

A close-up photograph of an industrial robot arm performing a welding task. The robot's gripper is holding a welding torch, which is in contact with a metal workpiece. A large, dense spray of bright orange and yellow sparks is being emitted from the point of contact, creating a dramatic, high-contrast scene against the dark background of the factory floor. The robot arm is primarily white and blue.

Erik Tempelman
Abboy Verkuilen
Koos Eissen

Boom

BASISBOEK PRODUCTIETECHNIEK



Basisboek productietechniek

Basisboek productietechniek

Erik Tempelman
Abboy Verkuilen
Koos Eissen

Boom

+ Online leeromgeving

Met onderstaande unieke activeringscode krijg je via www.boomstudent.nl toegang tot de online leeromgeving. Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de 1^{ste} druk. Na activering van de code is de online leeromgeving twee jaar toegankelijk. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende druk geactiveerd worden. De code is eenmalig te gebruiken.

Opmaak binnenwerk: Textcetera, Den Haag
Basisontwerp omslag: Dog & Pony, Amsterdam
Omslagontwerp: Emma Raben, Amsterdam
Beeld omslag: wi6995/Shutterstock

© Erik Tempelman, Abbot Verkuilen, Koos Eissen & Boom uitgevers Amsterdam, 2023

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden veeleevoudigd, 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.

Voor het overnemen van (een) gedeelte(n) uit deze uitgave in bijvoorbeeld een (digitale) leeromgeving of een reader in het onderwijs (op grond van artikel 16, Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting Uitgeversorganisatie voor Onderwijslicenties, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-uvo.nl.

No part of this book may be reproduced in any form, by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

ISBN 9789024456659
ISBN e-book: 9789024456666
NUR 123

www.boomstudent.nl
www.boomhogeronderwijs.nl

Inhoud

Welkom...	11
Dankwoord	15
1 DFMA in de 21ste eeuw	17
1.1 Inleiding: waarom printen we niet alles gewoon?	17
1.2 DFMA: de kunst en kunde van het afwegen	18
1.3 Een hiërarchie van productieprocessen	22
1.4 3D-printen of niet? De kosten vergeleken	23
1.5 Vooruitblik	25
Appendix: matrijzen, lossingshoeken en deelvlakken	26
2 Materialen en halffabricaten	29
2.1 Inleiding: eindeloze variatie?	29
2.2 Technische materiaaleigenschappen	33
2.3 Productie-eigenschappen van materialen	39
2.4 Halffabricaten	46
2.5 Meer weten?	49
3 Gieten van metalen	51
3.1 Inleiding: de macht van metaalgieten	51
3.2 Matrijzen	53
3.3 Gietlegeringen	55
3.4 Het vullen: stijgend of vallend, traag of snel	56
3.5 Stollen: de Chvorinov-vergelijking	58
3.6 Defecten – en hoe ze te voorkomen	59
3.7 Meer weten?	61
Epiloog: gietsimulaties	62
4 Plaat(ver)vormen	65
4.1 Ons startpunt: de Lancia Lambda	65
4.2 De minimale buigradius (MBR)	67
4.3 Terugvering	68
4.4 De grens vervormingskromme (GVK)	70
4.5 De GVK in de praktijk	72
4.6 Matrijzpersen	75
4.7 Scheiden	77
4.8 Meer weten?	78
Epiloog: sterkte versus vervormbaarheid	78

5	Extrusie van metalen	81
5.1	Inleiding: <i>less is more</i>	81
5.2	Extrusie van metalen: de basis	83
5.3	Materiaalkundige observaties	86
5.4	Solids en hollows	88
5.5	Praktische overwegingen	89
5.6	Meer weten?	93
6	Smeden	95
6.1	Inleiding	95
6.2	De basis: de stuikproef	96
6.3	Koud, warm of heet?	97
6.4	Intermezzo: het harden en ontlaten van staal	100
6.5	Smeedmethodes	102
6.6	Meer weten?	104
7	Verspanen	107
7.1	Verspanen: wat kun je ermee?	107
7.2	Beitels, krachten en vermogens	108
7.3	Belastingsvormen bij het verspanen	111
7.4	Op naar extreem hoge toleranties	113
7.5	Methoden	115
7.6	Meer weten?	119
8	Spuitgieten	121
8.1	Spuitgieten: eindeloze mogelijkheden	121
8.2	Extruderen	123
8.3	Aanspuiten en vullen	124
8.4	Koelen	126
8.5	Uitstoten en afwerken	128
8.6	Matrijzen	129
8.7	DFMA van spuitgietproducten	130
8.8	Meer weten?	132
	Appendix: het probleem van de plasticrecycling	134
9	Thermovormen	137
9.1	Inleiding	137
9.2	Stijfheid versus temperatuur bij plastics	138
9.3	Het basisproces	140
9.4	Procesvarianten	141
9.5	Verwarmen en koelen	144
9.6	Meer weten?	145
	Appendix: vier high tech-toepassingen van het thermovormen	146

10	Harsinfusie	151
10.1	Harsinfusie: wat kun je ermee?	151
10.2	Basisprincipe	153
10.3	Mallen en methoden	153
10.4	Materialen: de mengselwet	155
10.5	Infusie: de Wet van Darcy	158
10.6	Meer weten?	161
11	3D-printen	163
11.1	Inleiding	163
11.2	Principe van 3D-printen	163
11.3	Voornaamste technieken	165
11.4	Toepassingen	169
11.5	Meer weten?	173
	Epiloog	173
12	Verbinden en assembleren	175
12.1	Inleiding	175
12.2	Onverwachte meerwaarde	176
12.3	Lassen en (hard)solderen	177
12.4	Lijmen en kitten	180
12.5	Mechanisch verbinden	181
12.6	Vormsluitingen	184
12.7	Assemblage	186
12.8	Meer weten?	188
13	Overige technieken	191
13.1	Inleiding	191
13.2	Vormgevende technieken	191
13.3	Oppervlakte-warmtebehandelingen	197
13.4	Coatings	199
13.5	Meer weten?	202
14	Industrie 4.0	205
14.1	Inleiding	205
14.2	Van de steentijd naar industrie 3.0	205
14.3	Lean manufacturing	208
14.4	Six Sigma	209
14.5	Industrie 4.0: kenmerken en elementen	210
14.6	De verbindende schakel is...	213
14.7	Meer weten?	214

15	Remanufacturing	217
15.1	Inleiding	217
15.2	Hernieuwde aandacht	219
15.3	Product, proces en verdienmodel	220
15.4	Barrières voor remanufacturing	223
15.5	Enkele oplossingsrichtingen	225
15.6	Meer weten?	227
16	DFMA:theorie en praktijk	229
16.1	Inleiding	229
16.2	DFMA: wat, hoe en waarom	229
16.3	DFMA: de bedrijfscontext	231
16.4	Maakbaarheid: de 5P	234
16.5	Bijzondere tips voor DFMA	235
16.6	DFMA – en daarna	237
16.7	Tot besluit	239
	Epiloog	239
	Slotwoord	240
	Register	243
	Illustratieverantwoording	250



Welkom...

... in het *Basisboek Productietechniek*. Wie zich afvraagt hoe producten en machines vandaag de dag worden vervaardigd, is bij dit boek aan het juiste adres. Ook voor tips over het ontwerpen voor productie en assemblage, beter bekend als DFMA, van *design for manufacture and assembly*, kun je hier terecht. Het is bedoeld voor alle studenten, docenten en professionals in de werktuigbouwkunde en in het industrieel ontwerpen, niveau HBO en hoger. Echter, ook bedrijfskundigen, architecten en materiaalkundigen zullen in deze pagina's veel nuttige informatie en inzichten kunnen vinden.

Het belang van DFMA behoeft weinig betoog. Werkelijk ieder product dat we kennen is zodanig ontworpen dat het op passende wijze kan worden geproduceerd. DFMA is dan ook geen bijzaak, maar hoofdzaak. De Ahrend 360 bureaustoel die je hier links ziet is slechts een enkel voorbeeld.¹ Nu productie in Europa weer in opmars is, heeft het thema extra urgentie. Diverse moderne technieken, veelal onder de noemer 'Industrie 4.0', bieden ons hierbij nieuwe kansen; de noodzaak om een circulaire economie te creëren vormt een nieuwe, belangrijke voorwaarde.

Elke productietechniek heeft zo zijn voorkeuren qua materialen die het kan verwerken en qua vormen die het kan realiseren. De materiaalkunde maakt sommige keuzes simpel, andere moeilijk, en weer andere haast onmogelijk. Los daarvan heeft ook de praktijk haar mogelijkheden en beperkingen, zowel in de *state of the art* van de bedrijfstak als geheel, als op het niveau van elke individuele producent. Iedereen die iets wil ontwerpen, of het nu een massaproduct voor consumenten is of een unieke machine voor de industrie, dient dan ook thuis te zijn in de theorie én de praktijk.

Indeling van dit boek

De productietechniek omvat alle processen waarmee onderdelen worden geproduceerd en samengesteld tot complete producten. Traditioneel worden deze technieken onderverdeeld in zes hoofdgroepen: oervormen, vervormen, scheiden, samenvoegen, coaten en veranderen.² Voorbeelden hiervan zijn metaalgieten, plaat(ver)vormen, verspanen, lassen, anodiseren en warmtebehandelen. Helaas is deze verdeling niet altijd even duidelijk. Zo vallen spuitgieten van plastics en zandgieten van metalen beide onder het oervormen, maar worden in de praktijk door gescheiden takken van de industrie uitgevoerd. Los

1 Ontwerp: FLEX/design, Delft.

2 Dit is de onderverdeling volgens de Deutsche Industrie Norm (DIN) nr. 8580.

daarvan zijn er materiaalkundig gezien haast meer verschillen dan overeenkomsten te vinden. En een proces als *thixomoulding* zit juist weer op het grensvlak tussen oervormen en omvormen.

Een recentere onderverdeling kent vier hoofdgroepen: primair vormgeven, secundair vormgeven, verbinden en afwerken.³ Maar helaas, ook dit schema is niet geheel bevredigend: zo valt verspanen zowel onder de eerste als de tweede groep, en is 3D-printen evenzeer thuis bij de eerste als de derde. En opnieuw is deze onderverdeling noch voor de maakindustrie, noch voor de materiaal-kunde echt zinvol.

Dit boek volgt daarom een pragmatische indeling waarbij elk hoofdstuk een groep nauw verwante technieken belicht.⁴ Je kunt de hoofdstukken dan ook in willekeurige volgorde lezen. De enige uitzondering hierop is het tweede hoofdstuk: dit is gewijd aan materialen en halffabricaten, en legt daarmee de basis die vooral studenten nodig hebben om het boek in zijn geheel te kunnen begrijpen en toepassen.

Vorm en inhoud

Wie zich erin verdiept, ontdekt dat de productietechniek een fascinerende en verrassende eigen wereld vormt, waarin altijd meer te ontdekken is. De schrijfstijl die voor dit boek is gekozen, is hierop geïnspireerd: meer verhalend dan wellicht gebruikelijk voor een lesboek, en met hier en daar een zijpaadje – doorgaans met een voetnoot. Waar zinvol wordt verwezen naar video's die online toegankelijk zijn: processen moet je immers in actie zien! Een set zorgvuldig gekozen illustraties ondersteunt de tekst en biedt de lezer extra inspiratie.

'Perfectie wordt niet bereikt wanneer er niets meer kan worden toegevoegd, maar wanneer er niets meer kan worden weggelaten.'

(vrij naar Antoine de Saint-Exupéry)

Wat de inhoud aangaat, is bovenstaand citaat een richtlijn geweest. Anders gezegd, een encyclopedie is dit boek beslist niet. Gebruik het daarom niet als naslagwerk, maar als een eerste gids in die fascinerende en verrassende wereld, en bij het construeren en ontwerpen daarvoor. Zowel over de theorie als de praktijk is gezegd wat als basis nodig is. Wie meer wil weten vindt in de slotsectie van elk hoofdstuk concrete aanwijzingen.

3 Deze onderverdeling is gepopulariseerd door Michael Ashby uit Cambridge, UK.

4 De volgorde is gebaseerd op *Manufacturing and Design*, E. Tempelman et al. (Elsevier, 2014).

Online supplement

Voor gebruik op hogeschool of universiteit is uiteraard meer nodig dan een boek alleen: opgaven en uitwerkingen, toetsen voor zelfstudie, een beeldbank, extra leesmateriaal, videosuggesties en meer, dat alles vind je via www.boomstudent.nl. Onmisbaar voor student en docent!



Erik Tempelman – Abboy Verkuilen, Delft/Den Bosch, april 2023

Dankwoord

De productietechniek van nu is gebouwd op vele decennia, soms zelfs eeuwen, van voorgaande ontwikkeling. Op vergelijkbare wijze is dit boek veel dank verschuldigd aan tal van ontwerpers, constructeurs en productie-experts uit het netwerk van de auteurs. Het is ondoenlijk om iedereen hier recht te doen, maar de volgende personen willen we tenminste noemen:

Per hoofdstuk: Jeroen Kuipers (H1), Roy Kastelein en Pieter van der Wolk (H2), Enzo Lette en Laurens Katgerman (H3), Rudy Daams (H4), Yon van den Oever (H5), Wilfried de Korte en Teun van de Sande (H7), Maarten Labordus (H10), Bas van Deursen (H11), Richard Oosting (H12), Ricardo Abdoel en David Truyens (H14), Emma Boorsma en Jenny Coenen (H15), en Michel van Schie en Huub Ehlhardt (H16). Verder dank aan onze 'meelezers' uit het hoger onderwijs: Lieske Jorritsma, Walter Koeleman, Pim van Dorp, Rob Plas, Bartel Hulst, Rob van Gorp, Ad Kock en Maarten Meijer – tussen aanhalingstekens, want zij deden zoveel meer dan meelesen alleen!

Voor de illustraties danken we allereerst Koos Eissen, die met zijn schetsen een bijzondere bijdrage leverde – een coauteurschap waardig! Tevens dank aan Atula Jadhav तुम सचमुच अतुलनीय हो en Patrick Busser. Mede dankzij hen is er in dit boek ook visueel veel te beleven. Ten slotte dank aan Robin Zander, hoofdredacteur van vakblad *Constructeur*, die in de periode 2021-2022 meerdere vroege versies van hoofdstukken als columns in zijn blad opnam. Zonder deze enthousiaste ontvangst was dit boek er niet gekomen.

Ondanks al deze goede inbreng, en ondanks de beste bedoelingen van de auteurs, zal dit boek hier en daar nog onvolkomenheden bevatten. De lezer wordt vriendelijk verzocht zich daar niet al te veel van aan te trekken. Echter, wie grove onjuistheden en/of omissies tegenkomt, mag deze zeker melden via klantenservice@boomhogeronderwijs.nl. Elke reactie kan rekenen op blijdschap, dank en passende actie richting een tweede editie.



DFMA in de 21ste eeuw

1

1.1 Inleiding: waarom printen we niet alles gewoon?

In 1987 gebeurde er iets bijzonders. Dat was namelijk het jaar waarin we voor het eerst een 3D-printer konden kopen. Je ziet op de foto de gelukkige uitvinder, Chuck Hull, met wat hij toen een *Stereo Lithography Apparatus* (SLA) noemde.¹ Twee jaar later zou Scott Crump een ander 3D-printproces op de markt brengen onder de naam *Fused Deposition Modelling* (FDM). Het werk van deze pioniers leidde tot twee nog steeds vooraanstaande bedrijven in de 3D-printwereld, 3D Systems en Stratasys.

SLA werkt met thermoharders, FDM met thermoplasten. De printtechniek voor deze kunststoffen bestaat dus al tientallen jaren. Maar ook metalen worden langer geprint dan men denkt: *Selective Laser Sintering* (SLS) werd in de jaren '80 ontwikkeld (Carl Deckard, 1988), en daar kun je behalve plastics ook metalen mee verwerken – al geeft *Selective Laser Melting* (SLM) voor deze materialen doorgaans betere resultaten. SLM stamt alweer uit 1995 en is dus eveneens een volwassen technologie.

Tegenwoordig is er voor zowat elk materiaal wel een printer: niet alleen voor kunststoffen en metalen, maar ook voor glas, keramiek, beton, composieten, elektronica, voedsel en zelfs biologische weefsels. De technologie heeft tal van toepassingen, van *rapid prototyping* tot serieproductie, plus allerlei hybride oplossingen, zoals het printen van *jigs, tools and fixtures* voor het ondersteunen van assemblagewerk. 3D-printen, in 1987 nog revolutionair, is uitgegroeid tot een gevestigd proces voor de maakindustrie.

En toch... wordt het overgrote merendeel van alle producten nog steeds niet geprint. Technieken zoals spuitgieten, omvormen, verspanen en verbinden vormen nog altijd de échte motor van de industriële productie. Jazeker, de 3D-printers worden nog steeds beter, maar het is nu evolutie, geen revolutie. Ook in de 21ste eeuw kan *design for manufacture and assembly* (DFMA)

¹ Mocht deze term, en de volgende, je niets zeggen: geen paniek. Hoofdstuk 11 vertelt je er alles over. Voor nu is het niet nodig de nadere betekenis te kennen.

daarom beslist niet zonder kennis van deze traditionele processen.² Waarom we niet alles printen is simpelweg een kwestie van geld: het proces is doorgaans te duur, en de voordelen zijn alleen in bepaalde markten van toepassing – denk aan de luchtvaart, geneeskunde of reparatiewerk, maar ook aan combinaties van vorm en materiaal waarvoor andere processen zich niet lenen.³

Laten we in het vervolg van dit inleidende hoofdstuk eens nader bezien wat dat DFMA allemaal inhoudt. Daarna komen we op de kosten terug.

1.2 DFMA: de kunst en kunde van het afwegen

Wie een product van enige complexiteit wil ontwerpen, moet allereerst een besluit nemen over de algemene opbouw, ook wel ‘lay-out’ genoemd. Wat zijn de belangrijkste onderdelen en hoe komen ze ruimtelijk gezien bij elkaar? Op hoofdlijnen gaat de keuze dan tussen ‘modulair’ en ‘integraal’.

Je fiets is een voorbeeld van een modulair product: er is een dragend frame dat als ruggengraat fungeert (zie figuur 1.1) en daarop worden alle andere onderdelen in volgorde gemonteerd. Kenmerk van deze lay-out is dat je met een set modules – vandaar de naam – verschillende eindproducten kunt leveren. Ook het frame zelf is modulair: geef de buizen verschillende lengtes en je kunt diverse maten van frames realiseren. Dit is geen luxe, maar noodzaak: iedereen wil immers een goed passende fiets. Dankzij een aparte lakbehandeling kan er ook makkelijk in kleur worden gevarieerd – altijd belangrijk voor consumentenproducten.



Figuur 1.1 Fietsframe met buizen in blauw en luggen in wit

2 Deze traditionele processen worden ook nog voortdurend verbeterd – ironisch genoeg vaak dankzij 3D-printen (zie hoofdstuk 11).

3 Zeer grote vormvrijheid, optie voor *customizing*, lokale productie, korte time-to-market et cetera.

Wellicht het meest geperfectioneerde modulaire product ter wereld komt van Volkswagen. Hun *Modularer Quer Baukasten* (MQB)-platform deelt diverse modules tussen tal van auto's in het concern, met als enige eis dat de motor dwars ('Quer') voorin moet liggen. VW heeft ook nog een MLB-platform beschikbaar voor als de motor langsgelast moet worden, plus een MEB-platform voor de diverse elektrische Volkswagens.



Figuur 1.2 MQB-platform

Doorgaans maakt modulariteit de totale investeringen per product lager dan bij een integrale uitvoering. Dit is vrijwel altijd een belangrijk voordeel. Betere geschiktheid voor reparatie, *upgrading* en hergebruik komen daar nog bij: juist de modulaire lay-out biedt kansen in een circulaire economie. Een nadeel is dat veel onderdelen slechts zelden worden geoptimaliseerd voor een specifieke versie van het eindproduct.



Figuur 1.3 Integraal spuitgegoten e-bike

In een integraal product is theoretisch wél elk onderdeel toegesneden en geoptimaliseerd voor een specifiek product. Wil je de hoogst mogelijke prestaties, kies dan voor deze lay-out. Een firma die zo hun e-bikes maakt, is het Duitse bedrijf ISOCO (zie figuur 1.3). Ze gebruiken hiervoor een vernuftige variant van het kunststof spuitgietproces.⁴ Hoe zij het voor elkaar spelen om verschillende maten te maken is iets om eens over na te denken. En wat integraal

⁴ Op pagina 120 zie je de matrijs die voor deze fiets gebruikt wordt.



In *Basisboek Productietechniek* leer je alles over maakprocessen voor de 21ste eeuw. Het biedt een beknopt maar volledig overzicht van de belangrijkste processen uit de maakindustrie. Het boek geeft antwoord op vragen als: hoe werken maakprocessen, wat zit er materiaalkundig achter en welke uitvoeringen zijn er? Design For Manufacture & Assembly (DFMA), Industrie 4.0 en remanufacturing komen uitgebreid aan bod. Het beschrijft eveneens waar je tijdens het ontwerpen en construeren aan moet denken. Dit maakt *Basisboek Productietechniek* essentieel voor elke (toekomstige) engineer.

Naast het boek is er een online leeromgeving. Studenten vinden hier oefenopgaven, video's over productieprocessen, oefentoetsen en het online boek. Voor docenten zijn de uitwerkingen van de opdrachten, alle illustraties en aanbevelingen voor excursies beschikbaar.

Basisboek Productietechniek is primair bedoeld voor studenten en docenten in het hoger technisch onderwijs. Daarnaast is het geschikt voor alle professionele ontwerpers en constructeurs.

Erik Tempelman is als docent verbonden aan de Technische Universiteit Delft en werkt al ruim 25 jaar op het grensvlak van constructie, materiaal en productie. Hij staat bekend om zijn enthousiasme, inhoudelijke diepgang en brede netwerk in de maakindustrie.

Abby Verkuilen, *The Learning Engineer*, is als docent verbonden aan de Haagse hogeschool en is gespecialiseerd in de didactiek en de psychologie van leerprocessen. Van daaruit heeft hij ruime expertise opgebouwd over digitale leermiddelen.

Koos Eissen is, samen met Roselien Steur, auteur van de reeks boeken *Sketching*. Dit zijn wereldwijde bestsellers in het ontwerp-onderwijs. Hij is ook internationaal werkzaam als gashoogleraar.



www.boomstudent.nl
www.boomhogeronderwijs.nl

