

Chips

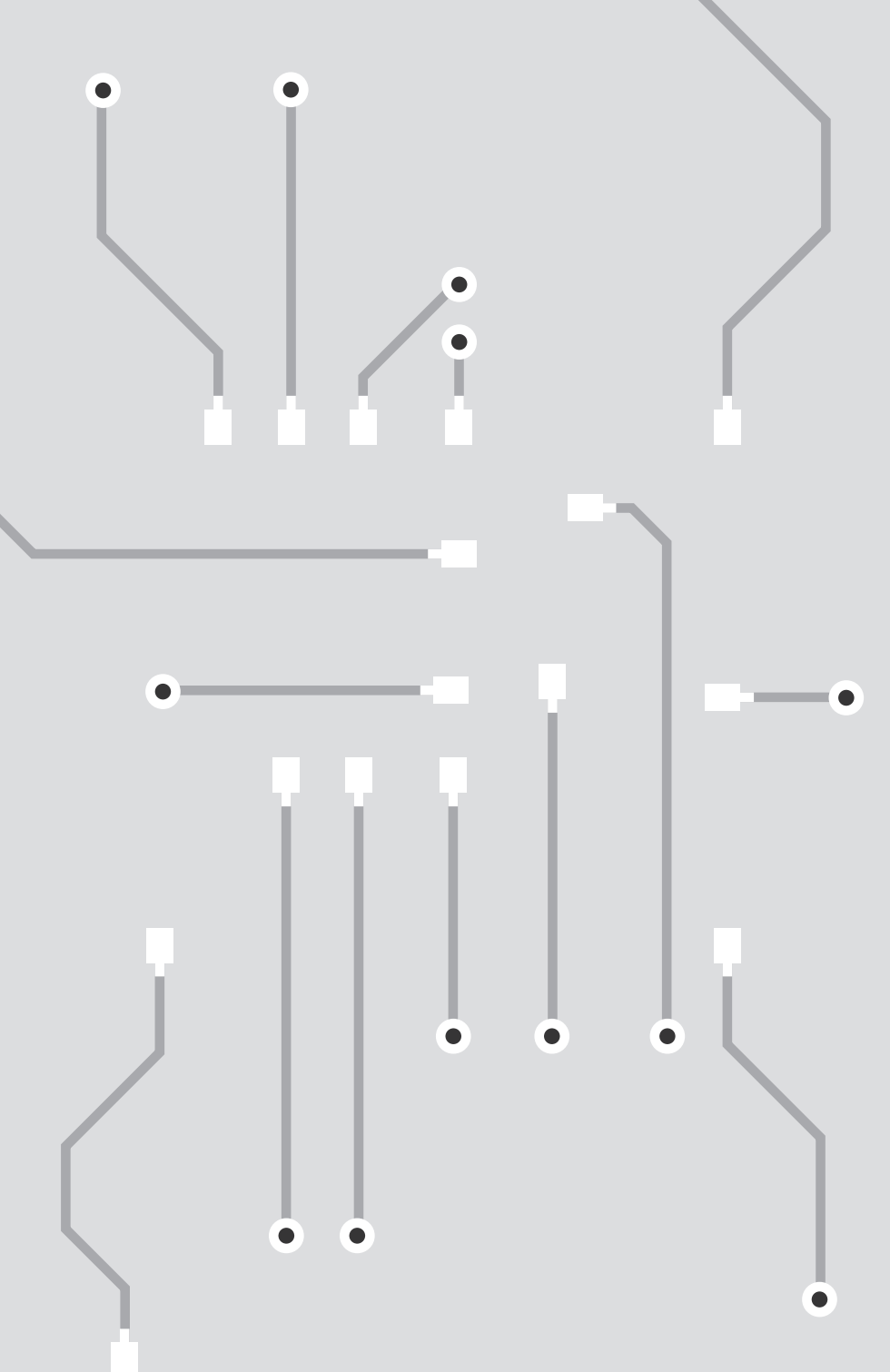


**JAN RABAEY &  
PIETER VAN NUFFEL**

# **CHIPS**

**HOE DIGITALE TECHNOLOGIE  
DE WERELD VERANDERT**

**ACADEMIA  
PRESS**



# VOORWOORD

---

**E**en van de vele redenen waarom ik hou van wetenschapscommunicatie is dat het de wereld zoveel rijker maakt. Het schenkt mij een blik op vele verborgen parallelle werelden overal om ons heen. Sinds ik geboeid ben door insecten zijn al die anonieme zwarte beestjes die rond onze kop vliegen veranderd in specifieke diersoorten met een eigen naam en vaak bizarre levenswandel. Sinds ik me verdiept heb in de wolken weet ik hoe de vele wolkensoorten heten en hoe ze ontstaan. En nadat ik me had ingelezen in de soorten fossielen die in onze dorpelstenen en natuurstenen vloeren zitten, vind ik miljoenen jaren oude honingraatkoralen in de vloertegels van het winkelcentrum, en zeeleliestengels in de vensterbank van de burens. Het geeft je plots kennis en inzicht in een voorheen onzichtbare laag van de werkelijkheid. Het is augmented reality zonder bril.

Er is nog zo'n onzichtbare laag die werkelijk overal om ons heen is en die weinig mensen zien in al zijn glorie: de computerchip. Kijk even om je heen waar je nu bent en vraag je het volgende af: stel dat het nu heel even pikdonker wordt, en elke computerchip in mijn omgeving geeft licht. Wat zou je zien denk je? Waar zitten ze

allemaal? In onze computers, telefoons, bankkaarten, geluidsboxen, USB-kabels, broodroosters, koffie-apparaten, horloge, oplader, koptelefoon, speelgoed, schakelaars, slimme lampen,... Er draait een enorme verborgen wereld van bits, bytes en schakelingen overall om ons heen, die zoveel dingen mogelijk maakt die wij doodnormaal zijn gaan vinden.

Wel, dit boek is er om jou de verwondering te schenken die je verdient als je naar een computerchip kijkt. Het technologische mirakel van miljarden schakelaartjes op een vierkante centimeter. De vele ideeën en tussenstappen die nodig waren om tot dit punt te komen. Het wonder van wat een computerchip eigenlijk is: gesmolten zand dat denkt. Je zal ook lezen hoe de ontwikkeling en productie van computerchips op dit moment mee de wereldpolitiek bepalen. En natuurlijk is er een blik op de toekomst. Of misschien beter: toekomst. Want welk pad we precies zullen bewandelen ligt nog niet vast. Als dit boek uit is, gaat het verhaal gewoon verder in de wereld om je heen en zal je die wereld op een rijkere manier ervaren.

Lieven Scheire, wetenschapscommunicator

# INHOUDS- OPGAVE

---

Voorwoord	5
Beste lezer	11
<b>DE DIGITALE REVOLUTIE</b>	13
De prehistorie	15
Van telraam tot computer	17
Rekenen op elektriciteit	21
Toen computers vrouwen waren	27
Een materiaal dat de wereld zou veranderen	31
De tirannie van de getallen	36
Naar de maan, en terug	40
Een zelfvullende voorspelling	41
<b>VAN ZAND TOT CHIPS</b>	47
Schrijf eens een boek op een speldenpunt	52
Schilderen met licht	56
De Nederlandse mirakelmachine	59
Het recept voor chips	65
Chips ontwerpen	67
De ecologische voetafdruk van de chipindustrie	69

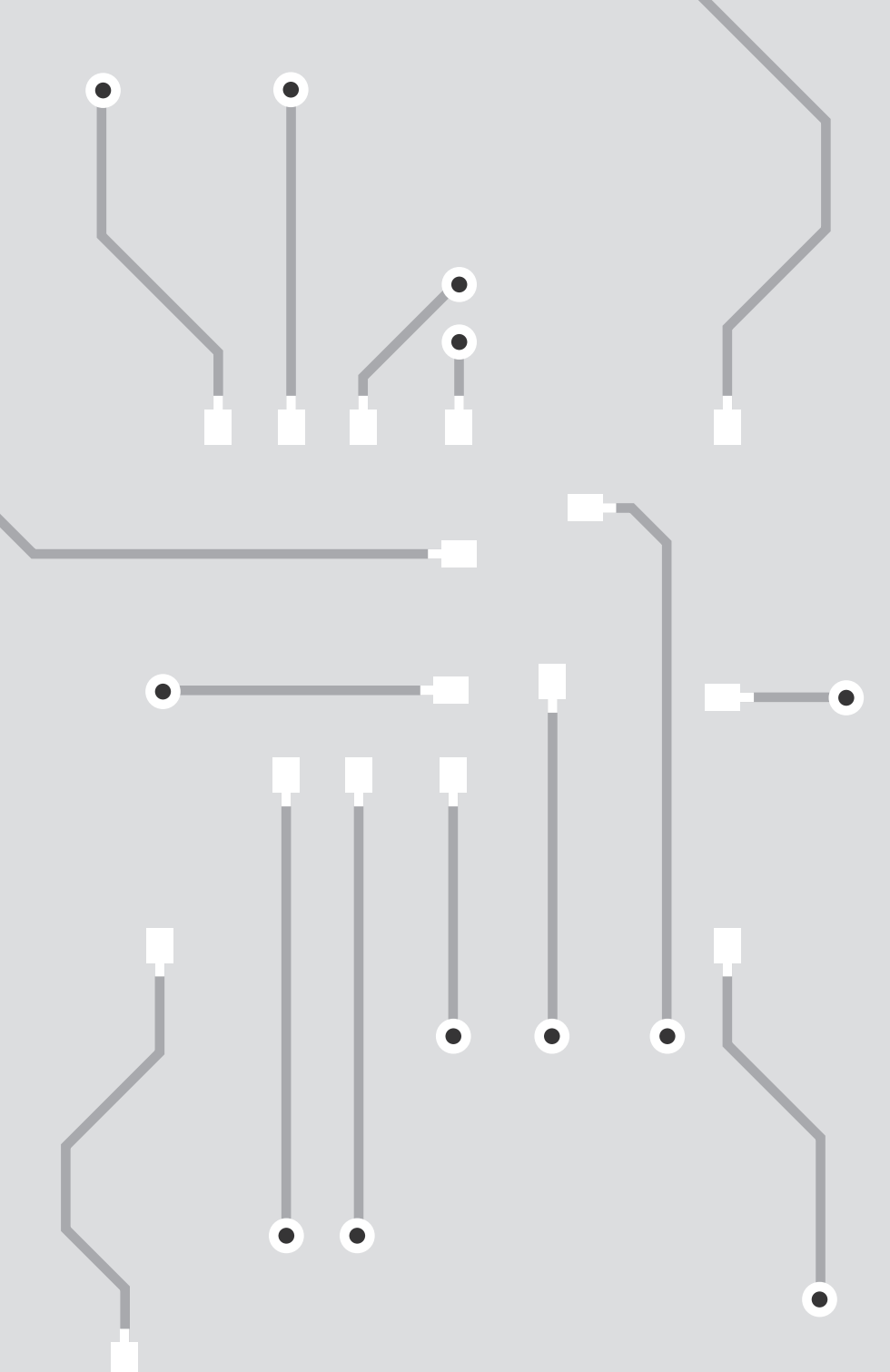
<b>EEN EXPLOSIË VAN APPLICATIES</b>	73
Chips op wielen	74
De zelfrijdende auto	77
Computer wordt kunstenaar	79
Het Kodak-moment	83
Mens krijgt superogen	86
Een labo op een chip	89
Het genoom van Gordon Moore	94
Een turbo op de ontwikkeling van nieuwe medicijnen	97
Een orgaan op een chip	101
Chips die gedachten lezen	103
Navigeren op de vleugels van Icarus	108
Het wonder van deze tijd	112

## **DE POKERCHIPS OP DE GEOPOLITIEKE**

<b>SPEELTAFEL</b>	117
Chips zijn niet de nieuwe olie	118
Alleen wie paranoïde is, overleeft	120
Het einde van de tovenaars	126
Mannen verliezen hun fabrieken	129
Made in China?	134
Het siliciumschild van Taiwan	138
De Chips Acts	140
Een Superlab in Vlaanderen	146
Het chiplabo van de wereld	150
Een zoektocht naar nieuwe evenwichten	155



<b>DE TOEKOMST VAN CHIPS</b>	159
De wet van Moore: nadert de houdbaarheidsdatum?	160
Drie ideeën die computers een nieuw tijdperk kunnen binnenloodsen	164
Wat chips kunnen leren van ons brein	166
De kwantumcomputer: een nieuwe manier van rekenen	169
De toekomst ligt in uw handen	175
Dankwoord	179
Eindnoten	181



# BESTE LEZER

---

**W**e hebben lang getwijfeld over de ondertitel van het boekje dat u nu in handen heeft. Digitale technologie verandert in een duizelingwekkende snelheid de wereld om ons heen, maar het is de mens die aan de wieg staat van deze veranderingen. Om de wereld te veranderen hebben mensen hulpmiddelen ontworpen: het wiel, de drukpers, de stoommachine enzovoort. De voorbije honderd jaar is de wereld sneller veranderd dan ooit tevoren. Moderne computers, mobiele telefoons en artificiële intelligentie ontstonden nadat mensen een ingenieuze manier gevonden hadden om kleine elektronische schakelaartjes te maken in dunne plakjes silicium. Deze bouwblokken, die we 'chips' noemen, zorgen ervoor dat we informatie steeds beter kunnen verwerken, opslaan en verzenden.

Deze eeuw staan ons nóg ingrijpendere veranderingen te wachten. Even hebben we met het idee gespeeld om de ondertitel van dit boek optimistischer uit te drukken: 'hoe digitale technologie de wereld verbetert'. We zijn

immers van oordeel dat de digitale revolutie onze manier van werken, leren en leven de voorbije eeuw niet alleen veranderd heeft, maar ook wezenlijk verbeterd heeft. Maar zoals iedere belegger weet: in het verleden behaalde resultaten bieden geen garantie voor de toekomst. Chips zijn zonder twijfel de bouwstenen van een maatschappelijke revolutie. De beloften zijn groot, maar de ethische, socio-economische en geopolitieke implicaties zijn dat ook. Hoe digitale technologie in de toekomst zal worden ingezet, hangt – opnieuw – af van mensen: van onderzoekers, van ondernemers, van beleidsmakers, van ons allemaal. Wie begrijpt hoe chiptechnologie de wereld verandert, kan die toekomst beter vormgeven. Met dit boekje willen we u daar wat inzichten in bieden.

Veel leesplezier,  
Jan Rabaey en Pieter Van Nuffel

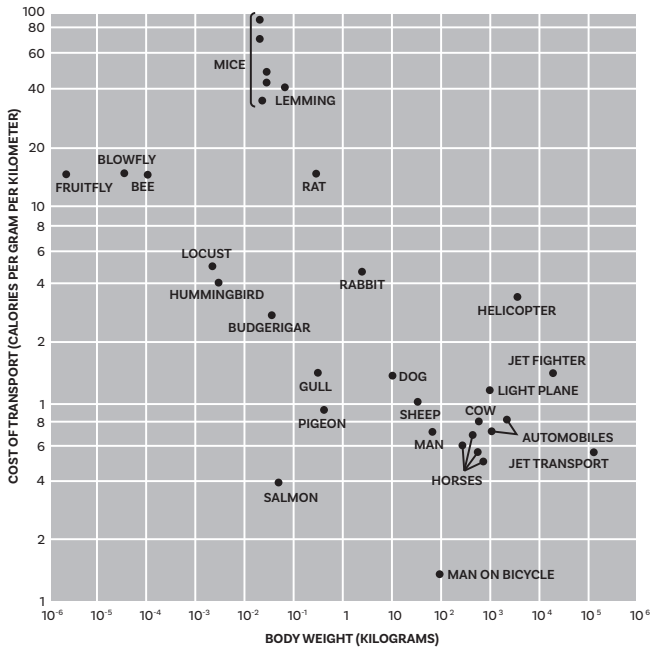
# DE DIGITALE REVOLUTIE

---

**D**e mens is een merkwaardig beestje. Een van de manieren waarop de homo sapiens zich onderscheidt van andere dieren, is door technologie te ontwikkelen om problemen op te lossen en de omgeving te manipuleren. Vergelijken we hoe energie-efficiënt dieren van punt A naar punt B bewegen, dan prijkt de mens niet bovenaan in de rangschikking. Maar wat als we een mens op een fiets zouden zetten? Dan laat die fietser zowat alle andere diersoorten op deze planeet ver achter zich. Een mens op een fiets verbruikt amper 0,15 calorieën per gram per kilometer. Dat was al in 1973 in het populairwetenschappelijk tijdschrift *Scientific American* te lezen. Het bijbehorende grafiekje liet zien hoe een mens op een fiets het paard, de zalm en de duif overtroeft.

Dat grafiekje liet een blijvende indruk na op de toen achttienjarige Steve Jobs. De legendarische oprichter van Apple verwees er in de jaren 1980 meermaals naar.<sup>1</sup> Voor Jobs illustreerde het de menselijke eigenschap om aan

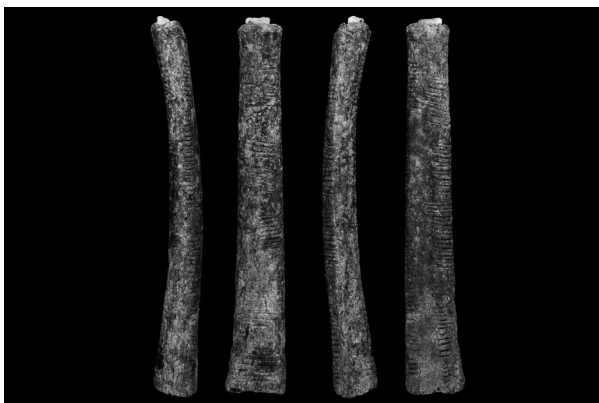
de hand van uitvindingen de beperkingen van de natuur te omzeilen. ‘Een van de dingen die ons onderscheidt van de hogere primaten is dat we tool-bouwers zijn’, zei hij. En de mens ontwerpt niet alleen hulpmiddelen om zich sneller te verplaatsen, maar ook om sneller informatie te verwerken. ‘De computer is voor mij het meest opmerkelijke hulpmiddel dat we ooit hebben bedacht’, ging Jobs verder. ‘De computer is als een fiets voor de geest.’



**MAN ON A BICYCLE** ranks first in efficiency among traveling animals and machines in terms of energy consumed in moving a certain distance as a function of body weight. The rate of energy consumption for a bicyclist (about .15 calorie per gram per kilometer) is approximately a fifth of that for an unaided walking man (about .75 calorie per gram per kilometer). With the exception of the black point representing the bicyclist (lower right), this graph is based on data originally compiled by Vance A. Tucker of Duke University.

## DE PREHISTORIE

De moderne computer was niet het eerste hulpmiddel om informatie te verwerken. Al lang voor het begin van onze jaartelling gebruikte de homo sapiens allerhande telssystemen. Het Ishango-beentje, te bewonderen in het Museum voor Natuurwetenschappen in Brussel, is daar de oudste getuige van. Dat kuitbeen van een baviaan, opgegraven in het Congolese Ishango en gedateerd op 22.000 jaar oud, vertoont allerlei inkervingen. In de manier waarop de lijntjes gegroepeerd zijn, lijkt een zekere logica te zitten.<sup>2</sup> Daarom zijn archeologen en wiskundigen de kerfstok uit Ishango gaan bestempelen als de oudste wiskundige vondst van de mensheid. Later gebruikte de mens ook abrikozenpitten, schelpjes, stokjes of kiezelsteentjes om getallen of verhoudingen bij te houden. De term 'calculus' vindt niet toevallig zijn oorsprong in het Latijnse woord voor 'steentjes'.



*Het Ishango-beentje, de oudste wiskundige vondst van de mensheid. © Instituut voor Natuurwetenschappen*

Maar steentjes zijn niet altijd voorhanden. Het lag voor de hand dat mensen hun eigen lichaam gingen gebruiken om te tellen. De Yupno-bevolking in Papoea-Nieuw-Guinea telt niet alleen op de vingers, maar ook op de tenen, op de tepels, de navel, de testikels en de penis!<sup>3</sup>. Andere volkeren gebruiken hun duim om de twaalf vingerkootjes op de rest van de hand te tellen. Het Chepang uit Nepal is een van de weinig overblijvende talen waarin het twaalftalig stelsel vandaag nog voorkomt. Kleitabletten uit het vroegere Mesopotamië tonen dan weer dat de Soemeriërs (en later ook de Babyloniërs) rekenden in een spijkerschrift dat uit zestig verschillende symbolen bestond. Dat zestigtalig stelsel leeft tot vandaag voort in onze tijdsmeting: een uur telt zestig minuten en een minuut telt zestig seconden. Maar het zouden uiteindelijk onze tien vingers zijn die de vroege voorloper van de digitale revolutie vormden. De term 'digitaal' is niet toevallig afgeleid van *digitus*, het Latijnse woord voor 'vinger'. De Romeinen noteerden voor iedere macht van tien een ander symbool (X, C, M). Romeinse handelaars en tollenaars maakten berekeningen aan de hand van een draagbaar decimaal telraam. De Indiërs gebruikten eveneens het decimale talstelsel, maar lieten in tegenstelling tot de Romeinen de ordegraad bepalen door de positie van het symbool. Het laatste cijfer stelt het aantal eenheden voor, het voorlaatste cijfer het aantal tientallen, het cijfer

---

I Hoe Yupno-vrouwen tellen is niet bekend. De antropologen die dat telsysteem in de jaren 1990 onderzochten, besloten enkel mannen op te nemen in hun sample, omdat vrouwen in de Yupno-cultuur niet in het openbaar zouden mogen tellen.



daarvoor toont het aantal honderdtallen, enzovoort. De Arabieren namen dat telsysteem al snel over.

## VAN TELRAAM TOT COMPUTER

In de zeventiende eeuw, toen de Indisch-Arabische cijfers ook in Europa gemeengoed waren geworden, ontstonden de eerste mechanische rekenmachines. 'Het is beneden de waardigheid van voorname mannen om hun tijd te verspillen met rekenen, terwijl elke boer het werk net zo nauwkeurig zou kunnen doen met de hulp van een machine', schreef de Duitse wiskundige Gottfried Wilhelm Leibniz.<sup>4</sup> Hij ontwierp een cilinder met daarop tien tandingen die in lengte varieerden en de cijfers 0 tot en met 9 voorstelden. Afhankelijk van het ingestelde getal konden die tandingen verschillende tandwielen in beweging zetten.<sup>5</sup> Het Leibniz-wiel was zo ingenieus dat de constructie niet alleen gebruikt kon worden om decimale getallen op te tellen of af te trekken, maar ook om te delen of te vermenigvuldigen. Leibniz slaagde er uiteindelijk niet in om zijn prototype om te zetten in een vlot werkend apparaat, maar anderen deden dat wel. Twee eeuwen na zijn dood zat de uitvinding van Leibniz in zowat iedere mechanische rekenmachine.

Leibniz had nog een ander idee waarmee hij zijn tijd ver vooruit was. Hij stelde getallen binair voor: in de vorm van nulletjes en eentjes. Die nulletjes en eentjes, vandaag 'bits' genoemd, vormen de taal van de digitale wereld waarin wij leven. Leibniz liet zich inspireren door *Het Boek der Veranderingen* – een eeuwenoude Chinese

tekst, bekend van de filosofie rond yin en yang. Hij zag in binaire getallen de ‘meest fundamentele manier om wetenschappelijk te rekenen’.<sup>6</sup> Hij fantaseerde zelfs al over een binaire rekenmachine. Die moest niet opgebouwd worden uit wielen en cilinders, maar uit gaten en bewegende knikkers. ‘De gaten moeten open zijn op de plaatsen die overeenkomen met een 1, en gesloten blijven op de plaatsen die overeenkomen met een 0’, schreef hij.<sup>7</sup> Die methode moest volgens Leibniz ‘gemakkelijk uit te voeren zijn’, maar het bleef bij een idee dat hij nooit verwezenlijkte. De ideeën van visionaire geesten komen wel vaker op momenten dat de technologische mogelijkheden nog ontbreken.

Nog zo iemand die haar tijd ver vooruit was, was Ada Lovelace. Ada werd in 1815 geboren in Engeland, de bakermat van de industriële revolutie. Het was een tijd waarin mechanische weefgetouwen de plaats innamen van handwevers. Ada’s jeugd was op zijn zachtst gezegd ongebruikelijk. Ze was de dochter van Lord Byron, een dichter die beroemd was door zijn literaire rebellie. Haar vader was ook een van de weinigen die de verdediging opnam van de luddieten. Die Engelse ambachtslieden zagen hun traditionele manier van werken bedreigd door de komst van mechanische weefmachines. In ‘Song for the Luddites’ moedigde Lord Byron hen aan tot verzet. De luddieten trokken er ’s nachts op uit om de moderne weefmachines kort en klein te slaan.

De ironie wil dat de nieuwe weeftechnologie een belangrijke rol zou gaan spelen in het leven van Lovelace. Ada’s

moeder wilde haar zo ver mogelijk weghouden van het onberekenbare karakter van haar vader. In plaats daarvan spoorde ze haar dochter aan om zich te verdiepen in wiskunde en logica. Dat was vrij uitzonderlijk in een tijd waarin vrouwen geen kansen kregen om zich wetenschappelijk te ontplooien. Ada raakte gefascineerd door machines. Niet zozeer door de bedreigingen ervan, zoals haar vader, maar door de mogelijkheden.

Begin 19de eeuw was de Fransman Joseph-Marie Jacquard erin geslaagd om weefgetouwen automatisch aan te sturen door middel van kaarten waarin gaatjes geponst waren. Later werden die ponskaarten ook gebruikt in muziekdoosjes en draaiorgels. Het weefgetouw van Jacquard en het rekenwiel van Leibniz inspireerden de Britse wiskundige Charles Babbage om een 'analytische machine' te ontwerpen. Dat zou niet zomaar een rekenmachine worden. Het zou de eerste machine worden die met ponskaarten geprogrammeerd kon worden om verschillende rekentaken uit te voeren. Ada Lovelace zag daar al snel de poëzie van in. 'De analytische machine kan algebraïsche patronen weven zoals een jacquard-machine bloemen en bladeren kan weven', schreef ze. Lovelace raakte bevriend met Babbage en werkte mee aan de ontwikkeling van de revolutionaire machine.

In haar aantekeningen schetste ze zelfs al een algoritme dat, wanneer de machine klaar was, wiskundige getallenreeksen zou kunnen genereren. Dat uitgeschreven plan wordt nu beschouwd als het allereerste computerprogramma. Maar daar stopte het niet voor Lovelace. Het

drong tot haar door dat de analytische machine ook niet-wiskundige taken zou kunnen uitvoeren. 'Het zou ook kunnen werken op andere dingen dan getallen, als er objecten gevonden zouden worden waarvan de onderlinge fundamentele relaties uitgedrukt zouden kunnen worden door die van de abstracte wetenschap van bewerkingen', schreef ze. 'Stel bijvoorbeeld dat de fundamentele relaties van klanken in de wetenschap van harmonie en muzikale compositie kunnen worden omgezet in zulke uitdrukkingen, dan zou de machine uitgebreide en wetenschappelijke muziekstukken van elke complexiteit en omvang kunnen componeren.'<sup>8</sup> Met andere woorden: de machine zou muziek kunnen componeren. Wat zou haar vader daarvan gedacht hebben?

Charles Babbage maakte de gedachtesprong van een rekenmachine naar een programmeerbare computer zoals we die vandaag kennen. Ada Lovelace durfde nog een stap verder te gaan. Ze begreep als eerste dat de mogelijkheden van een dergelijke machine niet beperkt bleven tot berekeningen, maar dat je er ook andere symbolen mee kunt manipuleren. Dat idee ligt aan de basis van de digitale revolutie: ieder stukje informatie (muziek, tekst, beelden, DNA...) kan door machines verwerkt worden. Ada's inzicht in de mogelijkheden van een analytische machine ging het voorstellingsvermogen van haar tijdgenoten te boven.

Uiteindelijk slaagden Babbage en Lovelace er nooit in om een werkend prototype te demonstreren aan de mensen uit hun tijd. Het was praktisch ondoenbaar om