



Design For Performance

Marius Aanonli Einang

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Knut Einar Aasland, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR PRODUKTUTVIKLING
OG MATERIALER

MASTEROPPGAVE VÅR 2012
FOR
STUD. TECHN. MARIUS EINANG

DESIGN FOR PERFORMANCE

Design for performance

I de siste åra har det vært arbeid 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. 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.

I sin prosjektoppgave høsten 2011 har kandidaten sett på hvilke faktorer som påvirker produktutvikling når slike produksjonsteknikker er tilgjengelige. Han har vurdert muligheter og begrensninger, og har foreslått en metodikk for å avgjøre hva som skal produseres additivt, og hva som skal gjøres subtraktivt.

Begrepet ”design for performance” – design for ytelse – har blitt lansert for å beskrive en produktutvikling der man ikke trenger å gjøre kompromisser pga produksjonstekniske forhold, men kan fokusere på funksjon og ytelse.

I denne oppgaven skal dette bearbejdes videre mot en metodikk for "design for ytelse".

Oppgaven skal inneholde:

- Et studium av rådende designmetodikker (Pahl & Beitz, Ulrich & Eppinger, evt. andre) for å finne ut hvor og hvordan spørsmålet om hybrid framstilling skal komme inn i en designprosess
- En vurdering av om "design for ytelse" vil være en egen aktivitet som inngår på ett bestemt punkt i en designprosess, eller om det er noe som vil påvirke hele prosessen
- En beskrivelse av hva metodikken bør inneholde (sjekklister, regnestykker etc.)
- En konklusjon om hvilket videre arbeid som bør gjøres på området

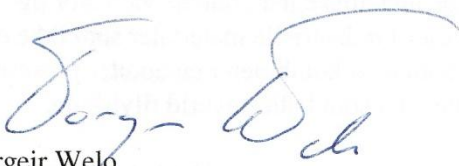
I tillegg til rapporten, skal det leveres en PU-journal i instituttets format.

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbejdet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen undervisning. Arket skal også oppdateres ved innlevering av masteroppgaven.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson ved SINTEF Raufoss Manufacturing: Klas Boivie


Torgeir Welo
Instituttleder


Knut Aasland
Faglærer

Forord

Denne oppgaven, gitt av SINTEF Raufoss Manufacturing og NTNU og er en fortsettelse på prosjektoppgaven med samme navn, "*Design for Performance*".

I den tiden jeg har skrevet denne oppgaven har jeg veldig god nytte av arbeidet jeg har gjort på forhånd i prosjektoppgaven. Jeg har i stor grad kunnet bekrefte resultatet av prosjektoppgaven, og videreutvikle det i masteroppgaven. Uten å ha lagt dette grunnlaget hadde denne masteroppgaven vært langt mer utfordrende.

Selv nå i masteroppgavens siste dager har jeg opplevd hvor vanskelig det kan være å komme fram til et godt HT-design uten å bruke en metodikk. Etter å ha studert temaet hybrid tilvirkning siden sommeren 2011 har nytten av en metodikk blitt mer og mer åpenbar. Det har vært veldig interessant å utvikle en metodikk for anvendelse av en teknologi med veldig stort potensial, teknologi som er i rask utvikling etter hvert som den har blitt mer utbredt i de siste årene.

Jeg har også observert at produktutviklingsmetodikker kan anvendes for å utvikle mer enn fysiske produkter. Jeg har jobbet på akkurat samme måte i utviklingen av metodikken for hybrid tilvirkning: Analyse av problemstillingen, se på alternative løsninger, komponere disse løsningene og til slutt se på detaljene av løsningen.

Opgaven er lagt opp slik at den leses best som en tosidig utskrift siden tekst ofte refererer til figurer på siden etter, eksempelvis i de tilfellene jeg har benyttet hele sider til figurer. Dette har jeg gjort for at flyten i lesingen skal være så god som mulig.

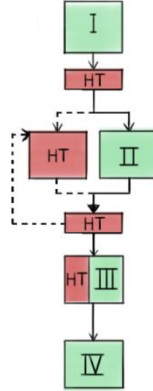
Nomenklatur

I denne oppgaven har jeg brukt noen forkortelser og begrep for å forbedre flyten i oppgaveteksten. Under er en liste med en forklaring av disse.

- HT: En forkortelse for hybrid tilvirkning
- HT-egenskap: Egenskaper som gir spesielt god utnyttelse av HT
- HT-design: Et design av en komponent eller et produkt som innebærer bruk av HT
- HT-komponent: Som HT-design; komponenter som krever HT
- HT-vurdering: Vurderingen om HT bør anvendes eller ei
- HT-løsning: En løsning på en funksjon krever HT

Sammendrag

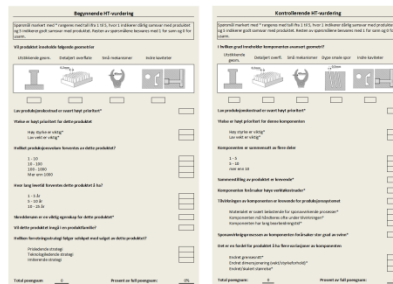
Strukturen av den integrerte HT-vurderingen



Figur 25: Valgt struktur for kombinert HT-vurdering og generell utviklingsmetodikk Generell firefases utviklingsmetodikk med integrert HT-vurdering

HT-vurderingen bør inngå som en parallell del av konseptutviklingen, som en integrert del av detaljdesignfasen og som et eget steg i form av to sjekklister. På denne måten vil integreringen av HT-vurderingen skje på en naturlig måte som gir ekstra fokus på HT i konseptutviklingen og som forsikrer at HT-komponenter vil virke godt med resten av produktet gjennom tett samarbeid i detaljutførelsesfasen. To sjekklister virker som kontrollpunkter etter første og andre fase. En generell firefases modell er valgt som mal for integreringen, slik at HT-vurderingen kan kombineres med de fleste andre utviklingsmetodikker.

Sjekklistene



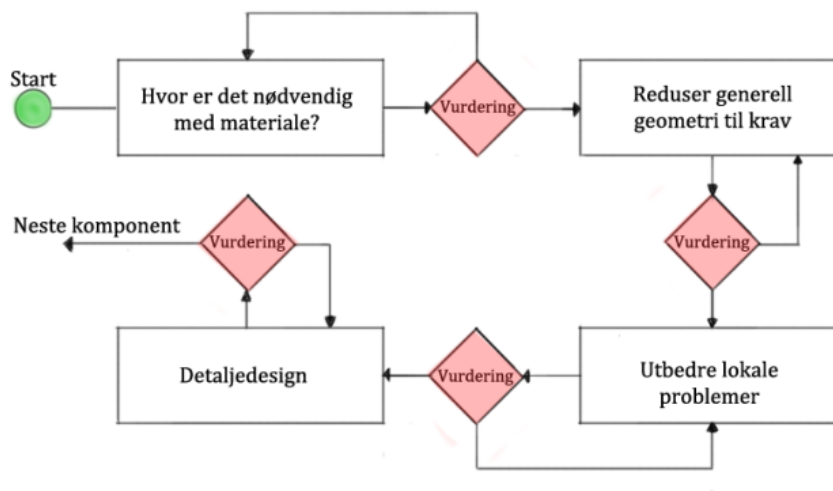
Figur 1: Miniatur av sjekklistene (Figur 27: Sjekkliste før konseptutviklingen, Figur 32: Sjekkliste etter konseptutviklingen)

Ved å undersøke primæregenskaper ved produktet og dets komponenter benyttes sjekklister for å vurdere om produktet sammenfaller med de sterke sidene ved HT. Ved å benytte en sjekkliste før konseptutviklingen har man mulighet til å finne et behov for HT tidlig i utviklingen. Sjekklisten etter konseptutviklingen benyttes for å kontrollere om resultatet av konseptutviklingen ser ut til å gi god utnyttelse av HT.

Morfologisk tabell med fokus på ytelse

De faktiske komponentene som best egner seg for HT avdekkes i første rekke gjennom bruk av en morfologisk tabell. Det vinnende konseptet vil bestå av en rekke løsninger. De løsningene som krever HT sorteres ut og kontrolleres i sjekklisten etter konseptutviklingen før de eventuelt tas med i en ny runde med konseptutvikling for HT-komponenter.

Designmetodikk for HT



Figur 43: Prosess for utvikling av HT-design

I konseptutviklingsfasen for HT-komponenter benyttes en designmetodikk for HT som baserer seg på tommelfingerreglene "Kun bruk materiale der det er nødvendig", "Kun bruk additivt der det er nødvendig" og regelen om minimum 45 graders helning for å unngå støttestruktur.

Kriterier for god HT-design

Kvaliteten av et utviklet HT-design kontrolleres og forbedres gjennom bruk av et sett med kriterier for som må oppfylles for at designet vil gi god utnyttelse av teknologien. Pliktkriteriene er generelle kriterier som er en fordel i alle tilfeller, og må innfris for å oppnå den beste utnyttelsen av teknologien. Ekstrakriteriene er de kriteriene som gir den økte ytelsen av produktet. Minst ett av disse kriteriene bør innfris for at utviklingen av teknologien skal være god.

Pliktkriterier:

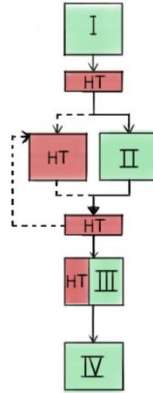
- Lite materialsvinn/reduisert maskinering
- Enkel ettermaskinering
- Minimal bruk av additiv tilvirkning

Ekstrakriterier:

- Skreddersøm
- Avansert geometri
- Lav vekt
- Forenkler sammenstilling
- Økt styrke

Abstract

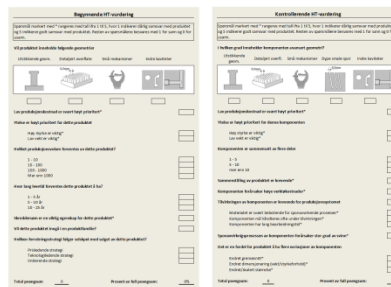
Structure of the integrated HM-evaluation



Figur 25: Valgt struktur for kombinert HT-vurdering og generell utviklingsmetodikkA general four phase design method with the integrated HT-evaluation

The HM-methodology (HM = hybrid manufacturing) is integrated as a parallel concept development phase, as a fully integrated part of the detail development phase and as HM-dedicated steps in between phases one and two, and two and three. This way the integration of the HM-evaluation is a natural addition to the general method. This ensures extra focus on HM in the concept development phase, and the integrated detail development phase ensures good interaction between HM-designs and conventional designs. The HM-dedicated steps are checklists. A general four phase development method was chosen as a definition of the overall development process. This way the HM-evaluation can be integrated in as many different product development processes as possible.

The checklists



Figur 2: Thumbnail of the checklists (Figur 27 and Figur 32)

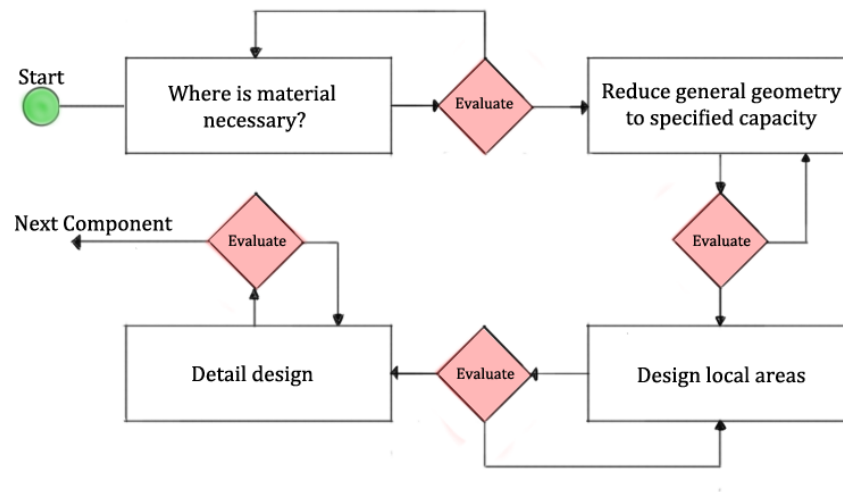
By analyzing the primary properties of the product and its components and comparing them with the most important properties available through HM the lists check whether it's likely that a good application of HM can be found or not. The first one is the earliest evaluation or indication available in the development process, while the second controls the result of the concept development, thus

ensuring that no bad HT-designs are developed further, as well as serving as a second chance to discover possible applications for HM.

Combination tree focused on performance

Primarily the components that are suitable for HM are found through the use of a combination tree. The solutions and components included in the winning concept that require HT are picked out for further analysis and a parallel development phase for HM-components.

Design methodology for HM



Figur 43: Proses for utvikling av HT-design Process for developing HT-designs

In the development phase for HM-components there is a process for developing good HM designs. It is based on the rules of thumb, "Only use material where it is necessary", "only use additive processes where it's necessary" and the rule of minimum 45 degree slope to avoid the need support structures during manufacturing.

Criteria for good HM designs

The quality of a proposed HM design is controlled and improved through the use of a set of criteria that must be met to achieve proper utilization of the technology. The primary criteria must be generally profitable in any application of HM and must be met to fully utilize the technology. The secondary criteria are the properties that actually give the products the increase in performance. At least one of

these criteria must be met to properly utilize the technology

Primary criteria:

- Low loss of material/reduced need of machining
- Simple surface machining where smooth surfaces are needed
- Minimal use of additive processes

Secondary criteria

- Customization
- Advanced geometry
- Low weight
- Simplified assembly
- Increased strength

Innhold

Forord.....	ii
Nomenklatur	iii
Sammendrag.....	iv
Abstract.....	vi
1 Innledning	1
1.1 Ifra prosjektoppgaven.....	1
1.2 I masteroppgaven	2
2 Etablerte produktutviklingsmetodikker.....	3
2.1 Pahl & Beitz	3
2.2 Ulrich & Eppinger	5
2.3 Nigel Cross.....	7
2.4 Generell form; Michael J. Frenchs modell	9
3 HT i de fire fasene	11
3.1 Om fremgangsmåten	12
3.2 Fase en; analyse av problemstillingen	13
3.3 Fase to; konseptutvikling	19
3.4 Fase tre; detaljdesign.....	23
3.5 Fase fire; produksjonsdesign	26
3.6 Oppsummering	27
4 Strukturer for HT- vurdering	30
4.1 Integrert vurdering.....	31
4.2 Dedikert fase.....	31
4.3 Parallell vurdering	32
4.4 Konklusjon.....	33
5 Innholdet I HT-vurderingen.....	35
5.1 Sjekkliste	35
5.2 Noen av sjekklistenes punkter	43
6 Utvelgingsprosess	49
6.1 Konseptutvikling som prosess for å finne HT-komponenter	49

6.2	Prosessen	50
6.3	Designmetodikk for HT	51
6.4	Eksempel på bruk av designmetodikk for HT.....	52
7	Kriterier for god HT-design	64
7.1	Pliktkriterier	64
7.2	Ekstrakriterier	65
7.3	Bruk av kriteriene.....	65
8	Konklusjon.....	66
8.1	Strukturen av den integrerte HT-vurderingen	66
8.2	Sjekklistene	66
8.3	Morfologisk tabell med fokus på ytelse.....	67
8.4	Designmetodikk for HT	67
8.5	Kriterier for god HT-design	67
8.6	Problemstillinger som har dukket opp underveis.....	68
9	Videre arbeid.....	69
9.1	Testing av metodene.....	69
9.2	Flere punkter i sjekklistene	69
9.3	Metoder for generering av nye ideer	69
9.4	Metode for redusering av generell geometri	69
10	Figurliste.....	70
11	Bilder:	71
12	Referanseliste	72
13	Vedlegg	73

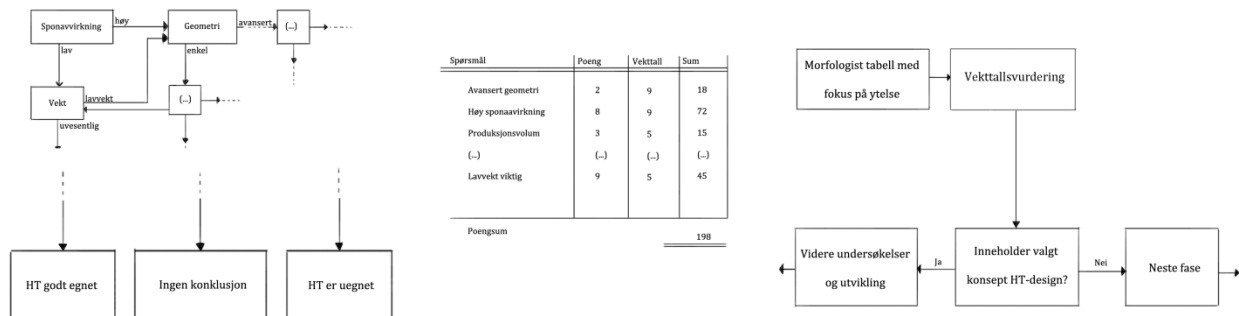
1 Innledning

1.1 Ifra prosjektoppgaven

I prosjektoppgaven *Design for Performance* presenterte jeg flere av de viktigste egenskapene ved hybrid tilvirkning (HT), egenskaper jeg fant gjennom et litteraturstudie. Oppgaven ga også et lite innblikk i teknologien bak selve tilvirkningsprosessen. To sentrale tilvirkningsprosesser, pulverbed- og pulverinjeksjon ble presentert, i tillegg til en rekke eksempler på bruk av denne teknologien. Målet ved oppgaven var å finne retningslinjer for god utnyttelse av HT, hvordan å finne komponenter som egner seg for HT, samt å lage retningslinjer for god fordeling mellom additive og subtraktive prosesser i tilvirkningen.

Det viste seg at HT er godt egnet til produkter hvor de følgende egenskapene er viktige:

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



Figur 3: Konsept 1, 2 og 3 fra prosjektoppgaven *Design for Performance*

For å velge ut komponenter som er godt egnet for HT ble tre forskjellige konsepter foreslått. Hensikten med konseptene var å virke som en huskeliste for konstruktøren, å gi en tankeprosess som fremmer løsninger med fokus på ytelse i tillegg til å lære opp /dekke manglende kunnskap om HT. To av disse konseptene har blitt tatt med videre i masteroppgaven.

Tre enkle regler ble foreslått, for å vise en tenkemåte som vil bidra til god bruk av teknologien; en "alt er lov"-framgangsmåte under konseptutviklingsfasen understreker behovet for et åpent sinn, eller "grønn fase" i denne delen av utviklingen. Reglene "bruk additiv tilvirkning kun der du trenger det" og "bruk materiale kun der du trenger det" i kombinasjon med metoder for formvariasjon og modulisering gir en tankegang som gir god utnyttelse av både additive og subtraktive tilvirkningsmetoder.¹

¹ Prosjektoppgave *Design for Performance* (2011) av Marius Einang

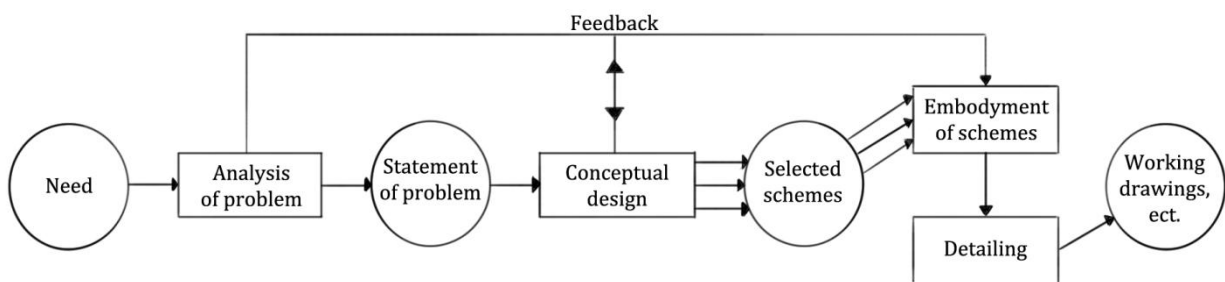
1.2 I masteroppgaven

Temaet for denne oppgaven er en utviklingsmetodikk for HT, og integreringen av denne i eksisterende, etablerte utviklingsmetodikker slik at den kan brukes effektivt. Innenfor dette temaet skal de følgende spørsmålene besvares:

- Hvor i utviklingsprosessen skal vurderingen om HT finne sted?
- Skal vurderingen være et eget steg i prosessen, gå parallelt eller være fullstendig integrert?
- Hva skal inngå i HT-vurderingen?
- Hvilket videre arbeid må gjøres for å fullføre denne metodikken?

Jeg har valgt å dele denne oppgaven inn i to deler. I del en skal de første to spørsmålene over besvares. Dette er i utgangspunktet et studium av etablerte produktutviklingsmetodikker, som legger grunnlaget for besvarelsen av alle de fire spørsmålene. Disse metodikkene har blitt utviklet gjennom mange år, gjennom både forskning og bruk i reelle utviklingsprosjekter. Tilbakemeldinger ifra industrien har forbedret prosessene, slik at de i dag er effektive for å løse komplekse problemer^{2 3}. Den andre delen skal besvare de to siste spørsmålene, basert på resultatet av de første to.

Det finnes mange forskjellige utviklingsmetodikker, alle formet etter den industrien hvor de har blitt anvendt. De har likevel en likhet, en grunnleggende modell som de aller fleste metodikker ser ut til å følge. En modell laget av Michael French, presentert i boken *Conceptual Design for Engineers* kan kalles en slik grunnleggende modell.⁴



Figur 4: Michael Frenchs modell⁴

Jeg har tatt utgangspunkt i denne modellen i denne oppgaven. På grunn av dens likhet med andre metodikker har jeg jobbet for å finne en modell for vurdering av HT som kan integreres med de fleste produktutviklingsmetodikker. I likhet med de etablerte utviklingsmetodikkene bør denne nye metodikken kun være en retningslinje som bør tilpasses de forskjellige industriene og individuelle designerne slik det passer best.

² Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger, *Product Design and Development*, 2008

³ G. Pahl, W. Beitz, *Design Engineering- A Systematic Approach*, 1996

⁴ Michael J. French, *Conceptual Design for Engineers*, 1998

2 Etablerte produktutviklingsmetodikker

I dette kapitlet gis en kort presentasjon av de metodikkene jeg har studert og benyttet meg av i denne oppgaven. Hensikten med det er å se på forskjellene og ulikhetene ved dem før de delene av dem jeg mener er spesielt interessante for HT-vurderingen trekkes fram i kapittel 3.

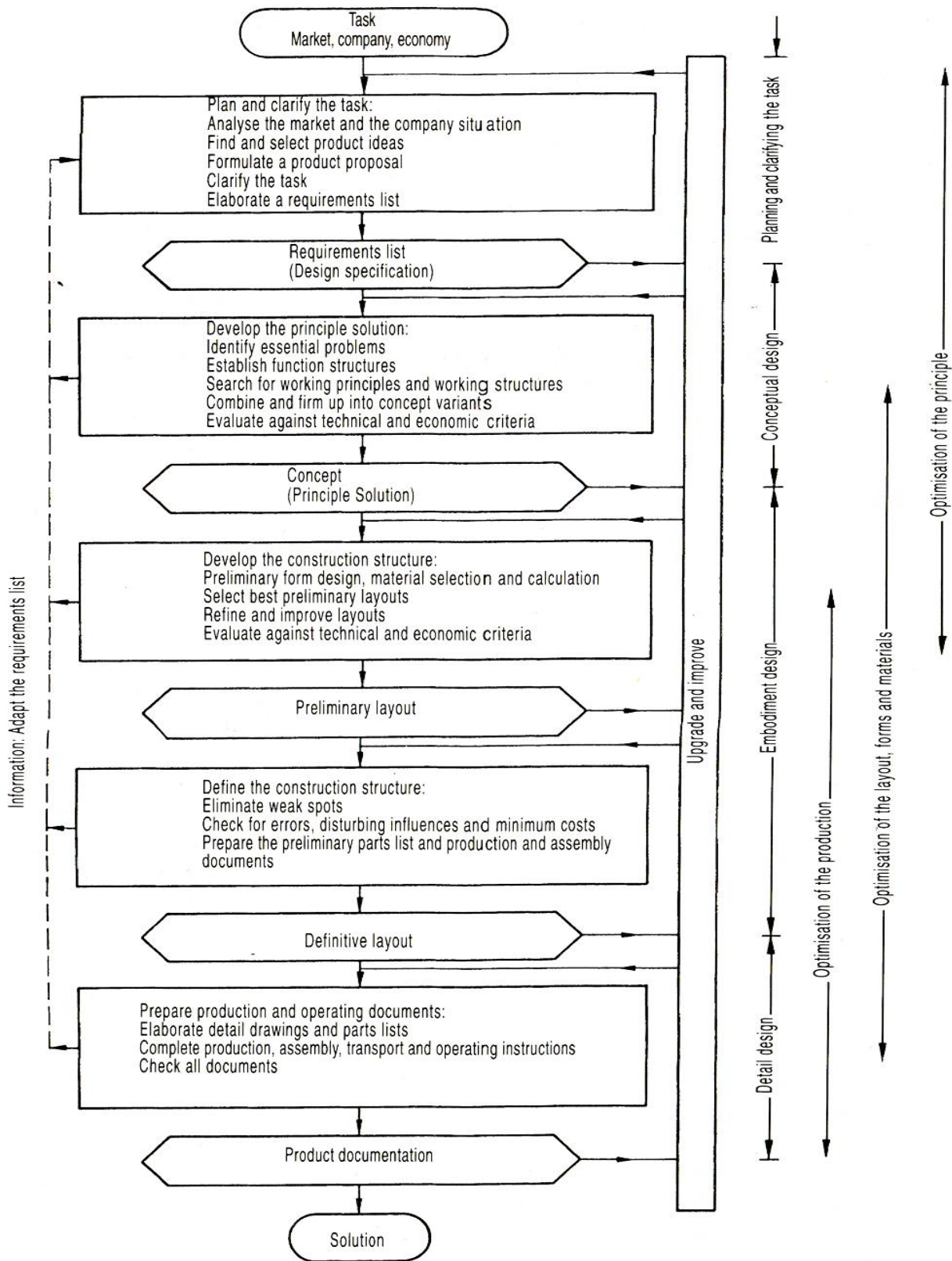
2.1 Pahl & Beitz

Dette er en strukturert og problemorientert metodikk utviklet med fokus på tekniske systemer. Metodene som denne metodikken består av har gjennom årene blitt testet og forbedret av praktiserende designere, konstruktører og forskere. Utviklerne av denne metodikken har erfaring ifra tungmaskineri-industri og over 20 år med utdanning innen produktutvikling.

Modellen består av fire hovedfaser som hver inneholder en rekke steg. Alle fasene og stegene skal gjentas iterativt til man har funnet en tilfredsstillende løsning. Disse fasene og målene ved dem er som følger:

- **Planning and clarifying the task:** I denne fasen samler man inn informasjon om markedet, brukeren, finner eksisterende løsninger, tekniske begrensninger og krav til produktet. Ved utgangen av denne fasen har man etablert det de kaller en "Requirement list". Denne listen fungerer som et referansepunkt for resten av produktutviklingen.
- **Conceptual design:** Her skal man definere og utforske løsningsrommet slik at man kommer fram til en rekke løsninger som tilfredsstiller kravene satt i første fase. Til slutt skal man ifra et utvalg av konseptuelle løsninger finne én eller noen få av de løsningene som best svarer på problemstillingen.
- **Embodiment design:** Det eller de konseptene valgt ut i forrige fase blir videreutviklet til funksjonelle modeller. I denne fasen blir ofte prototyper laget og testet imot det aktuelle markedet og deretter forbedret og skreddersydd etter markedets behov.
- **Detail design:** I den siste fasen skal løsningen ifra utgangen av forrige fase gjøres produksjonsklar. Fokuset i denne fasen er optimalisering av konseptets funksjon, layout, geometri, materiale og produksjonsmetode.

Utviklingsprosjektene har også varierende behov. Det kan være snakk om utvikling av et helt nytt produkt, en ny produktvariasjon, en ny variasjon i innen en produktplattform eller kun forbedring av et eksisterende produkt. Førstnevnte krever fokus på alle de forskjellige fasene imens sistnevnte trenger kun fokus på de siste to fasene.



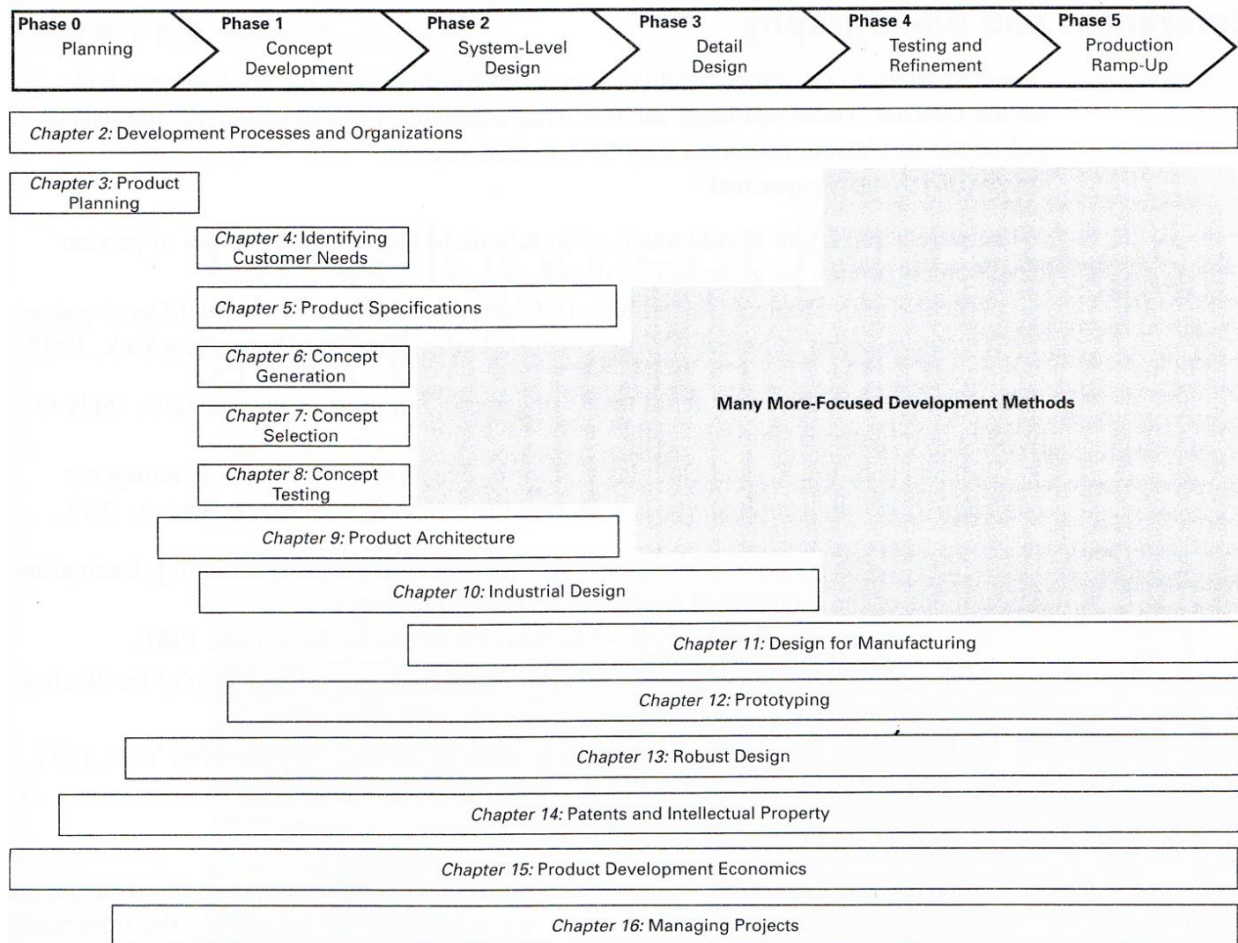
Figur 5: Pahl & Beitz' modell³

2.2 Ulrich & Eppinger

I boken "*Product Design and Development*" har forfatterne forsøkt å skape en utviklingsmodell basert på en blanding av synspunktene fra design, markedsføring og produksjon. Dette er en bok laget for undervisning, og modellen presentert i denne er i hovedsak laget med tanke på fysiske produkter.

Også denne metodikken er en generell struktur som bør formes etter prosjektets og bedriftens behov. Det er i alt seks faser som hver inneholder flere steg. Det er viktig å vite at hver av disse fasene normaliteres flere ganger, og at man til enhver tid kan gå tilbake til tidligere faser dersom det viser seg at tidligere antagelser og bestemmelser ikke vil fungere tilstrekkelig godt.

- **Planning:** Her vurderes nye markedsmuligheter, markedssegmenter defineres og målene for prosjektet settes. Hensikten er å avgjøre om prosjektet bør startes eller ikke.
- **Concept Development:** En dypere undersøkelse av markedets behov, generering av en rekke konsepter og tidlig testing av disse er det som kjennetegner denne fasen. Spesifikasjoner for produktet blir satt og brukt som en retningslinje for den videre utviklingen. Undersøkelser av konkurrerende produkter og en tidlig kostanalyse gjøres for å gjøre en ny undersøkelse om prosjektet bør fortsettes eller avsluttes.
- **System-Level Design:** Det beste konseptet ifra forrige fase arrangeres inn i undersystemer og videreutvikles. Produktarkitektur samt alternative arkitekturer i eventuell produktfamilie defineres. Leverandører av forskjellige komponenter avtales samtidig som et tidlig utkast av sammenstillingsprosessen skisseres.
- **Detail Design:** I denne delen av utviklingen bestemmes produktets form, materiale og toleranser. En endelig tegning av egenutviklede - og standardiserte komponenter legges til grunn for produksjonsprosessen. En trade-off mellom produksjonskostnad og kvalitet er et sentralt tema i denne fasen.
- **Testing and Refinement:** Med store deler av produktet designet og klargjort for produksjon testes produktet i miljøet det skal brukes og av produktets endelige bruker. Tilbakemelding fra dette stadiet benyttes for å øke kvaliteten, korrigere de feilene som eventuelt dukker opp og for å skreddersy produktet til brukeren.
- **Production Ramp-Up:** I denne siste fasen er utviklingsprosjektet i stor grad ferdig. Her er fokuset lagt på produksjon, og eventuelle problemer som oppstår er i sammenheng med produksjonsprosessen.



Figur 6: Ulrich & Eppingers modell

Fra investorenes synspunkt vurderes suksessen av et utviklingsprosjekt etter profitt. Det kan imidlertid være vanskelig å vurdere profitten direkte, og derfor har forfatterne definert fem kriterier for å måle et prosjekts lønnsomhet. Det er det samlede resultatet ifra de følgende fem punktene forfatterne mener at prosjektets reelle lønnsomhet kan måles:

- Produktkvalitet
- Produktkostnad
- Utviklingstid
- Utviklingskostnad
- Utviklingsevne

2.3 Nigel Cross

Denne boken presenterer en rekke etablerte metodikker, som Pahl & Beitz, VDI 222 og L.J. March's modell i tillegg til Nigel Cross' egen modell. Hans modell kombinerer en løsningsorientert metodikk som er tradisjonell for industriell design med problemorienterte metodikker som Pahl & Beitz og Ulrich & Eppinger. Resultatet er at løsningen og problemstillingen utvikles parallelt, noe som Cross omtaler som en mer naturlig utviklingsprosess.

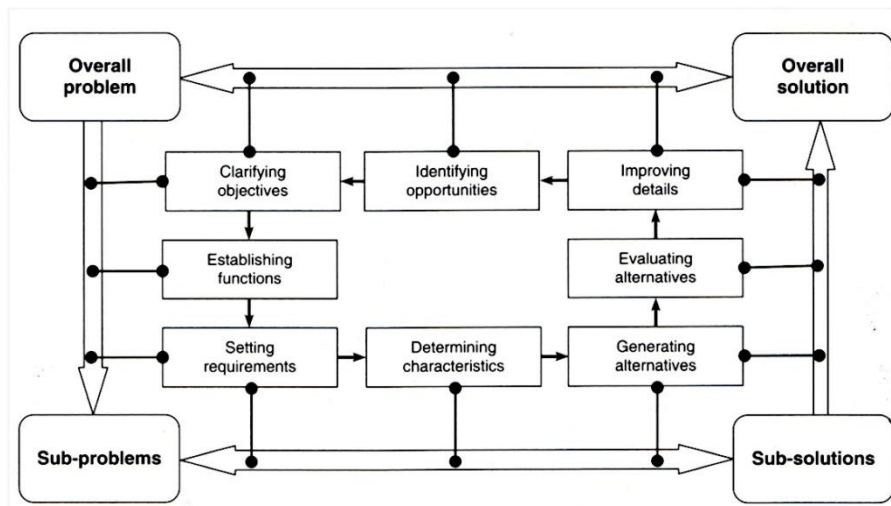
En studie av en gruppe ingeniører og designere viste at en for strukturert eller en for ustrukturert framgangsmåte ga dårligere resultater enn de som var mer fleksible. Samtidig har dagens mer komplekse og krevende løsninger skapt et behov for mer strukturerte metoder innen industriell design. Dette er bakgrunnen til teorien om at en kombinasjon av begge framgangsmåtene vil i mange tilfeller være bedre.

Modellen består av åtte steg som går igjen i de fleste designmetodikker:

- **Identifying opportunities:** Gjennom "*bruker scenarioer*", observasjon og intervju av brukere er målet med denne fasen å avdekke et behov i markedet. Denne metoden foretrekkes siden forfatteren mener at dagens brede og varierte marked krever en mer brukerorientert framgangsmåte for å sikre markedsandeler.
- **Clarifying objectives:** Ved inngangen av denne fasen har man avdekket et behov. For å finne en egnet løsning og for at alle i designteamet samt oppdragsgiveren skal forstå problemet lages et hierarkisk diagram over alle problemets krav (*need statements*).
- **Establishing functions:** En funksjonsanalyse gjennomføres ved å sette opp et blokkdiagram over alle av produktets funksjoner.
- **Setting requirements:** Først bestemmes hvilken type prosjekt det er som skal gjennomføres; utvikling eller bruk av ny teknologi til et nytt produkt, utvikling av en ny produktvariant i en produktserie, videreutvikling av et eksisterende produkt, osv. Når det er bestemt genereres en liste over krav det nye produktet må oppfylle for at det skal tilfredsstillende brukers behov.
- **Determining Characteristics:** Gjennom dypere intervju at brukere genereres en liste over brukers krav til produktets egenskaper. Dette gjøres blant annet ved bruk av QFD (*quality function deployment*) metoden. Først undersøkes det hva brukeren mener om konkurrerende eller lignende løsninger, eller teamets/selskapets eksisterende løsninger dersom de finnes. Deretter finner man de egenskapene ved produktet brukers utsagn kan knyttes til. Disse koblingene settes inn i en matrise slik at man kan kartlegge de viktigste egenskapene ved produktet. Et "*house of quality*"-diagram er et eksempel på en slik liste.

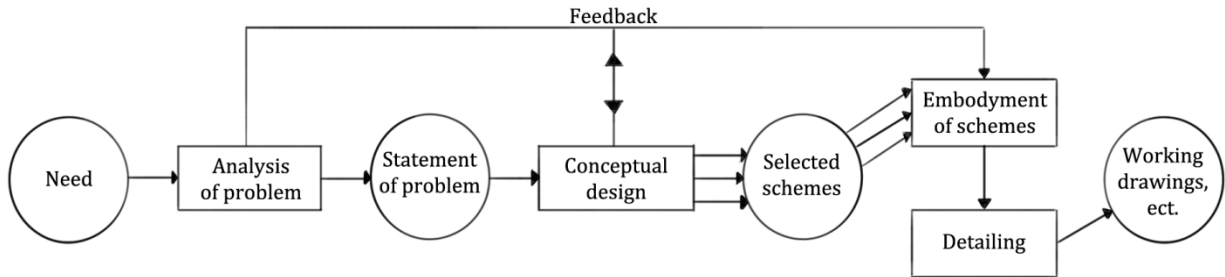
- **Generating alternatives:** En rekke løsninger på produktets funksjoner genereres og settes inn i det som kalles en morfologisk tabell. På denne måten vil forskjellige sammensetninger av de forskjellige løsningene skape forskjellige konsepter.
- **Evaluating alternatives:** De beste konseptene velges ut ved å gi produktets funksjoner vekt tall etter deres relative viktighet for produktets ytelse eller oppfylning av brukerens behov. Deretter gis de forskjellige løsningene poenger etter hvor godt løsning på det aktuelle problemet den tilbyr. Dette gir til slutt et regnestykke som viser hvor gode de forskjellige konseptene er i forhold til hverandre.
- **Improving details:** Oppgaven i denne fasen er å optimalisere design samt å redusere produksjonskostnad. Det ligger en trade-off mellom disse to oppgavene.

Samtidig som man går gjennom disse stegene veksler man mellom fokus på den endelige løsningen og den overordnede problemstillingen og mellom sub-problemer og sub-løsninger.



Figur 7: Nigel Cross' modell

2.4 Generell form; Michael J. Frenchs modell



Figur 8: M. J. Frenchs modell

Dette er modellen jeg har valgt å ha som utgangspunkt videre i denne oppgaven, men har valgt ikke å ta med metodene og detaljene som inngår i denne metodikken. Den delen av produktutviklingsprosessen er allerede godt dekket av metodikkene som er omtalt. Det jeg har tatt med er forfatterens modell.

De fire fasene denne modellen består av og rekkefølgen av dem er en overordnet fremgangsmåte som de fleste utviklingsmetodikker følger, inkludert modellene beskrevet i avsnitt 2.1 og 2.2.

2.4.1 Forskjeller og ulikheter

Den som skiller seg mest ut er Cross' modell (2.3), som veksler mellom fokus på problem og løsning gjennom iterasjoner av metodikkens åtte steg. Stegene i seg selv, og rekkefølgen av dem viser at denne og de to andre metodikkene likevel følger en lik fremgangsmåte.

Alle de tre metodikken legger størst vekt på fasen de alle deler; konseptutvikling. Denne omtales som den mest krevende og utfordrende fasen for designeren, og det kan i utgangspunktet se ut som et endepunkt for HT-vurderingen. Ved utgangen av denne fasen er mange av produktets detaljer bestemt, og introduksjon av HT på dette punktet vil kunne medføre mye re-design og dobbelt arbeid. På en annen side er høy fleksibilitet en av HT-teknologiens største styrker, og jeg har derfor valgt å se bort fra denne fordømmen inntil videre. I neste kapittel ser jeg på virkningen av å introdusere HT hver av de fire fasene.

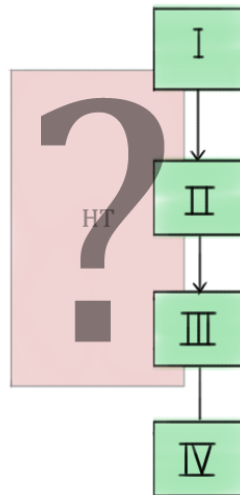
Ingen av metodikkene fokuserer særlig mye på den siste fasen, *detailing*. Pahl og Beitz skriver i forordet av boken at dette kapittelet har blitt droppet fordi det i seg selv er for stort, og at det varierer veldig ifra industri til industri.

2.4.2 Definisjon av de fire fasene

Basert på metodikkene presentert i dette kapittelet og Frenchs modell har jeg valgt å bruke følgende definisjon av de fire fasene i resten av oppgaven.

- **Analyse av problemstillingen:** Kartlegging av markedet, konkurrerende løsninger, eksisterende teknologi og brukerens behov er de viktigste punktene i den første fasen av et utviklingsprosjekt.
- **Konseptutvikling:** Utvikling av nye løsninger, undersøke eksisterende løsninger (både internt og eksternt), kombinasjoner av nye og gamle løsninger og til slutt evaluering av konsepter er det sentrale i denne fasen.
- **Detaljdesign:** Videreutvikling av det beste konseptet ifra forrige fase, optimalisering av form, materiale og sammenstilling mtp produksjon og ytelse og til slutt testing av produktet er målet med denne fasen.
- **Produksjonsdesign:** Optimalisering av produksjonsmetode, og design for produksjon er sentralt i denne siste fasen.

3 HT i de fire fasene



Figur 9: Illustrerer en ukjent kobling mellom to utviklingsmetodikker

Dette kapitlet er en undersøkelse av hvordan HT kan anvendes i de fire forskjellige fasene og hvilken virkning det vil ha. Resultatet av denne undersøkelsen er grunnlaget for besvarelsen av oppgavens to første problemstillinger:

- Hvor i utviklingsprosessen skal vurderingen om HT finne sted?
- Skal vurderingen være et eget steg i prosessen, gå parallelt eller være fullstendig integrert?

Fordelen av å basere denne undersøkelsen på de etablerte utviklingsmetodikkene er at de i løpet av mange år blitt formet av forskjellige reelle utviklingsprosjekter. Det vil si at denne undersøkelsen, og resultatet av den har gode røtter i et bredt spekter av problemstillinger og anvendelsesområder. Under denne undersøkelsen hatt de følgende spørsmålene i bakhodet, som jeg senere har forsøkt å besvare:

- Hvilken informasjon er tilgjengelig for å vurdere om HT er lønnsomt?
- Hvilken virkning HT vil ha om det implementeres på de forskjellige stadiene?
- Hvor mye informasjon er nødvendig for å kunne gjøre HT-vurderingen?
- Hvor mye arbeid inngår i re-design, fra en "konvensjonell design" til en "HT-design"?
- Reduseres potensialet for ytelse ved re-design kontra et "rent" HT-design?
- Krever HT en annen måte å jobbe på mtp utvikling av gode HT-design?

Disse spørsmålene har hjulpet meg med å sortere og trekke fram den informasjonen i de forskjellige metodikkene som jeg mener er mest relevante for HT-vurderingen. Jeg håper at disse spørsmålene gir leseren en bedre forståelse for mitt valg av metoder som er tatt med i denne undersøkelsen. Disse spørsmålene besvares etter hvert i som de forskjellige temaene tas opp i oppgaven.

3.1 Om fremgangsmåten

Før selve undersøkelsen vil jeg forklare kort om framgangsmåten. Jeg har sett på hver fase hver for seg, og det innebærer en antagelse om at HT ikke har blitt vurdert på et tidligere tidspunkt.

For eksempel: I fase tre antar jeg at fase to har blitt konkludert med et utvalgt konsept, i henhold til min definisjon av fasen i forrige kapittel. Deretter ser jeg på hvordan jeg kan gjøre en HT-vurdering basert på de metodene som inngår fase tre.

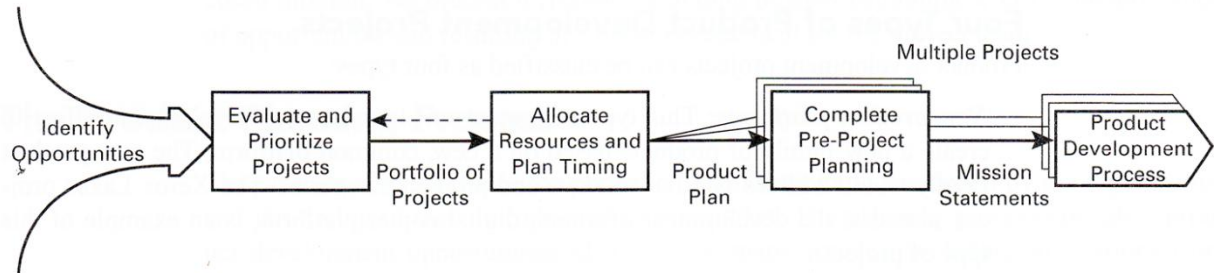
Det finnes i hovedsak tre typer utviklingsprosjekter: utvikling av et nytt produkt, videreutvikling av et eksisterende produkt, utvikling av en ny variasjon av et eksisterende produkt. Disse krever forskjellige fremgangsmåter. Ved å se på modellene uten å knytte dem til én type utviklingsprosjekt har jeg forsøkt å dekke så mye av teorien som mulig.

Innholdet i metodikkene av Ulrich & Eppinger og Pahl & Beitz er i stor grad lik, og for å unngå unødvendig gjentakelse av de samme metodene tar jeg bare med de elementene som ikke har blitt dekt av de andre metodikkene. I andre tilfeller, hvor flere metodikker har det samme innholdet har jeg valgt å bruke den metodikken som presenterer stoffet best eller er lettest å knytte til problemene i denne oppgaven. Dette gjelder i alle fasene.

I gjennomgangen av fasene dukker en flere spørsmål opp. I stedet for å svare på disse etter hvert har jeg samlet mange av disse i en drøftningsdel på slutten kapittelet. Noen av disse spørsmålene er dirkete knyttet til oppgavens to siste problemstillinger, og de blir tatt opp igjen i del to av oppgaven.

3.2 Fase en; analyse av problemstillingen

3.2.1 Ulrich & Eppinger



Figur 10: De fem stegene av fase 1, Ulrich & Eppingers modell

3.2.1.1 Sammenligning mellom kundens krav og egenskaper ved HT:

Den første fasen i modellen, "Product Planning" består av fem steg som indikert i figuren over. Det første steget i denne fasen, "Identifying opportunities" starter med å definere kundens behov. Behovet skaper markedet og er til sist med på å avgjøre den potensielle gevinsten av prosjektet. Allerede ved en undersøkelse av disse behovene kan gi en indikasjon om hvorvidt HT bør anvendes.

Etter at informasjon om kundens behov er samlet inn sorteres og rangeres den. Man deler inn i primære, sekundære og evt. tertiære behov som igjen rangeres etter viktighet. En sammenligning mellom kundens viktigste behov og egenskapene ved HT kan gi en tidlig indikasjon. For eksempel:



Bilde 1: IKEA-drillen FIXA

Produktkrav: Produktet bør være billig fordi det kun vil brukes i en kort tidsperiode. Dette er tilfellet ved den batteridrevne drillen solgt ved IKEA. Den tilfredsstillende kundens behov om en enklere og mer effektiv måte å sette sammen IKEA-møbler på, men den bør ikke koste mye siden den drillen sjelden benyttes. Dette betyr også at brukeren ikke har store krav til drillens kvalitet eller holdbarhet. Dette behovet er åpenbart i strid med egenskapene ved HT, som til sammenligning gir høy ytelse og medfører en høyere pris.



Bilde 2: Hotebensimplantat

Kundens behov: *Produktet bør kunne skreddersys mine individuelle behov.* Hoftelddsproteser, andre proteser samt andre medisinske produkter som høreapparat og tannfyllinger er produkter hvor skreddersøm er en av kundens viktigste behov. Denne egenskapen er en av de mest attraktive egenskapene ved HT, og et slikt behov har dermed gitt en god indikasjon om at HT kan lønne seg.

Disse to eksemplene markerer to ytterpunkter, og det er kanskje slike behov som kan avdekke muligheter for HT på dette tidspunktet. En sammenligning mellom en rangert liste over kundens behov med egenskapene ved HT kan være det første steget i vurderingen om anvendelse av HT.

3.2.1.2 Forretningsstrategi

I likhet med kundens viktigste behov kan valg av strategi i forhold til konkurrentene og kunden være viktig i vurderingen av HT. Fire eksempler på strategier blir presentert i U & Es bok:

- Technology leadership
- Cost leadership
- Customer focus
- Imitative

”Cost leadership”-strategien medfører fokus på kostnadseffektiv produksjon, enten ved hjelp av masseproduksjon, billig arbeidskraft, bedre produksjonssystem, billigere produksjonsmetoder osv. Med unntak av noen få tilfeller vil en slik strategi medføre at HT som produksjonsmetode er utelukket.

”Imitative”-strategi handler derimot om å ha evnen til følge med de stadig endrende trendene i markedet. Dette betyr at man trenger en evne til raskt å kunne levere produkter for å kapre markedsandeler ettersom behovet oppstår. Ved mindre produksjonsvolum kan HT lønne seg som produksjonsmetode om man følger en slik strategi. Man har fleksibilitet til å implementere endringer ifra batch til batch og man unngår verktøykostnader man ellers ville hatt. Dette forutsetter at endringer av produktet medfører store verktøykostnader ved konvensjonell tilvirkning (eksempelvis nye støpeverktøy).

3.2.1.3 Produktkravspesifikasjon

Det neste steget i den første fasen av produktutviklingen er å etablere de begynnende produktspesifikasjonene; en liste over metriske krav som skal lede produktutviklingen slik at produktet oppfyller brukerens krav. Sammenlignet med listen over brukerens krav gir denne listen gir et bedre grunnlag for sammenligning med egenskapene ved HT

Metric No.	Need Nos.	Metric	Imp.	Units
1	1, 3	Attenuation from dropout to handlebar at 10 Hz	3	dB
2	2, 6	Spring preload	3	N
3	1, 3	Maximum value from the Monster	5	g
4	1, 3	Minimum descent time on test track	5	s
5	4	Damping coefficient adjustment range	3	N-s/m
6	5	Maximum travel (26-in. wheel)	3	mm
7	5	Rake offset	3	mm
8	6	Lateral stiffness at the tip	3	kN/m
9	7	Total mass	4	kg
10	8	Lateral stiffness at brake pivots	2	kN/m
11	9	Headset sizes	5	in.
12	9	Steertube length	5	mm
13	9	Wheel sizes	5	List
14	9	Maximum tire width	5	in.
15	10	Time to assemble to frame	1	s
16	11	Fender compatibility	1	List
17	12	Instills pride	5	Subj.
18	13	Unit manufacturing cost	5	US\$
19	14	Time in spray chamber without water entry	5	s
20	15	Cycles in mud chamber without contamination	5	k-cycles
21	16, 17	Time to disassemble/assemble for maintenance	3	s
22	17, 18	Special tools required for maintenance	3	List
23	19	UV test duration to degrade rubber parts	5	hr
24	19	Monster cycles to failure	5	Cycles
25	20	Japan Industrial Standards test	5	Binary
26	20	Bending strength (frontal loading)	5	kN

Figur 11: Eksempel på en "target product specification"-liste av Ulrich & Eppinger

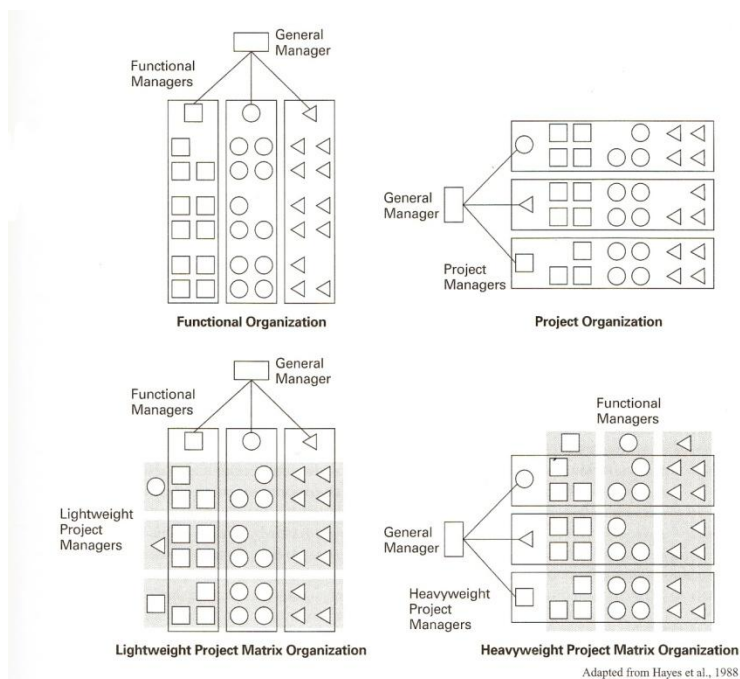
Dette er et eksempel på en liste over krav til en sykkeldeemper. I denne listen kan vi se krav som indikerer at ytelse og lavt vekt/styrke-forhold er rangert med høy viktighet. Alene kan dette indikere at HT egner seg som produksjonsmetode, men samtidig kan vi se at et krav om lav enhetskostnad er rangert som svært viktig. Ved å bruke tall ifra denne tabellen i en vektallsvurdering, slik som i konsept 1 i prosjektoppgaven, kan den resulterende poengsummen indikere om HT er egnet som produksjonsmetode.

3.2.1.4 Produktplattformer, spredning i markedet, skreddersøm og HT:

Når kundens behov er kartlagt studeres markedet. Markedet deles inn i segmenter og eventuelle konkurrenter studeres. Denne informasjonen brukes til å velge et eller flere segmenter man ønsker å oppsøke. På dette stadiet kan det vise seg at en stor spredning i markedet best tilfredstilles ved å opprette en ny produktplattform. Etableringen av denne er en krevende oppgave. Mine undersøkelser i prosjektoppgaven indikerer at HT kan være til fordel ved å tilby en større grad av skreddersøm og modulisering ved plattformprodukter.

3.2.1.5 Organisering av utviklingsteam

I de tilfellene hvor HT ser ut til å være den mest lønnsomme produksjonsmetoden vil det, som nevnt i et tidligere avsnitt, lønne seg å organisere utviklingsteamet på en måte som gir teamet de egenskapene som gagnar prosjektet best. Eksempelvis kan en tenke seg at en ingeniør med bakgrunn ifra industriell design være mer frigjort ifra tidligere løsninger enn en ingeniør med mekanisk bakgrunn, og dermed ha lettere for å finne nye og potensielt bedre løsninger.



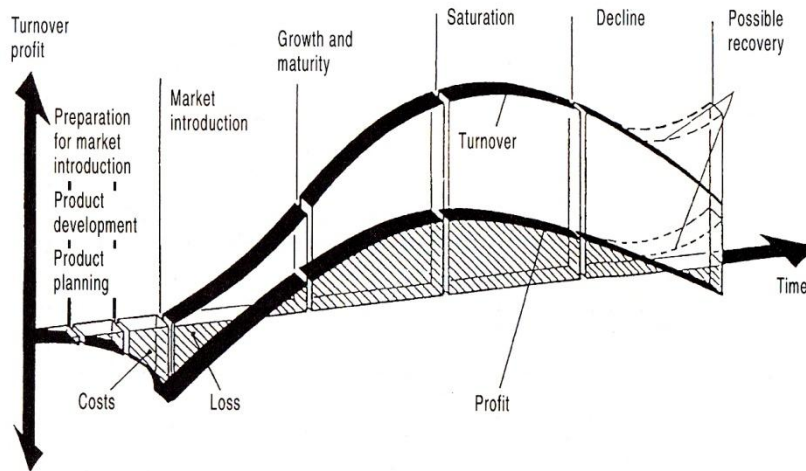
Figur 12: Forskjellige team.organiseringer, av Ulrich & Eppinger

I et intervju med prof. Sjur Dagestad kunne han fortelle en av hans erfaringer ifra industrien med paralleller til dette. Han kom ifra bilindustrien til et utviklingsprosjekt hos Tomra. Med hans bakgrunn hjalp han Tomra til å tenke på en ny måte som resulterte i store besparelser. Det kan altså være til stor fordel å inkludere et medlem i teamet som ikke har "bagasjen" ifra selskapets tidligere løsninger og prosjekter.

3.2.2 Pahl & Beitz

I den første fasen foreslår utviklerne av denne metodikken å gjøre undersøkelser som kobler selskapets mål og kapasitet, eksisterende teknologi og framtidig utvikling med nye produktmuligheter. I likhet med Ulrich & Eppinger handler det om å finne en egnet utviklingsstrategi.

3.2.2.1 Utvidet produktlevetid



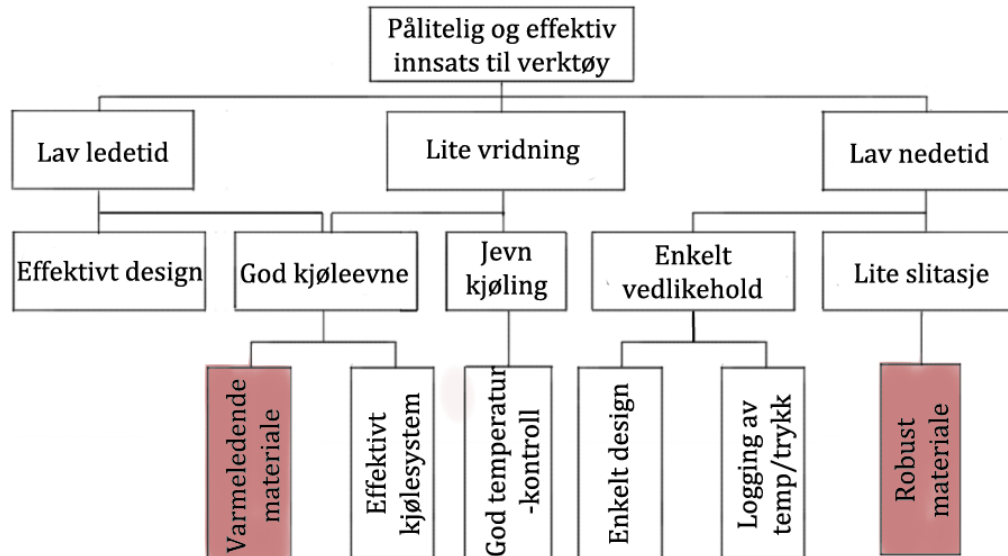
Figur 13: Graf av variasjonen av et produkts kostnad og lønnsomhet over tid, av Pahl & Beitz

Figuren over illustrerer livssyklusen til et produkt. Mot slutten av et produkts livstid ser man av denne figuren at det finnes en mulighet for at produktets levetid blir utvidet. Som regel kommer det som følge av introduksjonen av ny teknologi. Dette kan for eksempel føre til en økning i kvalitet slik at produktet tilfredstiller brukerens behov. Et godt eksempel på det finner man i datamaskiner, hvor man kan installere ny hardware slik at datamaskinen kan holde følge med industriens raske utvikling. Ny teknologi kan også føre til redusert pris pga billigere produksjon.

Det burde finnes tilfeller hvor introduksjon av HT i et etablert produkt i den avtagende fasen av sitt livsløp gir en utvidet levetid og dermed økt profitt. En kan se for seg et scenario hvor et produkt ikke lenger holder mål på grunn av at noen av dets komponenter har et utdatert design eller teknologi. Ved bruk av HT kan de kritiske komponentene redesignes og produseres på kort tid, uten å måtte designe en ny produksjonslinje. På denne måten kan kanskje noen produkter få et lengre liv. Det kan igjen knyttes til gjenbruk og resirkulering, et tema som er stadig viktigere i dagens samfunn.

3.2.3 Nigel Cross

3.2.3.1 Objectives tree method



Figur 14: Objectives tree for innsats i verktøy for sprøytestøping

Som i de andre metodene innebærer den første fasen en hierarkisk liste over krav til produktet som følge av brukerens behov. I metoden Cross foreslår, *objectives tree method* settes kravene opp i en blokkmodell i stedet for en liste, slik figuren på neste side viser. På denne måten kan man se viktigheten av de forskjellige funksjonene og hvordan de påvirker hverandre. Dette gir konstruktøren et bedre bilde av effekten av å introdusere HT.

En sammenligning av egenskapene øverstnederst i treet med styrkene det HT vil gi en god indikasjon på samme måte som en "requirements list" i Pahl & Beitz' modell, eller en "customer needs list" i Ulrich & Eppingers modell. Denne modellen kan gjøre det enklere å trekke fram sekundære egenskaper som kan gi mer informasjon om hvor godt HT egner seg for produktet. Figur 14 er et *Objectives tree* for en innsats til et av Plastos sprøytestøpeverktøy.

Dette eksempelet er basert på caset fra Plasto som er presentert i min prosjektoppgave¹. Denne figuren viser at det finnes en trade-off mellom to av produktets sekundære egenskaper. For å oppnå lav ledetid og liten grad av vridning kreves god kjøling. Dette oppnår ved kombinasjonen av et godt designet kjølesystem og valg av et varmeledende materiale. Samtidig er lav slitasje viktig for å holde nedetiden lav. Dette krever enten en robust design eller et sterkere materiale. I dette caset hadde den eksisterende løsningen et problem med slitasje og dermed mye vedlikehold. Dette gjorde at et sterkere materiale måtte velges. Siden designet ikke kunne endres ble et forbedret kjølesystem løsningen. Her ble HT en egnet løsning siden kjølesystemet på denne måten kunne skreddersys etter behov.

3.3 Fase to; konseptutvikling

3.3.1 Ulrich & Eppinger

3.3.1.1 Barrierer for innovasjon

Steg to og tre i prosessen (se Figur 15) handler om å finne eksisterende løsninger og teknologi og generering av egne løsninger. På denne måten vurderer man eksisterende og nye konsepter. Dette stadiet er det mest krevende for utvikleren og samtidig en av de største utfordringene ved god utnyttelse av HT. I denne sammenhengen har jeg stilt meg to spørsmål:

I hvilken grad virker gamle/kjente løsninger som en barriere for innovasjon?

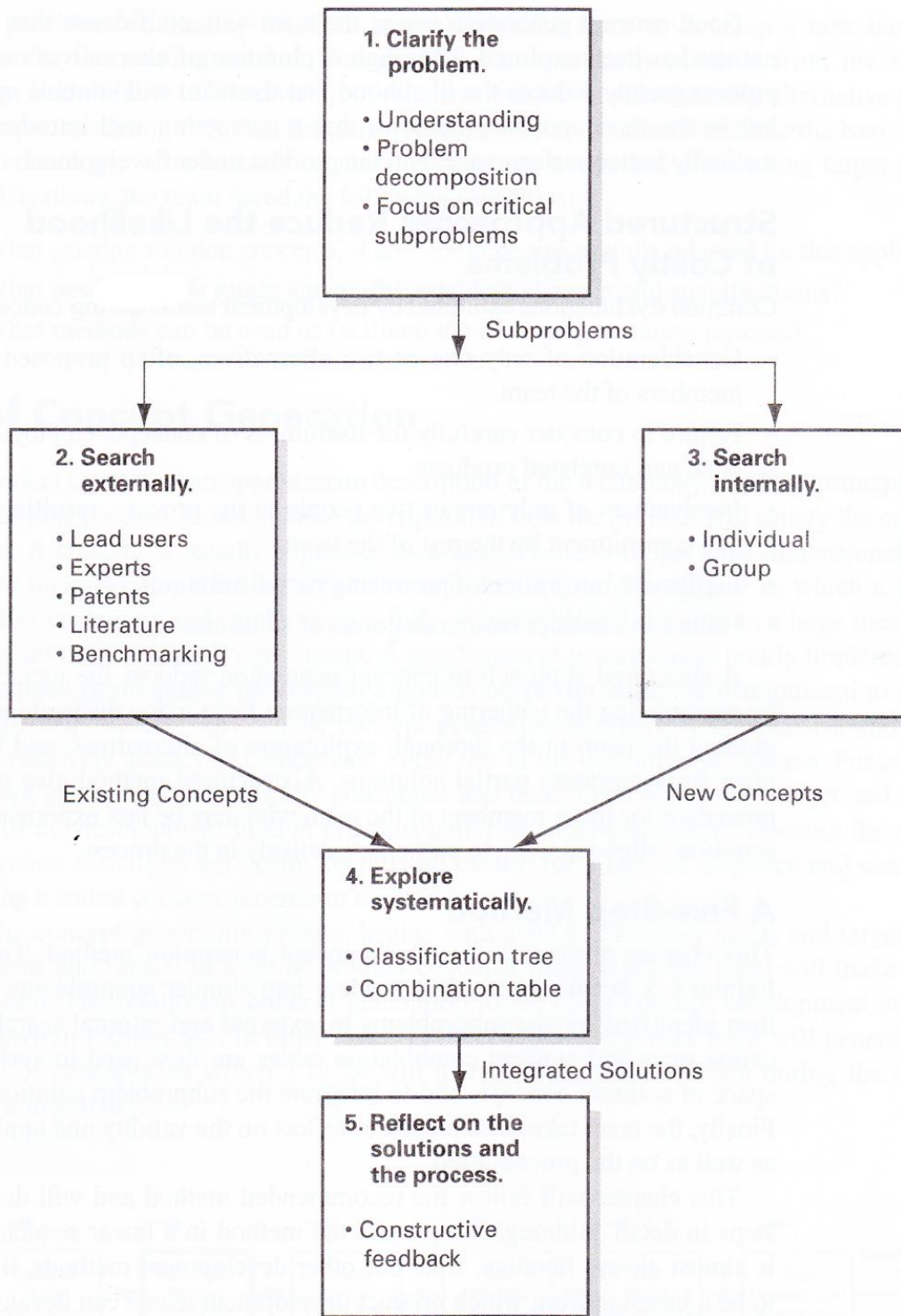
I intervjuet med prof. Dagestad ved NTNU kunne han fortelle om egne erfaringer ifra industrien. Han har opplevd denne problematikken i en case med Statoil. Problemstillingen i det tilfellet var å finne en løsning på et problem med fakkeltennere på oljeplattformer. Det viste seg at de med lang erfaring på dette området, og som jobbet med de eksisterende løsningene ikke var i stand til å finne nye løsninger. Sjur nevner kultur som den største barrieren for innovasjon, rettere sagt: "Hvordan vi gjør det hos oss". En bedrifts godt etablerte løsninger og eksisterende produkter skaper en motstand imot nye ideer og løsninger.

Hvordan generere de nye løsningene, fri for heftelsene tradisjon og konvensjonell produksjonsteknikk medfører?

Ved å introdusere en nytt steg i denne prosessen, evt. jobbe med steg to og tre parallelt kan man bryte ned noe av denne barrieren. Samtidig bør man i større grad fokusere på nye løsninger eller inspirasjon ifra naturen og andre områder utenfor sitt eget fagområde. For å finne nye løsninger gir det hensikt å lete på nye steder. Dette kan knyttes til organiseringen av utviklingsteamet, som nevnt i forrige avsnitt; Å introdusere et medlem i teamet med en annen bakgrunn, fri av fordommer kan også hjelpe med å brye barrierer for innovasjon.

3.3.1.2 Konseptevaluering

I den siste delen av denne prosessen foregår sammensetningen og utvelgelsen av de beste konseptene generert i denne fasen. Ved å generere konsepter både med og uten løsninger som krever HT vil en vektallsvurdering gi konstruktøren en annen vinkling på problemet; i stedet for å se hvordan kravene til produktet sammenfaller med HT-egenskaper ser man hvordan HT-design måler seg meg konvensjonelle løsninger. En slik sammenligning vil i større grad kunne vise om og hvilken grad av verdi HT genererer. Dette er også det første steget hvor man har mulighet til å velge ut de komponentene som har størst utbytte av HT.



Figur 15: Ulrich & Eppingers modell for konseptgenererings

3.3.2 Pahl & Beitz

3.3.2.1 Er konseptutvikling nødvendig

” Is a conceptual elaboration really needed, or do known solutions permit direct progress to the embodiment and detail phases?”⁵

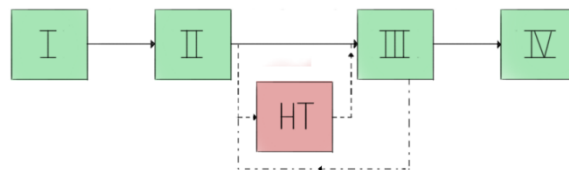
Dette er et interessant spørsmål som videre kan knyttes til re-design. I slike tilfeller finnes en mengde informasjon ifra eksisterende løsninger, informasjon som kan benyttes for å gjøre en HT-vurdering. Det kan være nødvendig med en ny runde konseptutvikling for å velge ut de komponentene som egner seg for HT, siden det ikke nødvendigvis er åpenbart hvilken kombinasjon av HT-komponenter og konvensjonelle komponenter som er best. Denne konseptutviklingen er vanskelig å unngå, men den vil imidlertid kun handle om en håndfull komponenter siden det grunnleggende systemet allerede er på plass.

3.3.2.2 Morfologisk tabell

Alle utviklingsmodellene peker ut en morfologisk tabell eller en tilsvarende metode for generering av forskjellige konsepter, gjerne i en kombinasjon med en vektallsvurdering for å velge ut det beste konseptet.

I min prosjektoppgave var en form for ”morfologisk tabell med fokus på ytelse” ett av konseptene jeg foreslo for utvelgelse av komponenter som egner seg for HT. Som Figur 18 illustrerer fungerer den ved at løsningene i tabellen utvikles med et sterkt fokus på ytelse. Dersom det vinnende konseptet inneholder løsninger som krever HT begynner en ny ny runde med utvikling av HT-komponentene for å forsikre seg om best mulig utnyttelse av teknologien. Dersom konseptet ikke inneholder løsninger som krever HT fortsetter utviklingen som normalt.

Det kan være vanskelig å avgjøre om en løsning vil kreve HT før videre utvikling av den/de gjeldende komponentene har blitt gjort. Dermed vil antagelig utviklingen av HT-komponenter ikke begynne før et stykke ut i konseptutviklingen, eventuelt ved en egen utviklingsfase i etterkant av den opprinnelige konseptutviklingen. I noen tilfeller vil kanskje ikke behovet avdekkes før i løpet av fase tre, og en iterasjon av konseptutviklingsfasen må gjøres mtp HT-komponentene.

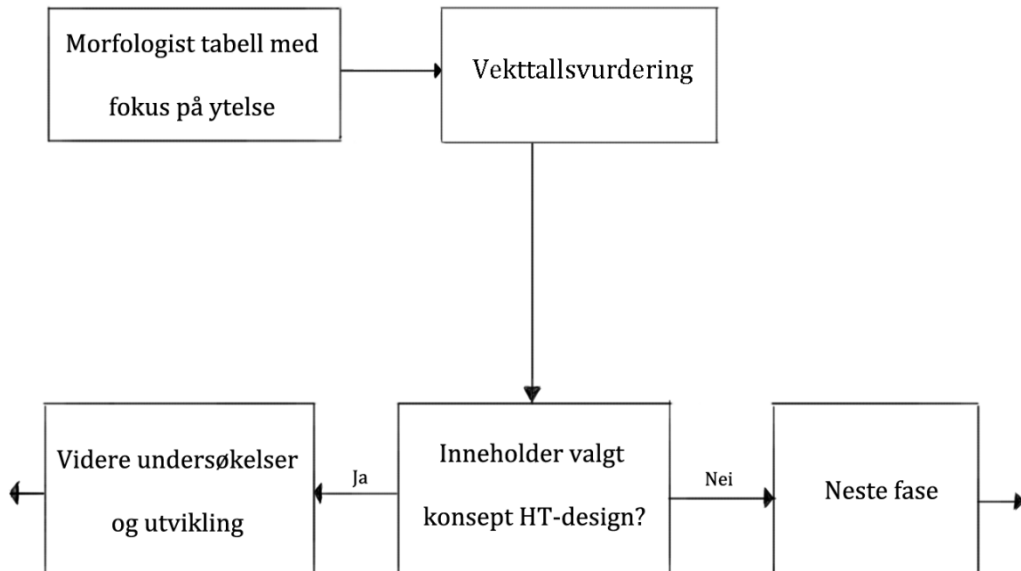


Figur 16: Egen konseptutviklingsfase for HT-komponenter

⁵ G. Pahl, W Beitz, *Engineering Design – A Systematic Approach*, 2. Utgave, 1996, side 138

Solution principle		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sub-function										
Change energy	electric ↑ mechan.	Electric motors of various types 	Linear motor 	Electrostriction 	Magnetostriction 	Piezo quartz	Capacitor	Electromagnet 		
	electric ↓ hydraulic	Hydrostat. displacement units (pump or motor) 	Hydrodynamic principle (Pump or turbine) 	MHD-Effect	Electro-osmosis Electrophoresis					
	mechan. ↓ mechan.	Screw drive 	Rack & pinion 	Cam drive 	Linkage 	Combined drive	Impulsive Drive 	Lever 	Pulley 	
	mechan. ↓ hydraulic	Piston 	Screw pump or motor 	Gear pump or motor 	Valve pump or motor 	Axial piston pump or motor 	Radial piston pump or motor 	Hydrodynamic principle 	Upthrust 	
Store energy	$E(t)$ → $E(t+\Delta t)$	Mechanical energy			Electrical energy			Hydraulic energy		
		Flywheel 	Moving mass (transl.) 	Potential energy 	Strain 	Battery 	Capacitor (electr. field) 	Hydraulic a) Bladder b) Piston c) Membrane (Pressure) 	Liquid storage (Pot. energy) 	
Control energy in respect of magnitude and time	S → $E^s t(S)$ → E	Mechanical energy			Electrical energy			Hydraulic energy		
		Cams: variation of surfaces and motions 			Epicyclic gear drive 	Controlled braking $A = \int \frac{T}{s(t)}$ 	Ohmic or inductive resistance 	Thyristor 	Controllable Valves 	Controllable motors and pumps
Vary energy component		Wedge 	Linkage 	Lever 	Gears 	Hydraulic 				

Figur 17: Eksempel på morfologisk tabell



Figur 18: Konsept 3 ifra prosjektoppgaven *Design for Performance*

3.4 Fase tre; detaljdesign

3.4.1 Ulrich & Eppinger

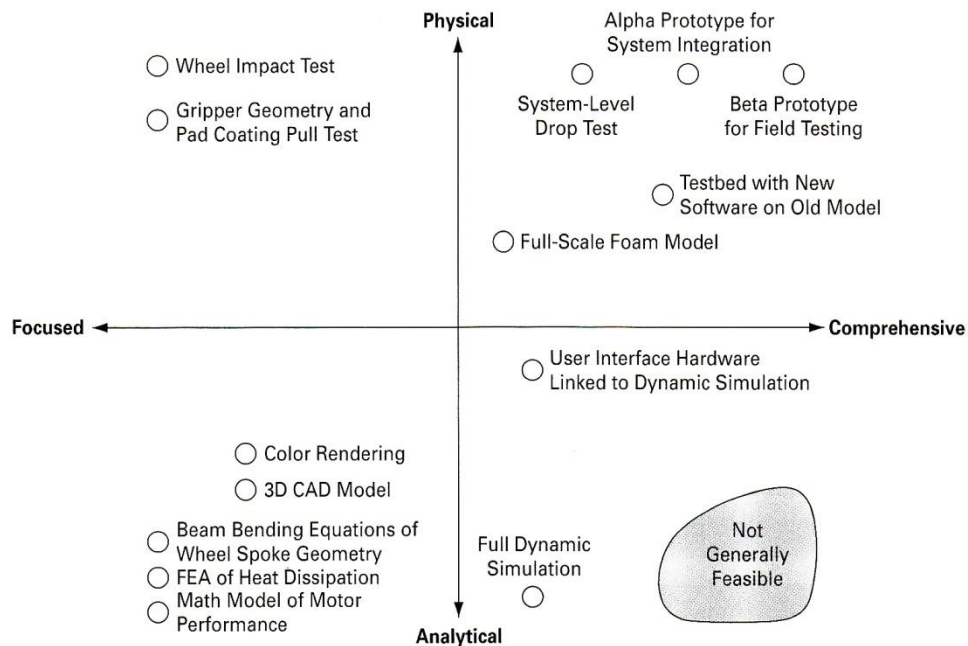
3.4.1.1 Produktfamilie

I denne modellen har den tilsvarende fasen navnet "System-level design". Det vinnende konseptet ifra fase to brytes her ned, settes sammen i undersystemer og organiseres i det som kalles en "Product architecture". Dette er innledningen til en viktig avgjørelse:

Er dette produktet en del at en plattform eller er det et enkeltstående produkt?

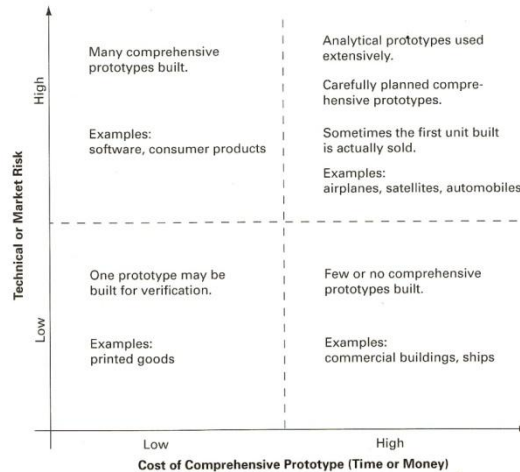
Denne avgjørelsen har stor betydning for det videre arbeidet ved utviklingen av produktets undersystemer. Stor produktvariasjon og gjenbruk av deler innad i produktfamilien skaper lønnsomheten av produktfamilien. I prosjektoppgaven konkluderte jeg med at HT er godt egnet til å skape en større grad av modularisering og skreddersøm i produktfamilien. I tillegg kan HT kan også brukes til å prøve ut produktvariasjoner med lavere risiko kortere utviklingstid.

3.4.1.2 Produkttester; høyfunksjonelle alfa-prototyper



Figur 19: Diagram over forskjellige typer produkttester, av Ulrich og Eppinger

Omfattende tester av undersystemer eller hele produkter inngår i denne fasen. Forskjellige problemstillinger og utviklingsprosjekter krever forskjellige typer av prototyper, slik figuren over viser. I industrien er det imidlertid vidt forskjellige holdninger til bruk av prototyper; HÅG ønsker å drive utviklingen uten å lage én eneste prototype, imens andre utviklingsprosjekter er umulige uten omfattende tester. Utvikling av nye flytyper er et eksempel på sistnevnte.



Figur 20: Kost-risk-diagram, av Ulrich & Eppinger

På grunn av allsidigheten og produksjonshastigheten tilgjengelig selv ved kompliserte geometrier ved HT tror jeg at denne teknologien kan anvendes for å skape mer verdi ut av det U & E kaller "alpha-" og "beta-prototypes". Omfattende tester av prototyper hos kunden parallelt med utviklingen av produktet vil gi en dypere innsikt i både mottagelsen kvaliteten av løsningen før produktet lanseres. Et tettere samarbeid med kunden vil gi et bedre produkt, en trend som er voksende i den marine industrien⁶. I noen tilfeller blir prototypen som blir brukt til utvikling av produktet den første solgte enheten (se Figur 20).


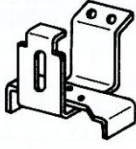
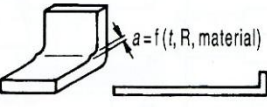
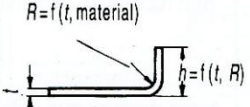




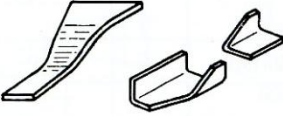
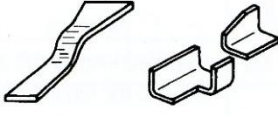
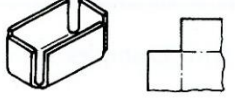
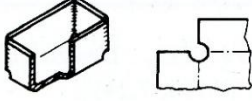


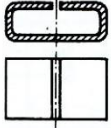
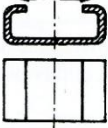
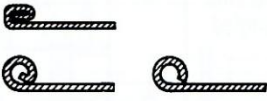

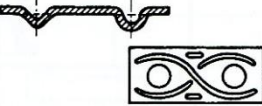
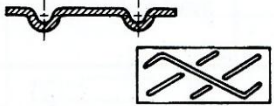
3.4.2 Pahl & Beitz

3.4.2.1 Dimensjonering og retningslinjer for designkvalitet og produksjonsvennlighet

Gjennom dimensjonering og utbedring av lokale geometrier ved å følge Pahl & Beitz' retningslinjer for god designkvalitet og produksjonsvennlighet (se Figur 21) kan det etter hvert vise seg at en komponent likevel er bedre egnet for HT. Dersom det i denne fasen viser seg at det vanskelig å tilvirke en komponent med tilstrekkelig ytelse ved konvensjonelle metoder kan altså HT være en bedre egnet tilvirkningsmetode.

En alternativ case kan være at det oppstår usikkerhet rundt ytelsen og den eventuelle levetiden av en komponent i et sammensatt produkt. Med den informasjonen tilgjengelig kan det være enklere og mindre tidkrevende å utvikle en komponent som tilvirkes ved HT. Dette gir utviklingsteamet muligheten til å videreutvikle enkelte komponenter uten å utsette lanseringen av det endelige produktet. På sikt kan HT-løsningen om mulig tilpasses konvensjonell tilvirkning, eventuelt erstattes med en konvensjonell løsning som tilfredsstiller krav til ytelse.

⁶ Hildre Hans Petter, Mork Ola Moen, Æsøy Vilmar, *The Maritime innovation Factory*, universitetet i Ålesund, 2011

PS	Guidelines	Objective	Wrong	Right
Be	Avoid complex bent parts (material waste); rather split and join.	C		
Be	Allow for minimum values of bending radii (bulging in the compression area and overstretching in the tension area) flange height and tolerances.	Q		
Be	Provide sufficient distance between pre-pierced holes and bend.	Q		
Be	Aim at holes and notches to cross the bend when it is not possible to provide the minimum gap.	Q		
Be	Avoid sloping edges and tapers in the region of the bend.	Q		
Be	Provide clearances at the corners when all sides are to be bent up.	Q		
Be	Provide Folded seam of sufficient width.	Q		
Be	Aim at large access openings for hollow shapes and undercut bends.	Q C		
Be	Provide stiffening at sheet edges.	A		
Be	Aim at identical indentation forms.	A		

Figur 21: Eksempel på retningslinjer for god designkvalitet av Pahl & Beitz

3.5 Fase fire; produksjonsdesign

Målet ved denne fasen er å optimalisere produktets form, sammensetning, toleranser, materialvalg og overflater med særlig tanke på produksjonsmetode. Ved inngangen av denne fasen har man en fungerende løsning ifra fase tre som er testet, dimensjonert og i stor grad definert. Å implementere HT på dette tidspunktet medfører med andre ord stor grad av redesign og dermed utvidet utviklingstid.

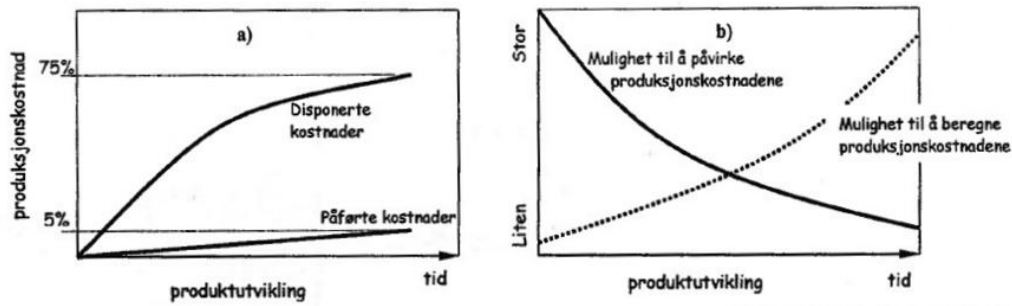
Basert på teorien bak den generelle produktutviklingsmetodikken kan man med god sikkerhet si at under vanlige forhold lønner det seg ikke å implementere HT på dette stadiet. Men hva med under uvanlige forhold?

For å svare på det ser vi på selve produksjonen. Produksjonen av et produkt er direkte med på å avgjøre produktets lønnsomhet; produktets kvalitet er bestemt av produksjonsmetoden samtidig som produksjonskostnaden avgjør profitten per solgte enhet. Derfor er valg av produksjonsmetoden med på å forme produktet ifra et sted i fase to fram til prosjektets slutt (se figuren over). Forsinkelser gjør at produktet kommer sent på markedet betyr tapt inntekt og evt. tapt markedsandel. Med dette i bakhodet dukker tre case opp, hvor HT kan anvendes.

- Problemer med produksjonslinje medfører stor forsinkelse
- Uventede problemer med én eller flere komponenter
- Høy risiko ved nytt produkt

Det finnes antageligvis tilfeller hvor man kan få behov for HT i denne fasen. Dette er dog spesielle tilfeller, og de hører ikke hjemme i vanlige utviklingsmetodikken.

3.6 Oppsummering



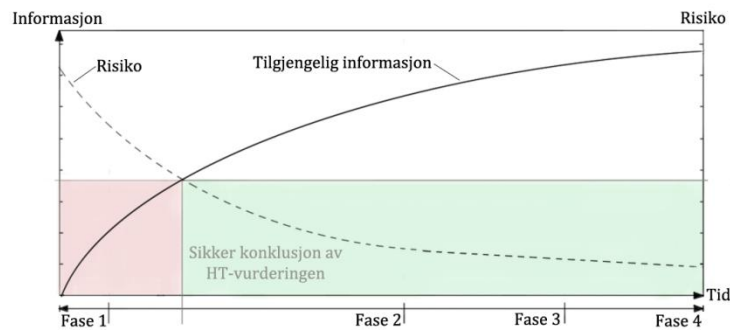
Figur 22: Figur ifra kompendium i faget TMM4115, Produktmodellering

3.6.1 HT-vurderingen bør inngå i første fase

Etter å ha gått gjennom alle fasene kommer det tydelig fram at man får inn mye informasjon som man kan benytte til å gjøre HT-vurderingen allerede i første fase. Det er også kjent at det er store fordeler ved å avgjøre slike avgjørelser så tidlig som mulig; kostnaden ved å gjøre endringer i et utviklingsprosjekt øker med utviklingstiden. Dette gjelder også muligheten til å påvirke produksjonskostnadene, noe som også er et viktig punkt for HT-vurderingen.

Det er ingen tvil om at det er en fordel i å ta HT-vurderingen så tidlig i utviklingsprosessen som mulig. Dette medfører at man kan benytte utviklingstiden til å lage en design som gir god utnyttelse av HT-teknologi. Samtidig unngår man utvidet utviklingstid som følge av at man lager en design for konvensjonelle tilvirkningsmetoder som må re-designes for å gi tilstrekkelig god utnyttelse av HT. Det omvendte kan også forekomme: Et HT-design viser seg å være lite lønnsomt og utviklingen av komponenten må begynne på nytt.

3.6.2 Sjekkliste ved utgangen av første fase



Figur 23: Variasjon av tilgjengelig informasjon gjennom fasene i et risiko-tid diagram

Figur 23 illustrerer hvordan en kan tenke seg at tilgjengelig informasjon og kunnskapen om et produkt øker i løpet av utviklingstiden. I den samme grafen har jeg også tegnet inn hvordan risikoen ved å ta HT-vurderingen synker med utviklingstiden. Det finnes altså en trade-off mellom informasjon tilgjengelig og risikoen avgjørelsen om HT innebærer; akkurat som ved de fleste andre avgjørelser som tas i utviklingen.

For å redusere denne risikoen kan man kun benytte den mest grunnleggende informasjonen i første omgang. Noe av den håndfaste informasjonen man har tilgang til på dette punktet kan benyttes til umiddelbart å avgjøre om HT bør anvendes. Eksempler på dette, dvs Ikea-drillen og hoftelddsprotesen som nevnt under fase en vil ha slik informasjon tilgjengelig i utviklingsprosjektet. En sjekklister som trekker fram slik informasjon vil være nyttig i denne sammenhengen.

I mange tilfeller vil imidlertid slik håndfast informasjon ikke være tilgjengelig. I de tilfellene har man kun informasjon som kan gi en indikasjon, men ingen konklusjon av HT-vurderingen. Informasjon basert på markedsundersøkelser kan være et eksempel på dette: Om man i Ulrich & Eppingers modell ser på kundens primære behov kan de samsvare med sentrale HT-egenskaper, men konseptutviklingen kan vise at man en konvensjonell vil gi en bedre løsning. Det betyr at sjekklister med fordel kan være todelt slik at den skiller mellom sikre resultater og indikasjoner

3.6.3 Fokus på HT i konseptutviklingen

En god HT-design krever en litt annen framgangsmåte enn ved konvensjonelle design. Pahl & Beitz omtaler "*clarity, simplicity and safety*" som tre grunnleggende regler en konstruktør bør følge. Det betyr at kompleksitet om mulig bør unngås ved konvensjonell design. Ved HT kan kompleksitet belønnes dersom det medfører redusert volum av materiale som skal tilvirkes.

Eksisterende og konkurrerende løsninger kan virke som en barriere for innovasjon. En adskilt utvikling eller medlemmer i utviklingsteamet uten "bagasjen" fra tidligere kan være en fordel for å finne de beste løsningene. Enten om dette oppnås ved å introdusere et nytt steg i konseptutviklingen, om en dedikert gruppe jobber med denne utviklingen parallelt med resten av konseptutviklingen drøftes i kapittel 4.

Samtidig peker Pahl & Beitz ut et viktig spørsmål i innledningen av konseptutviklingsfasen: *Er konseptutviklingsfasen virkelig nødvendig, eller finnes eksisterende løsninger som kan forbedres?* I et slikt tilfelle har man et prosjekt hvor man fra starten har mye informasjon og begrensninger ifra den eksisterende løsningen. Om det finnes effektive metoder for redesign bør undersøkes.

Et nytt sett med designregler bør også introduseres. I min prosjektoppgave kom jeg fram til to generelle regler: *bruk materiale kun der du trenger det og bruk HT kun der du trenger det*. I tillegg kan naturen være en god kilde til inspirasjon; formen på en flyvinge⁷, honeycomb-strukturen og dome-strukturen⁸ er alle strukturer man finner i naturen. Disse har hatt en stor innvirkning på design, eksempelvis finner man de to sistnevnte strukturene i Pantheon i Roma. Videreutvikling av disse reglene kommer i kapittel 7.

⁷ David E Alexander, Steven Vogel, *Nature's Flyers*, JHU Press 2004

⁸ William L MacDonald, *The Pantheon: Design, Meaning and Progeny*, Cambridge, Harvard University Press, 1976

3.6.4 Produktfamilier

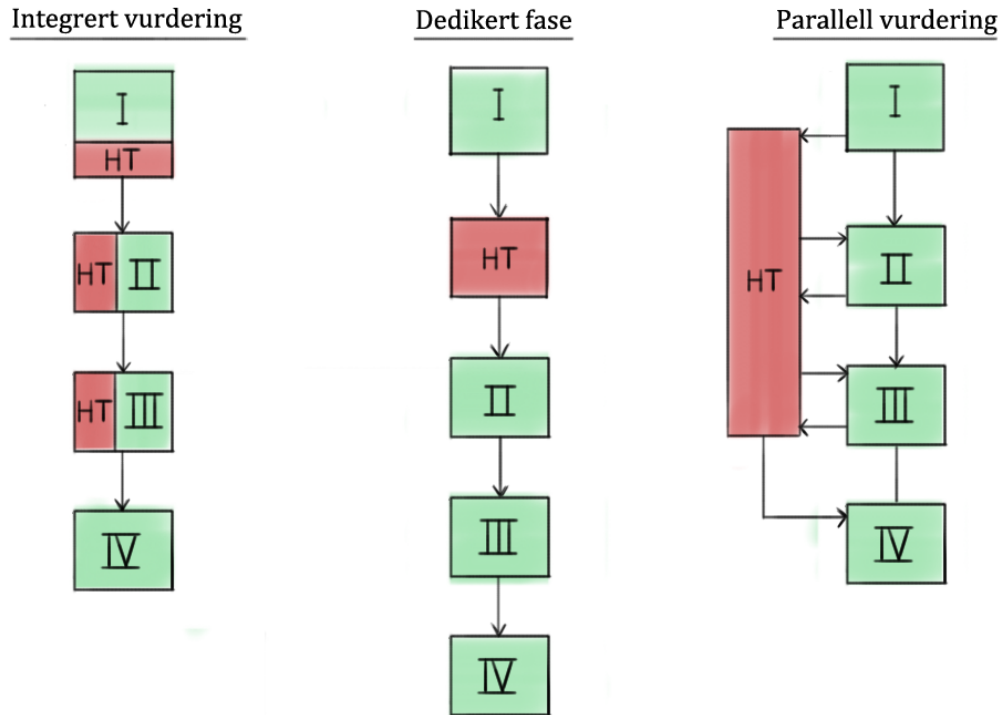
Ved etableringen av en større produktfamilie kan HT komme til nytte; ved å tilby stor variasjon samtidig med høy grad a gjenbruk av moduler gjennom HT vil det være enklere å etablere en ny produktfamilie. Med tiden kan noen av variantene i familien erstattes med konvensjonelle design med fordelene av at produktet er testet og verifisert av markedet før produksjonssystemet er etablert. Med andre ord kan HT redusere risikoen involvert ved å introdusere et nytt produkt.

3.6.5 Prototyper

Ifølge Ulrich & Eppingers modell introduseres prototyper en eller annen gang i løpet av konseptutviklingen og inn i fase tre. Disse prototypene prøves på sentrale brukere for å avdekke feil, og resultatene brukes for å forbedre det endelige produktet. En trend i dagens produktutvikling er at simuleringer og 3D-modeller erstatter behovet for slike prototyper. En 3D-modell kan derimot ikke fortelle hvordan en løsning vil mottas og oppleves i bruk i markedet. Gjennom et tettere samarbeid med kunden og ved bruk av mer omfattende prototyper gjennom HT parallelt med utviklingen i denne fasen tror jeg vil resultere i bedre produkter. Dette kommer selvsagt med en høyere utviklingskostnad, men etter hvert som produkter blir mer og mer kompliserte vil verdien av prototypen bli større. Ved bruk av HT bør det også være mulig å produsere prototyper med høy ytelse mye tidligere enn ved konvensjonelle metoder, eksempelvis støpte komponenter eller komponenter som krever dyre spesialiserte verktøy. På denne måten vil man få mer informasjon tidligere i utviklingen, noe som vil gi et bedre produkt og lavere risiko ved lansering av nye produkter. Å verifisere nytten av prototyper gjennom HT er en for omfattende problemstilling for denne oppgaven. Jeg har likevel nevnt det i oppgaven for å belyse noe jeg tror er en mulighet for god anvendelse av HT; "høyfunksjonelle prototyper"

Den siste fasen blir i svært liten grad dekket av de forskjellige modellene jeg har sett på. Den er for omfattende og i varierer i fra tilfelle til tilfelle slik at en generell modell er lite presis. Siden implementering av HT på dette stadiet i liten grad bidrar til utnyttelsen av teknologien konkluderer jeg med at HT-vurderingen ikke blir en del av denne fasen.

4 Strukturer for HT- vurdering



Figur 24: Tre elementære strukturer for HT-vurdering kombinert med generell utviklingsmetodikk

Figuren over viser de tre mest grunnleggende og forskjellige strukturene som kombinerer HT-vurderingen og den mest grunnleggende utviklingsmetodikken, Frenchs modell. I dette kapittelet skal hver modell drøftes og til slutt én velges som den best egnede strukturen. Fram til nå har teorien vist at vurderingen bør komme tidlig i utviklingstiden, slik Figur 24 illustrerer. Naturligvis er ikke framgangsmåten så rett fram som figuren indikerer, men vil sannsynligvis gjennomføres med flere iterasjoner av fasene. For ordens skyld har jeg valgt å behandle utviklingsprosessen som lineær.

Det er vanskelig å konkludere med hvilken av disse strukturene som er den beste. Forskjellige typer prosjekter og forskjellige selskap vil ha forskjellige behov, kultur og kapasitet. Resten av oppgaven vil bygge på den valgte modellen. Videre i dette kapittelet analyseres disse strukturene, og det endelige valget vil stå som mitt forslag til en generell modell som kan tilpasses etter behov.

4.1 Integrert vurdering

Sentralt i denne vurderingen står forbindelsen mellom HT- og konvensjonell design; et produkt vil inneholde HT- og "konvensjoenelle komponenter" som skal virke sammen. I den første fasen kommer HT-vurderingen inn på slutten, og dette er naturlig siden ntilstrekkelig informasjon må samles inn før man er i stand til å ta en avgjørelse. I begynnelsen er det lite som skiller denne strukturen ifra de andre. Forskjellen ligger i at vurderingen er en del av den første fasen, og hele teamet er en del av denne vurderingen.

I andre fase utvikles komponentene med HT-design sammen med resten av produktets komponenter. Når komponentene utvikles steg for steg i takt er det enklere å inngå kompromiss med tanke på design, slik at man unngår problemer og får det meste ut av hver komponent. Sagt på en annen måte er kanskje denne strukturen den mest naturlige i forhold til utviklingsprosessen slik den er i dag. Det betyr egentlig at prosessen går slik den alltid har gått, det er ingen store endringer som gjør HT-vurderingen ukjent og vanskelig å anvende.

Dette betyr at en bedriftskultur er uendret, noe som Dagestad beskrev som en barriere for innovasjon. Denne strukturen fremmer ikke nytenking, og implementeringen av HT-vurderingen kan for bli ineffektiv siden man enklere kan falle tilbake på kjente og godt innøvde prosesser.

4.2 Dedikert fase

Denne strukturen er den som har mest fokus på HT. Ved å etablere et eget steg for HT-vurderingen utnytter man hele utviklingsteamet til å besvare dette spørsmålet og til å finne løsninger som utnytter seg av denne teknologien. Det problematiske med denne modellen er imidlertid dens plassering; før konseptutviklingen har man antageligvis ikke nok informasjon til å gjøre en sikker avgjørelse, og etter konseptutviklingen vil det kanskje være vanskelig å finne de komponentene som egner seg for HT.

Man kan si at ved flere iterasjoner av HT-fasen og konseptutviklingen vil dette problemet løse seg, men denne utviklingsformen virker unaturlig og i realiteten upraktisk å følge. En mer naturlig prosess er at komponentene utvikles mer side om side, med tanke på grensesnitt og sammenstilling.

En fordel med denne strukturen er at man i innledningen av HT-fasen kan besvare et viktig spørsmål: *Er HT-fasen virkelig nødvendig, eller kan utviklingen fortsette uten å vurdere HT?* Dersom man oppdager at det er gode muligheter for å utnytte HT er verdien av fasen åpenbar, og utviklingsteamet bør ha god motivasjon til å fokusere på utviklingen av gode HT-design. Dersom HT ikke kan anvendes avsluttes fasen og man fortsetter utviklingene på vanlig måte, uten å utvide utviklingstiden ytterligere.

Som ved den integrerte vurderings-strukturen er det en fare for at HT-fasen blir neglisjert, og at den i et selskap med en godt etablert kultur kan bli ansett som et unødvendig og bortkastet arbeid. Man kan kanskje anta at et selskap med en slik kultur i utgangspunktet aldri ville tatt i bruk denne utviklingsmetodikken. Det gir likevel hensikt å velge en struktur hvor man unngår dette potensielle problemet.

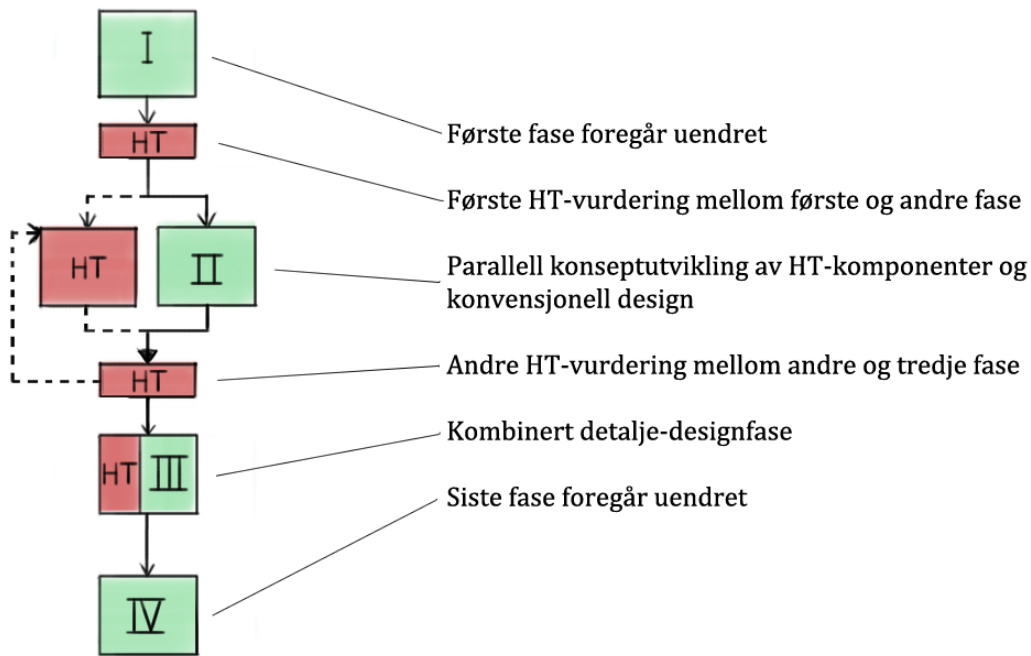
4.3 Parallell vurdering

På mange måter er denne strukturen en kombinasjon av de foregående strukturene. Samtidig som en egen fase er dedikert til HT-vurderingen utvikles HT-designene parallelt med de andre komponentene. Forskjellen er at her settes egen gruppe til å gjøre denne utviklingen. Denne gruppen står "utenfor" den vanlige utviklingsprosessen slik at man unngår eventuelle barrierer skapt av etablerte eller eksisterende løsninger.

Det kan også være en fordel å inkludere et medlem med en annen bakgrunn i teamet ansvarlig for HT-vurderingen, om enn kun i en liten periode. Det ikke uvanlig å bruke personer med annen bakgrunn for å skape nye løsninger, slik Dagestad ga et eksempel på.

Denne metodikken krever svært god kommunikasjon mellom de to utviklingsteamene, og i fase tre kan denne oppdelingen av teamet være både upraktisk og problematisk. Mye energi må brukes på kommunikasjon, og mangel på dette kan føre til store problemer. For eksempel kan det oppstå problemer med sammenstilling som ellers ville ha blitt unngått dersom det andre teamet var en del av utviklingen.

4.4 Konklusjon



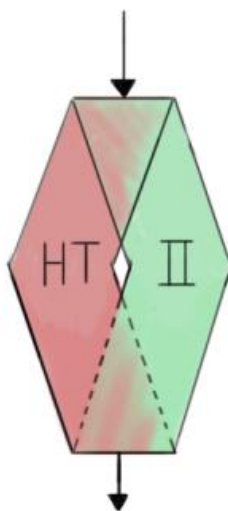
Figur 25: Valgt struktur for kombinert HT-vurdering og generell utviklingsmetodikk

Denne modellen er en kombinasjon av de tre prinsipielle strukturene. Her har jeg forsøkt å få med de positive egenskapene ved hver av dem samtidig som jeg har forsøkt å unngå de negative. Et sentralt mål for meg har vært å komme fram til en modell som er enkel å inkorporere i enhver utviklingsmodell samtidig som at den fremmer en ny tenkemåte som gir gode HT-design.

4.4.1 Forklaring av modellen

Første fase foregår som vanlig. Når nok informasjon er samlet inn tar utviklingsteamet en samlet vurdering om HT bør anvendes eller ikke. Denne vurderingen bør ta form som en sjekkliste. Dette er en effektiv måte å finne en indikasjon med den informasjon som er tilgjengelig. På denne måten får hele teamet en forståelse for avgjørelsen og "eierfølelsen" til produktet blir vedlikeholdt. I prosjekter med store utviklingsteam er det antagelig vis ikke mulig at alle tar del i denne vurderingen, men det vil i alle tilfeller være en fordel at så mange som mulig forstår bakgrunnen til avgjørelsen som har blitt tatt. Dersom det blir avgjort at HT ikke er lønnsomt utgår den parallelle konseptutviklingen og den fortsetter som vanlig.

Konseptutviklingen vil trolig variere fra case til case ettersom behovet for HT kan avdekkes på mange forskjellige steder i utviklingen. En naturlig måte å forestille seg konseptutviklingsfasen på er at den i utgangspunktet starter som normalt, og at etter hvert som potensielle HT-komponenter avdekkes deles utviklingsfasen i to parallelle deler slik at full fokus på konvensjonell eller HT-design kan opprettholdes for best mulig resultat.



Figur 26: Illustrasjon av en fusjonerende konseptutvikling

Etter konseptutviklingen gjøres en ny HT-vurdering. Denne vurderingen gjøres på grunnlag av mer og sikrere informasjon og man kan på dette punktet teste de antagelsene eller avgjørelsene gjort ved første HT-vurdering. Hvis det viser seg at HT likevel ikke bør anvendes, eller om HT har blitt avvist når det viser seg å være lønnsomt går man tilbake og gjør de endringene som er nødvendige. Dette er en naturlig framgangsmåte siden iterasjoner av konseptutviklingsfasen ikke er uvanlig.

Etter konseptutviklingsfasen kommer detaljdesign-fasen, og det er naturlig at HT- og konvensjonelle komponenter utvikles om hverandre. I utgangspunktet foregår denne fasen som før, med unntak av at HT-teknologi gir en frihet til å optimalisere HT-komponentene for ytelse hvor de konvensjonelle komponentene må ta hensyn til produksjon. I tillegg kan spørsmålet om etableringen av en produktfamilie oppstå, og utviklingen av denne kan ta utgangspunkt i denne fasen. Det kreves kanskje en egen metodikk for å finne ut hvordan HT kan benyttes best mulig i dette tilfellet. Det er imidlertid en for stor problemstilling til at den kan inkluderes i denne oppgaven. Den siste fasen fortsetter som før.

5 Innholdet I HT-vurderingen

Introduksjon til del 2

Den første delen av oppgaven har vist hvilken struktur HT-vurderingen bør ha og hvordan den kan integreres med de etablerte utviklingsmetodikkene. Den har også gitt et bilde av hva vurderingen bør inneholde, hvilke eksisterende metoder som kan benyttes for gjøre en vurdering og hvor man kan finne informasjon som er nødvendig for å kunne ta en avgjørelse. Det sentrale spørsmålet ved denne delen av oppgaven er:

Hva skal inngå i HT-vurderingen?

5.1 Sjekklistener

5.1.1 Hensikt

Den primære funksjonen til sjekklister er å avdekke et behov for HT, eventuelt indikere at det finnes et potensial for god utnyttelse av HT. Dette gjør sjekklister ved å be konstruktøren gi en rekke påstander poeng. Poengene representerer hvor godt påstanden samsvarer med egenskaper konstruktøren ønsker at produktet skal ha.

Poengskalaen bør reflektere usikkerheten i undersøkelsen. En skala fra 1 til 5 vil i dette tilfellet være en øvre bredde på skalaen. På dette tidspunktet i utviklingen av et nytt produkt er det mange ukjente faktorer. For eksempel: I en skala fra 1 til 10 vil det være vanskelig å avgjøre om 6 eller 7 poeng riktig representerer samsvaret mellom påstanden *"lav vekt er viktig"* og et ønske om lav vekt på en del til en motorsykkel. På den andre siden vil en skala fra 1 til 3 gi for liten spredning av resultatene.

En sekundær funksjon ved sjekklister er å hjelpe konstruktøren til å finne nye løsninger ved å gi en påminnelse om hvilke muligheter man har gjennom HT. Forhåpentligvis vil dette gjøre det enklere å oppdage muligheter for anvende geometrier som tidligere har vært uøkonomiske, umulige eller vanskelige å gjennomføre.

Etter å ha gjennomført sjekklister har man to valg: Enten søker man bevisst etter HT-design eller så holder man seg til konvensjonelle design. Resultatet av sjekklister presenteres i form av en total poengsum og hvilken prosentandel av den største mulige poengsummen den utgjør. En nedre prosentandel gir en grense for når HT-design bør utvikles eller ikke. Se Figur 29 og Figur 30 for eksempler.

5.1.2 To forskjellige sjekklister

5.1.2.1 Begynnende HT-vurdering; sjekklisten før konseptutviklingen.

Hensikten med sjekklisten før konseptutviklingen er å finne ut hvor stor sannsynlighet det er for å avdekke gode HT-design i konseptutviklingen. Er denne lav bør det ikke brukes tid på utvikling av HT-design. Lav sannsynlighet reflekterer også lite potensial for ytelse, siden sjekklisten er en undersøker hvor godt produktet utnytter HT-egenskapene.

Figur 27 viser et forslag til hvordan denne sjekklisten skal se ut og hva den bør inneholde. På dette tidspunktet ser konstruktøren på produktet på system nivå, noe som medfører en stor usikkerhet i vurderingen. Produktet i sin helhet kan samsvare med mange av HT-egenskapene, men på komponentnivå kan det vise seg at konvensjonelle metoder best egnet for gi produktet de ønskede egenskapene. Derfor inneholder denne listen kun punkter som kan besvares uten at konstruktøren har noen god kjennskap til de komponentene produktet skal bestå av.

Figur 31 viser hvordan undersøkelsen og utregningen av dens poenger kan løses ved hjelp av et regneark. Dette er imidlertid kun et eksempel. Vekttallene og poengene som gis de ved de forskjellige punktene må bestemmes slik at de gir best mulig resultat. Etter hvert som denne metoden benyttes vil den ha reelle tall å forholde seg til, slik at vekttallene kan korrigeres med tiden.

Figur 29 og Figur 30 viser eksempler på bruk av denne sjekklisten. Vær oppmerksom på at vekttallene brukt i disse eksemplene kun er bestemt "på magefølelse" for å illustrere bruken av skjemaet. Til disse eksemplene har jeg valgt to produkter som med sine egenskaper markerer ytterpunkter for denne undersøkelsen; et tilhengerfeste og en hoftelddsprotese.

Begynnende HT-vurdering

Spørsmål markert med * rangeres med tall ifra 1 til 5, hvor 1 indikerer dårlig samsvar med produktet og 5 indikerer godt samsvar med produktet. Resten av spørsmålene besvares med 1 for sann og 0 for usann.

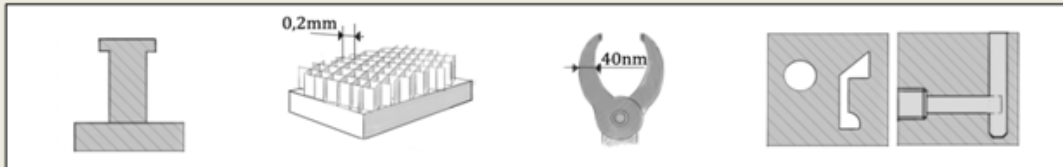
Vil produktet inneholde følgende geometrier

Utstikkende geom.

Detaljert overflate

Små mekanismer

Indre kaviteter



Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*

Ytelse er høyt prioritert for dette produktet

Høy styrke er viktig*

Lav vekt er viktig*

Hvilket produksjonsvolum forventes av dette produktet?

1 - 10

10 - 100

100 - 1000

Mer enn 1000

Hvor lang levetid forventes dette produktet å ha?

1 - 5 år

5 - 10 år

10 - 25 år

Skreddersøm er en viktig egenskap for dette produktet*

Vil dette produktet inngå i en produktfamilie?

Hvilken forretningsstrategi følger selskapet med salget av dette produktet?

Prisledende strategi

Teknologiledende strategi

Imiterende strategi

Total poengsum 0


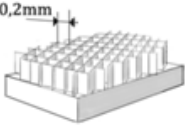


Prosent av full poengsum: 0%

Figur 27: Sjekkliste før konseptutviklingen

Spørsmål	Pseudokode
Vil produktet inneholde følgende geometrier:	
Utstikkende geometrier	Hvis JA, 10 poeng gitt
Detaljert overflate	Hvis JA, 15 poeng gitt
Små mekanismer	Hvis JA, 25 poeng gitt
Indre kaviteter	Hvis JA, 30 poeng gitt
Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*	Poeng fra 1 til 5 gitt, hvis 3 -5 skalert med
Ytelse er høyt prioritert for dette produktet	
Høy styrke er viktig*	Poeng ifra 1 til 5
Lav vekt er viktig*	Poeng ifra 1 til 5 skalert med faktor av poeng gitt av stykre (poeng over)
Hvilket produksjonsvolum forventes av dette produktet?	
1 - 10	Hvis JA, poeng gitt skalert med tilpasset
10 - 100	faktor hvis skreddersøm er viktig egenskap
100 - 1000	
Mer enn 1000	
Hvor lang levetid forventes dette produktet å ha?	
1 - 5 år	Hvis JA, 1 poeng gitt
5 - 10 år	Hvis JA, 10 poeng gitt
10 - 25 år	Hvis JA, 20 poeng gitt
Skreddersøm er en viktig egenskap for dette produktet*	Hvis ja, 25 poeng gitt
Vil dette produktet inngå i en produktfamilie?	Hvis ja, 5 poeng gitt
Hvilken forretningsstrategi følger selskapet med salget av dette produktet?	
Prisledende strategi	Hvis JA, -5 poeng gitt
Teknologiledende strategi	Hvis JA, 3 poeng gitt
Imiterende strategi	Hvis JA 5 poeng gitt
Total poengsum	Summer alle, justert til positive tall
Prosent av full poengsum	Poengsum / Maks poengsum


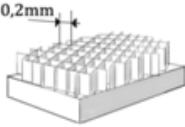
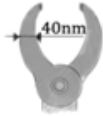
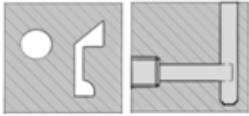
Figur 28: Pseudokode av "Begynnende HT-vurdering"

5.1.2.1.1 Eksempel: Begynnende HT-vurdering for tilhengerfeste

Begynnende HT-vurdering	
Spørsmål markert med * rangeres med tall ifra 1 til 5, hvor 1 indikerer dårlig samsvar med produktet og 5 indikerer godt samsvar med produktet. Resten av spørsmålene besvares med 1 for sann og 0 for usann.	
Vil produktet inneholde følgende geometrier	
Utstikkende geom.	Detaljert overflate
Små mekanismer	Indre kaviteter
	
	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*	<input type="text" value="5"/>
Ytelse er høyt prioritert for dette produktet	
Høy styrke er viktig*	<input type="text" value="5"/>
Lav vekt er viktig*	<input type="text"/>
Hvilket produksjonsvolum forventes av dette produktet?	
1 - 10	<input type="text"/>
10 - 100	<input type="text"/>
100 - 1000	<input type="text"/>
Mer enn 1000	<input type="text" value="1"/>
Hvor lang levetid forventes dette produktet å ha?	
1 - 5 år	<input type="text"/>
5 - 10 år	<input type="text"/>
10 - 25 år	<input type="text" value="1"/>
Skreddersøm er en viktig egenskap for dette produktet*	<input type="text"/>
Vil dette produktet inngå i en produktfamilie?	<input type="text"/>
Hvilken forretningsstrategi følger selskapet med salget av dette produktet?	
Prisledende strategi	<input type="text" value="1"/>
Teknologiledende strategi	<input type="text"/>
Imiterende strategi	<input type="text"/>
Total poengsum	<u>13.5</u>
Prosent av full poengsum:	<u>6%</u>

Figur 29: Eksempel på bruk av den begynnende HT-vurderingen på et tilhengerfeste

5.1.2.1.2 Eksempel: Begynnende HT-vurdering for hoftelddsprotese

Begynnende HT-vurdering	
Spørsmål markert med * rangeres med tall ifra 1 til 5, hvor 1 indikerer dårlig samsvar med produktet og 5 indikerer godt samsvar med produktet. Resten av spørsmålene besvares med 1 for sann og 0 for usann.	
Vil produktet inneholde følgende geometrier	
Utstikkende geom.	Detaljert overflate
Små mekanismer	Indre kaviteter
	
	
<input type="text"/>	<input type="text" value="1"/>
<input type="text"/>	<input type="text" value="1"/>
Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*	<input type="text" value="2"/>
Ytelse er høyt prioritert for dette produktet	
Høy styrke er viktig*	<input type="text" value="3"/>
Lav vekt er viktig*	<input type="text" value="1"/>
Hvilket produksjonsvolum forventes av dette produktet?	
1 - 10	<input type="text"/>
10 - 100	<input type="text" value="1"/>
100 - 1000	<input type="text"/>
Mer enn 1000	<input type="text" value="0"/>
Hvor lang levetid forventes dette produktet å ha?	
1 - 5 år	<input type="text"/>
5 - 10 år	<input type="text"/>
10 - 25 år	<input type="text" value="1"/>
Skreddersøm er en viktig egenskap for dette produktet*	<input type="text" value="1"/>
Vil dette produktet inngå i en produktfamilie?	<input type="text"/>
Hvilken forretningsstrategi følger selsket med salget av dette produktet?	
Prisledende strategi	<input type="text"/>
Teknologiledende strategi	<input type="text" value="1"/>
Imiterende strategi	<input type="text"/>
Total poengsum	<u>140</u>
Prosent av full poengsum:	<u>65%</u>

Figur 30: Eksempel på bruk av den begynnende HT-vurderingen på en hoftelddsprotese

5.1.2.2 Utregning av poengsum

Hvert spørsmål eller utsagn i sjekklisten har et tilhørende vektall. Størrelsen på dette vektallet avhenger av hvor god utnyttelse av HT den aktuelle egenskapen gir, og produktet av vektallet og poengene gitt av konstruktøren utgjør den resulterende poengsummen.

Eksempel:

	Poeng gitt	Faktor	Utregning	Totalt
Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*	2	1	2 x 1	2
Ytelse er høyt prioritert for dette produktet				
Høy styrke er viktig*	4		1	4
Lav vekt er viktig*	4	poeng styrke x 0.5	4 x 4 x 0.5	8
Total poengsum				14

Figur 31: Eksempel på sjekklstens virkemåte

Dette eksempelet viser hvordan utregningen i skjemaet foregår. Utsagnet "Lav vekt er viktig" har en høy faktor siden det er en viktig HT-egenskap imens utsagnet "Høy styrke er viktig" har en lav faktor, siden det alene ikke er ensbetydende med god utnyttelse av HT. Sammen får derimot utsagnet et økt bidrag, siden kombinasjonen av de to kan oversettes til et godt vekt/styrke-forhold.

5.1.2.3 Den kontrollerende HT-vurderingen; sjekklisten etter konseptutviklingen

Denne sjekklisten virker på samme måte som sjekklisten før konseptutviklingen. Denne har imidlertid mye mer informasjon tilgjengelig og er med det en mer sikker vurdering enn den første. Jeg har tidligere konkludert med at dette er det tidligste tidspunktet hvor man kan avgjøre HT-vurderingen. Denne sjekklisten skal fungere som en kontroll av resultatet av konseptutviklingen.


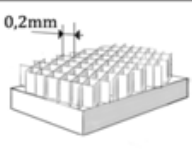

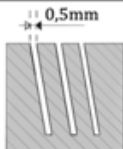
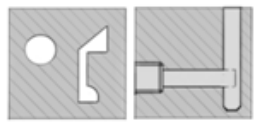
I stedet for å vurdere systemet i sin helhet fungerer denne vurderingen ved at komponenter vurderes enkeltvis, hvor konstruktøren kan kontrollere hvor godt de egentlig utnytter teknologien. Han har også muligheten til å vurdere om noen konvensjonelle løsninger med fordel kan forbedres ved bruk av HT.

Ikke alle komponentene i et produkt trenger å vurderes på denne måten. Det framgår av punktene i listen hvilke komponenter det er som er interessante, ettersom de trekker fram de mest sentrale egenskapene ved komponentene. Denne listen er med hensikt gjort kort og overfladisk slik at den kan gjennomføres raskt og effektivt. Denne vurderingen skal kun gi en indikasjon om hvorvidt et HT-design bør undersøkes, en form for første sortering. Til syvende og sist er det en kost-nytte evaluering som avgjør hvilken løsning som er den beste.

Kontrollerende HT-vurdering

Spørsmål markert med * rangeres med tall ifra 1 til 5, hvor 1 indikerer dårlig samsvar med produktet og 5 indikerer godt samsvar med produktet. Resten av spørsmålene besvares med 1 for sann og 0 for usann.

I hvilken grad inneholder komponenten avansert geometri?

Utstikkende geom.	Detaljert overfl.	Små mekanismer	Dype smale spor	Indre kaviteter
				
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lav produksjonskostnad er svært høyt prioritert*

Ytelse er høyt prioritert for denne komponenten

Høy styrke er viktig*
 Lav vekt er viktig*

Komponenten er sammensatt av flere deler

1 - 5
 5 - 10
 mer enn 10

Sammenstilling av produktet er krevende*

Komponenten forårsaker høye verktøkkostnader*

Tilvirkningen av komponenten er krevende for produksjonssystemet

Materialet er svært belastende for sponavvirkende prosesser*
 Komponenter må håndteres ofte under tilvirkningen*
 Komponenter har lang bearbeidningstid*

Sponavvirkningsprosessen av komponenten forårsaker stor grad av svinn*

Det er en fordel for produktet å ha flere variasjoner av komponenten

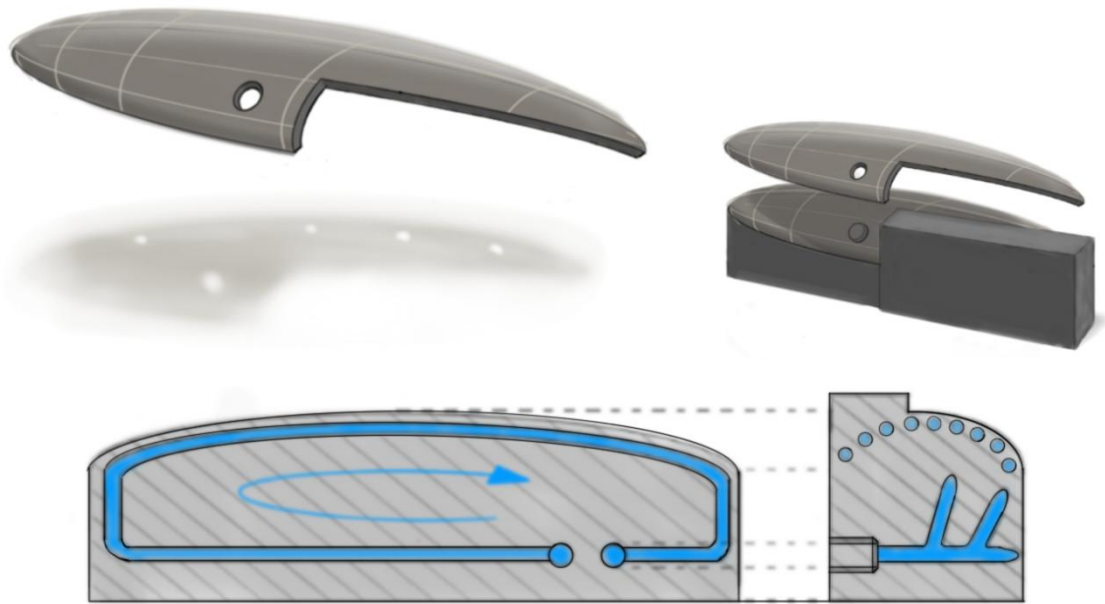
Endret grensesnitt*
 Endret dimensjonering (vekt/styrkeforhold)*
 Endret/skalert størrelse*

Total poengsum: 0 Prosent av full poengsum: 0%

Figur 32: Excel-regneark, sjekklisten etter konseptutviklingen

5.2 Noen av sjekklisterens punkter

5.2.1 Avansert geometri.



Figur 33: Deksel og tilhørende innsats med "conformal cooling"

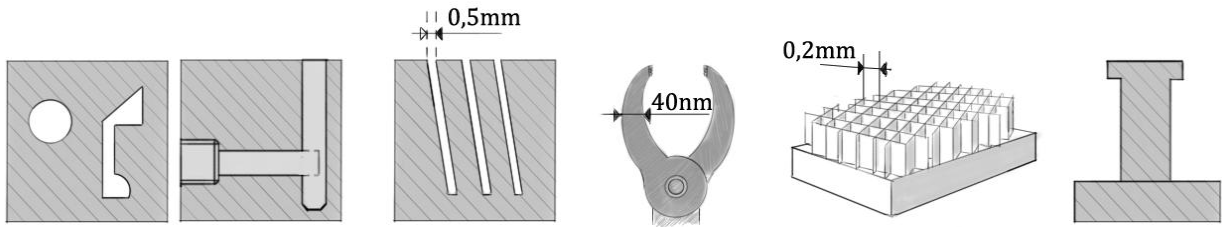
Det første spørsmålet i sjekklister har som hensikt å peke ut komponentene som enklest gir god utnyttelse av HT. Figur 33 viser et eksempel på en slik komponent. Denne innsatsen, en del av støpeverktøyet som skal lage dekselet i figuren benytter seg av "conformal cooling"⁹, dvs kjølekanaler som følger konturen til overflaten av kaviteten i verktøyet. I denne industrien har HT funnet en god anvendelse. Med bedre verktøy er design som tidligere var krevende i produksjon blitt lettere tilgjengelig.

Disse og lignende produkter som krever HT må kunne oppdages tidlig i utviklingen. Det samme gjelder for eksempel massive produkter som best egner seg til støping. Ved bruk at HT er volum og størrelse de begrensende faktorene.

I sjekklisterne er blir noen utvalgte geometrier etterlyst. De følgende geometriene er hva jeg har definert som avansert geometri:

- **Indre kaviteter** (conformal cooling, porøse soner, luftlommer)
- **Dype og smale utskjæringer**
- **Små produkter** (Instrumenter for kirurgi, små filter)
- **Detaljrike produkter** (mikrostrukturer, detaljerte overflater)
- **Små utsikende geometrier** (geometrier som er vanskelige/svake ved sveising eller krever mye maskinering)

⁹ Siegfried Mayer, *Optimised mould temperature control procedure using DMLS*, White paper, EOS



Figur 34: Illustrasjon av de avanserte geometriene

Dersom den komponenten konstruktøren skal lage inneholder en av disse geometriene vil HT være nødvendig eller mest lønnsomt. På den andre enden av skalaen; dersom komponenten er massiv og uten noen avansert geometri vil HT være uegnet. Ventildekslene av støpt aluminium i bilde 3 er et eksempel på et produkt som ikke har noen avansert geometri.



Bilde 3: Mopar ventildeksel

5.2.2 Skreddersøm

De produktene som kan lages på begge måtene, "gråsoner-produkter" er imidlertid vanskelige å finne. Som nevnt tidligere er det den økte ytelsen i forhold til kostnaden som avgjør om HT bør anvendes. Ved å studere verdien av skreddersøm kan det være mulig å finne noen av dem:

Produktfamilie: Et det nye produktet en del av en eksisterende produktfamilie? Økt grad av gjenbruk av eksisterende moduler kan føre til besparelser siden ny produksjonslinje er unødvendig. Dette betyr også at HT ikke bare utvider produktfamilien med ett nytt medlem, men potensielt med mange.

Lite produksjonsvolum og høye verktøykostnader: Dersom det er en fordel å skreddersy produktet til individuelle kunder, kundegrupper eller dersom produktet skal fungere med en rekke eksisterende grensesnitt, på tvers av produktfamilier osv. vil hver enkelt produksjonsserie være liten. Kun i de tilfellene hvor produksjon medfører store verktøykostnader, i tillegg til at produksjonsvolumet er lavt vil HT være en mer egnet løsning.

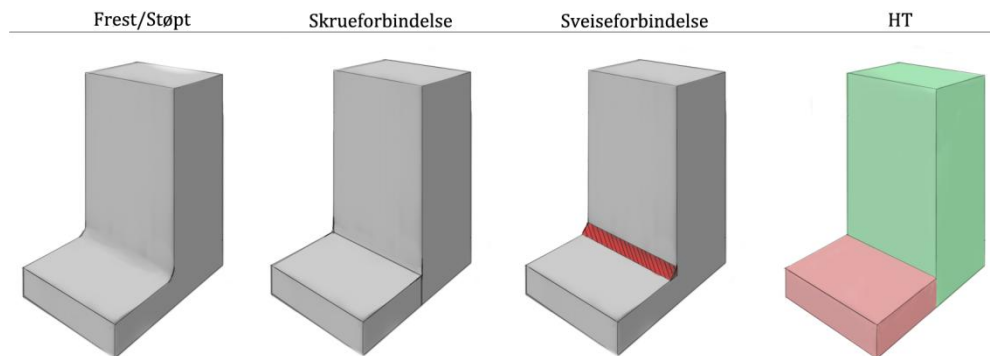
5.2.3 Sammenstilling, svinn og bearbeiding



Bilde 4: Brakett for landingssystem i et fly

I prosjektoppgaven ble en brakett i bildet over brukt som et eksempel på et produkt som gir mye svinn av sponavvirkning. Det er ikke kun materialkostnaden i svinn som er interessant i slike tilfeller, men også slitasje på verktøy, bearbeidningstid og ytelse.

Sammenstilling blir brukt i denne sammenhengen siden det kan tenkes at svinn ved konvensjonelle metoder kan reduseres ved å la gjenstanden være sammensatt av to deler. Dette medfører enten en sveise- eller skrueforbindelse som kan medføre økt produksjonskostnad utviklingstid. Figur 35 viser en sammenligning av flere metoder for å skape en enkel geometri.

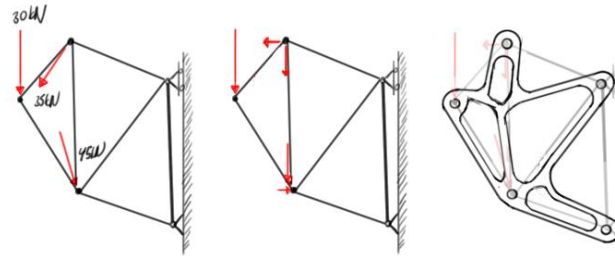


Figur 35: Forskjellige metoder for sammenstilling av to komponenter

Ved svært enkle geometrier slik som denne vil ikke HT gi den beste løsningen. Ved store produksjonsvolum vil støping gi den billigste tilvirkningsmetoden. Dersom et mykt materiale kan benyttes vil ekstrudering gi et bedre kost/styrkeforhold. Den sveiste eller freste løsningen gi det beste kost/styrkeforholdet ved lavt produksjonsvolum.

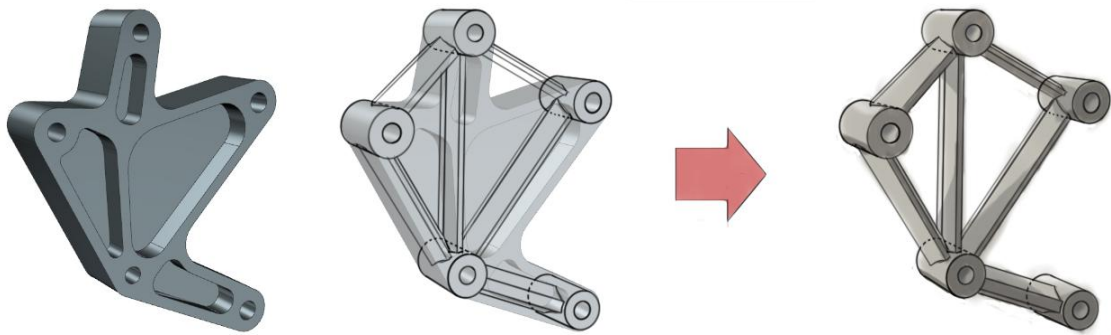
Dette er tilfellet ved denne enkle geometrien, som kan settes sammen av to komponenter. Det følgende eksempelet viser hvordan tilfellet blir dersom man betrakter en mer avansert geometri.

5.2.3.1 Eksempel: Utvikling av en brakett



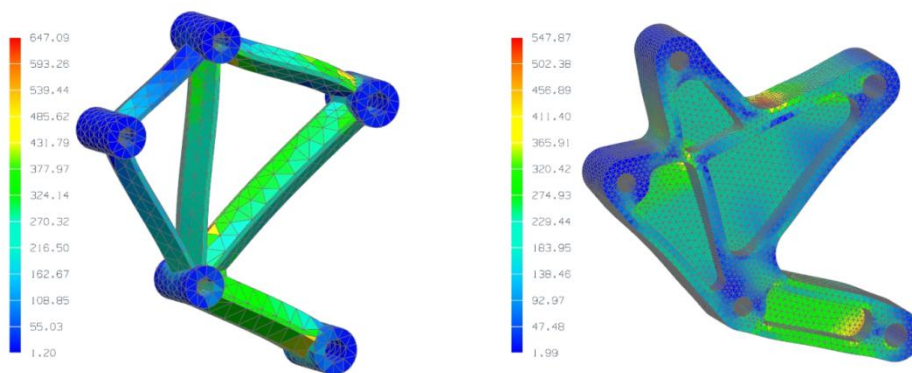
Figur 36: Skissert stav-modell av det eksisterende grensesnittet og dimensjonerende lastsituasjon

I konseptutviklingen av et produkt skal en konstruktør lage en komponent med et gitt grensesnitt som skal tåle en gitt belastning. Ut ifra skissen i Figur 36 ble en konvensjonell design laget, optimalisert for enkel tilvirkning ved fresing.



Figur 37: Generell geometri av frest versjon videreutviklet til nytt HT-design

Den generelle geometrien blir definert. Samtidig blir et alternativt design generert, et HT-design. Dette er laget med fokus på ytelse i stedet for billigst mulig produksjon.



Figur 38: Analyse av de generelle geometriene

Analyser og dimensjonering av de generelle geometriene av de to løsningene viser at versjonen til venstre i bildet over gir en vektreduksjon på ca 18%. Disse resultatene er lovende og konstruktøren forsetter utviklingen av det alternative designet.



Figur 39: Indre kaviteter i HT-design

Videre kan vekten reduseres ytterligere ved å fjerne unødvendig materiale i kjernen av braketten. Siden spenningene er størst nær knutepunktene har de indre kavitetene i midten av stavene liten påvirkning på styrken til braketten. Derfor kan mye vekt kan reduseres på denne måten. Disse indre kavitetene er svært vanskelig å tilvirke med konvensjonelle metoder.



Figur 40: Skisserte løsninger på et kritisk knutepunkt

Særlig ett av knutepunktene skaper store spenningskonsentrasjoner, og utviklingen fortsetter med å utbedre designet av dette området. Flere forskjellige design prøves ut, og den beste løsningen velges.

5.2.3.1.1 Sammenligning

Versjon	HT-design	Konvensjonell
Produksjonskostnad (stål)	7200 kr (inkl materialkost.)	370 – 550 kr (+ materialkost.)
Produksjonstid	7 timer	20-30 min
Volum	105060 mm ³	148081 mm ³

Produksjonstid og kostnad av HT-designet er gjort av Concept Laser, produsent av pulverbedmaskiner. Prof. Knut Sørby ved IPK, NTNU har gitt estimatet av produksjons tid og kostnad av den konvensjonelle modellen.



Figur 41: De ferdige brakettene; additiv versjon til venstre og frest versjon til høyre

Kostnaden og produksjonstiden av dette HT-designet er betraktelig høyere enn den konvensjonelle løsningen. I tillegg kommer en ytterligere kostnad og produksjonstid ved ettermaskinering. Gevinsten av den økte kostnaden er i dette tilfellet en vektreduksjon på 29.1 %, som potensielt kan økes, og en stor reduksjon i materialsvinn.

Fresingen av den konvensjonelle løsningen medfører materialsvinn på 75,7 % av volumet av den endelige løsningen. Svinnet i tilvirkningen av HT-designet er langt lavere, noe svinn må påberegnes fra pulver ifra prosessen som ikke kan gjenbrukes, eksempelvis bruk av støttestruktur og noe svinn ifra ettermaskineringen.

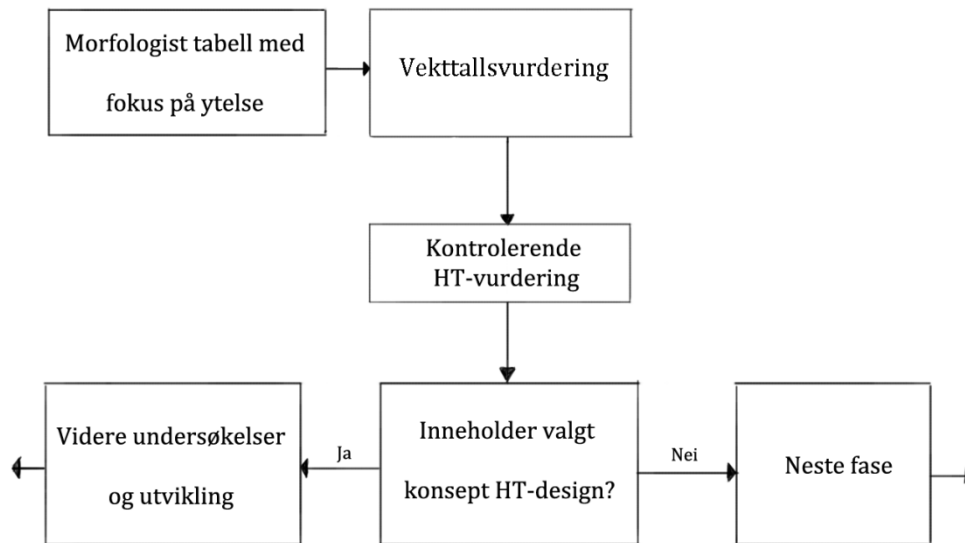
Tilvirkningen av den konvensjonelle løsningen må skje i to oppspenninger; 1. hull og lommer og overflate, 2- ytterkontur, lommer på underside og overflate av underside. Denne prosessen kan potensielt automatiseres, noe som vil redusere produksjonsprisen.

I en hybrid celle vil produksjonen av HT-designet må komponenten kun håndteres én gang; ved maskinering av undersiden av komponenten. Denne prosessen, samt pakking av ferdigproduserte komponenter kan automatiseres ved serieproduksjon.

Produksjonstiden som følge av den additive prosessen kan kortes ned dersom flere komponenter produseres samtidig, noe som vil redusere enhetskostnaden. Et eksempel på en slik reduksjon av produksjonstid og kostnad ble gitt i prosjektoppgaven¹⁰.

¹⁰ Marius Einang, *Design for Performance*, 2011, side 17, Medisinske implantater

6 Utvelgingsprosess



Figur 42: Videreutvikling av konsept tre ifra prosjektoppgaven *Design for Performance*

6.1 Konseptutvikling som prosess for å finne HT-komponenter

Den viktigste faktoren i HT-vurderingen, som tittelen av oppgaven tilsier er ytelse. *“Design for performance”* eller *“design for ytelse”* handler om å heve ytelse gjennom bruk av HT. Det første spørsmålet designeren må stille seg er om et HT-design vil heve ytelsen i forhold til konvensjonelle design i stor nok grad. Med andre ord må ytelsen på en eller annen måte måles. Til dette må man ha design å sammenligne.

Min konklusjon er at den mest effektive måten å gjøre dette på er ved de tradisjonelle metodene for konseptutvikling: For å komme fram til en god HT-design må det i utgangspunktet finnes en komponent med et behov som kan dekkes av HT. For HT-vurderingen betyr dette at bruk av HT krever minst én iterasjon av konseptutviklingen.

Dette betyr at konseptutviklingen går i første omgang som vanlig. Ved enden av første iterasjon av konseptutviklingen gjennomføres en utvelgelsesprosess som en videreutvikling av konsept tre fra min prosjektoppgave, Figur 42. Deretter utvikles HT-komponentene parallelt med resten av utviklingen.

Unntak til dette er enten ved videreutvikling av et selskaps egne eksisterende løsning eller ved en analyse av et konkurrerende, tilsvarende produkt. Mye informasjon kan hentes ifra slike produkter, og HT-vurderingen kan begynne helt i starten av utviklingsprosessen.

6.2 Prosessen

6.2.1 Morfologisk tabell med fokus på ytelse

Prosesen starter med at en morfologisk tabell genereres. Dersom sjekklisen før konseptutviklingen har indikert at HT vil være egnet vil denne tabellen trolig inneholde en rekke løsninger som krever HT. I utgangspunktet bør en morfologisk tabell inneholde løsninger uten at produksjonsmetode har blitt vurdert. Det er imidlertid vanskelig å ikke la seg påvirke av tidligere erfaringer. Derfor har jeg foreslått at man har et ekstra fokus på ytelse for å få med alle potensielle HT-krevende løsninger.

6.2.2 Vekttallsvurdering

Ut ifra den morfologiske tabellen genereres en rekke konsepter som veies imot hverandre gjennom en vekttallsvurdering. Det vinnende konseptet består av en rekke løsninger, og de løsningene som krever HT har på denne måten blitt valgt ut som de best egnede løsningene i forhold til produktkravene.

6.2.3 Videre undersøkelser og utvikling

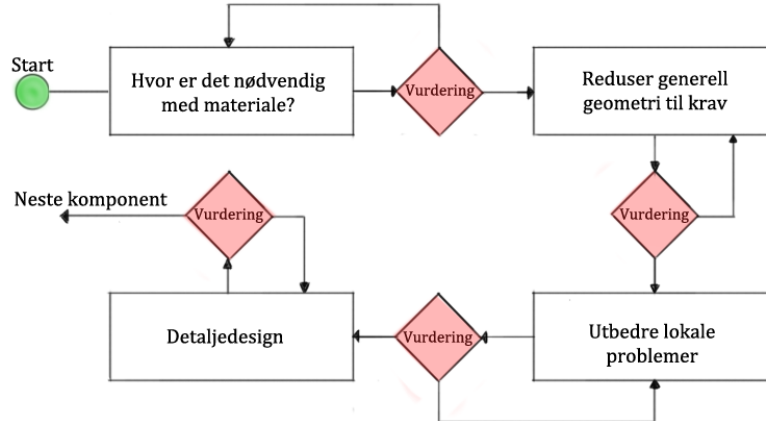
Etter at det vinnende konsept har blitt valgt går konstruktøren gjennom en den andre sjekklisen. Dersom resultatet av denne ikke strider med det valgte konseptet fortsetter utviklingen. Dersom konseptet ikke inneholder HT-løsninger fortsetter utviklingen til neste fase, ellers tar man HT-løsningene med i en egen utviklingsfase.

I dette steget kan det være en fordel å ta med en konsvensjonell løsning som et alternativ til HT-løsningen. Ved å se problemstillingen med hensyn til begge tilvirkningsmetodene vil det være lettere å oppdage problemer, fordeler eller ulemper med de forskjellige designene. Dette vil også gi en verdifull innsikt i komponenten når man skal vurdere fordelingen mellom subtraktiv og additiv tilvirkning.

Disse to løsningene utvikles side om side til man har den generelle geometrien på plass, og man har et godt nok grunnlag til å ta en endelig avgjørelse om hvilken løsning som er den beste for den gitte komponenten. Denne avgjørelsen tas på bakgrunn av simuleringer, kostanalyse og eventuelt prototyper dersom det er nødvendig.

Ulempen med denne framgangsmåten er at den medfører en økt utviklingskostnad siden to design utvikles i stedet for ett. Behovet for å gjøre det på denne måten vil variere fra tilfelle til tilfelle. Den vil være mest lønnsom i de tilfellene hvor det skal være en fordeling mellom additiv og subtraktiv tilvirkning, og bør i alle tilfeller kun benyttes fram til arbeidet med omfattende analyser og detaljdesign begynner.

6.3 Designmetodikk for HT



Figur 43: Prosess for utvikling av HT-design

I steget for utvikling av HT-design inngår en designmetodikk for HT. Prosessen i bildet over er den prosessen jeg har kommet fram til som har vært mest effektiv til å finne HT-design. Essensen av denne prosessen er å følge regelen "bruk materiale kun der det er nødvendig" og "kun bruk additiv tilvirkning der det er nødvendig" som står som en veiledende framgangsmetode i konklusjonen av min prosjektoppgave. Denne veiledende regelen trenger dog en struktur for å kunne benyttes som en metode for utvikling. I de fire stegene i prosessen over inngår noen forskjellige oppgaver:

6.3.1 Hvor er det nødvendig med materiale?

Dette steget handler om å forstå hvordan kreftene i komponenten vil virke. Dersom det eksisterer et grensesnitt blir oppgaven å finne den mest effektive måten å ta opp disse kreftene på. Dersom det ikke eksisterer et grensesnitt innebærer dette steget også å finne den best egnede løsningen. I det tilfellet bør det også fokuseres på ytelsen til den/de nærliggende komponentene. Resultatet av dette steget er en generell geometri skreddersydd for lastsituasjon, grensesnitt og nærliggende komponenter.

6.3.2 Reduser generell geometri til krav

Når den generelle geometrien er på plass er oppgaven å dimensjonere denne slik at den tilfredsstillir sikkerhetsmarginer osv. Dette innebærer å finne geometrier som både effektivt tar opp lastene og tilfredsstillir regelen om minimum 45 graders helning for å unngå støttestruktur¹.

6.3.3 Utbedre lokale problemer

Når man lager den generelle geometrien vil det oppstå geometrier som virker som spenningskonsentrasjoner, slik som vist i eksempelet i Figur 45. I andre tilfeller kan det være ønskelig å installere en sensor på produktet, slik som i caset ifra Plasto, som gir krav til lokale områder av komponenten.

6.3.4 Detaljdesign

Endringer i forskjellige små områder kan ha en effekt på det generelle spenningsbildet. Som følger av det kan det oppstå behov for justeringer av den generelle geometrien.

6.3.5 Vurdering

Mellom hvert steg vil en vurdering gjøres, eksempelvis i form av analyser som i eksempelet i Figur 45. Hver fase itereres til det ønskede resultatet er oppnådd. Resultater i senere faser kan også gjøre det nødvendig å gå tilbake til tidligere steg, selv om det ikke framgår av Figur 43.

6.4 Eksempel på bruk av designmetodikk for HT

6.4.1 Eksempel: Utvikling av brakett

Brakett-eksempelet i avsnitt 5.2.3.1 ble utviklet gjennom bruk av denne metodikken. Figur 45 viser hvordan utviklingen av denne har vært gjennom de fire stegene. Vurderingen i dette tilfellet har bestått av FEM-analyser og vektanalyser for å vurdere om designene ga godt nok vekt/styre-forhold.

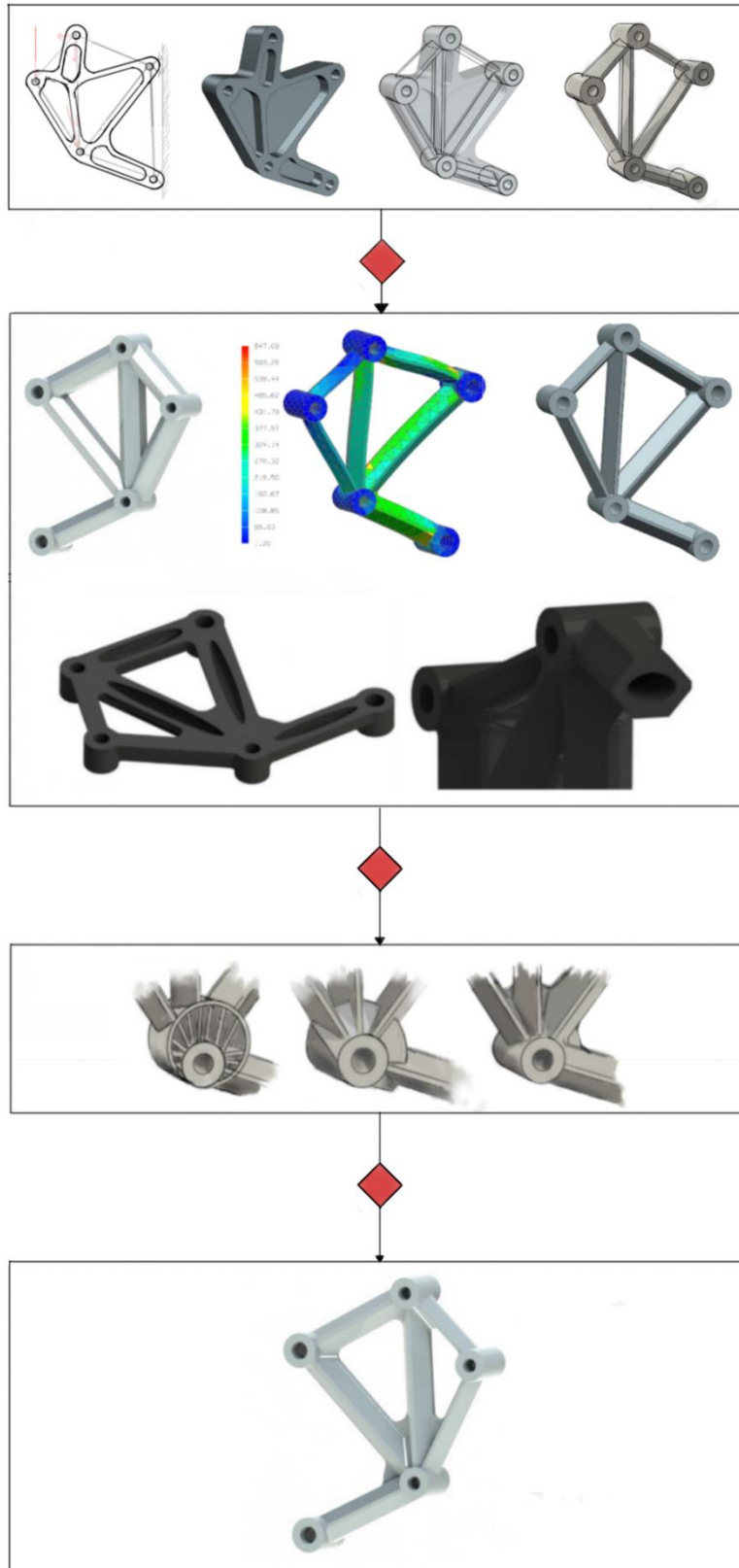
I steg en ble den generelle geometrien funnet ved å betrakte det eksisterende grensesnittet som om punktene var forbundet av et fagverk. Det er en kjent og beviselig effektiv måte å lage en stiv struktur på. Ved å sammenligne med den konvensjonelle løsningen ser vi at det er vanskelig å finne en løsning som fordeler mellom subtraktiv og additiv tilvirkning.



Figur 44: Alternativ brakett med fordeling mellom subtraktiv og additiv tilvirkning

Dette er én løsning hvor man kan ha en fordeling mellom subtraktiv og additiv tilvirkning, hvor den sorte delen i Figur 44 er den eksisterende subtraktive delen og de røde delene er de som tilvirkes additivt. Ulempen ved en slik løsning er at denne krever en jig for opplagring av den subtraktive delen og at den additive prosessen må foregå i to steg i og med at komponenten må snus for å legge til materiale på den andre siden. I tillegg må den subtraktive delen dimensjoneres slik at den ikke vrir seg som følge av den additive prosessen. Med andre ord kan en slik framgangsmåte kreve at delen er bedre dimensjonert enn nødvendig/dårligere designet, som igjen resulterer i et dårligere vekt/styrke-forhold.

I steg to reduseres geometrien, først den yre og så den indre. Når geometrien er redusert slik at den generelt tilfredsstillere kravene utbedres spenningskonsentrasjoner i kuntepunktener i steg tre. I steg fire finjusteres den endelige geometrien slik at best mulig vekt/styrke-forhold for denne løsningen kan oppnås.



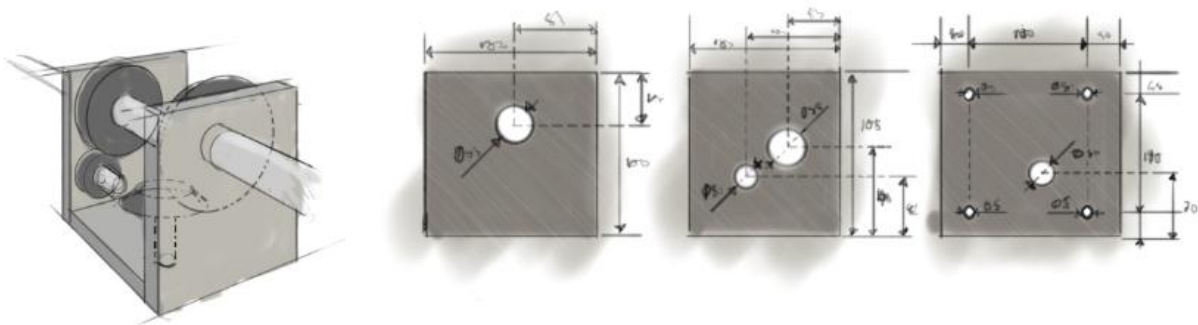
Figur 45: Utvikling av brakett, steg 1 til 4 av designmetodikk for HT

6.4.2 Eksempel: Utvikling del til girkasse av titan

I dette eksempelet har jeg sett på en litt mer avansert design. Denne gangen er fokuset på steg en og to og resultatet av tre forskjellige framgangsmåter. Eksempelet vil vise at disse framgangsmåtene gir svært forskjellige design med forskjellig produksjonstid og -kostnad gitt samme lastbetingelser.

Komponenten som skal lages i dette eksempelet er en komponent til en girkasse med lav vekt. For denne oppgaven er hvordan komponenten utvikles viktigere enn ytelsen av det endelige resultatet. Derfor har jeg gjort en antagelse om at konseptutviklingen har vist at løsningen skissert i Figur 46 er den beste løsningen.

6.4.2.1 Steg én; hvor er det nødvendig med materiale?



Figur 46: Skissert løsning for komponent og eksisterende grensesnitt og begrensninger

Fra konseptutviklingen kommer en grunnleggende idé om hvordan denne løsningen skal se ut, dimensjonerende lastbetingelser, begrensninger for komponentens ytre mål samt et fast grensesnitt som må følges for at girkassen skal fungere med de tilhørende komponentene. På grunn av dens geometri har konstruktøren gjort en antakelse om at den pulverbedmaskin vil være den best egnede maskinen for HT av denne komponenten. Det er imidlertid flere måter å lage denne komponenten ved hjelp av HT. På de neste sidene presenteres resultatet av tre forskjellige løsninger.



Additiv løsning



Sammensatt løsning



Hybrid løsning

Figur 47: Tre alternative løsninger for brakett til girboks

6.4.2.1.1 Additiv løsning



Figur 48: Modell av den additive løsningen ved slutten av steg 2

Av de tre gir denne løsningen det beste vekt/styrke-forholdet ved de gitte lastbetingelsene. Med de laveste utbøyningene, minste spenningene og den laveste vekten ser det ut til at dette er løsningen med best ytelse. Som ved utviklingen av braketten i eksempelet i kapittel 6 ble denne laget med tanke på å kun benytte materiale der det er nødvendig.

Dette designet er mest krevende med tanke på ettermaskinering. Dermed har denne komponenten den lengste produksjonstiden. I tillegg bryter denne løsningen med regelen om 45-graders helning, og mye støttemateriale må lages i tilvirkningsprosessen for at denne løsningen skal kunne lages. Dette gir en større grad av materialsvinn.

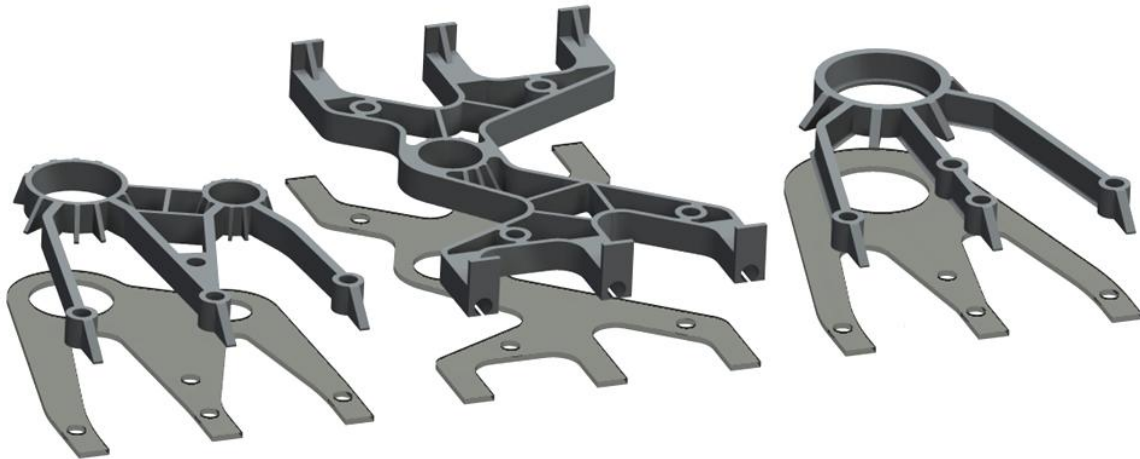
6.4.2.1.2 Sammensatt løsning



Figur 49: Modell av den sammensatte løsningen ved slutten av steg 2

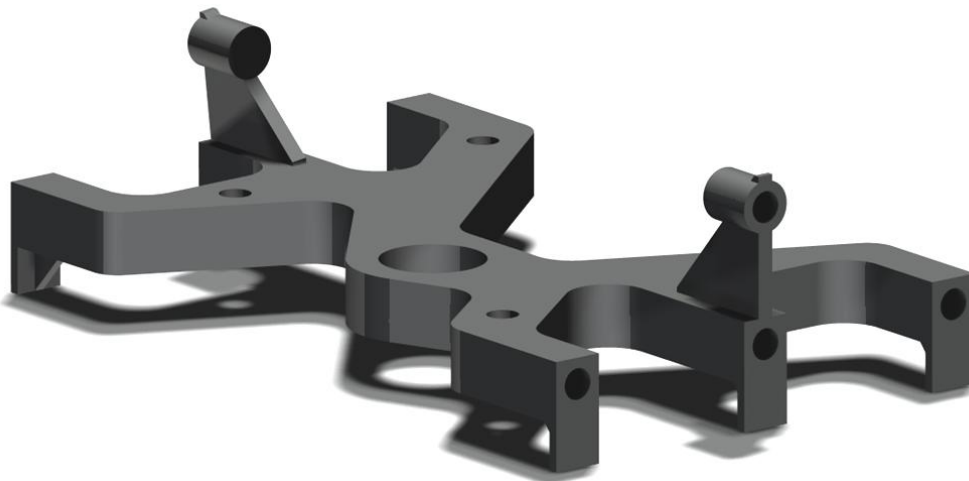
Den sammensatte løsningen er den løsningen som har den laveste byggehøyden. Dette medfører at det benyttes et større areal å spre komponentene utover slik at færre enheter kan produseres samtidig, men man kompenserer for dette med lavere produksjonstid.

Dette designet gjør det mulig å redusere volumet av det som skal bygges additivt ved å bygge videre på eksisterende geometrier tilvirket ved konvensjonelle metoder. Bildet på neste side viser en mulig fordeling mellom additiv og subtraktiv tilvirkning. Til disse "grunnplatene" kan en så enkel geometri velges at ingen eller svært liten grad av sponavvirkende prosesser er nødvendige. En viss tykkelse på grunnplatene er nødvendig for at platene ikke skal vri seg som følge av den additive prosessen, og det kan hende at denne tykkelsen er større enn det som er nødvendig for designet av den endelige komponenten som dermed blir overdimensjonert. Alternativt kan delene lages individuelt, eksempelvis én kun ved subtraktiv tilvirkning, én ved HT og én ved kun additiv tilvirkning.



Figur 50: Eksplovert modell av den sammensatte løsningen

Denne løsningen lages i tre deler for å redusere byggehøyden slik at byggetiden reduseres. Dette medfører at de må designes slik at de kan sammenstilles i etterkant, enten ved en lime-, sveise eller skrueforbindelse. Denne løsningen benytter en skrueforbindelse. Dette gjør at denne løsningen blir den tyngste av de tre, så vel som den mest plasskrevende.



Figur 51: Modell av bunnen av den sammensatte løsningen

For at denne løsningen skal tilfredsstillе kravene gitt av lastsituasjonen må skrueforbindelsen ha hjelp av skråstag. Disse stagen kan evt. sveises på i etterkant eller de kan tilvirkes additivt.

I denne løsningen har jeg antatt at lastsituasjonen krever at det finnes skråstag i begge retninger. Som i brakett eksempelet (Figur 44) belyser dette en problemstilling; dersom materiale skal tilvirkes additivt på begge sider av en eksisterende geometri må nødvendigvis komponenten snus ved et eller annet tidspunkt i prosessen. I dette tilfellet for en pulverbedmaskin blir benyttet for den additive tilvirkningen medfører dette utvidet produksjonstid som følger av oppvarming og avkjøling av maskinen i tillegg til håndtering av komponenten.

6.4.2.1.3 Hybrid løsning



Figur 52: Modell av den hybride løsningen ved slutten av steg 2

Den siste løsningen er et kompromiss av de to andre løsningene. Vekten er redusert i forhold til den sammensatte løsningen og volumet som skal tilvirkes additivt reduseres i forhold til den additive modellen. Det vil i mange tilfeller være slik at en del av komponenten er godt egnet til å tilvirkes ved konvensjonelle metoder.

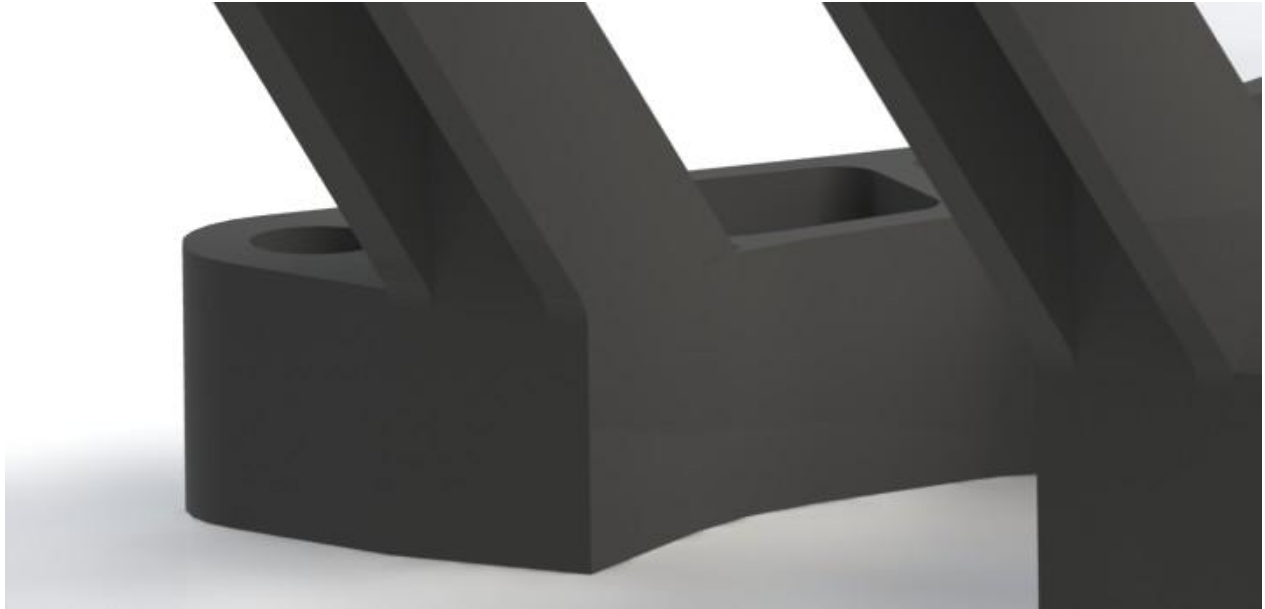


Figur 53: Bunnplate, subtraktiv av den hybride modellen

I dette tilfellet har "bunnplaten" en geometri som er tilpasset for dette. Ut fra områdene merket i rødt vil materiale legges til additivt.

Denne løsningen gir en design hvor det er enkelt å få det beste ut av hver tilvirkningsmetode. I dette tilfellet kan det tenkes at en umaskinert men trå-erodert bunnplate settes inn i en jig i en pulverbedmaskin, og den additive delen tilvirkes. Etterpå kan hele komponenten maskineres, slik at den ferdige komponenten kan lages minimal håndtering.

6.4.2.2 Steg 2; reduser generell geometri til krav



Figur 54: Redusert geometri av hybrid løsning

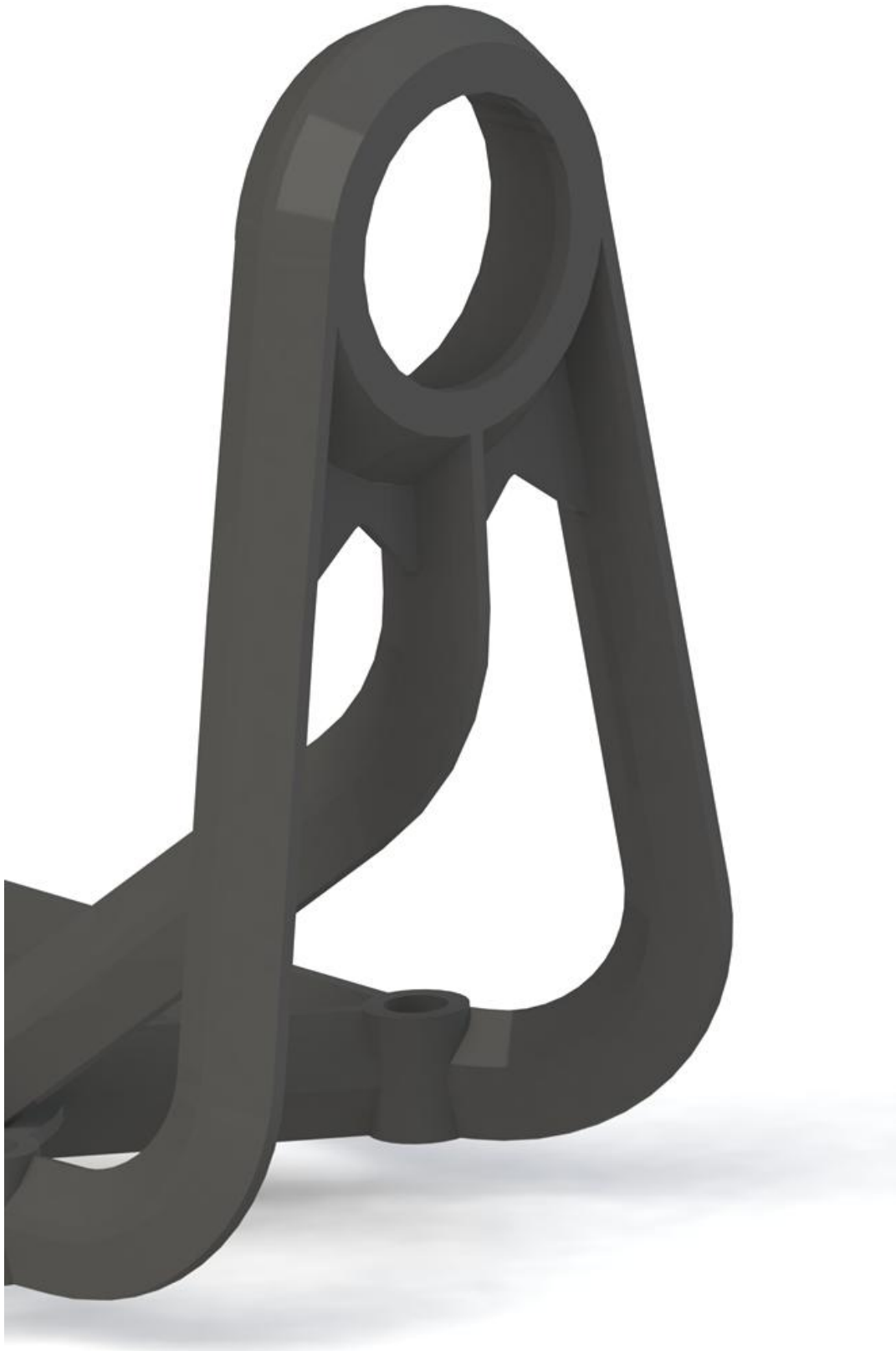


Figur 55: Hybrid løsning tilpasset til regel om minimum 45-graders helning

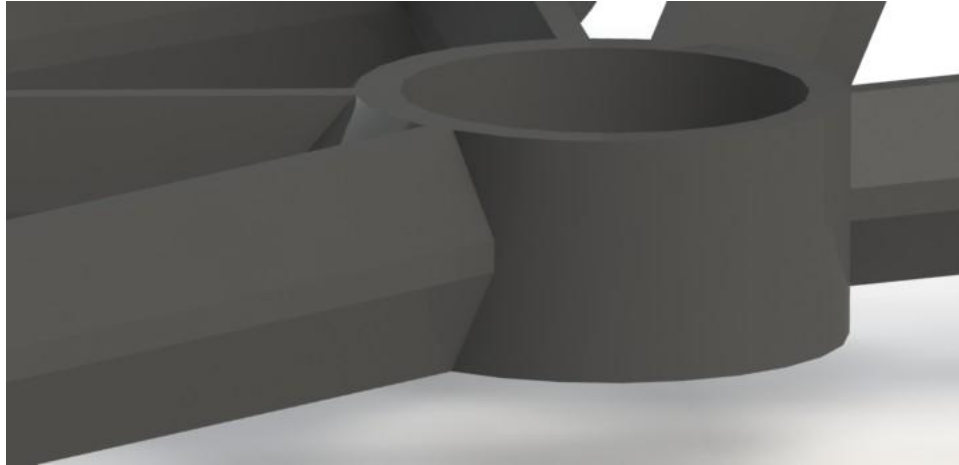
Figur 54 og Figur 55 viser hvordan geometrien til den hybride løsningen har blitt redusert for å skape et godt styrke/vekt-forhold. I tillegg er helninger og radier valgt slik at støttemateriale ikke er nødvendig og dermed er materialforbruket minst mulig. I de tilfellene hvor overflaten uansett må ettermaskineres og materialsvinn er en neglisjerbar kostnad i forhold til produksjonsvolum og levetid kan man se bort ifra 45-gradersregelen. Den regelen er viktigst i de tilfellene maskinering ikke mulig, som ved indre kjølekanaler i støpeverktøy eller ved overflaten på en hoftededdsprotese hvor overflaten er bygget additivt for bedre beninnvekt¹.



Figur 56: Redusert additiv del av hybrid løsning



Figur 57: Additiv løsning endret tilpasset til minimum 45 graders regel



Figur 58: Overflate av additiv løsning

Figur 56 viser at den additive delen av denne løsningen har plane overflater og lommer i stedet for en kurvet overflate og indre kaviteter. Fordelen med det er alle overflatene av denne modellen er lette å ettermaskinere. En alternativ løsning med en hul og sirkulær additiv del kan gi et bedre styrke/vektforhold, men en slik løsning hadde fått en høyere kostnad og lengre produksjonstid. I tillegg ville den indre ubehandlede overflaten skape sprekke-dannelser under visse lasttilfeller.

Figur 58 viser en overflate av den additive løsningen som vil være vanskelig i ettermaskinere. Dette er også et knutepunkt som må analyseres i steg tre i denne metodikken. Det vil ofte oppstå store spenninger i slike knutepunkt, og maskinering av overflaten vil derfor være viktig. En bør derfor velge en geometri som er enkelt å ettermaskinere.

6.4.3 Konklusjon

Versjon	Additiv	Sammensatt	Hybrid
Produksjonskostnad	n/a	16400 kr	11400 kr
Produksjonstid	n/a	11 timer	15 timer
Volum totalt	1123483 mm ³	1459782 mm ³	1132188 mm ³
Volum additivt	1123483 mm ³	943004 mm ³	596644 mm ³
Volum subtraktivt	0 mm ³	516778 mm ³	535544 mm ³
Areal additiv overflate	260134 mm ²	312348 mm ²	212579 mm ²

Produksjonstid og kostnad ble gitt at Concept Laser. Materialkostnader er medberegnet, utover dette kommer tid og kostnader ved ettermaskinering.

De tre delene av den sammensatte løsningen ble gitt en estimert produksjonstid på 3, 3 og 5 timer. Gitt at de blir produsert i én maskin vil jeg anta at den samlede produksjonstiden kan reduseres til 6-7 timer, basert på caset ifra min prosjektoppgave, hvor tilvirkning av 7 og 14 proteser tok henholdsvis 36 og 38 timer å produsere¹¹. Videre kan kostnaden reduseres, eksempelvis ved at bunnplaten (Figur 51) produseres ved konvensjonelle metoder.

Gitt at tre enheter av den hybride løsningen produseres samtidig i én maskin til produksjonstiden per enhet kunne reduseres noe. Jeg har dessverre ikke fått noen data på dette.

Jeg mottok ikke noen data på den additive modellen. Siden den har høyere byggehøyde enn den hybride løsningen kan vi trygt anta at produksjonstiden er mer en 15 timer. Siden volumet av det som skal tilvirkes additivt er større en de andre kan vi også trygt anta at dette vil være den dyreste løsningen.

Dette eksempelet viser at designet er avhengig av hvilke egenskaper som er mest prioritert. Dersom denne girkassen skulle benyttes i et fly i 20 år vil den additive løsningen være den mest interessante, ettersom den har det beste vekt/styrke-forholdet. Produksjonstiden vil uansett være svært liten sammenlignet med komponentens levetid i bruk, og produksjonskostnaden er neglisjerbar i forhold til innsparinger i redusert forbruk av drivstoff som følge av redusert vekt. Et godt eksempel på denne problemstillingen ble presentert i min prosjektoppgave¹²

Konstruktøren må altså vite hvilke egenskaper som er mest viktige, og hvordan fordelingen mellom subtraktive og additive prosesser påvirker disse egenskapene.

¹¹ Marius Einang, *Design for performance*, 2011, side 17, *Medisinske implantater*

¹² Marius Einang, *Design for performance*, 2011, side 13, *artikkel I The Sunday Times*

7 Kriterier for god HT-design

Hovedsakelig er hensikten med kriterier for god HT-design å finne ut hvordan man kan forbedre HT-løsninger. Særlig dersom man har liten erfaring med HT vil det være en stor fordel å kunne verifisere en design eller finne ut hvordan man kan forbedre designet slik at man utnytter teknologien best mulig. Disse kriteriene skal man altså bruke når man har et fungerende HT-design, så bruken av kriteriene passer godt inn en eller annen gang i fase tre, detalj utviklingsfasen, når HT-designene har tatt form. Kriteriene kan ikke fortelle noe om hvorvidt en HT-løsning er bedre enn en konvensjonell løsning på et gitt problem, men dersom man ikke klarer å innfri kriteriene er det nødvendigvis god grunn til å tro at HT er dårlig egnet.

Mål på kvalitet av design er et problematisk tema siden det styres av subjektive faktorer. Dette er heller et mål på hvordan en design tilfredsstillende en rekke krav som definerer den beste mulige utnyttelsen av teknologien.

En HT-komponent som tilfredsstillende kravene gitt i det neste avsnittet mener jeg vil gi den beste utnyttelsen av teknologien. Det går et skille mellom *pliktkriterier* og *ekstrakriterier*.

7.1 Pliktkriterier

Disse kriteriene er en fordel i alle tilfeller, derfor må disse innfris for at en HT-design skal gi god utnyttelse av teknologien. Pliktkriteriene er som følger:

- **Lite materialsvinn/reduert maskinering:** Den additive prosessen bør erstatte et behov for sponavvirkende prosesser ved konvensjonell tilvirkning. I tillegg kan man forsøke å unngå bruk av støttemateriale, særlig ved større produksjonsvolum for å redusere materialsvinn ytterligere
- **Enkel ettermaskinering:** De overflatene som må ettermaskineres bør være tilpasset ettermaskineringen slik at den totale produksjonstiden blir så lav som mulig.
- **Minimal bruk av additiv tilvirkning:** Så langt det lar seg gjøre bør fordelingen mellom subtraktiv og additiv tilvirkning velges slik at man kun benytter additiv tilvirkning der det er nødvendig. Dette må balanseres med at den subtraktive prosessen er så lav som mulig og at den additive prosessen gir en tilstrekkelig økning i ytelse.

Økt ytelse er også et pliktkriterium, men i stedet for å ha dette som et eget punkt er det slik at minst ett ekstrakriterium bør innfris. Det er hovedsakelig disse kriteriene som står for økningen i ytelse, uten at pliktegenskapene er innfridd er trolig løsningen lite kostnadseffektiv.

I noen tilfeller er ikke kostnadseffektivitet en prioritet. Innen medisin, forskning, formula 1, romfart osv er ytelse og skreddersøm de drivende kriteriene. Verktøykostnader kan også være et slikt tilfelle, hvor en stor engangsutgift vil gi større gevinst enn man kan spare på verktøykostnadene. Spesielle tilfeller som disse vil ikke nødvendigvis gi et godt samsvar med pliktkriteriene, men det er heller ikke de tilfellene disse kriteriene er ment til å brukes.

7.2 Ekstrakriterier

Minst ett av disse kriteriene bør altså innfris. Det er ikke alle tilfeller hvor disse egenskapene er nødvendige men de gir god utnyttelse av teknologien i de tilfellene det er nødvendig. Eksempelvis er det ikke alltid at lav vekt er en ettersøkt egenskap i en komponent. At bruk av HT gir lav vekt kan derfor ikke være et pliktkriterium siden man kan oppnå et godt HT-design uten at dette kriteriet innfris. De følgende har jeg satt som ekstrakriterier:

- **Skreddersøm:** Den additive prosessen gjør det mulig å skreddersy en standardisert komponent slik at produktet tilfredsstillende en bredere kundegruppe ved kun en lav kostnadsøkning.
- **Avansert geometri:** HT gjør avansert geometri (slik definert i avsnitt 5.2.1) tilgjengelig og dermed gir stor økning i ytelse eller muliggjør tidligere umulige eller upraktiske løsninger.
- **Lav vekt:** HT gjør det mulig å redusere vekten av en komponent betraktelig.
- **Forenkler sammenstilling:** En komponent som ved konvensjonell tilvirkning er vanskelig å installere, eller en komponent som tidligere har bestått av et antall komponenter har blitt forenklet slik at sammenstilling er enklere.
- **Økt styrke:** HT gjør det mulig å øke styrken til en komponent eller gjør det mulig å benytte en løsning som ellers er for svak eller er upraktisk å tilvirke på konvensjonelle metoder

Jeg har nevnt noen, men mest sannsynlig finnes flere ekstrakriterier som gir en god utnyttelse av HT.

7.3 Bruk av kriteriene

Ved å vurdere i hvilken grad pliktkriteriene innfris samt hvordan eventuelle ekstrakriterier innfris får konstruktøren et godt bilde av hvor god en HT-design er, evt hvor den bør forbedres. Dersom man vurderer prosentvis hvordan de enkelte kriteriene innfris kan et nedre gjennomsnitt av prosentene stå som en grense for når et design er godt nok. Dersom man har flere enn ett ekstrakriterium kompenserer det for manglende pliktkriterium.

Kriteriene bør også vektas i forhold til hvor viktige de er for utnyttelsen av teknologien. Det mangler dessverre nok empirisk erfaring for at jeg kan forslå vekttall i denne oppgaven.

7.3.1 Feilkilde: menneskelig svikt

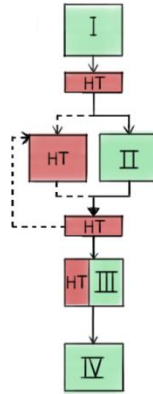
Selv om disse kriteriene i stor grad er objektive er vurderingen av hvor godt de innfridd gjort av konstruktøren. Dermed kan det hende at man får et falskt resultat.

Vekttallene kan setter også av et menneske, og nøyaktigheten av dette tallet er vanskelig å anslå. Dessuten kan viktigheten av kriteriene variere noe ifra tilfelle til tilfelle slik at et satt vekttall ikke alltid vil stemme. Utvikling av teknologien over tid kan også medføre at viktigheten av enkelte kriterier endrer seg. Derfor kan det hende at vekttallene må justeres periodevis.

En feilmargin på resultatet av disse kriteriene må settes før de kan benyttes.

8 Konklusjon

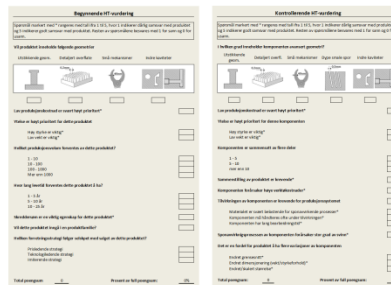
8.1 Strukturen av den integrerte HT-vurderingen



Figur 25: Valgt struktur for kombinert HT-vurdering og generell utviklingsmetodikk

Konklusjonen av del én av denne oppgaven var at HT-vurderingen bør inngå som en parallell del av konseptutviklingen, som en integrert del av detaljdesignfasen og som et eget steg i form av to sjekklister. På denne måten vil integreringen av HT-vurderingen skje på en naturlig måte som gir ekstra fokus på HT i konseptutviklingen og som forsikrer at HT-komponenter vil virke godt med resten av produktet gjennom tett samarbeid i detaljutførelsesfasen. En generell firefases modell er valgt som mal for integreringen, slik at HT-vurderingen kan kombineres med de fleste andre utviklingsmetodikker.

8.2 Sjekklistene



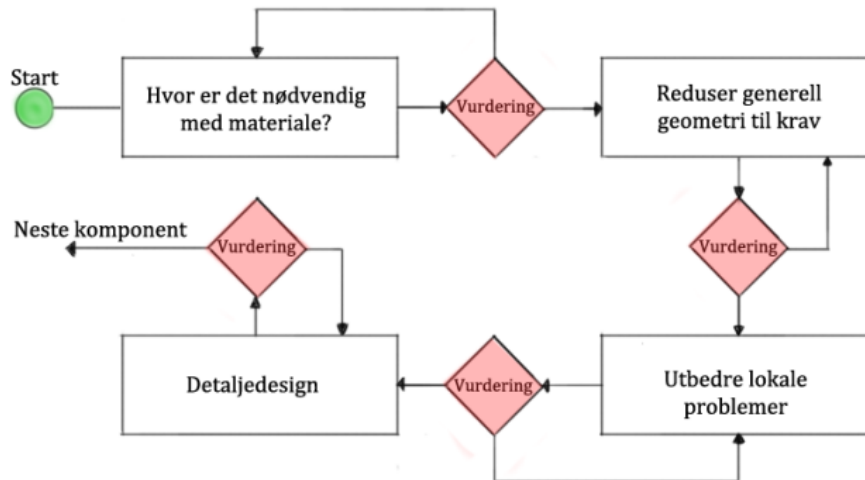
Figur 59: Miniatur av sjekklistene (Figur 27Feil! Fant ikke referanseikiden. og Figur 32)

Ved å undersøke primæregenskaper ved produktet og dets komponenter benyttes sjekklister for å vurdere om produktet sammenfaller med de sterke sidene ved HT. Ved å benytte en sjekklister før konseptutviklingen har man mulighet til å finne et behov for HT tidlig i utviklingen. Sjekklister etter konseptutviklingen benyttes for å kontrollere om resultatet av konseptutviklingen ser ut til å gi god utnyttelse av HT. To sjekklister virker som kontrollpunkter etter første og andre fase. Resultatet av den første kan vise at HT ikke bør anvendes og utviklingen fortsetter som før. Den andre sjekklister kontrollerer om de valgene man har gjort i konseptutviklingen er riktige.

8.3 Morfologisk tabell med fokus på ytelse

Komponentene som best egner seg for HT avdekkes i første rekke gjennom bruk av en morfologisk tabell. Denne tabellen utvikles med fokus på løsninger med høy ytelse. Det vinnende konseptet vil inneholde en rekke løsninger, og de løsningene som krever HT har på denne måten blitt valgt ut som komponenter som egner seg for HT. Disse komponentene tas med i en parallell konseptutviklingsfase for HT-komponenter.

8.4 Designmetodikk for HT



Figur 43: Prosess for utvikling av HT-design

I konseptutviklingsfasen for HT-komponenter benyttes en designmetodikk for HT som baserer seg på tommelfingerreglene "Kun bruk materiale der det er nødvendig", "Kun bruk additivt der det er nødvendig" og regelen om minimum 45 graders helning for å unngå støttestruktur. I et intervju med dr. Ian Campbell ved Loughborough University i Storbritannia var han enig i at denne overordnede prosessen er en riktig framgangsmåte. Han er aktivt involvert i produktdesign og design for additiv tilvirkning og mente at den mest interessante delen av denne prosessen er i reduseringen av den generelle geometrien og i utbedring av spenningskonsentrasjoner i knutepunkter.

8.5 Kriterier for god HT-design

Kvaliteten av et utviklet HT-design kontrolleres og forbedres gjennom bruk av et sett med kriterier som må oppfylles for at designet vil gi god utnyttelse av teknologien. Plikt-kriteriene er generelle kriterier som er en fordel i alle tilfeller, og må innfris for å oppnå den beste utnyttelsen av teknologien. Ekstrakriteriene er de kriteriene som gir den økte ytelsen av produktet. Minst ett av disse kriteriene bør innfris for at utviklingen av teknologien skal være god.

8.6 Problemstillinger som har dukket opp underveis

I innledningen til kapittel 3 var en liste over noen spørsmål jeg hadde stilt meg i den tiden jeg har jobbet med denne oppgaven. Noen av disse har blitt besvart i andre deler av oppgaven, imens andre ikke har kommet med. Siden de ikke har passet inn noe annet sted vil jeg besvare dem her.

- *Hvor mye informasjon er nødvendig for å kunne gjøre HT-vurderingen?*

Indirekte har dette spørsmålet blitt besvart i oppgaven, men for ordens skyld besvarer jeg det direkte her. Det har vist seg at HT-vurderingen har mange paralleller med resten av utviklingen. Den endelige avgjørelsen kan ikke gjøres før man har et HT-design man kan gjøre en kost-nytte analyse på. Som med alle andre komponenter og løsninger må det vurderes om ytelsen den gir og dens kostnad samsvarer med produktkravene. Dette kan være ved utgangen av konseptutviklingen eller det kan være i detaljutfviklingsfasen. Dermed har jeg konkludert med at denne problemstillingen er irrelevant for HT-vurderingen.

- *Hvor mye arbeid inngår i re-design, fra en "konvensjonell design" til en "HT-design"?*

I utviklingen av designmetodikk for HT, kapittel 6.3 og gjennom genereringen av eksemplene med braketten (6.4.1) og komponenten til en girkasse i titan (0) oppdaget jeg at re-design av en eksisterende komponent var i stor grad likt som å designe en helt ny komponent. En fordel ved re-design var at man kunne se hvor den konvensjonelle løsningen hadde materiale som ikke var nødvendig, men utover det var det ingen nevneverdig forskjell.

I utgangspunktet hadde jeg forventet å finne en eksisterende metodikk for effektiv re-design som kunne benyttes i slike tilfeller. Jeg fant imidlertid ingen metodikker som passet denne problemstillingen, og mitt inntrykk er at en slik metode ikke er nødvendig.

- *Reduseres potensialet for ytelse ved re-design kontra et "rent" HT-design?*

Etter å ha studert denne problemstillingen en stund kom jeg fram til at det er problematisk hvordan man skal tolke spørsmålet. Ved å benytte HT for å forbedre på et eksisterende produkt er det mulig at den eksisterende løsningen og de eksisterende grensesnittene ikke er optimale for HT. På den måten kan man si at potensial er tapt. Alternativt kan man i tillegg endre på større deler av produktet slik at man får bedre utnyttelse av HT i de nye komponentene, men dette blir i større grad et nytt produkt ettersom større endringer blir gjort med det eksisterende produktet. Jeg konkluderte dermed med at denne problemstillingen ikke var noe jeg ønsket å utforske videre.

9 Videre arbeid

9.1 Testing av metodene

Metodene jeg har kommet fram til må testes, justeres, og verifiseres før de kan tas i bruk som hjelpemidler i et reelt utviklingsprosjekt. Sjekklistene og kriteriene for god HT-design inneholder en rekke vekttall og forskjellige poenger som må justeres slik at de gir så riktig indikasjon som mulig. En egnet framgangsmåte er å kalibrere tallene i sjekklistene og kriteriene mot case hvor resultatene er kjent. Med tiden vil kontinuerlig kalibrering med nye case etter hvert som man kan måle det faktiske resultatet av produktene kunne gi riktige vekttall og poengsummer til sjekklistene og kriteriene for god HT-design.

9.2 Flere punkter i sjekklistene

Dersom flere kundebehov kan kobles til de viktigste egenskapene ved HT bør disse formuleres til spørsmål i sjekklistene. Listene slik de er presentert i denne oppgaven er foreløpig korte, slik de bør være for at de skal kunne brukes effektivt, men de kan fortsatt utvides noe.

9.3 Metoder for generering av nye ideer

Det finnes mange metoder for å finne nye ideer og løsninger. I konseptutviklingen for HT-komponenter kan det være en fordel om det finnes en metode som er særlig godt egnet til å finne gode HT-løsninger. Min designmetodikk for HT er en framgangsmåte for utvikling av et godt HT-design, men den krever at man i utgangspunktet har fått en god indikasjon om at HT sannsynligvis vil lønne seg. En egen metode for å finne løsninger som krever HT/gir god utnyttelse av HT hadde derfor vært en fordel.

9.4 Metode for redusering av generell geometri

Som prof. Campbell sa i mitt intervju med ham er hvordan man skal redusere den generelle geometrien og hvordan man skal håndtere lokale problemer som skarpe hjørner hvor spenningskonsentrasjoner vil oppstå i en design to spesielt interessante problemstillinger.

En framtidig løsning på dette er om man gjennom *Knowledge Based Engineering* kan løse slike problemer ved at programvare itererer seg fram til den beste løsningen. Etter en samtale med prof. Ole Ivar Sivertsen har jeg lært at det eksisterer programvare som automatisk skalerer design etter geometriske krav og krav til styrke, og at det ikke er utenkelig at tilsvarende programvare for denne problemstillingen kan lages.

10 Figurliste

Figur 1: Miniatur av sjekklisterne (Figur 27 og Figur 32)	iv
Figur 2: Thumbnail of the checklists (Figur 27 and Figur 32)	vi
Figur 3: Konsept 1, 2 og 3 fra prosjektoppgaven <i>Design for Performance</i>	1
Figur 4: Michael Frenchs modell ⁴	2
Figur 5: Pahl & Beitz' modell	4
Figur 6: Ulrich & Eppingers modell	6
Figur 7: Nigel Cross' modell	8
Figur 8: M. J. Frenchs modell	9
Figur 9: Illustrerer en ukjent kobling mellom to utviklingsmetodikker	11
Figur 10: De fem stegene av fase 1, Ulrich & Eppingers modell	13
Figur 11: Eksempel på en " <i>target product specification</i> "-liste av Ulrich & Eppinger	15
Figur 12: Forskjellige team.organiseringer, av Ulrich & Eppinger	16
Figur 13: Graf av variasjonen av et produkts kostnad og lønnsomhet over tid, av Pahl & Beitz	17
Figur 14: Objectives tree for innsats I verktøy for sprøytstøping	18
Figur 15: Ulrich & Eppingers modell for konseptgenererings	20
Figur 16: Egen konseptutviklingsfase for HT-komponenter	21
Figur 17: Eksempel på morfologisk tabell	22
Figur 18: Konsept 3 ifra prosjektoppgaven <i>Design for Performance</i>	22
Figur 19: Diagram over forskjellige typer produkttester, av Ulrich og Eppinger	23
Figur 20: Kost-risk-diagram, av Ulrich & Eppinger	24
Figur 21: Eksempel på retningslinjer for god designkvalitet av Pahl & Beitz	25
Figur 22: Figur ifra kompendium i faget TMM4115, Produktmodellering	27
Figur 23: Variasjon av tilgjengelig informasjon gjennom fasene i et risiko-tid diagram	27
Figur 24: Tre elementære strukturer for HT-vurdering kombinert med generell utviklingsmetodikk	30
Figur 25: Valgt struktur for kombinert HT-vurdering og generell utviklingsmetodikk	33
Figur 26: Illustrasjon av en fusjonerende konseptutvikling	34
Figur 27: Sjekkliste før konseptutviklingen	37
Figur 28: Pseudokode av "Begynnende HT-vurdering"	38
Figur 29: Eksempel på bruk av den begynnende HT-vurderingen på et tilhengerfeste	39
Figur 30: Eksempel på bruk av den begynnende HT-vurderingen på en hoftelddsprotese	40
Figur 31: Eksempel på sjekklisterens virkemåte	41
Figur 32: Excel-regneark, sjekklister etter konseptutviklingen	42
Figur 33: Deksel og tilhørende innsats med " <i>conformal cooling</i> "	43
Figur 34: Illustrasjon av de avanserte geometriene	44
Figur 35: Forskjellige metoder for sammenstilling av to komponenter	45
Figur 36: Skissert stav-modell av det eksisterende grensesnittet og dimensjonerende lastsituasjon	46
Figur 37: Generell geometri av frest versjon videreutviklet til nytt HT-design	46
Figur 38: Analyse av de generelle geometriene	46
Figur 39: Indre kaviteter i HT-design	47

Figur 40: Skisserte løsninger på et kritisk knutepunkt.....	47
Figur 41: De ferdige brakettene; additiv versjon til venstre og frest versjon til høyre	48
Figur 45: Videreutvikling av konsept tre ifra prosjektoppgaven <i>Design for Performance</i>	49
Figur 46: Prosess for utvikling av HT-design	51
Figur 47: Alternativ brakett med fordeling mellom subtraktiv og additiv tilvirkning	52
Figur 48: Utvikling av brakett, steg 1 til 4 av designmetodikk for HT	53
Figur 49: Skissert løsning for komponent og eksisterende grensesnitt og begrensninger.....	54
Figur 50: Tre alternative løsninger for brakett til girboks.....	55
Figur 51: Modell av den additive løsningen ved slutten av steg 2.....	56
Figur 52: Modell av den sammensatte løsningen ved slutten av steg 2.....	56
Figur 53: Eksplodert modell av den sammensatte løsningen	57
Figur 54: Modell av bunnen av den sammensatte løsningen.....	57
Figur 55: Modell av den hybride løsningen ved slutten av steg 2	58
Figur 56: Bunnplate, subtraktiv av den hybride modellen	58
Figur 57: Redusert geometri av hybrid løsning.....	59
Figur 58: Hybrid løsning tilpasset til regel om minimum 45-graders helning.....	59
Figur 59: Redusert additiv del av hybrid løsning.....	60
Figur 60: Additiv løsning endret tilpasset til minimum 45 graders regel.....	61
Figur 61: Overflate av additiv løsning	62
Figur 62: Miniatyr av sjekklistene (Figur 27 og Figur 32)	66

11 Bilder:

Bilde 1: IKEA-drillen FIXA.....	13
Bilde 2: Hotebensimplantat	14
Bilde 3: Mopar ventildeksel	44
Bilde 4: Brakett for landingssystem i et fly	45

12 Referanseliste

1. Prosjektoppgave, *Design for Performance* (2011), Marius Einang
2. Karl T. Ulrich, Steven D. Epponger, *Product Design and Development*, 2008
3. G. Pahl, W. Beitz, *Design Engineering – A Systematic Approach*, 2. utgave, 1996
4. Michael J. French, *Conceptual Design for Engineers*, 1998
5. G. Pahl, W. Beitz, *Design Engineering – A Systematic Approach*, 2. utgave, 1996 side 138
6. Hans P. Hildre, Ola M. Mork, Vilmar Æsøy, *The Maritime Innovation Factory*, universitetet i Ålesund, 2011
7. David E. Alexander, Steven Vogel, *Natures Flyers*, JHU Press, 2004
8. William L- MacDonald, *The Pantheon: Design, Meaning and Progeny*, Cambridge, Harvard University Press, 1976
9. Siegfried Mayer, *Optimised mould temperature control procedure using DMLS*, White paper, EOS
10. Marius Einang, *Design for Performance* (2011), side 17, Medisinske implantater
11. Marius Einang, *Design for Performance* (2011), side 17, Medisinske implantater
12. Marius Einang, *Design for Performance* (2011), side 13, Artikkel i *The Sunday Times*

13 Vedlegg

1. Prosjektoppgave, *Design for Performance 2011*