viktig da tilstedeværelsen av oksygen medfører en stor fare for at titanpulveret antenner. For å forhindre vridning av komponenten under tilvirkning holder noen maskiner temperaturen i kammeret på et gitt nivå. Erttilvirkning vil det gå med tid til at komponenten kjøles ned nok til at den kan håndteres.⁽⁶⁾



Illustrasjon 8: Pulverbeddmaskins virkemåte



Illustrasjon 9: Metoder for fordeling av pulver; motrullende valse (venstre) og vibrerende knivblad (høyre)

En av de mest utfordrende oppgavene i en pulverbeddmaskin er fordelingen av pulveret. Dette er to metoder som har blitt brukt i forskjellige maskiner som har blitt brukt i slike maskiner.⁽⁶⁾ Disse metodene medfører høye krav til pulveret for at de skal kunne gi riktig tykkelse på pulverlaget. Framstillingen av dette pulveret er svært energikrevende. Systemer for pulverlevering er derfor under stadig utvikling da dette er et område med stort potensial for reduksjon av kostnad.

Pulverinjeksjonmaskiner-maskiner

Virkemåte:

En laserstråle har et fokuspunkt ca 1 mm under overflaten av materialet slik at det dannes en liten smelte. Én eller flere dyser leverer metallpulver inn i denne smelten , slik at pulveret også smelter og blir en del av det faste materialet. En ikke-reaktiv gass brukes både for å forhindre oksidering av pulveret og for å fokusere pulverleveringen til ett punkt for høyere nøyaktighet.

Hovedpunkter:

- I mange tilfeller raskere enn pulverbeddmaskiner
- Krever ikke et flatt arbeidsområde
- Godt egnet for reparasjoner og store komponenter
- Kan monteres på en robotarm

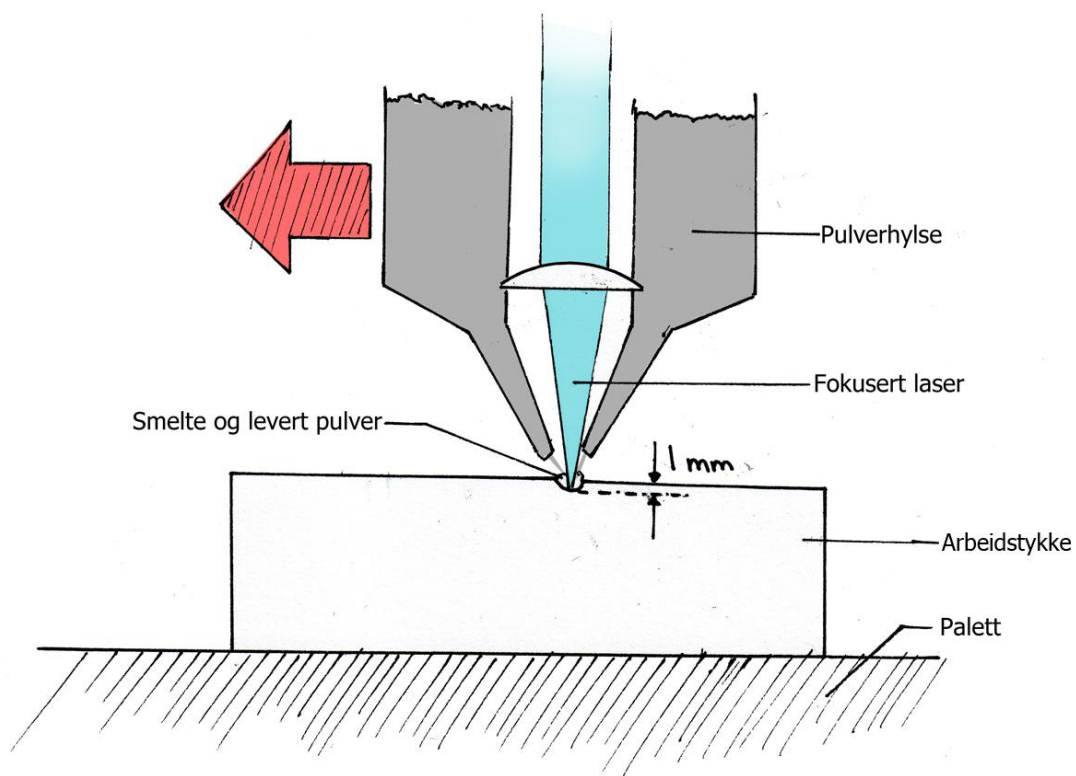
Materialer: Se vedlegg 2

Denne prosessen er forskjellig fra andre prosesser i og med at pulveret sprøytes ut etter hvert som materialet legges til komponenten. Denne prosessen trenger dermed ikke en plan arbeidsflate, og ved bruk av dekk-gass trenger ikke prosessen foregå i et lukket kammer. Dette betyr at prosessen er godt egnet for reparasjoner, gjerne på større gjenstander. Optomec er et selskap som bruker denne prosessen. Jeg har tatt med noen eksempler hvor deres LENS(*Laser Engineered Net Shaping*) -maskiner blir brukt.

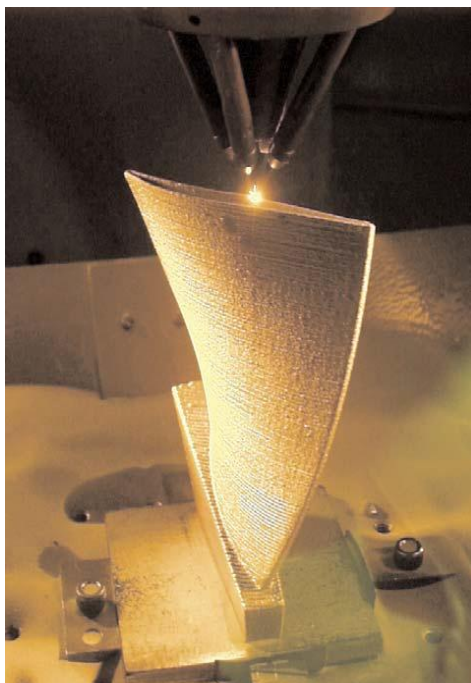
Bilde 10 viser et rotorblad bygget med LENS-prosessen. Normalt blir bladene frest ut av et arbeidsstykke, noe som tar lang tid, er krevende for verktøyet og skaper mye svinn. Med LENS-prosessen kan man legge til materiale som har bli slitt vekk, og deretter maskinere delen for å få nødvendig overflate og nøyaktighet.⁽⁸⁾

Bilde 11 er en komponent i en gass-turbin som har blitt reparert og ettermaskinert. En ny pakning kostet 1000 USD, imens reparasjonen kostet 500 USD. CCAD hadde 500 pakninger med behov for reparasjoner, noe som tilsvarte en betydelig besparelse. I tillegg vil reparasjoner kunne skje on-site, imens produksjon av en ny pakning kan kreve frakt. Mer om dette i på side 19.⁽⁸⁾

Bilde 12 viser et tilfelle hvor denne prosessen har blitt brukt til å reparere en rotor. Disse er ofte laget av svært dyre materialer som er krevende å bearbeide (kilde). En forlengelse av levetiden på slike produkter har en åpenbar fordel.⁽⁷⁾



Illustrasjon 10: LENS-maskins virkemåte



Bilde 10: Framstilling av et turbinblad



Bilde 11: Reparert component til gassturbin



Bilde 12: Reparasjon av turbinblad

Hovedområder hvor hybrid tilvirkning er aktuelt

Materialer; svinn, struktur og "lokalt materialvalg"

Hvordan oppnå god utnyttelse av materiale?

I de følgende eksemplene vises produkter som per i dag lages ved hjelp av subtraktiv tilvirkning. Dette er produkter som har eksister lenge, og prosessene for å lage dem er godt utviklet. Med hybrid tilvirkning kan de samme produktene lages med forbedret funksjonalitet og redusert svinn. Disse eksemplene viser hvordan hybrid tilvirkning kan gi god utnyttelse av materialer.

Svinn



Bilde 13: Brakett av titan for landingssystem i fly

På grunn av dyr prosesseringen er titan et dyrt materiale, som ofte blir brukt der hvor man ønsker et høyt styrke-vekt forhold, slik som i deler til fly. I mange tilfeller gir produksjon av slike komponenter 80 – 90% (eller mer) svinn i sponavvirkning. Dette fører til mye svinn og slitasje på verktøy. Resirkulering av spon er i mange tilfeller svært kostbart, dog varierer dette fra materiale til materiale. Ved bruk av titan kan det være kosteffektivt å redusere svinn til et minimum.

Bearbeiding



Bilde 14: Turbin av iconell

I likhet med titan er mange materialer svært krevende å bearbeide, slik som iconell. Denne turbinen vil føre til mye svinn og stor slitasje på verktøyet, som også gir behov for et kjølesystem. Disse problemene vil man slippe eller i større grad unngå ved bruk av hybrid tilvirkning.

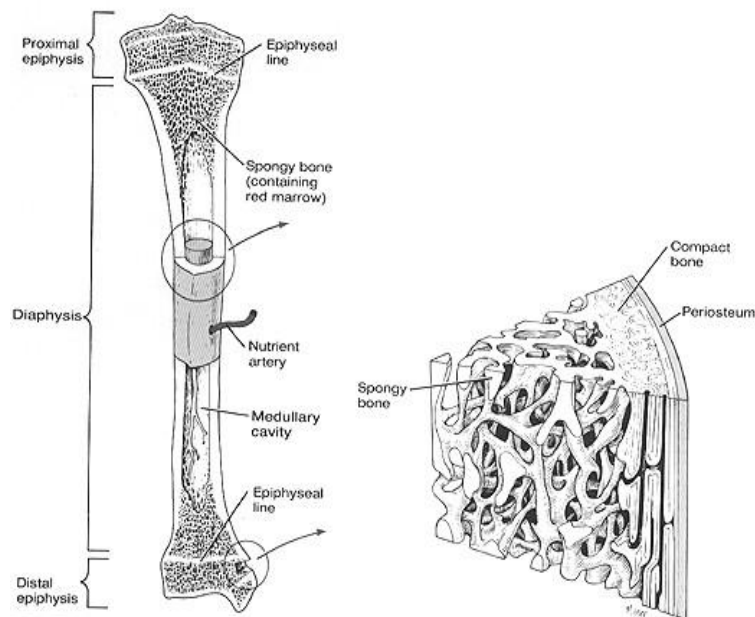
Lokalt materialvalg



Bilde 15: Eksempler på tannhjul

Et tannhjul er et produkt som krever både duktilitet og hardhet. En myk kjerne gjør at materialet tåler store påkjenninger hvor et hardt materiale ville ha gitt brudd. I tillegg trengs en hard overflate for å motvirke slitasjen som oppstår der hvor tannhjulene går i inngrep med hverandre. Ved å styre pulverblandingen kan man eksempelvis bestemme karboninnholdet slik at man får materialegenskapene der man vil ha dem. I tillegg kan man legge til et ytre lag med et ekstra slitesterkt materiale.

Materialstruktur



Illustrasjon 11: Beinstruktur

Naturen er mester på produktutvikling. Millioner av år med utvikling har resultert i strukturer som er skreddersydd for behovet. Kroppens bein er et godt eksempel på dette. Dets struktur gir et veldig godt styrke-vekt forhold. Med subtraktiv tilvirkning vil en slik struktur være alt for kostbar, om ikke umulig å lage. Dette kan imidlertid være en fordel for hybrid tilvirkning, siden dette reduserer volumet som skal tilvirkes. På dette området finnes fortsatt store utfordringer, siden det mangler programmer som takler det store antallet med detaljer dette medfører. Automatisk generering av optimal materialstruktur er også noe som må være på plass før dette er lønnsomt.

Vektreduksjon

I mange industrier er vekt en av faktorene som har størst innvirkning på kostnad og ytelse, eksempelvis fly og bilindustrien. Motivet for vektreduksjon er ikke noe nytt, men hybrid tilvirkning er et utmerket verktøy for vektredusjon. Selv ved grove anslag slik som i artikkelen ifra *The Sunday Times* kan man lett se at økningen av kostnader ved produksjon blir lønnsomme i det lange løp.



Bilde 16: Utsnitt ifra artikkel i *The Sunday Times*

I flyindustrien har vekt en stor påvirkning på kostnaden av flyturen. Overslaget i artikkelen ifra *The Sunday Times* viser at flyindustrien kan spare 351 milliarder dollar på drivstoff de neste 30 årene hvis vekten av flyene reduseres med 150kg

Eksempel: Redesign av dieselmanifold

Bildene øverst på neste side viser et eksempel hvor vekten på et dieselmanifold har blitt redusert med 40 %. For å redusere vekten er tankegangen at man bruker materiale kun der man trenger det. Redesign vil ikke nødvendigvis gi den beste utnyttelsen av denne teknologien sammenlignet med en ny design, men det illustrere hvor godt egnet hybrid tilvirkning gjør denne oppgaven. På forrige side viser avsnittet om materialstruktur en annen måte å redusere vekt på, uten å gå på bekostning av styrke.^(6,9)



Illustrasjon 12: Framgangsmåte ved redesign av dieselmanifold



Bilde 17: Resultat av redesign, additivt bygget



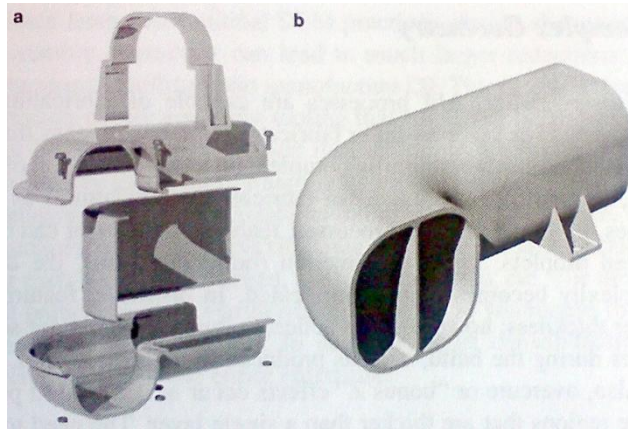
Bilde 18: Mazda MX-5

“Every gram counts. This is one of the key philosophies of the engineering team behind your Mazda MX-5”

I stedet for å fokusere på stadig sterkere motorer har teamet bak denne bilen fulgt det de kaller Gram strategien: Lavere vekt, morsommere å kjøre. Denne trenden kan bli standarden for fremtidens biler, siden energieffektivitet og lave utslipp også er tjent med denne utviklingen.⁽¹⁰⁾

Sammenstilling

Krav til funksjonalitet gjør at produkter må settes sammen av flere komponenter. Dette betyr at produktet må settes sammen, enten manuelt eller i en automatisert robotcelle. Det medfører også et potensielt svakt ledd i designet og redusert ytelse.



Illustrasjon 13: Gammelt og nytt design av luftkanal

Dette eksempelet viser forenklingen av en luftkanal til et jagerfly. Det originale designet bestod av 16 deler som ble redusert til én enkelt komponent i det nye designet. I tillegg ble innsiden av denne kanalen formet for bedre flyt.⁽⁶⁾

En komponent sammensatt av mange deler kan føre til redusert ytelse. Eksempelvis vil koblingspunkter føre til redusert flyt av fluider og gasser, i tillegg vil pakninger være nødvendig for å forhindre lekkasje som igjen skaper et behov for vedlikehold. En maskin sammensatt av færre deler kan oppnå bedre oppetid som følge av et mindre behov for vedlikehold. Dette har stor betydning innen mange forskjellige kapitalintensive områder, fra transport til prosessindustri og subsea.

I andre tilfeller kan et produkt være vanskelig å sette sammen, noe som kan gi et behov for spesialiserte verktøy osv. Med større frihet til å endre på design kan man skreddersy komponentene for sammenstilling, selv sent i produksjonsstadiet etter hvert som man oppdager problemer man ikke forutså under utviklingen.



Bilde 19: Unibody-chassis



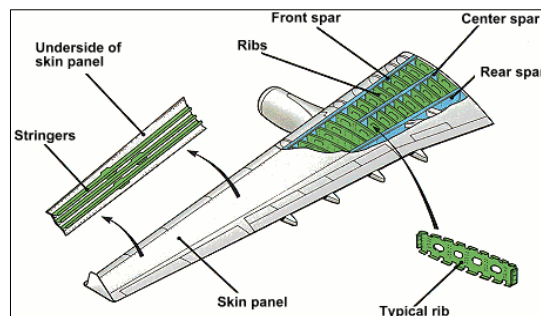
Bilde 20: Apple MacBook Pro

Dette eksempelet viser hvordan Apple har brukt det samme prinsippet på sine datamaskiner. Apples unibody-chassis er frest ut av en aluminiumsblokk som én del. Dette gir en langt stivere konstruksjon, som i tillegg forenkler sammenstillingen og dessuten øker levetiden på maskinen.



Illustrasjon 14: Airbus A380

Ved Airbus sine lokaler i Filton forskes det på flydeler av additivt tilvirkede deler av titan. I fremtiden ser selskapet for seg hele 35 meters vinger som én del.⁽³⁾



Illustrasjon 15: Struktur av en flyvinge

Medisinske implantater

SCP i Trondheim har utviklet en spesialtilpasset hofteprotese som har gitt svært gode resultater. Denne protesen blir individuelt tilpasset ved hjelp av CT-skanning overført til 3D- modeller som igjen overføres til kode for CNC-maskinering. Bidrag fra kirurger til å tilpasse disse protesene til pasienten har resultert i en mer naturlig leddbevegelse. Tilvirkningen av denne nye protesen gir 50 % høyere kostnader enn ved standardproteser, og dermed blir den kun brukt av pasienter med avvikende anatomi.⁽¹¹⁾

En studie gjort ved Mittuniversitetet i Sverige viser imidlertid at en protese produsert med en kombinasjon av additiv tilvirkning og subtraktiv tilvirkning kostet 65% mindre enn en tilsvarende protese laget med kun subtraktiv tilvirkning.⁽¹²⁾

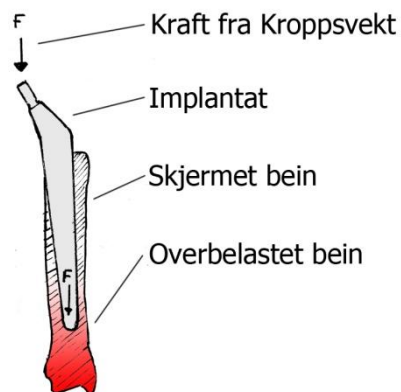
I denne undersøkelsen ble protesen laget ifra bunnen av og ettermaskinering ble gjort manuelt. Kostnadene per protese reduseres ytterligere dersom flere proteser lages samtidig. Tilvirkning av 7 og 14 proteser tok henholdsvis 36 og 38 timer additivt. Ledetiden per protese synker altså med flere proteser, imens maskineringstiden per protese ved subtraktiv tilvirkning er konstant.



Bilde 21: Femurimplantat med sone for beininnvekst



Bilde 22: Acetubulum med struktur for beininnvekst



Illustrasjon 16: Stress shield effekt

Den gjennomsnittlige levetiden til et hofteleddsimplantat er 20-25 år, men langt kortere og lengre levetider forekommer. Den vanligste årsaken til at implantat må byttes er at de løsner over tid pga en effekt som kalles *stress shielding*. Kroppens vekt overføres til beinet via tuppen av implantatet slik at kraften konsentreres i den nedre delen av beinet. Den øvre delen av beinet skjermes dermed ifra vekten.⁽¹³⁾

Implantater med overflater laget for beininnvekst kan føre til at kraften blir overført til beinet på en mer naturlig måte. Dette kan potensielt øke levetiden av implantater, noe som veldig stor betydning for pasientbehandling og pasienters levestandard.

Produktfamilier, modulering og skreddersøm



Bilde 23: Eksempler på selskap som benytter modulisering som metodikk for skreddersøm eller variasjon av produkter

Bruk av moduler gjør det lønnsomt til å tilby stor variasjon i produktsortimentet slik at det i så stor grad som mulig kan skreddersys til kunden. Denne metodikken har blitt brukt siden T-Forden kom på rullebåndet. I senere tid benyttes dette innenfor en rekke områder: Scania benytter modularisering av hyttene til sine lastebiler for å kunne skreddersy hver lastebil for kunden, Sperre har gjort det sammen med sine kompressorer, Håg med sine stoler, Ikea med mange av sine møbler og Volkswagen med sine biler.⁽¹⁴⁾

Skreddersøm er med andre ord et viktig verktøy innenfor dagens produktutvikling. For at dette skal kunne gjøres effektivt bør det være så stor variasjon som mulig på så få moduler som mulig. I tillegg bør endringer på modulene komme så sent som mulig i produksjonslinjen. Det er på dette området hybrid tilvirkning komplimenterer produktutviklingsmetodikken og produksjonssystemet, både ved å kunne gi større variasjon og færre forskjellige moduler.

Eksempel



Bilde 14: Turbin av iconell

Denne turbinen fra eksempelet på side 11 kunne vært en del av en større familie. En standardisert aksling vil kreve lite bearbeiding og i tillegg kunne holde flere forskjellige turbiner. Turbinene lages ved hybrid tilvirkning, hvor hver turbin kan skreddersys til formålet. Kombinert med muligheten til å nå et større marked, redusert svinn og verktøyslitasje vil kanskje hybrid tilvirkning gi et mer lønnsomt produkt av tilsvarende eller bedre kvalitet.

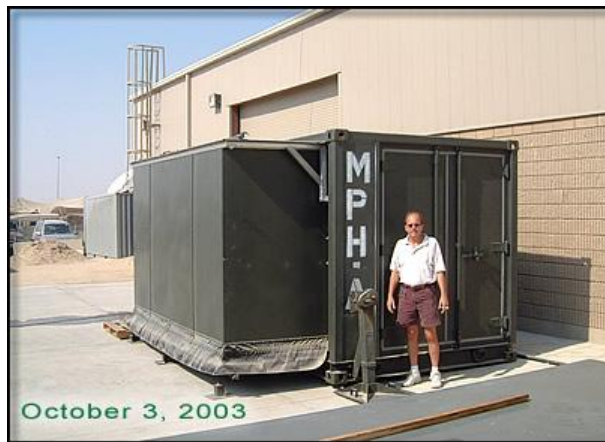
Logistikk

En MPH-enhet (*Mobile Parts Hospital*) er en enhet som er utstyrt med maskiner og verktøy slik at man har et mobilt verksted. Den amerikanske hæren har tatt i bruk disse enhetene for å spare tid og kostnader med transport. Dette gir dem de reservedelene de trenger, når og der de trenger dem. Noen slike enheter har blitt utstyr med CNC-maskner for både subtraktiv og additiv tilvirkning (LENS). En slik enhet har blitt satt i tjeneste ved en amerikansk base i Kuwait. I løpet av få timer ble enheten satt til 16-timers arbeidsdager for å holde følge med etterspørselen på reservedeler.^(6, 15)

Disse enhetene opererer på just in time prinsippet, noe som muligens kan overføres til eksempelvis bilindustrien:

Mindre produksjonsverksted utstyrt med hybride celler spredt utover verden vil kunne gi bedre tilgjengelighet av reservedeler, uten shipping- og lagerkostnader. Et slikt verksted vil også kunne tilby et nær ubegrenset utvalg av deler, avhengig av tilgangen på data og maskinens kapasitet mtp størrelse.

En annen anvendelse av dette kan være reparasjonsenheter for skip; å kunne bringe verkstedet til skipet vil i noen tilfeller kunne spare eieren for tapte inntekter pga nedetid. En slik enhet vil i tillegg kunne gjøre reparasjoner tilgjengelig på områder hvor et permanent verksted ikke vil være lønnsomt.



Bilde 24: MPH-enhet



Bilde 25: Åpen MPH-enhet med CNC-maskin

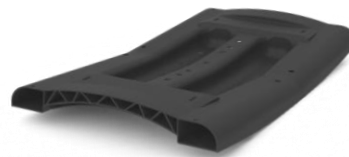
Plasto, et eksempel ifra sprøytestøpeindustrien

En anvendelse av hybrid tilvirkning på et område hvor denne teknologien har fått et fotfeste er verktøy for sprøytestøping. Eksempelet viser hvordan teknologien kan løse sentrale problemstillinger i denne industrien, og samtidig hvordan nye funksjoner kan forbedre disse verktøyene.

Problemstilling



Bilde 26: Fothviler i Ekornes' serie Jazz



Illustrasjon 17: Sete til fothviler

Plasto er en norsk bedrift som lager sprøytestøpte komponenter, blant annet støper et plastsete til en fothviler fra Ekornes. Problemene de har med produksjon av dette setet er en pågående case som berører to kjerneproblemer innen sprøytestøping; vridning vs. ledetid og gassforbrenning i kaviteten.

For at den ferdige komponenten skal få de riktige dimensjonene må det være svært liten grad av vridning etter støping. Vridning oppstår når polymeren stivner og trekker seg ujevnt sammen. Ved langsom og jevn kjøling av hele komponenten vil liten vridning oppstå, men dette gir for lang ledetid. I tillegg vil støpeformen forhindre vridning direkte.

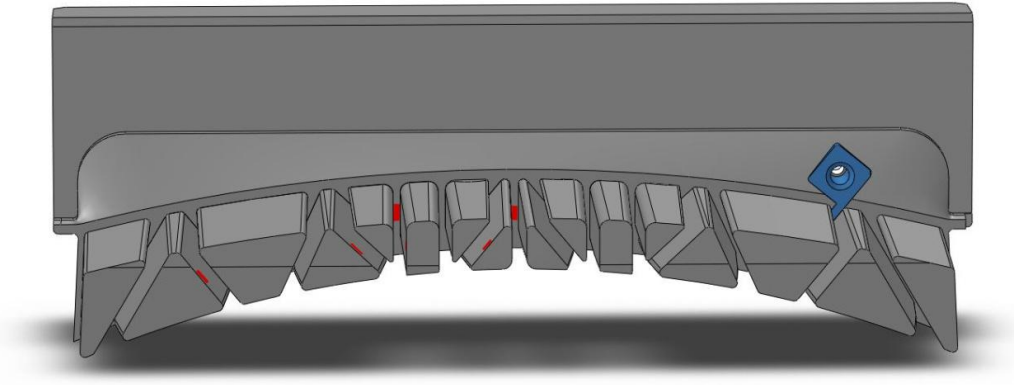


Bilde 27: Sete med problemområder merket med rød sirkel

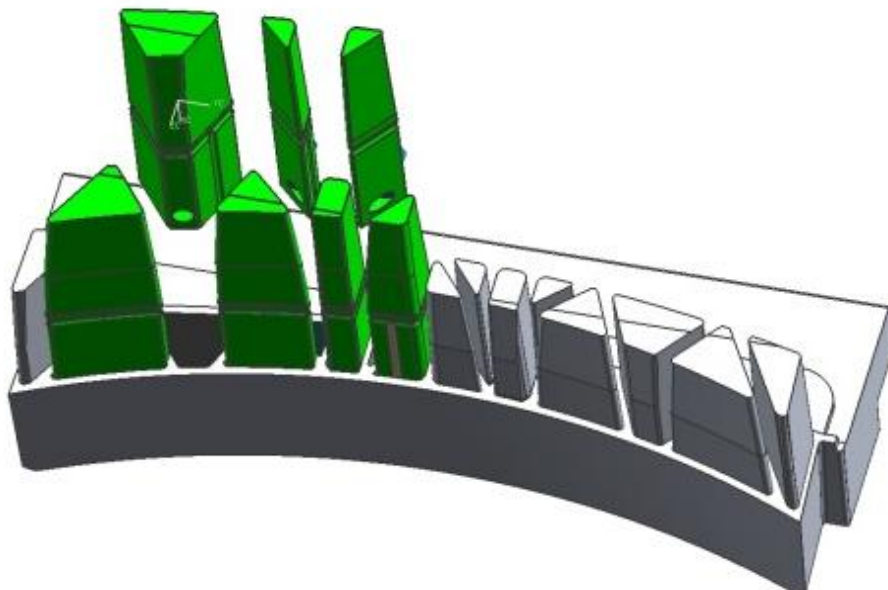
I støpeprosessen dannes det avgasser som pga setets geometri samles i finnene, markert i bilde x. Samlingen av denne gassen i kombinasjon med høy temperatur og høyt trykk skapes det som kalles en dieleffekt. Dette tærer på verktøyet, som etter hvert skaper deformasjoner på det ferdige produktet. Dette resulterer i mye nedetid på grunn av vedlikehold av verktøyet. Plasto ser nå på hybrid tilvirkning som en løsning på dette problemet.

Løsning

For å finne ut mest mulig om problemet starter designet av det nye verktøyet ved å samle inn så mye informasjon om problemområdet som mulig. Et nytt verktøy av stål utstyres med sensorer der hvor problemet oppstår, samt ved andre punkter av interesse.

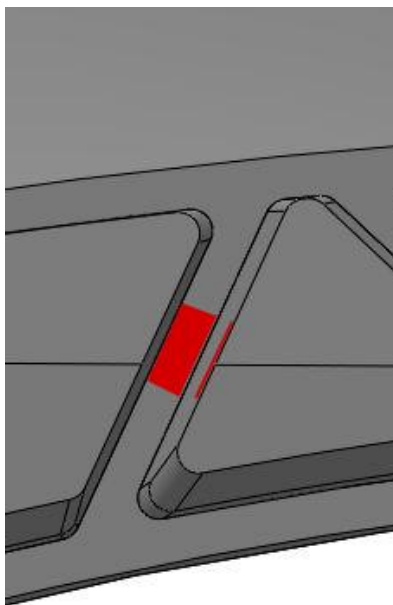


Illustrasjon 18: Verktøyet med mulige plasseringer av sensorer indikert med røde områder

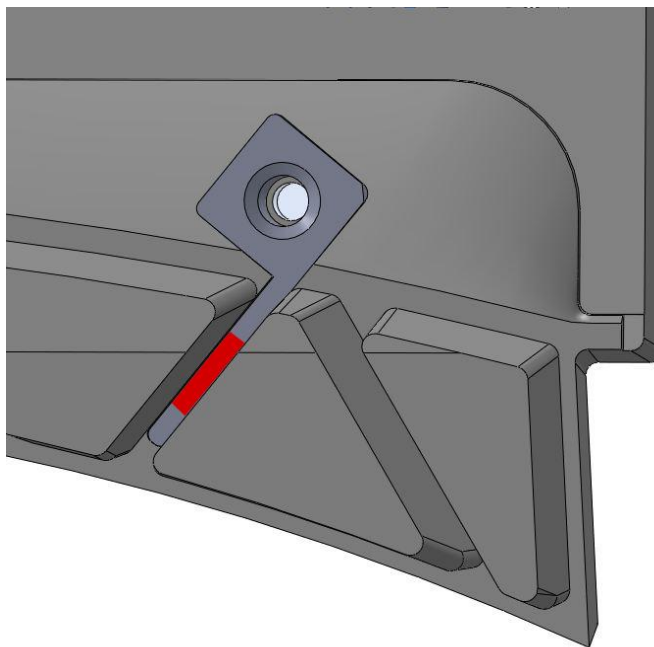


Illustrasjon 19: Sensorer settes på noen av verktøyets søyler før de festes til verktøyet

Noen av verktøyets søyler gjøres avtakbare slik at sensorer kan plasseres der de trengs. Dette gir også en forenklet lufteløsning, ved at gassen slipper ut gjennom mellomrommet mellom søylene og verktøyet.



Illustrasjon 20: Øvre og nedre plassering av sensor



Illustrasjon 21: Avtagbar sensor

En avtakbar sensor plasseres på den andre siden av verktøyet. Denne siden har ingen lufteløsning og vil fungere som normalt. Denne sensoren vil fungere som en referansemåling, slik at effekten av løfteløsningen på den andre siden kan måles.

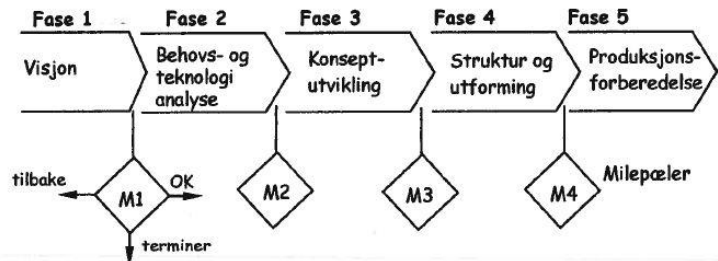
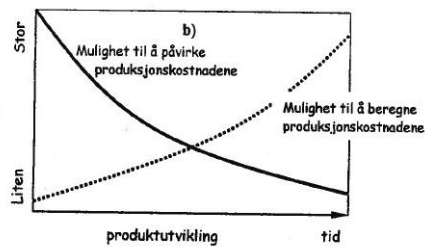
Verktøyet Plasto bruker i dag er av Moldmax, en kopperlegering som er utviklet for verktøy. Dette materialet har bedre varmeledningsegenskaper enn verktøystål. Dette var nødvendig for å oppnå god kjøling og tilstrekkelig lav ledetid, men det er samtidig et mykere materiale enn verktøystål, noe som fører til større slitasje. Skal Plasto bruke et hardere materiale trenger de en bedre kjøleløsning.

Den innsamlede dataen vil benyttes for å kartlegge kjølebehovet, slik at de kan skreddersy et kjølesystem med det som kalles *conformal cooling*, eller formtilpasset kjøling. Det betyr at kjølekanaler følger kaviteten med en gitt veggtykkelse for å oppnå jevn og god kjøling. Dermed kan det lages et mer slitesterkt verktøy, som fortsatt gir god ledetid. I tillegg kan det legges inn luftekanaler for å lede ut gassene der det er nødvendig, slik at slitasjen reduseres.

Ved å legge inn sensorer for trykk og temperatur i det endelige verktøyet vil logging avsløre endringer etter hvert. Eksempelvis kan et gitt avvik ifra en satt referanseverdi bli brukt som indikator for vedlikehold. På denne måten kan de bedre koordinere vedlikeholdet og dermed redusere nedetid ytterligere.

Oppsummering og drøfting

Jeg har vist at hybrid tilvirkning kan by på mange fordeler og gode produktegenskaper. Det fremmer masseskreddersøm, noe som er til stor fordel innenfor medisin og er en voksende trend innenfor andre områder. Det kan også brukes til reparasjoner eller endring av produkter slik at levetiden forlenges.



Det er også vist at god utnyttelse av teknologien forutsetter valg av produksjonsmetode i en tidlig fase. Et produkt sammensatt av færre deler vil i noen tilfeller være lønnsomt, og redesign vil ikke nødvendigvis gi den beste utnyttelsen av teknologien. Å modulisere et ferdig produkt vil medføre en stor grad av redesign.⁽¹⁴⁾

Uten begrensninger fra tradisjonelle tilvirkningsmetoder blir løsningsrommet langt større. For å velge ut de beste konseptene må det gjøres en vurdering basert på lønnsomhet. For å sikre god utnyttelse av hybrid tilvirkning må vi anta at konstruktøren har for liten kjennskap til teknologien til å gjøre en sikker vurdering. Retningslinjer bør i første omgang virke som erstatning for den manglende kunnskapen, og som et middel for opplæring. Retningslinjene bør også trene konstruktøren i å tenke på en ny måte. Før man skal finne komponenter og produkter som egner seg for hybrid tilvirkning må gode konsepter som faktisk benytter teknologien være på plass.

I forkant av konseptevalueringen trengs en ny tenkemåte for å "tvinge inn" nye innovative løsninger. Godt etablerte tilvirkningsmetoder har formet produkter slik vi kjenner dem i dag som underbevisst påvirker vår tenkemåte. Den "grønne sonen" i konseptutviklingen under fase 3 av IPM-modellen blir viktigere, og det er her man bør implementere fokus på ytelse.

Videre følger tre konsepter som illustrerer en prosess for å finne komponenter som egner seg for hybrid tilvirkning. I disse konseptene starter evalueringen på systemnivå slik at enkeltkomponenter eller undersystemer hvor hybrid tilvirkning er aktuelt kan velges ut. Disse går så igjennom en ny prosess hvor de optimaliseres og evalueres.

Konsept 1:

Spørsmål	Poeng	Vekttall	Sum
Avansert geometri	2	9	18
Mye sponavirkning	8	9	72
Størrelse på serie	3	5	15
⋮	⋮	⋮	⋮
Vekt er viktig	9	5	45
Poengsum			<u>150</u>

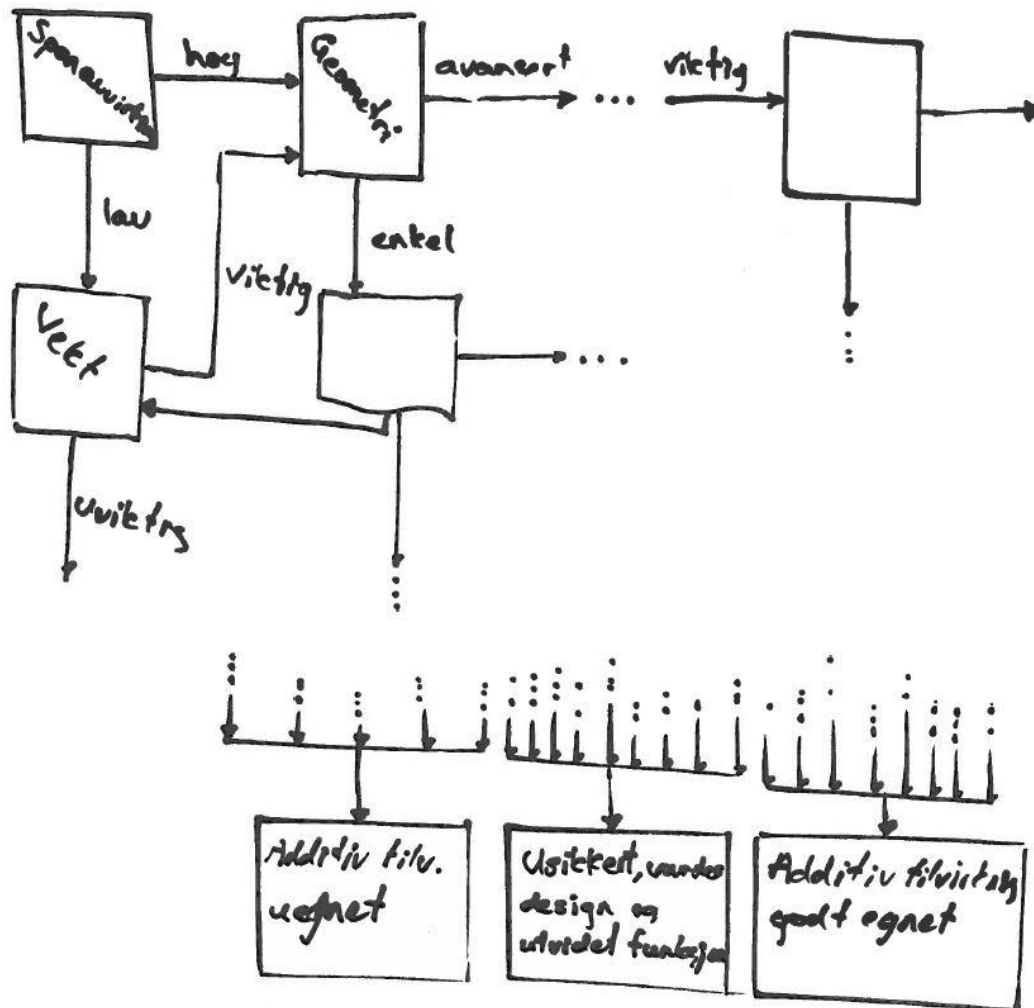
På samme måte som konsepter kan evalueres mot hverandre i utgang av fase 3 av IPM-modellen, kan et spørreskjema med gitte hovedpunkter og tilhørende vekttall måle hvordan kravene til produktet sammenfaller med styrkene ved hybrid tilvirkning.

En poengsum regnes ut, hvor summen kan sammenlignes med en referansetabell, for eksempel:

- Poengsum = **70 – 90** → Hybrid tilvirkning er uegnet
- Poengsum = **90 – 110** → Hybrid tilvirkning er i liten grad egnet
- Poengsum = **110 – 130** → Hybrid tilvirkning er egnet
- Poengsum = **130 –** → Hybrid tilvirkning er godt egnet

Vi antar at det finnes en liste med kritiske spørsmål hvor konstruktøren skal bedømme grad av riktighet. Dette systemet vil være enkelt å anvende, og vil raskt gi en indikasjon på om hybrid tilvirkning er aktuelt. Risikoen for gale svar er imidlertid stor ettersom det avhenger av man vektlegger de forskjellige punktene riktig. I tillegg vil noen av spørsmålene være lite relevante for problemstillingen imens andre faktorer er utelatt fullstendig. Denne listen må altså oppdateres kontinuerlig og brukes kritisk.

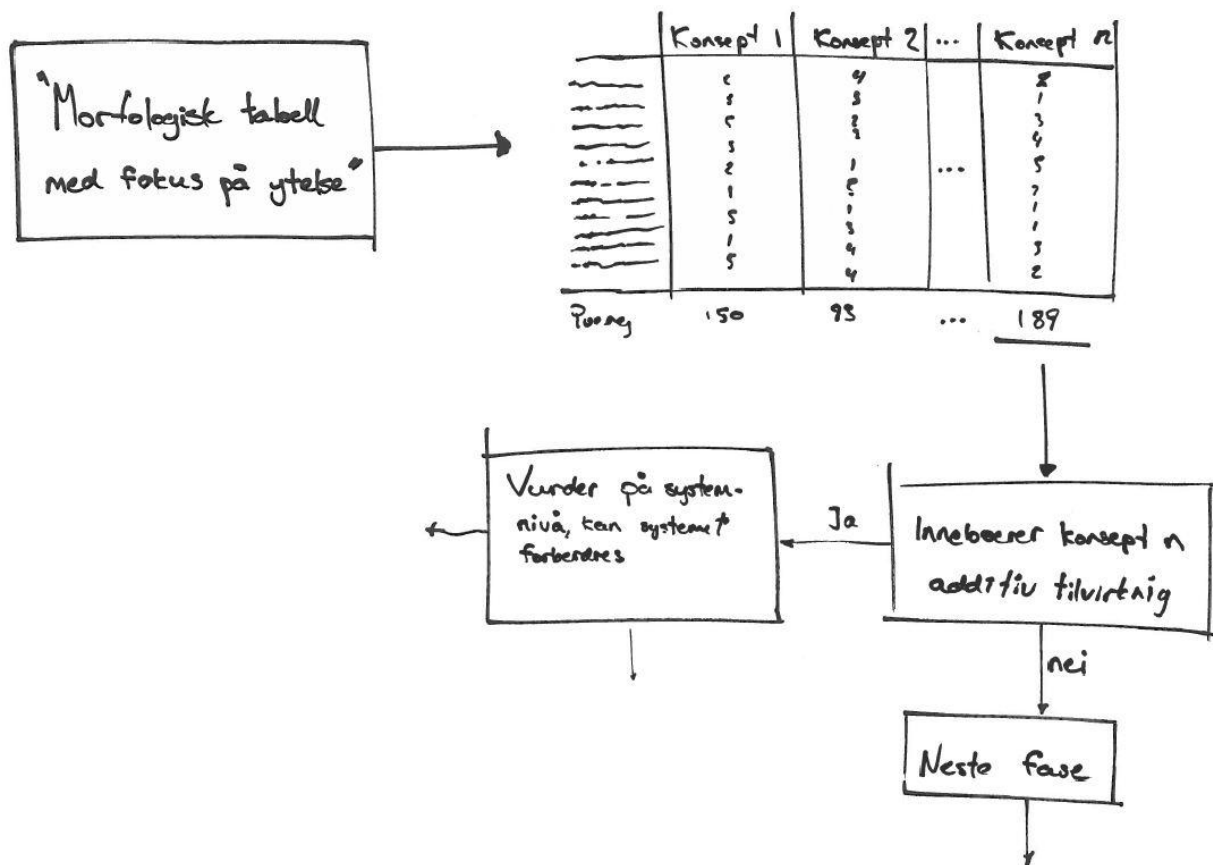
Konsept 2



Som en erstatning for kjennskap til teknologien kan et blokkdiagram lede konstruktøren eller utvikleren gjennom tankegangen til en som kjenner til teknologiens styrker og svakheter. Ved utgangen av diagrammet gis det en indikasjon om hvorvidt hybrid tilvirkning kan lønne seg.

Fordelen med dette systemet er at det kan lages slik at konstruktøren kan gjennom enkle vurderinger komme fram til en god indikasjon. Problemet som følger med gradering av viktighet slik man gjør i konsept en faller bort. På en annen side vil dette føre til et svært omfattende diagram, og her har man også problemet med at diagrammet må oppdateres kontinuerlig etter hvert som nye problemstillinger oppstår og teknologien utvikles.

Konsept 3

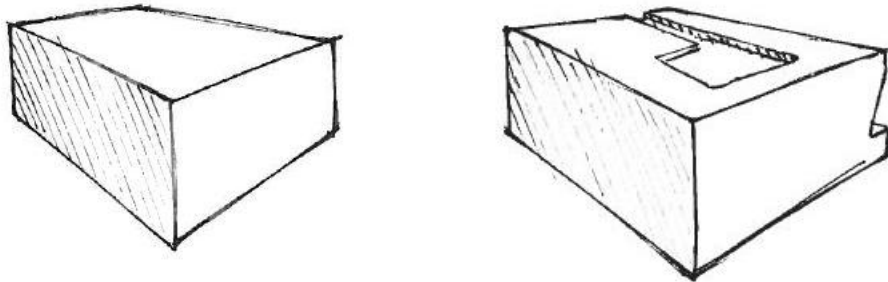


Når man lager en morfologisk tabell skal man være kreativ og skape et størst mulig løsningsromm. Forskjellige sammensetninger av de forskjellige funksjonene skal da kunne gi forskjellige konsepter som igjen vurderes mot hverandre. Dersom det valgte konseptet inneholder funksjoner som best lar seg løse ved hjelp av hybrid tilvirkning bør det tas en ny vurderingsrunde av komponenter eller undersystemer med komponenter som egner seg for hybrid tilvirkning. På denne måten kan man optimalisere enkeltkomponenter eller så sammen komponenter for bedre utnyttelse av teknologien.

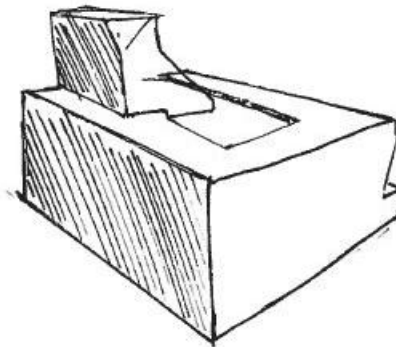
Dette konseptet knytter vurderingen sammen med den generelle konseptevaluering, noe som er en fordel da det gir et mer realistisk bilde enn en todelt vurdering vil gi.

Fordeling mellom additiv og subtraktiv tilvirkning

Når man konstruktøren har kommet fram til et konsept hvor én eller flere komponenter krever hybrid tilvirkning må han gjøre en ny vurdering. Denne vurderingen baserer seg dog enkelt og greit på én hovedregel: Fordelingen mellom subtraktiv og additiv tilvirkning bør være slik at man kun legger til materiale der det er behov for det.



Samtidig bør store volum velges slik at de enkelt kan freses ut av et arbeidsstykke, uten at det blir for store mengder svinn. Dersom produktet er en variant i en større familie kan det være lønnsomt med moduler, hvor den subtraktive delen er et fast utgangspunkt for hele familien.



Når den subtraktive delen er bestemt er den additive delen svært enkel; bruk materiale der du trenger det. Eksempelet på side 11 (diesel manifold) er et godt eksempel på en slik tankegang.

I tilfeller hvor hele komponenten må lages ved additiv tilvirkning vil den subtraktive delen kun sørge for nøyaktighet og god overflate.

Konklusjon

For god utnyttelse av hybrid tilvirkning må gode løsninger og konsepter åpenbart være på plass før selve konseptevalueringen. Fokus på ytelse bør være sentralt under konseptutviklingen, og jeg foreslår at én enkelt regel implementeres for å motvirke underbevisst påvirkning av tradisjonelle løsninger:

Alt er lov.

Det er i virkeligheten ikke sant; additiv tilvirkning har også begrensninger, men det bør ikke inngå i denne delen av konseptutviklingen siden det hemmer innovasjon. Konseptene kan uten store endringer tilpasses de begrensningene i et senere, og fokuset på ytelse bør være sentralt helt fram til et konsept er valgt. Grunnleggende muligheter ved additiv tilvirkning slik beskrevet på sidene 11 – 19 bør være kjent i forkant av konseptutviklingen.

Konseptene illustrerer en prosess for å indikere hvilke komponenter som egner seg for hybrid tilvirkning. Retningslinjene bør ta høyde for manglende kunnskap og virke som en metode for å peke ut områder hvor hybrid tilvirkning er egnet. De bør virke som en "huskeliste" slik at utvidet funksjonalitet kan tilegnes komponenter i et tidlig stadium, eksempelvis slik det ble foreslått at sensorer burde legges til i Plastos nye verktøy (side 22). Retningslinjene kan med fordel virke slik at konstruktøren trenes til å tenke på en ny måte som bidrar til økt fokus på ytelse. I en iterativ produktutviklingsprosess vil en slik tenkemåte komplimentere påfølgende runder med konseptutvikling.

Fordelingen mellom subtraktiv og additiv tilvirkning kan i stor grad gjøres ved å følge to enkle regler:

Bruk additiv tilvirkning kun der du trenger det

Bruk materiale kun der du trenger det

Disse reglene legger et godt grunnlag for god bruk av denne teknologien. Kombinert med metoder for formvariasjon og modulisering vil dette gi produkter som på en god måte benytter mulighetene ved additiv tilvirkning og nøyaktigheten og

Før disse retningslinjene kan tas i bruk må følgende spørsmål besvares, og kan egne seg som en del av masteroppgaven:

- Hvilke av de 3 konseptene gir best resultat? Kan de kombineres?
- Hvilke spørsmål skal stilles til konstruktøren i konsept 1 og 2?
- På hvilke produktområder skal denne vurderinger gjøres? Bør en slik vurdering skreddersys for hvert produktområde?
- Hvordan skal retningslinjene holdes oppdatert i forhold til teknologiutviklingen, nye anvendelser, nye problemstillinger osv?

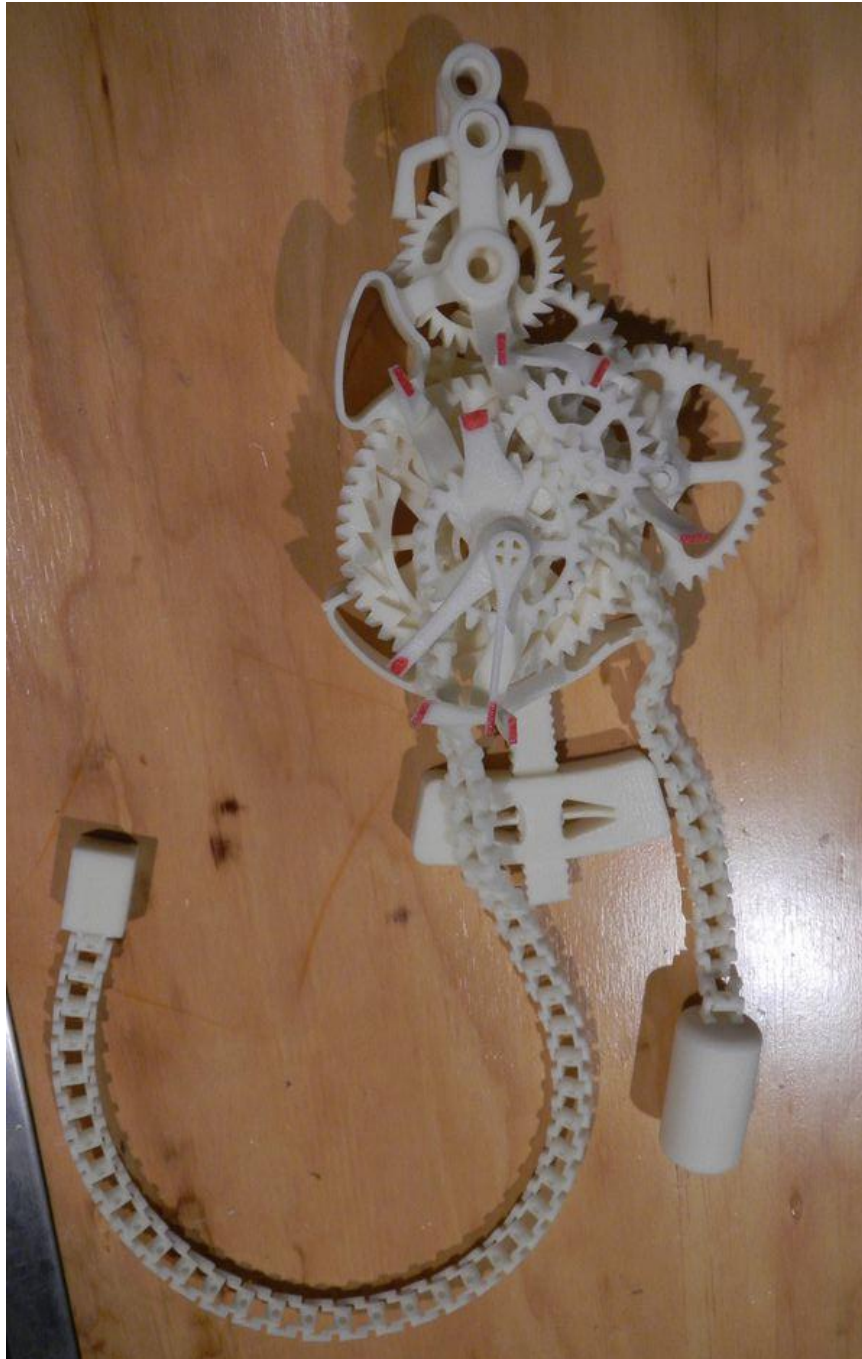
Deretter gjenstår å måle effekten av konseptet slik det er beskrevet i denne oppgaven.

Litteraturliste

1. Xiaorong Xu, Emanuel Sachs, Samuel Allen, *The design of Conformal Cooling in injection Molding Tooling*, 2001
2. The Economist, *Print Me A Stradivarius*, 2011, <http://www.economist.com/node/18114327>
3. The Economist, *The Printed World*, 2011, <http://www.economist.com/node/18114221>
4. KAWATA Satoshi, *Finer Features for Functional Microdevices*, Japan: Osaka University, 2001
<http://www.osaka-u.ac.jp/en/research/annual-report/volume-3/selection/05b.html>
5. Wired, *Micro Sculpture No Bull*, 2001
<http://www.wired.com/science/discoveries/news/2001/08/46370>
6. Gibson, W. Rosen, Strucker, *Additive Manufacturing Technologies, Rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer 2010
7. Sandia National Laboratorys, *Laser Engineered Net Shaping*
<http://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>
8. Hedges Martin, Calder Neil, *Near net shape rapid manufacture & repair by LENS*, 2006,
<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA524690>
9. Hauge Richard, luck Chris, *Atkins Project*, Loughborough University, 2009
10. Mazda, MX-5 Gram Strategy <http://www.mazda.co.uk/showroom/mx-5/weight-loss-programme/>
11. Svenningen S, *Kliniske erfaringar med en norsk individtilpasset hofteprotese*, Tidsskrift for den norsk legeforening, 2007, <http://tidsskriftet.no/article/1489681>
12. Licentiate Thesis, Mittuniversitetet i Sundvall, Sverige, *The use of additive manufacturing in the custom design of orthopedic implants*, 2011
13. Cluet, Jonathan, M.D., *Hip Replacement Loosening; Reasons for loosening of hip replacement implants over time*, 2010
<http://orthopedics.about.com/cs/hipreplacement/a/implantissues.htm>
14. Hildre Hans Petter, Mork Ola Jon, Aesøy Vilmar, *The Maritime Innovation Factory* Universitetet I Ålesund, 2010
15. Williams Meg, *Moving Technology forward, Mobile parts hospital manufactures replacement parts in Kuwait*, Army AL&T Magazine,
http://www.cleggind.com/50_Moving_Technology_Forward.doc.pdf
16. Siegfried Mayer, *Optimized mould temperature control procedure using DMLS*, EOS, 2009,
http://www.eos.info/uploads/media/EOS_WP_DMLS2_ENG_12.pdf
17. Vedlegg 2: Artikkel ifra the Sunday times, 2011
18. Vedlegg 3:

Vedlegg

Vedlegg 1: Bestefarsklokke “printet” spm én del.⁽³⁾



Vedlegg 2: Tabell over materialer som benyttes av Optomecs LENS-maskiner⁽⁸⁾

LENS® Preferred Alloys			
Alloy Class	Alloy	Alloy Class	Alloy
Titanium	Ti	Steels	H13
	Ti 6-4		S7
	Ti 6-2-4-2		17-4PH
	Ti 6-2-4-6		PH 13-8 Mo
Nickel Based	625, 713, 718		304, 316, 420
	Hastelloy X	Aluminium	4047
Cobalt Base	CoCr (Stellite)	Copper	Cu-Ni
LENS® Developmental Alloys			
Alloy Class	Alloy	Alloy Class	Alloy
Titanium	Ti 48-2-2	Steels	A2
	Ti 22Al-23Nb		15-5PH
Nickel Based	600 & 690		309, 410, 416
	Haynes 188 & 230		MM 10
	MarM 247		CPM 10V
	CMSX-3		Aermet 100
	Waspalloy	GRCop-84	
	Rene 142 & N5	Copper	Cu-10% Sn
Miscellaneous: Commercially Pure W, V, Mo, Ta, Re, Nb, Mo-Si_B, Nb-Si, C103, Norem, NanoSteel.			