

MATERIAALKEUZE VOOR ONTWERPERS

M. Kooijman
M. Pallada



Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u verkrijgen bij:

Sdu Klantenservice
Postbus 20014
2500 EA Den Haag
tel.: 070 378 98 80
fax: 070 378 97 83

© 2006 Sdu Uitgevers bv, Den Haag
1e druk, 1e oplage augustus 2006

Academic Service is een imprint van Sdu Uitgevers bv.

ZETWERK: Graphic Design Original, Salome Schmuki en Corina Künzli, www.orig.ch
LETTERFONT: Salome Schmuki
MATERIAAL SELECTIE DIAGRAMMEN: ©M.F. Ashby
OMSLAGONTWERP EN -REALISATIE: Carlito's Design, Amsterdam
FOTOGRAFIE: Selma Koelers, Marcel Kooijman
MICROFOTOGRAFIE: Wim Bruijs, Marcel Kooijman
DRUK- EN BINDWERK: Wilco bv, Amersfoort

ISBN: 90 395 2465 3

NUR: 173

Alle rechten voorbehouden. Alle auteursrechten en databankrechten ten aanzien van deze uitgave worden uitdrukkelijk voorbehouden. Deze rechten berusten bij Sdu Uitgevers bv.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet 1912 gestelde uitzonderingen, mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16 h Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich te wenden tot de Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.cedar.nl/pro). Voor het overnemen van een gedeelte van deze uitgave ten behoeve van commerciële doeleinden dient men zich te wenden tot de uitgever.

Hoewel aan de totstandkoming van deze uitgave de uiterste zorg is besteed, kan voor de afwezigheid van eventuele (druk)fouten en onvolledigheden niet worden ingestaan en aanvaarden de auteur(s), redacteur(en) en uitgever deswege geen aansprakelijkheid voor de gevolgen van eventueel voorkomende fouten en onvolledigheden.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the publisher's prior consent.

While every effort has been made to ensure the reliability of the information presented in this publication, Sdu Uitgevers neither guarantees the accuracy of the data contained herein nor accepts responsibility for errors or omissions or their consequences.

Bij het werven van het beeldmateriaal is het de uitgeverij niet gelukt om alle belanghebbenden te achterhalen. Diegenen die menen rechten te kunnen ontleen aan het beeldmateriaal of menen dat hun belangen geschaad zijn, kunnen contact opnemen met de uitgever.

Voorwoord

Het is ons een genoegen om u hierbij een nieuw technisch materiaalkeuzeboek te presenteren. Er bestaat al geruime tijd behoefte aan een boek dat meer ingaat op de beslisprocessen rondom materiaalkeuze. Veel beroepsgroepen hebben uiteindelijk te maken met het kiezen van een materiaal waarvan een product gemaakt kan worden. In de lijn van productontwikkeling, van idee tot ontwerp tot maakfase en tot gebruik en afdanken worden vele materiaalkeuze aspecten gevonden.

Een deel daarvan behoort tot het domein van de technici, constructeurs en producenten. In dit boek gaan we ons echter nadrukkelijk richten tot de productontwerpers en technisch bedrijfskundigen, die mede een beslissende rol hebben in het kiezen van productmaterialen. In de ideegeneratie, in de maakfase van producten, in de preproductiefase en in de gebruiksfase van producten liggen veel beslismomenten waar commercieel-technici en productontwerpers bij betrokken zijn. Zij moeten mee kunnen denken met technici en snappen hoe ze hun visie kracht bij kunnen zetten. Anderzijds moeten ze ook kunnen begrijpen wat de insteek is van de technici bij de keuze van productmaterialen.

We hebben een boek geschreven dat meer een lesboek is dan een handboek. We hebben ervoor gekozen veel te werken met visuele grafische ondersteuning van de tekst, om daarmee drempelverlagend te werken voor de opstap naar een integrale technische materiaalkeuze. Integraal, door het meenemen van aspecten uit alle fases van de productlevensloop, van ideegeneratie tot en met productie, en van gebruik tot aan recycling. Het accent ligt hierbij op de commerciële aspecten, de gebruiksaspecten en de vervaardigingaspecten van de materiaalkeuze.

Belangrijke hulpmiddelen die we uitgebreid introduceren zijn de materiaalselectiekaarten van Michael F. Ashby. Deze kaarten geven een zeer inzichtelijk beeld van de eigenschappen van de verschillende materiaalgroepen, in technische en in productietechnische zin. Voor het gebruik ervan is enig gevoel voor productparameters nodig, waar we dus ook uitgebreid op in gaan. Voor de uiteindelijke keuze is echter ook inzicht vereist in een aantal bedrijfsmatige en materiaalkundige eigenschappen. Dit inzicht geven we door bij beslisprocessen gebruik te maken van het begrip waarde. Daarnaast kan bij de materiaalkeuze niet worden volstaan met het noemen van een materiaalgroep, maar moet ook het juiste materiaal binnen die groep benoemd worden. Ook dit proces wordt belicht.

We denken dat we met dit boek een belangrijke bijdrage leveren aan het inzicht en aan het opdoen van ervaring met materiaalkeuze bij het productontwerpen.

De auteurs,
Marcel Kooijman, Marc Pallada

Studeren met dyslexie

Dyslectici zijn mensen die moeite hebben met lezen. De term dyslexie omvat alle stoornissen die het mensen moeilijk maakt om tekst te lezen. Ongeveer één op de vijftientig mensen worstelt ermee. Voor een dyslectische lezer lijkt het soms of een tekst er tweemaal staat, het ene woord wat verschoven is ten opzichte van een ander woord (moiré), of ze zien alleen de boven- en onderkanten van letters en regels. Ook kunnen de woordspaties in een tekst zo gezien worden alsof er rivieren van wit door een tekst lopen. [bron: Morf, tijdschrift voor vormgeving: www.morf.nl; deeplink http://www.morf.nl/inhoud/morf_nr2/artikelen/02_05_dyslectici.xml].

Diverse letterontwerpers hebben zich toegelegd op het ontwikkelen van aangepaste lettervormen, waaronder Salome Schmuki. Salome is grafisch ontwerper en letterontwerper en zij heeft een gedetailleerde studie verricht naar dyslexie. Deze studie heeft geresulteerd in een letterfont waarvan de letters meer onregelmatigheden vertonen dan andere lettertypen. Omdat ze haar letterfont in de praktijk verder wil testen en haar werk graag verder wil ontwikkelen, zei Salome volmondig 'ja' toen de uitgever haar vroeg dit boek vorm te geven.

De gedachte achter de gebruikte lettervormgeving in dit boek is om het dyslectische studenten makkelijker te maken de leerstof tot zich te nemen. Een leesprobleem mag immers geen struikelblok zijn bij het volgen van een studie! De invulling van dit idee is nog in een experimenteel stadium en we horen daarom graag uw mening en ideeën over hoe we het font (inclusief Griekse symbolen), de vormgeving en de gebruikte kleurstelling in dit boek kunnen verbeteren.

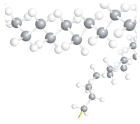
Het Ministerie van OCW heeft het Masterplan Dyslexie opgesteld. Het doel van het Masterplan Dyslexie is om de begeleiding van studenten met dyslexie te verbeteren. In 2008 moeten de Nederlandse hogescholen een dyslexiebeleid en -begeleiding uitvoeren (voor informatie zie: <http://www.masterplandyslexie.nl>). De auteurs en uitgever erkennen het belang van dit overheidsstreven en wij hopen met dit boek daaraan - op uitgeefniveau - een bijdrage te leveren.

We horen graag reacties van docenten en studenten.

Letterfont,
Salome Schmuki: orig@orig.ch

Uitgever,
Harry Ousen: H.Ousen@sdu.nl

INHOUD



1 MATERIAALKEUZE

1.1	Materiaalkeuze en ontwerpen	1
1.2	Materiaalkeuze en de productlevenscyclus	6
1.3	Opbouw van materialen	11
1.4	Materiaalkeuze bij kunststoffen	17
1.5	Materiaalkeuze bij keramische materialen	23
1.6	Materiaalkeuze bij metalen	24
1.7	Materiaalkeuze bij composieten	28
1.8	Deklagen	31
1.9	Steekwoorden	33
1.10	Oefeningen	33



2 MATERIAALKEUZE ALS PROCES

2.1	Materiaalkeuze en het creëren van waarde	37
2.2	Ontwikkeling van een product	40
2.3	Methodisch ontwerpen	52
2.4	Probleemdefiniërende fase	52
2.5	Werkwijzebepalende fase	61
2.6	Vormgevende fase	62
2.7	Invloed fabricage op materiaalkeuze	69
2.8	Montagefase	70
2.9	Gebruiksfase	72
2.10	Afvalfase	73
2.11	Oefeningen	76



3 MATERIAALEIGENSCHAPPEN

3.1	Denken in termen van eigenschappen	81
3.2	Producteigenschappen	82
3.3	Toepassingseigenschappen	84
3.4	Vormeigenschappen en verwerkingseigenschappen	88
3.5	Mechanische eigenschappen	93
3.6	Fysische eigenschappen	104
3.7	Chemische eigenschappen	108
3.8	Steekwoorden	111
3.9	Oefeningen	112



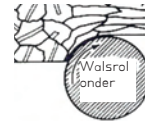
4 MATERIAALKEUZEMETHODIEKEN

4.1	Kiezen op gevoel	117
4.2	Kiezen aan de hand van tabellen	119
4.3	Kiezen op prioriteiten	120
4.4	Combineren van eigenschappen	121
4.5	De materiaalkeuzediagrammen van Ashby – inleiding	125
4.6	De materiaalkeuzediagrammen van Ashby – selectie	128
4.7	Steekwoorden	137
4.8	Oefeningen	137



5 MODELFORMING BIJ DE MATERIAALKEUZE

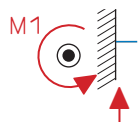
5.1	Methodische materiaalkeuze	143
5.2	Omzetten naar fundamenteel gedrag	148
5.3	Mechanische eigenschappen	149
	Formules, Ontwerpen op stijfheid, Ontwerpen op sterkte-eigenschappen, Ontwerpen op vervormbaarheid, Ontwerpen op vermoeiingseigenschappen, Kerfwerking, Ontwerpen op kruip-eigenschappen, Thermische spanningen	
5.4	Merit - parameters	173
5.5	Kosten	176
5.6	Materiaalkeuze	178
5.7	Steekwoorden	179
5.8	Oefeningen	180



6 KEUZE VAN DE PRODUCTIETECHNIEK

6.1	De plaats van productietechniek bij het ontwerpen	189
6.2	Karakterisering van de vervaardigingstechnieken	192
6.3	Variatie in materiaaleigenschappen ten gevolge van de levenscyclus van een materiaal	195
6.4	De mogelijkheden en beperkingen van productietechnieken	197
6.5	De wisselwerking tussen materialen en productietechnieken	203
	Gieten van metalen, Extruderen en spuitgieten van	

	kunststof, Walsen van metalen, Invloed verspanende bewerkingen op de maatvoeringseigenschappen van producten, Harden van aluminium, Harden van staal, Het lassen van koolstofstaal, Het lassen van aluminium	
6.6	Invloed van het aantal producten	225
6.7	De fabricagetijd van een product en de flexibiliteit	227
6.8	Milieuaspecten	229
6.9	Het systematisch kiezen van een fabricageproces met behulp van de Ashby - methode	232
	Kiezen met behulp van databases, Ashby fabricage selectieprocedure, Processelectiekaarten	
6.10	Het kiezen van een fabricageproces op basis van producteigenschappen	240
6.11	Het tijdstip van de keuze van een vervaardigings - techniek	244
6.12	Oefeningen	247



7	BESLISTECHNIKEN	
7.1	Beslissen op basis van het Programma van Eisen	254
7.2	Kiezen op basis van heuristische beslisregels	258
7.3	Beslissingscriteria op basis van multi - criteria	259
	Kwalitatieve methode, Kwantitatieve methode	
7.4	Kiezen op basis van waarde, de Kesselring - methode	265
7.5	Kiezen op basis van levenscycluskosten	268
7.6	Kostenoptimalisatie	273
7.7	Oefeningen	274



BIJLAGE A MATERIAALEIGENSCHAPPEN

A1	Eigenschappen van veel voorkomende kunststoffen	280
A2	Eigenschappen van keramische materialen	283
A3	Eigenschappen van koolstofstalen en gelegerde stalen	284
A4	Eigenschappen van gereedschapsstalen	285
A5	Eigenschappen van gietijzersorten	286
A6	Eigenschappen van roestvaste stalen	288
A7	Eigenschappen van aluminiumlegeringen	289
A8	Eigenschappen van koperlegeringen	290
A9	Eigenschappen van nikkellegeringen	291
A10	Eigenschappen van hittebestendige metalen	292
A11	Eigenschappen van Mg-/Be-/Ti- en Zn-legeringen	293

BIJLAGE B VERGELIJKINGSTABELLEN

295

BIJLAGE C MATERIAALKEUZE EN MODELLEN

C1	Wiskundige formules	318
C2	Checklist voor de materiaalkeuze	323
C3	Modellen voor materiaalkeuze	325
C4	Vergelijking van hardheidsschalen	358
C5	Brandgedrag van kunststoffen	362

BIJLAGE D MATERIAALKUNDIGE WOORDENLIJST

Engels/Nederlands (ten behoeve van literatuuronderzoek)	363
---	-----

BIJLAGE E VERVAARDIGINGSTECHNIKEN

E1	Gieten van metalen	374
E2	Verwerken van kunststoffen	379
E3	Omvormen	387
E4	Scheiden	407
E5	Warmtebehandelen	420
E6	Bijzondere technieken	435
E7	Verbinden	439
E8	Oppervlaktebehandelingen	452
E9	Decoratie - en labeltechnieken	462

INDEX

471

1 MATERIAALKEUZE

Na het bestuderen van dit hoofdstuk heb je inzicht in:

- het belang van een goed Programma van Eisen;
- het ontstaan van de kwaliteitsslip;
- de plaats van de materiaalkeuze in het totale ontwerpproces;
- de invloed van ontwerpkeuzes, waaronder de materiaalkeuze, op de levenscycluskosten;
- de fundamenteën van materiaalgedrag;
- de globale eigenschappen van de verschillende materiaalgroepen.

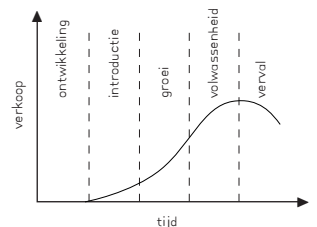
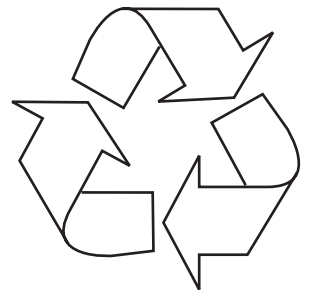
Bij het maken van de oefeningen:

- verken je de mogelijke productietechnieken die gebruikt kunnen worden voor verschillende producten;
- leer je meedenken met de ideeën van anderen;
- gebruik je het programma van eisen als communicatiemiddel;
- vergelijk je producten met behulp van levenscycluskosten;
- leer je denken in termen van eigenschappen;
- leer je materiaal te kiezen op basis van kwalitatieve eigenschappen.

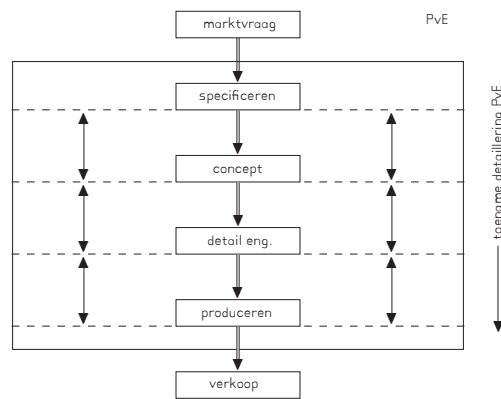
1.1 MATERIAALKEUZE EN ONTWERPEN

In de totale levensloop van producten zijn verschillende fases te onderscheiden. Nadat een productidee is geopperd kan er besloten worden het product te gaan ontwerpen. Als het product haalbaar is, zal het op de markt komen, verkocht worden en gebruikt worden. Na gebruik wordt het afgedankt. Het restproduct kan op allerlei wijzen hergebruikt worden, variërend van upgrading tot recycling of thermische recycling (verbranden) of biologische recycling (storten). Het totale ontwerpproces bestaat uit een opeenvolging van logische activiteiten. De weg van productidee naar product begint met het vaststellen van de wensen van de klanten gevolgd door de productspecificaties, het conceptuele ontwerp (op papier) en een model. Hierna volgen gebruikstesten en begint de engineering, dit leidt tot een prototype waaraan diverse testen kunnen worden uitgevoerd. Hiermee wordt de conceptfase afgesloten en begint de detailengineering. Hierbij worden de fabricagewijzen en de materiaalkeuze vastgesteld. Vervolgens begint de fabricage, gevolgd door verpakking en de verkoopactiviteiten.

Vanuit de klantenwensen worden de productspecificaties opgesteld. En deze productspecificaties die we in het vervolg het '**Programma van Eisen**' zullen noemen, worden dan ook in het vervolg van het ontwerpproces als leidraad gebruikt. Conceptueel moet het productidee voldoen aan de eisen. Vervolgens wordt het concept uitgewerkt en in samenhang worden



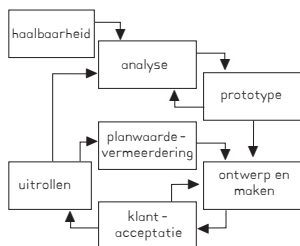
de berekeningen uitgevoerd, de tekeningen gemaakt, de fabricage-technieken gekozen, de materiaalkeuze uitgevoerd. Dit totaal resulteert in een set van tekeningen en een voorstel voor de vervaardiging van het product. De afdeling Productie evalueert het ontwerp op de maakbaarheid waardoor nog kleine details kunnen wijzigingen. De productie wordt voorbereid, materialen en componenten (koopdelen) worden ingekocht en uiteindelijk wordt het product vervaardigd en geassembleerd, getest en verpakt en verkocht.



Figuur 1.1: De relatie tussen het Programma van Eisen (PvE) en het ontwerpproces

De verkoop (marketing) van het product staat niet los van het ontwerpproces. Het product moet verkoopbaar zijn, met ander woorden: het product moet een bepaalde aantrekkingskracht (sexy) op de doelgroep hebben. In de vormgeving van het product moet je hiermee rekening houden. Anderzijds moet de marketing de sterke producteigenschappen benadrukken en daarmee het product promoten. Omdat een goede promotiecampagne ongeveer een half jaar voorbereiding vraagt, moet de marketingafdeling het ontwerpproces blijven volgen. Immers in de conceptuele fase worden al heel belangrijke beslissingen genomen die invloed hebben op de te volgen marketingstrategie. Anderzijds kunnen marketing-overwegingen de doorslag geven in de beslissingsprocessen.

Het totale ontwerpproces is een iteratief proces, wat wil zeggen dat de verschillende stappen meermalen doorlopen worden. Het schetsidee wordt eerst uitgewerkt tot een concept en vervolgens uitgewerkt tot een product. Het product wordt vervolgens weer opgesplitst in (sub)systemen, componenten en onderdelen. Op elk niveau wordt het probleem geanalyseerd en gemodelleerd, oplossingen gegenereerd en geëvalueerd en wordt de 'beste' oplossing gekozen. Creativiteit, kennis van bestaande oplossingen, inzicht in mogelijke combinaties en ervaring uit voorgaande



'iteratie'

ontwerpprojecten worden samengevoegd. Het Programma van Eisen is hierbij het belangrijkste communicatiemiddel. Je ziet dan ook dat de mate van detaillering van het Programma van Eisen toeneemt naarmate je verder in het ontwerpproces bent. Uit de detaillering kunnen aspecten naar voren komen waardoor eerdere ontwerpkeuzes moeten worden herzien. (Een lichtgewicht gasturbine van aluminium blijkt bijvoorbeeld niet hittevast genoeg.) Je zit dan op een doodlopende weg. Er zit dan vaak niks anders op om terug te gaan naar de conceptuele fase of soms zelfs tot het bijstellen van het Programma van Eisen; het proces opnieuw doorlopen en andere keuzes maken.

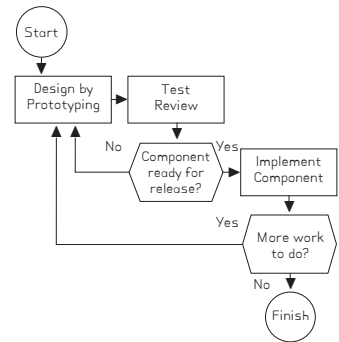
Een succesvol product wordt altijd ontwikkeld vanuit een zekere **marktbehoefte**. Uit een marktonderzoek, al dan niet in combinatie met een gebruiksonderzoek, kunnen eisen volgen voor het product. Het is hierbij zaak om de eisen en wensen zo concreet mogelijk aan het papier toe te vertrouwen (liefst zo min mogelijk wensen). Het resultaat is het begin van een **productdocument**, zoals de **Product Design Specification (PDS)**.

In de volgende fase krijgt het ontwerp zijn vorm, allereerst volgt uit het PDS een concept dat later verder wordt gedetailleerd. In deze fase worden de eisen onder andere vertaald naar de vorm, uiterlijk, functionaliteit en mogelijke werking van het product. Dit geschiedt vaak globaal in de volgende stappen: voorontwerp, berekeningen, materiaal- en productiekeuze, engineering, prototyping, gebruiksonderzoek, redesign, detailengineering.

In de volgende fase wordt het product gemaakt. De tekeningen worden vertaald naar producten. De benodigde documenten zoals productiehandleidingen, gebruiksaanwijzingen, pictografische aanwijzingen en certificaten krijgen hun definitieve vorm.

In de laatste fase van de totale productlevenscyclus wordt het product gebruikt totdat deze wordt afgedankt. Soms wordt een product gerenoveerd, of een dienst bijgesteld. In dit geval doorloopt het product nogmaals dezelfde cyclus.

Wat maakt nu een product succesvol? Dat zijn veelal meerdere zaken. Voldoen aan een vraag, een eigen uitstraling, iets unieks dat een bepaald gevoel opwekt. Een van de kritische succesfactoren is kwaliteit. **Kwaliteit** kun je definiëren als het voldoen aan behoeften/verwachtingen. Voldoet een product niet aan verwachtingen, dan is er sprake van een **kwaliteitsslip**. In de ideale situatie zijn de gewenste kwaliteit en gerealiseerde kwaliteit hetzelfde. Maar in de praktijk is dat vaak niet zo en ontstaat er de kwaliteitsslip. Afhankelijk van aan welke behoefte niet is voldaan, kan de kwaliteitsslip betrekking hebben op meerdere productaspecten. Zo kan het gebruik niet optimaal zijn, of de levensduur, of het uiterlijk. In een aantal gevallen kan dit herleid worden naar de materiaalkeuze. Metalen handvatten van pannen kunnen te warm worden



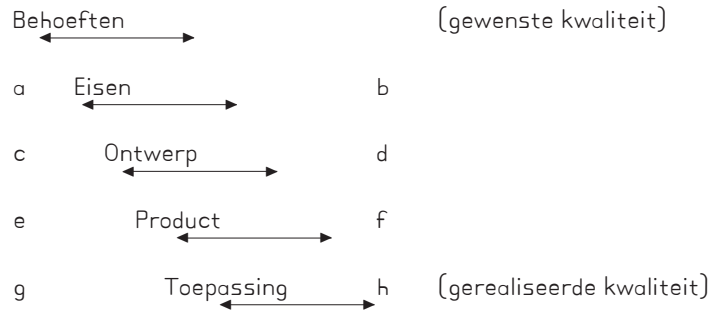
'iteratie'



'kwaliteitsslip: je wilt alleen beeld maar je krijgt ook een diepe kast'



(gebruik), kunststof handvatten kunnen bros worden door de hitte (levensduur), metaal is lastig hittevast en goedkoop te kleuren (uiterlijk). De kwaliteitsslip kan dus betrekking hebben op meerdere aspecten.



Figuur 1.2: De kwaliteitsslip [Bron: Opzetten KAM-systemen, ir. J. Leupen]

Per fase van de realisatie van een product zie je dat de gerealiseerde kwaliteit steeds meer afwijkt van de gewenste kwaliteit:

- a Enerzijds worden behoeften niet onderkend en niet in eisen vastgelegd.
- b Anderzijds worden eisen gecreëerd die weinig of niets met de reële behoeften te maken hebben.
- c Vervolgens worden de eisen omgezet in een ontwerp (van dienst of product). Ook hier zie je dat bepaalde eisen niet in het ontwerp worden meegenomen.
- d Het ontwerp voldoet wel aan niet-gestelde eisen.
- e Vervolgens wordt een product tot stand gebracht dat afwijkingen vertoont, omdat niet alles volgens de tekening lukt.
- f Maar ook wordt een overdreven inspanning geleverd, omdat bepaalde zaken mooier worden uitgevoerd dan noodzakelijk.
- g Ten slotte blijkt er een product uit te komen dat aanzienlijk afwijkt van de oorspronkelijke behoeften, en dat functies heeft die niemand gebruikt. Dit is deels het gevolg van de hier beschreven kwaliteitsslip. Deels is het ook een gevolg van verschuivingen in de behoeften (trends).
- h Tot slot kunnen problemen ontstaan door oneigenlijke toepassing.

Oorzaak van de hierboven geschetste kwaliteitsslip is meestal een gebrekkig communiceren. Juist de relevante eisen moeten worden gespecificeerd, gedocumenteerd, gedistribueerd en gearchiveerd in het Programma van Eisen. Een deel van deze eisen heeft betrekking op materiaalkeuze, in relatie tot werking, functie of fabricage en vormgeving van het product.

Bij het ontwerpproces is het beheer van de informatie heel belangrijk. Door de complexiteit van de hedendaagse artikelen zijn meestal veel personen betrokken bij het ontwerpproces, communicatie en het sturen op de juiste informatie zijn dan ook sleutels tot succes. De kwaliteit van een product wordt bepaald in de gehele productontwikkelingscyclus. Alleen als het Programma van Eisen goed wordt gehanteerd kan een concurrerend product op de markt gezet worden. Ten aanzien van de materiaalkeuze betekent dit dat alle vakspecifieke kennis die bij de verschillende ontwerppartners aanwezig is, meegenomen moet worden in de vertaalslag naar de juiste gewenste materiaaleigenschappen.

In eerste instantie lijkt het opstellen van een Programma van Eisen voor een product of dienst een simpele klus (de klus wordt onderschat), immers veel details worden zo uit de losse pols geschud, echter nader beschouwd valt het toch vies tegen. In de praktijk komt het nog steeds te veel voor dat zaken worden vergeten en dat er dan later nog met het nodige kunst- en vliegwerk (en extra kosten) aanpassingen aan ontwerp en product moeten worden uitgevoerd.

De kwaliteitsslip leert dat je in een zo vroeg mogelijk stadium van het ontwerpproces een goed Programma van Eisen moet opstellen. Het gaat immers om de efficiency van het ontwerpproces en effectiviteit van elke handeling. Het betekent dus dat er redelijk wat tijd en aandacht besteed moet worden aan het 'eerste concept'. Dit om te voorkomen dat je te veel iteratiestappen moet maken. Je moet dus (projectmatig) beginnen met de vertaling van de marktvraag naar een doelstelling. Vanuit een goede omschrijving van de eisen kun je de opdrachtbeschrijving voor het ontwerp definiëren. De opdrachtbeschrijving moet een zo nauwkeurig mogelijke definitie geven van het gewenste eindresultaat.

Voorbeeld

Ontwerp een hulpmiddel dat het mogelijk maakt voorwerpen tot 500kg met behulp van lichte handkracht stabiel in elke gewenste richting over een vlakke vloer met oneffenheden van maximaal 1cm hoog te bewegen, waarbij het hulpmiddel vastgemaakt kan worden aan het voorwerp en bovendien geblokkeerd kan worden in zijn bewegingen. Het hulpmiddel mag een eigengewicht van 1kg hebben en een totale productieprijs van 2,50euro per stuk bij een seriegrootte van 50 000. Het hulpmiddel mag een vloer van zacht vurenhout niet beschadigen, moet 20 000 keer belast kunnen worden met het maximumgewicht en 100 000 maal over de 1cm hoge drempel bewegen bij een snelheid van 5km/uur zonder te bezwijken. Het voorwerp mag maximaal 7cm hoog opgetild worden door het hulpmiddel. Het gebruik van het hulpmiddel moet eenvoudig uitgevoerd kunnen worden.



In het bovenstaande voorbeeld heb je te maken met een klant die zijn eisen en wensen goed kan verwoorden. Als je te maken hebt met een enkele klant, dan kun je de activiteiten voor het opstellen van een Programma van Eisen beperken tot het stellen van de juiste vragen. Bij grotere doelgroepen kunnen gebruiksonderzoek en een goed doordachte enquête goede hulpmiddelen zijn bij het vaststellen van de opdrachtbeschrijving. Ook is er een techniek als **Quality Function Deployment (QFD)**, letterlijk 'het gladstrijken van de plooiën in de functieomschrijving', waarmee volgens een vaste strategie de wensen van gebruikers in kaart worden gebracht en vertaald naar producteigenschappen.

Met behulp van de opdrachtoomschrijving maak je onderscheid tussen eisen, wensen, randvoorwaarden en formuleer je het ontwerpvraagstuk. Nu kan elk **ontwerpvraagstuk** worden teruggebracht tot een ontwerp-probleem met een viertal variabelen: functie, geometrie, materiaal en vervaardiging. De functies, die moeten worden vervuld om een oplossing van het ontwerp-probleem te bereiken. De geometrie, die voor de oplossing wordt gekozen. De materialen, waarmee de oplossing zal worden gerealiseerd. De vervaardigingstechnieken die dienen te worden aangewend om het product te realiseren en om het materiaal eventueel van specifieke eigenschappen te voorzien.

1.2 MATERIAALKEUZE EN DE PRODUCTLEVENSCYCLUS

Materiaalkundige aspecten hebben een belangrijk aandeel in de succesverhalen van de technologische evolutie van de mens in de laatste twee eeuwen. Zonder de ontwikkeling van staal had de stoommachine nooit voor de snelle industrialisering kunnen zorgen. De productie van aluminium en titaan heeft de lucht- en ruimtevaart in een stroomversnelling gebracht. De uitvinding van bakeliet door Baekeland in het begin van de twintigste eeuw was het begin van een nieuw tijdperk voor industriële vormgevers. De ontwikkeling van thermoplastische kunststoffen en de daarbij behorende verwerkingsprocessen heeft de ontwerper pas echt veel ontwerpvrijheden gegeven.

Als je kijkt naar de levenscyclus van een product, dan bestaat deze globaal uit ideefase, ontwerpfase, grondstoffase, productiefase (montagefase), verkoopfase, gebruiksfase, hergebruikfase, afdankfase en recyclingfase. We zullen aan de hand van een aantal voorbeelden laten zien dat in al deze fases de materiaalkeuze een bijzondere plaats inneemt. De materiaalkeuze bepaalt mede de waarde van een product in de diverse fases. Bij de ontwikkeling van een product kun je kiezen uit een breed scala aan materialen. Als je alle verschillende soorten kunststof, metalen (legeringen), keramische materialen, glassoorten en composietmaterialen op een rijtje probeert te zetten, zul je merken dat



je met enkele duizenden materialen niet klaar bent. Een database met informatie betreffende materiaaleigenschappen is dan ook een belangrijk ontwerp - hulpmiddel! Alle materialen hebben zo hun sterke kanten en het loont om in tabellen te kijken naar de belangrijkste toepassingsgebieden van een materiaal.

Gelukkig hoef je als ontwerper niet elke keer weer je speurtocht naar een geschikt materiaal te starten in die grote database. In dit boek zullen we je leren hoe je relatief eenvoudig tot een goede materiaalkeuze kunt komen, door gebruik te maken van het Programma van Eisen. In de meeste gevallen kies je een materiaal niet direct in het begin van het ontwerpproces, maar ontwikkelt de keuze zich gedurende het ontwerpproces. Gedurende het ontwerpproces ontwikkel je steeds meer inzicht in productfuncties, geometrie en vervaardiging. Immers jouw concept krijgt langzaam aan steeds meer vorm, het prototype wordt na een testfase (door beproeven of simulatie) uitontwikkeld tot een productierijp product. Tijdens de ontwikkeling van een dergelijk product werk je als ontwerper dus samen met verschillende afdelingen en gebruik je het Programma van Eisen als een communicatiemiddel. Stap voor stap neemt de mate van detaillering van jouw Programma van Eisen toe, totdat je op een zeker moment een materiaal kunt kiezen.

Kies niet te snel een materiaal of een vervaardigingsproces. Snelle keuzes kunnen betere en soms ook goedkopere alternatieven tegehouden. Bedenk dat je in de productontwikkelingsfase keuzes maakt. Keuzes die consequenties hebben voor de productievoorbereiding, fabricage, assemblage, het verpakken of de installatie (bij kapitaalgoederen), het gebruik, het onderhoud en de recycling, en die de kostenstructuur vastleggen.



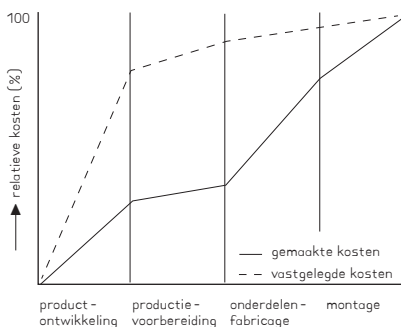
'assemblagekosten'



'verpakkingskosten'



'transportkosten'



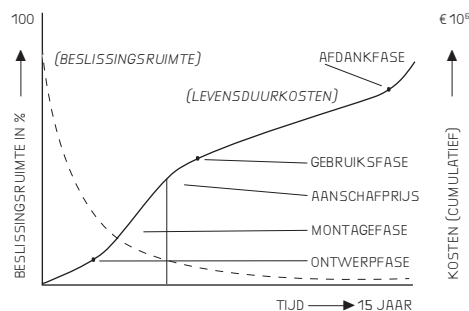
Figuur 1.3: Kostenontwikkeling gedurende productontwikkeling

De keuze voor bijvoorbeeld het vervaardigen van een pomphuis uit gegoten aluminium omvat veel meer dan alleen het gieten van aluminium. Immers de gietvorm moet worden gemaakt (uit vormzand), het gegoten product

moet worden nabewerkt en geassembleerd. In de ontwikkelfase leg je dus al snel de kosten van de daarop volgende fases vast. Dit illustreren we aan de hand van het volgende voorbeeld.

De inkoper van een constructiebedrijf besluit een goedkope partij staal (5% goedkoper) te kopen zonder overleg met de productie-afdeling. De inkoper denkt een koopje te hebben. Hij neemt dit besluit op basis van de prijs en het feit dat dit staal 20% sterker is dan het oude vertrouwde materiaal. Bij het lassen van dit nieuwe materiaal loopt men echter op tegen kwaliteitsproblemen. Het materiaal blijkt alleen met behulp van voorwarmen lasbaar te zijn. De kosten van de productiederving bedroegen € 50.000,- en de extra fabricagekost verhoogt de fabricagekosten met 5%. Als we voor de eenvoud veronderstellen dat de kostprijs voor 25% wordt bepaald door de materiaalprijs en voor de rest door de fabricagekosten (waarin ontwerp, overhead en dergelijke zijn verrekend), dan is het gevolg een kostprijsstijging van $(0,75 \times 5\%) - (0,25 \times 5\%) = 2,5\%$.

Een producent is vooral geïnteresseerd in de kostprijs van een product, en uit concurrentieoogpunt wil hij deze zo laag mogelijk houden en voldoende winst maken om de ontwikkeling van nieuwe producten te kunnen blijven financieren. Ontwikkelt de producent een product voor de Duitse markt dan kunnen, gelet op de Duitse milieuwetgeving (het groene-puntsysteem), de kosten voor recycling niet worden verwaarloosd.



Figuur 1.4: Ontwikkeling van de levensduurkosten van een eenvoudig gebruiksartikel over de totale levensduur

Uit het perspectief van de koper zijn veel meer zaken belangrijk; kostprijs is maar een van de vele belangrijke aspecten. Meestal kijkt de koper naar de totale levenscyclus van het product. De ontwerpfase steekt

soms schril af tegen een gebruiksfase van soms wel dertig jaar. Meestal is de ontwerpfasen kort, enkele weken voor business to business producten en maximaal een jaar voor een nieuw automodel of een chemische fabriek. Afhankelijk van het type product is een levensduurbeschoouwing meer of minder relevant. Een product zoals een stoomstrijkijzer vervang je simpelweg als deze op een of andere manier kapotgaat of niet meer functioneert. Onderhoud van een dergelijk apparaat beperkt zich tot schoonmaken en ontkalken (beide kan met relatief goedkoop schoonmaakmiddel). Een BPA-fabriek waar de grondstoffen voor het kunststof polycarbonaat worden gemaakt is een veel complexer product. Bij het ontwerpen van (petro)chemische installaties moet in het algemeen rekening gehouden worden met de omvang van het product. Het product kan maar tendelen in het eigen bedrijf worden vervaardigd. De componenten moeten worden getransporteerd naar het bedrijfsterrein van de klant en ter plaatse worden geassembleerd. Verder worden deze installaties met regelmatige tussenpozen uit veiligheidsoverwegingen geïnspecteerd en gekeurd en de dan geconstateerde gebreken worden dan gerepareerd. Dit kun je vergelijken met de APK voor personenwagens.

Bij kapitaalgoederen maar ook bij bruggen en sluizen is de aanschafprijs maar een fractie van de feitelijke gebruikskosten. Ze worden vaak in zeer korte tijd afgeschreven en als vuistregel begroot men bij deze producten de jaarlijkse onderhoudskosten als circa 10% van de aanschafwaarde. Een verkeerde materiaalkeuze heeft bij dit soort producten grote economische gevolgen namelijk meer onderhoud of zelfs een vervroegde modificatie. Veel kapitaalgoederen (zoals chemische fabrieken en gebouwen) worden na ongeveer 25 jaar gerenoveerd en moeten dan nogmaals 20 jaar mee. Bij het einde van de levensduur is het vaak interessant om het materiaal te recyclen als nieuwe grondstof of energiebron, mits er geen voor mens en milieu schadelijke materialen zijn toegepast. Zo kun je PVC maar beter niet verbranden in een vuilverbrandingsinstallatie in verband met vrijkomende chloorverbindingen zoals chloorgas, zoutzuur en dioxine.

De in de ontwerpfasen gemaakte keuzes betreffende geometrie, materiaal en vervaardiging hebben invloed op de montage- en gebruiksfase. Scherpe bochten in leidingen eroderen (slijten) sneller dan flauwe bochten. Gepolijste (vliegtuig)onderdelen hebben een langere levensduur dan gefreesde onderdelen. De levensduur van een product wordt veelal direct bepaald door een goede materiaalkeuze. In een enkel geval is de uiteindelijke keuze een compromis, echter het gebruik van goedkope materialen kan duurkoop betekenen. We zullen dit illustreren aan de hand van het onderstaande voorbeeld.



Een voedselproducent wil een deegkneder van roestvast staal kopen en heeft de keuze uit AISI 304 en AISI 316 (12 % duurder). Na wikken en wegen kiest hij voor AISI 304. Tijdens de eerste onderhoudsbeurt wordt er ernstige slijtage waargenomen, met als gevolg dat de kneedarm na twee jaar vervangen dient te worden door een van AISI 316 die nu al vijf jaar zonder noemenswaardige problemen functioneert. Dit voorbeeld illustreert het belang van kennis van de totale levenscyclus van het product en dit mee te laten wegen in het beslisproces. Een schijnbare kostenverhoging van 12 % resulteert in een levensduurverlenging van 150 %.



In veel gevallen loont het de moeite om alternatieven te evalueren met behulp van levensduurkosten (life cycle costing). De aanschafprijs van een auto vervaardigd uit aluminium (bijvoorbeeld Audi) of een composiet (zoals Lotus) is vaak hoger dan zijn tegenhanger van staal (bijvoorbeeld BMW). Het gewicht kan wel lager zijn, maar gelet op de steeds stijgende brandstofprijzen is het maar de vraag of de stalen auto over de gehele levensduur goedkoper is. Als het gebruik van deze materialen zich laat vertalen in een lager gewicht, is een lager brandstofgebruik een logisch gevolg. Nu zijn autocarosserieën de laatste decennia veel lichter geworden. Maar door accessoires die autorijden veiliger en comfortabeler maken, zoals ABS, airbags, cruise control, boardcomputer en airco, wordt de auto weer zwaarder. Objectief vergelijken is daarom soms moeilijk.

Het belang van de materiaalkeuze op het totale ontwerp en ontwikkeltraject van een product reikt echter veel verder dan alleen de levensduur van het product. Zo zijn er allerlei producten bedacht op basis van specifieke materiaaleigenschappen. Krimpfolie is gebaseerd op het geheugengedrag van polyetheen. De vormgevingsvrijheden van kunststoffen hebben de afgelopen twintig jaar geleid tot vele nieuwe producten.

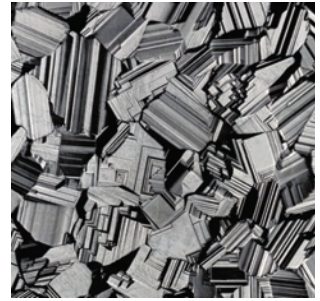
Met het gebruik van bepaalde materialen kun je proberen een product een exclusievere uitstraling te geven. Denk maar aan titanen ringen en horloges, maar ook aan de aluminium Senseo® of roestvast stalen koelkasten. Het uiterlijk van het materiaal, de goede corrosievastheid aangevuld met een stijlvolle vormgeving zorgen ervoor dat deze producten aan de bovenzijde van hun marktsegment zitten.

1.3 OPBOUW VAN MATERIELEN

Materiaalkeuze is goed te doen zonder kennis van allerlei fundamentele zaken zoals atoomfysica, chemie en thermodynamica. Dit is meer het vakgebied van de materiaalkunde. Toch gaan we er hier even op in omdat de elementaire materiaalkunde inzicht verschaft in het gedrag van de verschillende materiaalgroepen en in de mogelijkheden tot materiaalmodificatie. De **materiaaleigenschappen** zijn namelijk afhankelijk van de **samenstelling**, de **structuur** en van de (mechanische) **spannings-toestand** van een materiaal. De samenstelling geeft aan uit welke atomen een materiaal bestaat, de structuur zegt iets over de plaats van de atomen onderling en de spanningstoestand kan dusdanig zijn dat het materiaal afwijkend gedrag gaat vertonen. Aluminium kan gelegeerd worden met koper en door deze verandering van samenstelling wordt het metaal sterker. Als de atomen een regelmatige ordening hebben, spreken we van een **kristallijn materiaal**, in tegenstelling tot een amorf materiaal. Kristallijne kunststoffen hebben een hogere stijfheid dan amorse kunststoffen van dezelfde samenstelling. Zilver is een zacht materiaal, maar door het koud te smeden kunnen we de spannings-toestand dusdanig beïnvloeden dat het hard genoeg wordt voor toepassingen als bestek en sieraden. Samenstelling (welke atomen), structuur (waar zitten ze) en spanningstoestand (hoe verandert de structuur) zijn dus rechtstreeks van invloed op de eigenschappen.

We hoeven niet alle elementen (atoomsoorten) te behandelen die in de natuur bekend zijn, maar beperken ons tot de bouwstoffen van de belangrijkste ontwerpmaterialen. Bovendien kunnen we volstaan met eenvoudige modellen om de atoombouw en atoombinding te bespreken, al zijn deze in de fundamentele fysica al afgedaan als zijnde al te simpel.

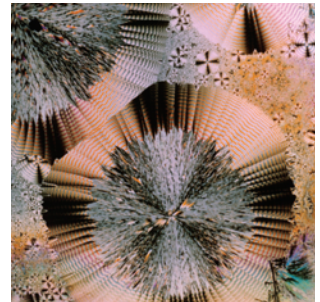
Het **atoommodel van Bohr** (uit 1913) stelt atomen voor als deeltjes die zijn opgebouwd uit een bolvormige kern met daarin positief geladen deeltjes, **protonen**, en elektrisch neutrale deeltjes, de **neutronen** die de kern bijeenhouden. De positieve lading van de kern oefent een aantrekkingskracht uit op negatief geladen zeer kleine deeltjes, **elektronen**, die om de kern heen 'zweven'. Er zijn evenveel elektronen als protonen in een atoom. De elektronen worden weliswaar aangetrokken door de kern, maar zullen niet op het oppervlak komen te liggen. De reden is simpelweg dat de elektronen elkaar afstoten, wegduwen dus, en wel zodanig dat er in feite in een bolvormige schil om de kern maar ruimte is voor 2 elektronen. Wat verderop is er ruimte voor 8 elektronen, die ook weer in een bolvormige schil liggen. Nog verderop ligt een schil waar maximaal 18 elektronen inpassen. De schillen in dit eenvoudige model zijn te vergelijken met luchtlagen rondom de aardbol, alleen de verhou-



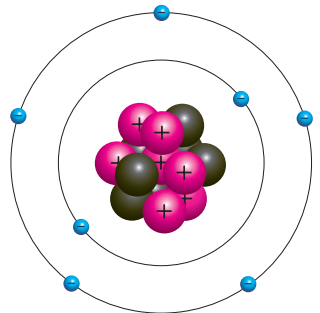
'kobaltoxide'



'grijs gietijzer'



'sferulieten hippuurzuur'



'atoommodel Bohr'

dingen zijn totaal anders. Stel dat we de kern van het koolstofatoom zouden nemen als 'aardbol' met een straal van 1cm, dan zou de eerste 'luchtlaag' met twee elektronen zich op kilometers hoogte bevinden. Atomen zijn dus erg lege bollen.

Al in 1870 kwam Mendelejev met een ordeningssysteem voor de verschillende atomen (elementen) die de natuur kent: het **Periodiek Systeem der Elementen**. Hierin worden de atomen gerangschikt naar atoommassa, en, zo bleek later, netjes op volgorde van het aantal elektronen, dat hiermee gelijk oploopt. Mendelejev ordende de atomen bovendien op bepaalde chemische eigenschappen die we inmiddels kunnen herleiden naar de verdeling van de elektronen over de schillen. Met name het aantal elektronen in de buitenste aanwezige schil bepaalt een groot deel van het chemische gedrag. Het aantal elektronen in de buitenste schil is maximaal 8 en zodoende kent het Periodiek Systeem acht hoofdgroepen, met respectievelijk 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 en 8 elektronen in de buitenste schil. De groep atomen met acht elektronen in de buitenste schil blijkt een bijzondere groep materialen te vertegenwoordigen: ze zijn alle gasvormig en reageren niet chemisch met andere materialen. Deze groep wordt de **edelgassen** genoemd: neon, argon, krypton, xenon en radon. Er is nog een ander bijzonder edelgas, namelijk helium. Een heliumatoom is zo klein dat het slechts 2 elektronen bevat. De hedendaagse toepassingen van edelgassen blijven beperkt tot gasvulling in sommige lampen, beschermgas bij sommige lasmethoden en het lichte helium voor de vulling van ballonnen. We noemen ze hier toch omdat de elektronenverdeling van een edelgas van belang is. Die elektronenverdeling heet de **edelgasconfiguratie**.

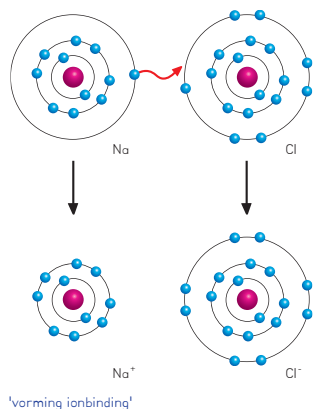
De volgende bladzijde geeft het deel van het Periodiek Systeem weer dat nagenoeg alle in de techniek gebruikte elementen bevat. De elementen met atoomnummers (aantal protonen) 57-71 en 89-112 ontbreken in dit overzicht. Met uitzondering van het zeldzame thorium (legeringsmiddel), neodymium (supermagneten), uraan (ballastmateriaal, kernfysica) en plutonium (kernfysica) worden deze elementen in de ons omringende producten niet gebruikt. In dit eenvoudige overzicht zijn de meeste door productontwerpers gebruikte elementen vetgedrukt aangegeven. Dit zijn er maar een paar! We kunnen al meteen zien, waarom koolstofvezelversterkt materiaal zo licht kan zijn: koolstof heeft een kleine atoommassa. We zien ook waarom autovelgen van magnesium licht zijn, terwijl loden stralingsschermen zwaar zijn.



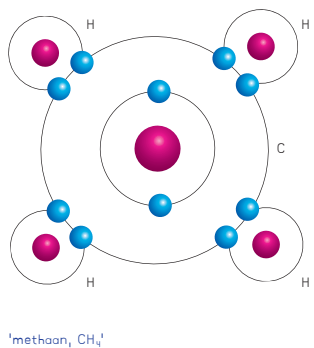
'Mendelejev'



We zien voor elk element de verdeling weergegeven die elektronen hebben over de schillen. Het valt op dat de metalen steeds maar 2 of 3 elektronen in de buitenste schil hebben, terwijl de niet-metalen er meer hebben, namelijk 5, 6 of 7. Tussen deze twee groepen in zitten de **metalloïden** die zowel metaaleigenschappen als niet-metaaleigenschappen kunnen hebben. Het aantal elektronen in de buitenste schil bepaalt de manier waarop de verschillende atomen zich met elkaar kunnen verbinden. Bovendien blijkt het bindingstype van atomen samen te gaan met diverse karakteristieke materiaaleigenschappen. Alle atomen streven naar het verkrijgen van een edelgasconfiguratie, dat wil zeggen: een buitenste schil met 8 elektronen.

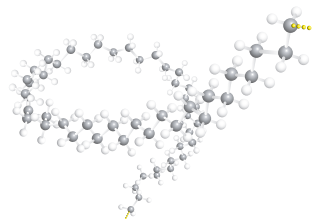


Natrium heeft 1 elektron in de buitenste schil en 8 elektronen in de schil eronder. Chloor heeft 7 elektronen in de buitenste schil. Als deze twee atomen dicht genoeg bij elkaar komen, kan het ene elektron van natrium semi-permanent in de buitenste schil van chloor gaan zitten. Van buiten lijkt chloor nu op een edelgas met 8 elektronen, en natrium ook, want hiervan zie je de volgende schil nu als buitenste schil. Het gevolg is dat het chlooratoom er een negatieve lading teveel bij heeft en we noemen dit een éénwaardig negatief **ion**. Het natriumatoom is een éénwaardig positief ion geworden. De verbinding levert bij kamertemperatuur een vast, steenachtig, kristallijn materiaal op, natriumchloride (keukenzout). Deze vorm van elektronenuitleen, waarbij geladen atomen (ionen) ontstaan, heet een **ionbinding** of ook wel een **zoutbinding**. Materialen met dit bindingstype bestaan steeds uit een metaal en een niet-metaal, zijn kristallijn, steenachtig, keramisch.



Een andere 'truc' om aan de edelgasconfiguratie te komen is het over en weer aan elkaar uitlenen van elektronen. Butaan bijvoorbeeld, dat gebruikt wordt als campinggas, maakt hiervan gebruik. Vier koolstofatomen en tien waterstofatomen vormen samen een molecuul, dat dus uit veertien atomen bestaat. Waterstof, met één elektron, 'leent' één elektron van koolstof en krijgt daarmee de edelgasconfiguratie van helium. De koolstofatomen lenen onderling vier elektronen uit en krijgen zo acht elektronen in de buitenste schil, de neonconfiguratie.

Door een snel over en weer lenen lijkt het of alle atomen de edelgasconfiguratie hebben, zonder dat ze permanente ionen vormen. We noemen deze binding een **atoombinding** of ook wel **covalente binding**, en alléén als atomen aldus gebonden zijn, spreken we van **moleculen**. Je kunt je misschien voorstellen dat er moleculen zijn die nog veel langer zijn dan butaan, moleculen die opgebouwd zijn uit hele lange koolstofketens, tot wel een miljoen koolstofatomen. We spreken dan van een **macromolecuul**, ook wel een **polymeer** genoemd. De lengte van een macromolecuul bedraagt niet meer dan ongeveer een honderdste millimeter. Een voorbeeld van een lange koolstofketen waaraan alleen waterstof-

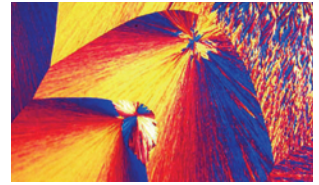


atomen gebonden zijn, is het kunststof polyetheen. Het covalente bindingstype tussen twee niet-metalen zoals koolstof, waterstof, zwavel, zuurstof en stikstof komt veelvuldig in de kunststoffen voor. Soms gaat het hierbij om slordig liggende ketens in een amorf materiaal, maar de ketens kunnen ook netjes parallel liggen, zodat een lokale ordening ontstaat en we het materiaal (gedeeltelijk) kristallijn mogen noemen. De sterkte en stijfheid nemen hierdoor toe.

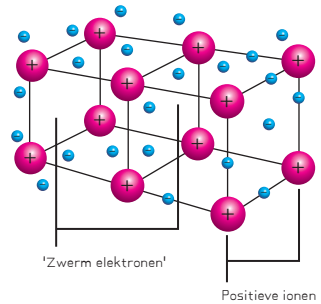
De metalen zitten redelijk in de buurt van de edelgasconfiguratie en maken hier handig gebruik van door met een heleboel atomen in een compact rooster te gaan zitten. De metaal-atomen delen één, twee of drie elektronen van de buitenste schillen met elkaar en vormen een grote elektronenwolk door het rooster heen. Deze manier van binden heet een **metaalbinding** en deze binding is binnen in het rooster weliswaar stabiel, maar de metaal-atomen aan de buitenkant (grensvlak) reageren toch met bijvoorbeeld niet-metalen als zuurstof, fosfor en chloor, om alsnog de edelgasconfiguratie te krijgen. Het resultaat is de vorming van allerlei corrosielagen zoals roest, groen koperfosfaat en stabiel aluminiumoxide.

Dankzij het gelijkmatige rooster en de overal identieke metaal-bindingen laten de metalen zich over het algemeen goed omvormen door technieken als walsen en smeden. Bovendien kan men door **legeren** het rooster hier en daar beïnvloeden, waardoor hogere sterktes ontstaan, hoewel het materiaal dan minder goed te walsen is. Ook zijn allerlei warmtebehandelingen mogelijk waarbij de atomen anders gerangschikt worden met als gevolg andere eigenschappen.

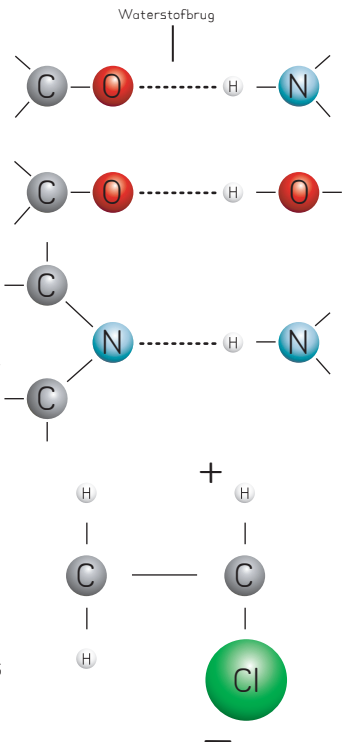
De atoombinding is de sterkste binding, de ionbinding een goede tweede en de metaalbinding is de minst sterke van de drie. In kunststoffen en keramiek komen echter ook nog andere, zwakkere bindingstypen voor: de **secundaire bindingen**. Als twee kunststofketens voldoende dicht bij elkaar komen, kunnen de waterstofatomen en de zuurstof- of stikstofatomen van de beide ketens een aantrekkende kracht op elkaar uitoefenen en vormen een zogeheten **waterstofbrug**. Daarnaast kunnen in sommige kunststoffen aan de keten dermate grote atomen vastzitten, zoals het 'enorme' chlooratoom in PVC, dat er een asymmetrie ontstaat. Door asymmetrie zit er als het ware aan de ene kant van de kunststofketen een grote negatief geladen elektronenwolk van chloor en aan de andere kant een klein, relatief positief waterstofatoom. De 'negatieve pool' van het ene molecuul en de 'positieve pool' van het andere molecuul oefenen een aantrekkende kracht op elkaar uit, we spreken dan van een **dipoolbinding**. Tot slot noemen we nog de wrijvingkracht tussen de ketens of tussen de kunststof wapeningsvezels in versterkte kunststoffen.

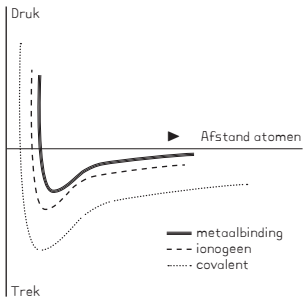


'polyetheen kristal'



'metaalbinding'



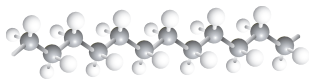


Secundaire krachten zijn relatief klein, vandaar dat kunststoffen ondanks hun sterke covalente bindingen zwakker zijn dan de meeste metalen. Uiteraard is er een ontwikkeling gaande om de covalente binding steeds beter te benutten, en er komen al sterkere kunststoffen op de markt.

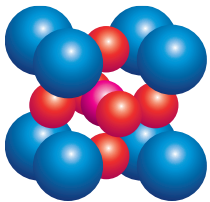
Ook tussen de kristallen van sommige keramische materialen kunnen een soort waterbruggen voorkomen, **hydraten** geheten. Ook deze materialen zijn dus zwakker. Bovendien komen er in keramische materialen als gevolg van de manier waarop ze uit poeders gebakken worden ook veel holtes voor, **porositeiten** geheten, welke het materiaal verzwakken.

In de natuurkunde heeft het atoommodel van Bohr plaatsgemaakt voor complexere, realistischere atoommodellen. Maar toch is het Bohr-model voor ons goed bruikbaar, omdat het een handig model (hulpmiddel) is om het gedrag van productmaterialen te verklaren en te beschrijven.

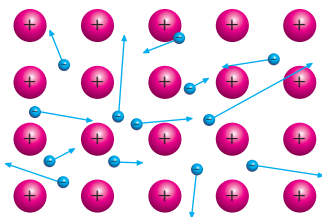
Op grond van de atoombindingstypen kunnen we een onderscheid maken tussen drie groepen materialen.



1 De **kunststoffen**, met in de keten sterke covalente bindingen en tussen de ketens secundaire bindingen, waardoor ze onder andere een laag smeltpunt hebben en niet al te stijf zijn, licht zijn en slecht warmte geleiden. Door de complexe manier waarop de elektronen bij de binding betrokken zijn, zijn kunststoffen slechte stroomgeleiders.



2 De **keramische materialen**, kristallijne materialen, bestaan uit een regelmatig rooster met afwisselend metaalatomen en niet-metaalatomen. Ze zijn bros, kunnen niet goed op trekspanning belast worden en zijn zeer hard door het ontbreken van secundaire bindingen en stijf door het kristallijne karakter. Ook keramische materialen zijn door de manier waarop de elektronen bij de bindingen betrokken zijn, slechte stroomgeleiders.



3 De **metalen** zijn door hun vrije elektronen goede stroom- en warmtegeleiders. Door hun kristallijne structuur met een isotrope (in alle richtingen gelijk) ordening van de atomen zijn veel zuivere metalen redelijk tot goed koud te vervormen en hebben ze een behoorlijke stijfheid. Door het bijvoegen van kleine hoeveelheden andere, vreemde atomen, het zogeheten legeren, kan het metaal aanzienlijk worden versterkt.

Je ziet deze kenmerken (eigenschappen) terug in de producten om je heen, in een veelheid van materialen. Wat zijn hun eigenschappen? Hoe gedragen ze zich als reactie op hun omgeving? Welke overwegingen

hebben geleid tot de keuze voor kunststof, keramiek, metaal of een combinatie van deze materialen (composiet)? Ging het om geld, schoonheid, of om functionele eigenschappen zoals roestbestendigheid, kleur, elektrische geleidbaarheid, grip, sterkte of hittevastheid? In de nu volgende paragrafen bespreken we de overwegingen die kunnen leiden tot de keuze voor respectievelijk een kunststof, een keramiek, een metaal of een composiet. We benoemen alvast vele eigenschappen.

1.4 MATERIAALKEUZE BIJ KUNSTSTOFFEN

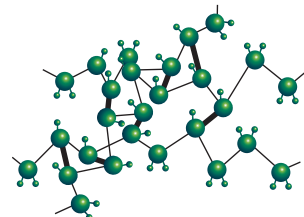
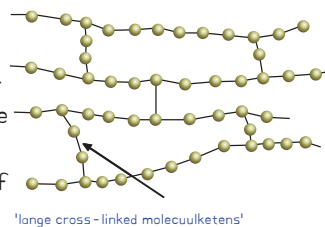
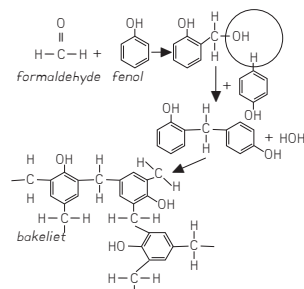
Bij de kunststoffen heb je de keuze uit allerlei materialen met zeer uiteenlopende eigenschappen, van tamelijk hard en sterk, tot zeer zacht en flexibel. Kunststoffen zijn onder te verdelen in vijf groepen: de thermoharders, de thermoplasten, de rubbers, de elastomeren en de gewapende kunststoffen. De laatste groep zullen we bij de composieten behandelen.

Thermohardende kunststoffen

De opmars van de kunststoffen, van onbekend naar niet meer weg te denken materiaal in de westerse wereld, is te danken aan de vormgevingsvrijheid van de materialen in vloeibaar vorm. Vloeibaar vormgeven kan ook met metalen, maar dan moet je smelten bij hoge temperatuur, en met keramiek kan het ook, maar dat moet je bakken bij hoge temperatuur. De eerste kunststoffen voor consumentenproducten waren thermoharders waarmee op eenvoudige wijze integraal radiobehuizingen en keukenmachines vormgegeven konden worden (1930-1950). Thermoharders hebben in dit opzicht veel voordelen boven het toen nog gangbare hout, gietijzer en zinkgietwerk voor allerlei behuizingen.

Er zijn twee groepen thermoharders. In het ene geval werk je bij kamertemperatuur met een dunne gietbare vloeistof, waaraan vlak voor verwerking een hardingsmiddel wordt toegevoegd. Vanaf dat moment begint de uitharding en moet je dus haast maken met de vormgeving. Het hardingsproces is enigszins te vertragen door te koelen. De dik geworden vloeistof kun je handmatig verwerken, meestal in combinatie met vezelmatten. Ook kun je gekoelde en reeds met vloeistof geïmpregneerde matten later bij kamertemperatuur als platen vormen en dan onder druk laten uitharden.

De tweede groep thermoharders gaat uit van poeder waar alle componenten al inzitten. Dit poeder wordt onder druk verwarmd tot het smelt, meestal gebeurt dit bij temperaturen tussen de 150°C en 200°C, waarna meteen ook het uitharden begint en je dus moet aanvangen met de vormgeving. Aan deze groep danken de thermoharders hun naam: thermische verwarming leidt tot uitharding. Na uitharding kunnen





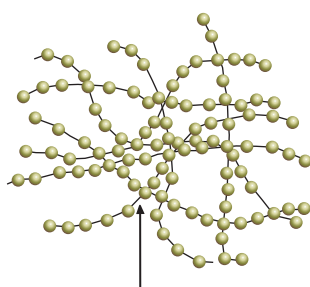
de thermoharders niet meer opnieuw omgesmolten worden. Vóór het uitharden bestaan de grondstoffen van thermoharders uit korte reactieve polymeren, die door een chemische reactie uitharden tot een groot, driedimensionaal, macromoleculair netwerk. Thermoharders zijn erg bros, vandaar dat ze vrijwel alleen in combinatie met vulmaterialen gebruikt worden. We gaan hier verder op in bij de composieten.



Een nadeel van de eerste thermoharders was de geur. Met name de fenolharsen (in fenolformaldehyde, PF, Bakeliet) waren berucht, vandaar dat ze in keukenmachines vervangen zijn door moderne thermoplasten, die bovendien tot dunnere producten te verwerken zijn. De thermoharders zijn bijna niet meer weg te denken uit de elektronica en ook de melamine-platen op koelkasten, wasmachines en geveldelen zijn nauwelijks te evenaren in chemische bestendigheid en krasbestendigheid. Eveneens vanwege de chemische bestendigheid worden in de chemische industrie ook polyesters en epoxies in leidingen en tanks gebruikt.

Thermoplastische kunststoffen

Rond 1950 werd duidelijk dat het mogelijk moest zijn langs chemische weg hersmeltbare kunststoffen te maken voor diverse technische toepassingen. Tien jaar later kwamen de eerste huishoudelijke toepassingen. Er zijn diverse voordelen aan het gebruik van thermoplasten die, zoals de naam al aangeeft, door thermisch verwarmen zacht en plastisch worden. Al het afval dat tijdens de productie ontstaat blijft waardevol, omdat het opnieuw gesmolten kan worden. Ook de eindproducten zijn recyclebaar.



'thermoplast'

De sterkte en stijfheid van kunststofproducten zijn het gevolg van de vele interacties tussen de lange moleculen, waterstofbruggen, wrijving en knopen in de ketens. Als de temperatuur verhoogd wordt, komen de ketens verder van elkaar te liggen waardoor het aantal interacties afneemt en het materiaal omvormbaar of zelfs gietbaar wordt. De stijfheid en sterkte nemen dan af.

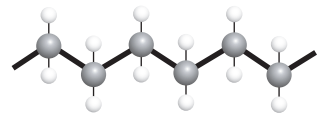
Door de lange ketens is er overigens geen sprake van 'gietbaar als water', de polymere vloeistof is ongeveer zo dik als warm asfalt. Vandaar dat er vaak gebruik wordt gemaakt van spuitgietmachines waarmee je hoge druk achter de kunststof kunt zetten zodat de matrijs met de dikke vloeistof snel en geheel gevuld kan worden. De hoge drukken in combinatie met de stroperige vloeistoffen vergen veel van de machines en de matrijzen, zodat deze vaak van duur edelstaal worden gemaakt. Het gevolg is dat deze techniek alleen voor relatief grote series producten gebruikt wordt, zodat de matrijskosten terugverdiend kunnen worden. Het is wel een eenvoudige techniek, waarbij in goed overleg met leveranciers

grondstofkorrels (granulaat) worden ingekocht en de productie kan beginnen. De eenvoud maakt echter dat ook producenten met te weinig ontwerpennis spuitgietproducten maken waar dus nogal eens slechte exemplaren tussen zitten. De ontwerpers van kunststofmatrijzen moeten met name goed gevoel ontwikkelen voor de warmtehuishouding en de doorstroombmogelijkheden in de matrijzen. Ook te grote wanddikten of grote wanddikteverschillen zijn veelvoorkomende ontwerpfouten.

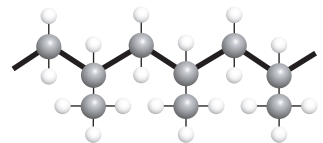
De thermoplasten vertegenwoordigen een grote groep kunststoffen en vier ervan, polyetheen, polypropreen, polystyreen en polyvinylchloride maken samen zdn 80 % uit van alle kilogrammen die aan kunststoffen verkocht worden. **Polyetheen (PE)**, met verschillende ketenlengtes wordt toegepast in boterhamzakjes tot aan supervezels. **Polypropreen (PP)** is een van de meest universele kunststoffen met toepassingen uiteenlopend van stijve verpakkingen tot aan machineonderdelen. Polystyreen (PS) heeft een veelheid aan toepassingen, van wegwerpbekertjes en isolatieschuimen tot aan hoogwaardige apparaatbehuizingen. Deze drie kunststoffen hebben bovendien een hoofdketen die alleen uit koolstof en waterstof bestaat, met als gevolg dat ze bij thermische recycling (verbranding) minder vervuילend zijn dan polyvinylchloride. **Polyvinylchloride (PVC)** heeft een fenomenale chemische bestendigheid tegen allerlei stoffen zoals zuren, oliën en alcoholen. Polyvinylchloride moet bij voorkeur na gebruik omgesmolten worden en in zijn kringloop is de milieubalans gunstig ten opzichte van vele andere materialen.

Een toepassing van kunststoffen die in de techniek nog wel eens vergeten wordt is de textiel. Dankzij de lange ketens laten kunststoffen zich goed verwerken tot spindraden waarvan sterke garens gemaakt kunnen worden. Thermoplasten als polyamide (PA, Nylon) en polyester worden gebruikt in toepassingen waarbij sterkte en laag gewicht van belang zijn, naast kleding ook in tenten en rugzakken. Polyaryletherketon (PEEK) vindt zijn toepassing in onder meer brandwerend textiel. Polyetheen, polypropreen en polyamide worden bovendien in allerlei banden touwproducten gebruikt. In deze toepassingen blijven de eigenschappen vergelijkbaar, dus kunnen textielproducten een bijdrage leveren aan technische ontwerp oplossingen voor problemen. Geotextiel is hiervan een voorbeeld, waarbij matten worden gemaakt om zandpakketten in dijken bij elkaar te houden.

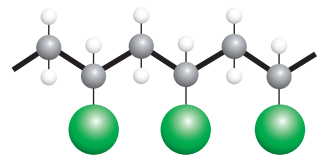
De toepassing van kunststoffen, en dan met name de thermoplasten, heeft een grote vlucht genomen. Een belangrijke reden hiervoor is dat je kunststoffen makkelijk kunt mengen met andere materialen. Door dit mengen kun je aan kunststoffen ongeveer alle eigenschappen meegeven die nodig zijn voor bepaalde toepassingen. Het mengen levert composieten op, waar we later op in gaan, maar ook **mengpolymeren**, die van alle verschillende basispolymeren een deel van de eigenschappen



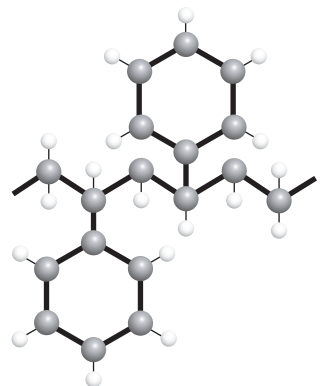
Polyetheen



Polypropreen



Polyvinylchloride



Polystyreen

meekrijgen. Thermoplasten worden gemengd met weekmakers om ze zachter te maken, of met aramidevezels om ze sterker te maken. Door te mengen met kleurstoffen zijn de thermoplasten bovendien in nagenoeg elke kleur en glans te leveren. Soms worden aan kunststoffen rubberen microbolletjes toegevoegd om de slagsterkte te verbeteren.

Naast mengpolymeren zijn er ook **copolymeren** waarbij de kunststofketen eigenschappen van meerdere polymeren langs chemische weg krijgt door de keten op te bouwen uit meerdere basispolymeren.

Rubbers

Temidden van alle materialen vormen de rubbers een groep die opvalt vanwege de lage sterkte en de grote rek die ze kunnen hebben. Dit is een elastische rek; rubbers kun je vele malen hun oorspronkelijke lengte uitrekken, waarna ze weer terugkeren in hun oude toestand. De naam rubber is afgeleid van het Engelse 'to rub', wat wrijven betekent, omdat het als natuurproduct bekende natuurrubber een hoge wrijvingscoëfficiënt heeft. Een rubber is in de elastische eindtoestand niet in een vorm te persen, omdat de rubber weer terugveert. Het vormgeven van bijvoorbeeld een autoband gebeurt daarom in een niet 'uitgeharde' toestand. Rubber is dan zeer plastisch, zacht en enigszins plakkerig waardoor lagen van verschillende rubbersoorten op elkaar geplakt kunnen worden. Daarna kunnen ze onder verwarming in de uiteindelijke vorm geperst worden. Hierbij worden met het in de rubber voorkomende zwavel (S) bindingen gevormd tussen de ketens. Dit proces heet **vulkaniseren** en is vergelijkbaar met het uitharden van thermoharders. Het ongevulkaniseerde mengsel is beperkt houdbaar en moet dus binnen een bepaalde tijd verwerkt worden. Het aantal bindingen dat gevormd wordt is veel geringer dan bij thermoharders, waardoor rubbers beweeglijk en elastisch worden.

Roet (koolstof) is een belangrijk element in rubbers, vandaar dat rubbers bijna allemaal zwart zijn. Het is niet te zien dat een product als een autoband uit vijf tot negen soorten rubbers kan bestaan. Voelen kun je dat wel, want het loopvlak bevat een andere rubbersoort dan de zijwanden en ook een andere rubbersoort dan de hiel van de band die om de velg zit, en waar staaldraad in zit. Het zijn combinaties van rubbersoorten als styreenbutadiëenrubber (SBR), nitrilbutadiëenrubber (NBR) en isopreenrubber (IR). Deze rubbersoorten zijn echter niet voldoende luchtdicht, zodat aan de binnenkant nog een laag eveneens zwarte butylrubber (IIR) wordt aangebracht. Het roet kent een enorme hechtingskracht en is daarom zo populair als versterkingsmiddel in rubber.

Door de elasticiteit is rubber in staat om zich haast aan elk oppervlak aan te passen waardoor grip ontstaat. Rubbers zijn net als thermoharders na het uitharden niet meer om te smelten en kunnen hooguit tot vulmateriaal verwerkt worden. Omdat rubbers vaak een



grote scheurweerstand kennen en dus niet zonder meer in stukjes geslagen kunnen worden, gebeurt de terugwinning bij zeer lage temperaturen, waarbij rubbers hard en breekbaar worden.

Elastomeren

Rubbers zijn moeilijk te kleuren. Een andere onhandigheid van rubbers is dat je om de juiste eigenschappen te krijgen meerdere componenten heel nauwkeurig moet mengen. Om deze redenen is een nieuwe groep kunststoffen ontwikkeld met het productiegemak en de kleurbaarheid van thermoplasten, maar met de gripeigenschappen en elasticiteit van rubbers: de **elastomeren**.

De elastomeren zijn wereldwijd samen goed voor circa anderhalf miljoen ton aan productie, tegen circa twaalf miljoen ton voor de rubbers. We onderscheiden in deze groep de ThermoPlastische Elastomeren (TPE), de Thermoplastische PolyOlefinen (TPO) en de Thermoplastische PolyUrethanen (TPU), naast een aantal andere kleinere groepen.

Kenmerkende toepassingen voor TPE zijn schoenzolen, kabelisolatie, handvatten, smeltlijmen en katten. Ze zijn gebaseerd op styreen bloccopolymeren, welke samen goed zijn voor ruim veertig procent van de TPE. De TPO valt formeel ook onder de thermoplastische elastomeren, maar wordt toch gezien als een aparte groep, meer als een flexibel plastic, en minder als een kleurbare rubber. Ze zijn dan ook harder en gladder dan de styreen TPE. Kenmerkende soorten zijn EthyleenPropyleenRubber (EPR) en EthyleenPropyleenDienM (EPDM), alsook enige vinylrubbers (EVA). Kenmerkende producten zijn laarzen, balgen, aandrijfriemen, afdichtingringen, wrijvingwieltjes en demping-materialen, samen goed voor een kwart van de TPE. De polyurethaan elastomeren (TPU, vijftien procent van de elastomeren) kunnen uiteenlopen van zeer zacht tot zeer hard en ze vertegenwoordigen dan ook een breed gezelschap van verschillende chemische verbindingen: van het beschilderbare polyesterpolycaprolacton voor spuitgegoten autopanelen tot aan het polytetramethyleenglycolether voor benzine-slangen en chemisch bestendige kabelisolatie.

Vormgeving vanuit de vloeibare fase

Bij het kiezen van materialen wordt altijd rekening gehouden met de uiteindelijke vormgeving van de producten. De kunststoffen laten zich het meest eenvoudig vormgeven in de vloeibare toestand. Voor het vloeibaar vormgeven is zo'n lage temperatuur nodig dat de matrijzen om het product te vormen van staal kunnen zijn, en soms zelfs van het zwakkere aluminium. Vandaar dat veel kunststofproducten onder hoge druk worden gegoten (persen, spuitgieten), of roterend in

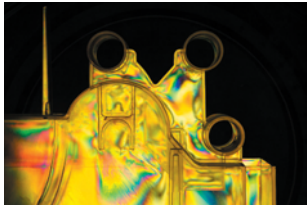




'spuitgietproduct'



'spuitgieten en blazen'



'spanningen in spuitgietproduct'

een holle mal (rotatiegieten), of warm worden omgevormd uit plaat (vacuümvormen). Indien de seriegroottes groot genoeg zijn en het product een complexe vorm heeft, zal men vaak kijken of kunststoffen een optie zijn. Vooral als er de wens is tot **integrale vormgeving**, waarbij allerlei lipjes, bevestigingspunten, holtes, gaten in één keer gemaakt moeten worden, wordt vaak gekozen voor een spuitgietproduct.

Op het moment dat het product ontstaat, ontstaat bij vloeibare vormgeving ook het materiaal. Dit betekent dat de productieomstandigheden van invloed zijn op de materiaaleigenschappen. Druk, temperatuur en tijd zijn parameters die een rol spelen. De gesmolten kunststof koelt af in de matrijs, stolt, en zal proberen te krimpen. Omdat de warmtegeleiding van kunststoffen slecht is, zal het enige tijd duren voor het binnenste van het materiaal gestold is. Als de buitenkant dan al hard is, zal het krimpende binnenste voor spanningen gaan zorgen in het materiaal. Soms kan dit worden tegengegaan door tijdens het uitharden vloeibaar kunststof in de matrijs te blijven drukken. Normaalgesproken zal echter door een goed ontwerp van het product moeten worden voorkomen dat de spanningen kunnen optreden. Doorgaans betekent dit voor de ontwerper dat er in het product alleen dunwandige stukken voorkomen, die dus gelijkmatig kunnen afkoelen. Ook moet de ontwerper bedenken hoe de gekozen productiewijze aansluit bij de vorm van het product, opdat de materiaaleigenschappen optimaal zijn en het materiaal vrij van spanningen is.

Dunwandige vormgeving betekent extra problemen bij het vullen van de matrijs. Dit houdt in dat er voor de vormgeving goed overlegd moet worden met de matrijsmakers, die hier de meeste ervaring mee hebben. Dit geldt voor spuitgieten, vacuümvormen en voor rotatiegieten. Bovendien moet er goed overleg plaatsvinden met de grondstofleverancier over de gewenste productiewijze en over de gewenste eindeigenschappen. Zodra de gewenste producteigenschappen, de gewenste productiemethode en de gewenste materiaaleigenschappen bekend zijn, zal goed overleg moeten leiden tot het juiste resultaat. Bij het vloeibaar vormgeven heeft de ontwerper behalve op de producteigenschappen dus ook een grote invloed op de materiaaleigenschappen. Uit het overleg met de grondstofleverancier moet ook volgen welk type kunststof gekozen moet worden, of beter gezegd welke **blend**. Polyetheen alleen is niet genoeg als bestelnaam. Je moet uitzoeken welke toevoegstoffen er wel en niet in moeten en welke handelsnaam de fabrikant gebruikt. Zijn polyetheen kan geheel anders blijken dan dat van de concurrent.

Kunststoffen zijn dus gemakkelijk vorm te geven in de vloeibare fase dankzij de lage smelttemperatuur. Een lage smelttemperatuur betekent echter ook dat de atomen kennelijk relatief beweeglijk zijn.

Voor kunststoffen zelfs zo erg, dat producten bij kamertemperatuur als gevolg van erop uitgeoefende krachten langzaam maar zeker steeds verder vervormen. We noemen dit verschijnsel **kruip**. Kunststofproducten zijn dus niet stabiel in de tijd, onder belasting. Een ontwerper zal hier rekening mee moeten houden door krachten voldoende te verdelen over de constructie. Een oplossing is om gebruik te maken van toevoegmaterialen met een hogere smelttemperatuur, zoals glas. Hierdoor ontstaat een kruipbestendig materiaal. We gaan hier nog op in bij de composieten.

1.5 MATERIAALKEUZE BIJ KERAMISCHE MATERIELEN

De kunststoffen zijn niet de enige groep materialen waarvan de vormgeving bij voorkeur langs vloeibare weg plaatsvindt. Bij kunststoffen gebeurt dat echter omdat het zo eenvoudig is in vergelijking met andere productiemethoden, bij technische keramiek wordt vanuit het vloeibare vormgegeven omdat andere methodes simpelweg niet kunnen. Je kunt keramiek in uitgeharde toestand niet buigen en nauwelijks verspanen (te hard). Vloeibaar is niet geheel het juiste woord, want het smeltpunt van keramiek is veel te hoog om het materiaal te kunnen smelten in industriële processen; vloeiende vormgeving is een betere uitdrukking. De meeste keramische producten worden gemaakt door te **sinteren**, een proces waarbij poeder bij hoge temperatuur onder druk wordt gezet. De temperatuur die gebruikt wordt is doorgaans in de orde van 1000°C . Als gevolg van de temperatuur en druk gaan de korrels vloeien tot één geheel, met nog enige porositeit als gevolg van luchtinsluiting. Hoe hoger de druk, hoe minder poreus en hoe sterker de keramiek wordt. Vandaar dat keramische producten die op deze wijze vervaardigd worden niet al te groot zijn, anders zouden de benodigde drukkkrachten te hoog zijn. De op deze wijze verkregen keramiek is vele malen sterker dan het zonder druk gebakken aardewerk dat we dagelijks gebruiken en dat zeer poreus is. De associatie met aardewerk en onbekendheid met technisch keramiek maakt echter dat veel ontwerpers liever geen keramiek voorschrijven.

Tot de keramische materialen behoren glassoorten, koolstof, hardmetaalsoorten en de meer herkenbare porseleinachtigen zoals alumina. Er zitten wat beperkingen aan het gebruik van keramiek. Het is door de verschillen in uitzettingscoëfficiënt moeilijk verbindingen te maken met andere materialen. De keramieken zijn bros, niet erg slagvast, en kunnen niet goed trekbelasting opnemen. De bewerkingskosten zijn hoog. De materiaalkosten zijn relatief hoog doordat gebruik moet worden gemaakt van poeders met een geschikte korrelgrootte en een kleine spreiding in korrelgrootte. Deze eisen zijn kostenverhogend. De materiaaleigenschappen zijn afhankelijk van de temperatuur,



'warmhoudplaat'



'horlogelagers'



'kogellagers'



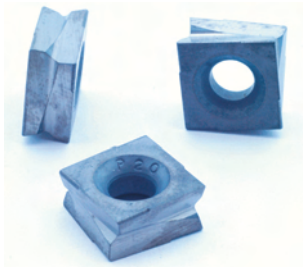


'isolators'

de sintertijd, de druk, de korrelgrootte, de korrelgrootteverdeling, de korrelvorm, de zuiverheid en de productvorm. Door het werken met poeders en het sinteren in vloeïende, maar niet vloeibare toestand is er tijdens het persen geen sprake van een constante druk door het materiaal heen. Daardoor is het moeilijk te voorspellen hoe de vorm en de verdeling van de porositeiten (holtes) is, waardoor het gedrag van het materiaal niet geheel vastligt. Goede technische keramiek maken is dus een kwestie van vakmanschap. De markt is klein en het aantal productiebedrijven gering.

Toch zijn de chemische bestendigheid, de slijtbestendigheid en de hittebestendigheid van keramieken zo spectaculair dat ze een aantal bijzondere producten mogelijk maken, die vaak niet van een ander materiaal kunnen worden gemaakt. Slijtvastheid en doorzichtigheid zien we samen in glasproducten. Chemische bestendigheid in afdichtingen voor vloeistoffen als azijnzuur. Chemische bestendigheid met precisie - gaatjes voor filters, slijtagebestendigheid in snijgereedschappen zoals beitels voor staalbewerking, hittebestendigheid in kijkglazen voor ovens en tegels voor ruimteveren. Meer dichtbij komen we keramiek tegen in vele composieten zoals carbonframes, remblokken, maar ook in isolatoren zoals schakelaars in ovens, halogeenlampvoeten, zekeringen en schrikdraadhouders.

Koolstof, als metalloïde, kan ook een metaalbinding aangaan en wordt onder andere gebruikt om de eigenschappen van stalen te modificeren. Daarnaast leidt deze eigenschap tot een bijzondere groep van keramische materialen: de **hardmetalen**. Ook met metalen als kobalt, molybdeen, wolfram, chroom en vanadium kan koolstof **carbiden** vormen. Deze carbiden zijn zeer hard en bovendien thermisch stabiel, zodat ze gebruikt kunnen worden in gereedschappen die ook bij hogere temperatuur nog goed moeten werken. In verschillende verhoudingen in poedervorm worden deze gesinterde carbiden gebruikt voor hardmetalen beitelplaatjes, boortanden en zaagtanden.



'beitelplaten'



1.6 MATERIAALKEUZE BIJ METALEN

Sinds de industriële revolutie zijn ze niet meer weg te denken uit ons dagelijks leven. Van nature komen metalen echter nauwelijks voor in de vorm waarin wij ze kennen. Ze zitten als zouten gebonden in allerlei gesteenten. We hebben veel moeite gedaan om ze eruit te halen en moeten daarna veel moeite doen om te voorkomen dat ze weer gaan corroderen (roesten). De buitenste atomen van metaalproducten zullen steeds steenachtige bindingen aangaan met de omgeving. Soms vormen ze daarbij een dichte keramische oxidehuid, zodat de rest van het metaal beschermd is. Soms ook roesten ze letterlijk door en moet het product

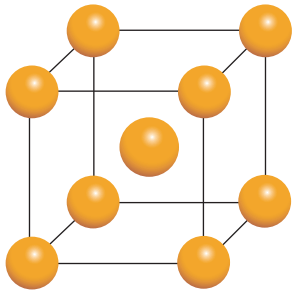
beschermd worden tegen de corrosie. In het kristalrooster zitten de metalen dicht op elkaar, hierdoor is de sterkte hoog en kan er vaak dun geconstrueerd worden, zodat constructies van metalen soms toch licht kunnen zijn, ondanks hun hoge soortelijke massa.

Het grote voordeel van metalen, bekeken vanuit de vormgeving, is dat ze op vrijwel elke manier verwerkt kunnen worden. Van metalen kunnen er gewalste profielen bestaan, gietlegeringen en gesinterde producten uit poeder. We spreken van **omvormmetalen**, **gietmetalen** en **poedermetallurgische (P/M) metalen**. Bovendien kunnen metalen producten geleverd worden in nagenoeg elke denkbare maat, van dun gouddraad voor elektronietoepassingen tot aan gegoten bolscharnieren van meters in diameter voor een waterkering en van meterslange treinrails tot paperclips. De materiaaleigenschappen van metalen kunnen bovendien op verschillende manieren aangepast worden. Het rooster in combinatie met het isotrope (in alle richtingen gelijke) bindingenpatroon maakt dat metaal koud gesmeed kan worden tot een zekere vervormingsgraad, met als resultaat dat het sterker wordt. Door middel van diverse warmtebehandelingen kunnen veel metalen harder en sterker, of juist zachter gemaakt worden. Daarnaast kunnen elementen (dus andere atomen) worden opgelost in het rooster van metalen om de eigenschappen te beïnvloeden. Op sommige metalen kunnen bovendien ook koudebehandelingen worden uitgevoerd waarmee dan de sterkte of slijtvastheid verbeterd wordt. Al deze technieken kunnen ook plaatselijk uitgevoerd worden.

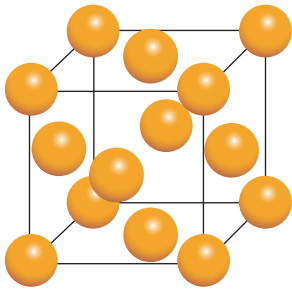
Het kan allemaal, maar het heeft zijn prijs. Als producten moeten worden warmtebehandeld, moeten ze vaak uit de productielijn naar een gespecialiseerd bedrijf en weer terug om afgewerkt te worden. Naast de kosten van de warmtebehandeling (per kilo product berekend) komen er ook vervoerskosten en logistieke kosten bij. Plaatselijke warmtebehandelingen vergen een goede voorbereiding en worden vaak uitgevoerd met speciaal vervaardigde gereedschappen zoals branders of magnetische inductiespoelen. Legeren gebeurt over het algemeen bij metalen met dure toevoegmaterialen. Voor een juiste toepassing van de verschillende warmtebehandelingen is goed overleg met de toeleverancier en met de warmtebehandelaar noodzakelijk.

Het kunnen veranderen van metaaleigenschappen (modificeren) hangt samen met de kristalliniteit van metalen. De metalen beginnen doorgaans als gesmolten vloeistof en worden dan direct gegoten tot eindproduct, of als gegoten halffabrikaat gewalst tot platen, balken en profielen. Bij het stollen van het gietstuk ontstaan kristallen, vergelijkbaar met ijsbloemen, met een duidelijke regelmatige vorm. Door het metaal warm te walsen worden de kristallen geplet, maar treedt ook door de warmte rekristallisatie op, zodat uiteindelijk platen ontstaan met een regelmatige kristalvorm. In de kristallen is vervorming

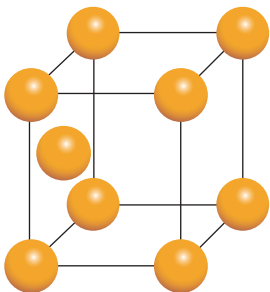




Ferriet:
kubisch ruimtelijk gecentreerd



Austeniet:
kubisch vlakken gecentreerd



Martensiet: 'vervormd ferriet':
tetragonaal ruimtelijk gecentreerd

mogelijk door het langs elkaar heen schuiven van de kristalvlakken. Dit wordt nog weer vergemakkelijkt door de aanwezigheid van bepaalde fouten die voorkomen in de bouw van de kristalroosters, de zogeheten **randdislocaties** en **schroefdislocaties**. Door externe krachten op het metaal kunnen deze dislocaties zich door het metaal verplaatsen, op een manier vergelijkbaar met een hobbel in een tapijt of tafellaken die weggestreken wordt. Zolang dit gemakkelijk gaat zal het metaal niet al te sterk zijn, maar wel ver kunnen uitrekken. Het metaal laat zich dan goed verwerken door middel van technieken als buigen, walsen en dieptrekken.

Als we de beweging van de dislocaties kunnen belemmeren, wordt het metaal sterker. Hiervoor zijn er verschillende mogelijkheden. Ten eerste kunnen we het metaal voorzien van atomen van een ander metaal, we noemen dit **legeren**. Meestal moeten deze **legeringselementen** meegesmolten worden in het oorspronkelijke gietbad, soms echter kunnen ze later door middel van diffusie bij hoge temperatuur het metaal in worden geleid. De vreemde atomen zullen zich nestelen in de omgeving van de dislocaties en zo de verdere beweging tegengaan. Een tweede techniek is ook gebaseerd op legeren, maar nu in combinatie met warmtebehandelingen die ertoe leiden dat de legeringselementen al dan niet samen met het basismateriaal nieuwe kristallen of kleinere kristallieten gaan vormen. Deze tweede fase die aldus in het materiaal ontstaat, zal niet mee afschuiven met het vervormende eerste kristalrooster, waardoor ook nu het metaal sterker wordt. Een vergelijkbare derde techniek is een warmtebehandeling, het zogeheten **normaalglouen**, waarbij het metaal nieuwe, kleinere, kristallen vormt. Doordat er nu vaker overgangen zijn van het ene kristalrooster naar het andere, aan de kristalgrenzen, wordt het moeilijker voor de dislocaties om over grotere afstanden af te schuiven, waardoor het materiaal wederom sterker wordt.

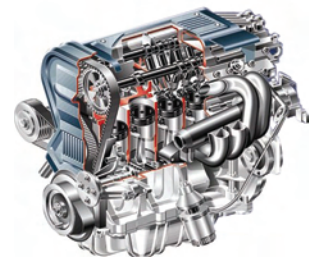
Sommige metalen kennen meerdere kristalroostertypes. Een voorbeeld is ijzer, dat tot 912°C een kubisch rooster kent, met een ordening waarbij op elke hoek van de kubus een atoom zit, en bovendien een enkel atoom in het midden van de kubus. Van 912°C tot 1394°C zijn de atomen anders gerangschikt en ontstaat een ander kubisch roostertype, met naast atomen op de hoekpunten ook steeds één op elk der zijvlakken van de kubus. De eerste ordening in ijzer, ofwel de **structuurtoestand**, heeft de naam **α -ferriet**, de tweede heet **γ -austeniet**. De structuurtoestand kun je ook aflezen in **toestandsdiagrammen**, zoals het ijzer-koolstofdiagram, waarin het roostertype als functie van de temperatuur en het koolstofgehalte te vinden is. Ook kun je eruit aflezen dat in ferriet maximaal 0,02% koolstof kan oplossen (bij 727°C), terwijl in austeniet tot wel 2,1% kan worden opgelost (bij 1148°C). Hiervan wordt gebruikge- maakt bij nog een methode om metalen te harden, het **afschrikhard**. Bij staalsoorten met circa 0,2 tot 1% koolstof kunnen we door vanaf

ongeveer 900°C relatief snel af te koelen zorgen dat het koolstof vast komt te zitten in het ferrietrooster, waar het dus niet in past. Het ferrietrooster raakt hier zo sterk van vervormd, dat er geen afschuiving meer mogelijk is, zodat het metaal zeer hard geworden is. Het nieuwe rooster dat ontstaat heet martensiet.

Als metaal gaat vervormen is er in het begin nog veel afschuiving mogelijk. Naarmate de vervorming voortschrijdt, wordt het aantal mogelijkheden om verder af te schuiven steeds kleiner. Er ontstaan bij voortgaande vervorming steeds meer dislocaties (roosterfouten), het materiaal verstevigt en wordt sterker. Vandaar dat koudgewalst plaatmateriaal sterker is dan warmgewalst plaatmateriaal. Vandaar ook dat dikker materiaal vaak een lagere sterkte heeft dan dunne plaat of staf. Een lagere sterkte, maar ook een grotere vervormbaarheid, is handig als je het materiaal nog wenst te buigen of anderszins om te vormen. Plaatmateriaal wordt dan ook verkocht in klassen als hard, half-hard, of dieptrekkwaliteit. Je zult dus bij het bestellen niet alleen de metaalsoort, maar ook de gewenste sterkte, hardheid of omvormkwaliteit moeten opgeven.

Zolang er geen speciale eisen worden gesteld, vind je voor de meeste toepassingen wel een geschikte kneedlegering of gietlegering in de ijzerlegeringen (staalsoorten) of in de aluminiumlegeringen. Voor magnesium (autovelgen, motorblokken) kies je als het echt lichter moeten voor titaan als je dun en elastisch wilt construeren (brilmonturen). Als chemische bestendigheid of hittebestendigheid een rol speelt (industriële branders), kies je voor nikkel. Is warmtegeleiding of stroomgeleiding van belang, of speelt er chemische bestendigheid mee (bijvoorbeeld waterleidingsarmaturen), dan is koper het te kiezen materiaal.

Ook metalen worden wel als eindproduct gegoten. Diverse producten, zoals autodeurknoppen (zink), fietsremhandels (aluminium) en verwarmingskachels (aluminium, gietijzer) bevatten onderdelen van gegoten metaal. Gietmetalen hebben ten onrechte een reputatie van breekbaar en ruw van uiterlijk. De moderne metaaltechnologie heeft vele gietlegeringen voortgebracht die qua eigenschappen niet onderdoen voor omvormmetalen. Giettechnieken worden vooral gebruikt voor producten die in grotere series vervaardigd worden en die een complexe vorm hebben. Door middel van gieten kunnen producten worden gemaakt die door middel van productietechnieken zoals frezen, smeden en omvormen nauwelijks te maken zijn. Alleen het computergestuurd frezen is soms een concurrerende techniek. De verschillende omvormmetalen kunnen niet zonder meer gegoten worden. Vanwege de complexe vormgeving worden vaak stoffen toegevoegd om de gietbaarheid te verbeteren, zodat gietlegeringen vaak andere aanduidingen hebben dan vergelijkbare omvormmetalen. Gietstukken hebben vaak een grovere kristalstructuur dan smeedstukken



'omvormen'



'gieten'

of andere omvormmetalen. Daarnaast hebben de kristallen vaak verschillende samenstellingen met als gevolg dat er een galvanische reactie mogelijk is in bepaalde milieus. (Edele plus minder edele kristallen als plus- en minpool.) De corrosiebestendigheid is dus ook minder, tenzij er rekristalliserende warmtebehandelingen worden uitgevoerd, wat niet altijd kan.

We hebben eerder gezien dat als de metaalkristallen klein worden dat dan de sterkte toeneemt. Vanuit dit idee is een nieuwe techniek ontstaan. Er wordt gebruikgemaakt van zeer fijn metaalpoeder, poeder met korrels ter grootte van één micrometer ofwel een duizendste millimeter. Een nieuwe trend is zelfs het gebruik van poeders die nog duizendmaal kleiner zijn. Het metaalpoeder wordt gesinterd, dus net als keramiek onder druk gebakken tot de korrels aaneenvloeien. Het resultaat is een product uit poedermetallurgisch metaal, dat extreem slijtvast en sterk is in vergelijking tot het materiaal waaruit het poeder is gemaakt. Om het metaal vrij van poriën te krijgen moeten hoge drukken gebruikt worden. Daardoor kan deze techniek alleen voor relatief kleine producten (tot enkele kubieke centimeters groot) gebruikt worden. Gezien de hoge kosten van poeder en machines, wordt dit metaal alleen voor speciale toepassingen gebruikt, zoals slijtvaste tandwielen en zeer kleine machineonderdelen, die op andere wijze moeilijk te harden zijn zonder dat ze te bros worden.

Het is aantrekkelijk om van kneedlegeringen uit te gaan, omdat deze als kant- en-klare staf worden aangeleverd met bekende eigenschappen. Door de lange industriële historie is de metaalbranche goed georganiseerd. Bovendien is de werktuigbouwkundige ontwerpwereld al zo vertrouwd met metalen dat de meeste traditionele constructieberekeningen gebaseerd zijn op de gegevens zoals deze gepresenteerd worden door de leveranciers. Vandaar dat er schijnbaar veel beter aan de materiaalkeuze van metalen te rekenen valt dan van andere materialen. Toch is dit een kwestie van gewenning. Het rekenen met kruip van kunststoffen en de variatie in eigenschappen van keramiek is goed te doen, zoals we nog zullen zien.



1.7 MATERIAALKEUZE BIJ COMPOSITIEN

Bij het legeren van metalen ontstaan nieuwe materialen met eigenschappen die niet rechtstreeks lijken op de eigenschappen van de uitgangsmaterialen. Als we bijvoorbeeld aluminium legeren met het beter geleidende koper, krijgen we een legering die slechter warmte en stroom geleidt dan elk der beide uitgangsmetalen. Bij het mengen van materiaal zullen de uitgangsmaterialen nog afzonderlijk herkenbaar blijven en zal het resultaat een materiaal zijn dat het ene materiaal versterkte eigenschappen van het andere materiaal meegeeft. Stel dat we geen legering van aluminium en koper maken, maar

koperdeeltjes ingieten in aluminium, dan zal het geheel de warmte beter geleiden dan aluminium.

Een ander voorbeeld is gewapend beton. Beton krijgt meer sterkte van de stalen wapening, en de stalen wapening zorgt voor een lager gewicht van het beton, zodat licht en sterk geconstrueerd kan worden.

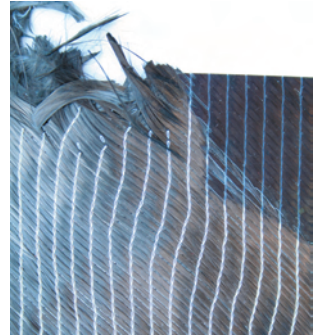
Een voorbeeld uit de kunststofwereld is het mengsel PS/PPO. Polystyreen (PS) krijgt slagvastheid door toevoeging van het rubber polyfenyleenoxide (PPO) en het PPO op zijn beurt wordt sterker door het polystyreen.

Zo ook ontleent siliciumcarbide vezelversterkt aluminium zijn sterkte aan het siliciumcarbide en krijgt het siliciumcarbide er de gietbaarheid van het aluminium bij.

Bij composieten maken we een onderscheid tussen het **matrix-materiaal** en het **vulmateriaal**. Matrixmateriaal is het materiaal waaraan we stoffen toevoegen om specifieke eigenschappen te verbeteren, de matrix is dus in feite het basismateriaal. Naar gelang het matrix-materiaal worden de composieten onderscheiden in metaalmatrix-composieten, versterkte kunststoffen en gewapende keramieken. Hout is een natuurlijke composiet omdat het uit onderscheidbare verschillende celmaterialen bestaat, maar waar niet specifiek iets aan toegevoegd is. Binnen de composieten wordt bovendien onderscheid gemaakt tussen mengcomposieten en laminaatmaterialen. De **mengcomposieten** bestaan uit een homogeen mengsel van matrix en toevoegmateriaal of wapeningsmateriaal. Als sprake is van wapeningsvezels kunnen deze kort zijn, of juist zeer lang, wat invloed heeft op de totale productsterkte.

Laminaatmaterialen zijn opgebouwd uit lagen van verschillende materialen. Voorbeelden zijn multiplex (hout op hout of kunststof op hout) en gelaagd glas (kunststof op keramiek). Het is goed om te bedenken dat composieten niet altijd gemaakt worden om sterkte te verhogen, een composiet kan ook tot doel hebben de warmtegeleiding te verbeteren (metaalvezel in kunststof) of juist te verlagen (lucht-insluiten: kunststof schuimen, metaalschuimen, poreus keramiek).

Hout is een van de oudst bekende productmaterialen. Voor veel hedendaagse producten wordt het echter nauwelijks toegepast omdat de eigenschappen niet erg constant zijn door natuurlijke invloeden als wind, bodemgesteldheid en knoesten en door vochtopname van het gedroogde hout. Ook is het hout uitgesproken **anisotroop**, dit betekent dat de eigenschappen in verschillende richtingen niet gelijk zijn. Hout is in de nerfrichting veel sterker dan loodrecht op de nerfrichting. Daarnaast zijn de industriële vormgevingsmogelijkheden beperkt voor massief hout. Bij complexe gefreesde vormen zullen stukken kunnen afbreken door de slechte hechting loodrecht op de nerf. Je zult bij



'bamboe-fiets'

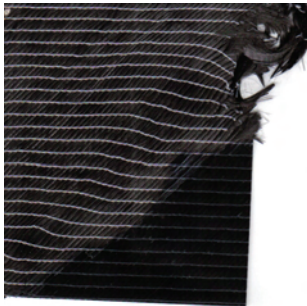


'Calfee'

massief hout van rechte, in de nerfrichting belaste vlakken moeten uitgaan, die eventueel gebogen kunnen worden. Om tegemoet te komen aan de geringe vormgevingsvrijheid van het werken met massief hout zijn allerlei houtspaander- en houtmeelmengsels gemaakt, die door persen met lijmstoffen vormgegeven worden. De sterkte hiervan is echter veel geringer dan van massief hout, en behoudens een enkele uitzondering moeten ze van deklagen worden voorzien tegen vochtopname, slijtage of om esthetische redenen. Om tegemoet te komen aan de anisotropie zijn laminaatmaterialen zoals triplex en multiplex ontwikkeld, die in het vlak van de platen in twee richtingen redelijk gelijk van eigenschappen zijn te noemen. Indien goed toegepast, kan met de houtlaminaten lichter en tegelijk sterker geconstrueerd worden dan met vrijwel alle andere materialen.

Van de door de mens gemaakte composieten zijn de vezelversterkte thermoharders de bekendste. Vooral bekend is het glasvezelversterkte epoxie dat in autodaken, vliegtuigonderdelen, zeiljachten, surfplanken en dienbladen voorkomt en daar voor extra sterkte en stijfheid zorgt. Er zijn grofweg drie manieren om dit soort composieten te maken. Je kunt vezelmatten of korte vezels op net aangemaakte thermoharder verspreiden en dan eventueel onder druk laten uitharden. Dit is de **hand-lay-up-methode**. Een tweede manier is om lange vezels door een bad heen te leiden en dan bijvoorbeeld buizen te wikkelen of lange profielen te maken. Eventueel kan men langs deze weg ook matten weven of bevochtigen met thermoharder, welke dan als vooraf geïmpregneerd materiaal, ofwel prepreg gekoeld bewaard en verkocht wordt. Na vormgeving worden de matten in een grote oven (autoclaaf) onder druk uitgehard. Een derde methode is om korte vezels of deeltjes van tevooren te mengen met kunststof in poeder of granulaat en dat dan droog te bewaren. Vervolgens wordt het in een vorm geperst en gesinterd. Deze techniek wordt onder andere in microchipbehuizingen gebruikt, met als doel de chip vormvast te houden bij temperatuurverhoging.

Een logisch vervolg op de vezelversterkte thermoharders zijn de vezelversterkte thermoplasten. Deze kunnen met korte vezels of glasdeeltjes en andere vulstoffen simpelweg gespuitsgiet worden. Een nadeel van deze productietechniek is de snelle slijtage van de matrijzen, zodat deze over minder producten moeten worden afgeschreven. Deze techniek wordt gebruikt voor behuizingen van handgereedschapmachines, met als resultaat dat deze sterker worden en ook bij het warm worden stijf en sterk blijven. Relatief nieuw zijn de **langvezel-thermoplasten**, waarbij lange vezels, al dan niet geweven, worden ingesmolten in thermoplastische halfabrikaten als staf en plaatmateriaal. Dit materiaal kan vervolgens warm vervormd worden tot eindproducten. Het gebruik van thermoplasten heeft meerdere voordelen. Het materiaal is taai, sterker en beter recyclebaar. Bovendien zijn betere oppervlaktekwaliteiten



en meer kleuren mogelijk dan bij thermohardercomposieten. Een nadeel van de thermoplasten is wel dat ze minder krasvast zijn.

De nieuwste familie van de composieten zijn de **metaalmatrix-composieten**. Het betreft hier eigenlijk alleen metalen met keramische vezels als wapening. De belangrijkste reden om metalen te willen wapenen met keramiek is net als bij veel kunststoffen om de mechanische eigenschappen bij hoge temperatuur te verbeteren. Door gebruik te maken van aluminium als matrix ontstaat een licht maar toch sterk materiaal voor gebruik bij hoge temperaturen. De aluminiummatrixcomposieten zijn drie keer zo duur dan aluminiumlegeringen. Toepassingen zijn onder andere ventiekleppen en cilindermantels in dieselmotoren.

1.8 DEKLAGEN

De drie hoofdgroepen materialen hebben elk zo hun eigen kenmerken als het gaat om de interacties tussen product en omgeving. Als we denken aan oppervlakte-interacties waarbij corrosie, grip, reflectie, kleur, slijtage, glijden, warmtegeleiding, comfort of klank een rol spelen zijn de groepen duidelijk verschillend. Dankzij het gebruik van deklagen kunnen we oppervlaktekenmerken van de ene groep toevoegen aan de andere groep.

Een van de grootste problemen is de hechting van de deklagen. Er zijn drie hechtingsprincipes: chemische, fysische en mechanische hechting. Bij de **chemische hechting** wordt er een verbinding (covalent, ionbinding of metaalbinding) aangegaan tussen ondergrond en deklaag. De deklaag kan vervolgens niet mechanisch verwijderd worden. Bij de **fysische hechting** is er in feite sprake van adhesie, waarbij de micro-structuur van belang is. Als op atomaire schaal de beide materialen qua vorm in elkaar passen, treedt er hechting op, mits de aantrekkingskracht tussen de materialen (adhesie) groter is dan de interne aantrekking (cohesie). Mechanische hechting is een grootschalige variant van fysische hechting. Door opruwing van de ondergrond ontstaat een vorm waar het deklaagmateriaal ingrijpt.

De **kunststof deklagen** zijn het bekendst. Dankzij het gebruik van verf kunnen andere materialen zoals hout tegen verrotting en metalen tegen corrosie beschermd worden. In principe kunnen alle materialen van een kleur voorzien worden. Nog meer toepassingen van kunststofdeklagen zijn tijdelijke beschermfolies, anti-aanbaklagen en anti-slijtlagen of glijlagen. Ook worden kunststofdeklagen aangebracht om juist meer grip op oppervlakken te krijgen, bijvoorbeeld op douche-vloeren of scheepsdekken.

De anti-corrosietoepassing is de bekendste. Veel metalen gaan een reactie met zuurstof aan. Soms ontstaat daarbij een dichte oxidehuid die het metaal beschermt tegen verder roesten. Vaak echter, blijkt

het corrosieproduct een poreuze laag, waardoor de zuurstof nog steeds bij het onderliggende metaal kan komen. In dat geval is een oplossing om het metaal af te schermen tegen de omgeving met een zuurstofdichte laag. Niet alle kunststoffen hechten zonder meer, vandaar dat vaak overgangslagen ('grondverf') gebruikt worden, die aan het metaal kunnen hechten en aan de kunststof (verf) toplaag. Dit zijn vaak lagen met een keramische aard, dus bestaande uit een verbinding van een metaal en een niet-metaal, waardoor ze zowel aan het metaal als aan de kunststof hechten.

Er zijn drie soorten **keramische deklagen**. De eerste is de anticorrosielaag op metalen die vaak al van nature ontstaat. Normaal gesproken wordt de laag echter langs industriële weg aangebracht, waardoor een betere kwaliteit ontstaat. Dit proces heet **passiveren**. Aluminium krijgt aldus een laag aluminiumoxide (alumina), roestvast staal een laag chroomoxide. De lagen hebben de chemische stabiliteit van een keramiek, maar ook de brosheid ervan, dus als het onderliggende metaal gebogen wordt, zal de laag barsten gaan vertonen en moet het metaal opnieuw gepassiveerd worden. Ook als het product later nog bewerkingen ondergaat, zoals knippen of boren, zal het bewerkte vlak opnieuw gepassiveerd worden. Het verwerken en bewerken van dit soort materialen vergt dus meer processtappen, die vaak door gespecialiseerde bedrijven moeten worden uitgevoerd. Het passiveren kan ook gecombineerd worden met een decoratieve functie, waarbij de oppervlakte een kleur krijgt.

Ook specialistisch is een tweede manier van keramisch bedekken, het bekende **emaileren**. Dit kan echter niet op elk metaal uitgevoerd worden. Over het algemeen wordt deze techniek uitgevoerd tegen (hoge temperatuur-) corrosie, maar het heeft vaak ook een decoratieve functie. Het onderliggende metaal is doorgaans een speciaal voor emaileren vervaardigde laaggelegeerde koolstofstaal kwaliteit.

De derde soort keramische deklaag is bedoeld om slijtage tegen te gaan. Er zijn drie technieken om dit soort lagen aan te brengen. Hardmetalen lagen worden onder andere aangebracht door ze op te lassen. Deze techniek wordt gebruikt voor machines voor zandtransport. Twee andere technieken zijn het **opdampen** (physical vapour deposition, PVD) en het **chemisch opdampen** (chemical vapour deposition, CVD). Deze technieken worden gebruikt voor dunne slijtvaste lagen op onder andere snijgereedschappen en verspanende gereedschappen. Keramische deklagen worden in principe alleen op metalen aangebracht. De stijfheid van kunststoffen is te laag, waardoor de laag op een kunststof product zou kunnen barsten bij belasting.

Metallische deklagen kunnen wel op kunststof worden aangebracht. Er zijn twee hoofdredenen te geven voor het gebruik ervan. Soms willen men een licht product de degelijke uitstraling meegeven van een metaal (titaan look), maar ook wordt gebruikgemaakt van de stroomgeleiding

van metalen om lekstromen af te voeren of om elektronische componenten af te schermen tegen elektromagnetische straling.

1.9 STEEKWOORDEN

KWALITEIT	ELEKTRON	COMPOSIT
GEOMETRIE	EDELGASCONFIGURATIE	LAMINAAT
KWALITEITSSLIJ	KRISTALLIJN	DEKLAAG
MATERIAAL	AMORF	THERMOHARDER
LEVENSZYCLUS	METAAL	THERMOPLAST
VERVAARDIGINGSTECHNIEK	KUNSTSTOF	RUBBER
LEVENSZYCLUSKOSTEN	KERAMIEK	ELASTOMEER
FUNCTIE	SPANNINGSTOESTAND	OMVORMMETAAL
ATOOM	STRUCTUUR	GIETLEGERING
MOLECUUL	SAMENSTELLING	

1.10 OEFENINGEN VRAAGSTUKKEN

1.1

- 1.1.1 Wat is de functie van het Programma van Eisen in het ontwerpproces?
- 1.1.2 Wat is kwaliteit?
- 1.1.3 Beschrijf de totale kwaliteitsslij.
- 1.1.4 Wat is de oorzaak van de kwaliteitsslij?
- 1.1.5 Wat zijn de kritische succesfactoren van een goed product?
- 1.1.6 Wat zijn de vier belangrijkste ontwerpvariabelen?

1.2

- 1.2.1 Benoem de levenszyclusfasen van een product.

1.3

- 1.3.1 Geef een voorbeeld van twee materialen die als gevolg van een verschil in samenstelling verschillende eigenschappen hebben.
- 1.3.2 Geef een voorbeeld van twee materialen die als gevolg van een verschil in structuur verschillende eigenschappen hebben.
- 1.3.3 Geef een voorbeeld van twee materialen die als gevolg van een verschil in spanningstoestand verschillende eigenschappen hebben.
- 1.3.4 Laat zien op welke wijze keramisch siliciumnitride (Si_3N_4) als ionbinding voldoet aan de edelgasconfiguratie.
- 1.3.5 Laat zien dat de metallische verbinding ijzercarbide Fe_3C op basis van een covalente of ionbinding niet kan voldoen

aan de edelgasconfiguratie.

- 1.3.6 Leg uit waarom kunststoffen ondanks hun sterke covalente bindingen niet de sterkste materialen zijn.
- 1.3.7 Welk materiaal zal zwaarder zijn, een kristallijne kunststof of een amorf kunststof van dezelfde samenstelling? Licht toe.
- 1.3.8 Leg uit waarom het bindingstype van een materiaal niet van invloed is op de mogelijkheid om een materiaal vorm te geven door middel van gieten.

1.4

- 1.4.1 Waarom is de restwaarde in de afdankfase van thermoplastisch materiaal hoger dan van thermohardend materiaal?
- 1.4.2 Geef vier mogelijke processen om een kunststof emmer te maken en beredeneer in welke volgorde van seriegrootte ze rendabel zijn.
- 1.4.3 Waarom zul je geen geweldige plaat van kunststof tegenkomen?
- 1.4.4 Wat is het verschil tussen elastomeren en rubbers?
- 1.4.5 Waarom kunnen thermoplasten meer uitrekken dan thermoharders?
- 1.4.6 Waarom is het aantrekkelijker, bij vergelijkbare producteigenschappen, om een product in kunststof te spuitgieten dan in metaal?

1.5

- 1.5.1 Waardoor breekt keramiek in uitgeharde toestand vrijwel meteen zonder verdere vervorming als je het probeert krom te buigen?

1.6

- 1.6.1 Verklaar waarom metaal zo goed gewalst kan worden.
- 1.6.2 Geef vier manieren om de hardheid van een metaal hoger te maken.
- 1.6.3 Waarom corroderen ('roesten') metalen zo gemakkelijk?

OPDRACHTEN

1.1

- 1.1.1 Stel een Programma van Eisen op voor een tandwiel van een versnellingsbak van een sportauto.
- 1.1.2 Stel een programma van eisen op voor een tandenborstel. Zoek uit van welke materialen deze is gemaakt en beredeneer de materiaalkeuze.

1.2

- 1.2.1 Welke materiaalkundige aspecten zorgen ervoor dat Miele bij de wasmachines bekendstaat als een van de meest betrouwbare merken? Wat zorgt ervoor dat deze machines gemiddeld een veel langere levensduur hebben?
- 1.2.2 Stel, een Miele - wasmachine heeft een verwachte levensduur van 16 jaar bij normaal gebruik. Een AEG - wasmachine met gelijke functionaliteit heeft een verwachte levensduur van 12 jaar. Nu ben jij op zoek naar een nieuwe wasmachine, welke van de twee zou jij kopen? Motiveer je antwoord.
- 1.2.3 Je staat op het punt een nieuwe auto aan te schaffen en je moet kiezen tussen een benzine of diesel uitvoering. Kies één auto en twee vergelijkbare uitvoeringen (één diesel en één benzine). Je rijdt 20 000 km per jaar. Welke uitvoering kies je?
- 1.2.4 Stel je financiert de auto van de vorige opgave volledig met een lening. Hoe verschuift het breakevenpunt?
- 1.2.5 Hoe verhouden zich de ratio's gewicht (in kg)/motorinhoud (in cc.), gewicht/ brandstofgebruik (bij 120 km/h) en gewicht/motorvermogen van een Lotus, een Audi TT en BMW Z3?

1.5

- 1.5.1 Beschrijf in welke opzichten het polyetheen van boterhamzakjes en het butylrubber van fietsbinnenbanden op elkaar lijken en in welke opzichten ze toch verschillend zijn.

1.6

- 1.6 Geef drie redenen waarom SiO_2 (glas), Al_2O_3 (alumina), WC (wolframcarbide) en C , carbonvezel, bij elkaar horen in de groep keramiek.
- 1.6 Keramiek is erg bros, maar wel slijtvast. Bedenk een manier om de slijtvastheid te benutten in een schaar, zonder bang te hoeven zijn dat deze te gemakkelijk breekt.
- 1.6.4 Je zit voor een schroothoop met de opdracht de metalen eruit te halen. Op grond van welke eigenschappen weet je wat de metalen zijn?

1.7

- 1.7.1 Geef twee redenen, een technische en een commerciële reden, waarom je een kantinestoel met een kunststof kuip van stalen poten voorziet en niet geheel uit kunststof maakt.
- 1.7.2 Geef drie goede redenen waarom je een kunststof zou willen mengen met een ander materiaal.