
Reader Ontwerpmethoden

WB1641 Werktuigkundig Ontwerpproject 1

Regine Vroom, Bob van Vliet



2024-08-30

Inhoudsopgave

Inleiding Reader Ontwerpmethoden	2
Uitgangspunten en doelstelling van het ontwerponderwijs in de BSc-Wb	2
Ontwerpen op academisch niveau	2
Ontwerpkwaliteiten nader toegelicht	2
Hele proces in elk project, op steeds hoger niveau	4
Het Werktuigbouwkundig Ontwerpproces	4
Criteria in het Programma van Eisen	5
Oplossingsonafhankelijke Criteria versus Specificaties	5
Verschillende Soorten Criteria	6
Functionele Eisen	6
Randvoorwaarden	6
Prestatiecriteria	7
Overzicht	7
Criteria Toetsbaar Formuleren	8
Toetsbaar Formuleren is Operationeel Formuleren	8
Toegankelijkheid	9
Ideeën schetsen in een ‘HKJ’-sessie	10
Deeloplossingen Verzamelen in een Morfologische Kaart	11
Vorm	11
Aanpak	13
Stap 1: Deelfuncties formuleren	13
Stap 2: Deeloplossingen schetsen	14
Stap 3: Maak een morfologische kaart	14
Stap 4: Zoek kansrijke combinaties	14
Concepten Beoordelen met de Gewogen Criteria Methode	15
Stap 1: Selecteer de relevante criteria	15
Stap 2: Voorspel de prestaties	15
Stap 3: Rangschik de criteria van meest naar minst belangrijk	16
Stap 4: Bepaal weegfactoren	17
Stap 5: Bepaal scores voor de concepten	18
Stap 6: Analyseer en bediscussieer het resultaat	19
Stap 7: Presenteer een gecombineerde tabel	20

Inleiding Reader Ontwerpmethoden

Ontwerpen is een onvoorspelbaar, complex, en iteratief proces. Er is niet één juiste manier van ontwerpen. Hoe je een ontwerpproject het beste aan kunt pakken hangt af van het project.

Om toch grip te krijgen op dit onvoorspelbare proces, zijn er verschillende ontwerpmethoden ontwikkeld, gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek naar de werkwijze van ervaren professionals. Maar ook op de vraag welke van deze methoden de beste is, of welke aanpak voor een bepaald project het meest geschikt is, is geen simpel en algemeen geldig antwoord te geven. Alleen door veel ervaring op te doen leer je inschatten wanneer het zinnig is om een bepaalde methode toe te passen, en wanneer niet.

Dit betekent niet dat je tot die tijd zomaar iets kunt doen. Bij Werktuigbouwkunde in Delft pakken we ontwerpprojecten aan op een manier die bewezen effectief is en die een goede basis biedt om op door te bouwen. De stappen in deze methode zal je een aantal keer moeten doorlopen om de ervaring op te doen die nodig is om zelfstandig vorm te kunnen geven aan een ontwerpproject.

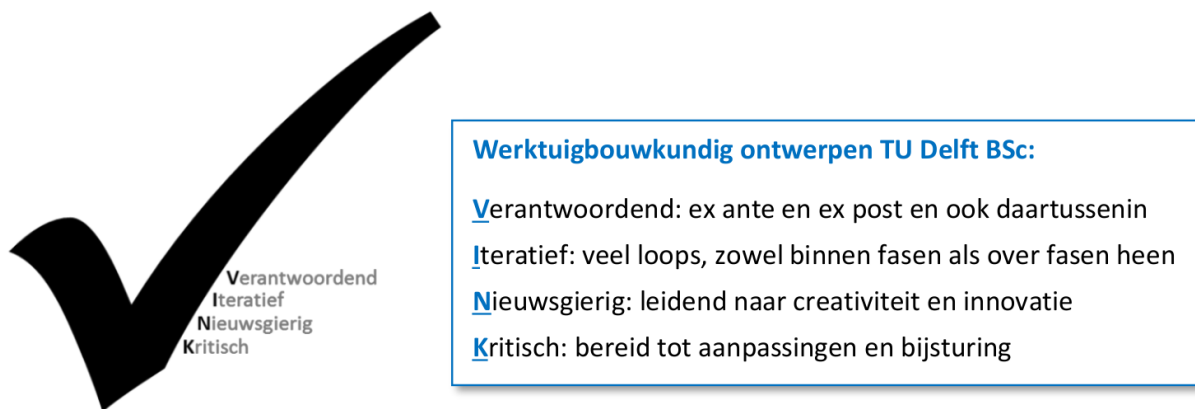
Uitgangspunten en doelstelling van het ontwerponderwijs in de BSc-Wb

Ontwerpen op academisch niveau

Ontwerpen op academisch niveau is (nog) meer dan werkende apparaten maken. Niet alleen het resultaat telt, maar ook de aanpak en de verantwoording, nodig om generieke kennis te benutten en te genereren. De grondbeginselen die het ontwerpproces academische waarde geven en het mogelijk maken de kennis uit de reguliere vakken te integreren worden hieronder verwoord en zijn samengevat in [Figuur 1](#).

Ontwerpkwaliteiten nader toegelicht

Van onze afgestudeerde Bachelors werktuigbouwkunde wordt verwacht dat zij zelfstandig een ontwerpproces voor het ontwikkelen van een technisch systeem kunnen opzetten en uitvoeren. Het ontwerpproces moet daarbij zijn afgestemd op het ontwerpdoel en de omstandigheden. En bij het uitvoeren van het ontwerpproces moeten steeds de voortgang, de tussenresultaten en de koers worden geëvalueerd ten opzichte van de doelstellingen om waar nodig de genomen ontwerpbeslissingen en het proces bij te sturen of bij te stellen. Ook het doel zelf zal met het voortschrijdend inzicht opgedaan tijdens het ontwerptraject steeds kritisch worden beschouwd en waar nodig worden bediscussieerd met belanghebbenden en eventueel worden bijgesteld.



Figuur 1: De kwaliteiten die worden verwacht bij het ontwerpen in de Bachelor Werktuigbouwkunde aan de TU Delft (Herder e.a. 2016)

Hiervoor is het nodig dat de BSc-Wb een **kritische en nieuwsgierige** houding heeft ten aanzien van de opdracht, ten aanzien van de mogelijke oplossingsrichtingen en ten aanzien van het eigen werk en dat van anderen. Bovendien zal het ontwerpproces in hoge mate **iteratief** worden doorlopen zowel binnen fasen als over de fasen heen om daarmee het doel, de koers en de resultaten op elkaar te blijven afstemmen. Bij ontwerpen wordt geredeneerd van doel (te realiseren functie) naar een ontwerp. Vele ontwerpen kunnen het doel verwezenlijken en het is aanvankelijk onzeker welke ontwerprichting het meest doelmatig is. Het ontwerpproces is daarmee net als elk wetenschappelijk proces in de grond van de zaak een iteratief proces, waarin de kennis over het probleem en het ontwerp tijdens het proces toeneemt. Door deze kritische en nieuwsgierige houding en systematische aanpak gecombineerd met kennis van ontwerpprocessen en ontwerptechnieken zal de BSc-Wb in staat zijn:

- de **tussenresultaten te verantwoorden en te onderbouwen** naar de gestelde en eventueel bijgestelde doelstellingen en tevens
- het **eindresultaat** (de gerealiseerde eigenschappen en prestaties van het ontwerp) te voorspellen, te **verantwoorden en te onderbouwen**. Bovendien heeft de BSc-Wb voldoende analytische vaardigheden om eventuele afwijkingen in de gerealiseerde prestaties te verklaren op basis waarvan een verbetertraject kan worden ingesteld of een realiteitsbijstelling ten aanzien van de verwachtingen kan worden gemaakt.

Met andere woorden, de BSc-Wb moet in het ontwerpen zowel aan de voorkant van het proces (ex ante) als aan de achterkant van het proces (ex post) de genomen ontwerpbeslissingen kunnen verantwoorden en daarmee kunnen overtuigen van de juistheid van het resultaat.

Hele proces in elk project, op steeds hoger niveau

Het ontwerpproces wordt in de BSc-Wb-opleiding meermalen doorlopen, steeds op een hoger niveau van zelfstandigheid en complexiteit.

Het Werktuigbouwkundig Ontwerpproces

Tip

Kijk [deze interactieve video](#) voor een overzicht van het ontwerpproces

In Delft doorlopen we ontwerpprojecten in de volgende stappen of fasen, op basis van het model van Pahl en Beitz (Rozenburg en Eekels 1998).

1. Oriënteren & Analyseren
 - Opdracht analyseren
 - Hoofd- en deelfuncties bepalen
 - Programma van eisen opstellen
2. Ontwerpruimte verkennen & Experimenteren
 - Alternatieve (deel-)oplossingen en werkingsprincipes bedenken en verzamelen
 - Verschillende ontwerprichtingen verkennen
3. Alternatieven ontwikkelen & Concept kiezen
 - De meest kansrijke varianten ontwikkelen tot complete concepten
 - De prestatie van de verschillende concepten voorspellen
 - Een concept kiezen
4. Optimaliseren & Detailleren
 - Systemgedrag modelleren en optimaliseren
 - Details uitwerken
 - Fabricage plannen
 - Ontwerp vastleggen in technische tekeningen
5. Maken & Testen
 - Prototype maken
 - Objectieve metingen en tests uitvoeren
6. Analyseren & Itereren

- Gedrag van prototype evalueren en analyseren
- Gerealiseerde prestatie vergelijken met verwachte prestatie
- Ontwerp verder ontwikkelen

Criteria in het Programma van Eisen

Voor elk ontwerp gelden bepaalde voorwaarden, doelen, en beperkingen. Die leg je vast in een programma van eisen (PvE). Hierbij zijn drie dingen belangrijk:

- Oplossingsonafhankelijkheid
- Onderscheid maken tussen verschillende soorten criteria
- Toetsbaar formuleren Ook compleetheid en ongewenste redundantie in de criteria spelen een rol. Daar komen we in een later stadium op terug.

Hieronder bespreken we de eerste drie punten.

Oplossingsonafhankelijke Criteria versus Specificaties

De criteria in het programma van eisen wil je zó formuleren dat ze de ontwerpruimte zo min mogelijk inperken. Je wil vastleggen wat je wil bereiken, niet hoe je dat gaat doen. Het idee is om een probleem te definiëren, onafhankelijk van de oplossing daarvoor.

Wanneer er criteria in een programma van eisen staan zoals ‘het mechanisme moet van staal zijn’, terwijl het eigenlijke doel is om een zo sterk en stijf mogelijke constructie te ontwerpen, dan heb je de ontwerpvrijheid nodeloos ingeperkt. Misschien is er wel een oplossing met composiet te ontwikkelen, bijvoorbeeld, die niet alleen sterk genoeg is, maar ook lichter, en sneller te produceren.

Zo'n eis is eigenlijk geen ontwerpcriterium. Het is een specificatie. In plaats van een meetlat om het ontwerp mee te beoordelen is het een voorgeschreven ontwerpbeslissing, een stuk van het ontwerp dat al vast ligt. Als een bepaald onderdeel of aspect van het ontwerp al gespecificeerd is, is daar geen ontwerpwerk meer voor nodig.

Hoe minder specificaties, hoe beter. De kans is dan groter dat je echt iets verrassends kunt verzinnen. Maar vaak zijn er wel degelijk een aantal elementen van het ontwerp die al gegeven zijn. De afmetingen van een montagepunt zijn bijvoorbeeld al bepaald, of er moet van de opdrachtgever gebruik gemaakt worden van een standaard productietechniek, of een bestaande motor, of een specifiek materiaal.

Specificaties neem je op onder een apart kopje, achteraan het programma van eisen. Binnen het daadwerkelijke programma van eisen probeer je juist om criteria zo oplossingsonafhankelijk mogelijk te formuleren.

Verschillende Soorten Criteria

Er zijn verschillende soorten criteria. Naast de specificaties maken we in het programma van eisen onderscheid tussen drie typen.

Vaak draait een ontwerpproject erom dat het ontwerp met beperkte middelen een bepaald doel weet te bereiken. Het doel definieer je in *functionele eisen*. De beperkingen aan de beschikbare middelen leg je vast in *randvoorwaarden*.

Functionele eisen en randvoorwaarden vormen het minimum waar een ontwerp aan moet voldoen. Maar als ontwerper ga je altijd op zoek naar meerdere manieren om binnen de randvoorwaarden te voldoen aan de functionele eisen. Daar zijn altijd alternatieven voor.

Je wil niet zomaar een oplossing, je wil een zo goed mogelijk ontwerp. Je stelt *prestatiecriteria* op om onderscheid te kunnen maken tussen de kwaliteit van verschillende opties die allemaal voldoen aan de minimale voorwaarden.



Tip

Kijk [deze interactieve video](#) over de verschillende typen criteria in een programma van eisen.

Functionele Eisen

In functionele eisen leg je vast wat een ontwerp in ieder geval moet kunnen. Wat moet het ontwerp precies gaan doen? Deze criteria moeten zo geformuleerd zijn dat ze een harde grens hebben: het ontwerp voldoet wel of niet aan een functionele eis.

Bijvoorbeeld: ‘De fiets moet het gewicht van twee personen kunnen dragen.’

Randvoorwaarden

In randvoorwaarden leg je vast welke middelen je wel en niet in mag zetten om de doelen uit de functionele eisen te bereiken. Randvoorwaarden beperken de ontwerpruimte. Hiermee leg je vast wat wel en niet mag en kan.

Voorbeelden hiervan zijn maximale kosten, minimale levensduur, en/of bepaalde afmetingen waar het ontwerp binnen moet blijven. Randvoorwaarden zijn net als functionele eisen geformuleerd met een harde grens: het ontwerp voldoet wel of niet.

Prestatiecriteria

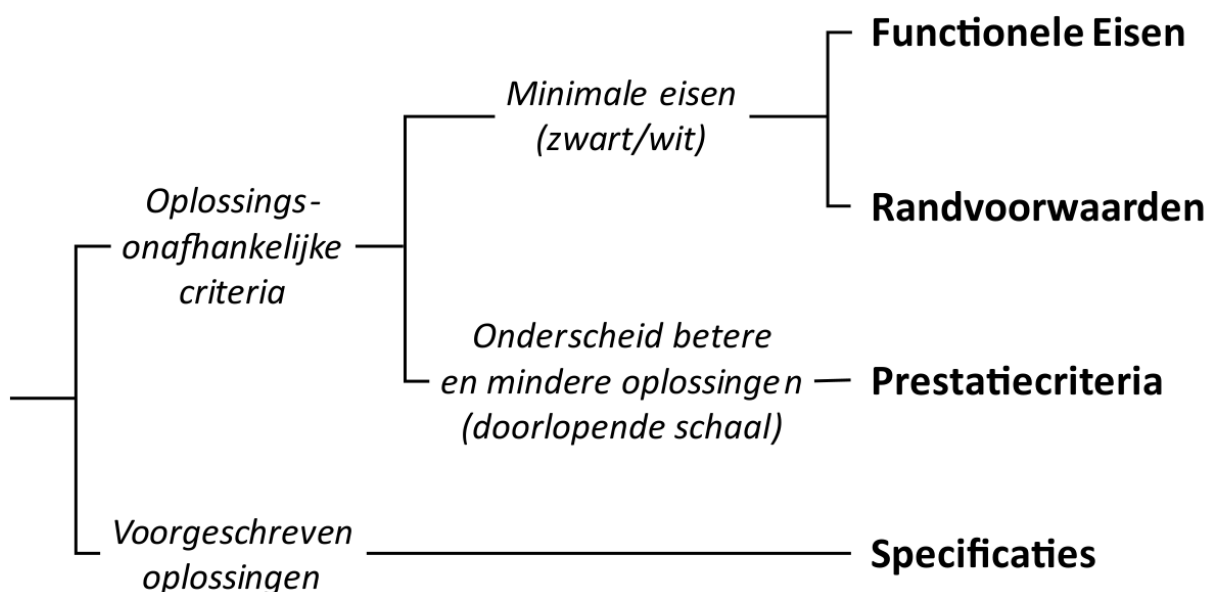
Wanneer aan de minimale voorwaarden is voldaan, vormen prestatiecriteria de meetlat waarmee de kwaliteit van een ontwerp beoordeeld kan worden. Wat maakt het beter of slechter? Welke eigenschappen wil je minimaliseren of maximaliseren? Voor prestatiecriteria zijn er géén harde grenzen; verschillende ontwerpen scoren beter of minder goed.

Voorbeelden zijn gewicht, efficiëntie, snelheid, levensduur, onderhoud, etc.

Overzicht

De verschillende typen criteria in een Programma van Eisen zijn te onderscheiden op basis van drie eigenschappen:

- Oplossingsonafhankelijke criteria versus voorgeschreven oplossingen.
- Minimale, wel/niet-geformuleerde eisen met een harde grens versus prestatiecriteria op - veelal - een doorlopende schaal.
- Actieve functionele doelstellingen die beschrijven wat het ontwerp moet doen versus randvoorwaarden die de grenzen aan de inzetbare middelen aangeven.



Figuur 2: Onderverdeling van verschillende typen criteria in een Programma van Eisen

Criteria Toetsbaar Formuleren

Voor álle criteria – voor functionele eisen, randvoorwaarden, prestatiecriteria, én voor specificaties – geldt dat ze toetsbaar geformuleerd moeten zijn. Dat wil zeggen: voor elk criterium moet het mogelijk zijn om objectief vast te stellen of en in hoeverre een ontwerp eraan voldoet. Criteria waarvan je niet kunt bepalen of een ontwerp eraan voldoet zijn nutteloos.

Toetsbaar Formuleren is Operationeel Formuleren

Neem bijvoorbeeld het ontwerpdoel ‘het ontwerp moet gemakkelijk te produceren zijn’. Wat betekent ‘gemakkelijk’ hier? Dit criterium is te algemeen geformuleerd. Is het belangrijk dat het snel te produceren is? Met weinig energie? Op een manier die voor ongeschoolde werknemers te begrijpen is? Of willen we vooral dat het weinig arbeid kost? Simpelweg dat het goedkoop is? Of met weinig investering in nieuwe productiemiddelen? Dit zijn allemaal verschillende manieren om dit criterium concreter te maken. In het ene project zal de ene de overhand hebben, in een ander zal het vooral om een van de andere punten draaien.

Het verhelderen of concreet maken van de specifieke technische betekenis heet het *operationaliseren* van criteria. Een operationeel criterium heeft een specifieke technische betekenis waarvan het duidelijk is hoe je dat objectief vast stelt.

Om criteria goed te operationaliseren moet je je dus afvragen wat je precies bedoelt met bijvoeglijk naamwoorden zoals ‘goed’, ‘makkelijk’, of ‘comfortabel’.

Bijvoorbeeld:

- Wat betekent ‘goed te produceren’?
 - Aantal onderdelen?
 - Productietijd?
 - Investeringskosten voor benodigde machines?
 - ...?
- Wat betekent ‘betrouwbaar functioneren’?
 - Frequentie waarmee een onderdeel vervangen moet worden?
 - Aantal keer per jaar dat een monteur nodig is?
 - Totale levensduur?
 - * In jaren?
 - * In kilometers?
 - * In aantal keer gebruikt?
 - * In verwerkte hoeveelheid input?

- * ...?
- Percentage uptime?
- ...?
- Wat betekent ‘makkelijk te bedienen’?
 - Hoe veel uitleg/training er nodig is voordat een gemiddelde gebruiker een bepaald prestatieniveau bereikt?
 - Aantal handen dat nodig is?
 - Nodige bedieningskracht?
 - Tijd totdat vermoeiing optreedt?
 - Score op een gestandaardiseerde test?
 - ...?

Merk op dat deze voorbeelden allemaal een objectief vast te stellen waarde definiëren, maar niets zeggen over of er een minimum of maximum is, of dat het doel is zo veel of zo min mogelijk. Het kan een *functionele eis* zijn dat een voertuig minimaal een last van 3 ton kan dragen, en/of er kan een prestatie criterium zijn dat deze waarde zo hoog mogelijk moet zijn. Of er nu een harde grens is of niet, voor alle criteria moet duidelijk zijn op welke schaal ze te meten zijn. Alleen dán kun je een ontwerp er objectief aan toetsen.

In bijzondere gevallen kun je een subjectief criterium toetsbaar maken door de toetsmethode in het criterium op te nemen. Je kunt dan aangeven op welke wijze hoeveel subjectieve uitspraken verzameld moeten worden om een resultaat voor een specifiek project acceptabel te kunnen vastleggen. Daarbij is het met name van belang dat het inzichtelijk is op basis waarvan de ontwerpkeuzes worden gemaakt. In de praktijk wordt in zulke gevallen bijvoorbeeld een marktonderzoek gedaan of een nieuwheidsonderzoek in een octrooidatabase.

 Tip

Kijk ook [deze interactieve video](#) over het toetsbaar formuleren van criteria.

Toegankelijkheid

Een criterium is pas nuttig in een ontwerpproject wanneer het niet alleen *operationeel* maar ook *toegankelijk* is – het moet daadwerkelijk te toetsen of te voorspellen zijn.

Neem bijvoorbeeld deze voor de hand liggende eis: ‘het nieuwe systeem moet beter verkopen dan de huidige versie’. Dit criterium is goed geoperationaliseerd. Wanneer het nieuwe product op de markt is zal het na verloop van tijd objectief duidelijk worden of het aan dit criterium voldoet. Maar tijdens het ontwerpproces heb je weinig aan zo’n criterium. De enige manier om de test voor dit criterium uit

te voeren is door het product daadwerkelijk op de markt te brengen. Dit helpt natuurlijk niet bij het nemen van ontwerpbeslissingen vóór die tijd.

Criteria zijn alleen toetsbaar als ze concreet geoperationaliseerd en praktisch toegankelijk zijn geformuleerd.

Ideeën schetsen in een ‘HKJ’-sessie

Met een ‘HKJ’ sessie of workshop kun je in korte tijd een grote set van kleine deeloplossingen bedenken en verzamelen. ‘HKJ’ staat voor ‘Hoe Kun Je ... ?’

Het is een manier om een creatieve sessie te structureren waarbij je met je groep rondom een tafel zit, en steeds na een minuut of 3 à 4 je schetspapier doorschuift naar degene rechts van je.

Je bent er een klein uur mee bezig. Dit zijn de stappen:

1. Maak een lijst van de belangrijkste deelfuncties die jullie product moet gaan uitvoeren. Net zo veel functies als dat je groepsleden hebt (dus meestal 6). Bijvoorbeeld: ‘HKJ koffieprut uit koffie filteren?’ Zo’n HKJ bestaat altijd uit een werkwoord en een lijdend voorwerp (het is eigenlijk gewoon een functiedefinitie). Dus niet zoiets als ‘veiligheid’ maar bijvoorbeeld wel: ‘HKJ de vingers van de gebruiker beschermen?’
2. Nummer de HKJ’s van 1 tot X, en zorg dat je X lege vellen papier hebt met duidelijk één van de HKJ’s als titel op elk vel. Iedereen start met een andere HKJ.
3. Ga er allemaal goed voor zitten en zorg dat je in een vrolijke bui bent :-).
4. Zet een kookwekker voor 3 of 4 minuten.
5. En dan: GO! Teken zo snel en simpel mogelijk een paar ideeën voor de HKJ die voor je ligt. Ze hoeven niet allemaal goed, creatief, of zelfs maar realistisch te zijn. Juist als je de eerste bent is het doel eerder om de voor de hand liggende dingen op papier te krijgen. Kwantiteit is nu even belangrijker dan kwaliteit. De ervaring leert dat hoe meer ideeën je op papier zet, hoe groter de kans dat er uiteindelijk ook een paar goede en verrassende tussen zitten.
6. Als de wekker gaat wisselt iedereen van HKJ. Iedereen schuift hun vel papier naar degene rechts van zich, en je zet opnieuw de wekker. Bekijk aan het begin van elke ronde even kort de tekeningen van je voorgangers. De kracht van deze methode zit hem in het doorbouwen, doorassociëren, en variëren op de ideeën van anderen.
7. Herhaal totdat je rond bent!

Tip

Kijk [deze video](#) voor een voorbeeld van hoe het schetsen en op elkaar doorbouwen eruit kan zien.

Na afloop kun je de ideeën bespreken en nog een tijdje besteden aan het ongestructureerd verder schetsen aan ideeën die interessant lijken. En je kunt natuurlijk nóg een ronde doen, met nieuwe deelfuncties en/of (deels) met dezelfde, als jullie het gevoel hebben dat er nog meer in zit.

Verzamel en organiseer uiteindelijk alle deeloplossingen in een morfologische kaart.

Deeloplossingen Verzamelen in een Morfologische Kaart

Een morfologische kaart is een manier om systematisch alternatieve opties voor deelfuncties te verzamelen en presenteren. Het is een hulpmiddel om de oplossingsruimte te verkennen, daar een overzicht van te geven, en om daarbinnen een aantal fundamenteel verschillende conceptringingen te vinden.

Tip

Kijk [deze interactieve video](#) voor een uitleg van de morfologische kaart.

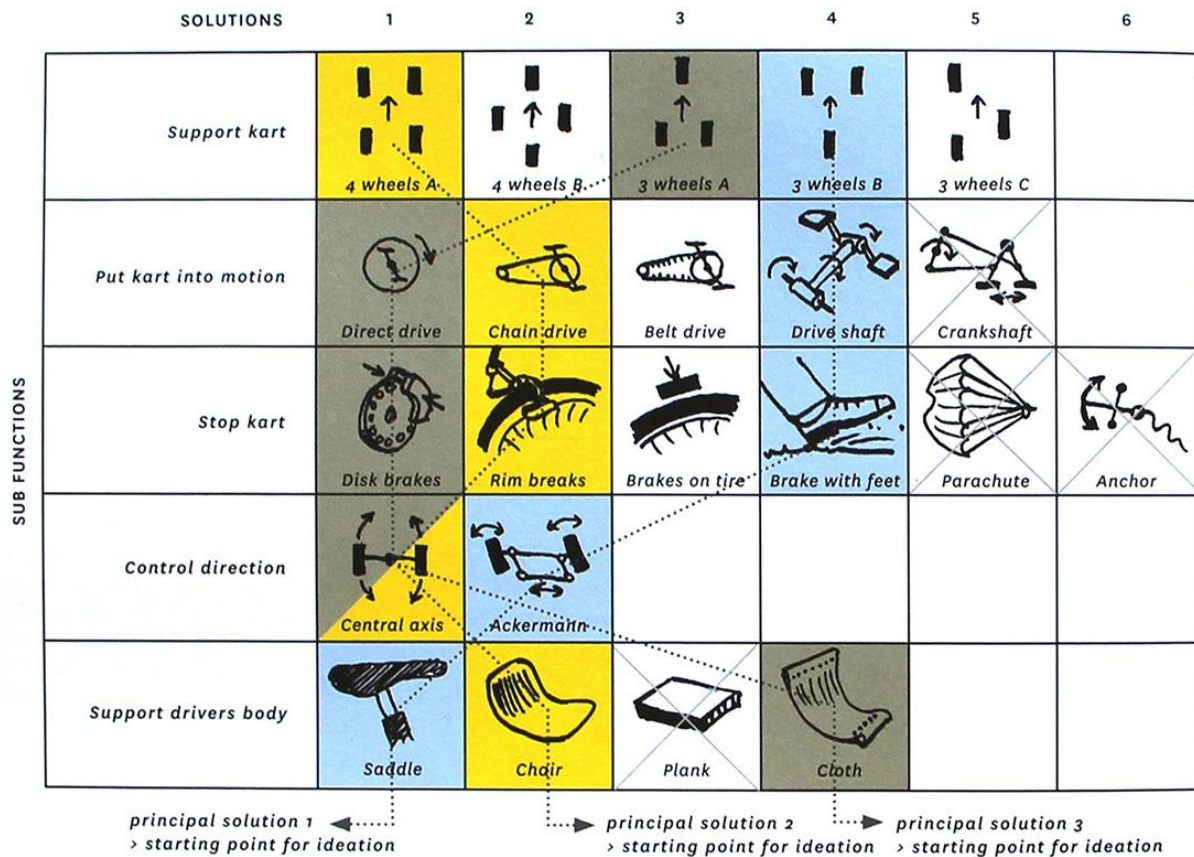
Vorm

De vorm van een morfologische kaart is een eenvoudige tabel met in de meest linker kolom de belangrijkste deelfuncties of -problemen onder elkaar, en in de rijen daarnaast kleine schematische tekeningen van mogelijke alternatieven, aangevuld met een beschrijving van de deeloplossing in één of enkele kernwoorden.

Bijvoorbeeld:

Buttondelen invoeren	 Met de hand...	 In schuiflade/strip...	 Gleuf...					
Matrijs wisselen	 Schuiven...	 Draaien...	 Revolver...	 Verticaal roteren...	 Diagonaal schuiven...	 180° draaien...		
Rotatie omzetten naar persbeweging	 Stampen...	 Heftboom - pers...	 Heupel pers...	 Schroefpers...	 Kruk pers...	 Solenoid...	 Heupel-heftboom...	 Spie-baas...
Button uitwerpen	 Uitschot pin...	 Matrijs omkeren	 Met de hand...	 Valluik...				
Vingers van gebruiker beschermen	 Klapnet leep...	 Pers ontbergen/afk...	 "Black-box"...					

Figuur 3: Morfologische kaart voor een elektrische buttonpers (werk van een tweedejaars student)



Figuur 4: Morfologische kaart voor een skelter, waarin 3 combinaties van deeloplossingen zijn geselecteerd om door te ontwikkelen tot concept (uit: (van Boeijen, Daalhuizen, en Zijlstra 2020))

Aanpak

Om alle mogelijkheden te verkennen is het goed om vroeg in een ontwerpproject zo veel mogelijk ideeën te verzamelen. Je hoeft nog niet 100% zeker te weten of een bepaald mechanisme goed gaat werken of niet. In dit stadium is het belangrijker om geen oplossingen over het hoofd te zien en om niet alleen de voor de hand liggende oplossingen te bedenken, maar zo veel en zo divers mogelijk.

Stap 1: Deelfuncties formuleren

Begin door de (4 tot 6) belangrijkste deelfuncties te formuleren. De formulering van een functies bevat altijd een zelfstandig naamwoord én een werkwoord (zie de voorbeelden hierboven).

Stap 2: Deeloplossingen schetsen

Eén voor één kun je voor alle deelproblemen zo veel mogelijk oplossingsrichtingen bedenken. Dit kunnen nieuwe ideeën zijn, maar ook bestaande mechanismen en deeloplossingen. Probeer in dit stadium geen kritiek te hebben op de oplossingsideeën. Vreemde, onpraktische, onhaalbare ideeën kunnen onverwacht tot nieuwe goede ideeën leiden. Eén manier om in groepsverband snel veel principeoplossingen te verzamelen is met een HKJ sessie (zie vorige hoofdstuk).

Teken (en beschrijf) eerst alle ideeën en ga ze daarna pas ordenen, beoordelen op bruikbaarheid, en eventueel nog aanpassen of verbeteren.

LET OP!

Het is echt géén goed idee om te beginnen met een lege tabel en om die dan vakje voor vakje in te vullen. Begin éérst door los en ruw te schetsen. Schets details, onderdelen, én af en toe een heel apparaat. Dat is veel productiever. Soms kom je er tijdens het schetsen nog achter dat je een deelfunctie vergeten bent, of juist dat je twee losse functies beter als één geheel kunt behandelen. Ook ideeën voor oplossingen kun je later nog splitsen in meerdere varianten, of juist samenvoegen om te voorkomen dat de morfologische kaart onoverzichtelijk wordt.

Stap 3: Maak een morfologische kaart

Verzamel en orden alle deeloplossingen in een morfologische kaart.

Het mooiste en meest overzichtelijke resultaat krijg je als je de ruwe ideeschetsen op dit moment allemaal nogmaals, zo eenvoudig mogelijk, in één eenvoudige stijl tekent. Zie de voorbeelden hierboven voor hoe dat eruit kan zien.

Maar je kunt ze het beste los tekenen, níet op papier al in een tabel. De meest praktische manier een nette en makkelijk aan te passen morfologische kaart te maken is om de tekeningen van deeloplossingen in te scannen, en om dan op de computer elke idee er los uit te knippen om samen te voegen in een nette tabel.

Stap 4: Zoek kansrijke combinaties

Deeloplossingen kunnen worden gecombineerd tot totaaloplossingen. Vaak is het zo dat er logische combinaties te vinden zijn, en combinaties van deeloplossingen die juist niet goed bij elkaar passen.

Tijdens het ontwikkelen van een bepaalde combinatie van deeloplossingen tot een conceptontwerp ontdek je vaak nog onverwachte voordelen, problemen, en mogelijkheden. Omdat je tijdens het ontwikkelen van concepten nog veel gaat ontdekken, en er voor die tijd dus nog veel onzeker is over wat

de beste oplossing is, is het belangrijk om een aantal fundamenteel verschillende combinaties uit de morfologische kaart te kiezen om door te ontwikkelen.

Concepten Beoordelen met de Gewogen Criteria Methode

Ontwerpen is compromissen sluiten. Sterk versus licht, duurzaam versus goedkoop, snel versus betrouwbaar. Maar meestal is het complexer dan een simpele trade-off tussen twee aspecten. Vaak zijn er vier, vijf, of nóg meer prestatiecriteria om af te wegen. Daarom bestaan er verschillende methoden voor het systematisch vergelijken van alternatieven en om de keuze voor één daarvan overtuigend te beargumenteren. Hier wordt één van deze methoden behandeld: het maken van een keuzetabel met gewogen criteria.

Stap 1: Selecteer de relevante criteria

Als het goed is voldoen alle concepten die je gaat vergelijken (in potentie) aan alle functionele eisen, randvoorwaarden, en specificaties. Anders zijn het geen geldige concepten. Deze harde criteria zijn immers de grens waar een ontwerp minimaal aan moet voldoen.

Bij het kiezen tussen verschillende concepten gebruik je daarom alleen maar prestatiecriteria. Op basis daarvan kun je een onderbouwde keuze maken voor het ontwerp met de 'beste' verzameling van eigenschappen.

Kies de 5 of 6 belangrijkste prestatiecriteria om de concepten op te beoordelen.

Stap 2: Voorspel de prestaties

Voordat je de concepten scores kunt geven is het belangrijk om éérst een tabel te maken met (schattingen/voorspellingen van) objectief te bepalen waarden. Een voorbeeld hiervan is Tabel 1.

Tabel 1: Vergelijkingstabel met voorspelde prestaties in objectief te bepalen waardes

	□	○	△
Criterion	'Blok'	'Buis'	'Punt'
Vermogen	180W	160W	200W
Duurzaamheid	40% Recyclebaar	70% Recyclebaar	80% Recyclebaar
Kostprijs	€ 300,-	€ 250,-	€ 500,-

	□	○	△
Installatie	60 minuten door eigenaar	30 minuten door monteur	90 minuten door monteur
Onderhoud	Maandelijks door eigenaar	Jaarlijks door monteur	Jaarlijks door monteur

Probeer de prestaties van de concepten zo veel mogelijk in kwantitatieve termen te voorspellen. Maar je kunt prestaties ook in kwalitatieve termen definiëren. Bijvoorbeeld hoe veel vaardigheid ergens voor nodig is, of een verschil in 'gemak van montage' in termen van welk specialistisch gereedschap er wel of juist niet nodig is. Kwalitatief kan óók objectief zijn. En cijfers kunnen soms juist heel subjectief zijn.

Wat hier vooral belangrijk is, is dat je jezelf dwingt om concreet te zijn. Als dat moeilijk is, moet je misschien nog eens de definitie van de prestatiecriteria beter toetsbaar maken (zie het hoofdstuk Criteria in het Programma van Eisen).

Maak een tabel met de objectief te bepalen prestaties van elk concept op elk prestatie criterium.

In een verslag of presentatie presenteer je deze tabel samen met de scoretabel die je hierna maakt. Je kunt ze onder elkaar zetten of combineren.

Stap 3: Rangschik de criteria van meest naar minst belangrijk

Niet elk criterium weegt even zwaar. Het één is belangrijker dan het ander. Eerst bepaal je de volgorde van de criteria van meest naar minst belangrijk.

Zet de criteria tegen elkaar uit in een tabel. Bepaal per rij steeds of een criterium belangrijker of minder belangrijk is dan het criterium in de kolom erboven.

Zie bijvoorbeeld Tabel 2.

Tabel 2: Onderlinge vergelijking van criteria op belangrijkheid

	Kostprijs	Vermogen	Installatie	Onderhoud	Duurzaamheid	Totaal
Kostprijs	-	0	1	1	0	2
Vermogen	1	-	1	1	1	4
Installatie	0	0	-	1	0	1

	Kostprijs	Vermogen	Installatie	Onderhoud	Duurzaamheid	Totaal
Onderhoud	0	0	0	-	0	0
Duurzaamheid	1	0	1	1	-	3

Het gedeelte linksonder de diagonaal is het spiegelbeeld van het gedeelte rechts erboven. Als ‘vermogen’ belangrijker is dan ‘kostprijs’, dan staat er in de rij naast ‘vermogen’ een ‘1’ in de kolom onder ‘kostprijs’, en in de rij van ‘kostprijs’ een ‘0’ in kolom ‘vermogen’.

Verwijs in een tabel als deze niet naar criteria met cijfers (1, 2, 3, ...) of letters (A, B, C, ...), maar gebruik kernwoorden. Dit vergroot de leesbaarheid aanzienlijk.

De volgorde van belangrijkheid volgt uit de totaalscore per criterium.

⚠ LET OP!

Deze tabel zet je niet in een verslag of presentatie. Het is bedoeld als gereedschap om (met een groep) in een gestructureerde discussie tot een volgorde van belangrijkheid te komen.

Stap 4: Bepaal weegfactoren

De scores uit de tabel in stap 3 zeggen alleen iets over de volgorde van belangrijkheid. Er kan niet uit afgeleid worden hoe groot de afstand tussen criteria is: hoe veel belangrijker het ene criterium is ten opzichte van anderen.

Dat het belangrijkste criterium ‘4’ scoort, wil niet zeggen dat die dubbel zo belangrijk is als een criterium dat ‘2’ scoort. Het kan bijvoorbeeld zijn dat drie criteria onderling maar weinig in gewicht verschillen maar wel allemaal veel belangrijker zijn dan de andere twee. Of dat er juist één boven alles belangrijk is, en alle andere criteria er in verhouding nauwelijks toe doen.

Bepaal weegfactoren door 100 procentpunten te verdelen over de criteria.

Met één en dezelfde volgorde kan dit tot heel verschillende uitkomsten leiden:

Tabel 3: Criteria in dezelfde volgorde van belangrijkheid, maar met verschillende verhoudingen tussen weegfactoren.

Kostprijs	40%	60%	30%
Vermogen	25%	15%	25%

Installatie	15%	15%	20%
Onderhoud	10%	5%	15%
Duurzaamheid	10%	5%	10%
Totaal	100%	100%	100%

Stap 5: Bepaal scores voor de concepten

De volgende stap is om de concepten een score te geven op elk van de criteria.

Bepaal per criterium een score voor elk van de concepten. Vertaal de voorspelde prestaties uit stap 2 allemaal naar scores op dezelfde schaal.

Wanneer er prestatiecriteria zijn waar met enige betrouwbaarheid een kwantitatieve waarde aan te geven is (zoals gewicht of prijs) moeten die omgerekend worden naar een score op de gebruikte schaal. Maar dat is niet altijd 1-op-1.

Bijvoorbeeld: wanneer je concepten hebt voor een stuk gereedschap met een geschat gewicht van 18, 23, en 28 kilogram, dan is het logisch om een groter verschil in score te kiezen tussen 18 en 23 kilogram dan tussen 23 en 28. De Arbowet stelt 20 kilo immers als grens voor iets dat één iemand mag tillen. Dus daar zit een grotere stap in waarde tussen de concepten.

Tabel 4: Verschil in vertaling van een objectief meetbare eigenschap naar prestatiescores

Gewicht	18kg	23kg	28kg
Score (lineair)	5	4	3
Score (niet-lineair)	5	2	1

LET OP!

Het vertalen van objectief meetbare eigenschappen naar prestatiescores is dus altijd een oordeel, waar je goede argumenten voor moet hebben. Het is geen rekensom met maar één goed antwoord.

Vergelijk steeds alle concepten op één bepaald criterium zodat helder wordt hoe de relatieve scores van de concepten op dat punt te onderbouwen zijn. Vul de tabel dus niet per concept in (voor elk concept van boven naar beneden), maar per criterium (voor elke eigenschap van links naar rechts).

Het eindresultaat ziet er dan zo uit:

Tabel 5: Scoretabel volgens de gewogen criteria methode

		□	○	△
criterium	Weging	‘Blok’	‘Buis’	‘Punt’
Vermogen	40%	4	3	5
Duurzaamheid	25%	1	3	4
Kostprijs	15%	4	5	2
Installatie	10%	5	2	1
Onderhoud	10%	4	3	3
Totaal	100%	3,4	3,2	3,7

De scoretabel moet de volgende eigenschappen hebben:

1. De criteria staan links, de concepten staan boven.
2. Van de concepten is de naam én een afbeelding opgenomen.
3. De criteria staan gesorteerd van meest naar minst belangrijk.
4. De weegfactoren tellen op tot 100%.
5. Alle scores gebruiken dezelfde schaal. Bijvoorbeeld een schaal van 1 tot 5.

⚠ LET OP!

Op het tentamen voor T1 van WB1641 moet je een scoretabel (zoals Tabel 5) correct volgens deze eigenschappen kunnen opstellen.

Gebruik in een vergelijkingstabel geen cijfers of letters om naar criteria of concepten te verwijzen. Geef de concepten in plaats van nummers of letters een naam. En vat je criteria samen in één of twee kernwoorden.

Stap 6: Analyseer en bediscussieer het resultaat

De gewogen criteria methode levert niet automatisch het ‘goede’ antwoord op!

Het maken van een keuzetabel is slechts een hulpmiddel bij het maken van een afweging, steigerwerk om de discussie in een ontwerpteam te structureren. Het volgen van deze methode dwingt je om aannames en inschattingen op een logische manier expliciet te maken, te kwantificeren, en om daar dis-

cussies over te voeren. Ook is het een manier om de uiteindelijk gemaakte afwegingen duidelijk te presenteren.

Soms is er een duidelijke ‘winnaar’. Maar het verschil is lang niet altijd zo afgetekend. En zelfs als er wel grote verschillen zijn, probeer te bedenken: wat gebeurt er als je een beetje gaat schuiven met weegfactoren en scores? Hoe robuust is de uitkomst?

Voer een discussie over het resultaat van de beoordeling. Welke scores geven de doorslag? Hoe zeker ben je van die cijfers? En blijft de uitkomst hetzelfde als je bepaalde criteria anders waardeert? Bij welke waarden zou een ander concept de voorkeur krijgen? Is een bepaald concept misschien gemakkelijker te verbeteren waardoor de keuze anders uit zou vallen? Of moet een hoge score juist met een korrel zout genomen worden door onzekerheden in het ontwerp?

Meestal is het zo dat het ‘eindresultaat’ nog flink aangepast moet worden. Er bleek misschien een belangrijk prestatie criterium te missen, jullie inschatting over de wegingsfactoren is veranderd, of de score voor een bepaald ontwerp moet bij nader inzien toch weer aangepast worden.

Schrijf op basis van de discussie een beknopte conclusie (max. 150 woorden) waarin de uiteindelijke keuze beargumenteerd wordt als toevoeging bij de (aangepaste) evaluatietabel.

Vaak is het zo dat je pas in de discussie over de conceptkeuze echt goed gaat begrijpen wat de kern van het ontwerp probleem is, en hoe je criteria het beste kunt definiëren. Zorg dat je het Programma van Eisen aanpast op basis van dit soort nieuwe inzichten zodat je overal dezelfde criteria en definities hanteert.

Stap 7: Presenteer een gecombineerde tabel

In plaats van twee losse tabellen – een vergelijkingstabel met voorspelde prestaties in objectief te bepalen waardes zoals Tabel 1 plus een scoretabel met gewichten en totaalscores zoals Tabel 5 kun je de uiteindelijke versies daarvan ook combineren in één grote tabel. Zie Tabel 6 hieronder voor een voorbeeld.

Door alle waardes in één tabel samen te voegen neemt het geheel minder ruimte in een verslag of presentatie. Bovendien geeft het als resultaat tabel van de gewogen-criteria-methode de lezer in één oogopslag inzicht in jullie conceptbeoordelingsproces.

Tabel 6: Gecombineerde vergelijkingstabel met voorspelde prestaties en scores samen

□	○	△
‘Blok’	‘Buis’	‘Punt’

		□		○		△	
criterium	Weging	Voorspelling	Score		Score		Score
Vermogen	40%	180W	4	160W	3	200W	5
Duurzaamheid	25%	40% Recyclebaar	1	70% Recyclebaar	3	80% Recyclebaar	4
Kostprijs	15%	€ 300,-	4	€ 250,-	5	€ 500,-	2
Installatie	10%	60 minuten door eigenaar	5	30 minuten door monteur	2	90 minuten door monteur	1
Onderhoud	10%	Maandelijks door eigenaar	4	Jaarlijks door monteur	3	Jaarlijks door monteur	3
Totaal	100%		3,4		3,2		3,6

Herder, J. L., P. Breedveld, G. Lodewijks, en R. W. Vroom. 2016. 'Ontwerpleerlijn BSc-Wb, Profilering in de bacheloropleiding werktuigbouwkunde aan de TU Delft'. *Intern TU Delft, 3mE*.

Rozenburg, N. F. M., en J. Eekels. 1998. *Productontwerpen, structuur en methoden*. 2016 2e dr. Den Haag: Lemma.

van Boeijen, Annemiek G.C., Jaap Daalhuizen, en Jelle Zijlstra. 2020. *Delft Design Guide: Perspectives, models, approaches, methods*. 2nd dr. BIS Publishers.