

design your future

## Computernetwerken

studiegebied  
handelswetenschappen en bedrijfskunde

*bachelor*

*toegepaste informatica*

1<sup>ste</sup> jaar



# Hoofdstuk 1

## Computernetwerken en het internet

Het huidige internet is waarschijnlijk het allergrootste door de mens gemaakte systeem, waarin honderden miljoenen computers, communicatielinks en switches met elkaar verbonden zijn, met miljarden gebruikers die via laptops, tablets en mobiele telefoons in verbinding staan met dat systeem en met een hele verzameling nieuwe met het internet verbonden 'dingen' zoals gameconsoles, bewakingssystemen, smartwatches, brillen met ingebouwde computertjes, thermostaten, sensoren en auto's. Deze technologie van met het internet verbonden dingen wordt Internet of Things (IoT) genoemd. Gezien de omvang van het internet en de vele facetten van de verschillende componenten en applicaties, vraag je jezelf misschien af of het überhaupt wel mogelijk is om te begrijpen hoe het werkt. Zijn er basisprincipes en structuren die als fundament kunnen dienen om zo'n verbazingwekkend groot en complex systeem te begrijpen? En zo ja, kan het behalve interessant ook leuk zijn om meer te weten te komen over computernetwerken? Gelukkig is het antwoord op deze vragen een luid en duidelijk JA! Het is inderdaad onze bedoeling om je, aan de hand van een moderne introductie van de dynamische wereld van computernetwerken, de onderliggende principes en praktische inzichten bij te brengen die je nodig hebt om niet alleen de netwerken van vandaag maar ook die van morgen te kunnen begrijpen.

In het eerste hoofdstuk maken we kennis met computernetwerken in het algemeen en het internet in het bijzonder. We schetsen hierin een breed beeld om door de bomen het bos te ontdekken. In dit redelijk algemene, inleidende hoofdstuk maken we kennis met een aantal essentiële delen van een computernetwerk, maar we verliezen ondertussen het complete plaatje niet uit het oog. Dit hoofdstuk vormt het fundament van de rest van het boek.

Veel terminologie bij computernetwerken stamt uit het Engels. Om zoveel mogelijk aan te sluiten op de internationaal gangbare termen en literatuur op het gebied van computernetwerken, is ervoor gekozen de Engelstalige termen te gebruiken tenzij er al een duidelijk ingeburgerd Nederlandstalig alternatief bestaat. Bij de introductie van zo'n term zal tussen haakjes een Nederlandstalig alternatief gegeven worden. Omgekeerd wordt ook bij Nederlandstalige termen hier en daar de Engelstalige term tussen haakjes meegegeven.

Het overzicht is in dit hoofdstuk als volgt gestructureerd. Na een kennismaking met wat elementaire terminologie en de basisconcepten bespreken we de elementaire hardware- en softwarecomponenten waaruit een netwerk bestaat. We beginnen bij de hosts aan de edge (rand) van het netwerk en bekijken de netwerkapplicaties die in het netwerk worden

uitgevoerd. Daarna kijken we naar de core (kern) van een computernetwerk, waarbij de communicatielinks (verbindingen of links) en de switches aan bod komen die gegevens transporteren, en de toegangsnetwerken (access networks) en fysieke media die de hosts verbinden met de core van het netwerk. We zullen zien dat het internet een netwerk van netwerken is en bekijken hoe deze netwerken met elkaar in verbinding staan.

Nadat we zowel de edge als de core van een computernetwerk hebben bekeken, wordt het overzicht in de tweede helft van dit hoofdstuk breder en abstracter. We onderzoeken de oorzaken van vertragingen en verliezen en doorvoer van gegevens in een computernetwerk en bekijken eenvoudige kwantitatieve modellen voor end-to-end-doorvoer en -vertraging die rekening houden met wat in het vakjargon bekend staat als transmission-, propagation- en queuing delays. Vervolgens maken we kennis met de belangrijkste opbouwprincipes in netwerken, met name de gelaagde opbouw en servicemodellen. Ook ontdekken we dat computernetwerken kwetsbaar zijn voor allerlei soorten aanvallen. We onderzoeken er een aantal en bekijken hoe computernetwerken beter beveiligd kunnen worden. We beëindigen de inleiding met een beknopte geschiedenis van computernetwerken.

## 1.1 Wat is het internet?

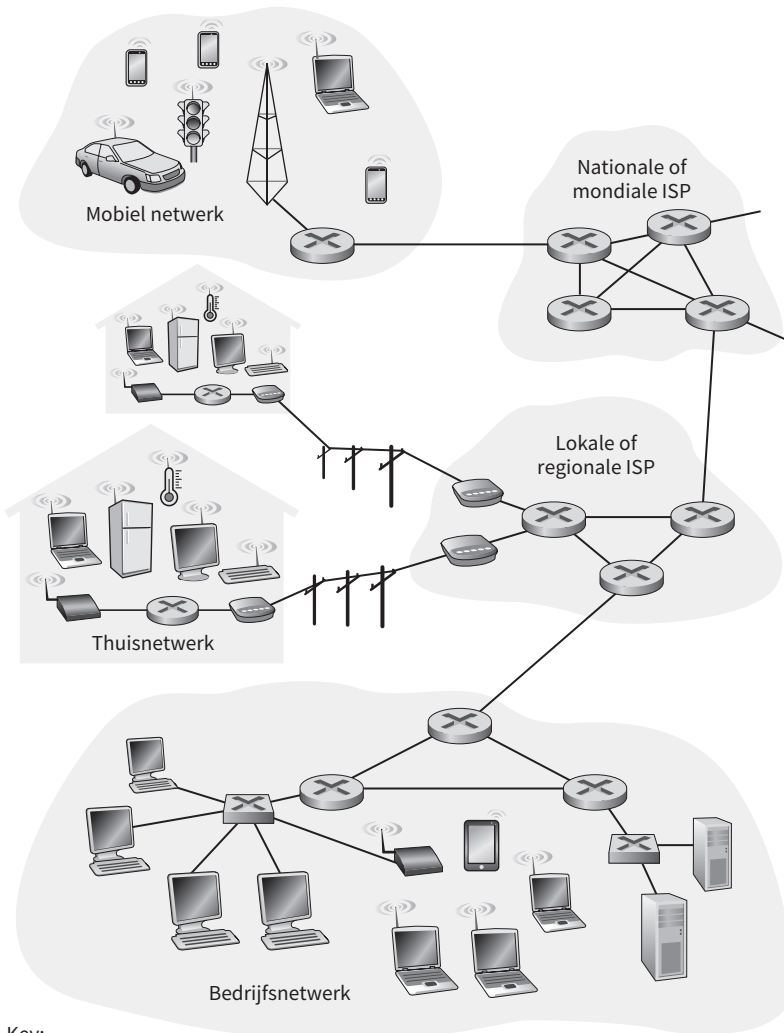
In dit boek gebruiken we het publiek toegankelijke internet, een specifiek computernetwerk, als uitgangspunt bij de bespreking van computernetwerken en de protocollen waarmee ze werken. Maar wat is het internet? Er is een aantal manieren om deze vraag te beantwoorden. Eén manier is simpelweg beschrijven waaruit het internet bestaat: de principiële hardware- en softwarecomponenten waaruit het internet is opgebouwd. Een andere manier is door het internet te beschrijven als een netwerkinfrastructuur die diensten verleent aan gedistribueerde applicaties. We beginnen met de elementaire beschrijving aan de hand van afbeelding 1.1.

### 1.1.1 Een elementaire beschrijving

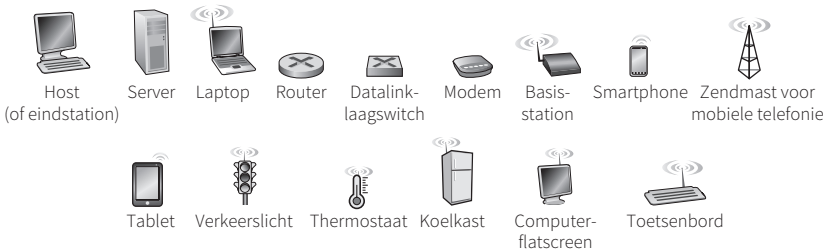
Het internet is een computernetwerk dat miljarden computers over de hele wereld met elkaar verbindt. Nog niet eens zo lang geleden waren dat voornamelijk traditionele desktopcomputers, Linux-werkstations en zogenaamde servers die informatie zoals webpagina's en e-mailberichten opsloegen en verstuurden. In toenemende mate zien we dat naast laptops, smartphones en tablets ook niet-traditionele dingen zoals tv's, gameconsoles, thermostaten, beveiligingssytemen, huishoudelijke apparatuur, horloges en brillen, auto's, verkeersinformatiesystemen en nog veel meer worden verbonden met het internet. De term *computernetwerk* lijkt inderdaad een beetje achterhaald als we kijken naar het enorme aantal niet-traditionele apparaten dat aan het internet wordt gekoppeld. In internetjargon worden al deze apparaten **hosts** of **eindsystemen** genoemd. Sommige schattingen geven aan dat in 2015 ongeveer 5 miljard devices met het internet verbonden waren en dat dit aantal zal groeien naar 25 miljard in 2020 [Gartner 2014]. Geschat wordt dat er in 2015 wereldwijd 3,2 miljard internetgebruikers waren, ongeveer 40% van de wereldbevolking [ITU 2015].

Hosts zijn onderling met elkaar verbonden via een netwerk van **communicatielinks** en **packetswitches**. In paragraaf 1.4 zien we dat er veel soorten communicatieverbindingen zijn, die opgebouwd kunnen zijn uit verschillende typen fysieke media zoals coaxiale kabel, koperdraad, glasvezel en radiogolven. Verschillende links kunnen gegevens met verschillende snelheden verzenden. De **transmissiesnelheid** van een link wordt aangeduid in bits/seconde. Wanneer een host (eindsysteem) gegevens naar een andere host moet verzenden, segmenteert de verzendende host de gegevens en voegt aan elk segment headerbytes toe. De pakketten informatie die op die manier ontstaan, **packets** genaamd in het computernetwerkjargon, worden dan via het netwerk verzonden naar de bestemmingshost, waar ze opnieuw samengesteld worden tot de oorspronkelijke gegevens. Een packetswitch neemt een packet aan op een van de ingaande communicatielinks en verstuurt deze informatie vervolgens via een van zijn uitgaande communicatielinks. Packetswitches zijn er in soorten en maten, maar de twee meest gebruikte varianten in het huidige internet zijn **routers** en **datalinklaagswitches**. Beide soorten switches sturen packets verder op het pad naar hun uiteindelijke bestemming. Datalinklaagswitches worden over het algemeen gebruikt in de toegangsnetwerken, terwijl routers meestal in de core van de netwerken worden toegepast. De reeks communicatielinks en packetswitches die een packet tussen de verzendende host en de ontvangende host passeert, noemen we een **pad** of **route** door het netwerk. Cisco stelt dat het jaarlijkse wereldwijde internetverkeer de zettabyte-drempel ( $10^{21}$  bytes) aan het einde van 2016 zal zijn gepasseerd en dat het rond 2019 2 zettabytes per jaar zal zijn [Cisco VNI 2015]. Netwerken met packetswitching (die packets transporteren) zijn in veel opzichten vergelijkbaar met een wegverkeersnetwerk dat bestaat uit snelwegen, wegen en kruisingen (waarover voertuigen getransporteerd kunnen worden). Stel je bijvoorbeeld een fabriek voor die een grote hoeveelheid vracht naar een magazijn duizenden kilometers verderop moet transporteren. In de fabriek wordt de partij vracht in kleinere stukken verdeeld (gesegmenteerd) en in een reeks vrachtwagens geladen. Alle vrachtwagens rijden dan, onafhankelijk van elkaar, over het netwerk van snelwegen, wegen en kruisingen om uiteindelijk op de bestemming – het magazijn – aan te komen. Daar wordt de vracht uitgeladen en opgeslagen bij de rest van de vracht van dezelfde zending. We kunnen packets in zekere zin vergelijken met vrachtwagens, communicatielinks met snelwegen en wegen, packetswitches met kruisingen en hosts met magazijnen. Op dezelfde manier als een vrachtwagen een route door het transportnetwerk volgt, volgt een packet een route door een computernetwerk.

Hosts krijgen toegang tot het internet via **internetserviceproviders (ISP's)** (internetaanbieders), zoals lokale kabel- of telefoonmaatschappijen voor thuisgebruikers, bedrijfs-ISP's, universiteits-ISP's, ISP's die wifi-toegang op luchthavens, in hotels en op andere openbare plaatsen aanbieden en op mobiele telefonie gebaseerde ISP's die mobiele toegang geven aan smartphones en andere draagbare devices. Elke ISP is een netwerk van packetswitches en communicatielinks. ISP's bieden een scala aan mogelijkheden voor netwerktoegang voor de hosts, waaronder breedbandtoegang thuis met behulp van een kabelmodem of DSL, supersnelle LAN-netwerktoegang en draadloze mobiele toegang. ISP's leveren ook internettoegang voor leveranciers van informatie (zogenoemde contentproviders) waardoor websites en videoservers direct met het internet verbonden zijn.



Key:



**AFBEELDING 1.1** Enkele componenten van het internet

Let op: bij datacommunicatie (waar we het in dit boek over hebben) is het gebruikelijk te werken met bits per seconde, mogelijk voorafgegaan door kilo (k), mega (M) of giga (G). Bij dataopslag en bestandsgroottes werkt men meestal met bytes, waarvoor soms (maar niet in dit boek) ook de afkorting b gebruikt wordt. Een byte is een groep van 8 bits. ISP's bieden ook contentproviders toegang tot het internet door hun websites er rechtstreeks

mee te verbinden. Het doel van het internet is het met elkaar verbinden van hosts. Dat betekent dat de ISP's die hosts toegang bieden zelf ook met elkaar verbonden moeten zijn. Deze ISP's aan de onderkant van de hiërarchie zijn met elkaar verbonden via nationaal en internationaal opererende eerstelaags-ISP's (Tier-1-ISP's), zoals Level 3 Communications, AT&T, Sprint en NTT. Een internationale ISP beschikt over snelle routers die via glasvezellinks met elkaar verbonden zijn. Het netwerk van elke ISP, of dat nu een internationaal of regionaal opererende ISP is, wordt door die ISP zelf onderhouden, gebruikt het IP-protocol (zie onder) en werkt met bepaalde naam- en adresconventies. We bekijken ISP's en de manier waarop ze met elkaar verbonden zijn nader in paragraaf 1.3. Hosts, packetswitches en andere 'onderdelen' van het internet, voeren **protocollen** uit waarmee het versturen en ontvangen van informatie binnen het internet wordt geregeld. Het **Transmission Control Protocol (TCP)** en het **Internet Protocol (IP)** zijn de twee belangrijkste protocollen voor het internet. Het IP-protocol bepaalt de indeling van de packets die worden verzonden en ontvangen tussen routers en hosts. Deze twee elementaire protocollen worden meestal aangeduid als **TCP/IP**. In dit inleidende hoofdstuk vind je meer informatie over protocollen. Maar dat is nog maar het begin: het grootste deel van dit boek gaat over netwerkprotocollen!

Gezien het belang van protocollen voor het internet is het belangrijk dat er overeenstemming is over datgene wat elke partij en elk protocol doet, zodat mensen systemen en producten kunnen maken die met elkaar samenwerken. Dit is dan ook de reden dat er standaarden ontwikkeld zijn. **Internetstandaarden** worden ontwikkeld door de Internet Engineering Task Force (IETF) [IETF 2016]. De documenten waarin de IETF-standaarden worden gepubliceerd heten **RFC's** (request for comments/verzoek om commentaren). De RFC's waren eerst bedoeld als algemeen verzoek om commentaren (vandaar de naam) om netwerk- en protocolontwerpproblemen op te lossen die optraden bij de voorloper van het internet [Allman 2011]. RFC's zijn over het algemeen erg technisch en gedetailleerd. Ze beschrijven protocollen zoals TCP, IP, HTTP (voor het web) en SMTP (voor e-mail). Er zijn op dit moment meer dan 7000 RFC's. Er zijn ook andere instanties die standaarden specificeren voor netwerkcomponenten (meestal netwerklinks). Het IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee [IEEE 802 2016] specificeert bijvoorbeeld de standaarden voor Ethernet en WiFi.

### 1.1.2 Een beschrijving van de diensten

In de vorige paragraaf is het grootste deel van de onderdelen die samen het internet vormen besproken. Maar we kunnen het internet ook vanuit een andere hoek beschrijven, namelijk als *een infrastructuur die diensten aan applicaties levert*. Naast traditionele applicaties zoals e-mail en websurfen, horen bij internetapplicaties ook mobiele smartphone- en tabletapplicaties, inclusief internetmessaging, routeplanning met realtime informatie over verkeersdichtheid, muziek-streaming vanuit de cloud, film- en televisie-streaming, online social media, videoconferencing, multiplayer games en systemen die plaats- of situatiegerelateerde informatie geven. De applicaties worden **gedistribueerde applicaties** genoemd, omdat er sprake is van verschillende hosts die gegevens met elkaar uitwisselen. Het is belangrijk om te bedenken dat internetapplicaties op hosts uitgevoerd worden; ze worden niet op packetswitches in de core van het netwerk uitgevoerd.

Hoewel ze het wel mogelijk maken dat gegevens tussen hosts uitgewisseld worden, is het packetswitches om het even welke applicatie de bron of bestemming van de gegevens is. Laten we eens beter kijken wat een infrastructuur is die diensten aan applicaties verleent. Stel dat je een nieuw idee hebt voor een gedistribueerde internetapplicatie. De vraag is hoe je van dit idee een concrete internetapplicatie maakt. Omdat applicaties op hosts uitgevoerd worden, zul je programma's moeten ontwikkelen die uitgevoerd kunnen worden op die hosts. Je zou bijvoorbeeld kunnen programmeren in Java, C, C++ of Python. Maar omdat je een gedistribueerde internetapplicatie ontwikkelt, zullen de programma's die op de verschillende hosts worden uitgevoerd gegevens met elkaar moeten kunnen uitwisselen. En daarmee komen we op een essentieel punt waarvoor we een andere manier moeten gebruiken om het internet te beschrijven: als een platform voor applicaties. Hoe instrueert een programma dat op een host wordt uitgevoerd het internet om gegevens af te leveren bij een ander programma dat op een host wordt uitgevoerd?

Hosts die verbonden zijn met het internet werken met een zogenaamde **socket interface** die specificeert hoe een programma dat op een host wordt uitgevoerd aan de internetinfrastructuur kan vragen om gegevens af te leveren op een specifieke bestemming (bij een programma dat op een andere host uitgevoerd wordt). Deze internet-socket interface is een verzameling regels waaraan het verzendende programma moet voldoen zodat het internet de gegevens bij het ontvangende programma op de bestemming zal kunnen afleveren. We bespreken de internet-socket interface uitgebreid in hoofdstuk 2. We bekijken nu een eenvoudige analogie die nog een aantal keren in dit boek zal terugkomen. Stel dat Alice een brief naar Bob wil sturen via de post. Alice kan in dat geval niet de brief schrijven en die vervolgens zo uit het raam gooien. De postdienst kan alleen zijn werk doen als Alice de brief in een envelop doet, Bobs volledige naam, adres en postcode op de voorkant van de envelop schrijft, de envelop sluit, er in de rechterbovenhoek boven Bobs naam een postzegel op plakt en vervolgens de envelop in een officiële brievenbus stopt. De postdienst heeft dus een eigen 'postdienst-interface': een verzameling regels waaraan Alice moet voldoen om de postdienst de brief bij Bob af te laten leveren. Op dezelfde manier bestaat de internet-socket interface uit een verzameling regels waaraan een verzendend programma moet voldoen. Alleen zo zal het internet de gegevens bij het ontvangende programma op de bestemming kunnen afleveren.

De postdienst levert natuurlijk meer dan één dienst aan zijn klanten. Denk bijvoorbeeld aan exprespost, post met bericht van bezorging en gewone postbezorging. Op een vergelijkbare manier levert het internet verschillende diensten aan applicaties. Wanneer je een internetapplicatie ontwikkelt, moet je een keuze maken uit de diensten die het internet aan jouw applicatie kan leveren. We beschrijven de diensten van het internet in hoofdstuk 2.

We hebben zojuist twee omschrijvingen van het internet gezien: de ene is gebaseerd op de gebruikte hardware- en softwarecomponenten en de andere op de infrastructuur voor het leveren van diensten aan gedistribueerde applicaties. Maar misschien vind je het allemaal maar verwarrend. Wat zijn packetswitching en TCP/IP? Wat zijn routers? Welke soorten communicatielinks worden gebruikt voor het internet? Wat is een gedistribueerde applicatie? Hoe kan een thermostaat of een sensor voor bijvoorbeeld hartslagmeting gekoppeld worden aan het internet? Het is niet nodig om je hier nu zorgen over te

maken – het doel van dit boek is om je kennis te laten maken met de onderdelen van het internet. Daarnaast gaan we in op de basisprincipes van de werking van het internet. We verklaren deze belangrijke termen en vragen in de volgende paragrafen en hoofdstukken.

### 1.1.3 Wat is een protocol?

Nu je een indruk hebt gekregen van wat het internet is, kunnen we verdergaan met een ander woord dat steeds terugkeert: *protocol*. Wat is een protocol? Waarvoor dient een protocol? Hoe herken je een protocol als je er een tegenkomt?

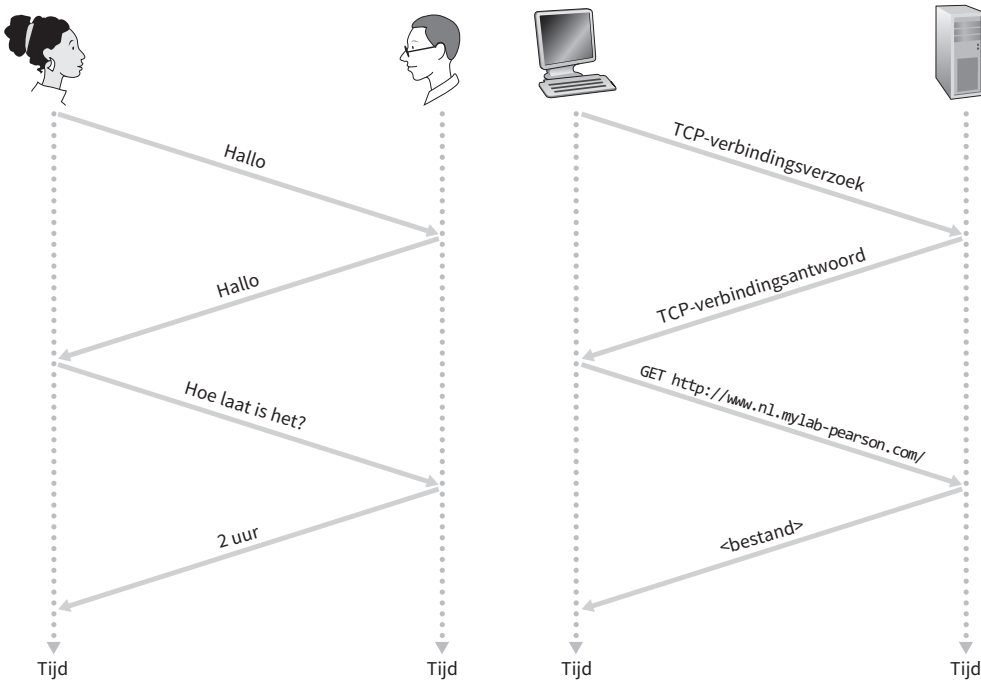
#### *Een menselijke analogie*

Het is waarschijnlijk het eenvoudigst om het wezen van een computernetwerkprotocol te doorgronden aan de hand van een vergelijking met menselijke interactie. Laten we analyseren wat er gebeurt wanneer je iemand vraagt hoe laat het is. In afbeelding 1.2 zie je deze interactie schematisch weergegeven. Wanneer we goede omgangsvormen veronderstellen, zal de eerste persoon de tweede eerst begroeten (de eerste ‘Hallo’ in afbeelding 1.2) om de communicatie met de ander op gang te brengen. Meestal zal iemand die het bericht ‘Hallo’ ontvangt, daarop reageren met een ander ‘Hallo’-bericht. Impliciet gaat de eerste persoon door het vriendelijke antwoord ‘Hallo’ ervan uit dat hij verder kan gaan met zijn vraag. Een ander antwoord op het eerste ‘Hallo’ (zoals ‘Laat me met rust’ of ‘Sorry, I don’t speak Dutch’) zou erop duiden dat de ander niet wil of kan communiceren. In dit geval zou het menselijke protocol voorschrijven om niet verder te gaan met de vraag. Soms krijgt iemand helemaal geen antwoord op een vraag, waardoor de vrager helemaal afziet van verdere communicatie. Merk op dat er in het menselijke protocol *specifieke berichten zijn die we verzenden en specifieke reacties die we uitvoeren wanneer we berichten ontvangen of zich andere gebeurtenissen hebben voorgedaan* (zoals geen reactie binnen een bepaalde tijd). Het zal duidelijk zijn dat verzonden en ontvangen berichten, alsmede de reacties op deze berichten en het optreden van andere gebeurtenissen, een belangrijke rol spelen in een menselijk protocol. Wanneer mensen verschillende protocollen gebruiken (bijvoorbeeld wanneer de een goede manieren heeft maar de ander niet, of wanneer de een het concept tijd begrijpt maar de ander niet), dan zullen deze protocollen niet samenwerken en kan er geen sprake zijn van zinnige communicatie. Hetzelfde geldt in netwerken: twee (of meer) communicerende entiteiten moeten hetzelfde protocol gebruiken om een bepaalde taak te kunnen uitvoeren.

Laten we een tweede menselijke analogie bekijken. Stel dat je in een collegezaal zit (en bijvoorbeeld een college over computernetwerken volgt). De docent spreekt steeds over protocollen en je bent aan het nadenken. De docent stopt en zegt: ‘Zijn er nog vragen?’ (een bericht dat wordt verzonden aan, en wordt ontvangen door, alle studenten die niet zitten te slapen). Je steekt je hand op (waarmee je een impliciet bericht verzendt aan de docent). Je docent beantwoordt dit met een minzame glimlach en zegt: ‘Ja...’ (een verzonden bericht waarmee je wordt aangemoedigd om je vraag te stellen – docenten vinden het fantastisch wanneer ze vragen krijgen). Vervolgens stel je je vraag (dat wil zeggen: je verzendt je bericht aan de docent). Je docent hoort je vraag (ontvangt je vraagbericht) en geeft antwoord (verzendt een antwoord aan jou). Ook hier zien we weer dat het verzenden



en ontvangen van berichten, en een reeks conventionele reacties wanneer deze berichten worden verzonden en ontvangen, de basis vormen van het vraag-en-antwoordprotocol.



AFBEELDING 1.2 Een menselijk protocol en een computernetwerkprotocol

### Netwerkprotocollen

Een netwerkprotocol lijkt erg op een menselijk protocol, behalve dat de entiteiten die berichten uitwisselen en reageren hardware- of softwarecomponenten zijn van een apparaat (bijvoorbeeld een computer, smartphone, tablet, router of ander apparaat dat in een netwerk opgenomen kan worden). Alle activiteiten op het internet waarbij twee of meer communicerende entiteiten op afstand betrokken zijn, worden uitgevoerd volgens een protocol. In hardware geïmplementeerde protocollen in twee fysiek met elkaar verbonden computers regelen bijvoorbeeld de doorstroming van bits over de 'draad' tussen de twee netwerkkaarten; protocollen in hosts die congesties (opstoppingen, congestions) moeten regelen, bepalen de snelheid waarmee packets tussen verzenders en ontvangers mogen worden verzonden; protocollen in routers schrijven het pad voor van een packet van de bron naar de bestemming. Protocollen zijn alomtegenwoordig op het internet en daarom gaat dit boek dan ook voornamelijk over netwerkprotocollen.

Een voorbeeld van een computernetwerkprotocol dat je waarschijnlijk wel kent: bedenk wat er gebeurt wanneer je een verzoek doet aan een webserver, bijvoorbeeld wanneer je de URL van een webpagina in je browser intikt. Het scenario is weergegeven aan de rechterzijde van afbeelding 1.2. Eerst zal je computer een verbindingsaanvraag (jargon: connection request-bericht) verzenden naar de webserver en vervolgens wachten op een antwoord. De webserver zal op een bepaald moment jouw connection request-bericht ontvangen en een verbindingsantwoord (jargon: connection reply-bericht) verzenden.

Nu jouw computer weet dat het toegestaan is om een webdocument op te vragen, zal de computer de naam van de gewenste webpagina verzenden in een GET-bericht. Ten slotte verzendt de webserver de inhoud van de webpagina naar jouw computer.

Net als bij de voorbeelden van de menselijke communicatie en de netwerkcommunicatie vormen de uitwisseling van berichten en de reacties wanneer deze berichten worden verzonden en ontvangen de belangrijkste elementen van een protocol:

*In een **protocol** worden het formaat en de volgorde van de berichten gedefinieerd die tussen twee of meer communicerende entiteiten worden uitgewisseld en de reacties bij het verzenden en/of ontvangen van een bericht of andere gebeurtenis.*

Het internet, en computernetwerken in het algemeen, maakt op grote schaal gebruik van protocollen. Om verschillende communicatietaken uit te voeren, worden verschillende protocollen gebruikt. Als je dit boek verder doorleest, zul je merken dat sommige protocollen erg eenvoudig en eenduidig zijn, terwijl andere complex en intelligent zijn. Wanneer je een expert wilt worden op het gebied van computernetwerken zul je het wat, waarom en hoe van netwerkprotocollen goed moeten begrijpen.

## 1.2 De edge van het netwerk

In de vorige paragraaf hebben we je een algemeen overzicht van internet en netwerkprotocollen gegeven. We bekijken nu de verschillende componenten van een computernetwerk (en vooral van het internet). We beginnen in deze paragraaf aan de edge van het netwerk en bekijken de componenten die we het beste kennen: de computers, smartphones en andere apparaten die we dagelijks gebruiken. In de volgende paragraaf verplaatsen we ons vanaf de edge naar het hart van het netwerk en bespreken we switching en routing (padbepaling, routing) in computernetwerken.

### CASUS

#### INTERNET OF THINGS

Kun je jezelf een wereld voorstellen waarin alles draadloos met het internet verbonden is? Een wereld waarin vrijwel alle mensen, auto's, fietsen, brillen, horloges, speelgoed, ziekehuisapparatuur, sensoren in huis, klaslokalen, videobewakingssystemen, weer-sensoren, artikelen in de winkel en huisdieren met het internet verbonden zijn. Dit is de wereld van het Internet of Things (IoT) en die is feitelijk realiseerbaar. Volgens sommige schattingen waren er in 2015 al 5 miljard dingen op het internet aangesloten en dit zou kunnen groeien tot 25 miljard in 2020 [Gartner 2014]. Hier horen ook de onafscheidelijke smartphones bij die we bij ons dragen in huis, op kantoor en in de auto en daarbij onze geolocaties rapporteren en het dataverbruik van onze ISP's en applicaties. Naast de smartphones zijn er al een heleboel niet-traditionele dingen beschikbaar als product. Er bestaan bijvoorbeeld internet-connected wearables (dingen die je draagt of bij je draagt) zoals horloges (van Apple en vele andere leveranciers) en brillen. Internet-connected brillen kunnen bijvoorbeeld alles wat we zien uploaden naar de cloud en stellen ons zo

in staat onze visuele ervaringen in realtime te delen met mensen over de hele wereld. Voor thuis (in onze smarthome) zijn er internet-connected apparaten beschikbaar zoals thermostaten die via onze smartphones in te stellen zijn en Internet-connected personenweegschalen waarmee we grafieken van het effect van ons dieet op onze smartphones kunnen zien. Er is internet-connected speelgoed zoals poppen die de spraak van kinderen herkennen en deels begrijpen en daarop op gepaste wijze reageren.

Het IoT biedt enorme voordelen voor de gebruikers maar tegelijkertijd is er ook een hoog risico op het gebied van veiligheid en privacy. Zo kunnen kwaadwillende figuren via het internet IoT devices hacken of servers hacken waar alle gegevens van de IoT devices opgeslagen worden. Een aanvaller kan bijvoorbeeld een internet-connected pop hacken en met een kind dat met de pop speelt een direct gesprek aangaan. Ook kan een aanvaller databases met persoonlijke gegevens, zoals medische informatie of informatie die door wearables is opgeslagen, hacken. Deze veiligheids- en privacyproblemen zouden het vertrouwen kunnen ondermijnen dat nodig is voor de acceptatie van deze technologieën en aldus een wijdverspreid gebruik tegenhouden [FTC 2015].

Eerder hebben we gezien dat in computernetwerkjargon de computers en andere apparaten die verbonden zijn met het internet vaak hosts of eindsystemen worden genoemd. Ze worden zo genoemd omdat ze aan het uiteinde van het internet zitten, zoals is weergegeven in afbeelding 1.3. De hosts van het internet zijn onder andere desktopcomputers (bijvoorbeeld pc's, Macs en Linux-machines), servers (bijvoorbeeld web- en mailservers) en mobiele devices (bijvoorbeeld laptops, smartphones en tablets). Daarnaast wordt een steeds grotere verscheidenheid aan andere 'things' als host met het internet verbonden (zie de casus).

Dat eindsystemen ook wel hosts (gastheren) worden genoemd is omdat ze 'onderdak' bieden aan applicaties. Denk daarbij aan applicaties voor webbrowsers, webserver, e-mailclients en e-mailserver. In dit boek gebruiken we de termen host en eindstelsysteem door elkaar. Dat wil zeggen: een host = een eindstelsysteem. Hosts worden soms nog verder onderverdeeld in twee categorieën: clients en servers. Clients zijn meestal desktop-pc's, laptops, smartphones, enzovoort, terwijl servers steeds krachtiger wordende machines zijn die webpagina's opslaan en distribueren, video streamen, e-mail doorsturen enzovoort. Tegenwoordig bevindt het merendeel van de servers waarvan we zoekresultaten, e-mail, webpagina's en video's ontvangen zich in grote datacenters. Zo heeft Google bijvoorbeeld vijftig à honderd datacenters, inclusief vijftien grote centers, die elk onderdak bieden aan meer dan honderdduizend servers.

### 1.2.1 Toegangsnetwerken

Nu we de applicaties en de hosts aan de edge van het netwerk hebben bekeken, bekijken we in deze paragraaf de **toegangsnetwerken** nader: de fysieke link(s) waarmee een host verbonden is met de **edgerouter**. De edgerouter is de eerste router op het pad vanaf een host naar een willekeurige andere host. In afbeelding 1.4 zijn verschillende soorten toegangsnetwerken met dikke grijze lijnen weergegeven, samen met de omgeving (thuis, bedrijf en wide-area mobiel draadloos) waarin ze worden toegepast.