

***Materiaalkunde
voor Ontwerpers
en Constructeurs***

***Materiaalkunde
voor Ontwerpers
en Constructeurs***

P. van Mourik
J. van Dam

© VSSD

Eerste druk 1996

Tweede druk 1998

Derde druk 2001

Vierde druk (gebonden) 2004, verbeterd 2006, 2012 (paperback)

Uitgegeven door:

VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

webstek over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/m013.htm>

Aan docenten die dit boek in cursusverband gebruiken, kunnen de illustraties in dit boek desgewenst in digitale vorm beschikbaar gesteld worden. Er is voor docenten tevens een bestand met antwoorden op de studievragem beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij emailadres hlf@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

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, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Elektronische versie

ISBN 978-90-71301-83-4

Gedrukte versie

ISBN 978-90-407-2497-8

NUR 971

Trefw.: materiaalkunde



Voorwoord

Bij de derde druk

Menselijke activiteiten berusten ook in de voorzienbare toekomst op het gebruik van een uitgebreid scala aan materialen. Het is een gemakkelijke voorspelling dat de variatie aan materialen, gegeven de toenemende complexiteit van concrete producten, alleen maar groter zal worden. Dit geldt niet alleen voor het nieuwste van het nieuwste, maar ook voor de materiaalklasse die sinds mensenheugenis in gebruik is: keramiek. Om aan deze complexiteit enigszins recht te doen, krijgen de keramische materialen in al hun verscheidenheid een corresponderende plaats en behandeling in deze derde druk. De behandelde onderwerpen variëren van glas, via baksteen en beton tot moderne functionele keramiek.

Bij de hierboven gesignaleerde toenemende complexiteit van materialen en producten worden materiaalkunde en materiaalkeuze als een geïntegreerd onderdeel van productontwikkeling en construeren steeds belangrijker. Eigenschappen zijn voor de ontwerper en de constructeur die meetbare aspecten van een stof die een sleutelrol spelen in het creatieve proces van materiaalkeuze. Welke eigenschappen dat zijn, wordt in een nieuw Hoofdstuk 2 toegelicht, waarin ook enkele meetmethoden van deze eigenschappen worden gegeven. In een eveneens nieuw Hoofdstuk 10 wordt de materiaalkeuze verder uitgewerkt, waarin de Ashby-aanpak een belangrijke rol kan spelen.

De toevoeging van deze twee hoofdstukken, nieuw in vergelijking met de voorgaande uitgaven van dit boek, en de integratie van de keramische materialen in deze derde druk leidden tot een nieuwe hoofdstukindeling van de behandelde stof. Daarbij is gestreefd naar een beperking van de hoofdstukomvang, waardoor de toegankelijkheid van het boek vergroot is.

De toevoeging van de nieuwe keramische onderwerpen vergroot de kring van gebruikers van dit boek: studenten industrieel ontwerpen, werktuigkundig constructeurs, maar ook bouwkundigen en civieltechnici. Dit sluit aan bij een al gegroeide praktijk. Het architecturale voorbeeld in het laatste Hoofdstuk past hierbij goed.

Bij de voorbereiding van deze nieuwe druk hebben de volgende personen een belangrijke rol als begeleidend lezer gespeeld. Voor Hoofdstuk 2 dr.ir. J. Zuidema en A.R. Wachters (beiden TU Delft), voor de gedeelten over de bouwkundige materialen dr.ir. A. Fraay en dr.ir. F.A. Veer (eveneens beiden TU Delft), voor de

gedeelten over de keramiek dr.ir. A. Goossens (TU Delft) en dhr. S. Pasveer (Koninklijke Porceleyne Fles te Delft). Voor Hoofdstuk 10 ir. M.J. ten Bouwhuijs (Universiteit Twente). Stimulerende contacten werden onderhouden met prof.ir. L. Katgerman, dr. A. Gotsis en ir. J. Prins (allen TU Delft). Voor de gastvrijheid betoond door de Sectie Polymeerkunde van de TU Delft (prof.dr.ir. J.J. Elmendorp, prof.dr.ir. S. Picken en prof.dr.ir. J. van Turnhout) zijn wij zeer erkentelijk.

Wij zijn verheugd dat dit boek in een derde druk kan verschijnen. Wij danken dhr. J. Schievink van de uitgever VSSD/DUP voor zijn enthousiasmerende belangstelling en inzet. Wij hopen dat met de hiervoor genoemde veranderingen de bruikbaarheid van dit boek voor de industrieel ontwerper en voor de constructeur in belangrijke mate vergroot is.

Delft, april/mei 2001

P. van Mourik & J. van Dam

Bij de vierde druk

Reeds betrekkelijk kort na de derde druk kan een vierde druk van dit studieboek verschijnen. Dat stemt uiteraard tot vreugde. Dit boek voorziet kennelijk in een duidelijke behoefte. Prof.em. dr.ir. B.M. Korevaar was bereid om met zijn kritisch stimulerende blik de tekst van dit boek tegen het licht te houden. Wij danken hem voor zijn waardevolle bijdragen. Wij danken J. Schievink van de VSSD, die het boek produceert, voor zijn immer enthousiasmerende belangstelling en inzet.

De tekst van deze vierde druk is te gebruiken naast die van de derde druk. Uiteraard blijven de auteurs verantwoordelijk voor deze tekst en houden zij zich aanbevolen voor opmerkingen die leiden tot verbeteringen en aanvullingen. Wij hopen dat de genoemde inspanningen bijdragen tot een vergrote bruikbaarheid van dit boek voor studenten en voor industrieel ontwerpers en constructeurs in de praktijk.

Delft, mei/juni 2004

P. van Mourik & J. van Dam

Noot bij deze gewijzigde vierde druk

Deze gewijzigde 4de druk bevat ter vervanging van de oude twee nieuwe appendices die ontleend zijn aan de recent verschenen Engelstalige editie van dit studieboek (Materials Science in Design and Engineering, ISBN 978-90-6562-301-0).

Delft, zomer 2012

P. van Mourik & J. van Dam

Aanwijzingen voor zelfstudie

In het studiejaar '94/'95 werd de stof in dit boek voor het eerst in deze vorm gebruikt voor het tweedejaarsvak Materiaalkunde II van de studierichting Industrieel Ontwerpen aan de Technische Universiteit Delft. Uit verzameld cijfermateriaal werd afgeleid, dat de in dit boek gepresenteerde stof zelfstudie stimuleert. Dit boek is dan ook speciaal ontworpen voor zelfstudie: het moet niet gelezen worden, maar bestudeerd. Het boek biedt de student de volgende hulpmiddelen bij zelfstudie:

1. De gedetailleerde inhoudsopgave laat in één oogopslag het verband tussen de verschillende onderdelen van de stof zien.
2. Voor elk hoofdstuk zijn leerdoelen geformuleerd, zodat de student direct ziet waar in dat hoofdstuk de belangrijke accenten liggen. Deze leerdoelen zijn opgenomen in een afzonderlijke Appendix.
3. De tekst is zo compact mogelijk geschreven, vaak in samenhang met de figuren: voor een goed begrip vormen tekst en figuren een geheel.
4. Terugzoeken is mogelijk via de gedetailleerde inhoudsopgave en via de trefwoordenlijst.
5. De studievragen in de tekst prikkelen tot nadenken. Voor de noodzakelijke terugkoppeling zorgen de 'Antwoorden op Studievragen'.
6. Aan het einde van het boek is een verzameling studie-opdrachten gegeven. Na bestudering van dit boek wordt van de studenten verwacht dat zij zelf een antwoord op een

dergelijke studie-opdracht formuleren en ook evalueren.

Materiaalkunde en Industrieel Ontwerpen zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. Een grondige kennis van materialen is een absolute vereiste voor een verantwoord product. De grote lijn van dit boek is dan ook:

1. kennis van en inzicht in de structuur van materialen (Hoofdstukken 3 en 4)
2. basiskennis van veel toegepaste materialen (Hoofdstukken 5, 6, 7 en 8)
3. kennis van en inzicht in het verband tussen structuur, verwerking en resulterende eigenschappen (Hoofdstuk 9).

Hoofdstuk 1 schetst de plaats van Materiaalkunde binnen Industrieel Ontwerpen. Hoofdstuk 10 illustreert dat de verbinding tussen ontwerpen en daadwerkelijk produceren niet altijd gemakkelijk is.

Door de trefwoordenlijst, de appendices, de vele tabellen en de referenties is dit boek niet alleen bruikbaar als studieboek, maar ook als naslagwerk. Kennis van materialen is een wezenlijk onderdeel van de geestelijke bagage van een Industrieel Ontwerper. In tegenstelling tot een wijd verbreid misverstand zijn *eigen kennis en inzichten* ook in het tijdperk van de informatietechnologie van doorslaggevend belang. Voor het beoordelen van informatie is een referentiekader noodzakelijk, gebaseerd op eigen kennis en inzichten. Kennis en inzicht verwerft men door zelfstudie. Voor de verwerking van dit boek is zelfstudie het noodzakelijke enzym.



Inhoud

VOORWOORD	5
Bij de derde druk	5
Bij de vierde druk	6
AANWIJZINGEN VOOR ZELFSTUDIE	7
1. INLEIDING	13
1.1. Metalen	17
1.1.1. Ferro-Metalen	18
1.1.2. Non-Ferro Metalen	18
1.2. Kunststoffen	20
1.3. Keramiek	23
1.3.1. Structurele keramiek	24
1.3.2. Functionele keramiek	25
2. EIGENSCHAPPEN EN MECHANISCHE BEPROEVING	27
2.1. Inleiding	27
2.2. Eigenschappen en hun samenhang	28
2.2.1. Elastische constanten	28
2.2.2. Breuktaaiheid	29
2.2.3. Dichtheid, warmte en slijtage	31
2.2.4. Samenhang van intrinsieke eigenschappen	31
2.3. Mechanische beproeving	33
2.3.1. Statisch: de trekproef	33
2.3.2. Statisch: de hardheidsmeting	38
2.3.3. Dynamisch: drie vormen van bezwijken	40
2.4. De waarde van materiaaleigenschappen	50
3. STRUCTUUR VAN MATERIALEN	51
3.1. Inleiding	51
3.2. Atoombouw en atoombinding	53
3.3. Metaalkristallen	58
3.3.1. Roosters	58
3.3.2. Kristalfouten	63
3.3.3. De versterking van metalen	69
3.3.4. Elektrochemische aantasting van metalen en	

metaallegeringen	74
3.4. Keramiek	77
3.5. Kunststoffen	84
3.5.1. De opbouw van polymeren	84
3.5.2. Ketenstructuur	87
3.5.3. Glastoestand en glas-rubber overgang	90
3.5.4. Semi-kristallijne polymeren	93
4. LEGERINGEN, OPLOSSINGEN, MENGSELS EN COMPOSITIEN	98
4.1. Inleiding	98
4.2. Opbouw van metaallegeringen	100
4.3. Toestandsdiagrammen voor binaire metaallegeringen	102
4.3.1. Onoplosbaarheid in de vaste toestand; eutecticum, peritecticum en intermetallische verbinding	103
4.3.2. Volledige oplosbaarheid in vaste toestand; mengkristallen	106
4.3.3. Beperkte oplosbaarheid in vaste toestand	107
4.3.4. Overgangspunten; gecompliceerde diagrammen	109
4.4. Toestandsdiagrammen voor binaire keramiek	112
4.5. Samengestelde kunststoffen	115
4.5.1. Polymeer-polymeer mengsels	115
4.5.2. Mengsels van polymeren met niet-polymeren; composieten	117
5. FERRO-METALEN	121
5.1. De kracht van ijzer, staal en gietijzer	121
5.2. IJzer	122
5.3. Staal	124
5.3.1. De structuur van staal bij normale afkoeling uit het austenietgebied	126
5.3.2. Gloeien van ongelegeerd staal	130
5.3.3. Staal voor carrosserieën	134
5.3.4. Harden van staal	136
5.3.5. Ontlaten van staal	140
5.4. Gietijzer	142
5.5. Gelegeerd staal	147
6. NON-FERRO METALEN	155
6.1. De sier, de duurzaamheid en de lichtheid van het bestaan	155
6.2. Aluminium en zijn legeringen	156
6.2.1. Zuiver aluminium, hergebruik en versterking	156
6.2.2. Aluminiumlegeringen	165
6.2.3. Aluminiumkneedlegeringen	172
6.2.4. Aluminiumgietlegeringen	184

6.3.	Koper en zijn legeringen	188
6.3.1.	Zuiver koper	188
6.3.2.	Binaire koperlegeringen	193
6.3.3.	Messing	195
6.3.4.	Brons	197
6.3.5.	De kleur van koper, messing, brons en nieuwzilver	199
6.4.	Magnesium en zijn legeringen	200
6.4.1.	Zuiver magnesium	200
6.4.2.	Magnesiumlegeringen	203
7.	KUNSTSTOFFEN	209
7.1.	Belangrijke thermoplasten	209
7.2.	Belangrijke thermoharders	213
7.3.	Belangrijke elastomeren	214
7.4.	Eigenschappen van kunststoffen	215
7.4.1.	Algemeen gedragspatroon	215
7.4.2.	Mechanische eigenschappen	222
7.4.3.	Oppervlakte-eigenschappen	234
7.4.4.	Thermische eigenschappen	237
7.4.5.	Elektrische eigenschappen	242
7.4.6.	Optische eigenschappen	245
7.4.7.	Milieu-invloeden	246
7.4.8.	Diffusie en permeabiliteit	248
8.	KERAMIEK	250
8.1.	Inleiding	250
8.2.	Glas en glaskeramiek	251
8.3.	Porselein en aardewerk	257
8.4.	Baksteen	261
8.5.	Cement en beton	263
8.6.	Technische keramiek	272
8.6.1.	Mechanische eigenschappen	273
8.6.2.	Thermische en elektrische eigenschappen	274
8.6.3.	Optische eigenschappen	275
9.	STRUCTUUR EN VERWERKING VAN MATERIALEN	278
9.1.	Inleiding	278
9.2.	Verwerking via de gasfase	291
9.3.	Structuur en de verwerking via de vloeibare toestand	294
9.3.1.	Metaallegeringen	294
9.3.2.	De structuur van gietijzer, gegoten aluminiumlegeringen, gegoten koperlegeringen en gegoten magnesiumlegeringen	299

9.3.3. Kunststoffen	308
9.4. Structuur en de verwerking via de vaste toestand	314
9.4.1. Plastische vervorming van metalen en metaallegeringen	314
9.4.2. Plastische vervorming en verspaning van kunststoffen	332
9.5. Structuur en verbindingen	334
9.5.1. Lassen, solderen en lijmen van metaallegeringen	334
9.5.2. Lassen van kunststoffen	340
9.5.3. Lijmen van kunststoffen	342
10. MATERIAALKEUZE, ONTWERPEN EN PRODUCEREN	344
10.1. Inleiding	344
10.2. Een voorbeeld van de nul-strategie: Delfts Blauw	347
10.3. Een voorbeeld van de beredeneerde strategie: keramische kookplaat	349
10.4. Een voorbeeld van systematische materiaalkeuze: zool van een stoomstrijkijzer	351
10.5. Stadsmeubilair	358
10.5.1. De exploitant	359
10.5.2. De vervoersmaatschappij	361
10.5.3. De ontwerper	362
APPENDIX 1 STANDARDIZATION AND NOMENCLATURE	365
APPENDIX 2 PROPERTIES OF SELECTED ENGINEERING MATERIALS	375
ANTWOORDEN OP STUDIEVRAGEN	381
STUDIEOPDRACHTEN	389
OUDE TOEKOMST	395
REFERENTIES	397
TREFWOORDEN	400
OVER DE AUTEURS	407

1 Inleiding

Stoffen heten materialen, als ze worden toegepast in concrete duurzame voorwerpen. Daarom is de materiaalkeuze een geïntegreerd onderdeel van het gehele ontwerp-proces. Voor alle materialen geldt dat er een nauw verband is tussen samenstelling, productieroute en de uiteindelijk verkregen eigenschappen. Deze twee gezichtspunten komen op verschillende plaatsen in dit boek, zij het niet op altijd dezelfde wijze verwoord, aan de orde. Gelukkig begint dit boek niet in een materiaalkundig vacuüm. Iedereen heeft op zijn minst een alledaagse materialenkennis. Voor de praktijk van het industrieel ontwerpen en het construeren zijn belangrijk:

- | | |
|------------------|--------------------------|
| 1. Metalen | 3. Kunststoffen |
| 2. Biomaterialen | 4. Keramische materialen |

Dit boek beperkt zich tot metalen, kunststoffen en keramiek. Metalen kunnen glimmen en voelen vaak koud aan. Iedereen kent ijzer en staal en goudeerlijke mensen maken vaak onderscheid tussen lood en oud ijzer, kortom tussen non-ferro en ferro metalen. De toepassing van de op ijzer gebaseerde legeringen lijkt dominant. De gezamenlijke jaarproductie van ijzer en staal is qua gewicht circa vijftig keer zo groot als die van het metaal met de op één na grootste productie, te weten aluminium en zijn legeringen. Deze dominante positie heeft ijzer vooral te danken aan de door de gemakkelijke winbaarheid relatief zeer lage prijs en aan de enorme variatie aan eigenschappen die ijzer- en staallegeringen kunnen vertonen.

Biomaterialen zijn alle via levende organismen verkregen materialen, zoals hout, leer, wol en de vezels van plantaardige oorsprong (hennep, vlas, katoen en jute). Natuurrubber, nog veel toegepast in banden voor vrachtauto's en vliegtuigen, heeft een tussenpositie. De oorsprong is biologisch, maar wat betreft opbouw en verwerking lijkt het meer op de synthetische polymeren. Kunststoffen worden veelal verkregen uit aardolie. Zij zijn voor de industrieel ontwerper van groot belang: van afwasteil tot vezels sterker dan staaldraad.

De keramische materialen zijn het oudst: vaten van aardewerk werden 150 eeuwen geleden al gemaakt en glas dateert van 50 eeuwen voor het begin van onze jaartelling. Voor ontwerper en constructeur zijn deze materialen vooral belangrijk, omdat een zeer groot scala van eigenschappen met keramische materialen te realiseren is: zeer goede geleiders en zeer goede isolatoren voor warmte en elektriciteit, vuurvaste materialen, vaak in combinatie met een grote duurzaamheid in uiteenlopende milieus. Veelal worden de keramische materialen gevormd tijdens de

vervaardiging van een product. Het verband tussen samenstelling, in alle betekenissen van dit woord, productieroute en uiteindelijke eigenschappen van het materiaal in het product is dus voor de keramische materialen zeer fundamenteel.

Een industrieel ontwerper zal in de regel gevraagd worden een compleet product te ontwerpen. Veelal zal een dergelijk product bestaan uit een veelheid van onderdelen van een veelheid van materialen, die gezamenlijk moeten voldoen aan de functie-eisen voor het complete product. Materiaalkeuze in relatie tot het totale ontwerp zal dus ingewikkeld zijn. In een geslaagd industrieel ontwerp zijn alle aspecten van het product - construeren/ontwerpen, materiaalkeuze en economisch en maatschappelijk verantwoord vervaardigen - gebalanceerd aanwezig. Daarvoor is nodig om in een vroeg stadium het belang van industrieel ontwerpen bij de vervaardiging van een massaproduct in te zien. De Leerdamse glasfabrieken deden dat al lang geleden: het door Copier ontworpen tulpglas is hier een goed voorbeeld van. Vaak is materiaalkeuze traditioneel bepaald: de wijn is drinkbaar dankzij het glas, en daarom is een wijnglas van glas gemaakt en niet van kunststof of metaal.

Voor een verantwoorde materiaalkeuze, en voor een in alle opzichten verantwoord ontwerp, zijn materiaalkundige kennis en inzicht absoluut vereist. Vanuit praktisch oogpunt zijn daarnaast nodig: globaal inzicht in de kosten, verkrijgbaarheid en verwerkbaarheid van materialen en globaal inzicht in de milieukundige consequenties. Op grond van het voorgaande zijn bijvoorbeeld destijds voor de studierichting Industrieel Ontwerpen van de Technische Universiteit Delft de volgende leerdoelen voor Materiaalkunde geformuleerd (Marinissen (1992)):

- Kennis van materialen, met nadruk op metalen en kunststoffen. De fysische en chemische eigenschappen, voor zover van belang voor de functionele kenmerken, voor de vervaardiging of voor de milieubelasting van in serie of in massa geproduceerde producten.
- Kennis over de vorm waarin materialen verkrijgbaar zijn.
- Vaardigheid in het beoordelen van gegevens uit materiaalhandboeken.
- Inzicht in de betekenis van materialen voor het ontwerpen van in serie of in massa vervaardigde producten
- Kennis en inzicht in de toepassingen van metalen of kunststoffen in relatie tot functie, fabricagemethode en fabricagekosten.
- Kennis en inzicht in het proces van materiaalkeuze.
- Inzicht in de trends van ontwikkelingen in de materiaalkunde.

Het gemeenschappelijke van deze leerdoelen is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen materiaalkeuze, productontwerp en productfabricage. Dit inzicht vormt de grondslag voor een verantwoorde materiaalkeuze en het zal in dit boek voor metalen, kunststoffen en keramiek belicht worden.

Zoals gezegd is in veel producten een veelheid van materialen aanwezig. Tijdens het ontwerpproces zal regelmatig de vraag gesteld worden welk materiaal voor een bepaalde toepassing in een product het geschiktst is. De complexiteit van deze vraag kan aan de hand van het volgende voorbeeld toegelicht worden. Een koffiezetapparaat is ingewikkelder dan het lijkt. Het bestaat uit verschillende onderdelen met elk specifieke functies. Denk bijvoorbeeld aan de warmhoudplaat, het verwarmings-element, de warmtewisselaar, de waterpomp en de behuizing. Voor elk onderdeel moeten de functie- en fabricage-eisen beschouwd worden, waarna een geschikt materiaal gekozen wordt. In elk stadium van het ontwerpproces is de vraag: voldoet het gekozen materiaal aan de gestelde functie- en fabricage-eisen? Tabel 1.1 geeft voor de behuizing enkele eisen.

Tabel 1.1. *Functie- en fabricage-eisen voor de behuizing van een koffiezetapparaat*

<i>functie-eisen</i>	<i>fabricage-eisen</i>
voorraadvat voor koud water	fabricage uit één stuk mogelijk
transport van heet water (ca 80 °C)	geen nabewerking
bescherming van de hete koffiepot	lage stukprijs/massafabricage
vaste, passende kleur	
lage massa	

De ontwerper maakt dus eerst een opsomming van de functie- en fabricage-eisen. Hierbij is de vaststelling van de noodzakelijk te vervullen eisen essentieel, want die eisen discrimineren tussen de geschikte en ongeschikte combinaties van eigenschappen. Elk materiaal vertegenwoordigt immers een combinatie van gezochte en minder gezochte eigenschappen. Een ontwerper stelt geen belang in een bepaald materiaal. Zijn belangstelling gaat naar combinaties van eigenschappen met minstens die eigenschappen die voor het voldoen aan de fabricage- en functie-eisen noodzakelijk zijn (zie Tabel 1.2). Veel kunststoffen kunnen uitstekend verwerkt worden via spuitgieten (zie Hoofdstuk 9), waarbij een ingewikkeld voorwerp vormgegeven kan worden zonder nabewerking. Ook kan aan kunststoffen elke gewenste kleur gegeven worden, zodat een oppervlaktelaag als kleurgever niet nodig is.

Tabel 1.2. *Eisen aan materiaaleigenschappen*

<i>functie-eisen</i>	<i>fabricage-eisen</i>
bestand tegen warm en koud water	spuitgietbaar
krasvast en slagvast	lage materiaalprijs
kleurvast zonder extra oppervlaktelaag	
geen aanhechting van koffie	
bestand tegen gangbare vaatwasmiddelen	

De groep van kunststoffen is echter zeer gevarieerd. Een belangrijke onderverdeling

is die in rubbers, thermoharders en thermoplasten. Omdat een rubberen koffiezetapparaat niet praktisch lijkt, blijven thermoharders en thermoplasten over. Zoals blijkt uit Hoofdstuk 9 zijn alleen de thermoplasten gemakkelijk vorm te geven via spuitgieten, waardoor nabewerkingen tot een minimum beperkt kunnen blijven. De materiaalkeuze komt er nu verder op neer een thermoplast te vinden, die zo goed mogelijk voldoet aan de genoemde eisen aan materiaaleigenschappen. De keuze zal zo veel mogelijk worden gedaan op basis van een kwantitatieve vergelijking tussen de gevraagde materiaaleigenschappen en de beschikbare thermoplasten. Hierbij zijn pragmatische overwegingen als de prijs, dat is de prijs van het materiaal verwerkt tot een kant-en-klare behuizing in de geplande aantallen, en de beschikbaarheid vaak doorslaggevend voor de uiteindelijke keuze.

Vraag 1.1 *Maak een beredeneerde schatting van het aantal per jaar in Nederland verkochte koffiezetapparaten.*

De variatie aan beschikbare materialen in de moderne samenleving is ontstellend groot. Deze grote variatie is de reden dat in dit boek lang niet alle voor de industrieel ontwerper en constructeur beschikbare materialen genoemd worden. Toch is het van belang een overzicht te krijgen van de beschikbare materialen. Omdat materialen stoffen zijn die worden toegepast in duurzame voorwerpen, wordt het krijgen van een dergelijk overzicht vergemakkelijkt door te denken aan producten en na te gaan welke materialen in deze producten voorkomen. Vervolgens kan men onderzoeken in welke classificatie men deze materialen kan brengen. Het schema van deze gedachtegang kan men vinden in Tabel 1.3.

Tabel 1.3. Materiaalclassificatie

<i>product</i>	<i>dagelijkse materiaalbenaming</i>	<i>classificatie</i>
theekopje	porselein	keramiek
laboratoriumbeker	pyrex	glas
sigarendoosje	blik	metaal
vliegtuig	aluminium	metaal
fietsband	rubber	kunststof

Een indeling van metalen, kunststoffen en keramische materialen is gegeven in Tabel 1.4. De grens tussen zware en lichte metalen ligt bij een relatieve dichtheid van 4,5 (relatieve dichtheid is de dichtheid van een stof gedeeld door de dichtheid van water). Voor het krijgen van een overzicht is het handig te beschikken over enkele karakteristieken van de hier genoemde materialen. Deze karakteristieken kan men gebruiken bij het onderscheiden van materialen. Zo kan bijvoorbeeld met een zakmagneet bekeken worden of een metaal magnetisch is. Naast deze karakteristieken zullen ook, waar mogelijk, enige typische toepassingen genoemd worden. De beschrijving van deze karakteristieken zal uiteraard globaal zijn.

Tabel 1.4. Globale indeling van metalen, kunststoffen en keramische materialen.

<i>klasse</i>	<i>categorie</i>	<i>voorbeelden</i>
ferro metalen		koolstofstaal gelegeerd staal gietijzer gietstaal
non-ferro metalen	lichte metalen	aluminium + legeringen magnesium + legeringen titaan + legeringen
	zware metalen	koper + legeringen zink + legeringen nikkel + legeringen wolfrام + legeringen
kunststoffen	thermoplasten	polyvinylchloride polyetheen polypropeen
	thermoharders	bakeliet polyester
	rubbers	natuurrubber siliconenrubber
	schuimen	polyurethaanschuim piepschuim
	composieten	glasvezelversterkte polyesters
keramiek	mineralen	silicium kwarts edelstenen
	klassieke keramiek	natuursteen steen voor de bouw aardewerk porselein, glas, email cement, beton
	technische keramiek	alumina, zirconia titaannitride siliciumcarbide Si-Al-oxiden Si-Al-nitriden diamant

1.1. Metalen

Metalen kunnen gepolijst worden en glimmen dan, maar veel metalen bedekken zich in aanraking met lucht met een oxidelaag waardoor ze dof schijnen. De edele metalen blijven echter glimmen. Metalen zijn meestal onbrandbaar. Metalen zijn

zwaar in vergelijking met kunststoffen en metalen voelen meestal koud aan. Metalen zijn sterk, vaak taai en hebben een hoge smelttemperatuur en geleiden warmte en elektrische stroom goed.

1.1.1. Ferro-Metalen

IJzer en staal

IJzer en staal roesten in aanraking met lucht en water net zo lang door tot er een gat in valt. IJzerroest is roestbruin. IJzer en staal zijn zwaar, magnetisch en sterk. Staal komt voor als buis, als U-, I- en L-profielen, als plaat, heel dik voor schepen, dun voor koelkasten en auto's en heel dun voor sigarendoosjes en drankblikjes. Platen en profielen van staal kunnen vaak gemakkelijk gelast worden. Staal is goedkoop en sterk. Beitel, waterpomptangen, steeksleutels, matrijzen voor de vormgeving van kunststoffen en plaat voor koelkasten zijn van staal. Betonijzer voor gewapend beton is een soort staaldraad. Roestvast staal is roestvast gemaakt door te legeren met chroom (minimaal ongeveer 13 gew% Cr). Het is dan magnetisch. Niet-magnetisch roestvast staal bevat ook nog nikkel (ongeveer 18 gew% Cr en ongeveer 10 gew% Ni).

Gietijzer

Gietijzer roest bijna niet, ook niet in aanraking met lucht en water. De vroegere wandelpier op Scheveningen was en putdeksels zijn van gietijzer. Gietijzer kan in allerlei grillige vormen gegoten worden: de lantaarnpalen op de Markt in Delft, de metro-uitgangen in Parijs, Rembrandt op zijn plein in Amsterdam. Gietijzer verdraagt nauwelijks trekspanningen, maar des te beter drukspanningen. De pilaren van de overkapping van station Den Haag Hollandse Spoor demonstreren dit. Bij overbelasting op trek breken de meeste gietijzersoorten bros, maar er zijn ook gietijzersoorten die veel taaier breken.

Gietstaal

Staal heeft een veel hogere smelttemperatuur dan gietijzer. Gietstaal is dus veel moeilijker te gieten dan gietijzer. Ingewikkelde, hoog belaste onderdelen, meestal voor kapitaalgoederen (schepen of machines voor productie), worden uit gietstaal vervaardigd.

1.1.2. Non-Ferro Metalen

Aluminiumlegeringen

Aluminiumlegeringen zijn licht, roesten niet, maar kunnen slecht tegen soda. Ze zijn niet zo licht als kunststoffen, maar veel lichter dan staal. Aluminiumlegeringen zijn niet magnetisch. Ze hebben onmiskenbaar de kleur van aluminiumverf, maar de

legeringen met veel silicium zijn veel grijzer dan de andere legeringen. De meeste aluminiumlegeringen zijn niet zo sterk als staal. Een product van een aluminiumlegering is veel slapper dan eenzelfde stalen product. Aluminiumlegeringen zijn meestal duurder dan staallegeringen. Technisch zuiver aluminium is nog makkelijker te vervormen dan technisch zuiver ijzer. Aluminiumlegeringen smelten bij veel lagere temperaturen dan staal en gietijzer.

Magnesiumlegeringen

Magnesiumlegeringen zijn nog lichter dan aluminiumlegeringen. Ze oxideren bijna niet, maar ze oxideren wel steeds verder, hoewel in droge lucht onmerkbaar langzaam. Ze zijn lastig plastisch te vervormen bij gewone temperaturen, zodat ze veel in gietstukken verwerkt worden. De bewerking met beitels gaat makkelijk, maar levert uiterst brandbare spanen op!

Titaanlegeringen

Titaanlegeringen zijn lichter dan ijzer en staal, maar niet zo licht als aluminiumlegeringen. Ze roesten niet, blijven glimmen als ze eenmaal gepolijst zijn en hebben een uitstekende weerstand tegen allerlei agressieve milieus. Ze kunnen net zo sterk zijn als vele staalsoorten, maar ze geven aan een constructie niet de hoge stijfheid die een staalsoort aan dezelfde constructie met dezelfde afmetingen zou geven, echter wel een hogere dan een aluminiumlegering. De verhoudingen tussen de waarden van de sterkte-eigenschappen en de dichtheid zijn bij titaanlegeringen zeer gunstig. De vervormbaarheid van plaat van titaanlegeringen is niet al te hoog.

Koperlegeringen

Ongelegeerd koper is excellent voor de geleiding van elektriciteit en warmte. Het kan goed bij gewone temperaturen vervormd worden. Het wordt dan zo sterk als gewoon staal. Gepolijst koper glimt bijna als goud. Koper aan de lucht blootgesteld slaat vaak groen uit. De legeringen van koper en zink heten messing (Engels: brass) en zijn geel. De legeringen van koper en tin heten brons en worden in het gebruik bruinrood. Stuivers zijn geslagen uit brons. De koperlegeringen bezitten een goede weerstand tegen de aantasting door (zee)water. Koperlegeringen zijn niet magnetisch.

Zinklegeringen

Zinklegeringen smelten bij zeer lage temperaturen. Zij zijn gesmolten zeer dun vloeibaar. Daarom zijn ze zo gemakkelijk te gieten: dinky toys en modeltreinlocomotieven. Ze zijn goed bestand tegen regenwater. Omdat kamertemperatuur voor zinklegeringen nogal hoog is, kunnen ze gemakkelijk tot plaat vervormd worden tot zinken dakgoten en regenpijpen. Staal wordt door verzinken vaak voorzien van een zinklaag. De ouderwetse vuilnisemmers en de verzinkt stalen portalen van de bovenleiding van de spoorwegen gaan echt lang mee.

Nikkel- en wolframlegeringen

Nikkellegeringen zijn vrij goed bij gewone temperaturen te vervormen, ze zijn relatief edel: chemisch weinig reactief. Daarom worden nikkellegeringen als muntmetaal gebruikt. Wolframlegeringen hebben een zeer hoog smeltpunt. De gloeidraden in gloeilampen zijn van wolfram.

Goud- en zilverlegeringen

Goudlegeringen hebben een uitstekende weerstand tegen allerlei chemische milieus. Zilver is ook vrij edel, maar wordt helaas zwart aan de lucht. Goud- en zilverlegeringen hebben een lage elektrische weerstand. Elektrische contacten in allerlei elektronische apparatuur zijn van goud- en zilverlegeringen. Ook sieraden worden veelvuldig van goud- en zilverlegeringen gemaakt. Bij kamertemperatuur vertonen de meeste goud- en zilverlegeringen een uitstekende vervormbaarheid, wat bij het maken van sieraden gemakkelijk is. De kleur van goudlegeringen wordt sterk bepaald door de legeringssamenstelling: roder door meer koper, witter door meer nikkel of palladium.

1.2. Kunststoffen

Vele nuttige kunststoffen (ook plastics genoemd), rubbers en vezels zijn synthetische polymeren. De meesten zijn organisch van oorsprong: soms uit steenkool, maar tegenwoordig voornamelijk uit aardolie. Synthetische polymeren zijn tamelijk nieuwe materialen. Na een bescheiden start net voor en tijdens de Tweede Wereldoorlog is het gebruik exponentieel gestegen. Omdat het toen nieuwe, onbekende materialen betrof, werden ze in sommige gevallen verkeerd toegepast. Daarom hadden ze jarenlang niet zo'n beste reputatie. Na verloop van tijd werd echter duidelijk dat het niet eerlijk was de plastics zelf hiervan de schuld te geven. De belangrijke bijdrage van de kunststoffen aan de levensstandaard wordt nu algemeen erkend. Tegenwoordig is de productie op volumebasis die van de metalen voorbij gestreefd. Polymeren zijn licht in gewicht, sommige drijven zelfs op water. In elk geval zijn ze altijd veel lichter dan metalen. Polymeren bestaan uit zeer grote moleculen, veelal lange ketens van koolstofatomen. Polymeren zijn vaak doorzichtig. Ze kunnen gekleurd worden door pigmenten toe te voegen. Met oplosbare pigmenten behouden transparante polymeren hun doorzichtigheid. De meeste pigmenten zijn echter niet oplosbaar in het polymeer, daarom zijn de meeste gekleurde kunststoffen ondoorzichtig. Naast kleurstoffen bevatten polymeren vaak nog andere niet-polymere toevoegingen, bijvoorbeeld weekmakers om ze zachter, flexibeler te maken en versterkende vulstoffen om de mechanische eigenschappen zoals sterkte te verbeteren. Ook zijn vaak stabilisatoren en anti-oxidanten nodig om de materialen te beschermen tegen verouderen, licht en biologische afbraak. In principe zijn