

VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL

Ontwerpmethodologie

4WE, 4TT, 4LR, 2.2LR, 2.2WB, 3.2LR

Prof. S. Vanlanduit



Vrije Universiteit Brussel

Voorwoord

Ongeveer 30% van het Bruto Nationaal Product is afkomstig van de verkoop van producten die de laatste vijf jaren werden ontwikkeld en 90% van de producten die we zullen gebruiken binnen de 10 jaar bestaan nog niet [18]. Naast dit rechtstreekse economisch draagvlak biedt het product ontwerp door innovatie nog tal van andere toegevoegde waarden voor het socio-economisch klimaat in Vlaanderen. Bovendien is productontwikkeling een bedrijvigheid die zich manifesteert over verschillende sectoren en op verschillende schalen. Gezien de productie van producten meer en meer naar lage loonlanden verschuift wordt het behoudt van de belangrijke product kennis die het ontwerp inhoud steeds belangrijker. Deze decentralisatie en de bijhorende herverdeling van de rol van de verschillende teams (ontwerp en productie) zorgt ervoor dat de organisatie en communicatie van het ontwerp een zeer belangrijke taak binnen het ontwikkelingsproces wordt. Door de hogere eisen van de consumenten naar kwalitatieve maar goedkopere producten wordt het ontwikkelingsproces alsmaar complexer. Daarnaast komt nog de groeiende concurrentie (o.a. van China, Japan, Oost-Europa) die bovenop de kwaliteits- en prijsdruk ook een steeds kortere ontwerptijd nodig maakt. Voorgaande argumenten tonen de noodzaak van een methodologische aanpak van het ontwerpproces van een product - zoals in deze cursus beschreven wordt - aan. In het bijzonder zullen volgende vraagstellingen rond het ontwerpproces aan bod komen:

- Wat zijn de verschillende stadia van het ontwerpproces, en welke tools zijn er voorhanden om de resultaten in de verschillende stadia in kaart te brengen?
- Hoe kunnen de ontwerp projecten op een efficiënte manier gepland worden (opvolging van de taken, deadlines, allocatie van resources)?
- Wanneer zijn de ontwerp inspanningen rendabel? Hoe bereken ik de kost van een product?

- Welke doelgerichte strategieën kunnen aangewend worden om bepaalde doelstellingen te realiseren (vb. milieuvriendelijk ontwerp)?
- Wat zijn de mogelijkheden en beperkingen van computer ondersteuning bij het ontwerpen.

Deel 1 in de cursus handelt over de organisatie van het ontwerpproces en is voornamelijk gebaseerd op de referentiewerken [16, 13] (de economische aspecten komen aan bod in [3]). De informatie rond Deel 2 - doelgericht ontwerp aspecten - is overgenomen uit [12]. Voor de materie met betrekking tot Deel 3 - computerondersteund ontwerpen werden de werken [5, 4] en de handleiding van het SolidWorks software pakket gebruikt.

Lijst met afkortingen

ANOM: Analysis of means

ANOVA: Analysis of variance

AOA: Activity on Arrow

AON: Activity on Node

BE: Break-even

BCG: Boston Consultancy Group

BOM: Bill of Materials

CAD: Computer Aided Design

CPM: Critical Path Method

CRF: Capital Recovery Factor

DCF: Discounted Cash Flow

DFA: Design For Assembly

DFM: Design For Manufacturability

DFU: Design For Use

DIN: Deutsche Industrie Norm

DOE: Design Of Experiments

DSA: Design Sensitivity Analysis

ECO: Engineering Change Orders

EV: Earned Value

- FDM:** Fused Deposition Modelling
- FORM:** First Order Reliability Method
- GPS:** Geometrische productspecificatie
- IRR:** Internal Rate of Return
- LiDS:** Lifecycle Design Strategy
- LOM:** Laminated Object Manufacturing
- MPO:** Milieugerichte Productontwikkeling
- MPS:** Materiële productspecificatie
- PDF:** Probability density function
- PDM:** Product Data Management
- PERT:** Project Evaluation and Review Technique
- PO:** Productontwikkeling
- QFD:** Quality Function Deployment
- QLF:** Quality Loss Function
- RAM:** Responsibility Assignment Matrix
- RSM:** Response Surface Methodologie
- SFF:** Sink Fund Factor
- SLA:** Stereolithografie
- SLS:** Selective Laser Sintering
- SNR:** Signal-to-noise ratio
- SPS:** Structurele productspecificatie
- TM:** Transformation Method
- VA:** Value Analysis, Value Engineering
- WA:** Waarde Analyse
- WBS:** Work Breakdown Structure Template

Deel I

Organisatie van het mechanische ontwerp proces

Hoofdstuk 1

Algemeenheden omtrent het ontwerpproces

1.1 Inleiding

Ontwerpen is het *aangeven van de beste oplossingen om aan een behoefte te voldoen met behulp van beschikbare middelen en met inachtneming van maatstaven van natuurkundige en maatschappelijke aard.*

De term 'behoefte' in deze definitie geeft aan dat het onderzoek van de klanteneisen een belangrijk deel van het ontwerp vormen (deze worden opgesteld in de zogenaamde *specificatie fase* zoals verder besproken wordt). Verder dient het ontwerp uitgevoerd te worden met 'beschikbare middelen' (financiële, materiële en menselijke). De allocatie van deze middelen is het onderwerp van de *project planning fase*. Het doel van een ontwerpproject bestaat niet uit het rechtlijnig uitwerken van één oplossing voor een ontwerp-probleem maar het genereren van verschillende mogelijke 'oplossingen' (ofwel concepten) waarvan er enkele weerhouden zullen worden voor de uitwerking van de vormgeving in het gedetailleerd ontwerp.

Ontwerpproblemen zijn in het algemeen zeer vaag geformuleerd (bv. 'ontwerp een manier om twee platen bij elkaar te houden' i.p.v. 'bereken de dikte van een bout die twee platen bij elkaar houdt die belast worden met een kracht van 100N'). Dit impliceert dat er veel mogelijke oplossingen zijn voor het ontwerpprobleem en dat meestal nog extra informatie moet verworven worden (bv. moeten de platen gedemonteerd kunnen worden, wat zijn de omgevingstemperaturen, etc.). Het verwerven en organiseren van deze informatie is een zeer belangrijke taak tijdens het ontwerp en zal in verschillende hoofdstukken in deze cursus behandeld worden. Bovendien heeft het ontwerpprobleem geen unieke optimale oplossing maar talrijke bevredigende

oplossingen (naargelang kost, ergonomie, kwaliteit of een combinatie hiervan als maatstaf wordt gebruikt).

Deze cursus handelt niet over het ontwerp van een welbepaald type product maar introduceert algemene concepten die toepasbaar zijn in het ontwerp van elk mechanisch (of elektronisch) onderdeel of systeem van onderdelen.

Waarom deze abstractere aanpak? Door een aantal strategische doelstellingen wordt de nood aan een systematische ontwerpaanpak groter:

- De groeiende complexiteit van mechanische ontwerpen die leidt tot de nood aan een overkoepelende structuur (o.a. integratie elektronisch, mechanisch, thermisch ontwerp).
- De hoge druk van de markt naar snellere product ontwerpen (gereduceerde 'time-to-market')
- De concurrentie in de markt brengt een vraag met zich mee naar lagere prijzen, hogere kwaliteit (vb. minituarisatie van electronica, ergonomie, etc.). Dit kan alleen gegarandeerd worden door een efficiënte en gestructureerde ontwerpstrategie.

In dit hoofdstuk worden enkele algemene basiskenmerken van het ontwerpproces geïntroduceerd. Deze zijn toepasbaar zowel voor elektrische, bouwkundige, mechanische, scheikundige of software productontwerpen.

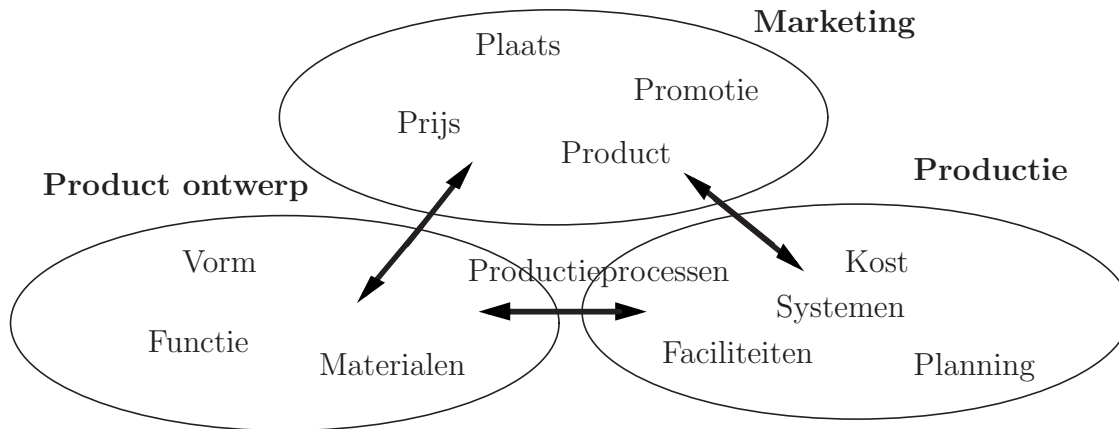
1.2 Variabelen in het ontwerpproces

De belangrijkste variabelen van het ontwerpproces zijn weergegeven in Figuur 1.1. Deze factoren – die behoren tot de drie categorieën ontwerp, productie en marketing – zijn echter zeer sterk gerelateerd tot elkaar. Enkele voorbeelden :

- Promotie vs. vorm : de vorm (en ook de functie) van het product speelt een belangrijke rol in de marketing.
- Prijs vs. materialen.
- Planning vs. plaats.
- Etc.

Om de efficiëntie van het productontwikkelingsproces te toetsen worden meestal de onderstaande drie maatstaven gebruikt :

- Kost



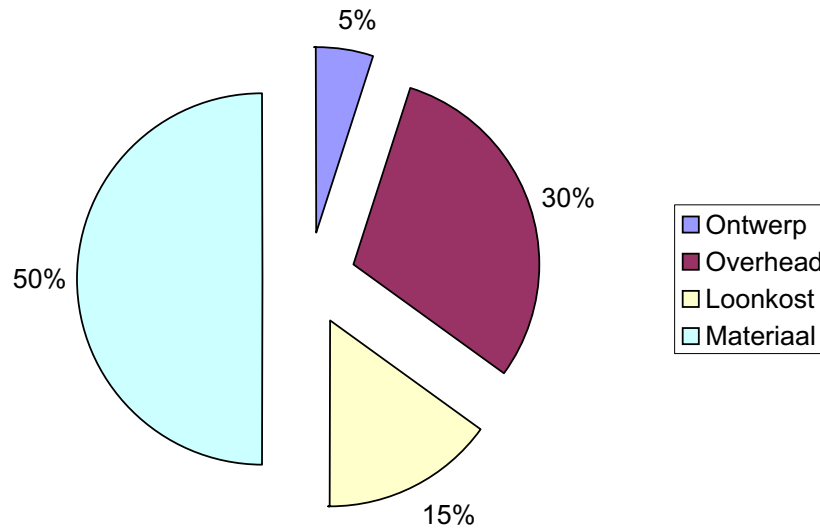
Figuur 1.1: Factoren in het ontwerpproces

- Kwaliteit
- Time-to-market

Hoewel de kost van een product een belangrijke parameter is in het ontwerpproces, is de eigenlijke ontwerp-kost slechts marginaal in de totale ontwikkelingskost van een product (zie het voorbeeld van Ford in Figuur 1.2). Daarentegen is het effect op de kwaliteit van het product zeer groot (in het voorbeeld in Figuur 1.3 kunnen productkost verschillen – te wijten aan de efficiëntie van het ontwerp – tot 50% waargenomen worden).

Dit betekent dat de beslissingen genomen tijdens het ontwerpproces weinig kosten maar veel invloed hebben op de kost van het product. De kost van het product wordt bovendien reeds zeer vroeg in de ontwerpfase vastgelegd, daar waar de eigenlijke gependeerde kost slechts later in het ontwikkelingsstadium in belangrijke mate toeneemt (zie Figuur 1.4). Hierbij stuit met op een paradox : in het begin van het ontwerpproces is de ontwerpvrijheid nog groot (en kunnen de meest kost effectieve oplossingen gekozen worden) maar tegelijkertijd is de kennis omtrent het ontwerpprobleem nog klein. In een later stadium neemt de kennis toe maar wordt de vrijheid beperkt door de kosten die wijzigingen dan met zich mee brengen.

Het ontwerpproces heeft een zeer grote invloed op de product kwaliteit, zowel vanuit het perspectief van (a) de consument (functie, duurzaamheid, gebruikersgemak, onderhoud) als, (b) de producent (uitvalwaarschijnlijkheid in productie en tijdens inspectie bij verdelers).

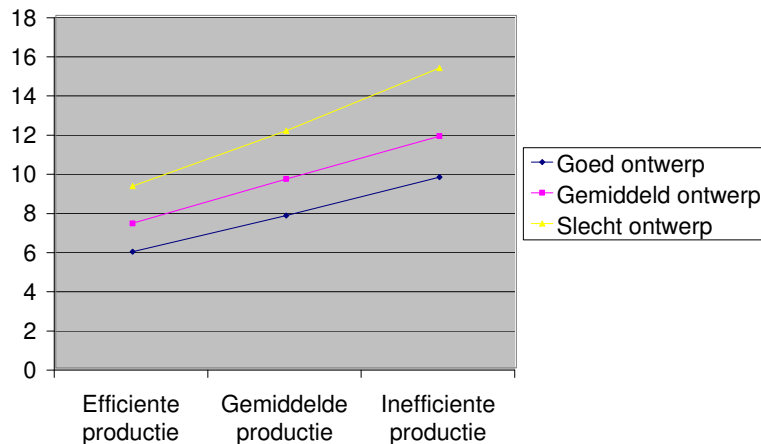


Figuur 1.2: Voorbeeld van de verdeling van de ontwerpbeurt bij Ford Motor Company.

Om concurrentieel te blijven moeten ondernemingen constant inspanningen leveren om hun producten op de markt te brengen na een zo kort mogelijk ontwikkelingsproces (dit noemt men de *time-to-market*). Dit kan op verschillende manieren gerealiseerd worden :

- Allocatie van (human) resources (vooral tijdens het begin van het ontwerpproces).
- Gestructureerde omgeving (organisatie, management).
- Gebruik van state-of-the-art ontwerp tools (CAE, virtual prototyping, etc.).

Het gebruik van een gereduceerd aantal veranderingen (alternatieven) van het ontwerp (of alternatieve concepten) kan – hoewel in eerste instantie een reductie van de *time-to-market* gerealiseerd wordt – zeer nadelig zijn voor het resultaat van het ontwerp (de *trouble-shooting* nodig bij problemen in een later stadium van het ontwerp impliceert een grote kost en tijd).



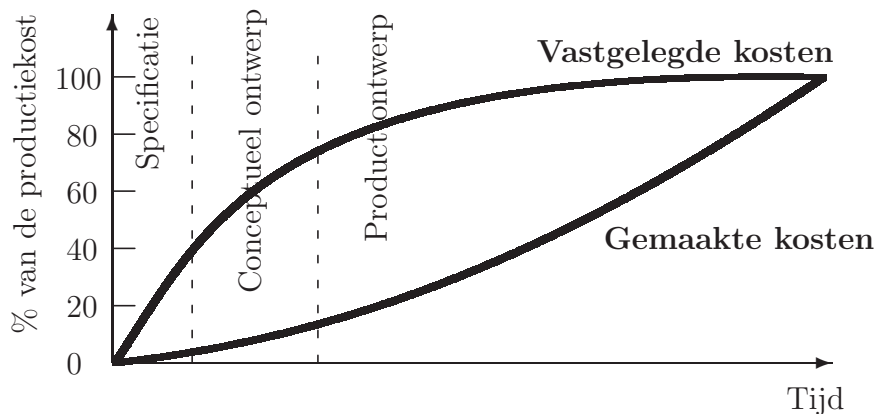
Figuur 1.3: Impact van de productie en het ontwerp op de kost voor koffiezetapparaten (uit [17]).

1.3 Concurrent engineering

In de huidige almaar verder globaliserende markt komen steeds de volgende drie strategische doelstellingen naar voren:

- Verkorting van de doorlooptijd van het ontwerpproces. Nieuwe producten moeten sneller naar de markt. Een product dat te laat op de markt komt, zal zowel minder marktaandeel verkrijgen als een slechtere winstmarge bezitten.
- De kwaliteit leveren die de markt vraagt. Het gaat daarbij tegenwoordig om meer dan het voldoen aan esthetische, functionele en onderhoudseisen, het gaat bijvoorbeeld ook om eisen voor afbreekbaarheid en recycling.
- De integrale kosten van het product moeten omlaag. De kosten moeten niet zo maar omlaag. De kosten moeten drastisch omlaag. Ordes in de grootte van 30% komen veelvuldig voor. Het Lopez-effect breidt zich uit tot andere branches dan de automobiellindustrie, bijvoorbeeld vliegtuig-, scheeps-, plant- en utiliteitsbouw. (Lopez was degene die namens Volkswagen tegen de toeleveranciers zei dat ze alleen nog mochten leveren tegen een 30% lagere prijs.)

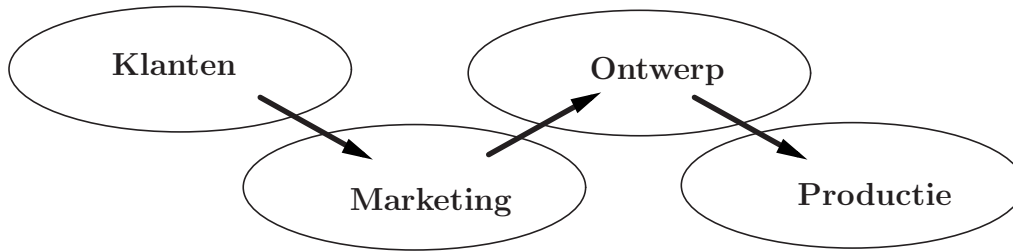
Uit deze eisen vloeit een aantal uitdagingen binnen een ontwerpproces voort, die van grote invloed zijn op de strategische doelstellingen. De meest voorkomende zijn de volgende:



Figuur 1.4: Vastgelegde productiekost tijdens de verschillende stappen in het ontwerp.

- Informatie die juist, volledig en maar voor n uitleg vatbaar is en impliciet dus ook goed wordt beheerd. Het resultaat is dan dat onderdelen direct goed worden gemaakt en bij de samenbouw passen.
- Effectieve communicatie voor een optimaal gebruik van de beschikbare kennis en een goed verloop van het proces. Het resultaat is dan dat de klant het product krijgt dat hij verwacht en dat de delen op de best mogelijke manier kunnen worden gemaakt met de beschikbare middelen.
- Duidelijke en vastgestelde verantwoordelijkheden en een effectief procesmanagement. Het resultaat is dan heldere beslissingen en keuzes op de goede momenten in het proces. 4 Het klassieke sequentiele productcreatieproces omvormen tot een proces met zo veel mogelijk parallelle processen. In de meeste bedrijven is dit al jarenlang een evolutionaire ontwikkeling, maar berust veelal op persoonlijke initiatieven, is incidenteel en ongestructureerd. De uitdaging is de parallelle processen optimaal te ontwerpen en structureel in de organisatie te verankeren.

Tot begin jaren '80 bestond het ontwikkelingsproces van een product (of proces) uit sequentiële overdracht van informatie tussen de verschillende betrokkenen (zie Figuur 1.7). Deze aanpak zorgt er voor dat het uiteindelijke product niet altijd op de beste manier gerealiseerd wordt (bv. deskundigen in de productieafdeling zijn vaak beter op de hoogte van de materialen en hun bijbehorende bewerkbaarheid die door ontwerpingenieurs in de ontwerpfase gekozen werden).



Figuur 1.5: Klassieke ontwikkelingsstrategie.

In de zogenaamde concurrent engineering (*Eng.: concurrent, Ndl.: simultaan*) aanpak voor productontwikkeling worden zowel project teams, ontwerpmiddelen en -technieken en informatie omtrent het product (o.a. vereisten van de klanten) en de productieprocessen tegelijkertijd in beschouwing genomen.



Figuur 1.6: Concurrent engineering ontwikkelingsstrategie.

De volgende tien kenmerken liggen aan de basis van concurrent engineering [2, 15] :

- Focus op het volledige productleven (deze 'product levenscyclus' is weergegeven in Figuur 1.8).
- Definitie van ontwerpproject teams.
- Het proces zelf is even belangrijk als het product.
- Aandacht voor de planning.
- Ontwikkeling van productvereisten.
- Stimulering van meervoudige conceptgeneratie.

- Bewustzijn van het beslissingsproces.
- Aandacht voor kwaliteit tijdens alle stappen van het ontwikkelingsproces.
- Gelijktijdige ontwikkeling van ontwerp en productieproces.
- Communicatie naar de geschikte personen op het juiste moment.

Een aantal van deze kenmerken worden hieronder in meer detail besproken:

- **Gelijktijdige activiteiten** Het basiskenmerk van Concurrent Engineering is gelijktijdigheid. Ofwel diverse activiteiten in verschillende fasen binnen het proces lopen tegelijkertijd zonder dat de een wacht op het eindresultaat van de ander. Een natuurlijke vorm van parallel verlopende fasen in het productcreatieproces is het proces zoals gegeven in Figuur 1.6. Het proces in een generieke vorm. Een andere vorm van Concurrent Engineering is dat op basis van een beperkt geometriedeeel, bijvoorbeeld het buitenoppervlak van een motorkap, door het gereedschapsconstructiebureau gereedschappen worden ontworpen, gedetailleerd en gepland om te worden gemaakt, terwijl de ontwerpers nog met de detaillering van het product bezig zijn. Ook kunnen op basis van voorlopige afspraken diverse disciplines hun systemen ontwerpen in een beperkte ruimte, bijvoorbeeld montagerekken, dozen, equipment, kabels, kanalen en pijpen. De ontwerpers van de structuur vervolgen tegelijkertijd hun eigen weg. Binnen een enkele applicatie kunnen parallelle activiteiten worden uitgevoerd door het ontwerp te delen. Bijvoorbeeld twee bedrijven die ieder een deel van het structuurontwerp verzorgen. De interfacerelaties tussen de structuurdelen zijn duidelijk gedefinieerd en vastgelegd. Hoewel er bij Concurrent Engineering in eerste instantie gedacht wordt aan activiteiten uit fasen van het proces die klassiek na elkaar werden uitgevoerd, hoeft dit natuurlijk niet het geval te zijn. Er kunnen zelfs hele verschuivingen optreden, bijvoorbeeld een ontwerpafdeling die alleen nog maar de buitendimensies van stalen kasten opgeeft en de detaillering verder overlaat aan de toeleverancier die de kasten maakt. Die kan dat sneller, goedkoper en beter. Van Concurrent Engineering is ook sprake bij de systeemontwerper die zijn systemen plaatst in de ruimtes die hem daarvoor aangewezen zijn. Een andere ontwerper gaat onafhankelijk verder met de ruimtes daarbuiten.

- **Gelijktijdige betrokkenheid** Het tweede belangrijke kernpunt van Concurrent Engineering is gelijktijdige betrokkenheid. Kennis en ervaring van alle facetten van de levenscyclus van het product moeten zo vroeg mogelijk in het ontwerpstadium aan bod komen. Concurrent Engineering is dat de productieafdeling in een vroeg stadium in het ontwerpproces te kennen kan geven dat een deur gemaakt van composietmateriaal in twee delen ontworpen moet worden, omdat de menselijke arm te kort blijkt te zijn om een mal voor de gehele deur goed te kunnen beleggen. Concurrent Engineering is ook de gelijktijdige betrokkenheid van de klant. Een Amerikaanse vliegtuigbouwer betrok een lokale en een Europese luchtvaartmaatschappij in het bouwteam voor een nieuw ontwerp van een vliegtuig. Door de betrokkenheid van de Europese klant kreeg het nieuwe ontwerp gemakkelijk en snel verplaatsbare pantries, waardoor het toestel zeer snel in allerlei passagiers/vrachtconfiguraties is om te zetten. Concurrent Engineering is als door gebruikmaken van ervaring van de samenbouwer het ontwerpaccident vanaf het begin wordt gelegd op de bouwbaarheid. Dit wordt wel design for assembly genoemd. En zo zijn er intussen nog meer termen gegroeid, zoals design for cost en design for manufacturing. Dit zijn dus de twee hoofdkenmerken: gelijktijdige activiteiten ten behoeve van het versnellen van het ontwerpproces en gelijktijdige betrokkenheid voor het verbeteren van het product en het proces.
- **Vrijgave voor een gegeven aantal activiteiten** In het klassieke proces werd een resultaat, een tekening, een document, vrijgegeven voor de rest van het proces. Dit is bij Concurrent Engineering niet meer mogelijk omdat het risico van verandering blijft zo lang een voorgaande activiteit niet is afgerond. Men neemt een gewogen risico met een deelresultaat voor een deel van het proces. Een voorbeeld is dat de buitengeometrie van de motorkap wordt vrijgegeven voor de aanmaak van een stuk gereedschap, omdat men niet wil wachten tot de motorkap in al zijn details vastligt. Dat zou immers het ontwerp en de fabricage van het gereedschap, en daarmee het gehele proces vertragen. Maar dat stuk gereedschap is daarmee niet automatisch goedgekeurd om productie te draaien. Er kan immers nog steeds een wijziging komen.
- **Duidelijk gedefinieerde en vastgelegde ontwerp- en procesverantwoordelijkheid** Om de snelheid van het proces te verhogen worden risico's genomen. Dit levert vaak geld op, maar het gaat ook wel eens mis. Er moet bijvoorbeeld toch een wijziging worden doorgevoerd, waardoor een duur stuk gereedschap opnieuw moet worden gemaakt.

In een situatie waar op persoonlijke initiatieven parallelle activiteiten plaatsvinden, heeft de initiatiefnemer schuld als het werk opnieuw gedaan moet worden terwijl de vruchten worden geplukt door de projectleiding. De managementverantwoordelijkheden van een proces dat gevoerd wordt volgens een Concurrent Engineering-benadering moeten daarom goed vastliggen.

- **Design Build Teams** Aan gelijktijdige betrokkenheid ligt een goede communicatie ten grondslag. Deze gelijktijdige betrokkenheid moet leiden tot goede keuzes en beslissingen. In de praktijk realiseert men dit meestal met ontwerpteam of bouwteam. Boeing introduceerde de naam Design Build Team. Buiten de officiële communicatie binnen het team zouden in het ideale geval alle betrokkenen op alle niveaus kennis moeten kunnen nemen van en reactie kunnen geven op de informatie die voor hen van belang zou kunnen zijn.
- **Geïntegreerd gebruik van informatietechnologie** Hoewel Concurrent Engineering een geweldige uitwerking kan hebben op een aantal belangrijke uitdagingen van de industrie, is het toepassen ervan heel duidelijk aan een aantal randvoorwaarden gebonden. De kwaliteit van het proces wordt beter, maar het beheer wordt complexer. Zonder toepassen van PDM tools (Product Data Management) zullen de problemen alleen maar toenemen. Ook bij de distributie van gegevens onder de belanghebbenden speelt de informatietechnologie een belangrijke rol. Daarbij kan gedacht worden aan opvraagbare en automatisch gedistribueerde informatie vanuit het PDM-systeem.

Wat is er met concurrent engineering te bereiken. Studies tonen aan dat een gemiddelde besparing valt te bereiken van tien tot vijftien procent van de bruto-omzet. Rolls Royce heeft zijn Trent-motor ontwikkeld met een besparing van ruim een derde van de kosten en met een verkorting van de doorlooptijd van eveneens meer dan een derde van de geschatte oorspronkelijk benodigde tijd. Hewlett Packard heeft voor een bepaald product het kosten-niveau teruggebracht tot twintig procent. General Electric Aircraft Engines bracht de doorlooptijd voor de ontwikkeling van een nieuw rotorblad van achttien maanden terug naar zeven maanden. Al deze verbeteringen zijn behaald door een combinatie van bovenvermelde uitdagingen te realiseren en enige vorm toe te passen van wat tegenwoordig wordt aangeduid met Concurrent Engineering, of in het Nederlands met Geïntegreerde Productontwikkeling.

Hoofdstuk 2

Het mechanisch ontwerpproces

In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht van de verschillende fasen in het ontwerpproces gegeven. Meer informatie omtrent de structuur van het ontwerpproces is te vinden in [16] (waarop dit hoofdstuk gebaseerd is).

2.1 Terminologie in het ontwerpproces

Door de groeiende complexiteit van producten worden alsmaar meer mensen betrokken bij het ontwerpproces, en bijgevolg wordt hierbij de communicatie steeds belangrijker. Hierdoor is het uiteraard nodig om over gemeenschappelijke terminologie voor objecten, methodes en acties te beschikken. Enkele veelgebruikte termen (met hun Engelstalige vertalingen) worden in deze paragraaf besproken.

Een systeem (*Eng.: system*) is een groep van objecten die een welbepaalde gemeenschappelijke functie hebben.

Elk systeem kan opgedeeld worden in :

- ofwel in sub-systemen die een specifieke deeltaak uitvoeren.
- ofwel in een samenbouw (*Eng.: assembly*) van componenten die de vorm van het systeem bepalen.

Zowel systemen als componenten hebben welbepaalde kenmerken (*Eng.: features*) zoals dimensies, vorm, materiaaleigenschappen, functionele details, etc.

Functie (*Eng.: function*) is de gewenste output van een systeem dat nog ontworpen moet worden. Gedrag (*Eng.: behavior*) is de eigenlijke output van het huidige ontwerp van een systeem. Performantie is de maat voor functie en gedrag.

Afhankelijk van de ervaringen die in het verleden reeds werden opgedaan met vergelijkbare ontwerpen en de beschikbare informatie (i.e. mate van concreetheid van het ontwerp probleem) onderscheidt men verschillende types van mechanische ontwerp problemen :

- **Selectief ontwerp** (*Eng.: selection design*) betreft de keuze van een of meer items uit een lijst van vergelijkbare items (vb. keuze van een lager) - vaak uit een catalogus.
- **Configuratie ontwerp** omvat het assembleren van een componenten die reeds gedesigned zijn (vb. layout van elektronische en mechanische onderdelen in een fototoestel).
- **Parametrisch ontwerp** omvat het vinden van waarden voor kenmerken die het object karakteriseren (vb. keuze van diameter en hoogte van een cilindrisch vat dat een gegeven hoeveelheid vloeistof moet bevatten).
- **Origineel ontwerp** slaat op het ontwikkelen van een component, proces of systeem dat voorheen niet bestond.
- **Herontwerp** (*Eng.: Redesign*) is het meest voorkomende ontwerp probleem (vb. hydraulische actuator met lengte 0.25m voorheen geleverd wordt ontworpen met lengte 0.3m).
- **Volgroeid ontwerp** (*Eng.: Mature design*) handelt over een ontwerp dat nauwelijks veranderd is gedurende meerdere jaren.

Verschillende voorstellingen kunnen worden gebruikt om een object – zij het een systeem, assembly of component – voor te stellen tijdens het ontwerp :

Semantisch Textuele voorstelling van het object (vb. woord 'moer').

Grafisch Tekening van een object (vb. schets of plan tekening van een moer).

Analytisch Vergelijkingen, regels en procedures om de vorm of functie van een object weer te geven (vb. $\tau = \frac{F}{A}$).

Fysisch De hardware of een fysisch model van het object (schaalmodel, prototype, etc.).

In elk van de voorstellingen evolueert het ontwerp van abstract naar concreet (grafisch: ruwe schetsen over schaal tekeningen naar 3D tekeningen met toleranties). Deze evolutie noemt men verfijning (*Eng.: Refinement*).

2.2 Het ontwerp team

2.2.1 Informatie verwerking

Het startpunt van het ontwerpproces zijn de cognitieve processen die zich afspelen bij de ontwerp ingenieur. Om deze te beschrijven kan het zogenaamde 'informatieverwerkingsmodel' gebruikt worden :

- Korte termijn geheugen (typisch 7 stukjes informatie, snel te acced-eren).
- Lange termijn geheugen (ongelimiteerde capaciteit).
- Controller (encoderen van externe informatie, opzoeken van gegevens in het lange termijn geheugen en verwerken m.b.v. het korte termijn geheugen).
- Externe omgeving : tijdelijke uitbreiding van het korte termijn geheugen (vb. schets op papier).

Het probleem oplossen bij het ontwerp gebeurt in volgende stappen :

Het probleem verstaan Parsen van de informatie in deelproblemen. Vergelijken met informatie in het lange termijn geheugen.

Een oplossing genereren Het probleem in deelproblemen ontbinden, partiële deeloplossingen zoeken en deze deeloplossingen combineren.

De oplossing evalueren

Beslissen

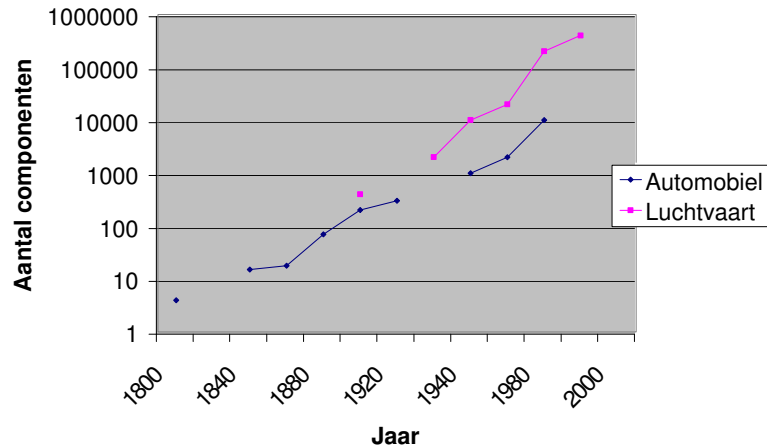
Afhankelijk van de persoonlijke kenmerken van de ontwerp ingenieur kunnen verschillende dimensies van het probleem oplossen waargenomen worden :

- Introvert vs. extrovert.
- Feiten vs. mogelijkheden georiënteerd denken.
- Objectieve vs. subjectieve aanpak.
- Vastberaden vs. flexibel.

Vaak laat men in het ontwerp teams bewust verschillende persoonlijkheden samen werken om het creatief denken (i.e. probleem oplossen op een originele manier) te stimuleren.

2.2.2 Teams

In tegenstelling tot vroeger waar één enkele ontwerp ingenieur een volledig ontwerp voor zijn rekening nam zijn tegenwoordig ganse teams hiervoor verantwoordelijk. Dit komt voornamelijk door de groei van de complexiteit van ontwerpen (zie voorbeeld Figuur 2.1) en de grotere multi-disciplinariteit van ontwerpen (vb. mechatronica: combinatie van mechanica, elektronica en software ontwerp).



Figuur 2.1: Evolutie van het aantal componenten in het ontwerp van wagens en vliegtuigen).

Meestal is een ingenieur lid van een team voor zijn specifieke kennis en ervaring in een bepaald domein. Daarnaast is er ook een tweede rol voor elk lid van het team met betrekking tot de probleemoplossende capaciteiten. Onderstaande rollen worden onderscheiden :

- Organisator/coördinator : geschikt als voorzitter van het team, heeft niet noodzakelijk veel technische expertise of creatieve bijdragen.
- Createur : ontwikkeld nieuwe ideeën die anderen kunnen uitwerken.
- Resource-onderzoeker : exploreert mogelijkheden zonder deze in detail uit te werken.
- Motivator : dynamisch assertief, maakt objectieve beslissingen.
- Evaluator : heeft een goede visie op de algemene doelstelling.

- Team werker : subjectieve beslissingsnemer die probeert een consensus in de groep te bereiken.
- Oplosser : persoon die ideeën op een betrouwbare en efficiënte manier in oplossingen omzet.
- Voltooier : nauwgezet, levert tijdig resultaten, detail-geïntereerd en delegeert weinig.

Volgende richtlijnen kunnen worden gebruikt om de performantie van de teams te optimaliseren :

- Houd het team productief.
- Selecteer teamleden op basis van hun vaardigheden (domein-specifiek en probleemoplossend).
- Definieer duidelijke gedragsregels.
- Stel een aantal onmiddellijke prestatiegerichte doelen.
- Organiseer regelmatig samenkomsten.
- Ontwikkel een gemeenschappelijk inzicht (d.m.v. communicatie).

In het ontwerpteam zijn verschillende rollen te onderscheiden. In kleine bedrijven (of kleine projecten) kan één persoon verschillende rollen uitvoeren, terwijl bij grote projecten elke rol door verschillende personen wordt vervuld :

- Product design ingenieur: draagt verantwoordelijkheid van het ontwerp.
- Product manager: vertegenwoordigt de link tussen de klant en het product (wordt ook vaak marketing manager genoemd).
- Manufacturing ingenieur: heeft een brede kennis van fabricage processen om het ontwerp te ondersteunen.
- Detailer: zijn verantwoordelijk voor het in detail uitwerken van het ontwerp (o.a. documentatie) na initiatie van de design ingenieur in het initieel stadium van het project.
- Drafter: schetsen en tekening maken van het product.
- Techniker: test apparaten ontwikkelen, experimenten uitvoeren, etc.

- Materiaalkundige: deze functie wordt vaak uitgevoerd door de materiaalleverancier.
- Quality assurance/quality control specialist: de QA zorgt ervoor dat het product voldoet aan pertinente codes en standaarden terwijl de QC ingenieur de statistische verwerking tijdens het proces uitvoert.
- Analyst: maken gebruik van gespecialiseerde software om vragen omtrent ontwerp prestatie op te lossen.
- Industrieel ingenieur: zijn verantwoordelijk voor de vorm van het product en de interactie van het product met de klant.
- Assembly manager: is verantwoordelijk voor het samenbouwen van het product.
- Vertegenwoordigers (leveranciers of verkopers): deze kunnen in verschillende stadia van het ontwerpproces ingeschakeld worden (met bijgevolg een dalende mate van bijdrage in het ontwerpproces).

Ontwerp teams kunnen op verschillende manier samengesteld worden:

- Functionele organisatie (ongeveer 13% van de ontwerp teams is op deze manier georganiseerd): elk project wordt toevertrouwd aan een team die gefocust zijn op één discipline (vb. aerodynamica).
- Functionele matrix (26%): een project manager met beperkte verantwoordelijkheid wordt aangeduid om een project te coördineren over verschillende functionele groepen (de functionele managers behouden de verantwoordelijkheid voor hun deeltaken).
- Balanced matrix (16%): een project manager wordt aangesteld om samen met de functionele managers verantwoordelijkheid te dragen om het project te volbrengen.
- Project matrix (28%): een project manager draagt de verantwoordelijkheid voor het ganse project. Functionele managers duiden personeel aan en verlenen technische expertise.
- Project team (16%): een project manager neemt de leiding van een groep teamleden gerecruteerd bij verschillende functionele groepen (functionele managers zijn niet betrokken).

De praktijk wijst uit dat samenstellingen georganiseerd rond het project (i.p.v. rond een discipline) het meest kans op succes hebben.

2.3 Het ontwerpproces

2.3.1 Overzicht

De organisatie van het ontwerpproces varieert in functie van een aantal factoren :

- Het product: oplage, mate van innovatie, complexiteit, etc.
- De industrie: geografische ligging, sector, grootte v.h. bedrijf, marktaandeel, etc..
- De omgeving: klanten eisen, beschikbare ondersteuning (vb. onderaannemers), etc.

Niettegenstaande deze variatie kan een generisch diagramma van de verschillende fasen van het ontwerpproces opgesteld worden (deze is weergegeven in Figuur 2.2. Dit schema geldt zowel op component als op assembly niveau en kan voor de verschillende types van ontwerp problemen toegepast worden (zoals deze beschreven werden in Sectie 2.1).

Gezien meer kennis wordt opgedaan naarmate het ontwerp vordert is het verloop van het ontwerp proces iteratief. Na beslissingen in design review meetings (aangegeven door de ruiten in Figuur 2.2) kunnen verfijningen in het begin van de fase of de vorige fase uitgevoerd worden.

Bij de organisatie van de design review meetings moet steeds :

- Vooraf een agenda van de meeting opgemaakt worden.
- De presentaties moeten kwaliteitsvol zijn (verstaanbaar, gestructureerd, met visuele ondersteuning).
- Achteraf moet een lijst van actiepunten opgemaakt worden (deze wordt opgenomen in het verslag van de vergadering).

In de volgende paragrafen worden de verschillende fasen van het ontwerpproces, zoals weergegeven in Figuur 2.2, afzonderlijk besproken.

2.3.2 Project definitie en project planning

Twee types ontwerp projecten kunnen onderscheiden worden : markt gedreven (80%) en technologie gedreven (20%). Echter elk markt gedreven product moet aan de recente technologie voldoen om als kwalitatief te worden beschouwd en technologie gedreven producten moeten een markt hebben om de kost van het ontwerp te overdekken (deze laatste projecten vereisen bovendien meestal

een hoge mate van investering in research en development). De meeste ontwerp projecten betreffen re-designs en zijn bij gevolg meestal marktgedreven : klanten willen dat het product goedkoper, beter, duurzamer, etc. wordt. Nieuwe marktgedreven producten of verbeteringen van bestaande producten ontstaan meestal uit ideeën van marketing departementen. De technologie gedreven producten zijn het gevolg van onderzoek en ontwikkeling (*R&D, Research en development*), dat typisch 2 tot 10 percent van de omzet van een bedrijf uitmaakt.

De project planning is een van de belangrijkste activiteiten in het ontwerp proces. Hierbij worden resources voor het voltooien van een project ge-alloceerd (budgetten, personeel, materieel) en wordt ervoor gezorgd dat tijdens het ontwerp de juiste informatie op het geschikte tijdstip aan de juiste teamleden beschikbaar wordt gemaakt. Gezien de planning speculaties naar de toekomst vereist is de planning voor een re-design eenvoudiger dan voor een volledig origineel ontwerp. Het resultaat van de planning is een blueprint van het process om het product tot stand te laten komen. In de laatste decenia bestaan meer en meer de trend om naast het product zelf ook het proces te laten evolueren. Een belangrijke indicator van het groeiende belang van het proces (t.o.v. het product) is het toenemend gebruik van de ISO-9000 standaard (kwaliteitsmanagement systeem). Het behalen van een ISO-9000 certificatie betekent dat het bedrijf :

- Operaties standardiseert, organiseert en controleert.
- Een constante dissiminatie van informatie voorziet.
- Statistische data en analyse gebruikt voor bedrijfsprocessen.
- De klantenreacties m.b.t. producten en diensten opneemt.
- Verbeteringen stimuleert.

Er zijn verschillende redenen waarom ondernemingen overgaan tot het aanvragen van een ISO-9000 certificatie : de noodzaak om kwaliteit en kost van producten onder controle te houden, om competitiever te worden, om te voldoen aan de eisen van een klant of omdat een regulerend orgaan dit vereist (vb. luchtvaart). De ISO certificatie geeft zelf geen richtlijnen voor het ontwikkelen van producten maar vereist van bedrijven dat het ontwikkelingsproces gedocumenteerd is (de certificatie duidt dus niet de kwaliteit van het process aan).

Een belangrijke beslissing die gemaakt dient te worden tijdens de project planning is het aantal en de vorm van de prototypes die zullen worden uitgevoerd. Men onderscheid:

Fase	Medium		
	Fysisch (vorm en functie)	Analytisch (vooral functie)	Grafisch (vooral vorm)
Concept	Proof-of-concept	Back-of-the-envelope	Schetsen
↓	Proof-of-product	Engineering analyse	Layout tekeningen
	Proof-of-proces	Eindige elementen	Detail tekeningen
Eindproduct	Proof-of-productie	Gedetailleerde simulatie	Solid modellen

Tabel 2.1: Types modellen in de verschillende fasen van het ontwerp proces.

- Proof-of-concept prototype: ontwikkelen van de functie van het product voor vergelijk met de specificaties of klanten eisen. De vorm, het materiaal en het fabricageproces zijn hier niet van belang.
- Proof-of-product prototype: help componenten en samenbouwen te verfijnen (geometrie, materialen productieproces en functie zijn van belang).
- Proof-of-process prototype: voor functioneel testen (exact materiaal en productieproces).
- Proof-of-production prototype: wordt gebruikt om het ganse productieproces uit te testen (pre-production run).

De recente ontwikkeling van *rapid prototyping* technologie (o.a. laser sintering, etc.) heeft de efficiëntie van het bouwen van prototypes verhoogd. Tegenwoordig is er een trend naar computermodellen om het aantal fysische prototypes te beperken. Dit komt er op neer dat men een ontwerp-test-bouw cyclus gebruikt i.p.v. een ontwerp-bouw-test cyclus (zie Figuur 2.3). Op die manier kunnen tijd en kosten die gepaard gaan met het produceren van prototypes bespaard worden. Een overzicht van mogelijke modellen die gebruikt worden doorheen het ontwerp proces is weergegeven in Tabel 2.1. In Hoofdstuk 10 worden enkele rapid prototyping technieken besproken om deze modellen op een snelle en efficiënte manier te realiseren.

Tijdens de project planning fase wordt een 'project plan' gemaakt. Dit is een document dat de taken definieert die nodig zijn tijdens het ontwerp proces. Voor elke taak worden objectieven, personeelsnoden, vereiste tijd, timing relatief tot andere taken en eventueel kosten gespecificeerd. Dit gebeurt in vijf stappen:

Stap 1 Identificeer de taken. De taken moeten zo specifiek mogelijk gemaakt worden.

Stap 2 Formuleer de objectieven voor elke taak. Wat is de input en output van elke taak? Definieer milestones en deliverables.

Stap 3 Schat de nodige resources. Gebruik makende van de complexiteit van de functie van het product kan bijvoorbeeld de nodige ontwerptijd geschat worden: $T = A * PC * D^{0.85}$, met: A een constante gebaseerd op de mate van communicatie binnen het bedrijf (vb. $A = 150$ voor een groot bedrijf met gemiddelde communicatie), PC de product complexiteit ($PC = \sum_j F_j$ met j het niveau in het functiediagram en F_j het aantal functies op dat niveau) en D de moeilijkheid van het project (schaal 1 tot 3).

Stap 4 Plan de opeenvolging van de taken. De beste manier om dit plan in de praktijk te brengen is de zogenaamde *Gantt chart* die o.a. commercieel verkocht wordt onder de productnaam Microsoft Project. Speciale aandacht moet besteed worden aan de afhankelijkheid van taken: sequentieel, parallel (gekoppeld of niet). Dit kan eenvoudig weergegeven worden in onder de vorm de *Design Structure Matrix (DSM)*. Dit is een matrix met zowel in de kolommen als de rijen de verschillende taken. Voor elke rij wordt een symbool aangeduid in de kolommen van de taken waarvan de betreffende taak afhankelijk is.

Stap 5 Schat de productontwikkelingskosten. Het schatten van deze kosten komt verder aan bod (in Hoofdstuk 4).

De verschillende processen die belangrijk zijn bij de project planning worden in detail besproken in het volgende hoofdstuk (Hoofdstuk 3 : 'Project Management').

Tijdens de 'project definitie fase' komen verschillende marketing aspecten van het ontwerp aan bod :

- Wat is het potentieel voor de 'Return On Investment (ROI)'?
- Past het product binnen het bedrijfsimago?
- Zijn de juiste verdeelkanalen beschikbaar?
- Is er voldoende productiecapaciteit in huis of bij gekende onderaannemers?
- Wat zal het product kosten?

2.3.3 Specificatie in het ontwerpproces

In de specificatie fase – die ook wel eens de concipiërende fase wordt genoemd – wordt gezocht naar een constructieve oplossing voor de beoogde behoefte. Het komt er op aan het probleem op de juiste wijze te formuleren en vervolgens te analyseren. Als resultaat van deze analyse wordt een helder zicht gekregen op de te vervullen hoofdfunctie van de toekomstige technische inrichting. Vervolgens zal creatief worden gezocht naar geschikte fysische of chemische processen, waarmee de hoofdfunctie kan worden vervuld. Het doel in de specificatie fase is het verstaan van het ontwerp probleem en het leggen van de grondslag voor het ontwerp. Dit eerste is niet altijd eenvoudig gezien het ontwerp probleem meestal vaag geformuleerd is. In deze eerste stap worden: de klanten geïdentificeerd en de klanteneisen gegenereerd (de verschillende types van klanteneisen zijn weergegeven in Tabel 2.2). Deze eisen worden dan gebruikt om de concurrentie te beoordelen. Daarna worden meetbare features van het ontwerp opgegeven d.m.v. engineering specificaties. Tevens worden target waarden voor deze features vastgelegd.

Bij het genereren van producteisen is het belangrijk deze eisen voldoen aan een aantal voorwaarden. Ze moeten :

- Toelaten om verschillende producten te onderscheiden.
- Meetbaar zijn.
- Orthogonaal zijn (d.w.z. dat er geen overlap is tussen de eisen).
- Universeel zijn (d.w.z. dat de evaluatie van de eis mogelijk is voor alle ontwerp alternatieven).
- Extern zijn (d.w.z. de informatie moet van buitenaf meetbaar zijn en geen betrekking hebben op de interne werking van het ontwerp).

Een product dient in het algemeen te voldoen aan een groot aantal eisen en wensen die vanuit een veeltal gezichtspunten zijn gedefinieerd. Deze eisen en wensen kunnen ingedeeld worden in:

- kostprijs: verkoopbaarheid (eisen van de gebruiker, situering van het product in de omgeving).
- functioneerbaarheid (eisen van het systeem zelf).
- fabriceerbaarheid (eisen van het productiesysteem).

Deze eisen kunnen verder ingedeeld worden in :

- Eisen vanuit de gebruiker:
 - specifieke klantenwensen
 - functievervulling in gebruikerstermen.
- Eisen vanuit de situering van het product in de omgeving:
 - omgevingscondities
 - materiaaleisen
 - veiligheid
 - ergonomie
 - milieu-eisen
 - esthetische eisen
 - politiek
 - marktbeperkingen
 - concurrentie
 - patenten
 - bedrijfsnormen
 - wettelijke voorschriften
 - te gebruiken voorschriften en normen
 - einde levensduur, sloop.
- Eisen ten aanzien van het systeem zelf:
 - Gebruikstermen:
 - * functievervulling in gebruikerstermen
 - * gebruiksprofiel
 - * kwaliteit en betrouwbaarheid
 - * beproevingen
 - * afmetingen
 - * gewicht
 - * opslag
 - * shelf life
 - * vervoer
 - * verpakking
 - * installatie en in bedrijf stellen

- * levensduur.
- Onderhoudstermen:
 - * onderhoud
 - * Beheer: documentatie.
- Eisen ten aanzien van het productiesysteem:
 - productieprocessen
 - productiefaciliteiten
 - productaantallen.

Het programma van eisen wordt als volgt nader ingedeeld:

- **Strikte eisen** Dit zijn de eisen waaraan nauwkeurig moet worden voldaan. Bijvoorbeeld het ontwerpen van een motor met een vermogen van X kW 5%.
- **Minimale eisen** Dit zijn de eisen waarbij een verlangde waarde moet worden gehaald of overschreden. Het specifieke brandstofverbruik zal minder dan Y zijn.
- **Wensen** De wensen zijn die punten uit het programma van eisen waaraan verder geen bijzondere voorwaarden zijn gesteld. Wanneer aan deze wensen wordt tegemoetgekomen, heeft het product wel een meerwaarde, maar pas nadat aan hoofdzaken is voldaan.

Deze indeling heeft twee bedoelingen. Allereerst leggen we hier eenduidig vast wat wij precies moeten ontwerpen. Vervolgens leggen we vast wat de relatieve zwaarte is van de eisen, zodat we daar bij onze afwegingen en evaluaties rekening mee kunnen houden.

Het resultaat van de behoefteanalyse (programma van eisen) is dat de ontwerper een helder zicht heeft gekregen op de te realiseren handel- of werkwijze en daarmee op de te vervullen functie(s) van de te ontwerpen technische inrichting. Dit noemen we de *externe functie(s)*. Het bepalen van de hoofd-functie en het definiëren van de deelfuncties is een belangrijke activiteit. Wanneer de ontwerper in dit stadium hoofden bijzaken niet weet te scheiden, valt er geen goed productvoorstel te verwachten, maar meer een toevallig samenraapsel van suboptimalisaties. Men moet er bij deze functiebepaling voor waken niet onmiddellijk in oplossingen te gaan denken. Dit blokkeert het vinden van de juiste oplossingen. Het heeft de voorkeur de functies op een bepaald abstractieniveau te definiëren. Bij het definiëren van de externe (deel)functies maakt men gebruik van de in de systeemtheorie gebruikelijke

blokschemas. De blokken stellen handel- of werkwijzen voor. De functies worden in de blokken aangegeven met behulp van een zelfstandig naamwoord en een werkwoord, bijvoorbeeld stof verzamelen (zie Figuur 2.4 voor het schema van een fruitpers). Men kan dit aanvullen met gegevens omtrent de hoeveelheid en de kwaliteit. Van veel nut is het om de grens van het systeem aan te geven. Via deze grens vindt overdracht met de buitenwereld plaats. Als het goed is, vindt men op de grenzen de overdracht terug in het programma van eisen.

Er bestaan verschillende manieren om product specificaties te genereren. Eén van de beste en momenteel zeer populaire methode is de zogenaamde *QFD* (voluit '*quality function deployment*'). De QFD methode werd geïntroduceerd in de jaren '70 in Japan (zie [19]) en werd voor het eerst gebruikt bij Mitsubishi. Met behulp van de QFD methode wist Toyota tot 60% van de kosten te reduceren om een nieuw auto model op de markt te brengen (zie Figuur 2.5) en ook andere grote bedrijven zoals Hewlett-Packard, NASA, Xerox, AT&T en ITT gebruiken de methode. Gebruik makende van de QFD methode wordt het zogenaamde '*house of quality*' opgebouwd [9].

De verschillende stappen (i.e. de kamers zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.6) in het house of quality worden hieronder besproken. Ter illustratie is een voorbeeld van een House of Quality voor het ontwerp van een wagen deur gegeven in Figuur 2.8.

Stap 1: who Identificeer de klanten. De belangrijkste klanten zijn de consumenten. In de concurrent engineering methodologie worden ook het management, productie en onderhoudspersoneel als klant beschouwd.

Stap 2: what Bepaal de klanteneisen. Uit onderzoek is gebleken dat gebruikers producten willen die: werken zoals het moet, lang meegaan en eenvoudig te onderhouden zijn. Het doel is echter niet enkel aan de klanteneisen te voldoen, maar de klanten aan te sporen om het product te kopen (i.e. zorgen dat ze niet gewoon tevreden zijn maar verheugd). De mate waarin klanten verheugd zijn over een bepaald product kan beschreven worden met het *diagram van Kano* (zie [10]) zoals weergegeven in Figuur 2.7. De standaard features worden door de consument verondersteld aanwezig te zijn (zoniet zal hij afkerig zijn). Deze standaard eisen worden niet opgenomen in de QFD specificatie van de vereisten. Het feature performantie is daarentegen wel een belangrijke klanteneis in het house of quality. De 'wow' features zijn deze die de klant niet verwacht in een product. Consumenten reageren neutraal op de afwezigheid van deze kenmerken. In functie van de tijd evolueren de 'wow' features naar performantie features die op hun beurt tot stan-

daard eisen kunnen gereduceerd worden. Vanuit het Kano diagram kan bepaald worden welke functies nodig zijn om de klant aan te trekken.

Een overzicht van verschillende types van mogelijke klanteneisen is weergegeven in Tabel 2.2. De functionele prestatie-eisen beschrijven het gewenst gedrag van het product. Hoe beter de functie van een ontwerp gekend is des te vollediger worden de functionele eisen. Daarom is het genereren van deze eisen iteratief binnen de verschillende fasen in het ontwerpproces. De menselijke factoren brengen de interactie met de mens in rekening die voor bijna elk product vereist is (i.e. de manipulering van het product en perceptie van de status van product). Fysische eigenschappen en fysieke interfaces met andere objecten zijn begrepen in de fysieke eisen. In de betrouwbaarheid wordt nagegaan hoelang het product wordt geacht mee te gaan en wat er gebeurt bij falen van één of meerdere onderdelen. Vereisten m.b.t. stadia van de levenscyclus van een product buiten het eigenlijk gebruik van het product worden vaak over het hoofd gezien. Deze vereisten kunnen echter een belangrijke invloed hebben op andere eisen (vb. het gekozen distributiekanaal beïnvloed de fysieke eisen).

Stap 3: who vs what Bepaal het relatief belang van de eisen. Dit resulteert in een gewichtsfactor voor elk van de klanten eisen welke een idee kan geven over een zinvolle spending van resources voor het voldoen aan de verschillende eisen.

Stap 4: now Hoe tevreden is de klant nu? In welke mate vindt de klant dat de concurrentie aan elk van de vereisten kan voldoen? Deze zogenaamde '*competition benchmarking*' wordt uitgevoerd door voor elk van de concurrerende producten aan elk van de vereisten een score van 1 tot 5 te geven naargelang ze voldaan is. Op die manier komen opportuniteiten voor verbetering naar boven (lage scores van concurrenten met een hoge gewichtsfactor).

Stap 5: how Hoe wordt aan de vereisten voldaan? Hierbij worden engineering specificaties ontwikkeld vanuit de klanteneisen (i.e. herformulatie van het ontwerpprobleem aan de hand van meetbare parameters met target waarden).

Stap 6: how vs what Dit is het relateren van klanteneisen met engineering specificaties. Meestal wordt volgende onderverdeling van de mate waarin how en wat gerelateerd zijn: sterke relatie, gemiddelde relatie, zwakke relatie, geen relatie. Deze verschillende niveaus van relaties wor-

den met behulp van symbolen schematisch weergegeven in het house of quality.

Stap 7: how much Vastleggen van engineering target waarden. Deze zullen later in het ontwerp gebruikt worden om te evalueren of het product aan de klanteneisen voldoet. De targets bevatten initieel een tolerantie van typisch 30% maar verder in het ontwerp proces worden de targets beter benaderd. Wanneer de targets veel verschillen van deze van de concurrentie is het raadzaam ze in vraag te stellen: is er een voordeel t.o.v. de concurrentie (technologisch) of zijn de targets te ambitieus?

Stap 8: How vs how Op welke manier zijn de engineering specificaties afhankelijk van elkaar? Deze (positieve of negatieve) correlatie wordt net als in Stap 6 opnieuw met symbolen weergegeven in het house of quality.

Gezien het house of quality zeer veel informatie bevat kan dit worden gebruikt als documentatie- en communicatiemiddel tijdens de specificatie fase in het ontwerp.

2.3.4 Het conceptueel ontwerp

De klanteneisen die gedefinieerd worden in de specificatie fase vormen de basis om een conceptueel model te genereren (in dit stadium van het ontwerp wordt de functie vastgelegd maar nog niet de vorm). De vooraf gedefinieerde targets worden gebruikt om het concept te evalueren (m.a.w. een concept is een idee dat voldoende ontwikkeld is om de fysische eigenschappen die het gedrag bepalen te evalueren). Hoewel het conceptueel ontwerp slecht de beginfase van het ontwerp is en er op dat moment nog weinig kennis is m.b.t. de concepten, worden reeds hier de beste alternatieven uit verschillende concepten gekozen. Frequente iteratie tussen het genereren, evalueren en beslissen van concepten is in het beginstadium van het ontwerp proces goedkoop (zoals voorheen reeds bleek uit Figuur 1.4) en leidt bijgevolg tot een efficiënt ontwerp.

De functie van een ontwerp is de logische stroming van energie, materiaal en informatie tussen objecten of de verandering van staat van een object veroorzaakt door een van deze flows. De types energie die in electromechanische systemen voorkomen zijn o.a. : mechanische, elektrische, thermische en stromingsenergie. Deze energie wordt getransformeerd, opgeslaan, getransfereerd, gedissipeerd en toegevoerd doorheen het product. De functie kan onderverdeeld worden in drie klassen naargelang de betrokken acties :

Functionele performantie	Resources
Energiestroom	Tijd
Informatiestroom	Kost
Materiaalstroom	Kapitaal
Operationele stappen	Eenheid
Volgorde van bediening	Materieel
Menselijke factoren	Standaarden
Uitzicht	Omgeving
Kracht en bewegingscontrole	Fabricage eisen
Mate van controle en aanvoelen	Materialen
Fysieke eisen	kwantiteit
Beschikbare ruimte	Intern/extern
Fysische eigenschappen	
Betrouwbaarheid	
Mean time between failures	
Veiligheid	
Levenscyclus	
Distributie	
Onderhoudsgemak	
Diagnose mogelijkheden	
Testmogelijkheden	
Herstellingsmogelijkheden	
Schoonmaak mogelijkheden	
Installeergemak	
Afdanking	

Tabel 2.2: Types van klanteneisen.

- Doorstroming (materiaalconserverende acties): opheffen, positioneren, vasthouden, ondersteunen, verplaatsen, roteren, begeleiden, etc.
- Divergente stroming (verdelen van het materiaal) : verdelen, demonteren, etc.
- Convergente stroming (samenstellen van materialen) : mixen, vasthechten, positioneren t.o.v., etc.

De informatiestroom wordt gebruikt als een intern automatisch controle systeem of een interface met de operator/gebruiker. De functie van een apparaat kan begrepen worden door de decompositie in onderdelen, zoals gedefinieerd in de volgende stappen :

Stap 1 Voor het volledige apparaat, bestudeer de interface met andere objecten: wat is de stroming van energie en informatie van en naar de gebruiker?

Stap 2 Verwijder een onderdeel voor een gedetailleerde studie: wat is de wisselwerking met andere onderdelen (hoe zijn ze fysisch gelinkt, wat is de functionele afhankelijkheid)?

Stap 3 Bestudeer de interface van elk van de componenten om de energiestroom te achterhalen: vb. rotatie wordt in translatie omgezet.

De patent literatuur is een goede bron van ideeën voor een conceptueel ontwerp. Er bestaan twee soorten patenten: *utility patenten* (die de functie van een idee beschermen) en *design patenten* (deze behelzen de vorm van een idee en vormen een minderheid van ingediende patenten). Een voorbeeld van de eerste pagina van een utility patent wordt getoond in Figuur 2.9 (het volledige patent telt 50 pagina's waaronder 63 figuren). Het zoeken naar toegekende patenten kan d.m.v. patent databanken. Met de introductie van het internet is dit veel eenvoudiger geworden (een mogelijk bron is de zoekrobot op de European Patent Office website: <http://www.espacenet.com> dat momenteel 45 miljoen patenten bevat). Er kan gezocht worden op volgende kenmerken:

- Woorden in de titel (zie veld (54) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Woorden in het uittreksel (zie veld (57) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Publicatienummer (zie veld (11) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Aanvraagnummer (zie veld (21) in het voorbeeld in Figuur 2.9).

- Prioriteitsnummer (zie veld (30) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Publicatiedatum (zie veld (43) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Aanvrager (zie veld (71) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Uitvinder (zie veld (72) in het voorbeeld in Figuur 2.9).
- Classificatie (IPC) (zie veld (51) in het voorbeeld in Figuur 2.9). De eerste letter in dit nummer duidt de klasse aan:

A: Landbouw

B: Uitvoeren van operaties, transport

C: Scheikunde, metallurgie

D: Textiel, papier

E: Vaste constructies

F: Werktuigkunde, verlichting, verwarming, wapens

G: Fysica

H: Elektriciteit

Andere belangrijke onderdelen van het patent zijn:

- De beschrijving
- De claims (verklaring van de unieke functie van een toestel)
- Tekeningen
- Een verslag van de opzoeken van het patent bureau (met daarin citaten naar relevante patenten). In het patentvoorbeeld uit Figuur 2.9 worden een kleine 50 patenten geciteerd.

Het doel van functioneel modelleren is het probleem op te splitsen naar stroming van energie, materiaal en informatie. Er zijn vier stappen om deze decompositie uit te voeren :

Stap 1 Zoek de algemene functie die moet verwezenlijkt worden. Het apparaat moet (zich baserend op de klanteneisen) omschreven worden als een 'black box': wat zijn de in- en de outputs?

Stap 2 Creëren van de subfunctie beschrijvingen: een zo verfijnd mogelijke identificatie van de noden.

Stap 3 Ordenen van de subfuncties: op welke manier (logische of chronologische volgorde) moeten de subfuncties uit Stap 2 uitgevoerd worden om de functie uit Stap 1 te verwezenlijken?

Stap 4 Verfijnen van de subfunctie structuur naar de functionele organisatie.

De kans is reëel dat bij het ontwikkelen van een concept dit concept reeds in het verleden werd gebruikt. Het grote probleem is dat de ideeën die ontwikkeld werden tussen de zestiende en de twintigste eeuw niet op een systematische wijze zijn opgeslagen en geïndexeerd. Van de ideeën die wel zijn opgetekend (bv. in patent databanken) zijn vaak zeer talrijk en zijn geïndexeerd op vorm i.p.v. functie. Om te zorgen dat tijdens het ontwerp van een apparaat het wiel niet opnieuw uitgevonden wordt kan beroep worden gedaan op één van de bestaande systematische concept generatie methodes:

- **Brainstorming:** hierbij worden alle ideeën (meestal geproduceerd in groep) opgetekend zonder evaluatie.
- **De 6-3-5 methode:** Een team van typisch 6 mensen noteert telkens 3 ideeën die na vijf minuten worden bekeken door het volgend teamlid dat op zijn beurt opnieuw drie ideeën genereert.
- **De Gallery methode**
- **De Delphi methode**
- **De synectics methode**
- **Gebruik van analogieën:** welk ander object gebruikt voorziet in dezelfde functie (vb. velcro en honingraatstructuren uit de natuur).
- **Gebruik van extremen:** dimensies zeer groot of klein maken, volgorde van objecten veranderen, iets stijf flexibel maken, etc.
- **Externe expertise:** leveranciers en fabricanten hebben vaak ervaring door communicatie met concurrerende bedrijven.
- **Literatuur:** tijdschriften (vb. Journal of Mechanical Design), webpagina's (vbn. <http://www.machinedesign.com>, www.designnews.com, www.manufacturing.net, www.engineersedge.com), patenten, etc.
- **De morfologische methode:** hierbij worden zoveel mogelijk ideeën ontwikkeld die de subfuncties kunnen uitvoeren. Deze worden dan gecombineerd in algemene concepten die aan de functionele vereisten

Oplossingen							
	Voeding	Lamp type	Intensiteit	Grootte	Stijl	Afwerking	Materiaal
	Batterij	Halogeen	Laag	Zeer groot	Modern	Zwart	Metaal
	Net	Fluorescent	Gemiddeld	Groot	Antiek	Wit	Keramiek
	Zonne-energie	Daglicht	Hoog	Gemiddeld	Romeins	Teracotta	Beton
	Generator	Gekleurd	Variabel	Klein	Art Nouveau	Metallic	Been
	Zwengel			Zeer klein	Industrieel	Stof	Glas
	Gas				Etnisch	Natuurlijk	Hout
	Petroleum					Email	Steen
	Vlam						Plastic

Tabel 2.3: Voorbeeld van een morfologische matrix voor het ontwerp van een lamp

voldoen. De morfologische methode werd eind jaren '40 ontwikkeld door de Zwitserse sterrenkundige Fritz Zwicky [22, 21]. De methode start van een grid van kolommen (die de relevante functies van het ontwerp bevatten) en rijen (die de mogelijke concepten voor de deelfuncties bevatten, voorgesteld d.m.v. schetsen of text). Van zodra de matrix opgevuld is moeten de individuele oplossingen gecombineerd worden tot een conceptueel ontwerp (merk op dat alle deelfuncties niet noodzakelijk evenveel concepten moeten bevatten). Een nadeel van de methode is dat een groot aantal concepten worden gegenereerd (combinatorisch explosief). Twee voorbeelden van de methode zijn gegeven in Tabel 2.3 en Figuur 2.10.

- **Logische methodes:** de theorie van inventieve machines (TRIZ), axiomatisch ontwerp en de methode van Pugh. De eerste methode (TRIZ) is het acroniem voor de Russische zin "Theorie van de inventieve machines". De ideeën van TRIZ gaan er vanuit dat de meeste van de ontwerpproblemen reeds opgelost zijn (in een andere industrietak, een niet gerelateerde situatie en met een andere technologie). De TRIZ methode maakt gebruik van contradicties (tussen verschillende eigenschappen van een ontwerp zoals sterkte en gewicht) en inventieve principes (die geëxtraheerd zijn uit een functionele classificatie van patenten):

1. Zoek de belangrijkste contradicties die het ontwerp moeilijk maken.
2. Gebruik één van de 40 inventieve TRIZ principes (zie Appendix A)

Axiomatisch design is gebaseerd op de relatie tussen vier ontwerp domeinen: klant, functie, fysisch en proces. De klanteneisen (*customer needs* of

CN) moeten aanleiding geven tot functionele vereisten (*functional requirements* of FR). Een functie uit de FR is vertegenwoordigd door interactie tussen fysische elementen. Deze fysische elementen zijn gekarakteriseerd door ontwerp parameters (*design parameters* of DPs). Proces variabelen (PVs) relateren elementen van het fabricage proces die het ontwerp proces beïnvloeden. Het eerste axioma uit de axiomatische ontwerp aanpak is het onafhankelijkheidsaxioma: 'onderhoud de onafhankelijkheid tussen FRs' (d.w.z. dat een verandering van een specifieke DP enkel effect heeft op één FR). Het tweede axioma is: 'Minimaliseer de informatie bevat in het ontwerp' (hoe simpeler hoe beter).

Na het genereren van een aantal concepten moet beslist worden welke concepten ontwikkeld zullen worden in producten. Het doel is om zo weinig mogelijk resources te spenderen om te beslissen welke concepten tot kwaliteit-producten kunnen uitgroeien. Deze *evaluatie* vereist zowel besluitvorming als vergelijk (zowel absoluut m.b.t. een target als relatief t.o.v. alternatieven). Gebaseerd op subjectieve waardeoordelen van een ontwerper kunnen op voorhand drie oordelen over een concept genomen worden:

1. Het concept is niet uitvoerbaar, haalbaar: de technologie is niet beschikbaar, het concept voldoet niet aan de klanteneisen, het concept wijkt te veel af van de gebruikelijke producten, het idee is niet origineel genoeg. Deze ideeën die verworpen worden kunnen wel meer inzicht geven in het probleem.
2. Het concept is werkbaar mits aanpassingen of veranderingen in de omgeving: beschikbaarheid van technologie, informatie die momenteel niet beschikbaar is.
3. Het loont de moeite om het concept verder te beschouwen.

Na de subjectieve beoordeling worden de concepten onderworpen aan een objectieve screening gebaseerd op: (a) de criteria gedefinieerd in de klanteneisen (zie het 'house of quality' boven), (b) de gereedheid van de gebruikte technologie. Na de screening wordt een 'go' of 'no-go' gegeven aan elk van de concepten. In dit stadium worden niet enkel slechte ontwerpen verworpen, maar worden ook nieuwe concepten gegenereerd: concepten met slechts enkele no-go's kunnen aangepast worden. De maturiteit van een technologie kan bepaald worden aan de hand van volgende zes maten:

1. Zijn de kritische parameters die de functie controleren geïdentificeerd?

1. Elastische vervorming	9. Fretting
2. Plastische vervorming	10. Kruip
3. Brosse breuk	11. Thermische schade
4. Ductiele breuk	12. Knik
5. Vermoeiing	13. Stralingsschade
6. Corrosie	14. Erosie
7. Slijtage	15. Delaminatie
8. Impactschade	16. Oxidatie

Tabel 2.4: Falingsmodes van een mechanisch onderdeel

2. Zijn het veilige werkingsgebied en de gevoeligheid van de parameters gekend?
3. Zijn de falingsmodes bekend (zie Tabel 2.4)?
4. Kan de technologie gefabriceerd worden met de beschikbare processen? Zoniet moet eventueel een afzonderlijk programma opgezet worden om de fabricagetechnologie te ontwikkelen.
5. Bestaat er hardware die positieve antwoorden op de vorige vragen demonstreert?
6. Is de technologie controleerbaar doorheen de levenscyclus van het product?

Een gestructureerde methode om concepten te evalueren is de zogenaamde beslissingsmatrix methode (Eng: *decision-matrix method*) ook vaak de methode van Pugh genoemd. De methode voorziet een middel om elk resultaat een score te geven m.b.t. de klanteneisen en relatief t.o.v. andere concepten en is grafisch weergegeven in Figuur 2.11. De beslissingsmatrix wordt door elk van de teamleden opgesteld en iteratief aangepast. Volgende stappen dienen uitgevoerd te worden :

- Stap 1** Kies de criteria voor vergelijk (vb. met behulp van de QFD methode).
- Stap 2** Stel relatieve belangrijkheidsgewichten op (zie ook QFD methode).
- Stap 3** Selecteer de alternatieven die zullen vergeleken worden (alle ideeën moeten in dezelfde taal en op hetzelfde abstractieniveau zijn).
- Stap 4** Evalueer alternatieven. Eén van de concepten wordt als rolmodel gekozen (ev. bestaand ontwerp). Voor elk van de alternatieven wordt

geëvalueerd of voor dat criterium de prestatie van de alternatieven beter ('+' of '+1'), hetzelfde ('S' of '0') of slechter is ('-' of '-1').

Stap 5 Bereken de tevredenheid aan de hand van vier scores: het aantal keer '+', het aantal keer '-', het totaal aantal scores en het aantal '+' scores min het aantal '-' scores. Tevens kan ook de gewogen som (met de belangrijkheid) uitgerekend worden.

Bij het interpreteren van de beslissingsmatrix moet een aantal zaken nagegaan worden:

- Indien een concept een goede gemiddelde score heeft is het belangrijk na te gaan welke sterktes en zwakke punten dit concept heeft.
- Indien een score dezelfde waarde heeft voor bijna alle concepten is deze score mogelijk niet goed gedefinieerd en moet het in meer detail bekeken worden.
- De tabel kan iteratief opgesteld worden, waarbij de best scorende concepten overgehouden worden.

Wanneer de kennis rond de criteria nog niet voldoende aanwezig is kan de keuze van de concepten aan de hand van de beslissingsmatrix bemoeilijk worden of kunnen zelfs verkeerde keuzes worden gemaakt. Om dit op te vangen kan gebruik worden gemaakt van de zogenaamde 'belief maps' die robuuste beslissingen toelaten (waarbij men onder 'belief' of overtuiging verstaat: het vertrouwen in de mogelijkheid van een alternatief om de criterium targets te halen gebaseerd op de huidige kennis). Een belief map is georganiseerd in twee dimensies: kennis (beschikbare informatie en gereedheid van de technologie) en vertrouwen (zie Figuur 2.12). Gebaseerd op experimentele steekproeven is een model opgesteld dat gebaseerd op de kennis $p(k)$ en het vertrouwen $p(c)$ de overtuiging berekend aan de hand van een Baysiaanse methode: $Belief = p(k)p(c) + (1 - p(k))(1 - p(c))$. Waarden voor deze vergelijking zijn gegeven door de krommen in Figuur 2.13.

De waarden uit de 'belief map' kunnen ook gebruikt worden als scores in de beslissingsmatrix.

2.3.5 De product ontwikkelingsfase in het ontwerpproces

Product generatie

Na het genereren en evalueren van concepten worden de beste keuzes verfijnd in producten. Deze producten worden dan geëvalueerd naar performantie,

kost en produceerbaarheid.

De in tegenstelling tot de conceptgeneratiefase ligt in de ontwerp- of ontwikkelingsfase de nadruk de vorm van de producten (daarom wordt dit stadium ook vaak 'shape design' of 'hardware design' genoemd). Het verfijningsproces verloopt iteraties: het ontwerp wordt achtereenvolgens gegenereerd en geëvalueerd waarna eventueel nieuwe verfijningen of wijzigingen toegepast worden.

Tekeningen zijn een belangrijk aspect van de productontwikkelingsfase. Ze worden gebruikt om:

- De geometrische vorm van het product te archiveren.
- Ideeën te communiceren tussen ontwerpers en tussen ontwerpers en productiepersoneel.
- Analyse te ondersteunen.
- De werking van het product te simuleren.
- De volledigheid van het product te controleren.
- Als extensie van het korte termijn geheugen van de ontwerpers.
- Te dienen als een synthese hulpmiddel (ongestructureerde ideeën samenbrengen en nieuwe concepten genereren).

Tijdens het maken van tekeningen moet nauwgezet te werk gegaan worden. Een studie van General Electric heeft aangetoond dat 60% van alle componenten niet gefabriceerd wordt zoals ze getekend zijn. De redenen hiervoor zijn verschillend:

- de tekeningen zijn onvolledig.
- de component kan niet gemaakt worden zoals gespecificeerd.
- de tekeningen zijn dubbelzinnig.
- de componenten kunnen niet samengesteld worden indien gefabriceerd zoals getekend.

Verskillende types tekeningen worden gegenereerd tijdens de productontwikkelingsfase:

Item	Part nr.	Hoeveelheid	Naam	Materiaal	Bron
1	63172-2	1	Buitenbuis	1018 Carbonstaal	Coyote Steel
2	94563-1	1	Rollager		Bearings Inc.
...
9		3	As	304 Roestvrij staal	Coyote Steel
10		1	Verbindingsrubber	Eurthaan	Reed Rubber

Tabel 2.5: Voorbeeld van een BOM

Layout tekeningen Ondersteund de ontwikkeling van de belangrijkste onderdelen en hun onderlinge relatie. Wordt op volgens schaal getekend en wordt vaak gewijzigd gezien ze fungeert als werkdocument. De belangrijkste dimensies worden getoond samen met de ruimtelijke constraints (toleranties worden niet aangeduid). Notities duiden een ontwerp feature of een specifieke functie van het product aan.

Detail tekeningen Hierop worden alle dimensies met toleranties aangeduid (standaard notaties zoals de '*ANSI Y14.5M-1994 Dimensions and Tolerances*' worden gebruikt). Materiaal en fabricage details moeten in duidelijke en specifieke taal gespecificeerd worden. De detail tekeningen worden gebruikt als communicatiemiddel met de productie en dienen bijgevolg goedgekeurd te worden door het management.

Assembly tekening Het doel is te illustreren hoe onderdelen van het product samengesteld worden. Assembly tekeningen worden net als detail tekeningen ondertekend door de project verantwoordelijke. Referenties naar andere tekeningen (en andere documenten) worden opgegeven. In het bijzonder wordt elk onderdeel geïdentificeerd met een letter of nummer verwijzend naar de 'Bill of Materials (BOM)'. Deze BOM of 'onderdelenlijst' is een index van het product die voor elk van de onderdelen van het product het item nr., het onderdeel nr., de nodige hoeveelheid, de naam of beschrijving van het onderdeel, het materiaal, de bron van de component bevat (voor externe onderdelen de naam van het leverend bedrijf). De BOM wordt typisch gemaakt in een spreadsheet. Een voorbeeld van een BOM is gegeven in Tabel 2.5.

CAD tekeningen in moderne CAD systemen is het onderscheid tussen de drie voorgaande types tekeningen vager (vanuit solid modellen kunnen op een semi-automatische manier detail en assembly tekeningen gegenereerd worden). Deze computertekeningen kunnen ook gebruikt worden om prototypes te creëren (zie Hoofdstuk 10 over Rapid Prototyping).

De productontwikkeling bevat een aantal basiselementen:

- **Vorm generatie:** ruimtelijke constraints, configuratie, connecties en componenten. De vorm generatie gebeurt hoofdzakelijk met behulp van layout tekeningen. De ruimtelijk constraints beschrijven de enveloppe van het product. Configuratie is de architectuur, structuur of ordening van componenten en assemblies van componenten in het product. Bij het definiëren van componenten moeten alle onderdelen die: (a) afzonderlijk bewegen, (b) uit een ander materiaal bestaan, (c) verplaatst moeten worden voor de toegankelijkheid, (d) materiaal of productiebeperkingen inhouden, (e) bestaan uit standaard elementen of (f) kosten kunnen besparen als component beschouwd worden. Merk op dat het onderverdelen in een groter aantal componenten vaak in grotere spanningen resulteert. Connecties ontwikkelen is het creëren en verfijnen van interfaces voor functions (relatieve posities van componenten). Enkele richtlijnen bij het ontwikkelen en verfijnen van interfaces: (a) interfaces moeten krachterevenwichten en een consistente stroming van energie, materiaal en informatie tonen. (b) na het ontwikkelen van interfaces met externe objecten moeten de interfaces die de meeste kritische functies uitoefenen ontwikkeld worden (moeilijkst te bereiken of belangrijkste klanteneis). (c) er moet getracht worden om de functionele onafhankelijkheid van de componenten te behouden (een variatie van een dimensie mag slechts één functie beïnvloeden). (d) let op bij het verdelen van het product in verschillende onderdelen (elk onderdeel kan een rol spelen in de verschillende functies). (e) decomposities kunnen die nieuwe functies impliceren kunnen geforceerd worden. Bij het ontwikkelen van een connectie wordt deze als een van volgende types geklasseerd: (a) vaste niet aanpasbare connectie, (b) aanpasbare connectie, (c) verdeelbare connectie, (d) locatie connectie, (e) pivoteer of hinge connectie. Deze connecties bepalen de vrijheidsgraden tussen verschillende onderdelen.

Ongeveer 20% van de dimensies in de meeste onderdelen van een apparaat zijn kritisch voor de performantie (de onderdelen voor functionele interface zijn meestal niet kritisch). Een aantal vormen worden vaak gebruikt in de component ontwikkelingsfase: een stang, een truss (gebruik makend van triangulatie), een holle cilinder en een I-profiel. Een krachtenstromings diagramma kan worden gebruikt om te visualiseren hoe krachten worden doorgegeven doorheen de componenten: (a) behandel de krachten zoals een vloeistof die doorheen de componenten stroomt. (b) de vloeistof neemt de weg van de minste weerstand, (c) schets meervoudige stromingslijnen, (d) label de stromingslijnen (T voor trekkracht, C voor drukkracht, S voor schuifspanning en B

voor buiging). Hierbij dient onthouden te worden dat krachten aan interfaces meestal trekkrachten zijn, terwijl schuifspanning voorkomt in adhesieven, lasnaden en wrijvingsinterfaces.

Na het ontwikkelen van componenten kunnen deze verfijnd (minder abstract gemaakt) en gepatched (veranderd zonder verfijning) worden. Verschillende types patches worden onderscheiden: combineren, decompositie, vergroten, verkleinen, herarrangeren, omdraaien en substitueren.

- **Materiaal.** Een ervaren ontwerper heeft reeds bij vroege concepten een lijst van mogelijke materialen in gedachten. De keuze van de materialen in het ontwerp wordt besproken in Hoofdstuk 9.
- **Productie:** fabricage en assembly. Bij zowel de productie als de materiaalkeuze zijn een aantal aspecten belangrijk: de hoeveelheid van het te produceren product, en de voorkennis m.b.t. de het gebruik in vergelijkbare toepassingen, de kennis en ervaring m.b.t. het materiaal of productieproces en de beschikbaarheid (van fabricagematerieel of onderdelen van verkopers). In Appendix B is een lijst van veelgebruikte materialen en hun eigenschappen weergegeven.

Product evaluatie

Het doel van dit stadium is het vergelijken van de performantie van een product met de engineering specificaties ontwikkeld in het vroegere stadium van het ontwerp proces.

De best-practices voor product evaluatie zijn hieronder beschreven:

Functionele veranderingen monitoren Bij de evolutie van het ontwerp project van concepten naar de ontwikkeling worden door de verfijning additionele functies toegevoegd. Er dient gewaakt te worden of de toegevoegde functies de oorspronkelijke basisfuncties niet tegenwerken.

Doelen van performantie evaluatie De product performantie evaluatie moet: (a) resulteren in numerieke waarden, (b) de evaluatie moet aanduiden welke kenmerken van het product eventueel moeten gewijzigd worden, (c) variaties te wijten aan productie, veroudering en omgeving moeten geïncorporeerd worden.

Nauwkeurigheid, variatie en ruis Het doel is een nauwkeurig evaluatie model (i.e. grote mate van correctheid) te ontwikkelen met een kleine variatie. Ruisfactoren (door productie, veroudering of omgeving) worden in rekening gebracht door het toepassen van veiligheidsfactoren.

Bovendien kan het ontwerp op dergelijke wijze gerealiseerd worden dat de ruisfactoren slechts een kleine invloed hebben op de kwaliteit van het product. Dit zogenaamd 'robust design' wordt verder besproken.

Modeleren van performantie Stap 1: identificeer de output parameters (kwaliteitsparameters) die gemeten moeten worden. Stap 2: noteer hoe nauwkeurig de outputs van het model moeten zijn (afhankelijk van het stadium in het ontwerp kan een eenvoudige berekening of een volledig eindig-elementen model nodig zijn). Stap 3: identificeer de input signalen, de controle parameters met hun limieten en de ruisfactoren. Stap 4: begrijp de mogelijkheden van analytische modellering m.b.t. de vereiste nauwkeurigheid, de noodzaak voor het gebruik van stochastische modellen en de nodige resources (kost, tijd, materieel en kennis). Stap 5: begrijp de capabiliteiten van fysische modellen. Stap 6: Selecteer de meest geschikte modelleer methode. Stap 7: voer de analyse of experimenten uit. Stap 8: verifieer de resultaten (zijn de targets voldaan? wat moet er veranderd worden?).

Tolerantie analyse De tolerantie van een onderdeel is verondersteld gelijk te zijn aan drie keer de standaardafwijking van een steekproef. Dit betekent dat 99.68% van alle samples binnen de tolerantie moeten vallen. Recent is er echter een trend naar het zogenaamde design for 6σ (dat uiteraard nog veel moeilijker te realiseren is). Bijgevolg heeft het specificeren van lage toleranties een belangrijke invloed op de kost van een onderdeel (zie Tabel 2.6).

Sensitiviteits analyse Sensitiviteitsanalyse is een manier om de statistische relatie tussen controle parameters van een ontwerp (v.b. de dimensies) en hun toleranties te onderzoeken.

Robuust ontwerp Deze methode werd ontwikkeld door Genichi Taguchi en bestaat uit volgende stappen: Stap 1: leid een relatie tussen de controle parameters en de kwaliteitskenmerken af. Stap 2: Genereer de vergelijking voor de standaardafwijking op de kwaliteitskenmerken gebaseerd op de standaardafwijking van de toleranties. Stap 3: los de vergelijking op om een minimum standaardafwijking te bekomen terwijl de targets nog bereikt worden. Hoewel het gebruik van fysische modellen mogelijk is worden meestal computermodellen gebruikt om deze methode te implementeren (zie ook Deel 3 : Computerondersteund ontwerpen).

Design for cost (DFC) Een van de moeilijkste doch belangrijke taken voor een ontwerpingenieur is het inschatten van de productie kosten. In de

Afwerking	Tolerantie	Kost (in%)
Ruw	0.75	10
Ruw	0.5	30
Ruw	0.25	37
Ruw	0.125	40
Semi-finish	0.063	60
Finish	0.025	100
Grind	0.012	260
Hone	0.006	390

Tabel 2.6: Relatieve kost van verschillende toleranties en bijbehorende afwerkingsgraden voor staal.

design-for-cost strategie worden de kosten actueel gehouden doorheen de verfijning van het product. De kost wordt verder in detail besproken (zie Hoofdstuk 4).

Value engineering Dit is een klantgeoriënteerde aanpak die ontwikkeld werd door General Electric in de jaren 1940. Het doel is het zoeken van de waarde van elke component of feature van een product t.o.v. de kost (zie ook verder in Sectie 4.3).

Design for manufacture (DFM) Met DFM wordt bedoeld het verwezenlijken van de vorm van componenten om een effectieve hoge kwaliteits productie toe te laten. Hierop wordt in deze cursus verder in gegaan in Hoofdstuk 7 (zie ook informatie uit de cursus 'Fabricagetechnologie').

Design for assembly (DFA) Hierbij wordt een product gemeten in termen van de efficiëntie van de montage (zie Hoofdstuk 6).

Design for reliability (DFR) Op de betrouwbaarheid van de ontwerpen wordt in deze cursus niet verder ingegaan. Zie hiervoor de cursus 'Betrouwbaarheid en risicoanalyse'.

Design for test and maintenance Hierbij spelen menselijke factoren zoals ergonomie een zeer belangrijke rol. Dit wordt verder behandeld in Hoofdstuk 5.

Design for the environment De methodologie van het milieukundig ontwerpen wordt steeds vaker aangewend in de praktijk. De verschillende aspecten van het zogenaamde 'Green Design' komen aan bod in Hoofdstuk 8.

2.3.6 Lanceren en ondersteunen van het product

De taak van de ontwerpingenieur houdt niet op wanneer het ontwerp in de productiefase is. In de concurrent engineering methodologie wordt ook een bijdrage geleverd aan de ondersteuning van : fabricage, verkoop, support. Bovendien worden de ontwerp ingenieurs ook meer en meer betrokken bij het afdanken van de producten en wordt reeds in een vroeg stadium van het ontwerp de duurzaamheid van de producten in rekening gebracht.

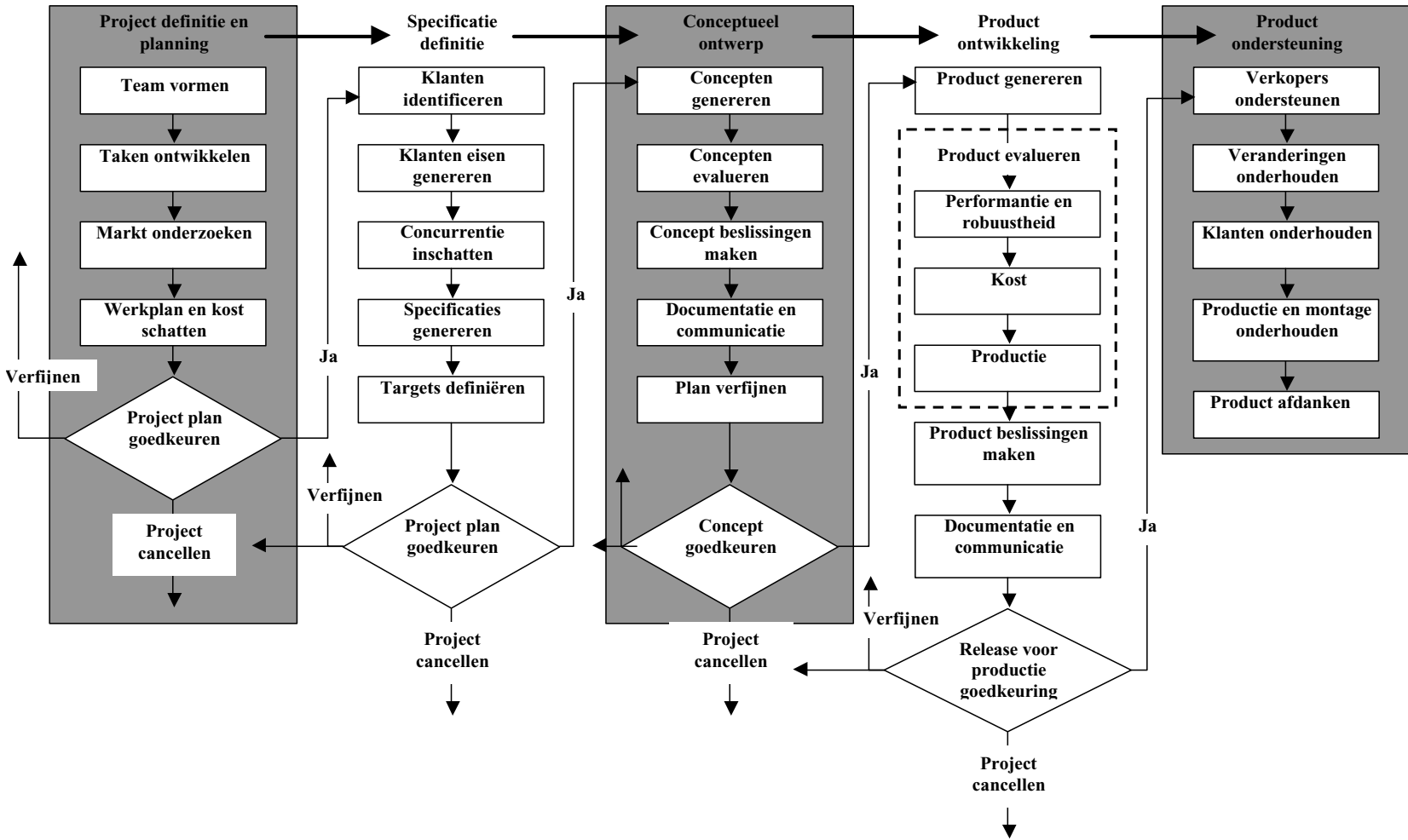
Naast de tekeningen die werden gemaakt tijdens het ontwerp proces moeten er nog bijkomende documenten opgesteld worden ter ondersteuning van de productie en verkoop van het product:

- Quality Control QC en Quality Assurance QA documentatie: wat moet er gemeten worden? Hoe? Hoe vaak?
- Fabricage richtlijnen: materieel, gereedschap processen.
- Assembly instructies: stap per stap documentatie die de samenbouw van producten beschrijft.
- Installatie instructies: unpacking, connecties (elektrisch), opstarten, testen.
- Operating instructions: opstarten, stand-by, normale werking, noodoperatie, afsluiten.
- Onderhoudsinstructies
- Afdank instructies (schadelijke producten, demonteren).

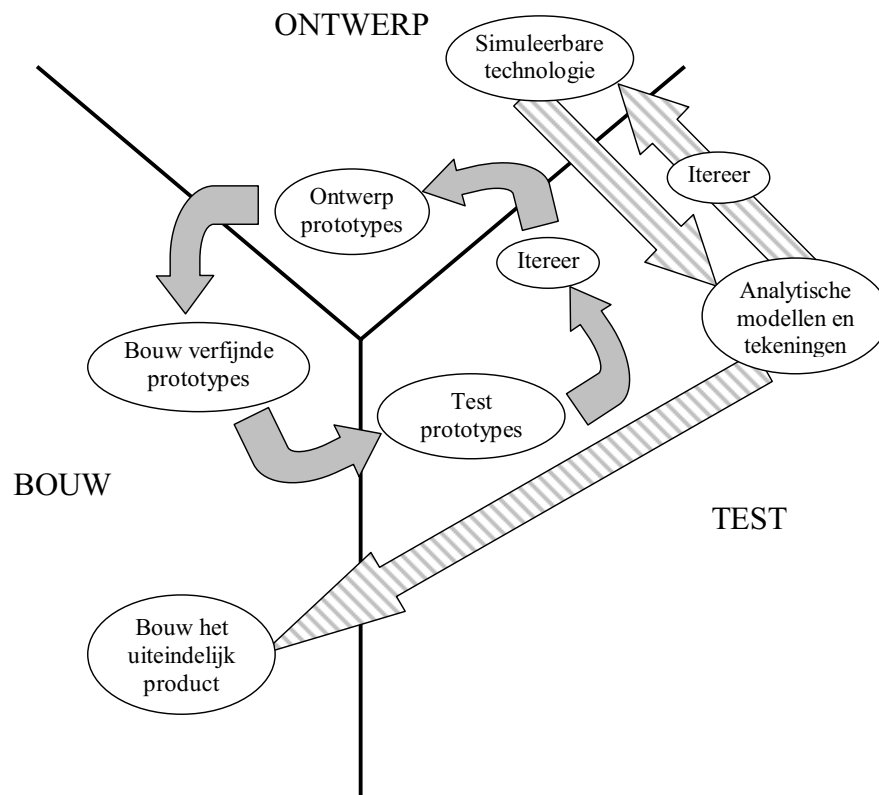
De support van het product neemt 20 tot 30% van de engineering tijd in beslag en omvat: ondersteunen van verkopers, interfacing met klanten, ondersteunen van fabricage en assembly en veranderingen onderhouden (als gevolg van ontwerp fouten, een verandering in de klanteneisen of een verandering in de materiaal of fabricageproces). Om dit laatste te verwezenlijken worden zogenaamde 'Engineering Change Orders (ECO)' samengesteld. Deze bevatten:

- De identificatie van wat gewijzigd worden (onderdeel nr.).
- De reden voor de verandering.
- De beschrijving van de verandering.
- Lijst van documenten en departementen betrokken in de verandering.

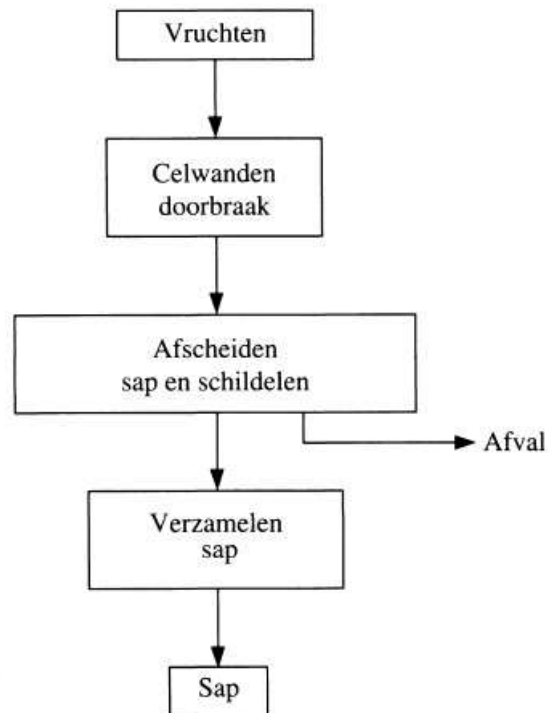
- De goedkeuring van de verandering.
- Instructies van het tijdstip van introductie van de wijziging (onmiddellijk, volgende productie run, later).



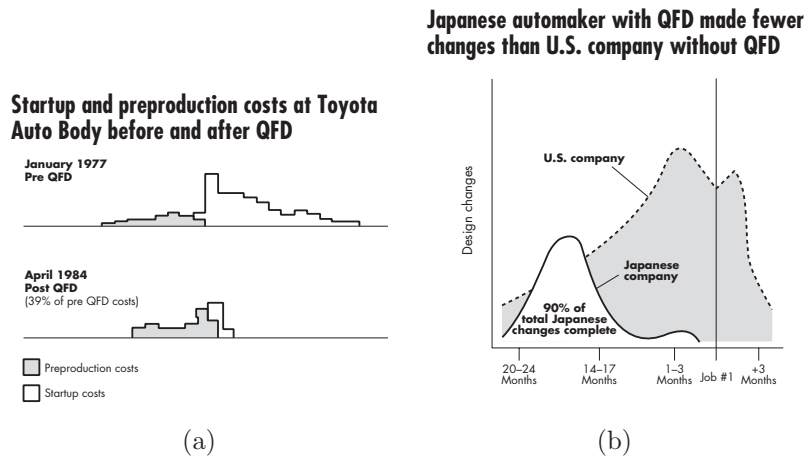
Figuur 2.2: Schematische voorstelling van het ontwerpproces).



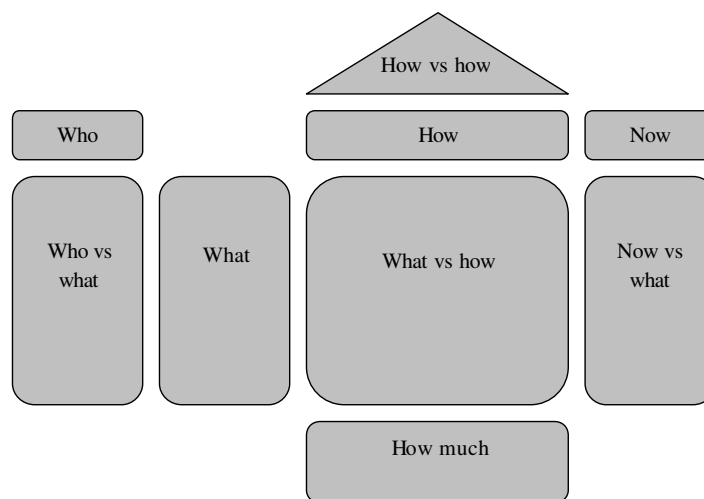
Figuur 2.3: Twee mogelijke cycli die gebruikt worden tijdens het ontwerp proces: de ontwerp-test-bouw cyclus (gearceerd) en de ontwerp-bouw-test cyclus (volle pijlen).



Figuur 2.4: Externe functies van een fruitpers, waarbij de hoofdfunctie het 'winnen van sap uit vruchten'.

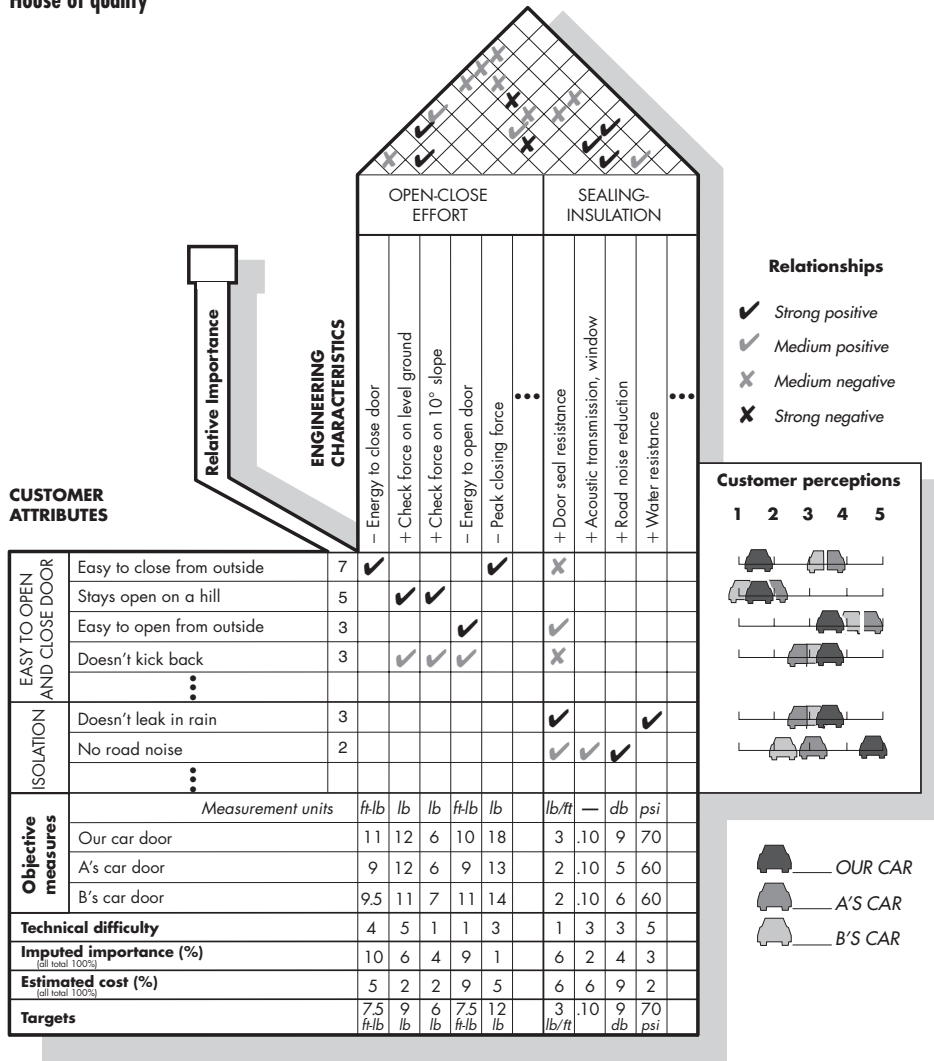


Figuur 2.5: (a) Kosten tijdens het ontwerp proces tijdens en voor de implementatie van de QFD aanpak. (b) Aantal veranderingen tijdens het ontwerp proces voor een Japanse (met QFD) en Amerikaanse (zonder QFD) automobielconstructeur.

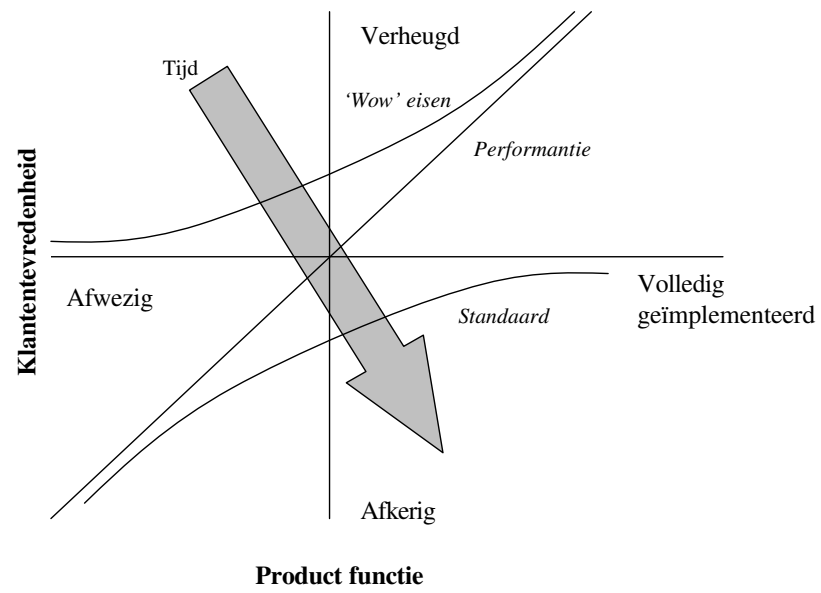


Figuur 2.6: Het 'house of quality'.

House of quality



Figuur 2.7: House of Quality van het ontwerp van een wagen deur (uit [9]).



Figuur 2.8: Het diagram van Kano.

<p>(19)</p>	 <p>Europäisches Patentamt European Patent Office Office européen des brevets</p>		<p>(11) EP 1 442 772 A1</p>
<p>(12) EUROPEAN PATENT APPLICATION</p>			
<p>(43) Date of publication: 04.08.2004 Bulletin 2004/32</p>		<p>(51) Int Cl.7: A63C 9/086</p>	
<p>(21) Application number: 04001260.1</p>			
<p>(22) Date of filing: 21.01.2004</p>			
<p>(84) Designated Contracting States: AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR Designated Extension States: AL LT LV MK</p>		<p>(72) Inventor: Okajima, Shinpei Izumi-shi Osaka (JP)</p>	
<p>(30) Priority: 31.01.2003 US 355232</p>		<p>(74) Representative: Grosse, Wolfgang, Dipl.-Ing. et al Patent- & Rechtsanwälte Grosse, Bockhorni & Schumacher, Forstenrieder Allee 59 81476 München (DE)</p>	
<p>(71) Applicant: Shimano Inc. 590-8577 Osaka (JP)</p>			
<p>(54) Snowboard binding</p>			

(57) A snowboard binding 12 includes a base member 22, a front binding member 24, a rear binding member 26, a front abutment section 42 and a rear abutment section 52. The front binding member 24 is coupled to the front portion 32 of the base member 22. The rear binding member 26 is coupled to the rear portion 34 of the base member 22. The front and rear binding members 24, 26 are arranged and configured to selectively engage a front and rear cleats of a snowboard boot 14. The front abutment section 42 extends upwardly from the front portion 32 of the base member 22 to laterally support the front binding member 24. The rear abutment section 52 extends upwardly from the rear portion 34 of the base member 22 to laterally support the rear binding member 26.

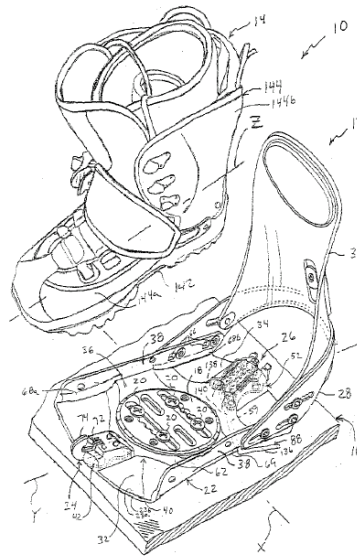


Fig. 1

EP 1 442 772 A1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

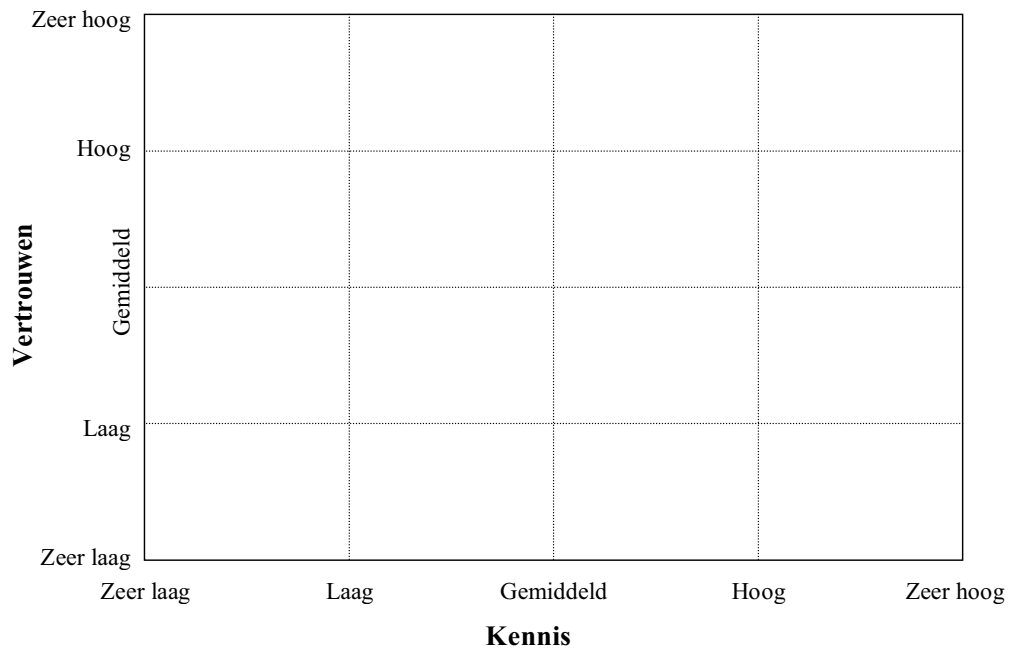
Figuur 2.9: Voorbeeld van de eerste pagina (uit 50) van een patent van een snowboard binding.

Handle Size	Handle Material	Striking Element	Weight of Hammer Head	Nail Removal Element
8 inches	Fiberglass with Rubber grip	1-inch diameter flat steel	12 oz	Steel claw at nearly a straight Angle
22 inches	Graphite with Rubber Grip	1-inch diameter grooved steel	16 oz	Steel claw at a 60 degree angle with handle
3 light years	Steel with rubber grip	Processed interior of a neutron star	20 oz	Conversion of the nail to pure energy
	Steel I-beam encased in kryptonite	1.25 inch-diameter grooved steel	1x10 ³²⁵ kg	
	Processed matter from the core of a white-dwarf star			

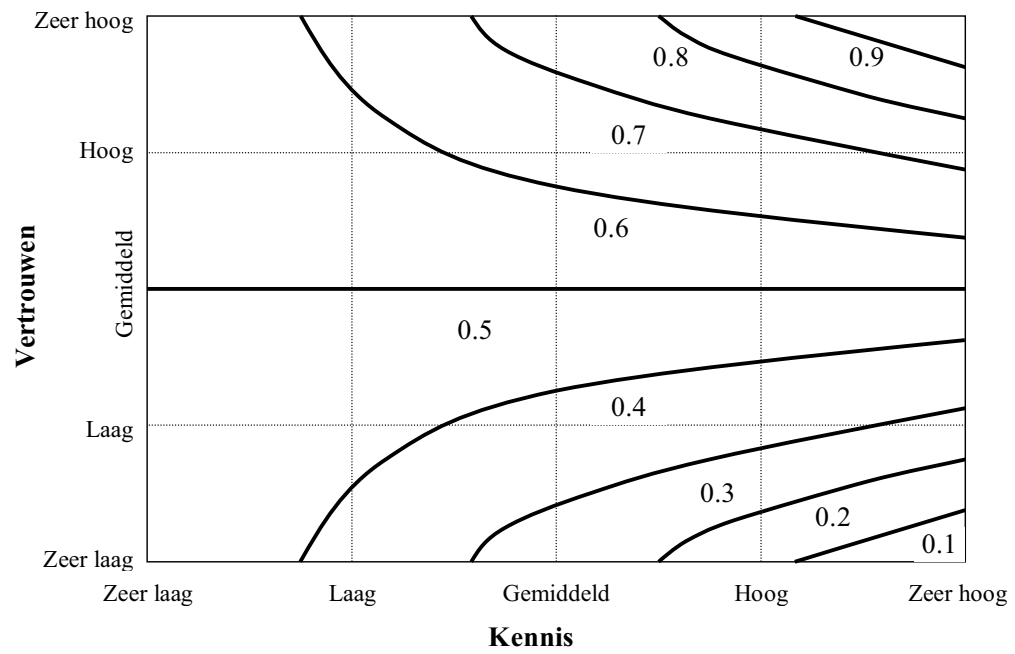
Figuur 2.10: Voorbeeld van morphologische matrix voor een hamer.

		Alternatieven			
1	2	Alternatief 1	Alternatief 2	Alternatief 3	3
Criteria	Belangrijkheid				
Criterion 1	xx	Evaluatie Alternatief 1 met Criterion 1	Evaluatie Alternatief 2 met Criterion 1	...	
Criterion 2	yy	Evaluatie Alternatief 1 met Criterion 2	Evaluatie Alternatief 2 met Criterion 2	...	4
Criterion 3	zz	Evaluatie Alternatief 1 met Criterion 3	Evaluatie Alternatief 2 met Criterion 3	...	
....				
	Tevredenheid	Score voor Alternatief 1	Score voor Alternatief 2	...	5

Figuur 2.11: De basis structuur van de beslissingsmatrix.



Figuur 2.12: Een blanco 'belief map'.



Figuur 2.13: Een blanco 'belief map' met Baysiaanse 'belief'-waarden.

Bijlage A

Veertig Inventieve TRIZ principes [1]

1. Fragmentatie

- (a) Verdeel een object in onafhankelijke onderdelen
- (b) Maak een object sectioneel
- (c) Verhoog de mate van segmentatie van een object

Voorbeelden:

- (a) sectioneel meubilair, modulaire computeronderdelen, vouwmeter, etc.
- (b) Tuinslang die kan verlengd worden door verschillende slangen met elkaar te verbinden.
- (c) Polyvalente zaal waarvan het volume kan gewijzigd worden.

2. Verwijdering: in tegenstelling tot vorig principe, wordt hier het object in niet-gelijke delen verdeeld.

- (a) Verwijder een storend onderdeel of eigenschap van een object.
- (b) Extraheer alleen het nodige onderdeel of eigenschap

Voorbeelden:

- (a) Om vogels te verschrikken op de luchthaven, reproduceer enkel het geluid dat vogels stoort.
- (b) De hulp generator van plezierjachten die gebruikt wordt als de motor niet in werking is wordt afgezonderd om geluid en trillingen te minimaliseren.

3. Lokale kwaliteit

- (a) Transitie van een homogene structuur van een object of omgeving tot een heterogene structuur.
- (b) Laat verschillende onderdelen van een object verschillende functies volbrengen.
- (c) Plaats ieder onderdeel van het object in condities die het meest voordelig zijn voor de werking.

Voorbeelden:

- (a) Om stof in mijnen tegen te gaan worden waterdruppels gebruikt. Fijne waterdruppels zijn effectief maar hinderen het zicht. Daarom wordt aan de buitenkant grove waterdruppels gebruikt en aan de binnenkant fijne druppels.
- (b) Een potlood en slijper in één.

4. Asymmetrie

- (a) Vervang een symmetrische vorm met een asymmetrische vorm van het object.
- (b) Verhoog de graad van asymmetrie.

Voorbeelden:

- (a) Eén kant van een band is sterker dan de andere om impact met de stoeprand te kunnen weerstaan.
- (b) Bij het ontladen van nat zand wordt een boog nabij de opening gevormd die irreguliere stroming veroorzaakt. Een asymmetrische trechter elimineert dit effect.

5. Combineren

- (a) Combineer objecten homogeen in ruimte of objecten voor naburigheid gebruik.
- (b) Combineer operaties homogeen in de tijd of opeenvolgende operaties.

Voorbeelden:

- (a) Het werkend element van een draaiende graafmachine heeft een speciale stoomuitlaat om de bodem tegelijkertijd te ontgooien en zachter te maken.

6. Universaliteit

- (a) Laat objecten meerder functies uitvoeren zodat de nood voor andere object geëlimineerd wordt.

Voorbeelden:

- (a) Een sofa de kan omgezet worden in een bed.
- (b) Een PDA met ingebouwde GSM

7. Nesten

- (a) Bevat een object in een ander object.
- (b) Laat een object passeren door een ander object

Voorbeelden:

- (a) Telescopische antenne.
- (b) Stapelstoelen.
- (c) Vulpotlood met vulling in het potlood.

8. Tegengewicht

- (a) Compenseer het gewicht van een object door het toevoegen van een ander object dat liftkracht genereert.
- (b) Compenseer het gewicht van een object door interactie met de omgeving zodat aerodynamische of hydrodynamische krachten worden ontwikkeld

Voorbeelden:

- (a) Boot met hydrofoils.
- (b) Een achterspoiler in racewagens om de druk van de wagen op de grond te verhogen.
- (c) hoek van windturbine schoepen wordt aangepast om toerental constant te houden.

9. Voorafgaandelijke tegen-actie

- (a) Indien het noodzakelijk is om een actie te ondernemen, neem dan vooraf tegenactie in overweging.
- (b) Indien de probleemstelling een trekkracht heeft, voorzie tegen-trekkracht op voorhand.

Voorbeelden:

- (a) Voorgespannen beton.
- (b) Voorgespannen as.

10. Voorafgaankelijk actie

- (a) Onderneem de nodig actie volledig of gedeeltelijk vooraf.
- (b) Orden objecten zodat actie kan worden ondernomen zonder wachten.

Voorbeelden:

- (a) Breekmes dat kan worden afgebroken wanneer het bot is.
- (b) Tippex in tapevorm.

11. Op voorhand opvangen

- (a) Compenseer een relatief lage betrouwbaarheid door op voorhand tegenacties te ondernemen.

Voorbeelden:

- (a) Om winkeldiefstal tegen te gaan worden gemagnetiseerde badges aan de waren bevestigd.

12. Equipotentialiteit

- (a) Verander de arbeidscondities zodat een object niet opgehouden of gezakt moet worden.

Voorbeelden:

- (a) Het vervangen van olie gebeurt in een put zodat de wagen niet moet worden opgekrikt.

13. Inversie

- (a) In plaats van een actie naar de specificaties van het probleem is een tegengestelde actie geïmplementeerd.
- (b) Maak een bewegend gedeelte van een object of de omgeving onverplaatsbaar en maak niet bewegende delen beweegbaar.
- (c) Draai een object om.

Voorbeelden:

- (a) Abrasief schoonmaken door de onderdelen aan het trillen te brengen i.p.v. het schuurmiddel.

14. Sferoidaliteit

- (a) Vervang rechtlijnige of vlakke onderdelen met gegolfde onderdelen.
- (b) Gebruik rollers, bollen, spiralen.
- (c) Vervang rechtlijnige beweging met roterende beweging, gebruik centrifugale kracht

Voorbeelden:

- (a) Computer muis gebruikt een bal om lineaire beweging in twee assen om te zetten in vector beweging.

15. Dynamiciteit

- (a) Laat de karakteristieken van een object of omgeving zich automatisch aanpassen voor optimale performantie.
- (b) Verdeel objecten in elementen die hun relatieve positie kunnen aanpassen.
- (c) Als een object niet beweegbaar is maak het beweegbaar.

Voorbeelden:

- (a) Een flitslicht met een flexibele darm.
- (b) Flaps bij een vliegtuig.

16. Gedeeltelijke of overdreven actie

- (a) Het is moeilijk om 100% effect te bekomen. Iets meer of minder verwezenlijken kan het probleem vereenvoudigen.

Voorbeelden:

- (a) Een cilinder kan geveerd worden door het in verf te dippen. Over-tollige verf wordt verwijderd door het object snel te roteren.
- (b) Om een uniforme ontlading van een metaalpoeder vat te bekomen wordt de trechter overvol gedaan om een constante druk te leveren.

17. Naar een andere dimensie gaan

- (a) Verwijder problemen door een object dat in een lijn te verplaatsen is twee-dimensioneel te bewegen, of een object dat in een vlak bewogen wordt in een drie-dimensionele ruimte te verplaatsen.
- (b) Gebruik een meerlagige samenbouw van objecten i.p.v. een éénlagige.
- (c) Inclineer objecten door ze op hun zijkant te plaatsen.
- (d) Projecteer beelden op naburige gebieden of op tegenovergestelde zijdes van het object.

Voorbeelden:

- (a) Een serre die een concave reflector heeft aan de noordkant om belichting aan die zijde te bevorderen.

18. Mechanische trilling

- (a) Laat een object oscilleren.
- (b) Als oscillatie bestaat, laat de frequentie toenemen (zelfs tot in het ultrasoon gebied).
- (c) Gebruik de resonantiefrequentie.
- (d) I.p.v. mechanische trillingen gebruik piezoactuatoren.
- (e) Gebruik mechanische trillingen tesamen met een electromagnetisch veld.

Voorbeelden:

- (a) Om een gipsverband te verwijderen zonder huidletsel wordt een handzaag vervangen door een trillend mes.
- (b) Breng een mal aan het trillen tijdens de vulling om de stroming en de structurele eigenschappen te verbeteren.

19. Periodische actie

- (a) Vervang een continue actie met een periodische of impuls actie.
- (b) Verander de frequentie van een periodische actie.
- (c) Gebruik pauzes tussen periodische acties

Voorbeelden:

- (a) Een impact sleutel lost gecorrodeerde moeren beter dan een continue.

(b) Een flitslamp wordt beter opgemerkt dan een continue lamp.

20. Continuïteit van zinvolle actie

(a) Voer een actie uit zonder onderbreking - alle onderdelen van een object moeten constant op volle capaciteit werken.

(b) Verwijder alle nietsdoende en intermediaire bewegingen.

Voorbeelden:

(a) Een boor met snijranden laat snijden in voorwaartse en achterwaartse beweging toe.

21. Erdoorheen haasten

(a) Voer een schadelijke of gevaarlijke operatie met een zeer hoge snelheid.

Voorbeelden:

(a) Een snijmachine voor dunwandige buizen maakt dat de buizen niet vervormen door zeer snel te bewegen.

22. Schade in voordeel omzetten

(a) Gebruik een schadelijke factor of effect van een omgeving om een positief effect te bekomen.

(b) Verwijder een schadelijke factor door het toevoegen van een ander schadelijke factor.

(c) Verhoog de hoeveelheid schadelijke actie totdat het ophoud schadelijk te zijn

Voorbeelden:

(a) Zand bevriest gedurende het transport door een koud klimaat. Door het over-vriezen m.b.v. vloeibare stikstof kan het gegoten worden.

(b) Met behulp van hoogfrequentie elektrische stroom wordt alleen de buitenste laag opgewarmd. Dit effect werd later gebruikt als oppervlakte warmte behandeling.

23. Feedback

(a) Introduceer feedback.

- (b) Keer de feedback om.

Voorbeelden:

- (a) Waterdruk uit een bron wordt constant gehouden door de druk te meten en met een pomp het waterniveau bij te regelen.
- (b) Lawaai reducerende apparaten meten het geluid en spelen het gemeten geluid in tegenfase af.

24. Mediator

- (a) Gebruik een intermediair object om een actie te transfereren of uit te voeren.
- (b) Verbind tijdelijk een object aan een ander object dat eenvoudig te verwijderen is.

Voorbeelden:

- (a) Om energieverlies te reduceren bij het gebruik van een elektrische stroom wordt een intermediair vloeibaar metaal met een lagere smelttemperatuur gebruikt.

25. Self-service

- (a) Maak het object zelf onderhoudend en zorg dat het additionele en herstelwerken kan uitvoeren.
- (b) Maak gebruik van het afval van materiaal of energie.

Voorbeelden:

- (a) Om schuurmiddel op pletwalsen gelijk te verdelen wordt het oppervlak gemaakt van hetzelfde schuurmiddel.
- (b) In een elektrisch lasapparaat wordt de voortstuwing van de lasstang gecontroleerd door de lasstroom.

26. Kopieëren

- (a) Gebruik eenvoudige en goedkope kopie in plaats van een object dat complex, duur, fragiel en moeilijk te bedienen is.
- (b) Vervang een object of een systeem van objecten door optische kopieën.
- (c) Wanneer zichtbare optische kopieën worden gebruikt, vervang ze door infrarode of ultraviolette exemplaren.

Voorbeelden:

- (a) De hoogte van grote objecten kan gemeten worden door hun schaduw te meten.

27. Een goedkoop object met kort leven i.p.v. een duurzaam

- (a) Vervang een duur object door een collectie goedkope.

Voorbeelden:

- (a) Wegwerpluiers.
- (b) Een muizenval met een konische opening waar de muis niet meer uit kan.

28. Vervanging van een mechanisch systeem

- (a) Vervang een mechanisch systeem door optische, akoestische of reuksystemen.
- (b) Gebruik elektrische, magnetisch of elektromagnetische velden voor de interactie met objecten.
- (c) Vervang velden: stationair door bewegend, vast door veranderend, random door gestructureerd.
- (d) Gebruik een veld tesamen met ferro-magnetische partikels.

Voorbeelden:

- (a) Om de binding tussen een metaalcoating en een thermoplast te verbeteren wordt het proces uitgevoerd in een elektromagnetisch veld om een kracht op het materiaal toe te passen.

29. Gebruik een pneumatische of hydraulische constructie

- (a) Vervang solide onderdelen van een object door gas of vloeistof.

Voorbeelden:

- (a) Om de tocht in een industriële schoorsteen te verhogen wordt een spiraalvormige pijp met een tuit gebruikt. Wanneer de lucht door de tuit stroom creëert het een muur van lucht die de drag verlaagd.
- (b) Voor het vervoer van fragiele producten worden enveloppes met luchtkussens gebruikt.

30. Flexibele of dunne membramen

- (a) Vervang algemene objecten door flexibele membranen of dunne filmen.
- (b) isoleer een object van de buitenomgeving door een dunne film of membraan.

Voorbeelden:

- (a) Om het verlies van water dat verdampt van planten wordt een polyethyleen spray gebruikt. Hierdoor groeit de plant beter.

31. Gebruik poreus materiaal

- (a) Maak een object poreus door het toevoegen van extra poreuze elementen.
- (b) Als een object reeds poreus is, vul de porieën op voorhand met een substantie.

Voorbeelden:

- (a) Om het oppompen van koelvloeistof van een machine te vermijden worden sommige onderdelen gevuld met poreus materiaal (poreus poedermetaal) dat gedrenkt wordt in koelvloeistof dat verdampt als de machine in werking is. Dit levert een korte termijn uniforme koeling.

32. Verander de kleur

- (a) Verander de kleur van een object of de omgeving.
- (b) Verander de doorzichtigheid van een object of zijn omgeving.
- (c) Gebruik gekleurde additieven om processen te visualiseren die die moeilijk te observeren zijn.
- (d) Indien zulke additieven reeds gebruikt worden gebruik oplichtende spoorelementen.

Voorbeelden:

- (a) Een transparant bandage die het inspecteren van de wonde mogelijk maakt.
- (b) In staal walsen wordt een watergordijn ontwikkeld om arbeiders te beschermen van overhitting. Dit gordijn werkt alleen voor infrarood licht. Door het toevoegen van een kleur aan het licht wordt een filter effect bereikt.

33. Homogeneity

- (a) Laat een object interageren met een primair object van hetzelfde materiaal of een materiaal dat vergelijkbaar is qua gedrag.

Voorbeelden:

- (a) Het oppervlak van een voeding voor schuurkorrels is gemaakt van hetzelfde materiaal dat door de voeding loopt. Dit maakt dat een continue restoratie van het oppervlak mogelijk is zonder slijtage.

34. Regenereren en afwijzen van onderdelen

- (a) Na het vervolledigen van de functie verwerp of wijzig een element of object.
- (b) Restitueer gebruikte onderdelen.

Voorbeelden:

- (a) Kogelhulzen worden weggeschoten na een schot.
- (b) Raket boosters worden afgescheiden na de lancering.

35. Transformatie van fysische en chemische statussen van een object

- (a) Verander de status van een object, concentratie of dichtheid, graad van flexibiliteit, de temperatuur.

Voorbeelden:

- (a) In een systeem voor broze materialen wordt het oppervlak van een voedingsschroef gemaakt van een elastisch materiaal met twee spiraalveren. Om het proces te controleren wordt de snelheid van de schroef vanop afstand verandert.

36. Fase transitie

- (a) Implementeer een effect ontwikkeld gedurende de transitie fase van een substantie (verandering van volume, vrijkomen van hitte of absorptie).

Voorbeelden:

- (a) Om de uitzetting van geribde pijpen te controleren worden ze gevuld met water en gekoeld tot een vriestemperatuur.

37. Thermische expansie

- (a) Gebruik expansie of contractie van een materiaal door warmte.
- (b) Gebruik verschillende materialen met verschillende uitzettingscoëfficiënten.

Voorbeelden:

- (a) Om de opening van een dakvenster in een serre te controleren worden bimetaal platen gebruikt die het raam met een verandering van temperatuur openen of sluiten.

38. Gebruik sterke oxidatoren

- (a) Vervang lucht door verrijkte lucht.
- (b) Vervang verrijkte lucht door zuurstof.
- (c) Behandel in lucht of in zuurstof met ioniserende straling.
- (d) Gebruik geïoniseerde zuurstof.

Voorbeelden:

- (a) Om meer warmte uit een lasapparaat te verkrijgen wordt zuurstof i.p.v. lucht gebruikt.

39. Voeg een omgeving toe

- (a) Vervang de normale omgeving met een inerte.
- (b) Voer het proces uit in vacuüm.

Voorbeelden:

- (a) Om te vermijden dat katoen vuur vat in een opslagplaats wordt het behandeld met een inert gas gedurende transport en stockage.

40. Samengestelde materialen

- (a) Vervang een homogeen materiaal door een composietmateriaal.

Voorbeelden:

- (a) Militaire vliegtuigvleugels.

Bibliografie

- [1] G. S. Altschuller. *Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems*. Gordon and Brach Science Publishers, New York.
- [2] D.E. Carter and B.S. Baker. *Concurrent engineering: the product development environment for the 1990s*. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1992.
- [3] G. E. Dieter. *Engineering Design, A Materials and Processing Approach*. McGraaw-Hill, New York, 1986.
- [4] S. Donders and H. Van der Auweraer. Engineering approach for robust vibro-acoustic design optimization. In *Proceedings of the 16th ISAAC Seminar (International Seminar on Advanced Techniques in Applied and Numerical Acoustics)*, 2004.
- [5] H. Eschenauer, N. Olhoff, and W. Schnell. *Applied Structural Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1997.
- [6] R. Fletcher. *Practical Methods of Optimization. Volume 1: unconstrained optimization*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1980.
- [7] R. Fletcher. *Practical Methods of Optimization. Volume 2: constrained optimization*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1980.
- [8] D. Goldberg. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley, Reading, USA, 1989.
- [9] J. R. Hauser and D. Clausing. The house of quality. *Harvard Business Review*, May-June, 1988.
- [10] N. Kano, N. Seraku, F. Takahashi, and S. Tsuji. Attractive quality and must-be quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, pages 39–48, 1984.

- [11] G. E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), 1965.
- [12] NN. *Werktuigbouwkundig Ontwerpen en Construeren*. tenHagenStam uitgevers, Den Haag.
- [13] NN. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Project Management Institute, Pennsylvania, USA, 2000.
- [14] NN. Software in design. Cursustext Faculteit Industrieel Ontwerpen, Technische Universiteit Delft, 2004.
- [15] B. Prasad. *Concurrent engineering fundamentals*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1996.
- [16] D. G. Ullman. *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill, New York, 3rd edition edition, 2003.
- [17] K. Ulrich and S. A. Pearson. Assessing the importance of design through product archaeology. *Management Science*, 44(3):352–269, 1998.
- [18] Paul Verhaert. *De praktijk van de productontwikkeling*. ACCO, Leuven.
- [19] Akoa Y. New product development and quality assurance - quality deployment system. *Quality Control*, 25(4):7–14, 1972.
- [20] T. Zang, M. Hensch, M. Hilburger, S. Kenny, P. Maghami J. Luckring, S. Padula, and Virginia W. Jefferson Stroud Langley Research Center, Hampton. Needs and opportunities for uncertainty-based multidisciplinary design methods for aerospace vehicles. Technical Report NASA/TM-2002-211462, NASA, Langley Research Center, 1992.
- [21] F. Zwicky. *Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach*. The MacMillan Company, Toronto.
- [22] F. Zwicky. *The Morfological Method of Analysis and Construction*. Courant Anniversary Volume. Wiley-Interscience, New York.