

AI – Alsmaar intelligenter

STEFAN BUIJSMAN BIJ DE BEZIGE BIJ

Plussen en minnen

Stefan Buijsman

AI – Alsmaar intelligenter

Een kijkje achter de beeldschermen



2020

DE BEZIGE BIJ
AMSTERDAM

Met dank aan Marijn Kroes voor inhoudelijk commentaar

Copyright © 2020 Stefan Buijsman
Omslagontwerp Moker Ontwerp
Foto auteur Merlijn Doomernik
Vormgeving binnenwerk CeevanWee, Amsterdam
Druk Bariet Ten Brink, Meppel
ISBN 978 94 031 9670 1
NUR 320

debezigebij.nl



Bij de productie van dit boek is gebruikgemaakt van papier dat het keurmerk van de Forest Stewardship Council (FSC®) mag dragen. Bij dit papier is het zeker dat de productie niet tot bosvernietiging heeft geleid.

Inhoud

Inleiding	7
1. Tandwiel, stroom of lichtdeeltje. Onder de motorkap van je computer	17
2. Zoek je een ongeluk. Het verleden van kunstmatige intelligentie	37
3. Neurale netwerken in beeld	57
4. Voorspelbare gesprekken. Neurale netwerken en taal	93
5. Creativiteit uit een chip	135
6. Kunstmatige intelligentie in de (toekomstige) samenleving	167
Links	191
Bibliografie	193
Illustratieverantwoording	219

Inleiding

Computers zouden op korte termijn de helft van alle banen overnemen. Algoritmes kunnen mensen dwars door muren heen volgen via wifisignalen. Facebook ontwikkelt een programma dat zijn eigen, voor ons onbegrijpelijke, taal verzint. De Chinese overheid gebruikt gezichtsherkenning om etnische minderheden te onderdrukken. Onderzoekers hebben een algoritme geschreven dat volledig automatisch nepnieuws produceert en weigeren het openbaar te maken uit veiligheids- overwegingen. Programma's worden te gemakkelijk racistisch en seksistisch. Samsung genereert op basis van een enkele foto levensechte filmpjes, waaronder een vrolijk babbelende Mona Lisa. Diezelfde technologie kan interviews faken zonder dat iemand het verschil ziet.

Eén ding is duidelijk: kunstmatige intelligentie is de wereld aan het veranderen. En zoals met iedere fundamenteel nieuwe technologie is het lang niet duidelijk wat het effect daarvan is. Zo woedde er in de Verenigde Staten in de negentiende eeuw een hevige discussie rondom de eerste treinen die rond de 80 kilometer per uur konden rijden. Men maakte zich serieus zorgen dat zulke snelheden gevaarlijk waren voor vrouwen. Er was, volgens de kranten van toen, een reëel risico dat hun baarmoeder uit hun lichaam gerukt zou worden. Klinkklare onzin – en ook wonderlijk dat specifiek de ingewanden van vrouwen

gevaar zouden lopen – maar vooraf was het lastig om dat in te zien. Niemand wist wat zulke snelheden doen met mensen.

Net zoals de treinen van toen kunnen onze huidige computers opeens veel meer dan ooit voor mogelijk is gehouden. De vraag is: wat moeten wij daarmee? Over welke aspecten moeten wij ons zorgen maken en welke claims over kunstmatige intelligentie zijn overdreven? Gaat de automatisering inderdaad zo snel dat we straks allemaal op straat staan, afhankelijk van een universeel basisinkomen? Vormen computers een existentiële dreiging voor de mensheid?

Stel je het volgende voor. Een groep informatici ontwerpt een programma dat de leiding moet nemen over een paperclipfabriek. Daar moet het programma natuurlijk voor kunnen redeneren en plannen, dus zorgen ze voor een spiksplinternieuw zelflerend algoritme. Het gevolg: de fabriek werkt steeds efficiënter en de kosten blijven maar dalen. Geweldig nieuws! Maar wat als de computer iets té slim is? Hoe ver zou die dan gaan om zijn doel (zo veel mogelijk paperclips produceren) te bereiken? Kan het algoritme bedenken dat wij niet eindeloos veel paperclips willen, en dat wij de fabriek op een gegeven moment dus zullen sluiten? Realiseert het algoritme zich op een gegeven moment dat het met genoeg moeite ook uit mensen paperclips kan maken? Worden wij uiteindelijk uitgeroeid door een paperclipfabriek? Ik kom later terug op dit scenario, maar aangezien zulke risico's serieus besproken worden kun je je afvragen: waarom gaan we dan toch door met het verbeteren van kunstmatige intelligentie?

Het antwoord daarop is simpel: kunstmatige intelligentie kan ons leven ook enorm verbeteren. In India gebruiken ongetletterden spraakherkenning om tóch via Uber geld te verdienen, alhoewel ze niet kunnen lezen wat er in de app gebeurt. Google verkoopt oortjes, Pixel Buds, die onder andere als automatische tolk fungeren. Longkanker wordt (soms) nauwkeuriger opgespoord door computers dan door radiologen. Adobe

ontwikkelt een programma dat bewerkingen van foto's kan opsporen en terugdraaien. Sociale netwerken gebruiken kunstmatige intelligentie om gegevens van suïcidale gebruikers door te geven aan hulpdiensten. We kunnen neushoorns beter beschermen dankzij kunstmatige intelligentie die stropers volgt op basis van de bewegingen van gazelles en antilopen. In juli 2019 werd bekendgemaakt dat in Amerika het eerste griepvacin getest wordt dat volledig ontwikkeld is door een computerprogramma. Ook bij klimaatverandering kan kunstmatige intelligentie enorm helpen, door bijvoorbeeld ontbossing beter in de gaten te houden, de energieopbrengst van wind- en zonneparken nauwkeuriger te voorspellen en de gevolgen van de opwarming van de aarde in kaart te brengen, zodat overheden voorzorgsmaatregelen kunnen nemen. Kunstmatige intelligentie wordt steeds nuttiger, en dat zullen we nog op vele plekken zien.

Genoeg redenen dus om voorlopig door te gaan met het ontwikkelen van kunstmatige intelligentie. Al komt die ontwikkeling soms wel heel dicht bij huis, want alleen dankzij kunstmatige intelligentie kan Facebook passende advertenties kiezen. En dat is lang niet altijd plezierig; verhalen genoeg van mensen die na een bezoek aan een horlogewinkel, zonder ooit iets over horloges te hebben opgezocht, op Facebook plotseling advertenties voor horloges te zien krijgen. Of die na een gesprek over nieuwe schoenen ineens een aantal merken op hun tijdlijn zien langskomen. Al werkt het algoritme van Facebook soms ook belabberd slecht: ik kreeg laatst de vraag of ik mijn rechten als buitenlandse au pair in Nederland wel ken, hoewel Facebook donders goed weet dat ik in Leiden geboren ben en werk als filosoof van de wiskunde.

Het zette mij aan het denken. Nou doe ik dat als filosoof sowieso al, maar er zijn ook belangrijke vragen over computers die voornamelijk filosofisch van aard zijn. Wat is de betekenis van een woord, en snappen computers die betekenis als ze tek-

sten voor ons schrijven? Hoe creatief zijn robots? Kunnen computers ooit even slim worden als mensen? Die vragen komen in dit boek stuk voor stuk aan de orde. Daarnaast komt er hier en daar wat wiskunde langs, al zal ik je de formules besparen. Ik hoop je een beeld te geven van de manier waarop kunstmatige intelligentie werkt, hoe die zich ontwikkelt en waar de pijnpunten zitten. Je zult zien dat juist de combinatie van wiskunde (om de techniek te verklaren) en filosofie (voor de algemenere vragen) daarbij heel goed van pas komt. Zo kun je meer grip krijgen op de huidige ontwikkelingen.

Want nu we steeds vaker kunstmatige intelligentie tegenkomen en computers een steeds grotere rol in de samenleving spelen, is het belangrijk om het kaf van het koren te kunnen scheiden. Ik zie vrijwel iedere dag berichten op mijn telefoon langskomen die erover gaan, mede omdat dat algoritme geleerd heeft dat ik zulke artikelen lees (en niet zoveel geef om voetbaluitslagen). Maar ik merk ook dat het lastig is om op basis daarvan een goed overzicht te krijgen van de stand van zaken. Vaak zijn berichten sensationeel geschreven, zonder echte uitleg van wat de onderzoekers daadwerkelijk gedaan hebben. Kleine doorbraken worden opgehemeld tot voortekenen van de komende robot-apocalyps.

Het klinkt in diezelfde berichten alsof de techniek razend-snel vooruitgaat, maar tegelijkertijd blijven de meeste banen gewoon bestaan en hoor je om de zoveel tijd van een veelbelovend project dat desondanks niet van de grond komt. IBM werkte bijvoorbeeld al jaren samen met ziekenhuizen om automatisch diagnoses te stellen, maar ondanks enorme investeringen vinden artsen het programma tegenvallen. Een heel aantal ziekenhuizen heeft het project stopgezet omdat het naar hun mening totaal niet helpt met diagnose of behandeling. Zo snel gaat het dus niet, al helemaal niet als je bedenkt dat een deel van de nieuwsberichten pure hype is. De Russische staatstelevisie presenteerde een 'hi-tech robot' die uiteindelijk gewoon

een verklede man bleek te zijn. Ongeveer 40% van alle Europese start-ups die zich laten classificeren als ‘AI-bedrijf’ doet in werkelijkheid niets met kunstmatige intelligentie, maar ontvangt wel meer geld dankzij het label. Als je die nuance niet meekrijgt, lijkt het allemaal veel sneller te gaan.

Kunstmatige intelligentie is ook moeilijk in te schatten doordat het niet op menselijke intelligentie lijkt. Aan de ene kant zijn computers behoorlijk slim – auto’s kunnen tot op zekere hoogte zelfstandig rijden en de wereldkampioen schaken is decennia geleden al verslagen door een computer – maar aan de andere kant maken algoritmes de meest gênante fouten. In juli 2018 identificeerde het commerciële gezichtsherkenningsprogramma van Amazon 28 leden van het Amerikaanse Congres met portretten van gearresteerde criminelen (onterecht dan, hè). Halverwege 2019 zagen zelfs de beste programma’s een licht gedraaide scooter aan voor een parachute en schreven topalgoritmes over vijfhoornige eenhoorns en vuurtjes onder water.

Het gaat dus nogal eens mis, de berichtgeving is snel sensationeel en de techniek is ondoorzichtig. Krijg dan maar eens een goed beeld van kunstmatige intelligentie. Dit boek biedt een blik achter de (beeld)schermen en neemt de sterke en zwakke kanten van moderne kunstmatige intelligentie onder de loep. Zodat je je wél een realistisch beeld kunt vormen. Zodat we niet bang hoeven te zijn dat de baarmoeder van treinreizigers uit hun lichaam vliegt, maar wel bedenken dat we spoorwegovergangen moeten bewaken als de treinen plotse-ling 80 kilometer per uur rijden.

Daarvoor hebben we eerst wat achtergrond nodig. Kunstmatige intelligentie heeft namelijk haar limieten, doordat wij alles in heldere regels moeten vatten wil het werken en computers weinig kunnen met ons algemene begrip van de wereld. Die beperkingen zijn terug te voeren op de wiskundige werking van onze computers. Computers voeren alleen berekenin-

gen uit. En berekeningen hebben een fundamentele beperking: ze werken enkel met tekens die, voor de wiskunde, niets betekenen. De beste manier om het verhaal over de mogelijkheden en beperkingen van kunstmatige intelligentie te beginnen is dan ook bij de basis waarop al die programma's draaien. Het eerste hoofdstuk duikt daarom – kort – in de werking van de computer, zodat je beter snapt waar de zwakke kanten van computers vandaan komen.

Want die waren er vanaf het eerste begin. Kunstmatige intelligentie is er namelijk al een hele tijd. Een acht weken lange workshop in de zomer van 1956 te Dartmouth wordt vaak gezien als het begin van het vakgebied. Al waren computers in eerste instantie niet bijster intelligent, toch laat die vroege kunstmatige intelligentie, die we in hoofdstuk 2 tegenkomen, een hele hoop zien van onze omgang met computerprogramma's. Zoals de manier waarop wij menselijke gedachteprocessen en emoties toeschrijven aan de meest simpele programma's. En dat we vergeten dat computers dingen véél letterlijker nemen dan wij ooit zouden doen. We zien chatbots uit de jaren zestig die niet meer deden dan je zin herformuleren tot een vraag, maar waarvan gebruikers toch vonden dat het programma op hun vader leek. En computers die dertig jaar later in alle ernst meldden dat de snelste manier om een vliegtuig af te remmen is door het te laten crashen. Simpele programma's dus, die gemakkelijk te begrijpen zijn, maar wel denkfouten aanstippen die wij nog altijd maken, ook bij de hypermoderne algoritmes van vandaag de dag. Daarmee is deze geschiedenis een mooi opstapje naar de moderne techniek en wat er op dit moment allemaal om ons heen gebeurt.

Want die moderne algoritmes, gebaseerd op 'neurale netwerken', zijn overal. Iedere keer als je *deep learning* ziet staan (en meestal ook als je *machine learning* ziet) gaat het over een neurale netwerk. Neurale netwerken zitten achter de hierboven genoemde longkankerdiagnoses en de mogelijkheid om je

telefoon te ontgrendelen met gezichtsherkenning. Ze zorgen ervoor dat een Tesla enigszins zelfstandig kan rijden omdat die herkent welke objecten er op de weg liggen. YouTube en Facebook halen haatzaaiende foto's en video's van hun platform af op basis van soortgelijke neurale netwerken. Illegale visserij kan door neurale netwerken aan het licht gebracht worden door slim gebruik te maken van heel veel satellietbeelden. Supermarkten slaan dankzij neurale netwerken automatisch meer ijsjes in als het warm weer wordt. Maar hoe betrouwbaar zijn die systemen nu echt? Snapt een Tesla altijd dat hij een overstekende voetganger ziet in plaats van een langsvliegend stuk karton? Kun je gezichtsherkenning nog foppen? Weten YouTube en Facebook hun algoritmes de juiste beslissingen aan te leren? Daarover gaat het in hoofdstuk 3.

Daar zien we ook dat neurale netwerken, en kunstmatige intelligentie in het algemeen, ontzettend specialistisch zijn. Neurale netwerken vormen de basis voor programma's die, naast gezichtsherkenning, ook automatisch nepnieuws schrijven en Google Translate mogelijk maken. Computers schrijven al veel van de nieuwsberichten over jaarrapporten van bedrijven en lokale verkiezingsuitslagen. Deze 'talige' neurale netwerken werken weer heel anders dan de netwerken die zelfrijdende auto's mogelijk maken, daarover lees je in hoofdstuk 4. Hoe goed zijn computers al in taal? Er zijn genoeg artikelen waarbij je niet doorhebt dat ze van de hand (nou ja, processor) van een computer zijn. Maar dezelfde algoritmes produceren ook absolute kul. Toch is het ons in minder dan tien jaar tijd gelukt om computers van halfslachtige zinnen naar geloofwaardige, neppe Wikipedia-artikelen te krijgen. Hoe hard gaan die ontwikkelingen? Als computers (soms) perfecte teksten schrijven, betekent dat dan dat ze ook snappen wat ze schrijven? Dat computers met betekenis om kunnen gaan? Dat ik binnenkort mijn baan als auteur kwijt ben omdat een neuraal netwerk veel sneller schrijft dan ik het ooit zal kunnen?

Over onverwacht automatiseerbare beroepen gesproken: kunstenaars lopen ook gevaar. Computers kunnen muziekstukken schrijven die zelfs kenners niet kunnen onderscheiden van originele werken van Bach. Ze kunnen schilderijen produceren die door het algemene publiek (oké, iets van dertig man op internet) even kunstzinnig gevonden worden als de topstukken op hedendaagse kunstbeurzen. Nog dichterbij: diezelfde neurale netwerken produceren portretfoto's van mensen die niet bestaan en kunnen zelfs volledige videoclippen verzinnen. Beeldmateriaal is een van de weinige dingen die we tot nu toe konden vertrouwen, op wat gefotoshop na. Hoe snel gaat dat veranderen? Wat moeten we dan? En betekent dit ook dat computers creatief zijn, nu ze kunst kunnen produceren? Dat zou behoorlijk zorgwekkend zijn, want kunnen ze die creativiteit dan niet ook inzetten om te bedenken dat voor een heel aantal problemen de beste oplossing is: weg met die mensheid? Zo rap gaat het niet, maar het is wel goed om te weten waarom dat nog niet kan. Waarom ik denk dat we ons voorlopig alleen zorgen hoeven te maken over onze eigen fouten, niet over een kwaadaardige computer die het op ons gemunt heeft. Dat komt allemaal langs in hoofdstuk 5.

In die hoofdstukken over neurale netwerken zien we ook allerlei limieten van de huidige techniek. Die beperkingen worden, doordat wij ze gemakkelijk over het hoofd zien, risicovol. Ze kunnen leiden tot auto-ongelukken, onterechte veroordelingen en systematische discriminatie. Al helemaal als je kunstmatige intelligentie te veel behandelt als menselijke intelligentie. Dan word je bang voor dingen die computers helemaal niet kunnen, zoals de wereld overnemen, terwijl je de echte risico's over het hoofd ziet.

Het grootste gevaar van kunstmatige intelligentie is ons gebruik ervan. Ten eerste omdat computers ons in staat stellen meer controle uit te oefenen over grotere groepen mensen, bijvoorbeeld zoals China de Oeigoeren onderdrukt met behulp

van gezichtsherkenning. Op iets minder gruwelijke schaal zorgt kunstmatige intelligentie ervoor dat bedrijven als Facebook en Google het de moeite waard vinden om enorme hoeveelheden data over ons op te slaan en dat Apple medewerkers heeft die meeluisteren met flarden van onze gesprekken. Maar het gevaar van kunstmatige intelligentie zit ook in onze neiging om klakkeloos over te nemen wat een computer zegt, ondanks impliciete discriminatie of ander ongewenst gedrag dat wij er onbewust in hebben geprogrammeerd.

Ik stip die limieten aan in de hoofdstukken over neurale netwerken, maar kom er extra op terug in het laatste hoofdstuk, nummer 6. Daar kijken we in vogelvlucht naar de huidige techniek en hoe wij ermee omgaan. Wat willen wij met een wereld vol kunstmatige intelligentie? Denk je, nu je weet hoe kunstmatige intelligentie werkt, dat je baan gevaar loopt? Moet je bang worden voor het gebruik van computers in oorlogsvoering? Worden we straks overspoeld met algoritmisch nepnieuws? Verwacht jij dat computers ooit net zo slim worden als wij?

Of zie je de toekomst rooskleuriger in? Brengt kunstmatige intelligentie juist allerlei voordelen met zich mee? Hoop jij op minder saaie, routinematige taken en meer creatieve uitdagingen op de werkvloer? Denk je dat computers de wereld juist veiliger maken doordat we de omgeving beter in de gaten kunnen houden en beter de gevolgen van ons gedrag kunnen voorzien? Dat we gezonder zijn dan ooit dankzij algoritmes die ziektes opsporen in een stadium waarin artsen ze nooit hadden gevonden?

Natuurlijk zal de toekomst een mengeling van positieve en negatieve kanten brengen. Specifieke technieken zijn nauwelijks te voorspellen, dus verwacht niet te lezen wat het volgende technische snufje is. Wel kunnen we zien waar onze toekomst met computers van afhangt. Want hoe je het wendt of keert, die toekomst zal doorspekt zijn met kunstmatige intelligentie. Hoog tijd dus om daar meer grip op te krijgen. We be-

ginnen, zoals gezegd, met de binnenkant van je laptop, telefoon en smartwatch, waar al die technologie op zal draaien.

Terminologie

Mocht je je afvragen wat een woord als ‘algoritme’ nu precies betekent, dan heb je hier een kort lijstje met de belangrijkste termen.

Algoritme: een set instructies die een computer (of jij) volgt. Iedere stapsgewijze reeks instructies telt; ook een recept is dus te zien als een algoritme, al gebruik je het woord bijna altijd voor de wiskundige instructies in een computerprogramma.

Kunstmatige intelligentie: algoritmes die (menselijke) intelligentie proberen na te bootsen, bijvoorbeeld de vaardigheid om te schaken, objecten te herkennen of teksten te schrijven.

Zelflerend algoritme/machine learning: een algoritme dat voorspellingen doet, die vervolgens worden getoetst aan en verbeterd met behulp van data. Bijvoorbeeld een ei koken door de kooktijd te voorspellen op basis van de grootte van het ei. Zo’n algoritme is zelflerend als het de voorspelde kooktijd naar boven bijstelt als het ei na de voorspelde kooktijd nog niet gaar is.

Neurale netwerken: een speciaal soort zelflerend algoritme, geïnspireerd op de hersenen. Verantwoordelijk voor bijna alle vooruitgang in de kunstmatige intelligentie van de laatste jaren. Ze worden uitgebreid uitgelegd in hoofdstuk 3; alle algoritmes uit de hoofdstukken 3, 4 en 5 zijn (types) neurale netwerken.

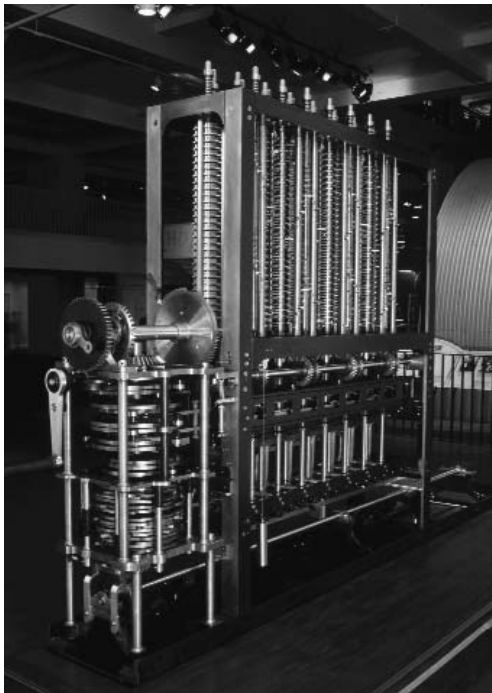
Deep learning: een term voor neurale netwerken die heel groot zijn, specifiek doordat ze veel lagen (achtereenvolgende rekenstappen, voor meer uitleg zie hoofdstuk 3) hebben.

Tandwiel, stroom of lichtdeeltje. Onder de motorkap van je computer

In juni 1991 was het eerste ontwerp van een rekenmachine eindelijk functioneel. En meteen eeuwen achterhaald, want deze machine was bedacht door Charles Babbage, een wiskundige uit het victoriaanse Engeland. Ter gelegenheid van zijn tweehonderdste geboortjaar bouwde het London Science Museum zijn mechanische, volledig uit tandwielen bestaande rekenmachine. Die had hij bedacht uit pure frustratie met de 'computers' van zijn tijd: mensen, vaak vrouwen, die met de hand berekeningen uitvoerden voor wetenschappers, legers enzovoorts – zelfs de NASA had rond 1950 nog een heel team vrouwen in dienst om de baan van raketten uit te rekenen. Babbage was die 'berekenaars' in de eerste helft van de negentiende eeuw al zat, omdat mensen nu eenmaal rekenfouten maken. Hij wilde die fouten vermijden door het rekenen over te laten aan een machine. Dit zou later ook een van de belangrijke drijfveren achter kunstmatige intelligentie zijn: de overtuiging dat een machine meer informatie foutloos kan verwerken dan wij. Dus ontwierp Babbage de eerste, zoals we nu weten werkende, rekenmachine. Niet veel later zou hij op papier ook de eerste mechanische computer ontwerpen, waarvoor tijdgenote Ada Lovelace het eerste computerprogramma schreef.

Het duurde uiteindelijk zes jaar om deze enorme rekenmachine te maken, je ziet haar in de figuur hieronder. Er waren

8000 componenten nodig, die niet (nauwkeurig genoeg) gemaakt konden worden in de tijd van Babbage. Zelfs in 1990 was het een hele uitdaging om zijn machine te bouwen. Het was lastig om alle wielen goed in elkaar te passen, en tijdens de eerste tests liep de machine nogal eens vast, ergens in de duizenden tandwielen. Dan moesten technici met een schroevendraaier of koevoet de wielen te lijf. En bij de opening van de tentoonstelling, in juni 1991, deed de machine het niet. Er werd weliswaar voor de ogen van de pers enthousiast aan de hendel links gedraaid, waardoor de tandwielen in beweging kwamen, maar de machine stond in een soort neutrale stand; er werd niets berekend. Dat gebeurde pas op 29 november 1991.



Babbage' *Difference Engine No. 2* in de collectie van het London Science Museum.

Hoe werkt dit gevaarte? De tandwielen zitten zo in elkaar dat ze kunnen optellen en aftrekken. Hieronder zie je er een versimpelde versie van. Kijk maar mee: het doel is om de 3 van het linkertandwiel op te tellen bij de 4 van het rechtertandwiel. Dat kan door het linkerwiel met de klok mee te draaien; als je goed kijkt zie je dat iedere gleuf tussen de raderen staat voor een ander getal, dus gaan we het linkerwiel drie stapjes draaien. Wat gebeurt er dan? Het linkertandwiel vermindert in waarde, omdat de rode pijl blijft staan, maar de getallen eronder naar links toe wegdraaien, van 3 naar 2, naar 1 en uiteindelijk naar 0. Het rechterwiel daarentegen draait de andere kant op; tegen de klok in. Ook daar blijft de rode pijl staan, maar verschuiven de getallen eronder naar rechts: van 4 naar 7. En voilà, je hebt met behulp van tandwielen een som opgelost!



Twee tandwielen uit de *Difference Engine No. 2*.

Je kunt zo ook aftrekken ($4 - 3$), maar dan moeten beide tandwielen met de klok mee draaien. En dat kan alleen met een extra tandwiel ertussen. In dat geval gaat het linkertandwiel in waarde naar beneden, net zoals bij het optellen. Omdat het rechtertandwiel nu ook naar links wegdraait, gaat ook daar de waarde omlaag, tot aan 1. Zo werkt de echte *Difference Engine* ook. Wil je weten hoe dat precies zit met dat extra wiel, scan dan de QR-code met je telefoon of volg de link vermeld achter in dit boek.



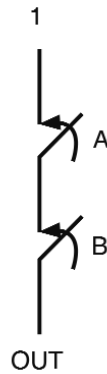
Babbage' rekenmachine kan dus optellen en aftrekken, maar door die berekeningen slim te herhalen lukt het ook om te ver-

menigvuldigen, te delen, wortel te trekken enzovoorts. Hij was zijn tijd ver vooruit. Dat was nog meer het geval met zijn volgende ontwerp: de Analytical Engine. Zijn mechanische computer is nooit gebouwd, maar hij zou via een soortgelijke tandwielconstructie een volwaardige, programmeerbare, computer zijn geweest. Het geheugen van 16,2 kB was wat klein, en je moest ponskaarten – vellen papier met rijen gaten – gebruiken als in- en uitvoer, maar verder kon dit ontwerp meer operaties uitvoeren dan de eerste elektronische computers. In principe had je er Snake op kunnen spelen of Word op kunnen laten draaien. Het enige wat zo'n machine nodig had waren de juiste instructies, en de tandwielen deden de rest. Dat die programma's uiteindelijk allemaal via de wiskunde werkten is heel mooi te zien bij de machines van Babbage, dankzij de getallen op de bronzen raderen.

Zonder handen! Stroompjes in huidige computers

Tot op zekere hoogte werken jouw laptop en telefoon op dezelfde manier als de negentiende-eeuwse ontwerpen van Babbage. Ze voeren identieke berekeningen uit, hebben een geheugen om informatie op te slaan en een processor om die te verwerken, plus in- en uitvoer. Het grootste verschil is dat je geen enorme tandwielen mee hoeft te slepen. In plaats daarvan werkt alles op elektriciteit en in chips (circuits): het levensbloed en de slagaders van de kunstmatige intelligentie. Deze chips, bestaande uit draden en poorten waar elektriciteit door stroomt, zijn bijzonder bepalend voor hun mogelijkheden en beperkingen. Met een basaal begrip van de werking van computer(chip)s kun je het verschil zien tussen een processor en onze hersenen en snap je waarom programmeurs zich in zulke rare bochten moeten wringen om een computer met taal te laten werken, plaatjes te laten snappen enzovoorts.

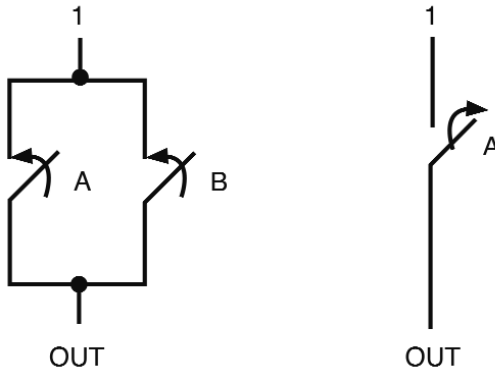
Om te beginnen rekenen moderne computers niet met een tientallig maar met een tweetallig stelsel: 1 (stroom loopt door de draad) en 0 (er loopt geen stroom door de draad). Een processor is een verzameling poortjes waar die stroom langs geleid wordt (of door tegengehouden wordt). Daar zijn drie soorten van: AND-, OR- en NOT-poorten – je kunt wiskundig aantonen dat je met die drie alle mogelijke types berekeningen kunt uitvoeren, terwijl je met een of twee nauwelijks van de grond komt. Die poorten doen wat je zou denken: een AND-poort geeft alleen stroom door als er in allebei de aangesloten draadjes stroom loopt, een OR-poort als er in een van de twee stroom loopt en een NOT-poort geeft alleen stroom af als er in het aangesloten draadje géén stroom loopt. Dat gebeurt vrij letterlijk met poortjes, zoals je hieronder kunt zien in de bedrading voor een AND-poort.



De bedrading voor een AND-poort: de stroom gaat alleen van bovenaf door naar de uitgang beneden als beide poortjes (A en B) dicht zijn, dus onder stroom staan.

Er zitten dus twee schakelaars achter elkaar, waardoor er alleen stroom naar de uitgang loopt als A én B onder stroom staan. Of dat wel of niet gebeurt hangt af van het programma dat de

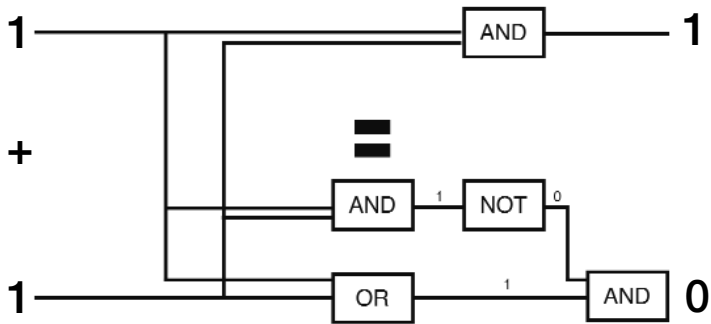
computer op dat moment uitvoert. Datzelfde geldt voor de poortjes in de bedradingen voor de OR-poort (links) en de NOT-poort (rechts).



Links een OR-poort, met twee losse paden van invoer tot uitvoer.
Rechts een NOT-poort, waarbij de A-schakelaar juist dichtgaat als er géén stroom door draadje A loopt.

En nu weet je genoeg om een processor te ontwerpen! Oké, niet echt natuurlijk, maar ieder ontwerp is uiteindelijk opgebouwd uit deze drie elementen. Door ze slim te combineren in een chip kun je getallen optellen, aftrekken enzovoorts. Hoe dat precies gaat, is even wennen en niet zo belangrijk voor de rest van het boek, dus ik houd het bij een klein voorbeeld.

Stel dat je de som $1 + 1$ wilt berekenen. De uitkomst daarvan is natuurlijk 2, maar omdat er alleen of wel, of niet stroom in een draadje loopt, schrijf je dat als **10** in het tweetalig stelsel (in dat stelsel vermenigvuldig je steeds met twee als je een plek naar links gaat, in plaats van met tien zoals we gewend zijn; dus dit is $1 \times 2 + 0 \times 1 = 2$ en **100** is $1 \times 2 \times 2$, dus 4). Dat kun je op een chip inbouwen op de manier die je op het volgende plaatje schematisch ziet weergegeven.



$1 + 1 = 10$ in een processor. Links komt de stroom binnen (beide wel, want twee enen) en via de poortjes komt rechts de juiste uitkomst: boven wel stroom (1) en onder niet (0). Na iedere poort staat of er wel of geen stroom in de draad te vinden is met een 1 of 0.

Hoe lees je dit plaatje? Van links naar rechts, zoals de stroom ook door dit circuitje loopt. Om te beginnen zijn er links twee draden, voor de twee getallen die je wilt optellen. In beide loopt stroom, dus staat er bij beide draden een 1. Die twee invoerdraden sluit je aan op een reeks poorten, zodat uiteindelijk rechts de uitkomst staat: een getal met twee cijfers. Om het linkercijfer van de uitkomst te berekenen heb je alleen een AND-poort bovenin nodig. Als er door beide draden van de invoer stroom loopt, dus als je twee keer een 1 hebt die je gaat optellen, dan komt er ook stroom uit de AND-poort. Die stroom geeft ons het linkergetal in de 10, het juiste antwoord.

Voor het rechtergetal moet je (met de vier poorten die je onderin ziet) zorgen dat er alléén stroom uit komt als door een van de twee originele draden stroom loopt. Stroom gaat vanuit de invoer door een OR-poort onderaan en een AND- en dan een NOT-poort daarboven voordat de twee uitkomsten (van OR en NOT) samengeraapt worden met een laatste AND-poort. Je kunt meekijken naar de tussenuitkomsten om te zien dat je dan op een 0 uitkomt (geen stroom), het juiste resultaat voor het rechtergetal van 10. Ook klopt dit circuit voor de andere

sommen: $1 + 0$, $0 + 1$ en $0 + 0$. Maar dat is voor de liefhebber; het kan namelijk best even duren voordat je zo'n plaatje kunt lezen. En de exacte werking van zo'n circuit hoef je echt niet te snappen voor de rest van het boek. Wil je toch meer weten? Lees dan een van de boeken over computerarchitectuur die achterin genoemd worden, in de bibliografie.

Computerprogramma's schrijf je door de processor te vertellen welke draden stroom moeten krijgen. En dat gebeurt via wiskunde. De instructies die je aan een processor geeft gaan over het laden en opslaan van data, het uitvoeren van berekeningen en tot slot de sprongen in de code, zodat je dezelfde instructies nog een keer uitvoert of juist instructies overslaat. Uiteindelijk worden al deze commando's uitgevoerd door de juiste draadjes van stroom te voorzien, waardoor de poortjes vanzelf hun ding doen. Maar om dat voor elkaar te krijgen moet de programmeur wiskundig beschrijven wat hij wil doen. In termen van enen en nullen dus, hoewel er geen cijfers rondspoken in een laptop. Dat programmeren met enen en nullen verdwijnt misschien op termijn met de overstap naar een nieuw soort computer, maar de wiskunde, zoals je zult zien, die blijft.

De stroom voorbij: kort over kwantumcomputers

Je hoort het af en toe in het nieuws: er worden gloednieuwe computers ontwikkeld, 'kwantumcomputers'. Het duurt nog even voordat we die dagelijks kunnen gebruiken, maar ze zijn al wel ver genoeg in wording dat er een paar werkende exemplaren zijn, plus een heel aantal voorstellen voor de manier waarop we grotere kwantumcomputers kunnen ontwerpen. We weten dus redelijk goed hoe deze computers zullen werken als we eenmaal krachtige versies ervan aan de praat hebben gekregen.