

VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL

Ontwerpmethodologie

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

Prof. S. Vanlanduit



Vrije Universiteit Brussel

Hoofdstuk 7

Design for manufacturability (DFM)

7.1 Inleiding fabricagegericht ontwerpen

Het fabricagegericht ontwerpen houdt in dat de ontwerper al in een vroeg stadium van het ontwerpproces een overwogen keuze van te gebruiken materialen en bewerkingsprocessen maakt en het ontwerp hier zo goed mogelijk op afstemt. De doelstelling van het fabricagegericht ontwerpen is ontwerpen voor een optimale vervaardiging, ofwel een optimale maakbaarheid. De maakbaarheid van een product geeft een indicatie van de inspanning die moet worden gedaan om het product te vervaardigen. Maakbaarheid is een aspect dat behoort tot de fase vervaardiging van de productlevenscyclus. Andere fasen binnen deze levenscyclus zijn onder andere ontwerp, assemblage of montage, distributie en onderhoud.

Fabricagegericht ontwerpen is het dusdanig ontwerpen van een product dat dit aan de hand van de geometrische productspecificatie (GPS), de materiële productspecificatie (MPS) en de structurele productspecificatie (SPS) op een eenduidige wijze en betrouwbaar kan worden vervaardigd. De geometrische productspecificatie (GPS) is een groep van internationale normen voor het vastleggen van het geheel van geometrisch gerelateerde productinformatie. Deze informatie betreft vorm, dimensies, toleranties, onderdeeltekeningen, etc. De informatie is gebundeld in een pakket ontwerptekeningen of CAD-modellen, hetgeen het resultaat is van de ontwerpinspanning. De materiële productspecificatie (MPS) is een specificatie van de te gebruiken materialen in het product, inclusief de toestanden waarin de materialen zich bevinden tijdens alle fasen van het productieproces. Hierbij moet worden gedacht aan resultaten van processen die de materiaaleigenschappen wijzigen,

zoals verstevigen, gloeien, harden en coaten. De structurele productspecificatie (SPS) is een specificatie van de hiërarchische opbouw van het product in assemblies, sub-assemblies, componenten en onderdelen. De specificatie omvat de functionele en fysische productstructuur, de bill of materials (BOM), de voorgeschreven verbindingselementen en de montagevolgorde. Voor de geometrische productspecificatie is een groot aantal normen in gebruik. Voor de materiële productspecificatie zijn minder normen gangbaar en daardoor treden bij deze specificatie meer onduidelijkheden op. Hetzelfde geldt voor de structurele productspecificatie. Vaak zijn er naast deze specificaties nog andere eigenschappen belangrijk. Bijvoorbeeld esthetische eigenschappen als kleur en de afwezigheid van bramen of krassen. Bij het fabricagegericht ontwerpen bepaalt de ontwerper in een vroeg stadium welke bewerkingsprocessen, gerelateerd aan de gekozen materialen, zullen worden toegepast en wordt gedurende het ontwerpen rekening gehouden met de mogelijkheden, beperkingen en eisen van de gekozen bewerkingsprocessen.

De potentiële voordelen van het toepassen van het fabricagegericht ontwerpen zijn:

1. Het productontwerp is beter afgestemd op het vervaardigingsproces en is goed maakbaar.
2. Achteraf zijn minder ontwerpwijzigingen nodig.
3. De duur van de ontwerpfase en van de productrealisatiefase neemt af.
4. De betrokkenheid van de ontwerper in de vervolgfasen van het productrealisatieproces neemt toe.
5. De technische werkvoorbereiding wordt eenvoudiger en kan sneller worden uitgevoerd.
6. De communicatie tussen de ontwerp- en de productieafdeling wordt verbeterd.

Maakbaarheid is geen absoluut, maar een relatief begrip; er is geen algemeen geldige maatstaf. Maakbaarheid laat zich daarom moeilijk kwantificeren, onder andere omdat het onderlinge belang van de genoemde beoordelingscriteria niet in alle gevallen even groot is. Wel kan worden bepaald welke aspecten de maakbaarheid positief of negatief beïnvloeden:

1. Het productontwerp. In het productontwerp worden de geometrisch productspecificatie (GPS), de materiële productspecificatie (MPS) en structurele productspecificatie (SPS) vastgelegd. Samen bepalen deze

specificaties de vorm en dimensies van het product, als mede de te gebruiken materialen (zowel eigenschappen als vorm en afmetingen) en de productopbouw. Tegenstrijdigheden, missende of foutieve informatie in de specificaties kunnen ertoe leiden dat het fabriceren van het product problematisch wordt.

2. De bematingen en toleranties. Met name de bematingen en toleranties op technische tekeningen kunnen in hoge mate de maakbaarheid van een product beïnvloeden. Onhandig gekozen maten maken nameten van onderdelen een tijdrovend proces. Te nauwe toleranties kunnen ertoe leiden dat de kosten van het fabriceren sterk toenemen, doordat er dan per onderdeel veel verschillende bewerkingen nodig zijn.
3. De materialen. De voorgeschreven materialen zijn rechtstreeks gerelateerd aan zaken als functionaliteit, uiterlijk, kosten en hergebruik, maar de materialen bepalen vooral de maakbaarheid van een product. Zo zijn harde, slijtvaste materialen doorgaans zeer moeilijk te bewerken. De keuze van materialen moet afgestemd zijn op de keuze van de bewerkingsprocessen en omgekeerd.
4. De fabricage. Uiteraard speelt de maakbaarheid van elk van de onderdelen van het product tijdens de fabricage de grootste rol. De maakbaarheid wordt onder andere bepaald door het aantal benodigde bewerkingsprocessen, opspanningen, gereedschappen en de benodigde bewerkingstijden.
5. De assemblage. Het produceren bestaat uit fabriceren en assembleren. Assemblage heeft alles te maken met productinterfaces. Deze interfaces bepalen de functioneel noodzakelijke toleranties, die gerelateerd zijn aan de bewerkingstoleranties. De assemblage en met name de assemblagestructuur van het product beïnvloedt dus in grote mate de maakbaarheid van een product.
6. De milieu-aspecten. Alhoewel milieu-aspecten niet rechtstreeks de maakbaarheid van een product beïnvloeden, zijn zij toch van groot belang; vooral bij de keuze van materialen en milieuvriendelijke bewerkingsprocessen. Een bewerkingsproces waarbij veel milieubelastend afval wordt geproduceerd, is duur en kan inefficiënt zijn en daarmee resulteren in een slechte maakbaarheid van het product.

Het is niet toereikend om de genoemde aspecten die de maakbaarheid van het product bepalen individueel te beschouwen. Er moet rekening worden gehouden met de combinatie van de aspecten. Per product zal een op-

timale balans tussen de verschillende aspecten moeten worden gevonden. Vanwege het nog premature karakter van het concept fabricagegericht ontwerpen bestaan er nog geen kant en klare oplossingen voor dit tijds- en situatieafhankelijke multi-criteria-optimalisatieprobleem. Per product moet met behulp van het gezonde verstand, afhankelijk van het toepassingsgebied, een juiste afweging van aspecten worden gemaakt. De informatie in dit hoofdstuk kan hiertoe bijdragen.

7.2 Inleiding productietechniek

De maakbaarheid van een product is afhankelijk van het productontwerp, de te gebruiken materialen en de te gebruiken bewerkingsprocessen. Voor het fabricagegericht ontwerpen heeft de ontwerper een goede basiskennis nodig van de productietechniek. In deze paragraaf wordt daartoe nader ingegaan op de indeling van bewerkingsprocessen en op de materiaaleigenschappen die van belang zijn voor het bewerken.

7.2.1 Indeling bewerkingsprocessen

Vrijwel elk product wordt vervaardigd door een combinatie van opeenvolgende bewerkingsprocessen. Formeel moet hier gesproken worden van fabricageprocessen. Deze worden namelijk onderverdeeld in bewerkingen die de geometrie van het product wijzigen en in behandelingen die tot doel hebben de materiaaleigenschappen van het product te wijzigen. In dit hoofdstuk worden echter alleen de bewerkingen uitvoerig behandeld en derhalve is er gekozen voor de term bewerkingsprocessen. De combinatie van opeenvolgende processen wordt het vervaardigingsproces, of de fabricagemethode genoemd. Een classificatie van bewerkingsprocessen die veel wordt gehanteerd is de DIN 8580-norm, die de volgende indeling voorschrijft: 1. oervormen; 2. omvormen; 3. scheiden en afnemen; 4. opbrengen van lagen; 5. veranderen van materiaaleigenschappen; 6. verbinden. Daarnaast wordt er onderscheid gemaakt tussen primaire, secundaire en tertiaire processen:

Primaire bewerkingsprocessen zijn die processen die het uitgangsmateriaal tot halffabrikaat verwerken (o.a. oervormen en omvormen). Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen productgebonden halffabrikaten, zoals giet- en smeedstukken (discrete vervaardiging), waarbij de vorm van het halffabrikaat volledig wordt bepaald door de geometrie van het gereedschap, en tussen niet-productgebonden halffabrikaten, zoals plaat, profielen, draad en buis (continu).

Secundaire bewerkingsprocessen bewerken het halffabrikaat dat verkregen is door de primaire vormgeving verder totdat de vorm van het eindproduct is bereikt. Processen die vallen in de categorie secundaire bewerkingen behoren tot het scheiden en afnemen.

Tertiaire bewerkingsprocessen Bij tertiaire bewerkingsprocessen wordt niet de vorm maar een aantal andere producteigenschappen gewijzigd. Zo vallen onder de tertiaire bewerkingen materiaalbehandelingen, waaronder bijvoorbeeld het harden en oppervlaktebehandelingen (onder andere lakken en coaten), ofwel het opbrengen van lagen, maar ook reinigen en afbramen (ontdoen van de scherpe kanten aan het product die ontstaan zijn als gevolg van het bewerken).

Oervormen Onder oervormen wordt verstaan het rechtstreeks transformeren van een uitgangsmateriaal met een niet-gedefinieerde geometrische vorm in een wel-gedefinieerde geometrische vorm. Typische oervormprocessen zijn:

- gieten (vloeibaar uitgangsmateriaal);
- sinteren (poedervormig uitgangsmateriaal);
- materiaal aangroei technieken (opbouwen van een product zonder vormbepalend gereedschap).

Omvormen Het omvormen houdt in dat de geometrie van een product wordt gewijzigd zonder de massa, de samenhang of het volume te veranderen; het uitgangsmateriaal wordt onder invloed van externe krachten blijvend (plastisch) vervormd. Bij veel omvormprocessen worden drukspanningen in het materiaal geïntroduceerd, waardoor de vermoeiingssterkte toeneemt. Producten die via een omvormproces geproduceerd zijn, hebben daarom vaak een hoge vermoeiingssterkte. Vanwege de hoge vervormingssnelheden hebben omvormprocessen doorgaans een korte cyclustijd, alhoewel afhankelijk van de mate van gewenste vervorming meerdere bewerkingsstappen nodig kunnen zijn om het product via verschillende tussenstadia tot de gewenste eindvorm om te vormen. Vooral halffabrikaten worden geproduceerd via het omvormproces (buizen, profielen, plaat- en stafmateriaal). De initiële kosten (aanschaf van de machine en productgebonden gereedschappen) zijn hoog. Andere nadelen zijn de slijtage van de gereedschappen en de potentiële overbelasting van de machine of gereedschappen waardoor machinedelen kunnen afbreken. Omvormprocessen van metalen kunnen in twee categorieën worden onderverdeeld: 1) massief omvormen,

2) plaatvormen. Veel plaatvormprocessen, zoals buigen en dieptrekken, worden echter gebruikt om plaatmateriaal (vervaardigd door primaire vormgevingstechnieken als walsen) te bewerken tot eindproduct. Deze plaatvormprocessen behoren in dat geval eigenlijk tot de secundaire bewerkingsprocessen. Dit geeft aan dat het vinden van een eenduidige indeling van bewerkingsprocessen zeer lastig is. Derhalve worden er internationaal veel verschillende indelingen toegepast. Voorbeelden van typische omvormprocessen zijn: smeden, walsen, extruderen en buigen.

Scheiden en afnemen Bij scheidende en afnemende bewerkingen wordt de samenhang van het uitgangsmateriaal verbroken om een product te vormen. Bij scheidende bewerkingen blijft het restmateriaal in het algemeen geschikt voor verdere (scheidende) bewerkingen. Tijdens afnemende bewerkingen wordt het te verwijderen materiaal omgezet in een geometrisch niet langer rechtstreeks bruikbare vorm; pas na recycling is het rest- of afvalmateriaal weer bruikbaar. Bij afnemende bewerkingen wordt van de uitgangsvorm net zolang materiaal verwijderd, tot de gewenste productvorm ontstaat. Massa en volume reduceren dan ook tijdens afnemende bewerkingen. Typische afnemende bewerkingen zijn: verspanende bewerkingen (frezen, draaien), etsen. Voorbeelden van typische scheidende bewerkingen zijn: knippen, ponsen; brandsnijden, lasersnijden.

Opbrengen van lagen Het opbrengen van lagen op een product kan gebeuren om het product te beschermen tegen invloeden van het (agressieve) milieu (bijvoorbeeld het verzinken), om de producteigenschappen te verbeteren (bijvoorbeeld coatings op snijgereedschappen) of om het uiterlijk van een product te wijzigen (bijvoorbeeld lakken).

Veranderen van materiaaleigenschappen Veelal worden materiaaleigenschappen veranderd door thermische processen. Afhankelijk van de duur van de behandeling wordt alleen het materiaal aan de oppervlakte of het gehele onderdeel beïnvloed. Het doel van het veranderen van de materiaaleigenschappen kan zijn:

- het verbeteren van de slijtagebestendigheid van een onderdeel;
- het verhogen van de hardheid van een onderdeel;
- het elimineren van inwendige spanningen in een onderdeel;
- het (tijdelijk) beter vervormbaar maken van een uitgangsmateriaal voor een bepaald bewerkingsproces.

Verbinden Bij het verbinden worden (tenminste twee) afzonderlijke delen samengevoegd tot een star geheel. De verbindingstechnieken zijn onder te verdelen in de volgende categorieën: 1. mechanische verbindingen, zoals pen-gat-verbindingen (los- en niet-losneembaar-/ bout- versus klinkverbinding); 2. eigen materiaal (lasverbinding); 3. additief materiaal (soldeer- en lijmverbindingen); 4. verbinden door het omvormen van tenminste n van de te verbinden delen; 5. wrijvingsverbinding door elastische vervormingen tussen te verbinden delen (o.a. persverbindingen).

In Tabel 7.1 zijn de bewerkingshoofdgroepen oervormen, omvormen, scheiden en afnemen, verbinden, opbrengen van lagen en veranderen van materiaaleigenschappen, uitgezet tegen deze factoren. Vanwege de talrijke varianten binnen elke hoofdgroep geeft de tabel niet meer dan een globaal overzicht.

	<i>oer- vormen</i>	<i>om- vormen</i>	<i>scheiden en afnemen</i>	<i>verbinden</i>	<i>opbrengen lagen</i>	<i>veranderen materiaal- eigensch.</i>
<i>Kosten gereedsch. arbeid middelen</i>	hoog laag middel	hoog laag hoog	middel hoog middel	laag hoog laag	laag laag hoog	laag laag hoog
<i>Kwaliteit Snelheid Flexibiliteit Milieubelasting</i>	middel hoog laag middel	hoog hoog laag laag	hoog middel hoog hoog	middel middel hoog middel	middel middel hoog hoog	hoog laag middel laag

Tabel 7.1: Globale beoordeling van de bewerkingshoofdgroepen.

7.2.2 Ontwerprichtlijnen voor de verschillende bewerkingsprocessen

Sinteren

Bij sinteren wordt basismateriaal in poedervorm via een mal gevormd tot de gewenste geometrische vorm. Bij de keuze van de geometrie van de vorm moeten een aantal zaken in acht genomen worden :

- Vermijd afgeronde randen en scherpe hoeken (van minder dan 45 graden).
- Neem volgende dimensionele limieten in acht:
 - hoogte/breedte < 2.5
 - Dikte wanden > 2 mm
 - Doorsneden gaten > 2 mm
- Vermijd zeer kleine toleranties.
- Vermijd smaltandige profielen.
- Gebruik geen diepe blinde gaten. Dit geeft aanleiding tot grote gereedschapskosten.

Bij injection moulding worden kunststof granulaten gesmolten en door een spuitkop geïnjecteerd in een mal. Door het afkoelen van het materiaal kan vervorming optreden. Hiermee moet rekening gehouden worden in het ontwerp :

- Gebruik geen te grote volumes of dikke wanden. De wanden van een groot volume zakken in bij afkoeling.
- Vermijd lange onderdelen.
- Het gebruik van scherpe hoeken leidt tot hoge spanningsconcentraties.
- Gebruik hoeksteunen om vervorming tegen te gaan.
- Gebruik geen diepe blinde gaten. Dit geeft aanleiding tot grote gereedschapskosten.
- Gebruik schuin opstaande wanden om het loskomen van de onderdelen uit de mal te bevorderen.

Bij smeden wordt vloeibaar materiaal in een matrijs gebracht en gevormd door de twee delen van de matrijs met een grote kracht tegen elkaar te brengen. De ontwerprichtlijnen voor deze productietechniek hebben voornamelijk betrekking op de vloeilijnen van het materiaal in de matrijs :

- De oppervlaktestructuur is onregelmatig ter hoogte van de zogenaamde 'parting line' (dit is de scheidingslijn van de twee delen van de matrijs). De meest economische keuze bestaat erin de parting line te kiezen zodat het onderdeel volledig in één matrijs gelegen is. Indien dit niet mogelijk is wordt deze lijn zo dicht mogelijk bij de neutrale spanningsas van het onderdeel gekozen.

- Vermijd parting lines die niet in één vlak liggen.
- Vermijd dunne secties < 5 mm.
- Vermijd grote sectieovergangen.

Bij extrusie worden door het duwen van plastisch uitgangsmateriaal door een matrijs onderdelen (meestal profielen) gefabriceerd. De constructiemogelijkheden en van de matrijs bepalen de ontwerpmogelijkheden en beperkingen :

- Vermijd scherpe randen en hoeken.
- Hoogte profielwand > 14 keer de dikte.
- Vermijd holle vormen (dit vereist speciale gebruik van extrusie technieken).
- Vermijd grote sectieovergangen.
- Gebruik ribben om het profiel te verstevigen.

Dieptrekken is een productietechniek waarbij een plaatvormig materiaal met behulp van een stempel en een matrijs vervormd wordt. Hierbij moeten een aantal ontwerpregels in acht genomen worden :

- Om materiaal te besparen worden best eenvoudige vormen getrokken.
- Neem een minimale kromtestraal om overtrekken tegen te gaan.
- Laat genoeg afstand tussen opeenvolgende gaten en hoeken. Indien dit niet mogelijk is, laat het gat dan over de hoek lopen.
- Breng geen afschuiningen aan in de buurt van een hoek.
- Voorzie speling in de buurt van een rechtopstaande hoek.
-

Bij het draaien van onderdelen moet men zorgen dat :

- Er ruimte is op het onderdeel om het in te klemmen.
- De afwerkingsgraad wordt afhankelijk gemaakt van de bestemming.
- Vermijd overtollige draaioperaties (kragen).
- Gebruik eenvoudige vormen die afgestemd zijn op het draaigereedschap.

Bij het frezen moet voornamelijk rekening gehouden worden met de vorm van het gereedschap en de vervorming die optreedt bij het contact van de frees met het onderdeel (vb. geen dunne wanden om vervorming tegen te gaan).

7.3 Richtlijnen voor fabricagegericht ontwerpen

De volgende richtlijnen voor fabricagegericht ontwerpen zullen hieronder besproken worden:

- Algemene DFM richtlijnen
- Materiaalkeuze voor fabricagegericht ontwerpen
- Checklist voor de ontwerpfase
- Checklist voor de vervaardigingsfase

7.3.1 Algemene DFM richtlijnen

1. Streef naar eenvoud in het productontwerp. Eenvoudige producten zijn robuust, goed onderhoudbaar en doorgaans tegen lage kosten te vervaardigen.
2. Kies de juiste materialen bij de gekozen volgorde van bewerkingsprocessen en vice versa. De geometrie van het productontwerp dicteert in hoge mate welk bewerkingsproces gebruikt wordt.
3. Houd tijdens het ontwerpen rekening met de te verwachten seriegrootte; ontwerp bijvoorbeeld bij voorkeur geen gietstuk voor kleine series.
4. Houd rekening met specifieke proceseigenschappen. Elk proces kent zijn eigen eigenaardigheden, zoals bijvoorbeeld het lossend zijn van gietstukken.
5. Beperk het aantal vereiste bewerkingsprocessen per product. Door het doordacht kiezen van toleranties kunnen aanvullende processen, zoals bijvoorbeeld het slijpen, achterwege blijven.
6. Maak gebruik van standaardisatie in het productontwerp, dit bevordert de onderhoudbaarheid en maakt hergebruik van ontwerpen in de toekomst mogelijk (ontwerp van productvarianten).
7. Maak gebruik van standaard materialen, gereedschappen en componenten. Hierdoor neemt de omvang van de benodigde voorraad af (kostenreductie) en wordt het productonderhoud verbeterd.

8. Schrijf zo ruim mogelijke toleranties voor. Te nauw voorgeschreven toleranties drijven de productiekosten sterk op.
9. Breng in een tekening niet meer dan de noodzakelijke bematingen, toleranties en opmerkingen aan, dit geeft de productieafdeling meer vrijheid om het product te vervaardigen.
10. Overleg bij onduidelijkheid met de productieafdeling. Voor het hergebruik van productontwerpen is het van groot belang dat de informatie op de tekeningen correct en toereikend is.

7.3.2 Materiaalkeuze voor fabricagegericht ontwerpen

De materiaalkeuze in het ontwerpproces wordt uitvoerig besproken in Hoofdstuk 8.

In deze paragraaf worden enkele richtlijnen m.b.t. materialen voor het fabricagegericht ontwerpen gegeven:

- Stem de materiaalkeuze af met de keuze van het bewerkingsproces.
- Selecteer materialen niet alleen op geschiktheid, maar ook op kosten, bewerkbaarheid en standaardaanwezigheid, zowel in samenstelling als in vorm en afmetingen.
- Bepaal de noodzaak van corrosievastheid van bepaalde onderdelen; corrosievastheid kan de mogelijkheden van hergebruik en recycling verbeteren. Onderdelen die gelakt worden, hoeven waarschijnlijk doorgaans niet corrosievast te zijn, hetgeen op kosten bespaart.
- Overweeg of het aanbrengen van een coating voorkomen kan worden door de keuze van een ander (meer corrosievast) materiaal, mits hiermee kosten, het milieu en/of productietijd bespaard kan worden.
- Bepaal de bijdrage aan de kostprijs van het product van het materiaal; materiaalkosten in massaproducten moeten typisch zo laag mogelijk worden gehouden, omdat deze 50-70% van de kostprijs bepalen.
- Overweeg of toepassing van een duurder materiaal kosten kan besparen tijdens het fabriceren.
- Heroverweeg de materiaalkeuze tijdens en aan het eind van het ontwerpproces; door de evolutie van het ontwerp kan het zijn dat de initieel gemaakte keuze niet meer optimaal is.

- Houd rekening met nieuwe mogelijkheden van (nieuwe) materiaalsoorten.
- Houd rekening met de opslagmogelijkheden van het uitgangsmateriaal; materiaalopslag vergt veel voorraadruimte en is derhalve kostbaar.
- Houd rekening met de vorm en afmetingen van het uitgangsmateriaal; plaatmateriaal kan bijvoorbeeld efficiënt gebruikt worden door de producten zo vorm te geven dat zij optimaal genest kunnen worden.
- Houd rekening met het energieverbruik dat vereist is om de materialen te bewerken.
- Houd rekening met de verbindbaarheid van het materiaal (solderen/lassen/lijmen).
- Houd rekening met recycling en/of verbranding; laminaatmaterialen zijn bijvoorbeeld moeilijk recycleerbaar.
- Beperk het aantal verschillende soorten materiaal in een product; producten die uit slechts n materiaal bestaan, zijn goed recyclebaar.
- Vermijd het gebruik van niet-losneembare verbindingen tussen productonderdelen die niet uit hetzelfde materiaal bestaan.

7.3.3 Checklist voor de ontwerpfase

1. Is het productontwerp zo eenvoudig mogelijk?
Denk hierbij aan het aantal onderdelen, het aantal verschillende materialen en het aantal verschillende verbindingselementen, aan de levenscyclusaspecten als maakbaarheid, assemblage, service, reparatie, hergebruik en recycling, aan de complexiteit van de geometrie en aan het onafhankelijk zijn van functies binnen het product.
2. Zijn de volgende zaken gestandaardiseerd?
 - uitgangsmaterialen
 - afmetingen van uitgangsmaterialen
 - afmetingen van ontwerpelementen als afschuiningen, spiebanen en asdiameters
 - schroefdraad, zowel in- als uitwendig
 - toleranties en ruwheden op de tekeningen
 - verbindingselementen, lagers, ringen, etc.

3. Zijn alle onderdelen functioneel gezien noodzakelijk?

Ga van elk onderdeel na of het een functie vervult die essentieel is voor het technisch functioneren? Ga van onderdelen die geen technische functie maar bijvoorbeeld een esthetische functie vervullen na of de kosten van deze functie opwegen tegen de baten. Elimineer onderdelen die niet functioneel bijdragen aan het product.

4. Zijn de onderdelen zoveel mogelijk symmetrisch?

Symmetrie zorgt ervoor dat er minder informatie is om een bepaald onderdeel te beschrijven en draagt derhalve bij aan de eenvoud van het ontwerp.

5. Is schijnbare symmetrie voorkomen?

Schijnbare symmetrie kan leiden tot interpretatiefouten en daardoor tot fouten tijdens de vervaardiging en/of assemblage.

6. Zijn de volgende zaken geminimaliseerd?

- gewicht
- hoeveelheid rest- of afvalmateriaal
- noodzaak tot afbramen
- nauwe toleranties
- lage oppervlakteruwheden
- materiaal- en bewerkingskosten

7. Zijn scherpe randen en hoeken afgerond?

Ter voorkoming van spanningsconcentraties die kunnen leiden tot scheurvorming en breuk, vanwege de afrondingsstralen en diameters van bewerkingsgereedschappen en voor het voorkomen van verwondingen tijdens assemblage, onderhoud en gebruik van het product.

8. Zijn inwendige spanningsconcentraties voorkomen?

9. Is het product voldoende innovatief?

Denk hierbij aan de volgende vragen: Is voldoende stil gestaan bij de mogelijkheden van nieuwe materialen en bewerkingsprocessen? Is het werkingsprincipe van het product nog voldoende efficiënt? Is er nog steeds voldoende vraag naar het product? Wat doet de concurrent?

10. Is er onderzoek verricht naar de geschiktheid van nieuwe materialen en bewerkingsprocessen?

11. Voldoen de ontwerptekeningen aan de geldende normen?
Maak hierbij gebruik van de geldende BIN-normen en interne normen binnen het bedrijf en/of bij uitbesteding van de normen van de toeleverancier.
12. Zijn de productcontouren van het CAD-model gesloten?
Ondanks 'snap'-functionaliteit van CAD-systemen kan het voorkomen dat door bijvoorbeeld afrondingsfouten een op het oog gesloten contour een onderbreking heeft die bij automatische generatie van de NC-code kan leiden tot het falen van het vervaardigen van het product op een numeriek bestuurd bewerkingsmachine.
13. Is de wanddikte van het product uniform?
14. Volgt de functie van elk onderdeel duidelijk uit de tekening?
Denk hierbij aan een logische naamgeving van het onderdeel en een eventuele tekstuele verklaring van speciale nauwe toleranties en/of oppervlakteruwheden. Inzicht in het functioneren van een onderdeel helpt in belangrijke mate bij het vervaardigen van het product.
15. Bevatten de tekeningen fouten?
Controleer of: alle maten aanwezig zijn, standaardwaarden voor toleranties en oppervlakteruwheden zijn gebruikt, niet onterecht nauwe toleranties en/of lage oppervlakteruwheden zijn gevraagd en dimensies correct, eenduidig en eenvoudig na te meten zijn.

7.3.4 Checklist voor de vervaardigingsfase

1. Zijn de materialen en bewerkingsprocessen goed op elkaar afgestemd?
Met name bij de keuze van een bewerkingsproces moet worden bepaald of het werkstukmateriaal met dit proces kan worden bewerkt. Deze informatie kan worden gevonden in handboeken of bij de werkvoorbereiding.
2. Zijn de bewerkingsprocessen afgestemd op de seriegrootte?
3. Is bekend waar de verschillende onderdelen worden vervaardigd?
4. Is het uitbesteden van onderdelen goed overwogen?
5. Is er rekening gehouden met het onbemand fabriceren?
Denk hierbij met name aan het opspannen van het product. Voor het onbemand produceren moeten verschillende producten op eenzelfde

pallet kunnen worden opgespannen zodat deze zonder omspannen achtereenvolgens kunnen worden bewerkt.

6. Zijn de volgende zaken geminimaliseerd?

- het aantal bewerkingsprocessen
- het aantal bewerkingsstappen per proces
- het aantal benodigde opspanningen
- het aantal benodigde gereedschappen

7. Is een correcte keuze gemaakt voor de gereedschappen?

- universele gereedschappen
- vorm- en maatgebonden gereedschappen
- productgebonden gereedschappen

Een correcte keuze hangt af van de seriegrootte. Universele gereedschappen zijn doorgaans het voordeligst, productgebonden gereedschappen zijn niet alleen duur, maar hebben een lange ontwikkelingstijd (enkele weken) en nemen veel ruimte voor opslag in.

8. Zijn de onderdelen tijdens alle bewerkingsstappen goed op te spannen? Probeer het gehele vervaardigproces stapsgewijs voor te stellen. Denk bij elke stap aan zaken als toegankelijkheid, stabiliteit, stijfheid, thermische beïnvloeding, gevoeligheid voor beschadigen en mogelijkheden van eenduidige en spanningsvrije opspanning en/of inklemming.

9. Is de toegankelijkheid van de gereedschappen in orde?

Denk hierbij niet alleen aan de afmetingen van het gereedschap, maar ook aan de geometrie, afmetingen en oriëntatie van de gereedschaphouder en de machinearm.

10. Is er voldoende rekening gehouden met de spaanafvoer?

Spanen die tijdens het bewerken op het werkstuk vallen en daar blijven liggen kunnen aanleiding geven tot vervormingen vanwege de hoge temperatuur van de spanen.

11. Zijn of worden restspanningen in het product verwijderd?

Als er zich voor een bewerkingsproces inwendige spanningen in het werkstukmateriaal bevinden, kan dit aanleiding geven tot het kromtrekken van het werkstuk na het bewerken. Warmtebehandelingen kunnen worden gebruikt om de inwendige spanningen te homogeniseren.

12. Kan afkeur in een vroeg stadium tijdens het vervaardigen worden herkend?
Als in de productie bekend is welke maten functioneel aan hoge eisen moeten voldoen, kan met behulp van pasmiddelen of kalibers snel worden bepaald of een product voldoet aan de maatgeving. Met een kaliber wordt bijvoorbeeld getest of het product in een gat met een bepaalde passing kan worden geassembleerd.
13. Is het gebruik van koelsmeermiddelen geminimaliseerd?
Koelsmeermiddelen zijn slecht voor het milieu, verlagen de waarde van het afval- en/of restmateriaal en brengen extra kosten met zich mee voor het reinigen van de werkstukken.
14. Is er rekening gehouden met de afvoer en eventuele reiniging van afval- en restmateriaal?
15. Zijn de onderdelen stijf genoeg om te kunnen worden bewerkt?
16. Zijn de (verschillende) wanddikten met de gekozen bewerkingsprocessen goed te vervaardigen?
Tijdens veel bewerkingsprocessen treden op het werkstuk zeer hoge krachten op, de minimaal bewerkbare wanddiktes zijn derhalve begrensd.

Hoofdstuk 8

Materiaalkeuze in het ontwerp

8.1 Inleiding

Bij ieder nieuw ontwerp of constructie komt vroeg of laat het moment dat er een materiaalkeuze moet worden gemaakt. In het verleden was dit meestal niet zo'n groot probleem, de constructeur gebruikte het materiaal waarmee hij/zij al geruime tijd werkte of in het ergste geval werd het materiaal gebruikt dat toevallig toch in het magazijn voorradig was. De tijden zijn echter veranderd, er komen steeds meer eisen zowel op het gebied van de milieuwetgeving als de nieuwe Wet op productaansprakelijkheid gaan een steeds grotere rol spelen. Daarbij komt nog een groot eisenpakket van de opdrachtgever, die behalve een zo goedkoop mogelijke constructie er ook nog een wil die liefst helemaal geen onderhoud vergt en bij voorkeur eeuwen blijft functioneren. Bovendien moet het energie-verbruik in de gaten worden gehouden, een zo licht mogelijke constructie vervaardigd uit materiaal dat zowel bij de fabricage als bij de be- en verwerking weinig energie vergt, dus bijvoorbeeld kunststoffen (die zeer energiegunstig zijn) in plaats van aluminium (dat energieverslindend is). Vooral bij transportmiddelen speelt het gewicht een grote rol. Het maakt een groot verschil of de motor een auto van 650 kg of van meer dan een ton moet verplaatsen. In de luchtvaart speelt het energieverbruik een nog belangrijkere rol. Eén kg gewichtsbesparing op een vliegtuig betekent 10.000 liter brandstofbesparing op de gemiddelde levensduur (20 jaar) van een vliegtuig. Op het eerste oog lijkt het onmogelijk om met al die wensen en eisen rekening te kunnen houden; toch is dit mogelijk, zoals we dit hoofdstuk zullen aantonen. Bij het maken van een verantwoorde materiaalkeuze moeten we met een aantal factoren rekening houden, namelijk:

- het moment van keuze

- kennis van de materialen
- vergelijkingsmogelijkheden tussen de verschillende materialen
- wettelijke bepalingen en eisen.

8.2 Moment van keuze

Ongeacht welke ontwerpmethodiek ook wordt toegepast, voorop moet staan in welk materiaal het ontwerp wordt uitgevoerd. Aan de hand van een programma van eisen moet dus een (voorlopige) materiaalkeuze worden gemaakt. Deze keuze hoeft nog niet geheel te zijn uitgewerkt, maar wel moet vaststaan in welke groep we moeten zoeken. Grofweg bestaan die uit: ferro-metalen; lichtmetalen en andere non-ferros; kunststoffen; elastomeren en rubbers; composieten; technische keramiek; en een groep overige, waaronder glas, grafiet, beton enzovoort. Belangrijk is dat men over de eigen grenzen heen durft te kijken. Wanneer eenmaal de materiaalgroep is geselecteerd geldt nog maar één regel namelijk: denk in het materiaal.

8.3 Denk in het materiaal

Die eerste keuze is natuurlijk een zeer grove selectie, bovendien zal men voor een wat grotere constructie niet aan één materiaal voldoende hebben, maar zullen voor de verschillende onderdelen ook verschillende materialen nodig zijn. Bekijk dan elk onderdeel als een afzonderlijk ontwerp. Neem hierin ook de prijs-/prestatieverhouding mee. Niet altijd is het goedkoopste materiaal ook de goedkoopste oplossing. Zo kan een wat duurdere kunststof in bepaalde gevallen veel goedkoper (prijsgunstiger) zijn, omdat men er minder van hoeft te gebruiken, zodat er lichter (dunnere wanddiktes) kan worden geconstrueerd. Een juiste materiaalkeuze kan van grote invloed zijn op de uiteindelijke prijs van het product. De kostenopbouw van een product is als volgt samengesteld: 55% materiaalkosten; 15% personeelskosten; 15% gereedschapskosten; 15% management- en organisatiekosten. Het zal duidelijk zijn dat dit gemiddelde waarden zijn. De fabricage van enkele stuks kan afwijkende cijfers opleveren. Neemt men echter een gemiddelde van 5 à 6 onderdelen dan ligt de speling binnen de 2%. Is de afwijking groter dan de genoemde 2%, dan is het verstandig de organisatiestructuur en de toegepaste technologie nader te analyseren. Hoe groter echter de productserie hoe meer de factor materiaal gaat meespelen. Een duur stuk gereedschap, bijvoorbeeld een zeer gecompliceerde matrijs, drukt een groter stempel op een kleine serie

dan op honderdduizenden gelijke producten. Hieruit blijkt overduidelijk dat de grootste winst valt te behalen uit een juist materiaalgebruik. Een besparing van 10% op de personele kosten (een bijna nooit te behalen percentage) geeft uiteindelijk maar een kostenbesparing van 1,5% op het product. Een materiaalkostenbesparing van 10% geeft echter besparing van 5,5% op de productkosten. Door een juiste materiaalkeuze en een verstandig materiaalgebruik (weinig afval) is vaak een besparing van meer dan 10% op de materiaalkosten te verwezenlijken. Na de eerste globale keuze zal voor elk onderdeel een meer specifieke keuze moeten worden gemaakt. Dit houdt in dat binnen de bepaalde materiaalgroep gezocht moet worden naar de meest geschikte materiaalsoort. Ook dit hangt weer van verschillende factoren en eisen af (zie verder).

8.4 Kennis van de materialen

De kennis van de materialen is voor veel constructeurs waarschijnlijk het grootste probleem en hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te wijzen. Ten eerste zijn de meeste constructeurs gewend geraakt om in een bepaalde materiaalgroep te ontwerpen. Ten tweede wordt er (in de vakbladen) te weinig over nieuwe materialen en toepassingen gepubliceerd. Ten derde bevatten boeken die een bepaalde materiaalgroep beschrijven verouderde gegevens (tussen het moment dat een materiaal op de markt komt en het moment dat dit materiaal in een boek wordt omschreven zit gemiddeld acht jaar). Als vierde punt kan worden aangemerkt dat de constructeur een vrij behoudend persoon is, die niet geleerd heeft om over zijn eigen grenzen heen te kijken. Uit een nationale enquête bleek dat meer dan 70% van alle constructeurs (dit zelfde geldt overigens ook voor constructeurs in het buitenland) niet op de hoogte zijn van nieuwe materiaalontwikkelingen. Als laatste punt, en misschien wel het belangrijkste: er bestaat geen enkel Nederlandstalig handboek dat duidelijk de vergelijkingsmogelijkheden tussen de verschillende materiaalgroepen geeft. (In januari 1994 is het Handboek Technische materialen verschenen die deze verbanden wel legt. Dit handboek is een coproductie van Samsom BedrijfsInformatie en Stam Tijdschriften.) De voornaamste reden voor het gebrek aan kennis is de overstelpende hoeveelheid technische materialen. Een grove inventarisatie geeft enige duizenden metalen, meer dan 150.000 kunststofsoorten, een paar honderd composieten en wat minder technische keramieksoorten. Het is niet verwonderlijk dat een constructeur hier geen wijs uit kan worden. Toch is die materialenwereld niet zo ondoordringbaar als hij er op het eerste gezicht uitziet. Kijken we naar de grootste groep 'de kunststoffen', dan blijkt het getal van 150.000 een zo-

genaamd 'officieel' getal te zijn, namelijk het totaal van alle geregistreerde soorten. Dit geeft een volkomen vertekend beeld. In de eerste plaats betreft dit in hoofdzaak 'merknamen', zodat dezelfde kunststof gefabriceerd door de firma A, B en C onder verschillende namen staat ingeschreven. Bovendien zijn in deze telling ook de soorten opgenomen die ontwikkeld zijn voor één specifieke toepassing en daarna nooit meer (in bulk) zijn aangemaakt. Een globale schatting geeft ons circa 2000 soorten kunststof, die min of meer regelmatig worden toegepast. Van deze groep vormen ongeveer 200 soorten de harde kern, waarvan voldoende voorraad beschikbaar is en waarvan alle parameters bekend zijn. Dit geeft al een heel ander beeld. Wanneer we eenmaal de soort hebben geselecteerd (aan de hand van mechanische, thermische en fysische eigenschappen) is bij bijna elke kunststofleverancier een diskette verkrijgbaar waar alle andere data ontstaan, zoals verwerkingstemperatuur, mengverhoudingen, cyclustijd, sluitdruk en temperatuur in de spuitgietmachine, enzovoort. Ook voor andere materialen zijn deze gegevens vaak op floppy beschikbaar, onder andere voor aluminium kneedlegeringen (Aluselect) en koper en koperlegeringen (Copper & copper alloys van het Engelse Copper Development Association). Voor steeds meer materiaalsoorten worden deze data op floppy gezet en zijn commercieel verkrijgbaar. En probleem blijft en wel dat hier alleen de gegevens op staan van die speciale materiaal-soort. Vergelijkingen maken met andere materiaalgroepen is dan ook onmogelijk. Veel materiaaldeskundigen hebben getracht dit in kaart te brengen. Wanneer men bijvoorbeeld de E-modulus en de dichtheid tegen elkaar afzet voor een groot aantal materialen blijkt dat de spreiding zo groot is dat die bijna niet meer in kaart te brengen is. Vergelijk bijvoorbeeld de dichtheid van polymeerschuim en technische keramiek maar eens met elkaar. Een methode voor het in kaart brengen en vergelijken van verschillende materialen op een systematische manier is uitgevoerd door professor Ashby van Cambridge University. Door het toepassen van een logaritmische schaalverdeling kwamen de materiaalgroepen veel dichter bij elkaar te liggen en waren ze onder te brengen in diagrammen. In eerste instantie ontstonden zo tien verschillende diagrammen. Later heeft hij dit aantal uitgebreid tot 18 kaarten, door ook onder meer modulus en relatieve kosten; sterkte en relatieve kosten, slijtage en maximale lagerdruk; enzovoort tegen elkaar uit te zetten. De lijst werd in 1993 gecompleteerd door de toevoeging van nog eens 5 diagrammen, de zogenaamde Process Selection Charts, waarin onder meer de verschillende bewerkingsmethoden worden uitgezet tegen de minimale wanddikte, variërend van 1 nm tot ruim 1 m. Ondanks de mogelijkheid om hier relevante extra informatie uit te halen, zullen we ons beperken tot de eerste tien originele diagrammen, die in de loop der tijd steeds zijn aangevuld en vervolmaakt. Bovendien zag Ashby kans om elk diagram meer mogelijkheden te geven. Zo

is het ook mogelijk om bijvoorbeeld een keuze te maken voor het construeren met minimaal gewicht, enz. (zie uitleg bij Figuur 8.2).

De tien Ashby diagrammen zijn:

1. Modulus-dichtheid
2. Sterkte-dichtheid.
3. Breeksterkte-dichtheid.
4. Modulus-sterkte.
5. Breuktaaiheid-modulus.
6. Breuktaaiheid-sterkte.
7. Dempingscoëfficiënt-modulus.
8. Warmtegeleidbaarheid-temperatuurvereffening.
9. Uitzettingscoëfficiënt-modulus.
10. Sterkte-uitzetting.

Een korte uitleg over de kaarten en de gebruiksmogelijkheden volgt later.

8.5 Wettelijke bepalingen en eisen

Behalve de opdrachtgever stelt ook de overheid een groot aantal eisen. Bijvoorbeeld de Milieuwetgeving die steeds verdergaande maatregelen vereist ten aanzien van materiaalgebruik. Welke effecten heeft de toepassing van een bepaald materiaal op het milieu en omgekeerd wat doet het milieu aan het materiaal? Door het schaarser worden van bepaalde materialen worden in de wet weer regels opgenomen ten aanzien van hergebruik. De tijd is al erg dicht bij dat we alleen nog maar producten mogen maken, waarvan de gebruikte materialen voor 100% recyclebaar zijn. Een bijna onmogelijke opgave, die de constructeur wettelijk zou kunnen verplichten om andere (niet samengestelde) materialen toe te passen, alleen maar vanwege het feit dat het materiaal voor hergebruik geschikt moet zijn. We nemen de auto als voorbeeld en bekijken de problemen die ontstaan wanneer deze voor 100% recyclebaar moet zijn. De uitstoot van schadelijke uitlaatgassen laten we even buiten beschouwing. We bekijken de auto dus alleen als een constructie. Veel autofabrikanten gebruiken tweezijdig verzinkt staalplaat om corrosie tegen te gaan. Bij sloop is dit verzinkte staal in feite waardeloos. Het is geen

schroot maar afval. De zinklaag is alleen te verwijderen met zeer sterke chemicaliën, die zeer milieu-onvriendelijk zijn en met recent gepubliceerde thermische processen, die nog nadere evaluatie behoeven. Dus geen verzinkt staalplaat meer maar bijvoorbeeld aluminium (wat weer energieverblindend is) of halogeenvrije kunststoffen (waar het koperspubliek weer niet aan wil). Een autobumper is meestal uit kunststof gemaakt, een zachte (goedkope) kern waartegen een harde duurdere kunststoflaag wordt gespoten of verlijmd. Beide kunststoffen zijn op zich recyclebaar, maar helaas bijna niet te scheiden, zodat het gerecyclede product van zeer slechte kwaliteit is, waar behalve berrmpaaltjes bijna niets van te maken is. Een ander groot probleem vormt de bekabeling. In de meeste gevallen wordt voor de elektrische bekabeling koperdraad gebruikt die van een kunststoflaag is voorzien. Het kopergedeelte moet worden hergebruikt, maar de kunststoflaag is er zo goed als niet af te krijgen. Vroeger werd deze kunststoflaag eraf gebrand, maar dat is om milieutechnische redenen niet meer toegestaan. Er zijn nog een hoop andere voorbeelden te noemen, die het in de toekomst de constructeur extra moeilijk, zo niet onmogelijk, maken om zijn vak naar behoren uit te oefenen. Het voorgaande illustreert eens te meer hoe belangrijk het is om een verantwoorde materiaalkeuze te maken. Vooral het moment van keuze wordt steeds belangrijker. Voordat men aan het uiteindelijke ontwerp begint moet de materiaalkeuze eigenlijk al zijn gemaakt. Het is in het kader van dit handboek en zeker binnen dit hoofdstuk onmogelijk om alle milieu-aspecten, bepalingen, voorschriften en wetten te bespreken. Hiervoor bestaan gelukkig een aantal goede adviesbureaus. Een ander probleem is de van kracht zijnde Wet op de productaansprakelijkheid (EU richtlijn 2001/95/EG). Volgens deze wet is de fabrikant bij het falen van een product of constructie, ook nog na vele jaren, wettelijk aansprakelijk en moet hij overduidelijk kunnen aantonen dat het falen niet kan zijn veroorzaakt door een constructiefout. Op dit moment is nog niet geheel bekend hoe ver dit terug gaat en op welke manier men de tegen-bewijslast moet kunnen leveren. Toch is dit een aspect waar in de toekomst terdege rekening mee moet worden gehouden.

8.6 Indeling in groepen en eigenschappen, de diagrammen van Ashby

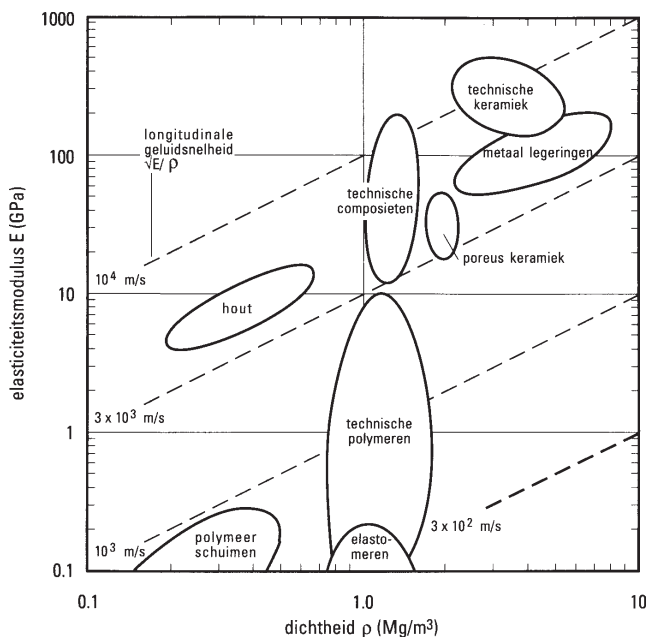
Vaste stoffen worden van oudsher in zes groepen verdeeld:

- metalen;
- polymeren;

8.6. INDELING IN GROEPEN EN EIGENSCHAPPEN, DE DIAGRAMMEN VAN ASHBY173

- rubbers;
- composieten;
- keramiek;
- glas en overige materialen.

Binnen een bepaalde materiaalgroep is de spreiding van eigenschappen vrij gering. Echter wanneer we alleen naar één materiaalgroep kijken, verkleinen we ons gezichtsveld en zien we de overeenkomsten/verschillen tussen de verschillende materiaalgroepen niet. Deze verschillen/overeenkomsten kunnen we duidelijk maken aan de hand van de zogenaamde Materiaaleigenschaftkaarten, de diagrammen van professor Ashby. In Figuur 8.1 illustreren we dit idee: een eigenschap, hier de E-modulus, wordt uitgezet ten opzichte van een andere eigenschap, de dichtheid ρ . Uit het diagram blijkt duidelijk dat de data van een bepaalde materiaalgroep, bijvoorbeeld de polymeren, als een cluster op de kaart verschijnt. Het domein van iedere materiaalgroep is veel kleiner dan het volledige gebied dat die eigenschap omsluit. De data uit een bepaalde groep worden omsloten door een soort 'eigenschapsenvelop'.



Figuur 8.1: Elasticiteitsmodulus / dichtheid.

Dit alles is in feite zeer eenvoudig en niet meer dan een bepaalde manier om eigenschappen in een bruikbare vorm neer te zetten. Echter door een juiste keuze van de assen en de gebruikte schaalfactoren, kan het diagram ook voor andere toepassingen worden gebruikt. Ter illustratie: De geluidssnelheid in een vaste stof is afhankelijk van de E-modulus en de dichtheid. De longitudinale geluidssnelheid ν wordt verkregen uit:

$$\nu = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8.1)$$

of wanneer we het logaritmisch weergeven:

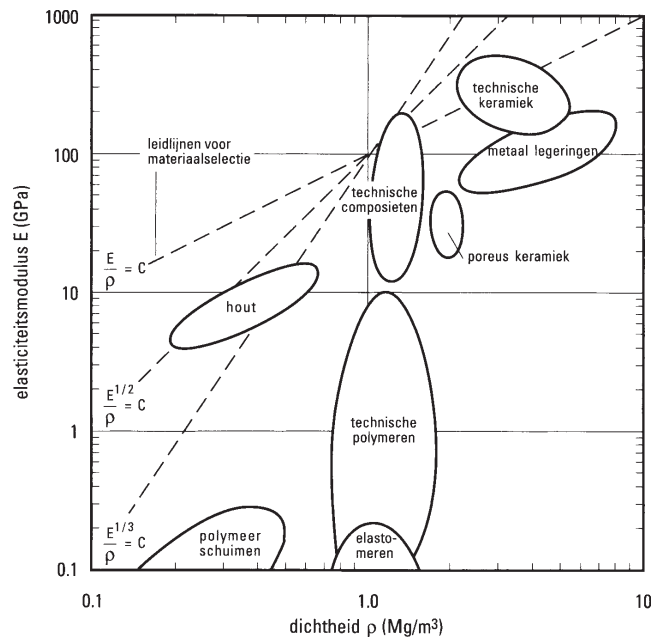
$$\log E = \log \rho + 2 \log \nu \quad (8.2)$$

Voor een bepaalde waarde van ν geeft deze vergelijking een rechte lijn met helling = 1. Dit geeft ons de mogelijkheid om lijnen te trekken van gelijke geluidssnelheid. Dit zijn de parallelle diagonale lijnen in Figuur 8.1. Alle kaarten bieden de mogelijkheid om ook andere verbanden weer te geven. De kaarten kunnen ook een hulpmiddel zijn bij de materiaalkeuze van technische ontwerpen. Het gedrag van een belast onderdeel van een constructie wordt zelden bepaald door een eigenschap, maar door een combinatie van eigenschappen. De lichtste trekstang die een gegeven trekbelasting kan verdragen zonder een bepaalde verlenging te overschrijden, is die met de grootste E/ρ -waarde. De lichtste kolom die een bepaalde drukbelasting zonder knik kan verdragen, is die met de grootste $\sqrt{E/\rho}$ -waarde. Het lichtste vlak dat een gegeven druk kan weerstaan met een minimale doorbuiging is die met de grootste waarde voor $\sqrt[3]{E/\rho}$.

Figuur 8.2 toont hoe de kaarten gebruikt kunnen worden bij het selecteren van een materiaalgroep door ieder van deze combinaties een maximale waarde toe te kennen. De voorwaarde $E/\rho = C$ of het logaritme $\log E = \log \rho + \log C$ geeft rechte lijnen met een helling gelijk aan één.

De voorwaarde $\sqrt{E/\rho} = C$ geeft lijnen met een helling gelijk aan twee. De voorwaarde $\sqrt[3]{E/\rho} = C$ geeft lijnen met helling gelijk aan drie. In Figuur 8.2 is van ieder stel lijnen (helling 1, 2, 3) één lijn aangegeven, dit is de zogenaamde 'Leidlijn voor materiaalselectie'.

De andere lijnen worden gevonden door de leidlijnen evenwijdig te verschuiven. Het is nu eenvoudig af te lezen welke materialen voldoen aan de gestelde eisen. Wanneer we een lat parallel leggen aan de $\sqrt{E/\rho} = C$ -lijn dan zijn alle materialen die op dezelfde lijn liggen, even goed ten aanzien van de knikbelasting. De materialen boven deze lijn zijn beter (kunnen een grotere belasting verdragen), de materialen onder deze lijn zijn slechter. Op



Figuur 8.2: Elasticiteitsmodulus / dichtheid.

dezelfde manier kunnen de lijnen voor de trekbelasting van trekstangen en de doorbuiging van platen worden verschoven, voor het selecteren van een materiaal. Van de mechanische en thermische eigenschappen van een materiaal zijn er tien die van belang zijn voor het materiaalgedrag en dus voor het uiteindelijke ontwerp of de constructie. Deze zijn weergegeven in Tabel 8.6.

De Ashby-diagrammen geven deze eigenschappen voor negen materiaalgroepen. De oorspronkelijke verdeling in zes groepen werd uitgebreid door een onderscheid te maken tussen composieten, schuimen en houtsoorten; en een verdeling aan te brengen tussen hogesterkte technische keramiek en lage sterkte, poreus keramiek (bijvoorbeeld bakstenen). Een domein van een bepaalde groep materialen geeft een beeld van in principe alle elementen uit deze groep. De in de diagrammen opgenomen materialen staan in Tabel 8.2.

In dit hoofdstuk zijn de tien Ashby-diagrammen opgenomen, die een hulpmiddel kunnen zijn voor de uiteindelijke materiaalkeuze. Bij iedere kaart hoort een meer uitgebreide uitleg. In het Handboek Technische Materialen worden alle kaarten uitvoerig toegelicht, ook wat betreft de andere gebruiksmogelijkheden. Tevens worden andere materiaalkeuzeprogramma's

Eigenschap	Teken	Eenheid
Dichtheid	ρ	Mg/m ³
Elasticiteitsmodulus	E	GPa
Sterkte	σ	MPa
Breuktaaiheid	K_{ic}	MPa m ^{1/2}
Taaigheid	G_{ic}	J/m ²
Dempingscoefficient	η	-
Warmtegeleidbaarheid	λ	W/m K
Thermische vereffeningscoef.	a	m ² /s
Volumetrische soortelijke warmte	C_p^p	J/m ³ K
Lineaire uitzettingscoefficient	α	I/K

Tabel 8.1: Basisverdeling van materiaaleigenschappen

hierin besproken. Bovendien wordt van elke materiaalgroep een groot aantal soorten behandeld, waarbij naast de fabricage en de toepassingsmogelijkheden ook aandacht wordt besteed aan de be- en verwerkingsmogelijkheden, veredeling, warmtebehandelingen, coaten, verbindingmogelijkheden enz.

De elasticiteitsmodulus en de dichtheid zijn twee belangrijke materiaaleigenschappen. Staal wordt onder meer gebruikt voor stijve balken, rubber voor samendrukbare dempers. De dichtheid van lood maakt het geschikt als ballastmateriaal, de dichtheid van kurk is bruikbaar voor drijvende toepassingen. De data van een bepaalde materiaalgroep vormen een cluster die door een dikke lijn (envelop) wordt omgeven. Alle materialen van Tabel 8.2 zijn in de figuur terug te vinden. De in het diagram aangegeven materialen zijn speciaal gekozen om het domein af te bakenen. Binnen de envelop liggen echter ook alle materialen die niet zijn genoemd.

Voor metalen en polymeren wordt als sterkte de treksterkte genomen. In de spreiding is rekening gehouden met de initiële sterkte tot aan de uiterste sterkte. Voor de meest praktische toepassingen is de sterkte in 'trek' van dezelfde grootteorde als deze in 'druk'. Voor de brosse keramieken wordt met 'sterkte' de breeksterkte bij drukbelasting bedoeld. Het gaat hier dus niet over de treksterkte die ongeveer 15 maal kleiner is. Het domein van de brosse materialen wordt in het diagram met een stippellijn aangegeven. Voor rubbers betekent 'sterkte' de afschuifsterkte. Voor composieten beschouwen we de bezwijksterkte bij trek (de druksterkte kan lager liggen door het knikken van de vezels). De enorme verticale spreiding bij iedere materiaalgroep, geeft een indicatie van de invloeden van legeren (van metalen), vervormingsversteving, korrelgrootte, porositeit, enz.

De treksterkte van een materiaal verbeteren heeft alleen zin zolang dit materiaal niet bezwijkt door brosse breuk. De weerstand van een materiaal

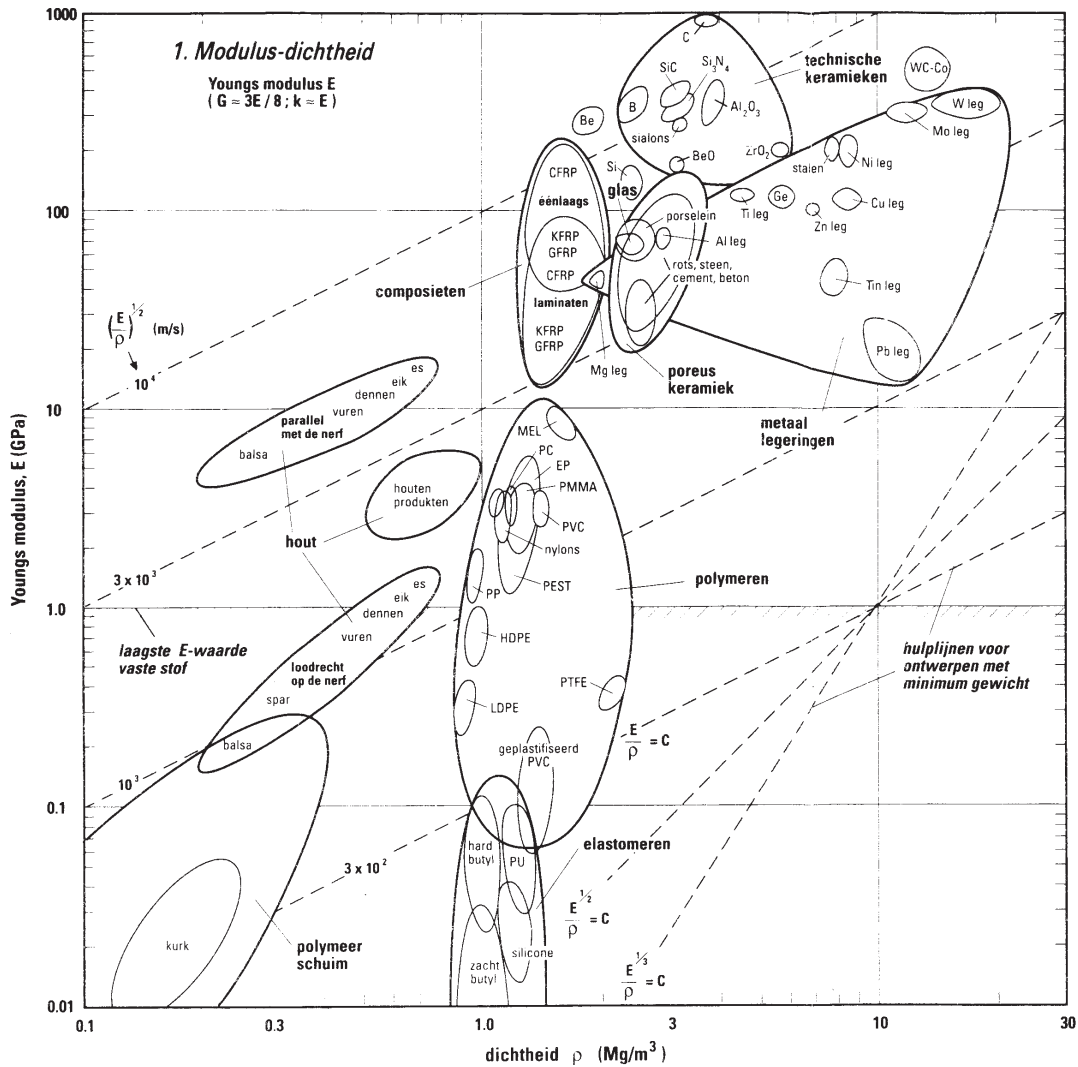
8.6. INDELING IN GROEPEN EN EIGENSCHAPPEN, DE DIAGRAMMEN VAN ASHBY177

Materiaalgroep	Materiaalsoort	Aanduiding
Metaallegeringen	Aluminium legeringen	Al leg
	Koper legeringen	Cu leg
	Lood legeringen	Pb leg
	Magnesium legeringen	Mg leg
	Molybdenum legeringen	Mo leg
	Nikkel legeringen	Ni leg
	Stalen	Stalen
	Tin legeringen	Tin leg
	Titanium legeringen	Ti leg
	Tungsten legeringen	W leg
	Zink legeringen	Zn leg
	Polymeren	Epoxy's
Melamines		MEL
Polycarbonaat		PC
Polyesters		PEST
Polyethyleen (hoge dichtheid)		HDPE
Polyethyleen (lage dichtheid)		LDPE
Polyformaldehyde		PF
Polymethylmethacrylaat		PMMA
Polypropyleen		PP
Polytetrafluorethyleen		PTFE
Polyvinylchloride		PVC
Technisch keramiek		Alumina
	Diamant	C
	Sialons	Sialons
	Silicium Carbide	SiC
	Silicium Nitride	Si ₃ N ₄
	Zirconia	ZrO ₂
	Composieten	Koolstofvezel versterkt polymeer
Glasvezel versterkt polymeer		GFRP
Kevlarvezel versterkt polymeer		KFRP
Poreus keramiek	Baksteen	Baksteen
	Cement	Cement
	Rotsgesteente	Rots
	Beton	Beton
	Porselein	Psln
	Aardewerk	Awerk

Tabel 8.2: Materialen in Ashby diagrammen

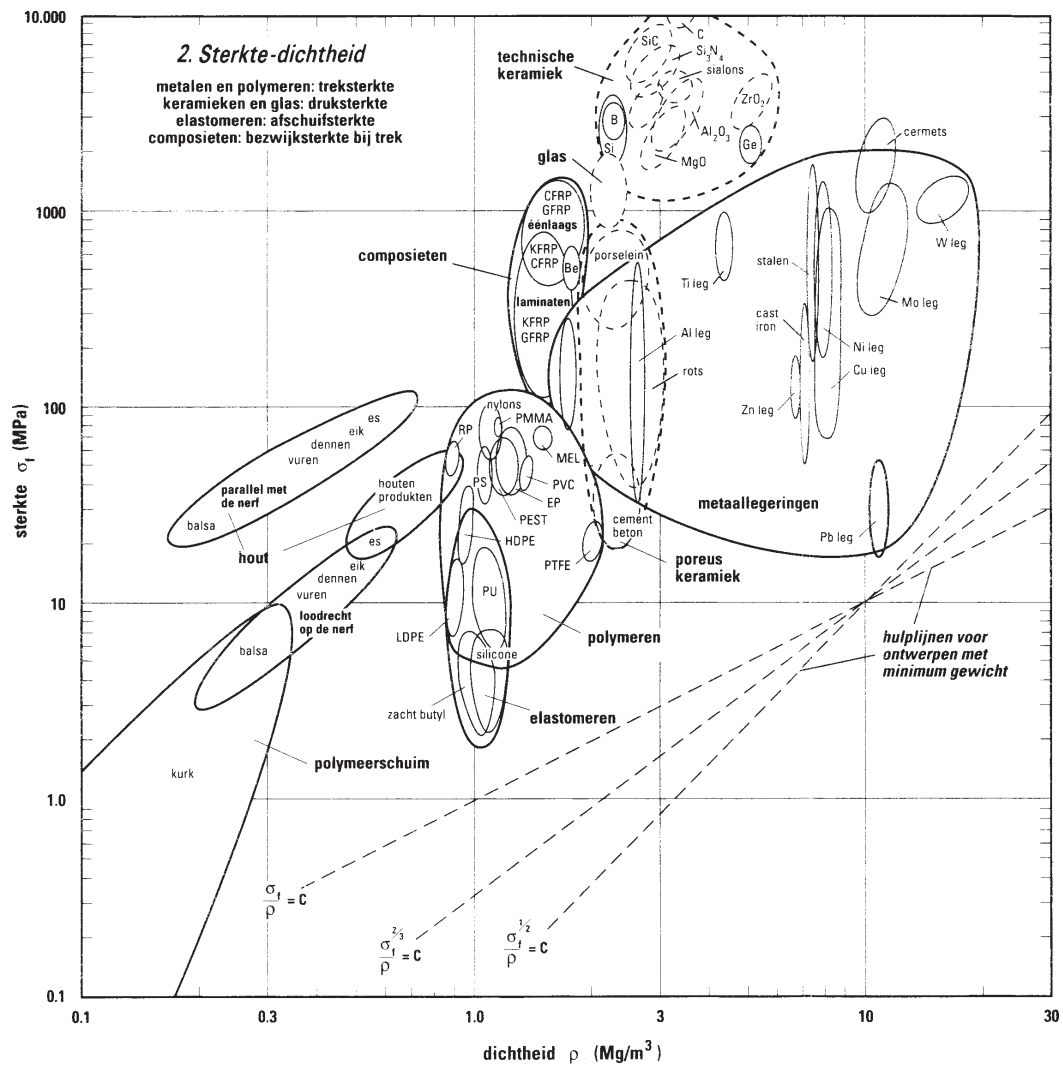
Materiaalgroep	Materiaalsoort	Aanduiding
Glas Borosilicaat	glas	B-glas
	Soda glas	Na-glas
	Silica	SiO ₂
Hout	Essehout	Es
	Balsahout	Balsa
	Vurehout	Vuren
	Eikehout	Eik
	Grenen	Grenen
	Triplex enz.	Triplex
	Elastomeren	Natuur-rubber
Hard butyl rubber		Hard butyl
Polyurethaan		PU
Siliconen rubber		Silicone
Zacht butyl rubber		Zacht butyl
Polymeerschuim	Kurk	Kurk
	Polyester	PEST
	Polystyreen	PS
	Polyurethaan	PU

Tabel 8.3: Materialen in Ashby diagrammen (vervolg van Tabel 8.2)



Figuur 8.3: Modulus-dichtheid diagram.

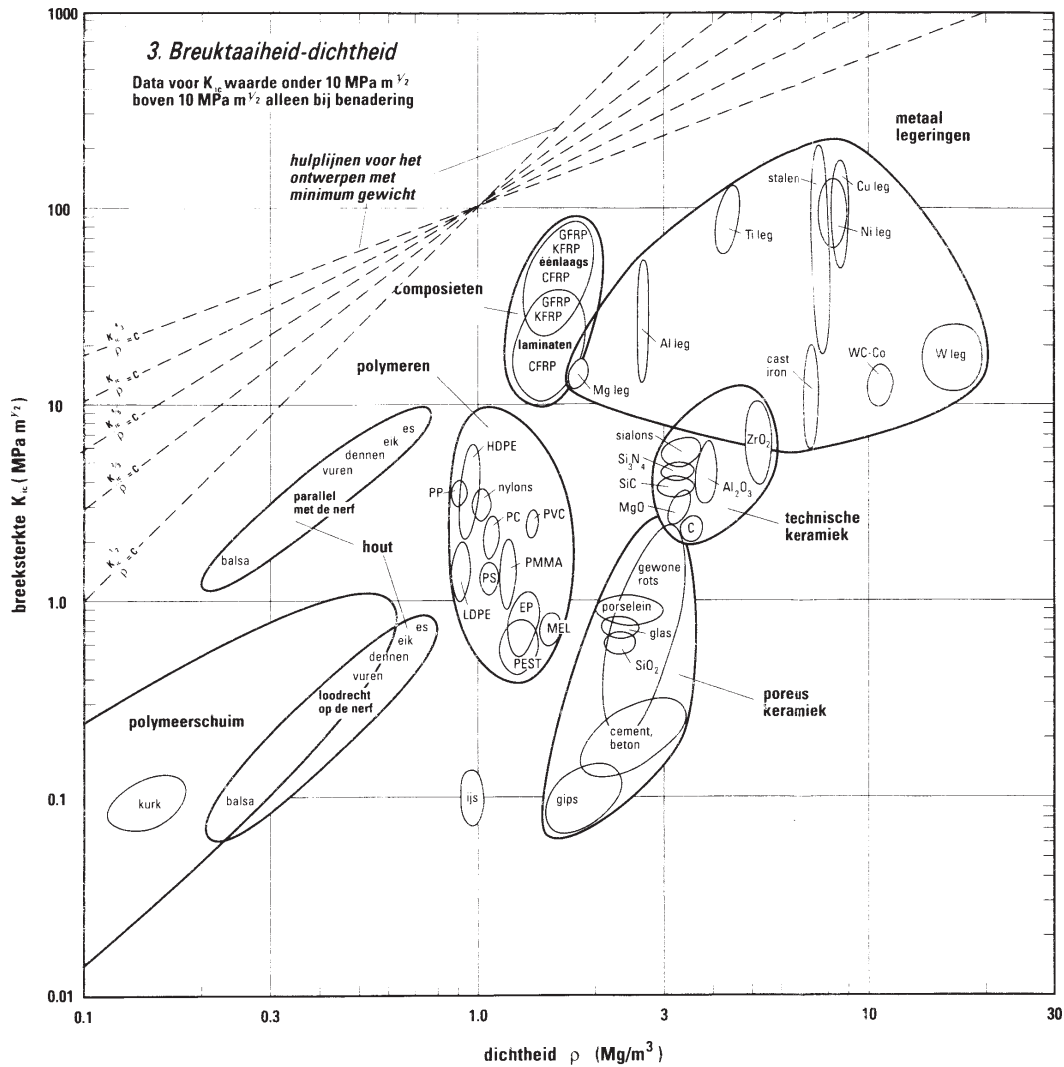
tegen het voortschrijden van een scheur wordt uitgedrukt in de 'breuktaaiheid'; K_{ic} . Ook hier krijgen we weer een zeer breed gebied. Voor K_{ic} van 0,01 tot 100 MPa m^{1/2}. De lage waarden horen bij brosse materialen die elastisch vervormen tot ze breken. De breukmechanica beschrijft dit lineair-elastisch gedrag vrij goed en de breuktaaiheid is hier een goedgedefinieerde eigenschap. De hoge waarden horen bij zeer plastische materialen, die een zeer grote plasticiteit vertonen voor breuk. Voor deze materialen is de breuktaaiheid



Figuur 8.4: Sterkte-dichtheid diagram.

slechts een benaderde waarde, die is afgeleid van de 'kritische J-integraal' en uit metingen van de kritische scheurgrootte.

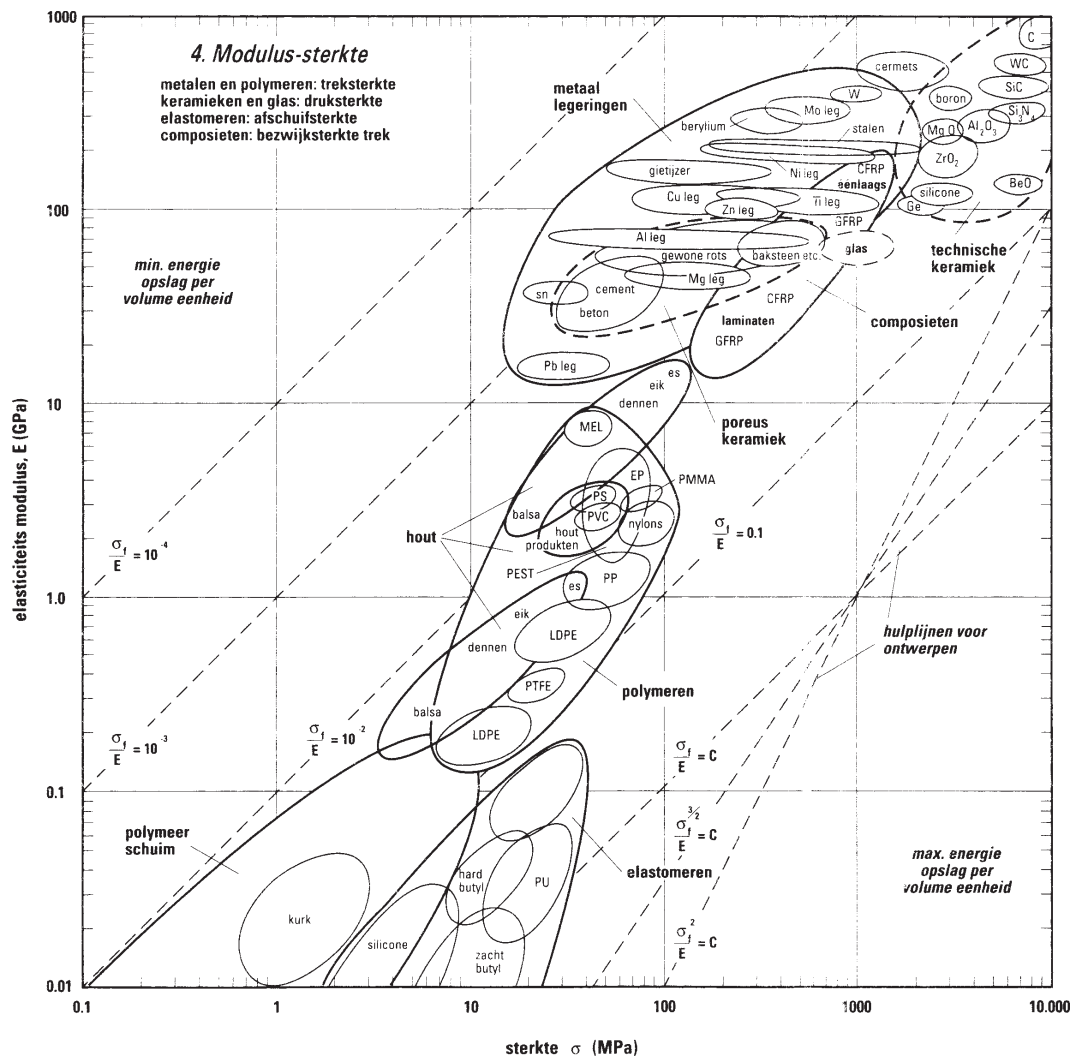
Veren maakt men zowel van hoge-sterkte staalsoorten als van rubber. Hoe is het mogelijk dat twee zulke verschillende materialen geschikt zijn voor eenzelfde taak? Kaart 4 in Figuur 8.6 kan ons hierbij helpen en wordt zo misschien wel de meest interessante kaart voor gebruik (zie hiervoor de uitgebreide uitleg van dit diagram). De 'sterkte' wordt op dezelfde wijze geïnterpreteerd als voor diagram 2 in Figuur 8.4.



Figuur 8.5: Breuktaaiheid-dichtheid diagram.

De breuktaaiheid van de meeste kunststoffen is kleiner dan die van de meeste keramische materialen. Toch worden kunststoffen veel gebruikt in technische constructies: keramische materialen worden (nog steeds) met heel wat meer omzichtigheid behandeld vanwege hun broosheid.

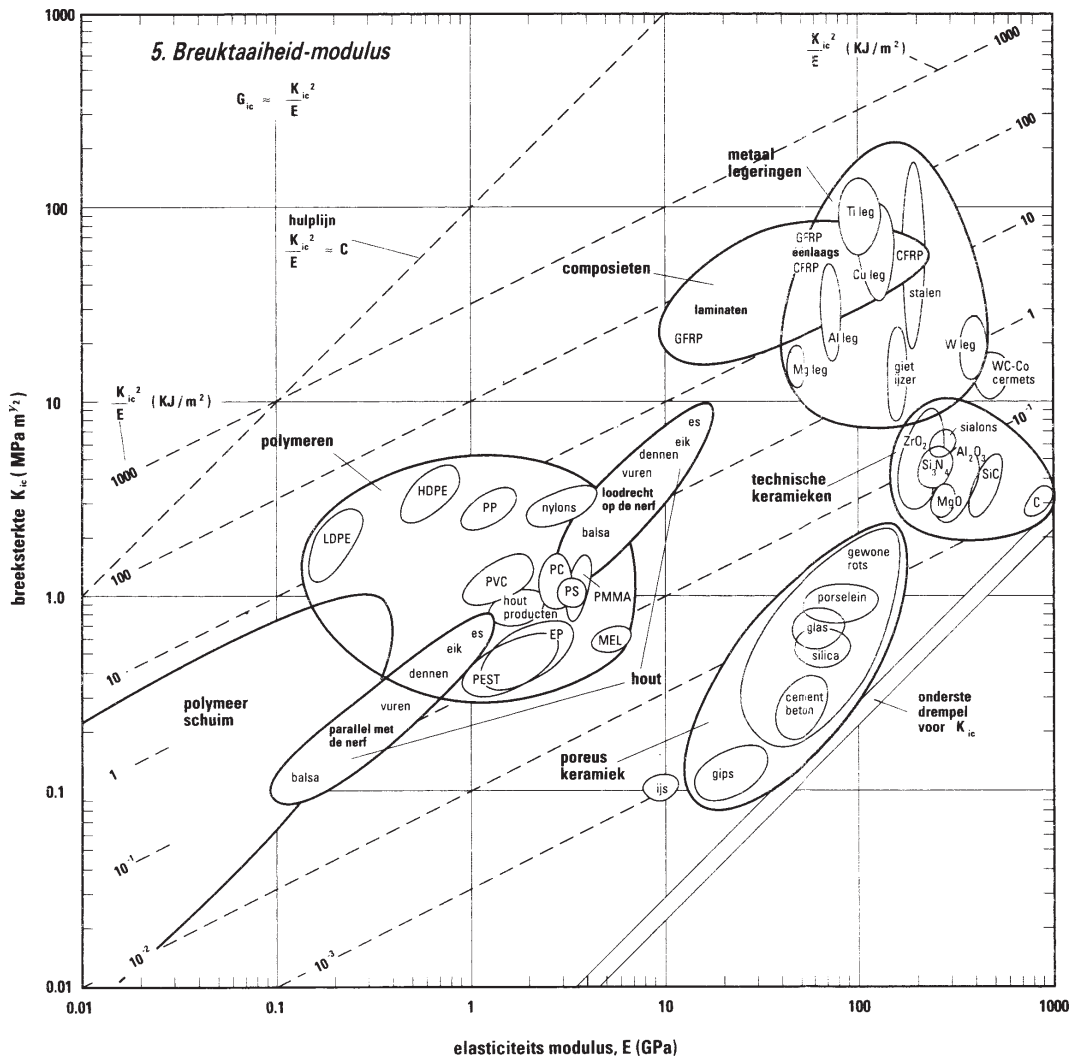
In dit diagram wordt de breuktaaiheid uitgezet tegen de sterkte. Opmerkelijk is dat de afmetingen van de 'proceszones' (plastische zone) (aangegeven met stippellijnen) zeer sterk verschillen: van atomaire grootte voor zeer brosse keramieksoorten en glas tot vele centimeters voor de meest taaië met-



Figuur 8.6: Modulus-sterkte diagram.

alen. Bij een bepaalde afmeting van de 'proceszone' neemt de breuktaaiheid toe met de sterkte (zoals ook kan worden verwacht).

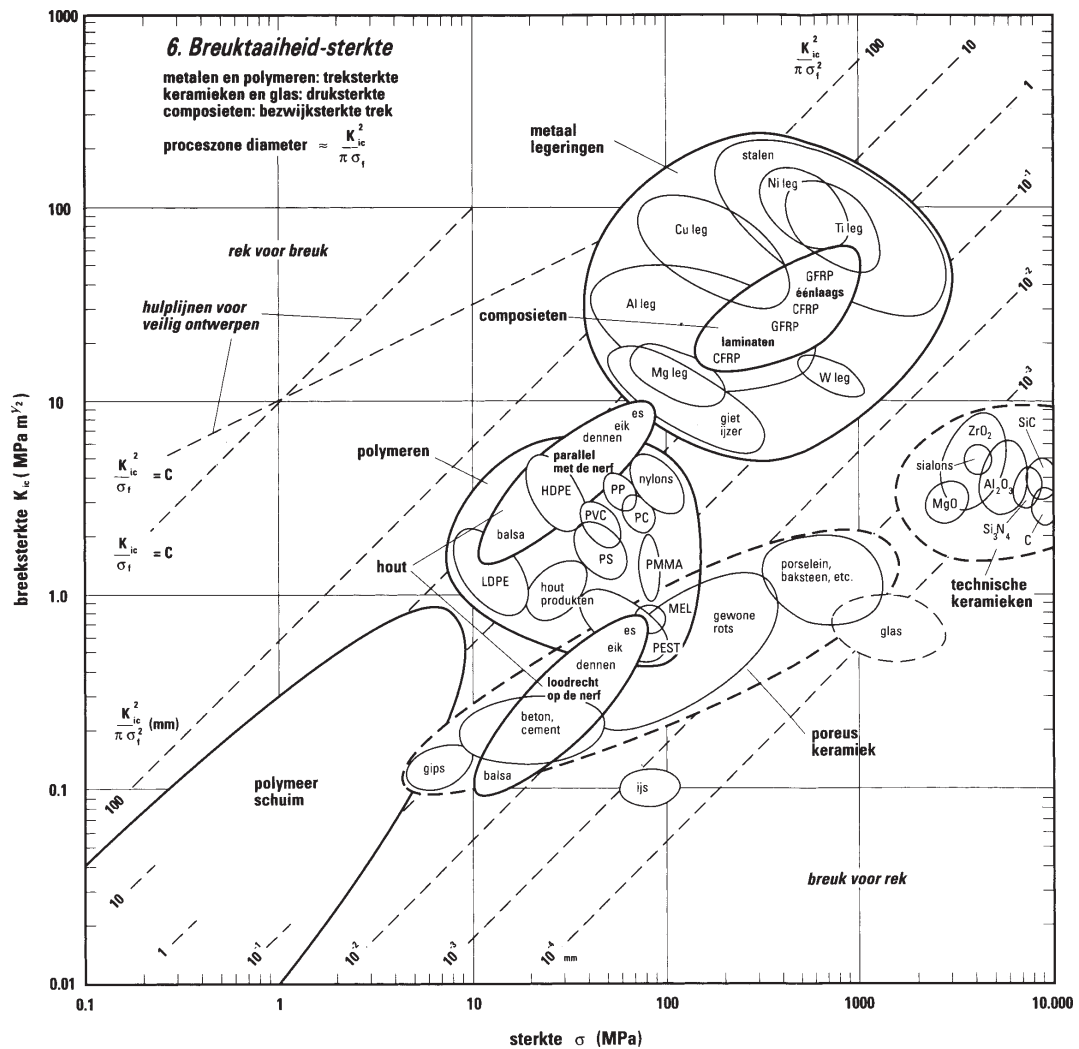
Klokken worden traditioneel uit brons gemaakt (gegoten). Ze kunnen echter ook uit glas worden vervaardigd en zelfs siliciumcarbide zou goed voldoen. Zowel metaal, glas als keramiek hebben onder de juiste voorwaarden een relatief lage intrinsieke demping, of een lage 'inwendige wrijving', wat een belangrijke materiaaleigenschap is. We meten de intrinsieke demping via een dempingscoëfficiënt die in deze kaart is uitgezet.



Figuur 8.7: Breuktaaiheidsmodulus diagram.

De materiaaleigenschap die de warmtestroomsnelheid door een materiaal bepaalt is de warmtegeleidbaarheid. Bij temperatuurverschillen bepaalt de temperatuurvereffeningscoëfficiënt de temperatuurveranderingen. Kaart 8 in Figuur 8.10 geeft lijnen voor gelijke soortelijke warmte.

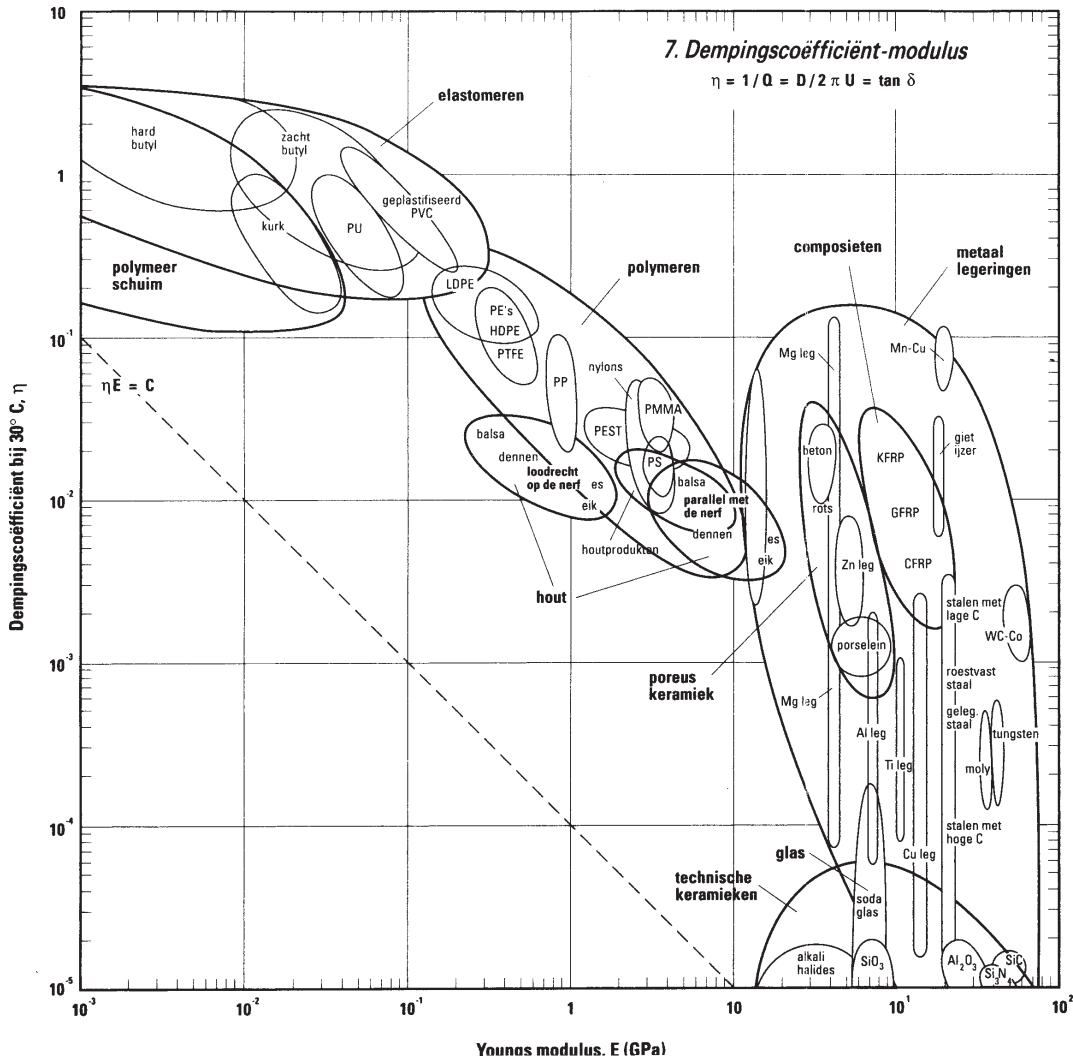
Bijna alle vaste stoffen zetten bij verwarming uit. De thermische trillingen van atomen veroorzaken, zelfs bij kamertemperatuur, grote verplaatsingen. Bij stijgende temperatuur neemt de gemiddelde afstand tussen de atomen toe. De toename van de atomaire afstand als functie van de temperatuur is



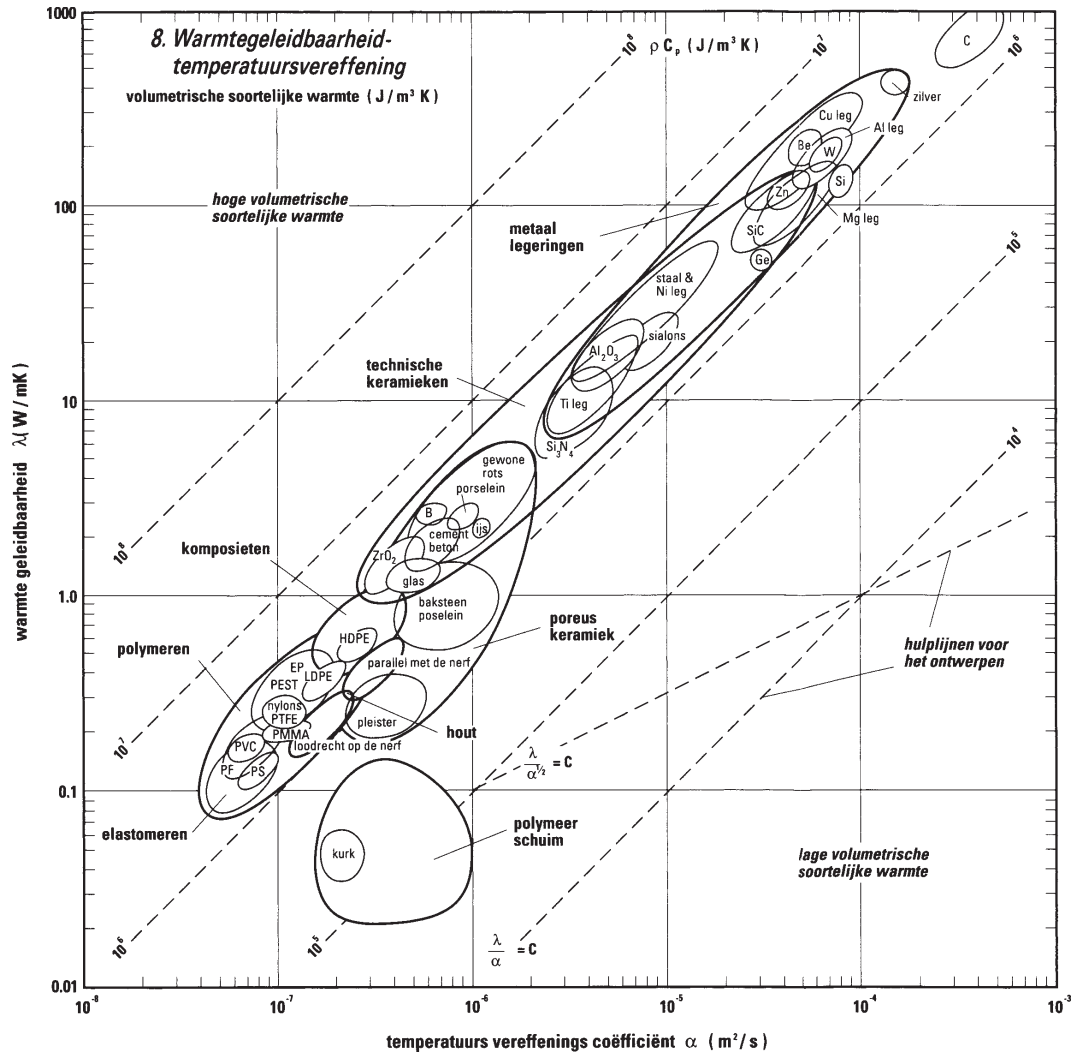
Figuur 8.8: Breuktaaiheidsterkte diagram.

de lineaire uitzettingscoëfficiënt.

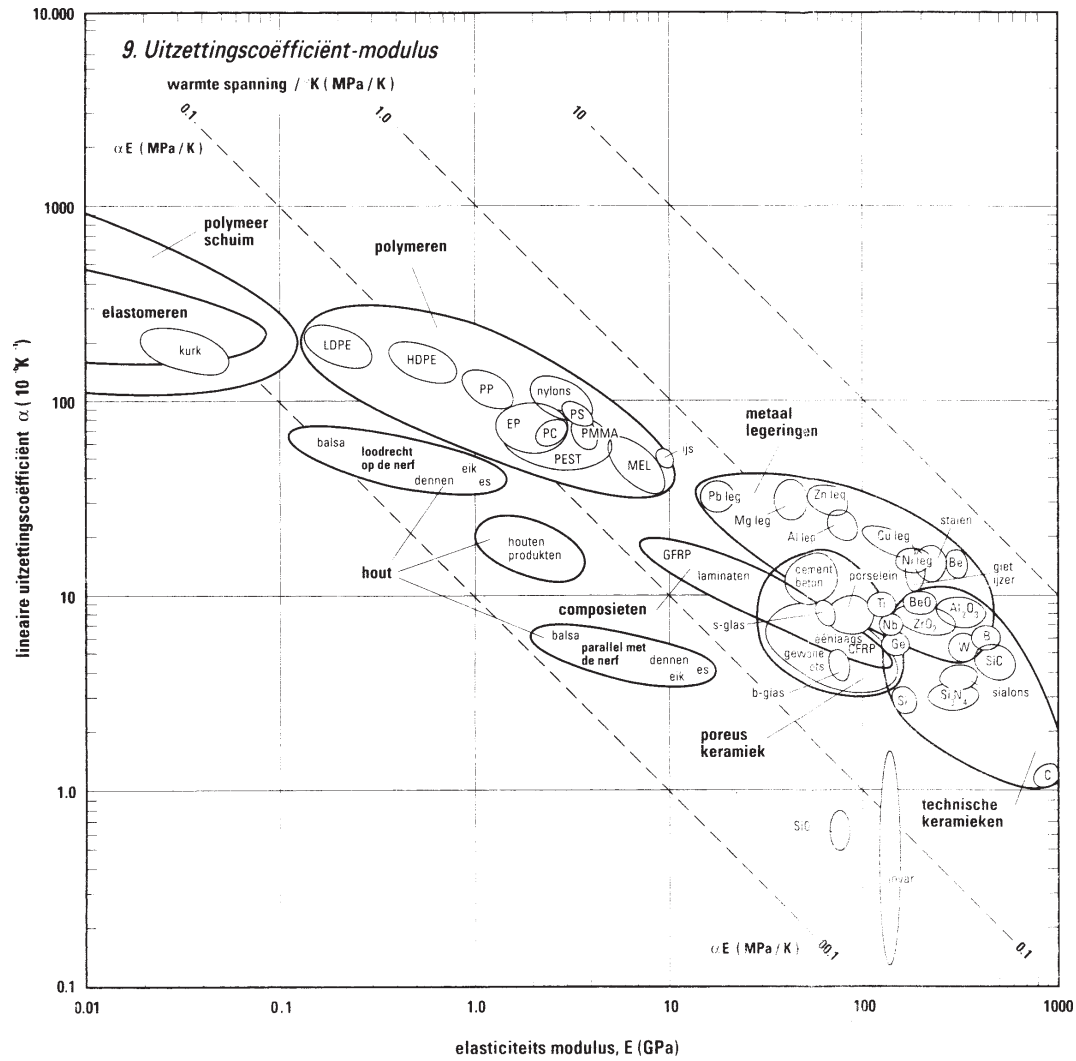
Wanneer een ijsblokje in een frisdrank wordt gedaan, hoor je het breken. Het ijs begeeft het onder een thermische schok. De mogelijkheid van een materiaal om zulke spanningen te weerstaan noemen we 'thermische schokbestendigheid'. Deze hangt af van de thermische uitzettingscoëfficiënt en zijn genormaliseerde sterkte. Deze waarden zijn in kaart 10 in beeld gebracht.



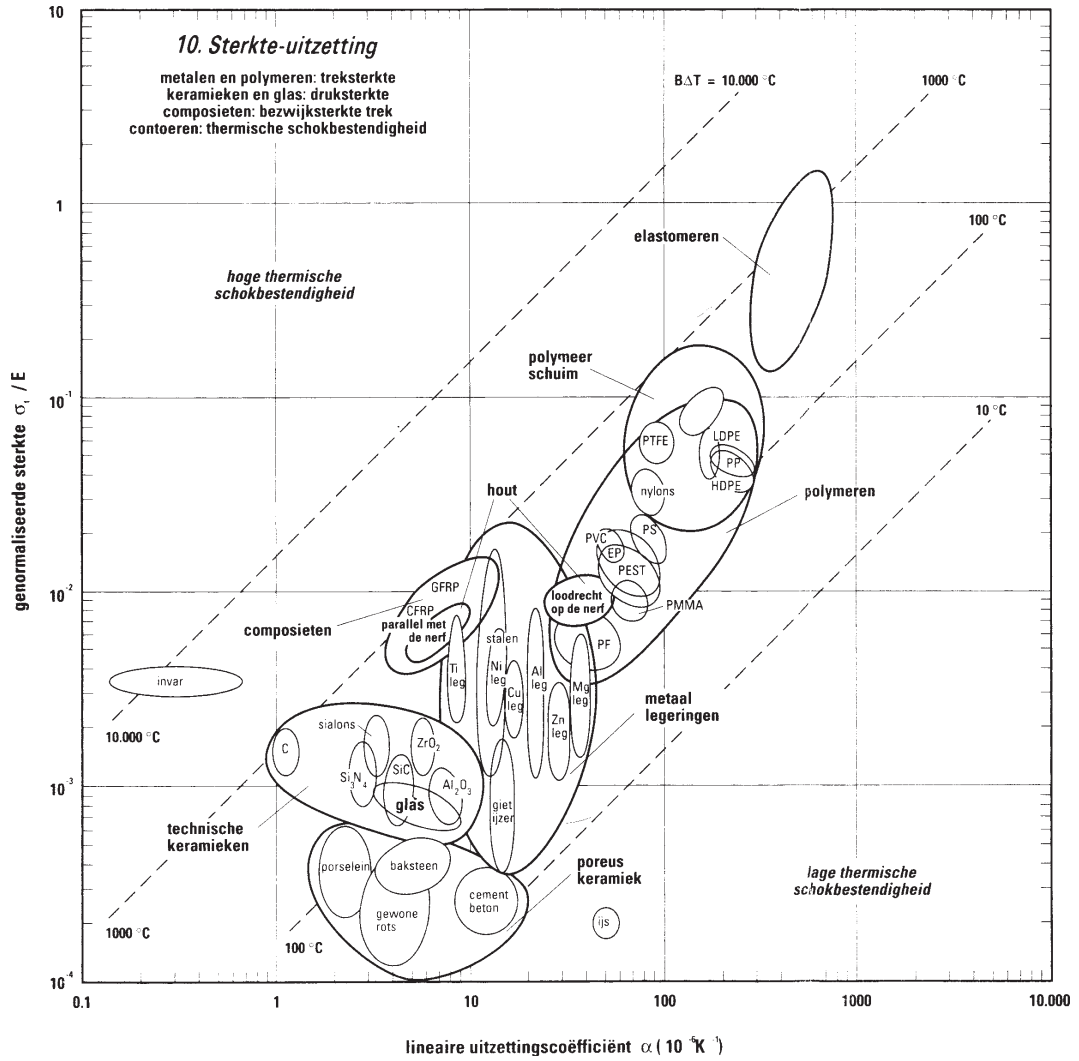
Figuur 8.9: Dempingscoëfficiënt-modulus diagram.



Figuur 8.10: Warmtegeleidbaarheid-temperatuurvereffenings diagram.



Figuur 8.11: Lineaire uitzettingscoëfficiënt-modulus diagram.



Figuur 8.12: Genormaliseerde sterkte-lineaire uitzettingscoëfficiënt diagram.

Bijlage B

Lijst van veelgebruikte materialen

The following 25 materials are those most commonly used in the design of mechanical products; in themselves they represent the broad range of other materials.

Steel and irons

1. 1020
2. 1040
3. 4140
4. 4340
5. S30400
6. S316
7. 01 tool steel
8. Gray cast iron

Aluminum and copper alloys

9. 2024
10. 3003 or 5005
11. 6061
12. 7075
13. C268

Other metals

14. Titanium 6-4
15. Magnesium AZ63A

Plastics

16. ABS
17. Polycarbonate
18. Nylon 6/6
19. Polypropylene
20. Polystyrene

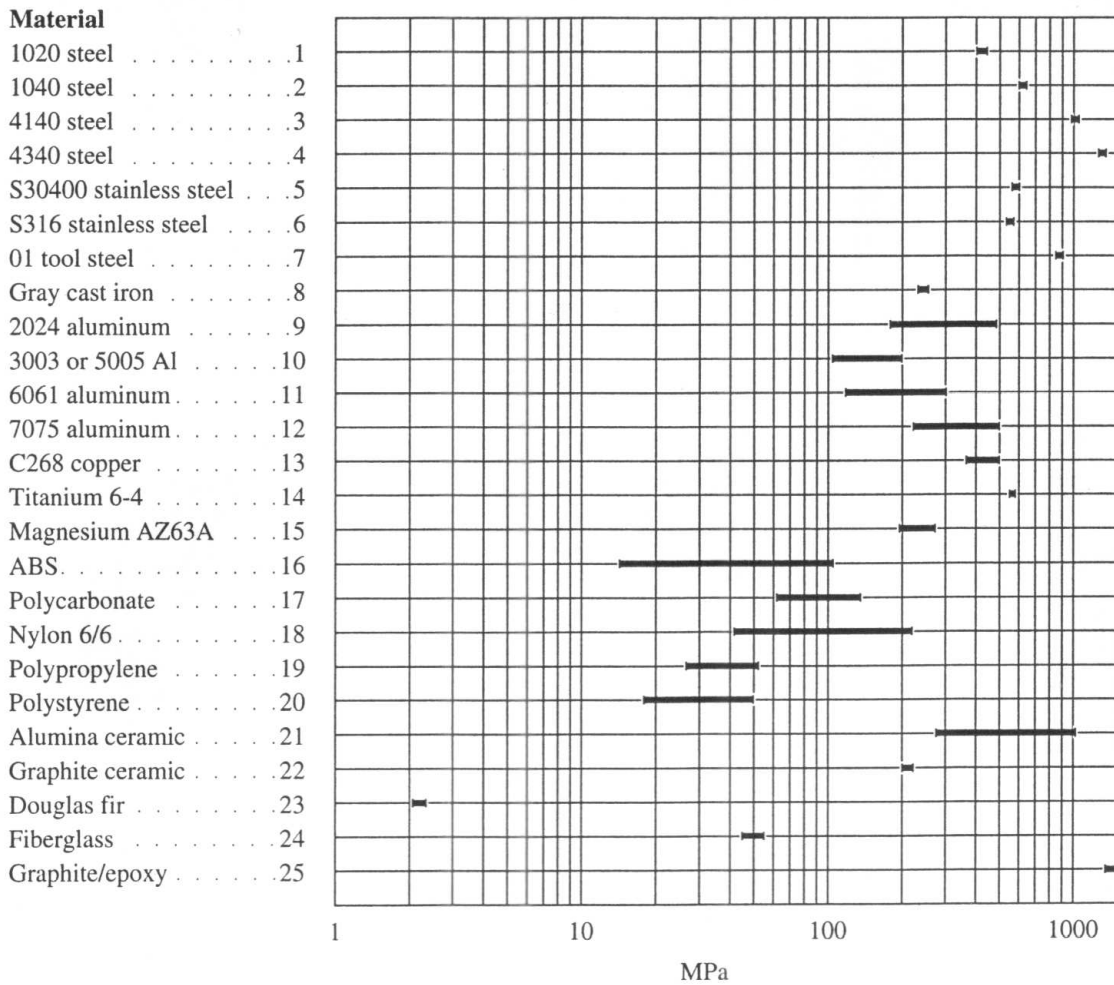
Ceramics

21. Alumina
22. Graphite

Composite materials

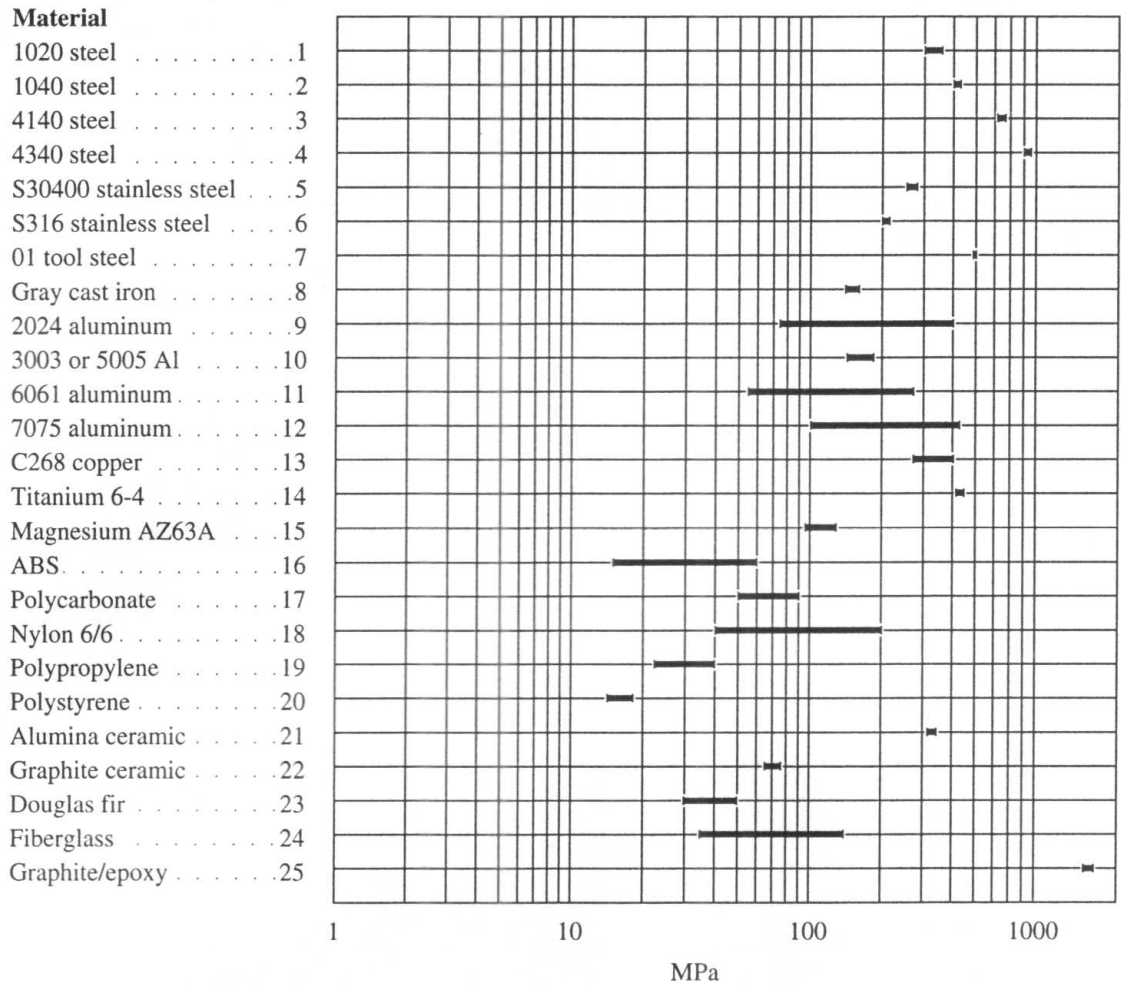
23. Douglas fir
24. Fiberglass
25. Graphite/epoxy

Figuur B.1: Vijfentwintig meestgebruikte materialen.

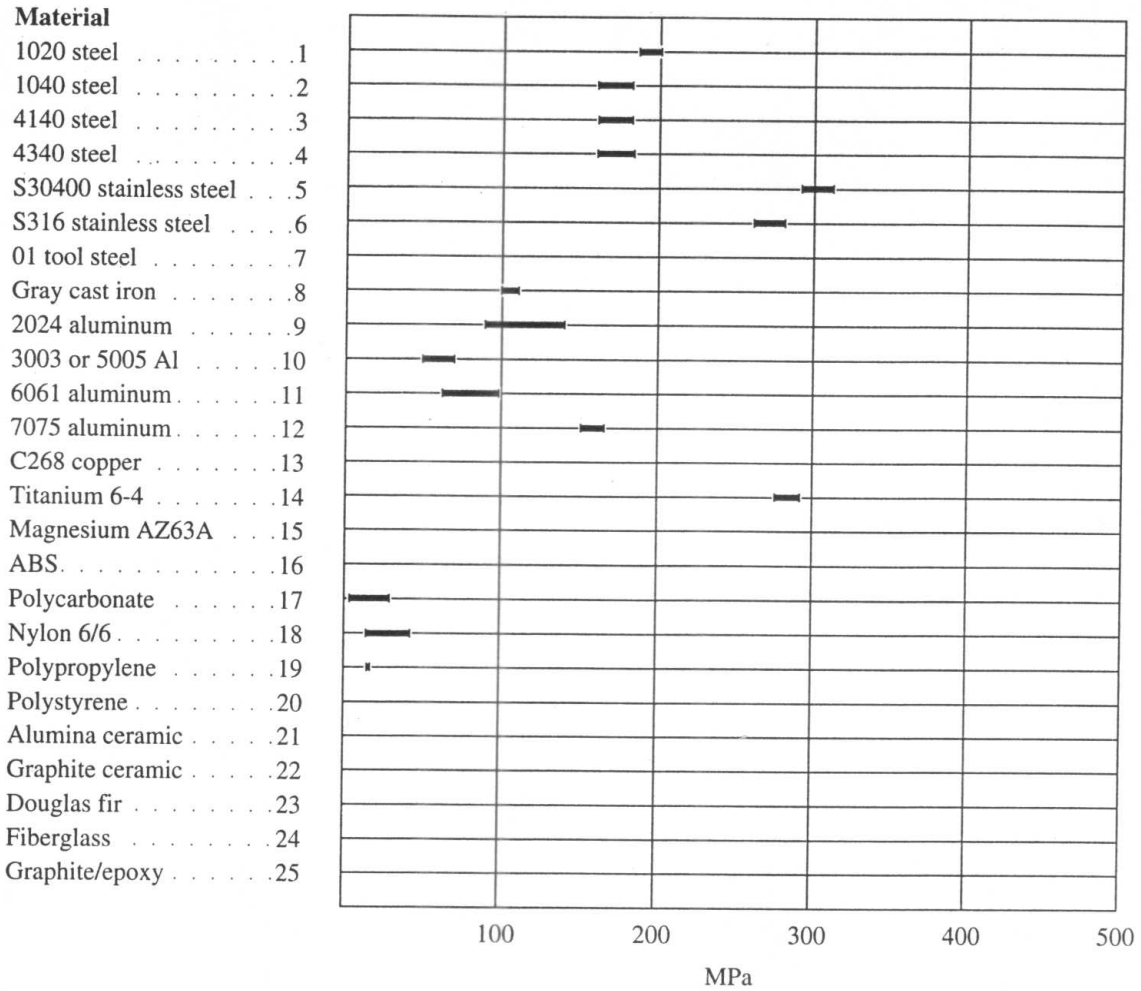


Note: Longitudinal value for graphite/epoxy.
 1 MPa = 144.7 psi.

Figuur B.2: Treksterkte van de vijfentwintig meestgebruikte materialen.

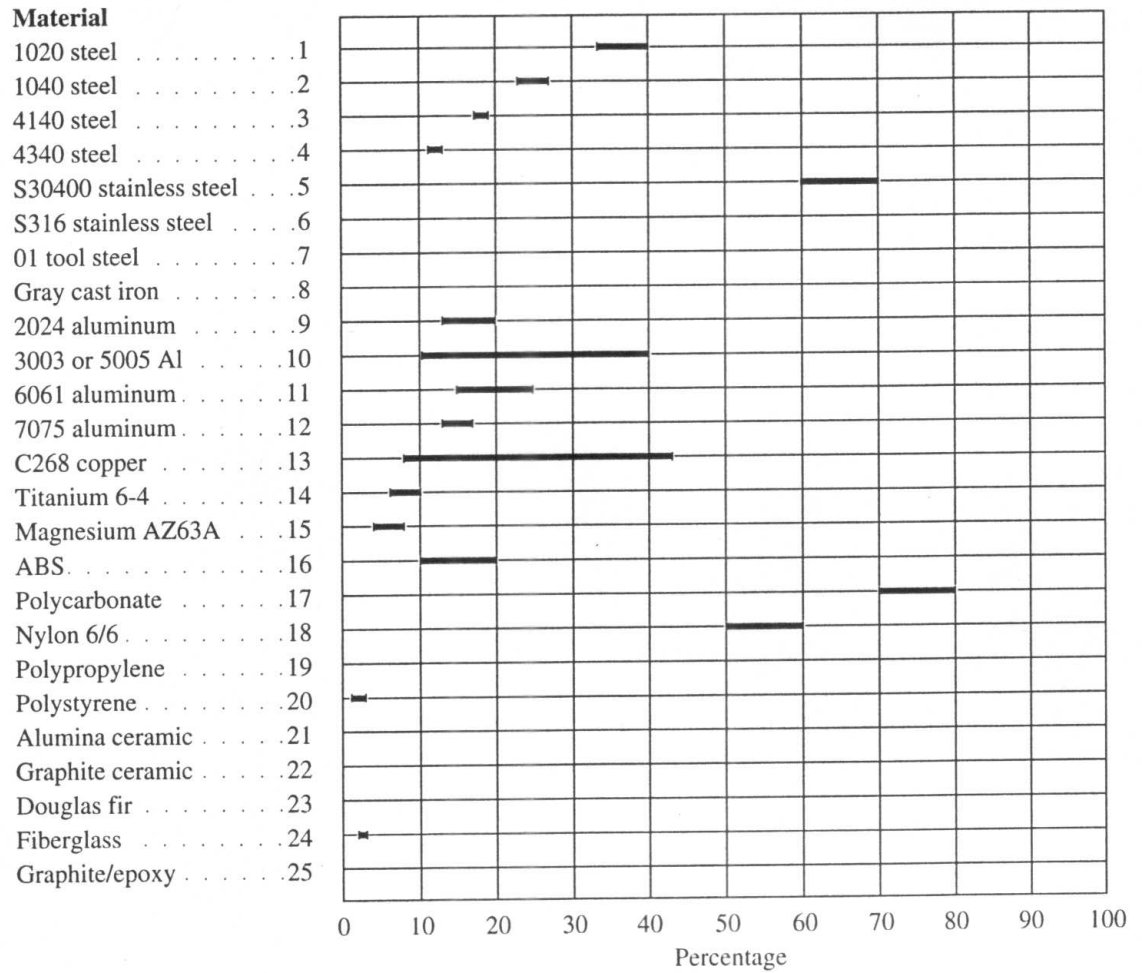


Figuur B.3: Yield sterkte van de vijftientig meestgebruikte materialen.

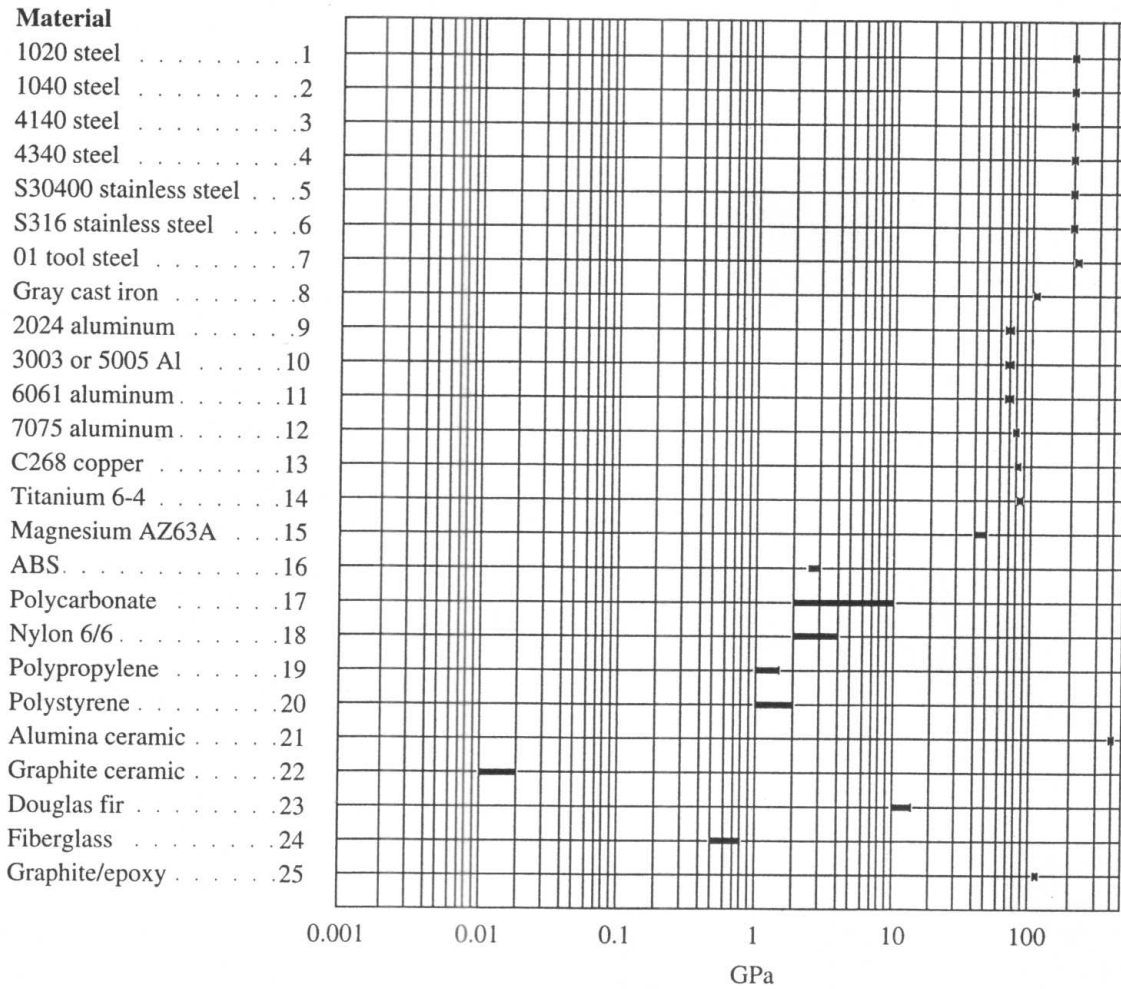


Note: Some materials do not have an endurance limit.
 1 MPa = 144.7 psi.

Figuur B.4: Endurance Limit van de vijftiwintig meestgebruikte materialen.

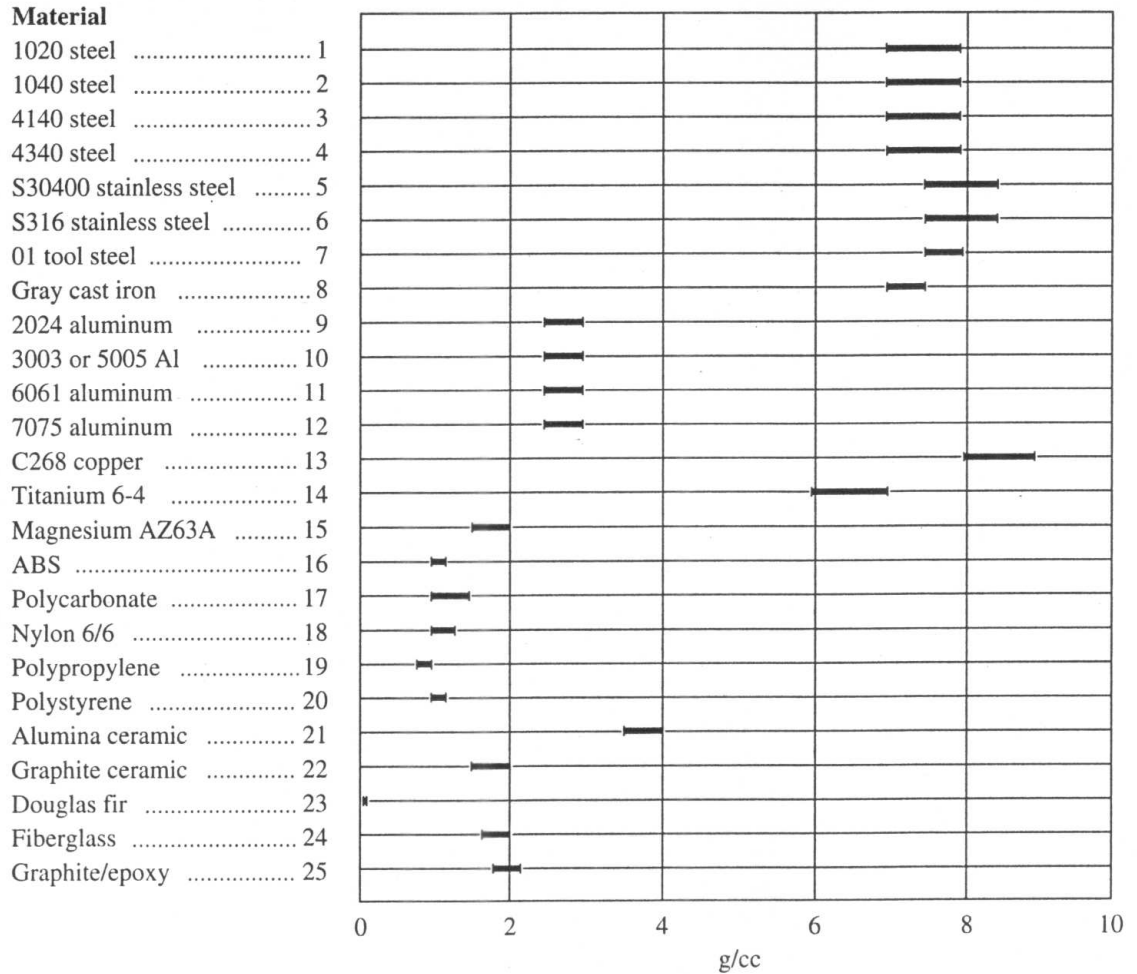


Figuur B.5: Uittrekking van de vijftientig meestgebruikte materialen.



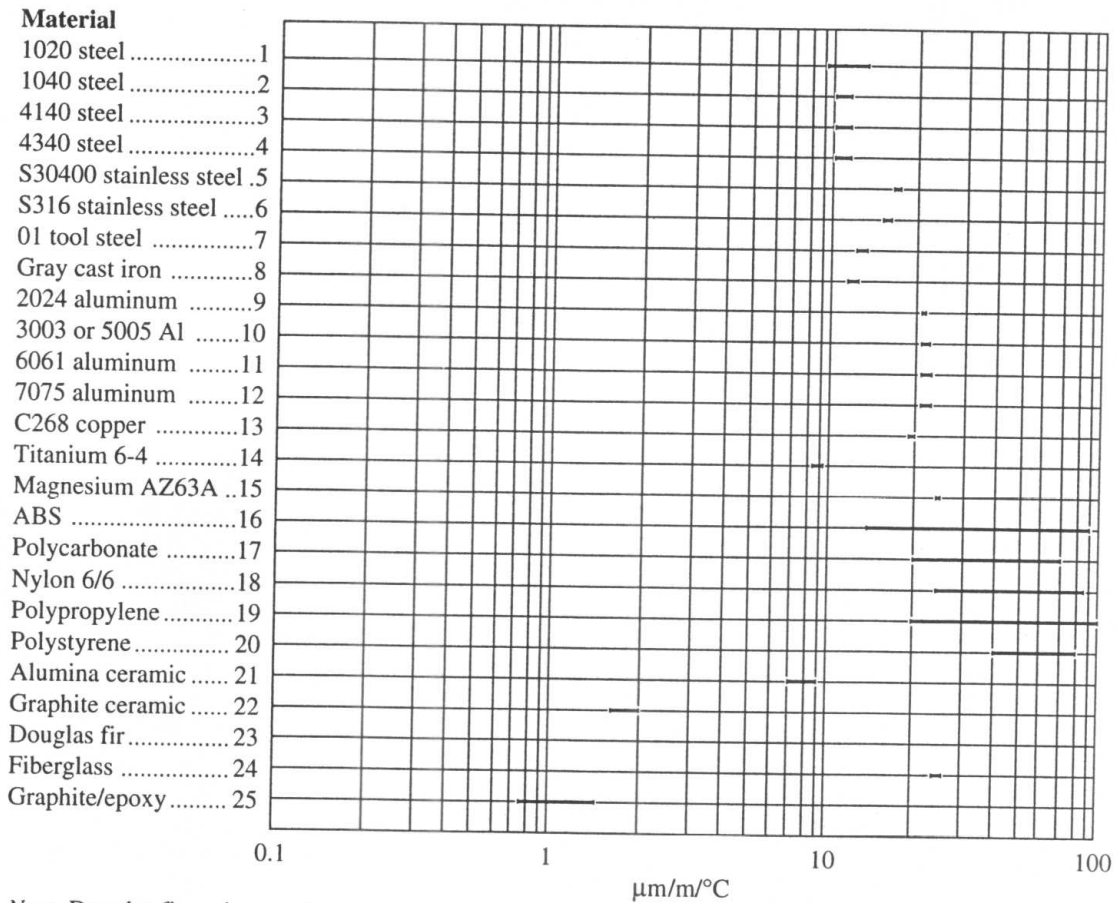
Note: 1 GPa = 144.7 kpsi.

Figuur B.6: Elasticiteitsmodulus van de vijftientig meestgebruikte materialen.



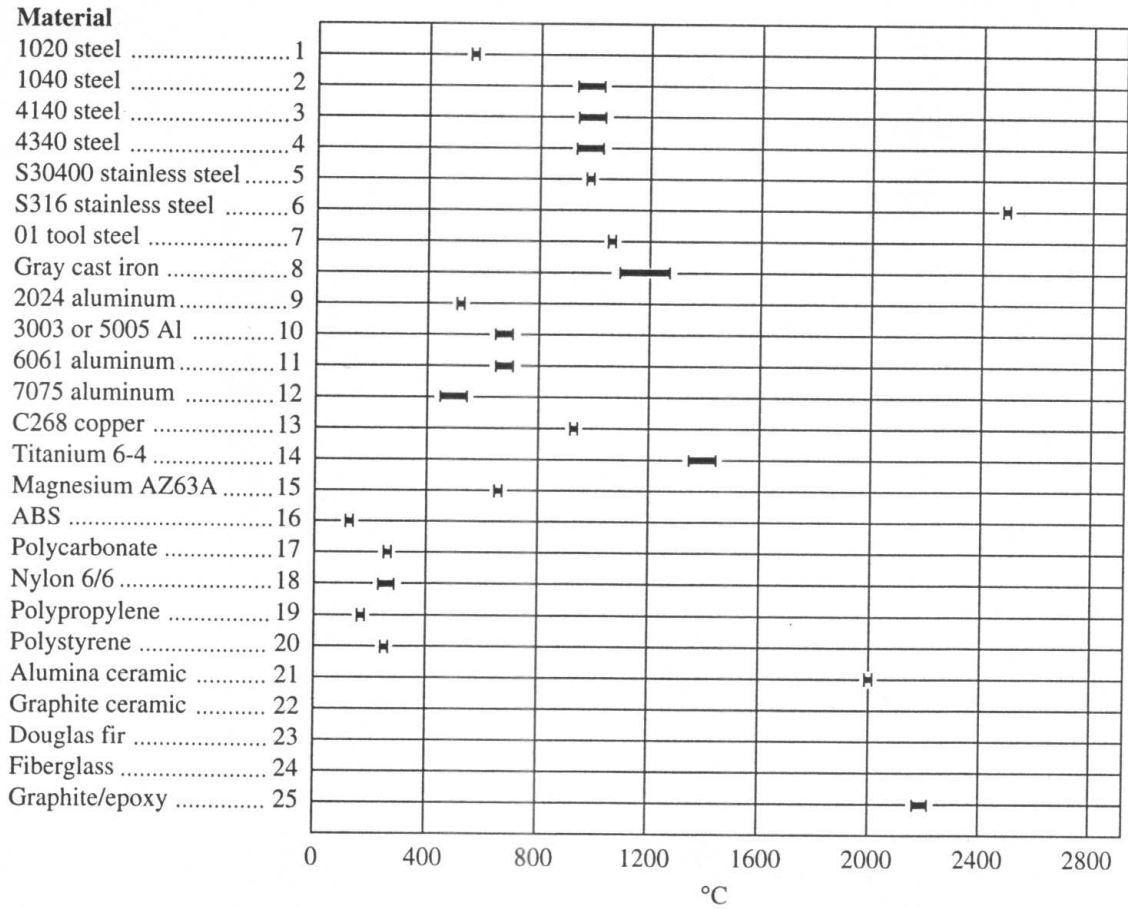
Note: 1g/cc = 0.036 lb/in³.

Figuur B.7: Dichtheid van de vijftientig meestgebruikte materialen.



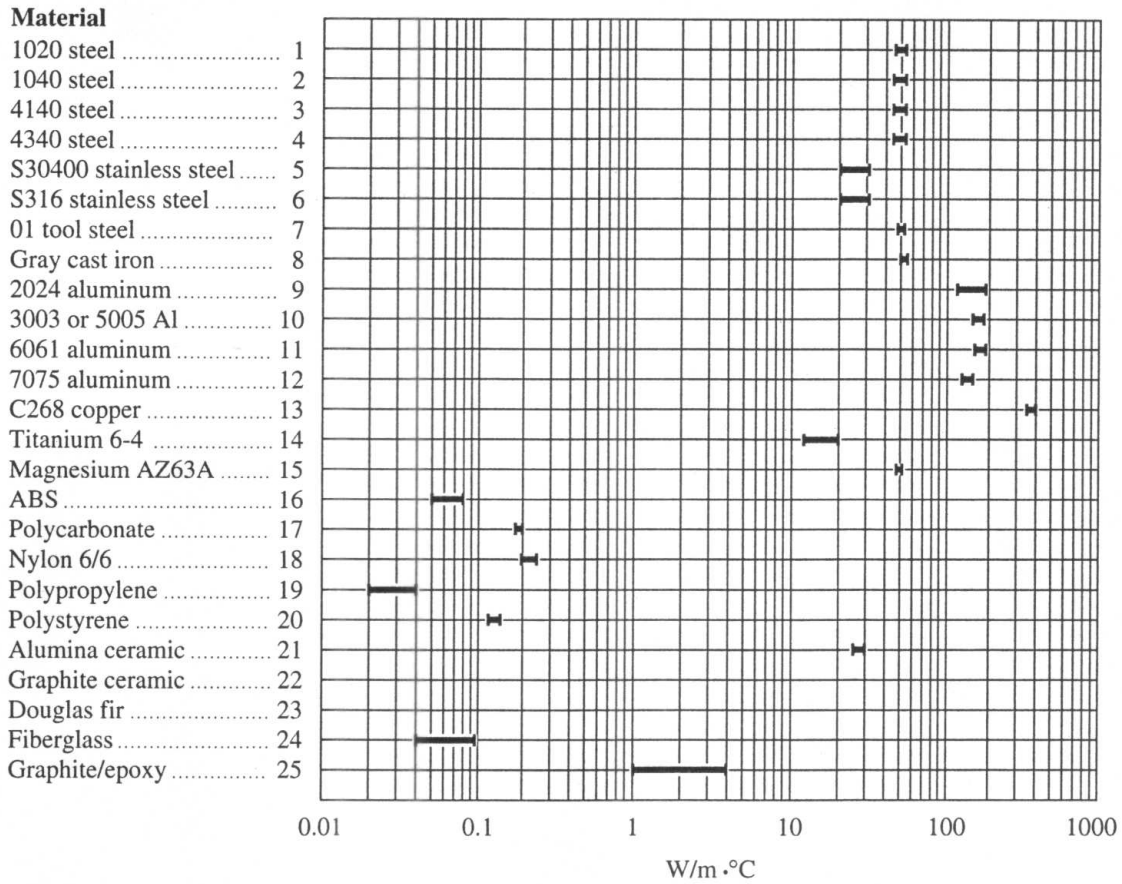
Note: Douglas fir varies greatly.
 $1 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C} = 0.55 \mu\text{in}/\text{in}/^{\circ}\text{F}$.

Figuur B.8: Uitzettingscoëfficiënt van de vijftientig meestgebruikte materialen.



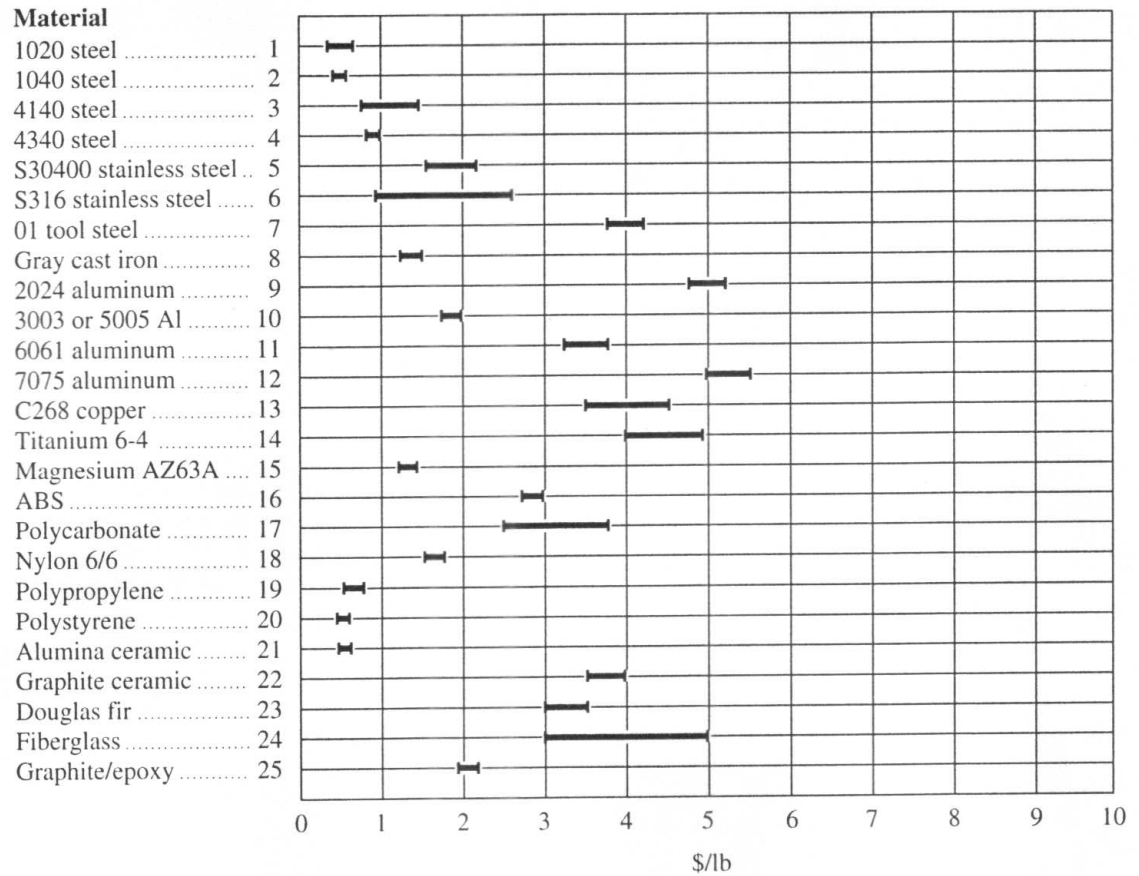
Note: Data unavailable for graphite, Douglas fir, and Fiberglass.
 $^{\circ}\text{F} = 32.2 + (9/5)^{\circ}\text{C}$.

Figuur B.9: Smelttemperatuur van de vijftig meestgebruikte materialen.



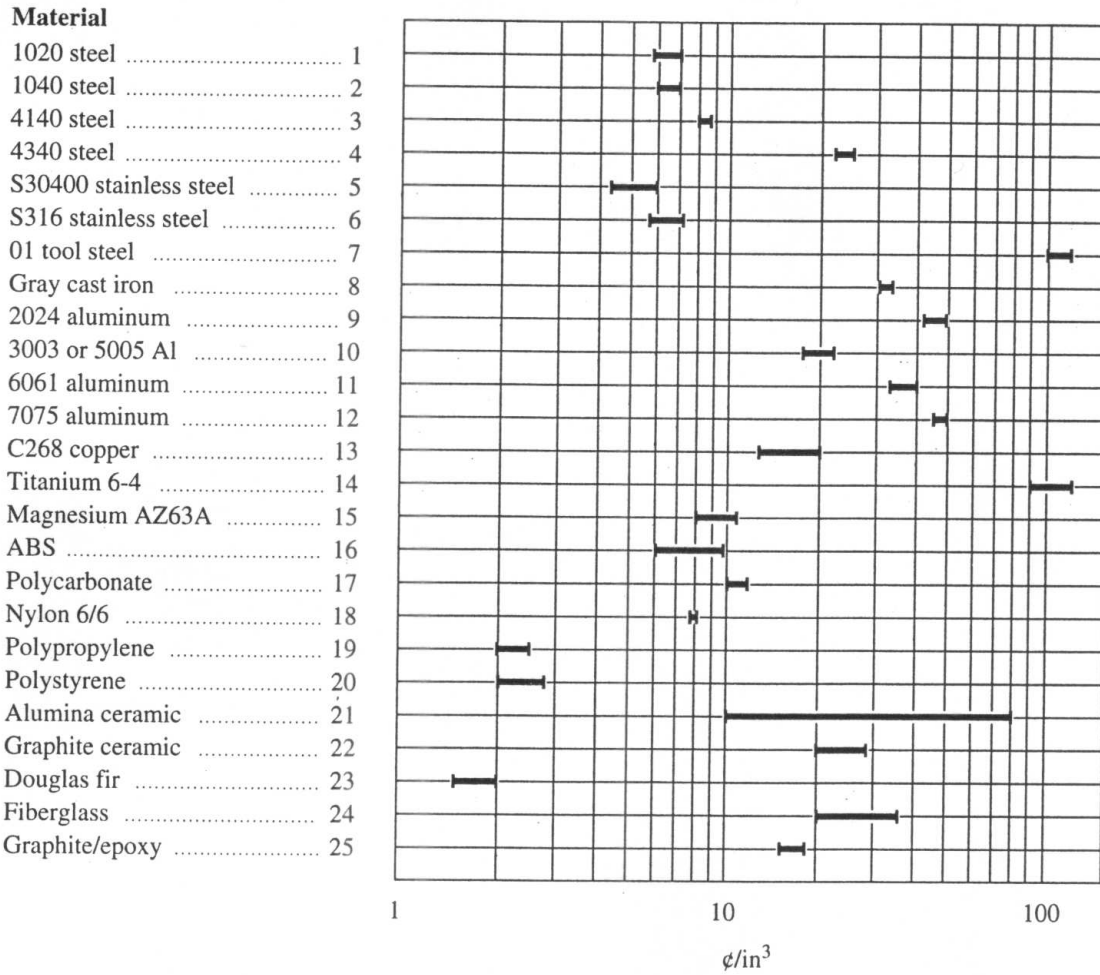
Note: Data unavailable for some materials.
 $W/m \cdot ^\circ C = 0.57 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ F$.

Figuur B.10: Thermische geleidbaarheid van de vijftientig meestgebruikte materialen.



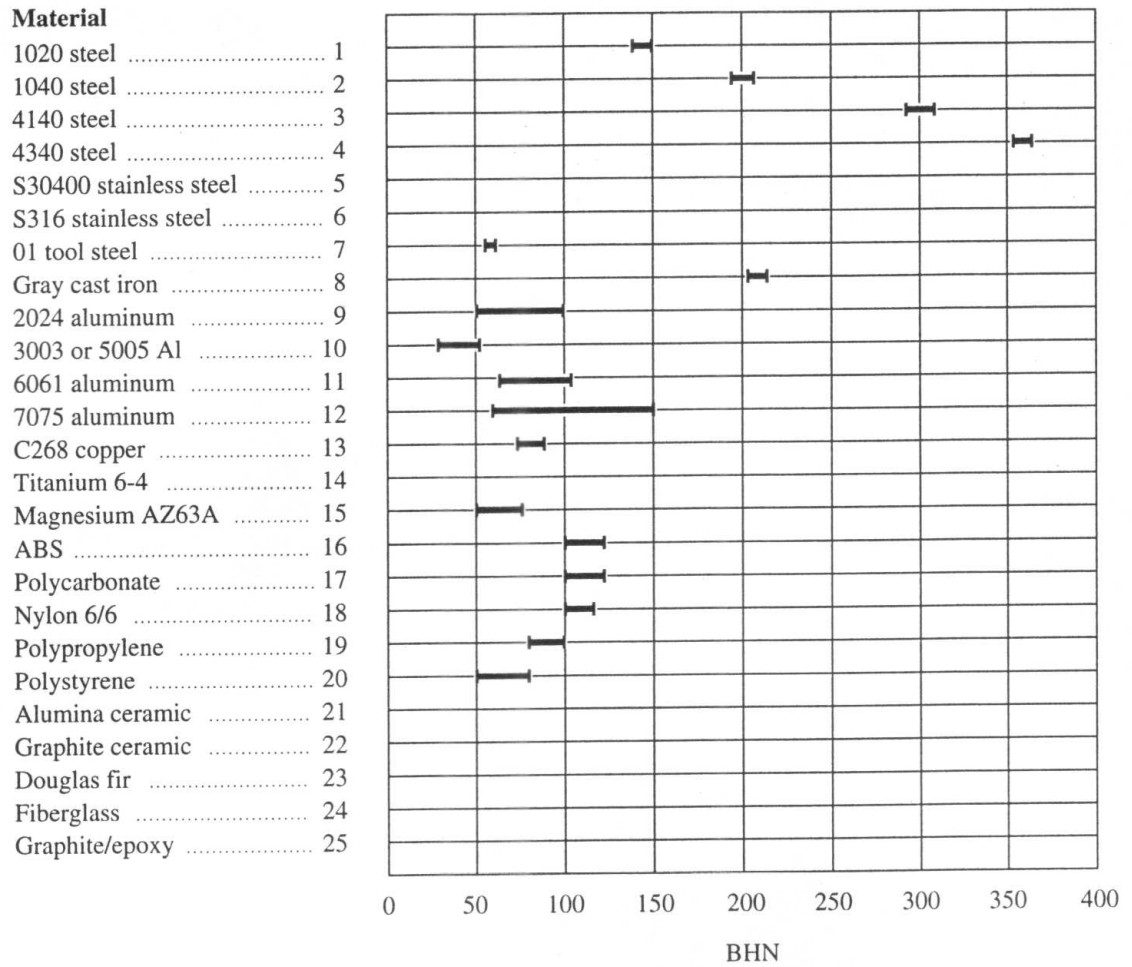
Note: \$ year 2000.

Figuur B.11: Kost (in \$) per pond van de vijfentwintig meestgebruikte materialen.



Note: \$ year 2000.

Figuur B.12: Kost (in \$) per volume van de vijfentwintig meestgebruikte materialen.



Figuur B.13: Hardheid van de vijftientig meestgebruikte materialen.

Component	Materials
Aircraft components	*Aluminum 2024, 5083, *6061, *7075; *titanium 6-4; *steel 4340, *4140; *graphite/epoxy; polyamide-imide, maraging steel
Auto engines	*Gray cast iron
Auto instrument panels	*Polypropylene; modified polyphenylene oxide
Auto interiors	*Polystyrene; polyvinyl chloride; *ABS; *polypropylene
Auto bodies, panels, parts, and coverings	*Steel 1020, *1040; *ABS; *alumina; *nylon; polyphenylene sulfide; aluminum 5083; *stainless steel 316; *fiberglass/epoxy; *polycarbonate
Auto taillight lenses	*Polycarbonate
Automotive trim	*ABS; styrene acrylonitrile; *polypropylene
Bearings and bushings	*Nylon; acetal; bronze; Teflon; beryllium copper; *stainless steel 316
Boat hulls	Styrene acrylonitrile; *aluminum 6061; polyethylene; *fiberglass/epoxy
Bottles	*Polycarbonate; thermoplastic polyester; high-density polyethylene; *polypropylene; polyvinyl chloride; PET
Battery cases	*Polystyrene
Business machine cases	*ABS; *polystyrene; *polycarbonate
Buttons	Melamine; urea
Cams	*Nylon; *aluminum 6061
Cabinets and housings	*ABS; acetal; *polycarbonate; polysulfone; *nylon; *polypropylene; *polystyrene; polyvinyl chloride; *steel 1040
Compact disks	*Polycarbonate
Computer casings	*ABS
Conveyor chains	Acetal; *steel 1040,
Cryogenic parts	Boron/aluminum; *graphite/epoxy; aluminum 5086
Dies	*O1 tool steel; cemented carbide
Electric connectors	Polysulfone; phenolic; *nylon; polyethersulfone (PES); *ABS
Fan blades	*Nylon; *steel 4340
Forgings	*Steel 1020, *4340; copper alloys; aluminum alloys
Fixtures	*O1 and A2 tool steels; epoxy; *aluminum 6061
Gears	Acetal; *gray cast iron; *steel 1020, *4340; *nylon; *polycarbonate; polyamide; filled phenolic; aluminum bronze
Handles and knobs	Phenolic; melamine; urea; nylon*; *ABS; acetal
Helmets	*Polycarbonate; *ABS
Heat exchangers	Stainless steel

Figuur B.14: Gebruikte materialen in componenten.

Hoses	*Nylon; *polycarbonate
House siding and gutters	*Polypropylene
Keys	*Steel 1020, *4140
Levers and linkages	Acetal; *steel 4140, *4340
Machine bases	*Gray cast iron; Steel 1020; ductile iron
Marine parts and instruments	Styrene acrylonitrile; *steel 1020; aluminum 5083, *6061; *polycarbonate; *titanium 6-4
Microwave cookware	Thermoplastic polyester; *polycarbonate; *polypropylene
Molded containers	*ABS; *polypropylene; *polycarbonate; polystyrene; polyvinyl chloride; vitreous graphite
Pipes	Polyvinyl chloride; *copper
Screws and bolts	*Steel 1020, *1040, *4140; acetal; *nylon
Shafts	*Steel 1020, *1040, *4140, *4340
Springs	*Steel 1080, *4140, 6250; stainless steel; beryllium copper; *nylon; titanium 6-4; maraging steel; phosphor bronze; acetal
Structural components	*Cast iron; *Douglas fir; *alumina; *aluminum 2024, *6061, *7075; *steel 1020, *4140
Storage boxes	Polystyrene*
Switches and wire jacketing	Fluoropolymers; thermoplastic polyester; modified polyphenylene oxide; *nylon; copper C11400
Telephone cases	*ABS
Toys (plastic)	*ABS; high- and low-density polyethylene; *polypropylene; polyvinyl chloride
Utensils	*Aluminum 3003; *polycarbonate; polyphenylene sulfide; polytetrafluoroethylene
Valves	Acetal; polyamide-imide; *alumina; *nylon; *aluminum; bronze

Figuur B.15: Gebruikte materialen in componenten (vervolg van Tabel B.14).

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. Hemsch, 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.