

COMPUTERSYSTEMEN EN EMBEDDED SYSTEMEN



LEO VAN MOERGESTEL

5^E DRUK

Boom



Computersystemen en embedded systemen

Computersystemen en embedded systemen

5e druk

Leo van Moergestel

Boom

**inclusief
website!**

Met onderstaande unieke activeringscode krijg je via www.boomstudent.nl toegang tot de website met extra materiaal.

Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de 5e druk. Na activering van de code is de website twee jaar toegankelijk. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende druk geactiveerd worden. De code is eenmalig te gebruiken.

Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u vinden via www.boomhogeronderwijs.nl

© Van Moergestel, Boom uitgevers Amsterdam, 2022

Ontwerp en zetwerk binnenwerk: Studio Bassa, Culemborg
Omslagontwerp: Emma Raben, Amsterdam

ISBN 9789024450831
ISBN e-book: 9789024450848
NUR 173

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

Voor zover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van (een) gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (art. 16 Auteurswet) kan men zich wenden tot de Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.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.

Voorwoord

Dit boek brengt de lezer een gedegen basiskennis op het gebied van computertechniek en embedded systemen bij. Omdat computers meestal niet op zichzelf staan maar in een netwerk opereren, wordt de nodige aandacht aan datacommunicatie en netwerken geschonken. De inhoud beperkt zich niet tot een bepaalde klasse van computers, maar probeert steeds een zo breed mogelijke blik te bieden. Veel concrete voorbeelden komen uit de wereld van de personal computer, omdat de meeste lezers daar waarschijnlijk zelf ervaring mee hebben. Voor embedded systemen hebben we herkenbare voorbeelden uit het dagelijks leven gekozen.

Dit boek is prima te gebruiken bij een cursus Inleiding computerarchitectuur. Daarnaast biedt het een goede basis voor lezers die zich willen verdiepen in de technologie van embedded systemen. Het kan als leidraad of naslagwerk dienen. *Computersystemen en embedded systemen* is ook geschikt voor zelfstudie. Met de vraagstukken aan het eind van ieder hoofdstuk kan de lezer zijn opgedane kennis testen.

Deze herziene vijfde druk is geactualiseerd, waarbij technologieën en begrippen uit vroegere tijden zijn vervangen door meer eigentijdse ontwikkelingen. Bepaalde delen zijn herschreven, maar de globale opzet is gelijk gebleven. In deze druk is ook feedback op vorige edities verwerkt. Zo is bijvoorbeeld de index verder uitgebreid.

Er bestaan, afhankelijk van wat de lezer wil leren, verschillende leertrajecten in dit boek die bepaalde onderwerpen meer of minder belichten. Het hoeft dus niet per se van voren naar achteren doorgewerkt te worden en sommige onderdelen kunnen worden overgeslagen zonder dat de rest van het boek onbegrijpelijk wordt. Een drietal leerroutes zal ik hier schetsen:

1. *Embedded systems*

Bedoeld voor lezers die kennis van embedded systems en computerarchitectuur willen opdoen: hoofdstuk 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 17, 18 en 19.

2. *De helicopterview*

Voor lezers die een brede blik op de computer- en netwerktechnologie willen hebben: hoofdstuk 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17 en 18.

3. *De netwerktechnologie*

Die gedeelten van het boek die met datacommunicatie en netwerken te maken hebben: hoofdstuk 1, 2, 3, 4, 10, 15, 17 en 18.

Natuurlijk blijft het altijd een mogelijkheid om het hele boek van A tot Z door te nemen of een eigen selectie van de onderwerpen te maken. Het probleem met computerboeken is dat ze meestal verouderd zijn op het moment dat de drukinkt droog is. Dit probleem heb ik op twee manieren proberen te omzeilen.

Ten eerste behandel ik concepten en technieken die al geruime tijd hun waarde bewezen hebben en probeer ik niet te specifiek op numerieke gegevens over de laatste stand van de techniek in te gaan. Het noemen van zaken als snelheden is niet geheel te vermijden en die zijn dus ook bij deze herziene uitgave weer aangepast. Ook verdie-

nen nieuwe ontwikkelingen die nog niet zo lang bestaan hun plaats in dit boek. Voor concrete voorbeelden wijk ik vaak uit naar kleine computers met het idee dat de lezer zelf wel in staat is een schaalvergroting toe te passen. Een 8-bits computer verschilt qua werking niet essentieel van een systeem met een 64-bits databus. Nadeel is dat we dan op wat oudere microprocessors terugvallen, maar de plaatjes worden wel overzichtelijker door deze schaalverkleining. De basisprincipes komen hierbij hopelijk goed uit de verf.

De tweede manier om dit boek actueel te houden is ondersteuning via internet. Relevante artikelen, documentatie, uitwerkingen van opgaven en leertrajecten zal ik via de website bij dit boek beschikbaar stellen, waar nodig met verwijzingen naar hoofdstukken uit dit boek. Vooral de uitwerkingen van en een aanvulling op de opgaven uit dit boek kunnen voor zelfstudie nuttig zijn. Via www.boomstudent.nl kun je met de code uit het colofon van dit boek toegang krijgen tot de bijbehorende website. Docenten vinden op de website o.a. de figuren in pdf-formaat om in hun lessen te gebruiken.

Ik realiseer me dat veel onderwerpen die in dit boek ter sprake komen relatief kort behandeld worden. Voor veel onderwerpen, zoals digitale signaalbewerking, bestaan weer complete leerboeken. Dit boek kan een goede opstap zijn om voor het eerst kennis te maken met een specifiek onderwerp.

Rest mij nog iedereen te bedanken die op de een of andere wijze aan de totstandkoming van dit boek heeft bijgedragen. Met name wil ik Loes Heiligers en Marc Appels van Boom uitgevers bedanken voor de prettige samenwerking bij de totstandkoming van deze vijfde druk.

Zaandam, augustus 2022,
Leo van Moergestel

Inhoud

- 1 Inleiding 1
 - 1.1 Analoog en digitaal 1
 - 1.2 Hardware en software 2
 - 1.3 Computers in onze samenleving 2
- 2 Computersystemen van groot naar klein 5
 - 2.1 Standaardcomputers 5
 - 2.2 Embedded systemen 6
 - 2.3 Computereigenschappen 7
 - 2.4 Digitale gegevens 8
 - 2.5 Realtime 9
 - 2.6 Processors 10
 - 2.7 Netwerken 12
 - 2.8 Alles komt bij elkaar 12
 - 2.9 Software 14
 - 2.10 Samenvatting 16
 - Vragen 16
- 3 Getalrepresentaties en codesystemen 17
 - 3.1 Talstelsels 17
 - 3.2 Binair rekenen 20
 - 3.3 Codesystemen 29
 - 3.4 Fouten in codes 35
 - 3.5 Samenvatting 40
 - Vragen 40
- 4 Digitale techniek 41
 - 4.1 Basisbegrippen 41
 - 4.2 Digitale techniek in detail 52
 - 4.3 Samenvatting 73
 - Vragen 73
- 5 Digitale ontwerptechniek 75
 - 5.1 Mintermen 75
 - 5.2 Karnaugh-diagrammen 76
 - 5.3 Don't care-condities in K-diagrammen 79
 - 5.4 Ontwerpen van flipflop-schakelingen 79
 - 5.5 Samenvatting 86
 - Vragen 86
- 6 AD- en DA-conversie 88
 - 6.1 DA-conversie 88
 - 6.2 AD-conversie 92
 - 6.3 Samenvatting 115
 - Vragen 115
- 7 Computerarchitectuur 116
 - 7.1 Blokschema van een computer 116
 - 7.2 Busarchitectuur 117
 - 7.3 Geheugen 121
 - 7.4 CPU 131
 - 7.5 I/O 144
 - 7.6 Exceptions 149
 - 7.7 Harvard-architectuur 155
 - 7.8 Samenvatting 156
 - Vragen 156
- 8 Systeembussen, I/O en dataopslag 158
 - 8.1 Systeembussen en buseigenschappen 158
 - 8.2 Praktische realisaties van bussen 161
 - 8.3 I/O-poorten 163
 - 8.4 Dataopslag 166
 - 8.5 Samenvatting 181
 - Vragen 181
- 9 Datacompressie 182
 - 9.1 Inleiding 182
 - 9.2 Verliesvrije datacompressie 184
 - 9.3 Lossy compressie 192
 - 9.4 Samenvatting 195
 - Vragen 195
- 10 Datacommunicatie 196
 - 10.1 Simplex, duplex 196
 - 10.2 Protocol, serieel, parallel, snelheid, efficiëntie 197
 - 10.3 Kanaalcapaciteit en bandbreedte 197
 - 10.4 Transportmedium 198
 - 10.5 Baseband versus broadband 200
 - 10.6 TDM, FDM, OFDM en CDMA 200
 - 10.7 Serieel datatransport 204

- 10.8 Lijn codering bij serieel datatransport 207
- 10.9 Parallel datatransport 209
- 10.10 Modulatie en demodulatie 210
- 10.11 Koppeling met een internetserviceprovider 211
- 10.12 Differentiële verbinding 213
- 10.13 V.24, RS-232, RS-423, RS-422, RS-485 214
- 10.14 Samenvatting 216
Vragen 216
- 11 Systeemprestatie 217**
 - 11.1 Cachetechnologie 217
 - 11.2 Processor performance 226
 - 11.3 Multiprocessorsystemen 230
 - 11.4 Samenvatting 235
Vragen 236
- 12 Operating systems 237**
 - 12.1 Taken van het operating system 237
 - 12.2 Kernel, device drivers 237
 - 12.3 Process 238
 - 12.4 System calls 239
 - 12.5 Command interpreter 240
 - 12.6 Typen operating systems 241
 - 12.7 Procesmanagement 241
 - 12.8 Filemanagement 251
 - 12.9 Device drivers 255
 - 12.10 Realtime scheduling 258
 - 12.11 Operating systems voor embedded systemen 263
 - 12.12 Samenvatting 264
Vragen 264
- 13 Virtualisatie 265**
 - 13.1 Inleiding 265
 - 13.2 Vormen van virtualisatie 266
 - 13.3 Technieken en achtergronden 266
 - 13.4 Procesvirtualisatie 270
 - 13.5 Systeemvirtualisatie 271
 - 13.6 Samenvatting 278
Vragen 278
- 14 Digitale besturingen 279**
 - 14.1 Besturingscomputer 279
 - 14.2 Microcontroller 279
 - 14.3 PLC 280
 - 14.4 DCS 298
 - 14.5 Samenvatting 299
Vragen 300
- 15 Computernetwerken 301**
 - 15.1 Ontwikkeling van computernetwerken 301
 - 15.2 Algemene begrippen en principes 302
 - 15.3 Ethernet 307
 - 15.4 Draadloze netwerken 315
 - 15.5 TCP/IP-gebaseerde netwerken 322
 - 15.6 Samenvatting 333
Vragen 333
- 16 Netwerken in productiesystemen 334**
 - 16.1 De automatiseringspiramide 334
 - 16.2 Veldbussen 336
 - 16.3 Software in productiesystemen 345
 - 16.5 Samenvatting 347
Vragen 348
- 17 Security 349**
 - 17.1 Inleiding 349
 - 17.2 Doelstellingen van de cryptografie 349
 - 17.3 Geschiedenis en basisbegrippen 350
 - 17.4 Wiskundige achtergrond 356
 - 17.5 Symmetrische cryptografie 357
 - 17.6 Asymmetrische cryptografie 360
 - 17.7 Praktische realisaties 365
 - 17.8 Steganografie 368
 - 17.9 Samenvatting 368
Vragen 369
- 18 Internet 370**
 - 18.1 Internet en intranet 370
 - 18.2 Core en edge 370
 - 18.3 Internetdiensten 371
 - 18.4 DNS 372
 - 18.5 Routing 374
 - 18.6 E-mail 374
 - 18.7 World wide web 375
 - 18.8 Security 378
 - 18.9 XML 379

18.10	Java en .NET	380
18.11	Cloud computing	386
18.12	Samenvatting	389
	Vragen	389
19	Embedded systemen	390
19.1	Algemene basisprincipes	390
19.2	Toepassing in auto's en autonome voertuigen	404
19.3	Toepassing in huis	406
19.4	Smartphone	412
19.5	Toepassing in algemene voorziening	419
19.6	Internet of Things	427
19.7	Samenvatting	429
	Vragen	429
	Index	430

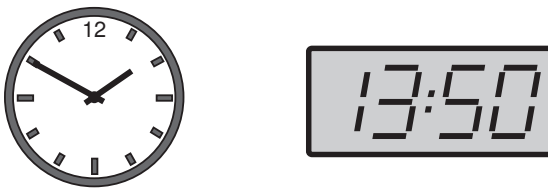
Hoofdstuk 1

Inleiding

In deze inleiding komt een drietal onderwerpen aan bod. Eerst gaan we in op de begrippen analoog en digitaal. Vervolgens komt de twee-eenheid hard- en software aan bod. Als laatste onderwerp gaan we kijken waar en hoe computer-technologie zoal wordt ingezet.

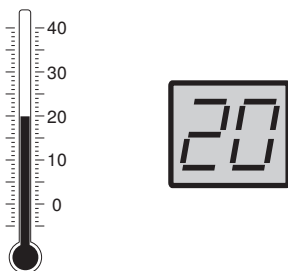
1.1 Analooq en digitaal

Het onderscheid tussen analoog en digitaal is het duidelijkst te zien aan de hand van een paar voorbeelden. Bekijk de analoge en digitale klok van figuur 1.1. De analoge klok heeft een wijzerplaat en de wijzers geven het tijdstip aan. De digitale klok geeft een getal dat een maat is voor de tijd.



Figuur 1.1 *Analoge en digitale klok*

Analoge technieken worden meer en meer verdrongen door digitale technieken. Een analoog meetinstrument heeft meestal een schaal met daaraan gekoppeld een wijzer of iets dergelijks. Een tweede voorbeeld is een thermometer (zie figuur 1.2).



Figuur 1.2 *Analoge en digitale thermometer*

Een analoge thermometer bevat een kolom met een vloeistof waarvan de hoogte analoog is aan de temperatuur. Een schaal geeft aan wat de temperatuur is. De digitale tegenhanger geeft als resultaat enkel een getal.

Digitale systemen werken met getallen. Bij computers blijken deze getallen uit het *tweetallig stelsel* te komen. Dit wordt vaak populair vertaald naar de uitspraak dat een computer maar tot twee kan tellen. Dat is natuurlijk onzin, mensen die het tientallig stelsel gebruiken kunnen wel degelijk verder tellen dan tien, zeker als bijvoorbeeld over salaris onderhandeld wordt.

1.2 Hardware en software

Hardware is tastbaar. De elektronica, de computerkast en allerlei mechanische onderdelen van een computer behoren tot de hardware. *Software* is de programmatuur. Een USB-stick, die zelf vanwege zijn tastbaarheid tot de hardware behoort, kan wel software bevatten. Deze twee kunnen niet zonder elkaar. Een computersysteem zonder software is zinloos. Een programma zonder computer heeft ook weinig nut. De analogie met een boek gaat hier aardig op. Papier en drukinkt waarmee letters en afbeeldingen zijn gedrukt, vormen de hardware. De software is het verhaal of de inhoud van het boek. Net zoals een schrijver auteursrecht op een verhaal heeft, heeft de softwareontwikkelaar auteursrecht op zijn product. Een probleem met software is dat het vrij simpel te kopiëren is zonder verlies van kwaliteit. Het vrij kopiëren van commerciële software is niet toegestaan.

Toch is er ook software die wel vrij te kopiëren is. Ook bij deze software horen auteursrechten. Voorbeelden van vrije software zijn het Linux-systeem en veel daarbij meegeleverde software die valt onder de GNU Public Licence (GPL).

In figuur 1.3 is het verband tussen software en hardware in een lagenmodel weergegeven. De hardware vormt het platform waarop de software draait. In de Nederlandse taal gebruiken we het werkwoord *draaien* waar in het Engels het werkwoord *to run* wordt gebruikt. Dit lagenmodel bestaat hier uit slechts twee lagen, maar verderop zullen we daar verfijningen op aanbrenge.



Figuur 1.3 *Lagenmodel*

Soms is software al in elektronische componenten ingebakken. In dat geval spreekt men vaak van ‘firmware’. Deze ingebouwde software bestuurt bijvoorbeeld allerlei elektronische apparatuur.

1.3 Computers in onze samenleving

Toen de eerste computers werden gebouwd, waren ze groot en duur en werden hoofdzakelijk gebruikt voor rekenwerk. De computerrevolutie is begonnen met de komst van de microprocessors in het begin van de jaren zeventig van de twintigste eeuw. Computers werden klein en goedkoop. Allerelei toepassingen die weliswaar mogelijk

waren maar voorheen veel te duur, werden met de microprocessor realiseerbaar. We zullen eens kijken waar we computers zoal tegenkomen en beginnen gewoon bij huis. Een modern gezin beschikt tegenwoordig vaak over één of meer tablets, smartphones en/of personal computers (pc's), tegenwoordig meestal in de vorm van laptops. Deze systemen kunnen voor spelletjes, tekstverwerking, hobby, en communicatie met andere computers gebruikt worden. Voor spelletjes zijn overigens ook speciale spelcomputers te koop, die voor beeldweergave een tv gebruiken en onder meer daardoor wat goedkoper zijn dan een pc. Deze systemen worden wel gemakkelijk als computer herkend. Anders ligt het bij elektronische apparatuur en huishoudelijke apparaten. Niet iedereen beseft dat hiervan de besturing en bediening met weliswaar kleine computersystemen, ook wel *microcontrollers* genaamd, gebeurt. Ook in de moderne auto is de microcontroller binnengedrongen en speelt een rol bij het goed laten functioneren van de motor en allerlei in de auto verwerkte beveiligings- en diagnosesystemen. In de transportwereld is de computer onder meer bekend als de 'automatische piloot' in vliegtuigen. Het spoorwegnet wordt met computers geregeld en beveiligd en natuurlijk treft men ook computersystemen aan op schepen. Het autonavigatiesysteem is een gespecialiseerde computer die met behulp van spraak en beeld de bestuurder helpt bij het vinden van de eindbestemming. De stap naar zelfrijdende auto's is inmiddels ook al gezet.

In de kantoorwereld is de pc niet meer weg te denken en elk bedrijf gebruikt computers voor administratieve en financiële toepassingen. In de industrie heeft de computer zijn weg gevonden voor de automatisering en besturing van productieprocessen. In ziekenhuizen wordt geavanceerde apparatuur bestuurd met computers of maakt men gebruik van computertechnologie om deze te kunnen laten functioneren. Het klimaat in grote gebouwen wordt geregeld met gebouwbeheersystemen die ook weer microcomputers gebruiken voor het verzamelen van meetgegevens en het bijsturen van de diverse beheersystemen.

Naast civiele toepassingen zijn computers ook niet meer weg te denken bij militaire toepassingen, zoals intelligente wapensystemen, drones, versleuteling van communicatie et cetera. Alan Turing werkte in de tweede wereldoorlog aan een systeem om de geheime codering van berichten van Duitsland te ontcijferen. Hij is ook de grondlegger van een theoretisch model, de zogenoemde Turing Machine, dat John von Neumann weer inspireerde tot de ontwikkeling van de architectuur van onze hedendaags computers. De oorsprong van internet stamt uit de Koude Oorlog. Het achterliggende idee was om onderzoeksprojecten van de Amerikaanse defensie niet afhankelijk te laten zijn van een enkele lokale en destijds dure en kwetsbare computers. Dit netwerk, ARPANET, groeide door en mondde uiteindelijk uit in internet. Tegenwoordig zijn cyberaanvallen, om communicatie-infrastructuur en andere voorzieningen uit te schakelen, ook onderdeel geworden van moderne oorlogsvoering. Cyberaanvallen vinden soms ook in situaties plaats waarin nog geen sprake is van oorlog, maar als bepaalde regimes via social media invloed willen uitoefenen op de politieke situaties in andere landen.

Het internet wordt door sommige mensen beschouwd als het grootste technologische systeem ter wereld. Het aantal personen dat internettoegang heeft groeit met de dag.

Zeker nu smartphones een relatief laagdrempelige toegang bieden. Meer dan 90% van de wereldbevolking heeft een mobiele telefoon. Van deze mobiele telefoons zijn ruim 90% smartphones die internettoegang gebruiken. Naast toegang door personen is er ook enorm veel apparatuur met het internet verbonden. Dit Internet of Things (IoT) kent inmiddels meer dan 15 miljard met het internet verbonden devices. Een internet-toepassing voor personen die tijdens de coronapandemie een geweldige boost heeft verkregen is videoconferencing. Dit heeft ook het zogenoemde thuiswerken mogelijk gemaakt met als gevolg dat de impact van een lockdown in ieder geval wat kleiner werd. Social media zoals Facebook, Instagram en Twitter spelen inmiddels een belangrijke rol. De computersystemen worden juist door de verbinding met internet veelzijdiger en krachtiger. Cloudcomputing is een ontwikkeling die is gestart bij grote internet- en IT-bedrijven zoals Amazon, Google, Microsoft en Oracle en levert op demand hard- en software oplossingen met behulp van grote computerclusters op basis van internet-technologie.

Al deze technologische ontwikkelingen hebben een positieve en negatieve kant. Alle apps en toepassingen hebben ons leven verrijkt, gemakkelijker en leuker gemaakt. Informatie zoeken en vinden, navigeren, communiceren en heel veel andere zaken zijn echt veel eenvoudiger geworden. Daar staat tegenover dat software vandaag de dag meestal complex is en van grote systemen is het moeilijk om te achterhalen wat ze precies doen. Een voorbeeld hiervan is de zogenaamde sjoemelsoftware. Dit woord raakte in 2015 in zwang door een zaak rondom firmware (software ingebed in een systeem) van een auto, die metingen kon aanpassen als de auto werd getest op een rollerbank (wielen draaien, maar de auto beweegt niet). Social media hebben naast het wereldkundig maken van wat iemand heeft gegeten of hoe leuk de kinderen zijn, ook bijgedragen aan het verspreiden van nepnieuws. Privacy is eveneens een punt van zorg. Een smartphone 'weet' waar die is en hierdoor is dus over het algemeen te achterhalen waar de bezitter van de smartphone zich bevindt. Met als uitzondering de situatie in misdaadfilms, en waarschijnlijk ook in de echte wereld, waar boeven met regelmaat een telefoon uit een rijdende auto gooien. Een andere negatieve ontwikkeling is de opkomst van malware. Malware (software met een destructief doel, die meestal ongewild op een systeem terecht komt) bedreigt niet alleen de industrie en grote instellingen, maar ook particulieren kunnen het slachtoffer worden.

Hoofdstuk 2

Computersystemen van groot naar klein

We gaan in dit hoofdstuk eerst eens kijken wat we nu precies onder een computer verstaan en in welke vormen we computers aantreffen. Ook bekijken we in vogelvlucht de werking van computers in het algemeen en zullen aan de hand van wat voorbeelden een aantal specifieke computergerelateerde begrippen leren kennen. We eindigen met beschouwingen over computernetwerken, embedded systemen en software.

2.1 Standaardcomputers

De eerste associatie die de meeste mensen tegenwoordig met computers maken, is die met de personal computer, ook wel pc genoemd. In veel huishoudens is dit een gebruiksvoorwerp, vergelijkbaar met televisie of andere elektronische apparatuur. De portable versie van de pc in de vorm van de laptop heeft de desktopversie inmiddels al op veel plaatsen vervangen. De pc is veelzijdig en kan voor allerlei taken ingezet worden, maar meestal is de toepassing in de huiselijke sfeer spelletjes spelen, internetten of het doen van administratieve taken zoals tekstverwerking en aanverwante toepassingen (spreadsheet voor berekeningen en database voor gegevensopslag). De veelzijdige inzetbaarheid danken pc's en eigenlijk computers in het algemeen aan het feit dat het programmeerbare systemen zijn. Een programma bepaalt de werking. Een tekstverwerkingsprogramma geeft aan een computer een heel andere functionaliteit dan een schaakprogramma. Een programma bestaat uit een reeks eenvoudige instructies die door het systeem worden uitgevoerd. De kracht van een systeem zit hem onder meer in het feit dat per seconde enorm veel instructies kunnen worden uitgevoerd.

Bij pc's onderscheiden we de programmatuur, ook wel software genoemd, die het systeem laat functioneren en een basis voor toepassingen vormt. Deze software noemen we het *besturingssysteem* of *operating system*. Voorbeelden uit de pc-wereld hiervan zijn MS-windows, MacOS en Linux. De eindgebruiker is meestal meer geïnteresseerd in de toepassingen die op die operating systems kunnen draaien. Hier komen dus de toepassingen als tekstverwerking, database, spellen, webbrowsers enzovoort om de hoek kijken.

Systemen die veel informatie aan een netwerk kunnen geven, de zogenoemde servers, stijgen meestal qua prestatie boven een pc uit. Heel grote systemen zoals mainframes en supercomputers vormen de top qua systeemprestatie (en prijs). Al deze systemen hebben met de pc gemeen dat ze een operating system kennen waarop de voor het gebruik noodzakelijke toepassing in de vorm van software draait. Overigens worden deze zware systemen vaak samengesteld uit een combinatie van computers die samen als een geheel functioneren. Kijken we naar de systemen die wat prestatie betreft in de buurt van een pc zitten, dan komen we bij apparaten die meestal ook wel als computer

herkend worden. Denk bijvoorbeeld aan spelcomputers. De naam geeft al aan dat het hier om computers gaat. Tegenwoordig is de term gameconsole wat gebruikelijker. Tablets en smartphones zijn computersystemen die min of meer vergelijkbaar zijn met pc's. Deze categorie is duidelijk voor het gebruikersgemak ontworpen en kent inmiddels al een enorme variëteit aan software, de zogenoemde apps. In veel technische toepassingen treffen we computers aan die een onderdeel van een groter geheel zijn. In deze embedded systemen is de computer een component van een groter geheel.

2.2 Embedded systemen

Een plaats waar computers min of meer sluipend hun intrede hebben gedaan is in de embedded systemen. Hier zitten computersystemen verstopt in apparatuur, gebruiksvoorwerpen of technische systemen (zoals auto's) zonder dat de gebruiker zich daar direct bewust van is. Vooropgesteld moet worden dat dit geen definitie is van embedded systemen. Bij sommige embedded systemen kan de eindgebruiker zelf nog 'programmeren'. Bij de zogenoemde deeply embedded systemen is dat niet meer mogelijk. Deze computers mogen eigenlijk niet falen, omdat daarmee de werking van het systeem waarin ze 'ge-embed' zijn, onderuitgehaald wordt. In praktijk kan dit natuurlijk nooit voor honderd procent zo zijn, daarom past men technieken toe die bekend staan onder de naam fault tolerance. Een fault tolerant systeem is in staat eventueel optredende fouten op te vangen of op eigen kracht te herstellen.

Twee eigenschappen zijn kenmerkend voor embedded systemen:

- 1 User interface of gebruikersinterface: dit is de wijze waarop de gebruiker met het systeem omgaat. De algemene term om de interactie tussen gebruikers en computers aan te duiden is mens-computer-interactie ofwel human-computer interaction (HCI).
- 2 Doel van het systeem: welke taken moet het systeem uitvoeren.

In deze twee eigenschappen onderscheiden embedded systemen zich van algemeen inzetbare computers. We zullen dit nader bekijken. Standaardcomputers hebben een gebruikersinterface die bij laptops gebaseerd is op een toetsenbord, (aanraak)beeldscherm en eventueel een muis. Een embedded systeem heeft vaak een interface die hiervan sterk afwijkt of soms helemaal geen interface. Een of enkele drukknoppen, een eenvoudig aanraakscherm (touchscreen), één of meer lampjes (ledjes) vormen de user interface. Sommige embedded systemen hebben helemaal geen directe interactie met een gebruiker. Dit lijkt wat moeilijk voor te stellen, maar het gaat hier om computers die informatie van elektronische opnemers binnenkrijgen en daarop op een voorgeschreven manier reageren. Ook computers die netwerkverkeer in een datacommunicatienetwerk regelen, hebben vaak alleen netwerkaansluitingen en geen directe user interface.

De tweede eigenschap van embedded systemen waarin ze zich onderscheiden van standaardcomputers, is het doel van een embedded computersysteem. Een standaardcomputer is veelzijdig inzetbaar en kan een grote diversiteit van functies uitvoeren. Denk maar aan een laptop. Die is op het ene moment een tekstverwerker, het volgende ogenblik een spelmachine en daarna of wellicht tegelijk een afspeler voor muziek. Een embedded systeem is gebouwd en geprogrammeerd voor één taak of hoogstens voor een klein aantal specifieke taken.