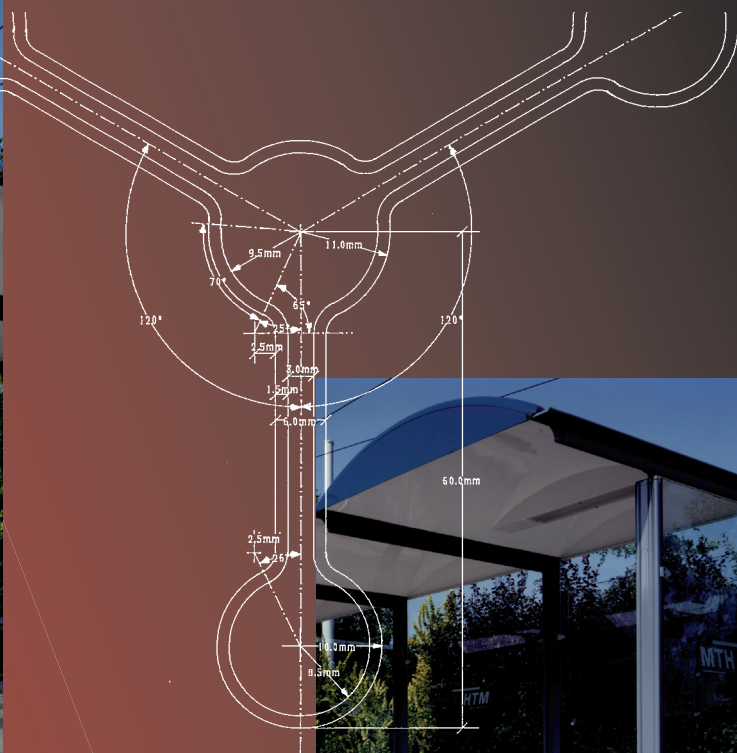


Materiaalkunde voor Ontwerpers en Constructeurs



P. van Mourik
J. van Dam

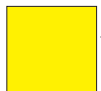
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|----------|----------|
| 7 Li | 9 Be | 11 Na | 12 Mg | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar | | | | | | | | | | |
| 3 H | 4 He | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 55 Rb | 56 Sr | 57-71 ZA | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn | | |
| 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lw | | | |
| 133 Cs | 137,4 Ba | 139-175 ZA | 178,5 Hf | 181 Ta | 184 W | 186 Re | 190 Os | 192 Ir | 195 Pt | 197 Au | 200,6 Hg | 204,4 Tl | 207 Pb | 209 Bi | 210 Po | 210 At | 222 Rn | | |
| 85,5 Rb | 87,6 Sr | 89 Y | 91 Zr | 93 Nb | 96 Mo | 99 Tc | 101 Ru | 103 Rh | 106,4 Pd | 108 Ag | 112,4 Cd | 115 In | 118,7 Sn | 122 Sb | 127,6 Te | 127 I | 131,3 Xe | | |
| 39 K | 40 Ca | 45 Sc | 48 Ti | 51 V | 52 Cr | 55 Mn | 56 Fe | 59 Co | 58,7 Ni | 63,6 Cu | 65,4 Zn | 70 Ga | 72,6 Ge | 75 As | 79 Se | 80 Br | 84 Kr | | |
| 23 Na | 24 Mg | 27 Al | 28 Si | 29 P | 31 S | 31 Cl | 31 Ar | 31 K | 31 Ca | 31 Sc | 31 Ti | 31 V | 31 Cr | 31 Mn | 31 Fe | 31 Co | 31 Ni | 31 Cu | 31 Zn |
| 11 Li | 12 Be | 13 B | 14 C | 15 N | 16 O | 17 F | 18 Ne | 19 Na | 20 Mg | 21 Al | 22 Si | 23 P | 24 S | 25 Cl | 26 Ar | 27 K | 28 Ca | 29 Sc | 30 Ti |
| 223 Fr | 226 Ra | 227 Ac | 232 Th | 231 Pa | 238 U | 237 Np | 244 Pu | 243 Am | 247 Cm | 249 Bk | 251 Cf | 254 Es | 253 Fm | 256 Md | 254 No | 257 Lw | | | |
| IIA | IIIA | IVA | VIA | VIIA | VIIIA | IB | IIB | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIA | VIIIB | VIIIA | VIIIA | | | | |



kgv



krq



hex.d.p.



diamant



overige

***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

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 studievraag 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 (hardcover)

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 be-
toond 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

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. Bepaalde 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 NOMENCLATUUR | 365 |
| APPENDIX MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN | 368 |
| APPENDIX RICHTWAARDEN MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN BIJ KAMERTEMPERATUUR | 378 |
| APPENDIX PRIJSVERHOUDINGEN | 384 |
| APPENDIX SYSTEMISCHE DETERMINATIE VAN KUNSTSTOFFEN | 387 |
| ANTWOORDEN OP STUDIEVRAGEN | 395 |
| STUDIEOPDRACHTEN | 403 |
| OUDE TOEKOMST | 409 |
| REFERENTIES | 411 |
| LEERDOELEN | 414 |
| TREFWOORDEN | 417 |
| OVER DE AUTEURS | 423 |

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 verwarmingselement, 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 wolfram + 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 staal draad. 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 demonstrenen 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

synthetische polymeren niet biologisch afbreekbaar, hun weerstand tegen degradatie in het milieu is groot. Daarom zal hergebruik, recycling, hoewel moeizaam en duur, belangrijk blijven. Polymeren zijn slechte elektriciteits- en warmtegeleiders, wat ze tot ideale materialen maakt voor elektrische en warmte-isolatie. In het algemeen zijn polymeren taai, slechts een minderheid is bros. Polymeren zijn niet erg warmtebestendig en veel plastics verliezen hun vorm bij temperatuurverhoging. Bij blootstelling aan water en lucht blijven polymeren bij normale temperatuur vrijwel onveranderd. Echter, plastics kunnen branden en geven dan roet en een scala van schadelijke gassen af. Polymeren worden verdeeld in drie grote groepen: *thermoplasten*, *thermoharders* en *elastomeren of rubbers*.

Thermoplasten

Thermoplasten bestaan uit lange ketenmoleculen, opgebouwd uit kleine repeterende eenheden, monomeren genaamd. Polyolefinen, met polyetheen (monomeer: etheen) en polypropreen (monomeer: propeen) als belangrijkste vertegenwoordigers, zijn koolwaterstoffen met grote ketenlengte. De polyolefinen zijn gedeeltelijk kristallijn en daardoor ondoorzichtig, en ze zijn zo licht dat ze op water drijven. Polypropreen wordt veel toegepast in gebruiksgoederen, polyetheen voornamelijk in verpakkingen: flessen, zakken en folies. Vinylpolymeren hebben koolstofketens waaraan, naast waterstof, andere zijgroepen zijn bevestigd. Welbekende voorbeelden zijn polystyreen (PS), polyvinylchloride (PVC) en polymethylmethacrylaat (PMMA, perspex, een van de zeer transparante plastics). PS wordt gebruikt in consumentenproducten, PVC in grote hoeveelheden in buizen en pijpen en, met weekmaker, in vloer- en meubelbekleding. De zogenaamde condensatiepolymeren bevatten, naast koolstof, andere atomen zoals zuurstof en stikstof in de hoofdketen. Tot deze klasse behoren de nylons (vezels!), polycarbonaat (taai en doorzichtig) en polyetheentereftalaat (PET, voor flessen en textielvezels). Vloeibaar-kristallijne polymeren (LCP's: 'liquid crystalline polymers') zijn opgebouwd uit staafvormige, stijve moleculen. Deze moleculen kunnen in vloeibare toestand gemakkelijk uitgericht worden en behouden dan hun oriëntatie in de vaste toestand. Dit leidt tot zeer stijve en sterke materialen, die zeer hittebestendig zijn. Een goed voorbeeld vormen de aramiden, die gebruikt worden voor sterke vezels met een hoge modulus. Rond 1955 werd ontdekt dat een betrekkelijk eenvoudige manier om nieuwe polymeren te maken bestaat in het combineren van twee of meer verschillende polymeren in een zogenaamde polymeerblend. Zo kunnen de eigenschappen van de afzonderlijke polymeren gecombineerd worden. Het eerste voorbeeld van een blend, en nog steeds belangrijk in de praktijk, was slagvast polystyreen (HIPS: 'high impact polystyrene'), waarin polystyreen, een bros polymeer, gemengd wordt met een kleine hoeveelheid rubber. Een andere methode om polymeren te combineren is copolymerisatie, waarbij twee of meer verschillende monomeertypes (zie § 3.5) in één keten voorkomen. Een voorbeeld van een veel gebruikt copolymeer is ABS (acrylonitril -

butadien - styreen), een taai materiaal voor consumentenproducten. Thermoplasten worden zacht en/of smelten bij temperatuurverhoging al bij betrekkelijk lage temperaturen en ze worden weer vast als ze vervolgens worden afgekoeld. Dit houdt in dat ze gemakkelijk en met lage energiekosten vormgegeven kunnen worden. Het proces van verweken en weer vast worden kan ook vele malen herhaald worden, wat gunstig is voor de herverwerking.

Thermoharders

In thermoharders worden de lange ketenmoleculen gecombineerd tot netwerken die zeer nauwmazig zijn. Deze netwerken vormen zich tijdens de vormgeving van een product door een chemische reactie tussen de uitgangskomponenten, het prepolymeer en de harder. In de regel zijn thermoharders veel brosser dan thermoplasten. Daarom bevatten de meeste thermoharders grote hoeveelheden (tot 60%) vulmiddelen en/of versterkende vulstoffen zoals minerale of organische deeltjes, anorganische en organische vezels. Thermoharders zijn in het algemeen sterker en harder dan thermoplasten. Een eenmaal gevormd, uitgehard product verwekt niet meer bij temperatuurverhoging, vandaar de naam thermoharder. Thermoharders vinden daar toepassing waar weerstand tegen hitte en vervorming belangrijk is. Thermoharders kennen een relatief lange geschiedenis: al in 1907 vond Leo Baekeland het naar hem genoemde Bakeliet[®] (fenol-formaldehyde, PF) uit, dat een revolutie betekende in elektrisch installatiemateriaal. Later werden andere harsen op basis van formaldehyde ontwikkeld: ureum-formaldehyde (UF) rond 1930 en melamine-formaldehyde (MF) in 1940. Deze materialen hebben als voordeel een lichte, heldere kleur, in tegenstelling tot PF. Ze worden nog steeds in ruime mate toegepast, bijvoorbeeld MF in decoratief plaatmateriaal (Formica[®]). Tot de modernere thermoharders behoren de alkydharsen, de polyesters, de epoxyharsen, de polyurethanen en de siliconen. Alkydharsen vormen een essentieel onderdeel van moderne lakken en deklagen. Polyesters treffen we o.a. aan in glasvezel-versterkte jachten en behuizingen voor elektrische schakelaars. Een bekende toepassing van epoxy's is die in hoogwaardige lijmen. Polyurethanen zijn het bekendst als schuimen, harde schuimen in de bouw en voor isolatiedoeleinden, elastische schuimen voor matrassen, kussens e.d. Siliconen worden onder andere gebruikt voor afdichtingen.

Rubbers

Bij rubbers is, net als bij de thermoharders, sprake van een netwerk in het eindproduct. Dit netwerk is evenwel veel *ijler* dan bij de thermoharders. Rubbers bestaan uit lange ketenmoleculen, zoals de thermoplasten, maar om te voorkomen dat ze onder mechanische belasting gaan vloeien, zijn de rubberketens lokaal chemisch met elkaar verbonden, verknoopt. Deze verknoping heet vulcaniseren en werd oorspronkelijk tot stand gebracht door zwavelatomen. Dit vulcanisatieproces

werd bij toeval ontdekt door Charles Goodyear in de eerste helft van de 19e eeuw bij een poging om het kleven van natuurrubber tegen te gaan door deze te bestuiven met zwavelpoeder en te verhitten. Tegenwoordig worden ook andere vulcanisatiemiddelen gebruikt en andere, synthetische rubbers hebben een groot deel van de markt overgenomen. De belangrijkste synthetische rubbers zijn copolymeren van butadien en kleine hoeveelheden styreen of acrylonitril: SBR en NBR. Auto- en fietsbanden, gasslangen, afdichtingen, pakkingen en transportbanden vormen belangrijke toepassingen van deze rubbers. Siliconenrubbers zijn hoogwaardige, prijzige rubbers die uitstekend bestand zijn tegen zowel hoge als lage temperaturen. Ze zijn chemisch inert in bijna alle milieus, wat ze zeer geschikt maakt voor isolatie, afdichtingen en medische toepassingen (kunstaders, implantaten). Onder de rubbers vinden we tegenwoordig ook flexibele thermoplastische materialen die niet chemisch verknoopt zijn, maar gebruik maken van fysische mechanismen tot verknoping zoals kristallisatie en lokale fasenscheiding. Deze thermoplastische elastomeren (TPE's) hebben het voordeel dat de fysische verknoppingen bij temperatuurverhoging verdwijnen door bijvoorbeeld te smelten. Daardoor kunnen ze verwerkt worden met de normale verwerkingsmethodes voor thermoplasten en zijn ze ook gemakkelijk herverwerkbaar.

1.3. Keramiek

De aardkorst is de leverancier voor de grondstoffen voor keramiek. De aardkorst bevat twee soorten elementen: metalen en niet-metalen. Elementen bestaan uit atomen. Het Periodiek Systeem (zie binnenkant van de omslag van dit boek) rangschikt de verschillende soorten atomen. Daarin loopt een min of meer diagonale grens tussen de niet-metalen (rechts van deze lijn) en de metalen. Keramiek is steeds vast en vaak kristallijn, dat wil zeggen dat de atomen op een bepaalde manier ten opzichte van elkaar zijn gerangschikt. De vele glassoorten zijn voorbeelden van stoffen die vast zijn, maar niet kristallijn. Keramiek bevat als belangrijk element steeds een niet-metaal. Vaak gaat het bij keramiek om scheikundige verbindingen van metalen en niet-metalen: metaaloxiden, metaalsulfiden of metaalboriden. Ook verbindingen tussen niet-metalen, zoals siliciumnitride en koolstofnitride worden onder de keramiek gerekend, evenals diamant en silicium. Keramiek geldt als vrij bros, maar kan in de praktijk toch taaier zijn dan verwacht. De spreiding van de sterkte-eigenschappen is verrassend groot. De eigenschappen van keramiek zijn zeer nauw verbonden met de gevolgde productieroute. Keramiek is in het algemeen hard en sterk, slijtvast en corrosievast in zeer uiteenlopende milieus. Gewone fysische eigenschappen (zoals geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit), maar ook kleur, lichtreflectie en tastbaarheid kunnen zeer variëren en bieden zo vaak verrassende mogelijkheden. Voor toepassingen is belangrijk het onderscheid tussen

structurele en functionele keramiek.

1.3.1. Structurele keramiek

Kenmerkend voor structurele keramiek is het gebruik onder mechanische belasting. Relevant zijn dan sterkte en weerstand tegen slijtage in relatie tot de omgeving waarin het gereede product moet functioneren. De fabricage van het product is tegelijkertijd vaak de route waarlangs de keramiek gevormd wordt. Bekende voorbeelden zijn dakpannen, sanitair en moderne fornuiskookplaten. Om onvolkomenheden tijdens de productie die zouden kunnen leiden tot een verminderde belastbaarheid voor mechanische belasting op te vangen, worden deze voorwerpen vaak met grotere wanddikten gemaakt dan op grond van de zuivere sterkteberekening vereist zou zijn. Daarom is een toiletpot zo zwaar!

Aluminosilicaten

Klassieke keramiek (zie Tabel 1.4) heet ook wel triaxiale keramiek. Drie ingrediënten, siliciumoxide + klei + veldspaat, worden met water gemengd tot een kneedbare pasta. Fijngemalen siliciumoxide, ofwel silica, heet ook wel flint, kwarts of zand. Klei en veldspaat zijn beide gemengde oxiden: aluminiumoxide en silica met daarnaast de oxiden van metalen uit de eerste kolommen van het Periodiek Systeem: natrium, kalium, magnesium en calcium. Kwarts is een vulstof, klei en water maken het mengsel te boetseren en veldspaat zorgt voor verdichting. De eigenschappen van deze klassieke keramiek in producten als theekopjes, straatklinkers, tegels en dakpannen worden vooral bepaald door de samenstellingsverhouding van de drie hoofdingrediënten en de baktemperatuur. De klassieke keramiek is zo oud als de weg naar Rome.

Cement

van kamertemperatuur. Vormgeving van cement vraagt daardoor weinig energie per eenheid van volume. Er zijn drie soorten cement:

- i.* hydraulisch cement,
- ii.* condensatiecement,
- iii.* zuur-base-cement.

Hydraulisch cement verstart door hydratatie, dat is *opname van water*. Condensatiecement verstart door het *verlies van water* als gevolg van de polymerisatiereactie van een gel van silica. Een zuur-base-cement is een mengsel van een basevormend oxide, zoals magnesiumoxide of calciumoxide met een zuurvormend oxide, zoals boriumoxide, of een zuur, zoals fosforzuur. Calciumfosfaat is een cement dat veel toegepast wordt voor botprothesen en gebitsimplantaten.

Zirconia

Klassieke keramiek is meestal te bros voor veel constructieve toepassingen. Taaiheid is vaak verbonden met de mogelijkheid vervormingsenergie op te nemen door het materiaal. Sommige soorten zirconia kunnen vervormingsenergie opnemen door de rangschikking van de atomen in hun kristallen te veranderen. Een vleesmes moet uiteraard scherp zijn, maar ook enigszins taai, als het plotseling bij het snijden van de kip een bot ontmoet.

Titaannitride

Titaannitride heeft een zeer grote hardheid en slijtvastheid en daarom vindt het toepassing als snijkanten voor de metaalbewerking. Titaannitride is goudkleurig; een gewoon stalen horloge lijkt van goud met een titaannitride-oppervlaktelaag die bovendien zeer krasbestendig en corrosievast is, zodat een goedkoop horloge een zeer duurzaam 'gouden' uiterlijk heeft. Een dergelijke keramische deklaag laat zien, hoe ontwerpers en constructeurs de *voordelige* eigenschappen van staal (vervormingsmogelijkheden) en titaannitride (kleur en duurzaamheid) combineren zonder de *nadelige* eigenschappen (roesten, respectievelijk brosheid) te accepteren.

1.3.2. Functionele keramiek

Benutting van specifieke fysische eigenschappen is kenmerkend voor onderdelen vervaardigd uit functionele keramiek. Voorbeelden van deze eigenschappen zijn geleiding van warmte of elektriciteit, magnetisatie, optische kenmerken (zoals kleur, reflectie en luminescentie), vuurvastheid en katalytische werking. De ouderwetse isolatiesteentjes in de groen uitgeslagen messing lampfittings en de hoogspanningsisolatoren in bougies en röntgenbuizen zijn voorbeelden van functionele keramiek.

Glaskeramiek

Glaskeramiek combineert de vormgeving van glas met de verkrijging van keramiek. Glas is een niet-kristallijne (zie voor het begrip kristallijn Hoofdstuk 3) vaste stof en bij glaskeramiek gaat na de vormgeving de niet-kristallijne vaste stof door een speciale warmtebehandeling gedeeltelijk over in kristallijne vaste stof: het resultaat heet glaskeramiek. Glaskeramiek heeft vaak een zeer kleine uitzettingscoëfficiënt. Dit is zeer gunstig voor de toepassing van glaskeramiek als kookplaat.

Alumina

Alumina is aluminiumoxide. Dit smelt pas bij tweeduizend graden Celsius. Saffieren en robijnen zijn vormen van alumina, waarvan de kleur wordt bepaald door secundaire stoffen. Natriumlampen boven autowegen bezitten een binnenlaag van alumina die transparant is voor het licht ervan en tegelijk bestand is tegen de steeds aanwezige natriumdampen in de lamp. Alumina komt ook voor in hoogspanningsisolatoren en in vuurvaste onderdelen in de chemische industrie.

Diamant

Diamant is de hardste van alle stoffen. Alle andere stoffen kunnen dus met diamanten snijgereedschap bewerkt worden. Elektrisch een isolator, is het voor warmte een geleider. Bij kamertemperatuur is het zeer inert, maar omdat diamant een verschijningsvorm van koolstof is, kan het verbranden bij hoge temperatuur. Deklagen van diamant kunnen onder speciale condities van vrij lage druk en temperatuur uit alcohol dampen verkregen worden. Zij kunnen zowel kristallijn zijn als glasvormig. Dit soort deklagen vergemakkelijkt de biologische acceptatie van prothesen.

Glasvezels en germaniumdioxide

Telecommunicatie berust op de verzending van informatie via elektromagnetische wisselspanningen. De capaciteit van verzending is afhankelijk van de frequentie van de toegepaste elektromagnetische wisselspanningen. Licht heeft een veel grotere frequentie dan de elektrische stromen in koperen telefoonkabels. Glas is doorzichtig en daarom zijn glasvezels zo belangrijk voor de telecommunicatie. Het licht mag de glasvezels niet verlaten. Een radieel verlopend gehalte aan germaniumdioxide zorgt voor een radieel verlopende brekingsindex die het licht binnen de vezel houdt, ook als de vezels een kabel vormen van kilometers lengte.

Vraag 1.2 *Benoem de functionele keramiek in de voorgaande alinea.*