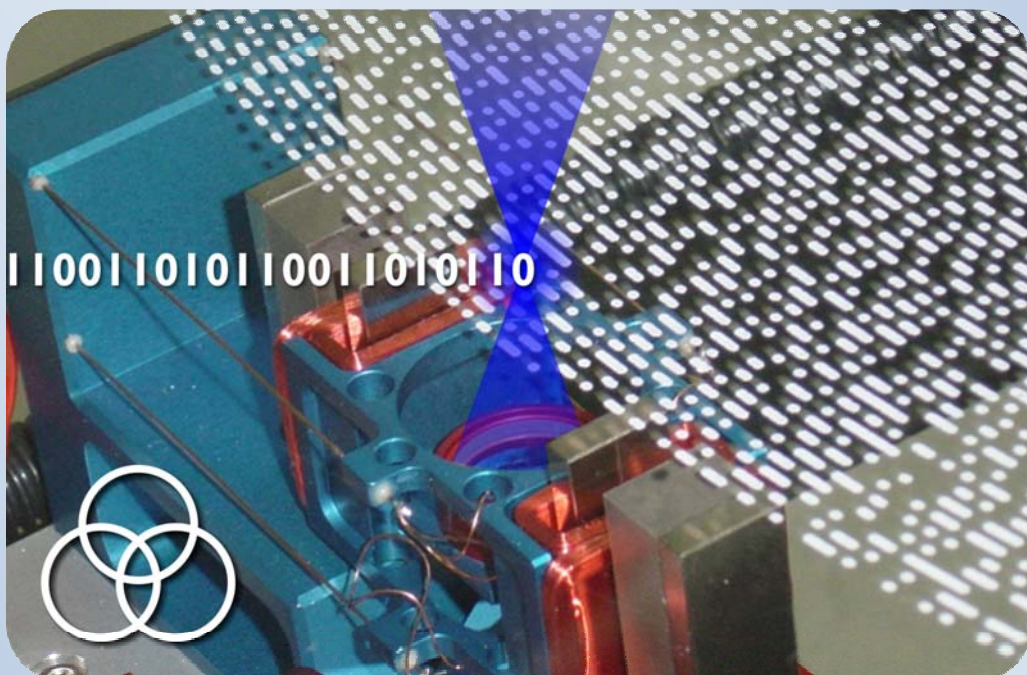


De Blu-ray Disc



Een vakoverstijgende opdracht voor 5 havo en 5/6 vwo
natuurkunde, wiskunde, elektrotechniek, informatica

Jean Schleipen
Philips Research, Eindhoven

Colofon

Auteur: Jean Schleipen
Philips Research, Eindhoven

Eindredactie: Betty Majoor
In Profiel Tekstontwerp, Eindhoven

Dit is een uitgave van:
Philips Human Resources Benelux / Jet-Net
Gebouw VB-12
Postbus 80003
5600 JZ Eindhoven

Uitgave: versie 2.0, september 2012

INHOUD

INTRODUCTIE	3
MODULE 1 VAN ANALOOG NAAR DIGITAAL (ELEKTROTECHNIEK)	1
1.1 Terminologie.....	5
1.2 Van analoog naar digitaal geluid	6
MODULE 2 FOUTEN OPSPOREN EN CORRIGEREN (WISKUNDE, INFORMATICA) ..	1
2.1 Hamming-code.....	16
2.2 Interleaving	20
MODULE 3 SCHRIJVEN EN LEZEN MET LICHT (NATUURKUNDE)	23
3.1 De afmeting van een laserspot	23
3.2 De ontwikkeling van cd naar Blu-ray Disc.....	25
3.3 Digitale kanaalcodering	32
MODULE 4 SCHERPSTELLEN EN SPOORVOLGEN (MEET- EN REGELTECHNIEK, ELEKTROTECHNIEK)	38
4.1 Ongewenste bewegingen	38
4.2 Meten en regelen.....	40
BIJLAGE A: WERKBLAD 'BINAIR'	43
BIJLAGE B: WERKBLAD 'PARITEITTABEL'	44
BIJLAGE C: WERKBLAD 1 - 'MAAK JE EIGEN CD'	45
BIJLAGE D: WERKBLAD 2 - 'MAAK JE EIGEN CD'	46
BIJLAGE E: WERKBLAD 3 - 'MAAK JE EIGEN CD'	47

INTRODUCTIE

Over de hele wereld maken mensen gebruik van optische dataopslag. Je kent ze vast wel: cd, dvd, Blu-ray Disc. De discs van de cd-familie worden gebruikt voor muziek, films, games, foto's, computer bestanden en ga zo maar door. Wat gebeurt er als je zo'n disc in je spelcomputer stopt? Of in de dvd-speler of de diskdrive van je computer?

In dit lespakket krijg je een kijkje achter de schermen van de optische dataopslag. Hoe sla je muziek of een film op op een disc en wat komt er bij kijken als zo'n schijfje weer wordt afgespeeld? We beginnen met een kort stukje geschiedenis over data en hoe data in de loop der tijden werd verzonden en vastgelegd.

Korte geschiedenis

Mensen leggen al heel lang gegevens vast. De oudst bekende grottekeningen zijn ongeveer 40.000 jaar oud. Sinds die tijd is er veel gebeurd. Informatie ontwikkelde zich van een rotstekening tot virtuele omgevingen; informatiedragers ontwikkelden zich van rots tot geheugenchips. We pikken er een paar voorbeelden uit.

Vastleggen van data

- *communicatie*:
van beeldschrift in grottekeningen naar symbolen zoals spijkerschrift, hiërogliefen, het moderne alfabet, emoticons en de 0-en en 1-en waarmee onze computers communiceren;
- *geluid*:
van muziekdoos of orgelboek naar grammofoon, cassette- en bandrecorder, cd en mp3-speler;
- *beeld*:
van schilderijen en etsen naar fotografie, film, video en 3D-animaties.

Opslagmedia



- *communicatie*:
van steen (bijvoorbeeld *de steen van Rosette*), kleitablet en papier naar elektronische media zoals tekstverwerker, pdf en e-reader;
- *geluid*:
van metaal (muziekdoos), karton (orgelboek) en vinyl (LP) naar magnetische tape en discs, optische discs (cd, dvd en Blu-ray) en geheugenkaartjes;
- *beeld*:
van papier en canvas/linnen naar fotografische film, magnetische en optische discs en geheugenkaartjes.

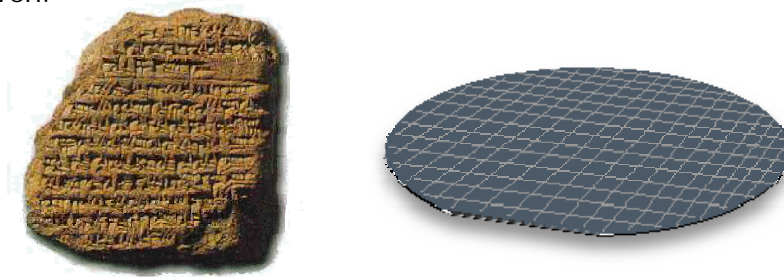
Oversturen (en opvragen) van data:

- van niet mogelijk (grottekeningen);
- naar overhandigen van persoon naar persoon (kleitabletten, boeken, foto's, ...);
- naar elektronische communicatie op afstand (telegraaf, telefoon, satelliet en glasvezel);
- naar direct opvraagbaar zonder tussenkomst van personen met de opkomst van internet (YouTube, Google, iTunes, e-mail, *cloud computing*, ...) .

Vroeger was de opslag van beeld – zoals een schilderij – gekoppeld aan papier of canvas, ook geluid en film hadden hun eigen opslagmedia. De moderne, digitale opslagmedia zijn geschikt voor alle vormen van informatie: communicatie, geluid, beeld, ... Het opslagmedium is niet langer een-op-een gekoppeld aan de aard van de data.

**schrijven
in steen**

Sinds de rotstekeningen is er veel gebeurd. Toch is meest moderne opslagtechnologie – op chips en geheugenkaartjes – nog steeds gebaseerd op het schrijven van symbolen (bits) in steen (silicium). De techniek die hiervoor gebruikt wordt heet lithografie. Dit woord is afgeleid van het Grieks: lithos=steen en grafein=tekenen of schrijven.

**Opgave 1**

Maak een tijdlijn met 10 voorbeelden van opslagmedia. Zorg ervoor dat minstens de helft van je voorbeelden uit de vorige of huidige eeuw komt.

Module

1

VAN ANALOOG NAAR DIGITAAL (elektrotechniek)

Hoe leg je muziek, een film of een game vast op een klein plastic schijfje? In deze module leer je hoe je een signaal uit de gewone wereld, zoals geluid, kunt vertalen naar informatie die je op kunt slaan op een cd, dvd of Blu-ray Disc. Voor we dat doen gaan we eerst in op de terminologie die daarbij wordt gebruikt.

1.1 Terminologie

In de computerwereld kom je allerlei begrippen tegen die ook van toepassing zijn op een cd, dvd en Blu-ray Disc. Om spraakverwarring te voorkomen, bespreken we hier eerst de belangrijkste begrippen.

Analoog

De signalen in de wereld om ons heen noemen we analoog. Licht bijvoorbeeld, kan zwak zijn of heel fel met alle gradaties daartussenin. Geluid varieert van zacht tot hard. Het is een glijdende schaal, die – net als een glijbaan – alle mogelijk tussenwaarden aan kan nemen. Ook onze zintuigen werken analoog: onze ogen en oren zijn in staat al die mogelijke intensiteiten van licht en geluidsvolumes waar te nemen.

Digitaal

De analoge wereld kan een vrijwel oneindig aantal toestanden aannemen. Om die wereld te beschrijven, gebruiken we echter maar een beperkt aantal symbolen zoals letters en cijfers: de analoge informatie wordt gedigitaliseerd.

Het woord digitaal komt van het latijn (digita = vingers) en verwijst naar het tellen met vingers. In een digitale beschrijving wordt informatie uitgedrukt in een gezamenlijk afgesproken symbolentaal. Een *digit* komt overeen met een enkel symbool van deze symbolentaal: digits zijn bijvoorbeeld de letters van het alfabet en de cijfers (0 t/m 9) van ons decimale stelsel.



Binair

Het woord digitaal wordt veel in de context van computers gebruikt. In dat geval is een digit de meest fundamentele rekeneenheid van de

computer. Er zijn er maar twee: de 0 (lage spanning) en de 1 (hoge spanning). Alle informatie moet dan ook worden omgezet in een reeks van 0-en en 1-en. Deze tweetallige schrijfwijze heet **binair**. Een digit in het binaire stelsel heet een **bit**. Een serie van acht bits wordt een **byte** genoemd.

Digitaal of binair?

Je spreekt dus over digitaal als je symbolentaal (cijfers, letters, ...) gebruikt om iets te beschrijven en over binair als die symbolentaal uit maar twee symbolen bestaan: 0 en 1. In het dagelijks taalgebruik echter wordt vrijwel alleen het begrip digitaal gebruikt en dan vooral in de betekenis van binair. In deze lesmodule sluiten we hierbij aan. Verwarrend? Geen nood, we laten geen twijfel bestaan over wat er wordt bedoeld.

Is een
computer
analoog of
digitaal?

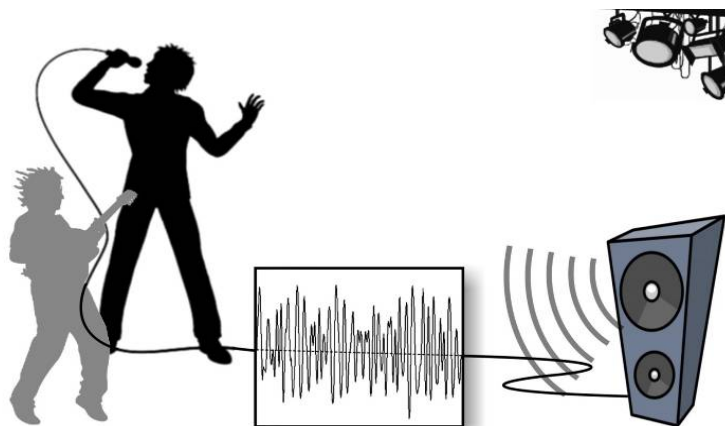


Een computer rekt met 0-en en 1-en. Je zou dus denken dat een computer binair is. Strikt genomen is dit niet waar. Ook een computer is een analoog apparaat.

De natuur en de wereld om ons heen, en dus ook in je computer, werkt nu eenmaal analoog. De spanning/voltage in een computerchip is een analoge spanning. We hebben afgesproken dat als de spanning op een elektronische component lager is dan een bepaalde waarde, we deze '0' noemen, en als deze groter is dan een bepaalde waarde, we deze '1' noemen. Het alfabet voor elektronisch rekenen bestaat dus uit twee 'letters': de 0 en de 1. De spanning in de computerchip kan veel meer waarden aannemen.

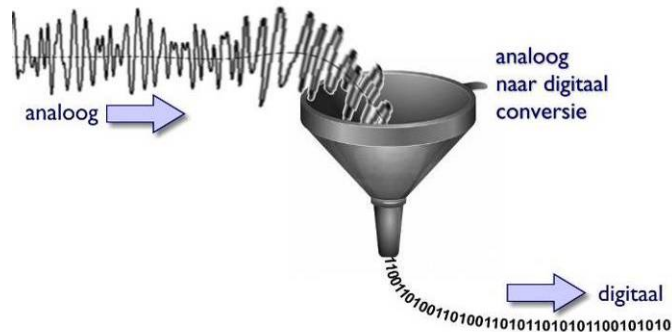
1.2 Van analoog naar digitaal geluid

Geluid is een analoog verschijnsel. Een geluidssignaal bestaat, zoals je in figuur 1 kunt zien, uit drukgolven. In wiskundige termen laat zo'n drukgolf zich beschrijven als een sinus. Deze drukgolven komen tegen ons trommelvlies dat op zijn beurt gaat trillen. Zo kunnen wij horen.



figuur 1. Geluid is een analoog signaal

Als je geluid vast wil leggen op een cd, kan dat niet met sinussen. Op een cd kun je alleen digitale, binaire signalen schrijven, alleen enen en nullen. Hoe zet je nu een analoge geluidssignaal om in reeks enen en nullen?



figuur 2. Een analoge signaal wordt omgezet in enen en nullen

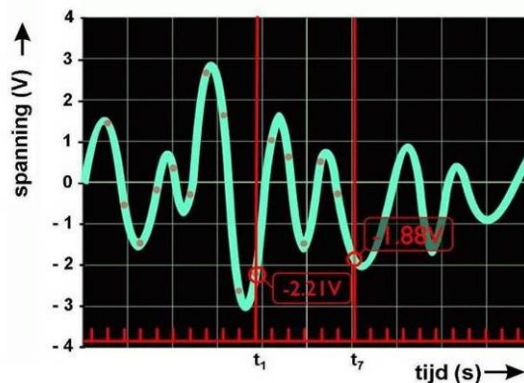
Om een analoge signaal te digitaliseren, nemen we drie stappen:

1. Het analoge geluidssignaal wordt eerst bemonsterd: met regelmatige tussenpozen wordt er een momentopname van het signaal gemaakt.
2. De gemeten waarden worden vervolgens omgezet in een decimaal getal tussen nul en een vooraf afgesproken maximale waarde.
3. Tenslotte wordt elk decimaal getal omgezet in een binair getal.

We zoomen op elk van de stappen in.

Stap 1: Bemonsteren van een signaal

We beginnen met het elektrische signaal van een geluidsoptname. Dit signaal bestaat uit een heleboel, gecombineerde sinussen. Een klein stukje van zo'n signaal ziet eruit zoals figuur 3. De spanning varieert tussen twee uiterste waarden, in dit geval tussen -4V en +4V. De rode schaalverdeling is de tijd.



figuur 3. Een klein stukje van een analoge muzieksignaal

Om het geluid te digitaliseren (binair te maken), meten we met regelmatige tussenpozen de waarde van de spanning. Op tijdstip t_1 bijvoorbeeld is de spanning $-2,21$ V. Op tijdstip t_7 is de spanning $-1,88$ V.

Dit meten met regelmatige tussenpozen heet **bemonsteren**, de gemeten waarden worden **samples** genoemd. Bij elk rood stipje in het plaatje wordt een sample genomen. De samples op t_1 t/m t_7 hebben de volgende waarden:

sample $t_1 = -2,21$ V

sample $t_2 = 1,03$ V

sample $t_3 = 0,73$ V

sample $t_4 = -1,51$ V

sample $t_5 = 0,67$ V

sample $t_6 = -0,28$ V

sample $t_7 = -1,88$ V

**44100
monsters
per
seconde**

Er is een regel die zegt dat je een sinusvormig signaal met frequentie f minimaal met de dubbele frequentie ($2f$) moet bemonsteren om analoge informatie op een juiste manier te representeren. Deze regel heet het *Nyquist theorema*.

De maximale frequentie die wij kunnen horen is ongeveer 20 kHz. Voor voldoende kwaliteit moet je muziek dus met minimaal 40 kHz bemonsteren. Philips en Sony stelden in 1980 voor de muziek-cd een standaard samplefrequentie vast van 44,1 kHz.

Om muziek vast te leggen op een cd wordt dus elke seconde 44100 keer de spanningswaarde van het muzieksignaal gemeten!

Stap 2: Van muzieksignaal naar decimaal getal

We gaan nu het voltage van een sample omzetten in een geheel getal. Neem bijvoorbeeld de sample op t_7 . Deze heeft een waarde van $-1,88$ V. We willen dus de waarde $-1,88$ omzetten in een geheel natuurlijk getal (0, 1, 2, 3, ...). Om dit te doen, hebben we het **ingangsbereik** en de **resolutie** nodig.

► *Ingangsbereik*

Het ingangsbereik wordt bepaald door de twee uiterste waarden van je muzieksignaal. In ons voorbeeld loopt dit bereik van -4 Volt tot $+4$ Volt.

► *Resolutie*

De resolutie is de nauwkeurigheid waarmee je straks de informatie op de cd wegschrijft. Bijvoorbeeld: bij een 12-bits resolutie, als je binaire getallen bestaande uit 12 digits gebruikt, kun je het bereik van -4 tot $+4$ Volt opdelen in 4096 stapjes (2 tot de macht $12 = 2^{12} = 4096$).

Je kunt dus alle waardes tussen -4 en +4 Volt omzetten in een getal van 0 tot 4095:

$$\begin{aligned} -4V &\Leftrightarrow 0 \\ +4V &\Leftrightarrow 4095 \end{aligned}$$

Nu kunnen we de gemeten voltages omrekenen in een geheel getal. Om makkelijk te kunnen rekenen verschuiven we eerst alle waarden 4 Volt omhoog. Zo kunnen we altijd rekenen met getallen boven de nul. De waarden variëren nu tussen de 0 en 8 Volt. Dit verdelen we vervolgens in 4096 stappen (0 t/m 4095):

$$\begin{aligned} 0V &\Leftrightarrow 0 \\ +8V &\Leftrightarrow 4095 \end{aligned}$$

Reken met de volgende stappen een voltage om in een geheel, decimaal getal:

1. Breng de waarde boven de 0
plus 4 Volt
2. Bereken de relatieve plaats op de schaal van 0 to 8 Volt
deel door 8
3. Vermenigvuldig deze waarde met de gewenste resolutie
vermenigvuldig met 4095 en rond af op een heel getal

Een voorbeeld:

Volt schaal -4 tot +4 V	Volt schaal 0 tot 8 V	Relatief schaal 0 tot 1	Decimaal getal
-4	0	0	0
-3,5	0,5	0,0625	256
-3	1	0,1250	512
-2	2	0,2500	1024
-1	3	0,3750	1536
0	4	0,5000	2048
4	8	1,0000	4095

Stap 3: Van decimaal naar binair

Als laatste stap gaan we de gevonden decimale waarden vertalen in 0-en en 1-en: we gaan de samples omzetten in een **binair** getal. We frissen eerst onze kennis over binaire getallen op.

Een binair getal bestaat uit enen en nullen. Afhankelijk van zijn positie in het binaire getal heeft een bit een bepaalde waarde: net als in ons 'gewone' tientallige stelsel, waarin de 'digits' overeenkomen met eenheden, tientallen, honderdtallen enz.

Binaire getallen

In ons tientallig stelsel komen de verschillende posities in een getal overeen met machten van 10: 10^3 (duizendtallen), 10^2 (honderdtallen), 10^1 (tientallen), en $10^0=1$.

In het binaire stelsel is die waarde een macht van 2. Voor een 4-bits binair getal hebben die twee-machten achtereenvolgens de volgende waarden: 2^3 2^2 2^1 2^0 .

Het eerste bit van een 4-bits getal heeft dus een waarde van 8 (2^3) het tweede een waarde van 4, het derde 2, en het vierde 1.

Een binair getal $b_3b_2b_1b_0$ komt dus in het tientallige stelsel overeen met $b_3 \times 2^3 + b_2 \times 2^2 + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0$.

$$\begin{aligned} \text{Bijvoorbeeld: } 0110 &= 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ &= 0 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 2 + 0 \times 1 \\ &= 6 \end{aligned}$$



Opgave 2

Ga na dat:

$$0101 = 5$$

$$0011 = 3$$

$$1000 = 8$$

$$1111 = 15$$

$$0000 = 0$$

Vul in:

$$1100 = \dots$$

$$0111 = \dots$$

$$\dots = 10$$

$$\dots = 4$$

**Opgave 3**

Om ons geluidsfragment te digitaliseren (binair weer te geven), moet je de gemeten spanning van de samples omzetten in een binaire waarde. Hoe nauwkeurig kan dat met een 4-bits binair getal?

Vul in:

Een 4-bits binair getal kan verschillende waarden aannemen.

De spanning van een sample ligt tussen +4V en -4V. Dit bereik kunnen we dus verdelen in stappen.

Elke stap komt dan overeen met Volt.

Met zulke grove stappen, krijg je natuurlijk geen mooie vloeiende sinus meer, als je de waardes binair wilt schrijven. Bovendien moet je een waarde als -1,88V afronden, waardoor je veel kwaliteitsverlies krijgt. Daarom gebruiken we bij het omzetten van een geluidssignaal meer bits.

**Opgave 4**

Bij een audio-cd wordt er een resolutie gebruikt van 16 bits.

Wat is de grootste macht van 2, bij een 16-bits getal?

Hoeveel verschillende waardes, kan een 16-bits getal aannemen?

Bij de volgende opgaven rekenen we met 12-bits binaire getallen. De tabel hieronder geeft een overzicht van de decimale waarden van deze binaire getallen:

positie	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
2-macht	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
waarde	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1



Opgave 5

Ga zelf na dat:

$$0010\ 0110\ 1100 = 512 + 64 + 32 + 8 + 4 = 620$$

$$1111\ 0000\ 1111 = 2048 + 1024 + 512 + 256 + 8 + 4 + 2 + 1 = 3855$$

Vul in:

$$1000\ 1000\ 1000 = \dots + \dots + \dots = \dots$$

$$0101\ 0101\ 0101 = \dots$$

$$0000\ 0000\ 1010 = \dots$$

$$1000\ 0000\ 0001 = \dots$$

We kunnen nu binaire getallen ontcijferen in decimale getallen. Wat we nodig hebben is van decimaal naar binair. Dit is wat minder makkelijk. Doe hiervoor de volgende twee stappen:

1. Kijk welke macht van 2 de grootste is die in je getal past.
2. Trek dit af van je getal en herhaal stap 1 met het overblijvende getal.

Herhaal deze stappen tot je een rest van nul hebt.

Een voorbeeld:

Je wilt het decimale getal 2643 omzetten in een 12-bits binair getal. Noteer dan steeds de grootste 2-macht dit in het overblijvende getal past:

2-macht	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
waarde	<u>2048</u>	1024	<u>512</u>	256	128	<u>64</u>	32	<u>16</u>	8	4	<u>2</u>	<u>1</u>
binair	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1

$$2643 - \underline{2048} = 595$$

$$595 - \underline{512} = 83$$

$$83 - \underline{64} = 19$$

$$19 - \underline{16} = 3$$

$$3 - \underline{2} = 1$$

$$1 - \underline{1} = 0$$

$$2643 = 2^{11} + 2^9 + 2^6 + 2^4 + 2^1 + 2^0$$

binair geschreven: **1010 0101 0011**



Opgave 6

Oefen nu zelf met het maken van grote binaire getallen. Je kunt hiervoor je rekenmachine en onderstaande hulptabel gebruiken.

$$4095 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

$$3000 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

$$512 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

$$199 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

$$1234 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

Hulptabel binaire getallen

2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1

Nogmaals, stap 1 t/m 3: Van geluidssignaal naar binair getal

Om een geluidssignaal om te zetten in een binair getal hebben we dus de volgende stappen gedaan:

1. bemonsteren van het geluidssignaal
2. gemeten waarde omzetten in een decimaal getal
3. decimaal getal omzetten in binair getal

Bijvoorbeeld:

-4V \Leftrightarrow 0 \Leftrightarrow 0000 0000 0000
 +4V \Leftrightarrow 4095 \Leftrightarrow 1111 1111 1111

Gewapend met deze kennis kunnen we nu een geluidssignaal omzetten in een reeks binaire getallen. Deze kunnen vervolgens weggeschreven worden op een cd, dvd of Blu-ray Disc.



Opgave 7

We nemen het geluidssignaal uit figuur 3. Zet de waarden van de samples van t_1 t/m t_7 om in een binair getal. Gebruik onderstaande hulptabel.

Volt schaal -4 tot +4 V	Volt schaal 0 tot 8 V	Decimaal getal	Binair getal
-2,21	1.79	916	0011 1001 0100
1,03			
0,73			
-1,51			
0,67			
-0,28			
-1,88			

Hulptabel binaire getallen

2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1



Opgave 8

Je kunt ook andere data omzetten in binaire getallen. Bijvoorbeeld tekst. Vul in de tabel de volgende drie stappen in.

- a. tekst: kies een woord van drie letters en vul deze in in de 3 kolommen van onderstaande tabel;
- b. van tekst naar decimaal: zoek de bijbehorende decimale code op voor elke letter (zie werkblad 'binair' in bijlage A);
- c. van decimaal naar binair: zet de drie decimale getallen om in drie 8-bits binaire getallen.

tekst:			
tekst naar decimaal:			
decimaal naar binair:			

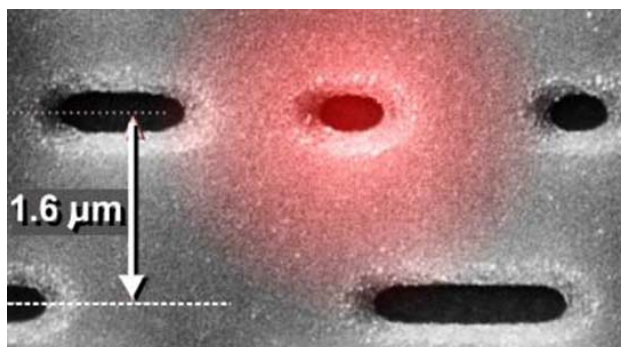


Module

2

FOUTEN OPSPOREN EN CORRIGEREN (wiskunde, informatica)

In module 1 hebben we gezien hoe je een geluidssignaal om kunt zetten in een reeks nullen en enen. Die nullen en enen worden vervolgens als putjes weggeschreven op een cd. Sterk uitvergroot ziet dat er als volgt uit:



figuur 4. Uitvergroting van de oppervlakte van een cd.

Als je de reeks nullen en enen eenvoudigweg op de cd zet, kun je echter problemen verwachten. Als je een cd goed bekijkt, zitten er altijd wel krasjes, stofjes of vingerafdrukken op. De kans dat er bij het uitlezen van de putjes een fout wordt gemaakt is dus levensgroot. Toch merk je daar niets van als je met een dvd-speler een film bekijkt of met een spelcomputer zit te gamen. Hoe kan dat?

In deze module maak je kennis met foutcodering, een wiskundige truc die fouten op een cd opspoort en verbetert. We kijken eerst hoe hij werkt, daarna mag je er zelf mee aan de slag.

2.1 Hamming-code

Stel, je speelt in een bandje en je wilt een cd opnemen met jullie favoriete nummers. Samen duiken jullie de studio in. Na de opname wordt de muziek gedigitaliseerd. Die vette bas en dat snelle loopje worden vertaald in een enorme reeks nullen en enen (bits). Een piepklein stukje muziek ziet er dan bijvoorbeeld zo uit:

1100 0110 1101 1100

Als we deze reeks precies zo op een cd wegschrijven, is de kans klein dat we hem straks weer zonder fouten kunnen afspelen. Maar als je op een slimme manier extra bits toevoegt, kun je bij het afspelen foute bits herkennen en corrigeren. In deze module gebruiken we hiervoor de Hamming-code, een sterk vereenvoudigd

broertje van de codeertechniek die in een cd, dvd of Blu-ray Disc wordt gebruikt.

Coderen

Voor de Hamming-code delen we ons digitale muziekfragment op in groepjes van vier bits. Dit zijn de *informatiebits* b_3 , b_2 , b_1 en b_0 . Vervolgens voegen we aan elk groepje informatiebits drie extra bits toe, de zogenaamde *pariteitbits* p_3 , p_2 en p_1 :

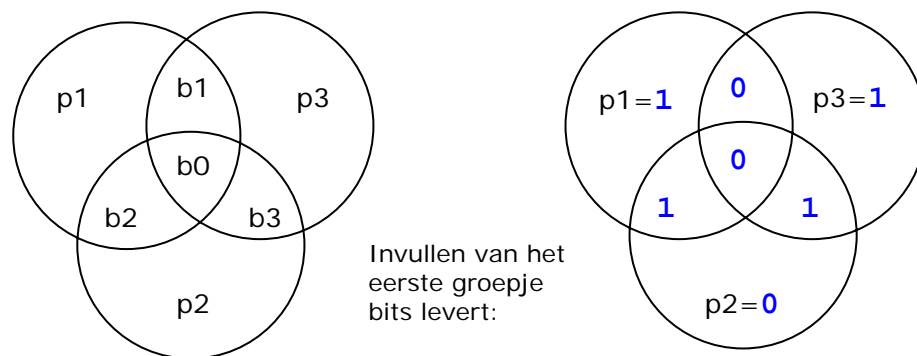
1100* 0110*** 1101*** 1100*****

Ons muziekfragment bestaat nu dus uit vier getallen van zeven bits b_3 , b_2 , b_1 , b_0 , p_3 , p_2 , p_1 . Zo'n getal noemen we een *codewoord*.

Om de waarde van de pariteitbits te bepalen gebruiken we drie cirkels en de volgende rekenregel:

- ▶ ***In elke cirkel moet een even aantal enen staan.***

We vullen de cirkels als volgt in:



figuur 5. Bepaling van de pariteitbits met behulp van de cirkelregel

Het eerste codewoord in ons voorbeeld is dus: **1100101**. Let hierbij op de juiste volgorde: b_3 , b_2 , b_1 , b_0 , p_3 , p_2 , p_1 . Dit codewoord schrijven we weg op de cd.



Opgave 9

Bepaal de pariteitbits voor de andere drie groepjes bits in ons voorbeeld en schrijf alle codewoorden van het muziekfragment hier op:

1100101 0110 _ _ _ _ _ _ _ _ _ _



Opgave 10

Controleer of **1010010** en **0001111** geldige codewoorden zijn (met andere woorden: kloppen ze wel of niet met de cirkelrekenregel). Omcirkel de goede antwoorden:

1010010 is een geldig / geen geldig codewoord

0001111 is een geldig / geen geldig codewoord

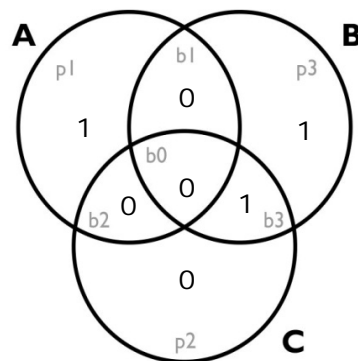
Decoderen

Als we de cd willen afspelen zien we dat die vuil is geworden. Bij het uitlezen van de putjes zitten er wat kleine stofjes in de weg. We krijgen nu de volgende codewoorden (vergelijk deze met de originele codewoorden die je in opgave 9 hebt bepaald):

1000101 **1110110** **1101110** **0100101**

Met de drie cirkels en de regel '*in elke cirkel een even aantal enen*', controleren we of er bij het lezen een fout is opgetreden.

We vullen het eerste codewoord in de cirkels in.



figuur 6. Controleren van een codewoord met behulp van de cirkelregel

We zien nu het volgende:

- ▶ Cirkel B voldoet aan de regel dat er een even aantal enen in moeten staan. Deze cirkel bevat dus geen fout.
- ▶ Cirkel A en cirkel C bevatten allebei een oneven aantal enen. De fout moet dus staan in het segment dat alleen deze twee cirkels gemeenschappelijk hebben. Hier staat de informatiebit b2. De 0 die hier staat, moeten we dus veranderen in een 1.

	informatiebits				pariteitbits		
	b3	b2	b1	b0	p3	p2	p1
codewoord vóór correctie	1	0	0	0	1	0	1
codewoord na correctie	1	1	0	0	1	0	1



Opgave 11

Controleer op dezelfde manier de andere drie codewoorden uit het voorbeeld en corrigeer ze als dat nodig is. Welke bits waren fout? Omcirkel de foute bits in de codewoorden hieronder (in elk codewoord is maximaal 1 bit fout).

Vind je de originele codewoorden van opgave 9 terug?

1000101 1110110 1101110 0100101

De codewoorden die we in ons voorbeeld gebruiken bestaan uit zeven bits: vier informatiebits en drie pariteitbits. We noemen dit een [7, 4, 3]-code.

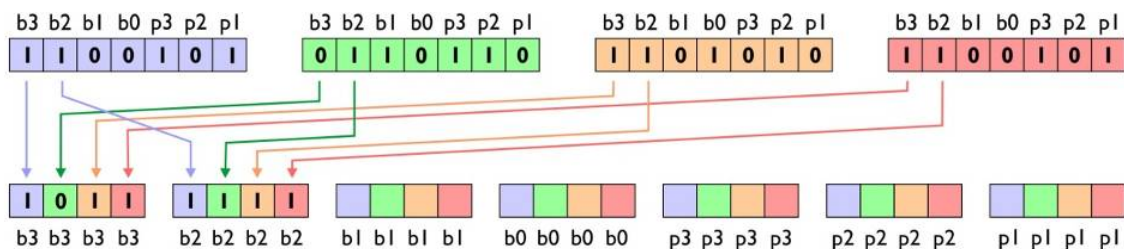
2.2 Interleaving

Met de [7,4,3]-Hamming-code kun je maximaal één fout in een codewoord opsporen en corrigeren. Kun je ook beredeneren waarom? Als er een krasje of vuiltje op een cd zit, is de kans natuurlijk groot dat er een hele rij bits achter elkaar verkeerd wordt uitgelezen. Daarom is een techniek ontwikkeld waarbij het risico op fouten letterlijk wordt gespreid. Bij deze techniek worden de codewoorden eerst 'opgeknipt' in losse onderdelen en bij het wegschrijven over een groter gebied op de disc verspreid. Deze techniek heet *interleaving*. Het komt erop neer dat van een set codewoorden eerst alle eerste bits achter elkaar worden weggeschreven, dan alle tweede bits, etc.

Onze originele codewoorden:

1100101 0110110 1101010 1100101

worden dan als volgt weggeschreven op de cd:



figuur 7. Het wegschrijven van codewoorden met behulp van interleaving



Opgave 12

Schrijf de codewoorden uit opgave 9 op met gebruik van interleaving:

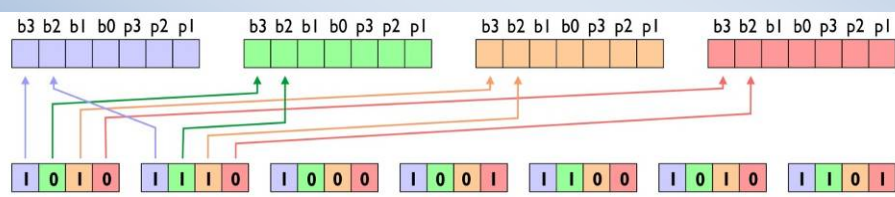
1011 1111 _____



Opgave 13

De volgende reeks bits is met interleaving op een cd vastgelegd. Schrijf op uit welke codewoorden deze reeks is gemaakt. Gebruik hiervoor onderstaande figuur.

1010 1110 1000 1001 1100 1010 1101



Je hebt wat geoefend met de Hamming-code en interleaving. Nu gaan we serieus aan de slag !



Opgave 14

'Maak je eigen cd'

In deze opdracht ga je zelf een cd 'opnemen' die daarna door een medeleerling wordt 'afgespeeld'.

Gebruik bij deze opgave de werkbladen 'binair' en 'pariteitabel' en de werkbladen 1,2 en 3 (bijlagen A t/m E).

Deel 1: Opnemen (noteer je gegevens op werkblad 1)

1. Bedenk een (geheime) boodschap of woord van 5 letters.
2. Digitaliseer je boodschap met behulp van het werkblad 'binair'.
3. Deel je boodschap nu op in 10 groepjes van 4 bits.
4. Voeg nu aan elk groepje de 3 pariteitbits toe; gebruik hiervoor de Hamming-code en het werkblad 'pariteitabel'.
5. Zet met interleaving alle eerste bits achter elkaar, dan alle tweede bits, enzovoort. In totaal heb je dan 70 bits.
6. Schrijf de bits in de volgorde die je nu gekregen hebt op de cd (werkblad 3). Begin bij START.

LET OP: Zoals je ziet, zit er een grote kras op de cd. **Vervang op de plaats van de kras jouw informatie (0 of 1) door een 0.** Zorg ervoor dat de oorspronkelijke, correcte bits niet zichtbaar zijn. Ga dus niet krassen of weggummen !

7. Knip je cd uit en geef hem aan een medeleerling die jouw boodschap mag gaan afspelen. Speel intussen zelf een cd van een medeleerling af.



Opgave 14 - vervolg

Deel 2: Afspelen (noteer je gegevens op werkblad 2)

8. Reconstrueer de codewoorden die met interleaving op de cd zijn weggeschreven. Als het goed is heb je nu 10 codewoorden met een lengte van 7 bits.
9. Controleer met de Hamming-code of er fouten in de codewoorden zitten en corrigeer ze als dat nodig is. Gebruik hierbij het werkblad 'pariteit_tabel'.
10. Verwijder de pariteitbits zodat je 10 groepjes van 4 bits overhoudt.
11. Combineer steeds twee groepjes van 4 bits zodat je 5 groepjes van 8 bits overhoudt.
12. Zoek op het werkblad 'binair' voor elk groepje de bijbehorende letter op.
13. Welke boodschap heb je ontcijferd? Klopt dit met de boodschap die je medeleerling heeft gecodeerd?
14. Als je tijd over hebt, of als je dit leuk vind, probeer dan ook eens de boodschap te ontcijferen zonder de eventueel foute bits te corrigeren! Je krijgt nu volstrekte onzin...

Met deze Hamming-code kun je per codewoord maar één fout herkennen en herstellen. De codes voor foutcorrectie die tegenwoordig gebruikt worden, zijn veel geavanceerder en kosten veel meer rekentijd. In je gameapparatuur zitten chips die speciaal zijn ontworpen om razendsnel met één bepaalde code fouten te vinden en te corrigeren. Het principe daarvan is echter gelijk aan wat je in deze module hebt gedaan!

Deze wiskundige methode van foutcodering vind je terug in alle systemen waarbij digitaal informatie wordt gelezen of overgestuurd, en is niet meer uit ons dagelijks leven weg te denken: internet, Hyves, Facebook, Skype, harde schijven, computer geheugens, USB geheugen sticks, digitale TV, online banking, iTunes, cloud computing, om maar een paar voorbeelden te noemen ...

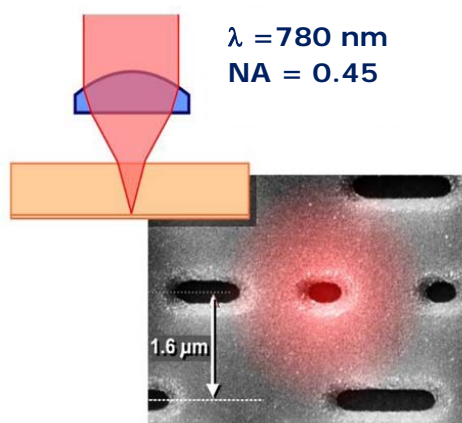
SCHRIJVEN EN LEZEN MET LICHT (natuurkunde)

Een muziek-cd heeft een opslagcapaciteit van 750 MB (MB = Megabyte = 1024^2 bytes; 1 byte = 8 bits). Op een dvd past 4,7 GB en een Blu-ray Disc kan per laag zelfs 25 GB bevatten en met een slimme truc kunnen er twee of meer lagen beschreven worden (GB = Gigabyte = 1024^3 bytes). De plaatjes zijn in principe precies even groot. Wat bepaalt dan de opslagcapaciteit van een disc?

In deze module leer je hoe je de capaciteit van een disc kunt berekenen. Een belangrijke factor daarbij is de afmeting van de laserspot die de putjes op de disc 'leest'. Hoe dit van invloed is geweest op de ontwikkeling van cd naar Blu-ray Disc komt aan bod in een kort stukje geschiedenis.

3.1 De afmeting van een laserspot

De afmeting van de kleinste mogelijke structuur die je met behulp van een laserbundel kunt uitlezen, wordt bepaald door de grootte van het gefocusseerde laserspotje. In figuur 8 zie je een uitvergroting van de oppervlakte van een muziek-cd. De rode vlek komt overeen met het gefocusseerde licht van de laser waarmee de cd wordt uitgelezen.



figuur 8. Een sterk uitvergroete laserspot op de oppervlakte van een cd

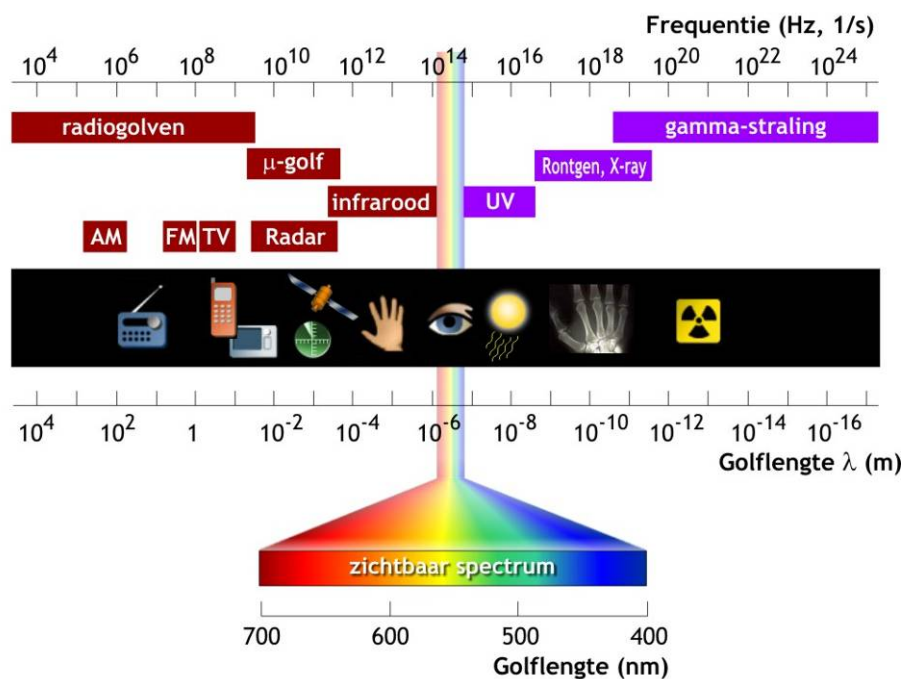
Zelfs al zouden we een perfecte lens kunnen maken die alle 'lichtstralen' door één punt laat gaan, dan nog zorgt het fenomeen **diffractie** (of: *buiging*) van lichtgolven voor een eindige afmeting van dit 'punt'. De hoeveelheid buiging wordt bepaald door (i) een eigenschap van de lens die wordt uitgedrukt in een dimensieloos getal NA, de numerieke apertuur, en (ii) de kleur van het gebruikte laser licht.

De diameter w van de gefocuseerde, buigingsbegrenste laserspot wordt gegeven door:

$$w = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

met w = de diameter van de laserspot
 λ = de golflengte van het gebruikte laserlicht
 NA = de numerieke apertuur van de gebruikte lens

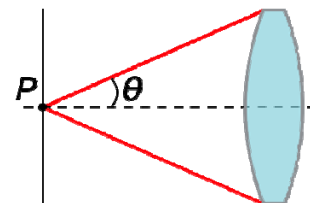
De golflengte van het licht bepaalt de kleur waarmee wij het licht waarnemen: rood licht heeft een golflengte van ongeveer 650 nm, voor blauw licht is dat 450 nm (1 nm = 0.001 μm = 10^{-9} m).



figuur 9. Het elektromagnetisch spectrum; ongeveer in het midden ligt het spectrum met zichtbaar licht

Hoe groot kan NA maximaal zijn?

De numerieke apertuur van een lens is gelijk aan de sinus van de halve openingshoek θ van de gefocuseerde bundel: $NA = \sin(\theta)$. Hoe groter de hoek θ , des te groter de numerieke apertuur, NA. De maximale waarde voor NA is gelijk aan 1 omdat de sinus van een hoek nooit groter kan zijn dan 1.



Als de bundel licht in een medium met *brekingsindex* n wordt gefocusseerd, dan geldt $NA = n \cdot \sin \theta$. Dit is het geval bij een immersie microscoop. Hierbij zit er een dun laagje water (met $n=1,33$) of olie (met $n>1,6$) tussen het object en de objectieflens. Doel: de NA kan dan groter worden dan 1, met als gevolg een kleinere w en dus een groter oplossend vermogen.

3.2 De ontwikkeling van cd naar Blu-ray Disc

Van cd ...



In de jaren 70 van de vorige eeuw, toen het compact disc systeem werd ontwikkeld, waren er compacte infrarode halfgeleiderlasers beschikbaar met een golflengte van 780nm. Op dat moment konden er goedkope, buigingsbegrensde lenzen worden gemaakt met een numerieke apertuur van 0,45.

Voor microscopen waren er allang objectieven beschikbaar met een veel grotere NA, maar die waren veel te duur voor een consumentenproduct. Een lensje voor een cd-, dvd- of Blu-ray-speler mag typisch niet meer dan €1 kosten !

Met de beschikbare laser en lenzen kon een opslagcapaciteit van 750Mb worden gerealiseerd.

De 9^e van Beethoven is maat voor cd

De opslagcapaciteit van een compact disc is 750 MBytes. Dit getal komt niet zomaar uit de lucht vallen. Toen de cd werd ontwikkeld, waren er een aantal belangrijke ambassadeurs voor dit nieuwe opslagmedium. Een van hen was Herbert von Karajan, toenmalig dirigent van de Berliner Philharmoniker en een ikoon in de wereld van de klassieke muziek. von Karajan wilde dat de 9^e symfonie van Beethoven op één enkel schijfje zou passen.

De 9^e van Beethoven duurt ongeveer 74 minuten. Om de dynamiek van klassieke muziek (zachte en luide passages) nauwkeurig genoeg vast te kunnen leggen, kozen de ingenieurs van Philips en Sony voor een 16-bits sampling methode: elk sample wordt weergegeven door een 16-bits getal. Verder moesten twee kanalen worden vastgelegd (stereo). Je kunt nu uitrekenen hoeveel bits geheugencapaciteit daarvoor nodig is. In de opgaven ga je dat straks zelf doen.



... naar dvd ...



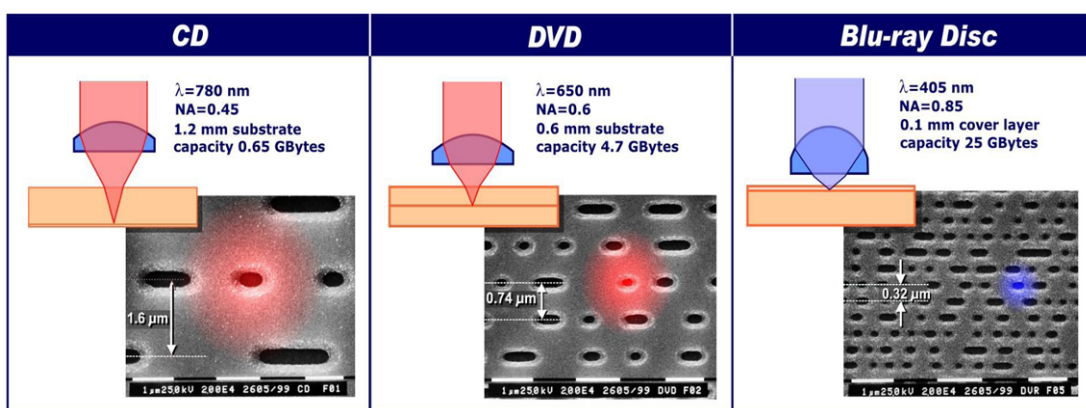
De muziek-cd bleek een succes en vervolgens wilde men ook film op zo'n blinkend schijfje kunnen zetten. Daar was wel meer opslagcapaciteit voor nodig dan de 750 MBytes van een cd. Daarom zochten de grote industrieën en onderzoeksinstituten in de jaren 80 naarstig naar goedkope halfgeleiderlasers met een kortere golflengte. Toen begin jaren 90 een rode halfgeleiderlaser op de markt kwam, werd al snel begonnen met het uitontwikkelen van het dvd-systeem. Het fabricageproces van de buigingsbegrensde lensjes was inmiddels sterk verbeterd zodat er ook lenzen met een grotere numerieke apertuur gemaakt konden worden. In 1996 kwam het dvd-systeem op de markt met een lasergolflengte van 660 nm en een numerieke apertuur van 0.6. Dit leverde een opslagcapaciteit van 4,7 GBytes, genoeg voor 1 uur film, met een beeldkwaliteit die veel beter was dan de toenmalige VHS magnetische tape videorecorders.

... naar Blu-ray Disc



Maar toch was dit nog niet genoeg. In de jaren 90 werd hard gewerkt aan een betere resolutie van tv-beelden. Dit resulteerde in HD-TV, *high definition TV*, als opvolger van het sterk verouderde PAL TV-systeem. Tegelijkertijd kwamen er betere beeldschermen met een hogere resolutie op de markt. Vergeleken met het oude PAL systeem zouden HD-TV-beelden een vijf keer scherper beeld opleveren. Voor een HD-TV-film was ook vijf keer meer opslagcapaciteit nodig.

De speurtocht naar een goedkope laser met een nog kortere golflengte ging in de jaren 90 dus onverminderd door. In 1996 werd een blauw-violette laser met een golflengte van 405 nm ontwikkeld. Door ook de NA te verhogen van 0,6 naar 0,85 kon een vijf keer grotere opslagcapaciteit worden gerealiseerd. In 2006 werd het Blu-ray Disc systeem geïntroduceerd met een lasergolflengte van 405 nm, een NA van 0,85 en een opslagcapaciteit van 25 GBytes per laag.



figuur 10. De cd, dvd en Blu-ray Disc met een steeds kleinere lasergolflengte λ en een steeds grotere numerieke apertuur NA

Geheugen 'onder de moterkap'

Op een audio-cd past 750 MBytes data. De eerste data-cd's, zoals cd-rom en cd-rw, hadden maar een opslagcapaciteit van 650 MBytes. Dit komt door een sterk verbeterde *error correctie* die nodig is om fouten tijdens het uitlezen te corrigeren. Maar waarom hebben we voor data een krachtigere foutcorrectie nodig dan voor muziek?

Het blijkt dat uitleesfoutjes in muziek niet zo erg zijn: tot op zekere hoogte kunnen deze worden weggepoetst door filters en interpolatietechnieken. Bij data zoals tekst kan dat niet: een cd-loopwerk kan niet beslissen of een foutief uitgelezen woord 'bos' eigenlijk 'bus' had moeten zijn. Wij weten dat de zin 'De bos stopt om kwart over twee' nergens op slaat, maar een cd-speler weet dat niet.



Opgave 15

Je gaat in deze opgave een schatting maken van de hoeveel data die je weg kunt schrijven op een optische disc.

- a. Bereken de diameter w van de laserspot voor het cd-, dvd- en Blu-ray Disc-systeem. Let hierbij op de gebruikte eenheden: $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 1/1000 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mm}$.

$$W_{cd} = \dots\dots\dots$$

$$W_{dvd} = \dots\dots\dots$$

$$W_{Blu-ray} = \dots\dots\dots$$

- b. Bereken de oppervlakte van de laserspots en maak een *schatting* van de hoeveelheid bits die op een disc passen. Deel hiervoor de oppervlakte van het actieve deel van de disc dat de informatie bevat (beginnend bij straal 22 mm en eindigend bij straal 58 mm van de disc) door de oppervlakte van de laserspot.

$$\text{aantal bits cd} = \dots\dots\dots$$

$$\text{aantal bits dvd} = \dots\dots\dots$$

$$\text{aantal bits Blu-ray} = \dots\dots\dots$$



Opgave 16

Reken in de volgende invuloefening uit wat de capaciteit van een cd moet zijn voor het opslaan van 74 minuten **muziek**.

Een muziek-cd heeft een afspeelduur van 74 minuten.	Dit is sec.
De muziek is bemonsterd met 44100 samples/sec.	Voor 74 min muziek zijn er dus samples nodig.
Voor stereogeluid worden er tegelijkertijd twee kanalen opgenomen.	In totaal hebben we dus samples.
De resolutie waarmee de samples op de disc worden geschreven is 16 bits/sample.	Dit levert in totaal bits.
1 byte = 8 bits	Hetgeen overeenkomt met bytes.
1 kbyte = 1024 bytes 1 Mbyte = 1024 kbytes (dus 1 MB = 1 Mbyte = 1024^2 bytes)	De opslag van 74 minuten muziek op een cd kost dan MB opslagcapaciteit.



Opgave 17

Doe dezelfde invuloefening nu voor 1 uur **film**.

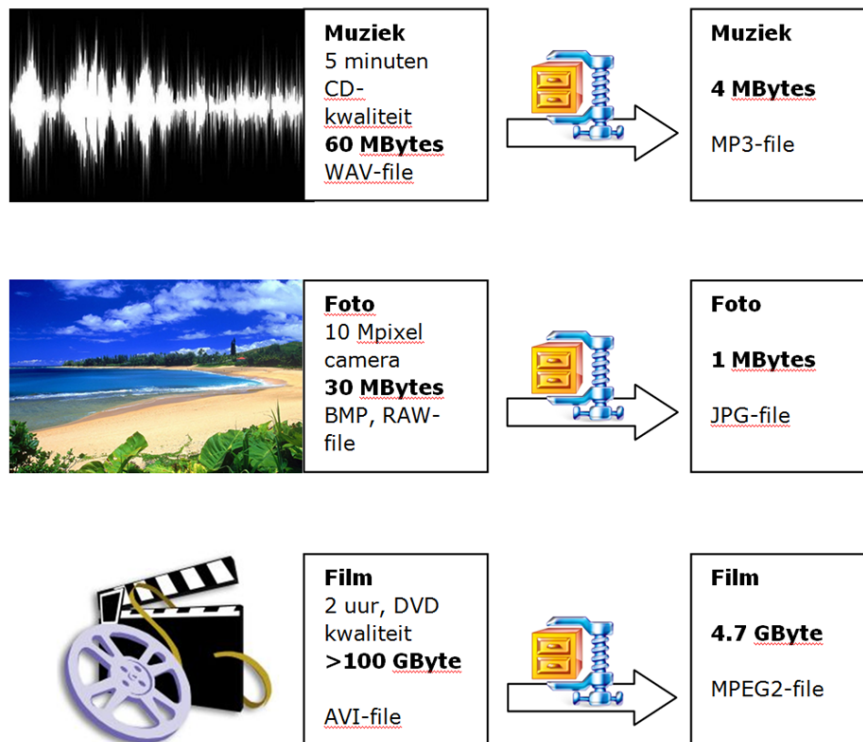
De film heeft een speelduur van 1 uur.	Dit is sec.
Een film wordt met 25 beeldjes/sec afgespeeld.	Dit levert beelden.
Elk beeldje bestaat uit 576 rijen van elk 720 pixels (beeldpunten): de maten voor het huidige PAL-TV-systeem.	Totaal zijn er dus pixels.
De resolutie waarmee de helderheid van een enkel pixel op de disc wordt geschreven is 8 bits/pixel.	Dit levert in totaal bits.
Per pixel heb je drie kleuren: rood, groen en blauw	Totaal zijn er dus bits.
1 byte = 8 bits	Dit is gelijk aan bytes.
1 kbyte = 1024 bytes 1 Mbyte = 1024 kbytes 1 Gbyte = 1024 Mbytes (dus 1 GB = 1 Gbyte = 1024^3 bytes)	De opslag van 1 uur film kost GB opslagcapaciteit.

Datacompressie



Eén uur film kost dus veel meer opslagcapaciteit dan de 4,7 Gbytes van een dvd-disc. Om dit probleem op te lossen wordt **datacompressie** toegepast, een wiskundige techniek waarmee je de grootte van een digitaal bestand kunt verkleinen.

Er bestaan verschillende compressietechnieken. ZIP-compressie is bijvoorbeeld een bekende techniek uit de computerwereld. Om videobeelden te comprimeren (bijv. mpeg) wordt gebruik gemaakt van *lossy compression*. Hierbij gaat informatie die voor de waarnemer niet direct zichtbaar is, verloren en kun je grote compressieverhoudingen bereiken. Met de lossy compression die voor dvd wordt gebruikt, kun je digitale video bestanden met een factor 30 reduceren. Een bekende lossy compression-techniek voor muziek is mp3. Met mp3 worden frequenties en frequentiecombinaties die het menselijk oor niet kan waarnemen, uit het muzieksignaal verwijderd. Het resterende signaal wordt vervolgens gedigitaliseerd.



Opgave 18

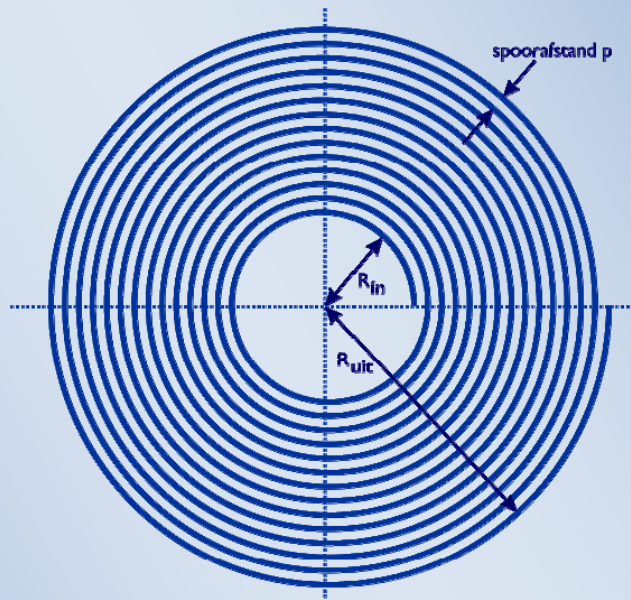


Een beetje bibliotheek heeft al snel zo'n 100.000 boeken. Een boek heeft gemiddeld 300 pagina's en elke pagina bevat zo'n 4000 letters. Voor 1 letter hebben we 1 byte opslaggeheugen nodig. We gebruiken ZIP compressie, waarbij bestanden tot 15% van de oorspronkelijke grootte kunnen worden teruggebracht. Hoeveel Blu-ray Discs (25 GBytes) hebben we nodig om al deze boeken op te kunnen slaan ?



Opgave 19

De afzonderlijke bits op een cd, dvd of Blu-ray Disc staan weggeschreven langs een spiraal. De afstand tussen twee naburige sporen van deze spiraal, de spoorbreedte p , is voor een cd gelijk aan $p = 1,6 \mu\text{m}$. Een μm is $10^{-3} = 1/1000$ millimeter.



- Hoeveel sporen liggen er over een afstand van één mm naast elkaar?
- Hoe lang is het totale spoor op een cd:

Om een idee te krijgen van de totale lengte L van het cd-spoor, kun je een slim rekentrucje gebruiken. Zoals we zo meteen laten zien kun je de lengte L van de spiraal goed benaderen met de formule:

$$L = \frac{\pi (R_{\text{uit}}^2 - R_{\text{in}}^2)}{p}$$

De minimale en maximale radius van de spiraal is voor cd, dvd en Blu-ray Disc gelijk aan $R_{\text{in}} = 23 \text{ mm}$ en $R_{\text{uit}} = 58 \text{ mm}$.

De spoorbreedte p voor de verschillende systemen is gelijk aan:

$p_{\text{cd}} = 1,6 \mu\text{m}$; $p_{\text{dvd}} = 0,74 \mu\text{m}$ en $p_{\text{Blu-ray Disc}} = 0,32 \mu\text{m}$.

Bereken nu de totale lengte van het data spoor voor een cd, dvd en Blu-ray Disc (let op de gebruikte eenheden):

$$L_{\text{cd}} = 3,14 \times (\dots - \dots) / \dots = \dots$$

$$L_{\text{dvd}} = 3,14 \times (\dots - \dots) / \dots = \dots$$

$$L_{\text{Blu-ray Disc}} = 3,14 \times (\dots - \dots) / \dots = \dots$$



Opgave 20

Hoeveel bits passen er nu op een Blu-ray disc? We kunnen dit als volgt exact uitrekenen.

Gebruik hiervoor de lengte van het spoor op een Blu-ray disc die je in de vorige opgave berekend hebt.

Deel de totale lengte van het spoor door de bitlengte. De fysische lengte van 1 bit bedraagt voor het Blu-ray Disc systeem 75 nm. Dat deze lengte kleiner is dan de grootte van de laserspot hebben we te danken aan de *kanaalcodering*, waarover zo meteen meer.

Er passen dan / = bits op een Blu-ray Disc.

NB: Het hierboven berekende aantal bits is het totaal aantal *kanaal bits* (zie paragraaf 3.3)! Dit is dus inclusief alle extra informatie zoals bits die nodig zijn voor de error correctie, bits voor adresinformatie, voor timinginformatie, etc...



De lengte van een spiraal, een benadering

Beschouw de spiraal als een verzameling van N concentrische cirkels, met straal R_1 t/m R_N . De afstand tussen twee naburige cirkels is gelijk aan de spoorbreedte p . De omtrek O_i van cirkel i met straal R_i bedraagt $2\pi R_i$.

De totale lengte L van de spiraal is dan gelijk aan de som van de omtrekken van alle cirkels O_i , met $i=1$ t/m N :

$$L = \sum_{i=1}^N O_i = \sum_{i=1}^N 2\pi \cdot R_i$$

Deze som kunnen we makkelijk uitrekenen als we bedenken dat de som van de omtrekken van de eerste en de laatste cirkel gelijk is aan de som van de omtrekken van de 2^e en de op één na laatste cirkel:

$$2\pi \cdot R_1 + 2\pi \cdot R_N = 2\pi \cdot (R_1 + p) + 2\pi \cdot (R_N - p)$$

en deze is gelijk aan de som van de omtrekken van de 3^e en de op 2 na laatste cirkel, etc. De som van de omtrekken van alle cirkels is dus gelijk aan de helft van het totaal aantal cirkels, maal $(2\pi \cdot R_1 + 2\pi \cdot R_N)$, ofwel:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_N - R_1}{p} \cdot 2\pi \cdot (R_1 + R_N) = \frac{\pi \cdot (R_N^2 - R_1^2)}{p}$$

In ons geval is $R_1 = 22$ mm, $R_N = 58$ mm en $p = 320$ nm.

De lengte van een spiraal, exact

Voor de wiskids onder ons, en alleen als je het begrip integreren hebt gehad: je kunt de lengte van een spiraal exact bepalen met behulp van *integratie*. Als we langs de spiraal lopen zal de afstand r van het spoor ten opzichte van het centrum van de spiraal geleidelijk toenemen als functie van de omloophoek ϕ (immers, dit is de definitie van een spiraal).

Als we beginnen (dus als $\phi = 0$) geldt $r=R_1$. Vervolgens zal er voor elke gehele omwenteling ($\phi \rightarrow \phi + 2\pi$) een afstandje p (de spoorbreedte) bijkomen:

$$r(\phi) = R_1 + \frac{\phi}{2\pi} \cdot p$$

Het totaal aantal omwentelingen bedraagt $N_\phi = (R_N - R_1) / p$.

De lengte van een klein boogsegmentje op afstand $r(\phi)$, met hoek $\Delta\phi$, bedraagt $r \cdot \Delta\phi$. De totale lengte van de spiraal is dan gelijk aan de som van al deze boogsegmentjes:

$$L = \sum_{\phi=0}^{N_\phi \cdot 2\pi} r(\phi) \cdot \Delta\phi = \int_{\phi=0}^{N_\phi \cdot 2\pi} r(\phi) \cdot d\phi = \int_{\phi=0}^{N_\phi \cdot 2\pi} [R_1 + \phi \cdot (p/2\pi)] \cdot d\phi$$

Bereken deze integraal en vergelijk het antwoord met de benadering voor de spiraallengte.

3.3 Digitale kanaalcodering

Je hebt berekend hoeveel bits er op de verschillende discs passen. Met een truc is het mogelijk om nóg meer bits op een disc te zetten. Deze truc noemen we *digitale kanaalcodering* en wordt o.a. ook toegepast bij optische telecommunicatie over een glasvezel (bijvoorbeeld voor internet) en het oversturen van digitale tv via een satelliet.

Hieronder zie je het oppervlak van een cd, wanneer deze zonder kanaalcodering gebrand zou worden. Elke bit krijgt een apart putje toegewezen. Omdat we zoveel enen en nullen door elkaar hebben bij een reeks gegevens, zou het een oppervlak van heel veel, kleine putjes worden. Dit is niet zo rendabel. Bovendien is het technisch gezien lastig om die kleine, afzonderlijke putjes foutloos te lezen.



figuur 11. Putjes in het oppervlak van een cd

Met digitale kanaalcodering wordt de informatie in reeksen langere putjes vertaald. Die zijn niet alleen makkelijker uit te lezen, maar

kunnen ook meer informatie bevatten dan een rij losse putjes. Bovendien kunnen we door heel nauwkeurig te kijken naar de *timing* van de putjes die voorbijkomen, bits lezen en wegschrijven naar disc die feitelijk kleiner zijn dan de spotgrootte van de gefocusseerde laserbundel. Hoe werkt dit?

Voor alle duidelijkheid: de lengte van het kortste putje dat we kunnen lezen wordt nog steeds bepaald door de grootte van de laserspot. Daar komen we eenvoudigweg niet onderuit.

Als we het kleinst mogelijke putje weergeven met **a**, dan zou een enkele bit, **1** of **0**, dus overeenkomen met een stukje dataspoor met lengte **a**. Een bitreeks als **111** zou dan overeenkomen met een stukje dataspoor met lengte **3a**. En voor de bitreeks **0111** heb je dus een lengte **4a** nodig op de disc. Voor een Blu-ray Disc geldt dat

$$a = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA} = 0,29 \mu m$$

Maar moeten we de bitreeks **111** per se wegschrijven als **aaa** ? Nee! Zolang het bijbehorende putje maar groter is dan **a** (de *resolutie* van het uitlees systeem) kunnen we de lengte van het putje goed meten.

NB: De oplettende lezer heeft hier vast opgemerkt dat we nu opeens $a=0.61 \times \lambda/NA$ gebruiken. Terwijl we eerder zagen dat de grootte van de laserspot gelijk is aan $w=1.22 \times \lambda/NA$. Dit heeft te maken met het feit dat de *resolutie* of het *oplossend vermogen* van een optisch systeem gelijk is aan de helft van de spot grootte.

Nauwkeurige timing

We gaan nu nauwkeurig kijken naar de timing van de gemeten signalen. Bij een voldoende nauwkeurig systeem kunnen we best onderscheid maken tussen een putje met een lengte **a**, en een putje met een lengte van bijvoorbeeld $1\frac{1}{2}a$.

We kunnen dan het volgende afspreken:

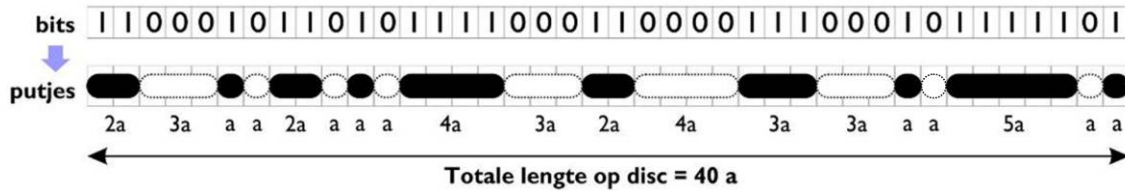
- ▶ één enkele losse bit schrijven we weg met lengte **a**;
- ▶ twee identieke bitten, bijvoorbeeld **11** of **00**, schrijven we weg als een putje met lengte $(1+\frac{1}{2})a=1\frac{1}{2}a$;
- ▶ drie opeenvolgende identieke bitten, **111** of **000**, schrijven we weg als een putje met lengte $(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{2})a=2a$; enzovoorts.

Deze truc heet *digitale kanaal codering*.

Wat levert ons dit op? Om hier een idee van te krijgen, kijken we naar de volgende reeks van 40 bits die we naar een disc gaan wegschrijven:

1100010110101111000110000111000101111101

Wanneer we **géén kanaalcodering** toepassen, en dus voor elke afzonderlijke bit een stukje dataspoor met lengte a gebruiken, dan hebben we op de disc een lengte van $40a$ nodig om alle bits weg te schrijven. Dit is weergegeven in onderstaande figuur. Op de bovenste rij zie je de reeks bits, op de onderste rij zie je de putjes op de disc.



figuur 12. Het wegschrijven van binaire getallen zonder kanaalcodering

Hoeveel ruimte hebben we nodig om dezelfde bitreeks weg te schrijven **mét kanaalcodering**? Hiervoor zetten we de reeks bits eerst om in een reeks getallen die aangeeft hoeveel identieke bits er steeds achter elkaar staan, de zogenaamde **runlengtes**.

Eerst hebben we twee **1**-en: dit geeft een runlengte van 2, vervolgens drie **0**-en: runlengte 3; enzovoorts.

De som van alle runlengtes voor deze bitreeks moet natuurlijk gelijk zijn aan 40, het totaal aantal bits. Controleer maar.



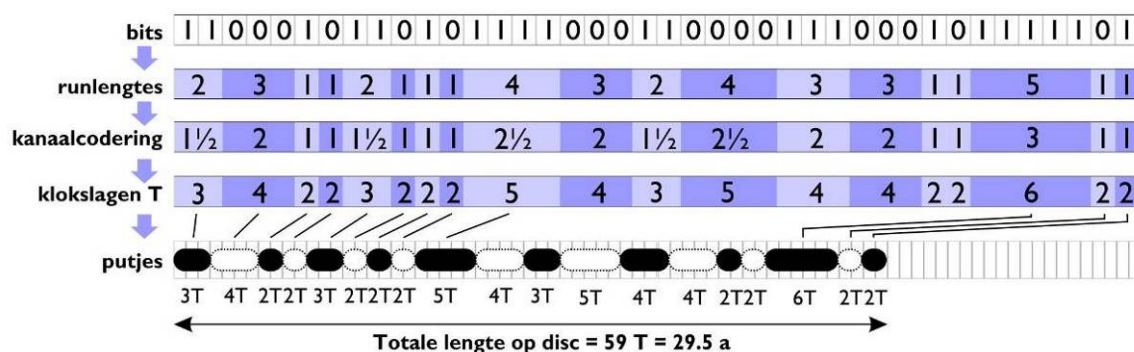
Om makkelijker te kunnen rekenen definiëren we eerst het begrip **klokslag T** . Eén klokslag T is de tijdsduur die een enkel **kanaalbit** (waarover zo meteen meer) nodig heeft om onder de laserspot door te schuiven. De kleinste eenheid die we op de disc wegschrijven, een putje met lengte a , krijgt nu 2 klokslagen T toegewezen:

$$a := 2T, \text{ ofwel } T := \frac{1}{2}a.$$

Vervolgens gaan we de kanaalcodering toepassen: een runlengte gelijk aan 1 (1 enkele gebruikersbit) schrijven we weg met de minimaal toegestane lengte $1a = 2T$ (kleiner kan niet omdat het optisch oplossend vermogen gelijk is aan a). Alle runlengtes groter dan 1 maken we stiekem een beetje korter, en wel volgens de volgende formule. Het aantal klokslagen N_T voor een bepaalde runlengte R wordt gegeven door:

$$N_T(R) = R \cdot a - (R - 1) \cdot \frac{1}{2}a = \frac{1}{2}(1 + R) \cdot a = (1 + R) \cdot T$$

Een runlengte van bijvoorbeeld $R=5$ wordt nu dus $6T = 3a$ lang. Ditzelfde putje zou zonder kanaalcodering $5a$ lang zijn! We boeken dus een winst in opslagcapaciteit van 40% !



figuur 13. Het wegschrijven van binaire getallen mét kanaalcodering:

Kanaalcodering

Dit klinkt al mooi, maar toch zijn we er nog niet. Een willekeurig patroon van gebruikersbits zal voor een groot deel bestaan uit bitreeksen als '**...0101010...**'.

Runlengte $R=1$ komt dus vrij vaak voor. Maar voor runlengte $R=1$ hebben we geen winst in opslagcapaciteit (immers, deze wordt niet korter gemaakt en blijft gelijk aan a). Om dit probleem op te lossen zijn meer geavanceerdere kanaalcoderingen bedacht, waarbij de oorspronkelijke stroom gebruikersbits eerst wordt omgezet in een nieuwe stroom bits, met een geoptimaliseerde verdeling runlengtes.

Voor Blu-ray Disc is afgesproken om alleen runlengtes te gebruiken met lengtes variërend van 2 klokslagen tot 8 klokslagen lang dus:

$$2T \leq a \leq 8T .$$

Er is hier een bovengrens gesteld aan de maximaal toegestane runlengte om te voorkomen dat er tijdens het lezen een fout gemaakt wordt. Immers, stel dat de *nauwkeurigheid* waarmee we de lengte van de klokslagen kunnen bepalen 10% van de klokslag T bedraagt. Bij het uitlezen van een lang putje van bijvoorbeeld 20 klokslagen T kan er dan een leesfout optreden van $20 \times 10\% \times T = 2 T$. Ofwel: we zitten er $2T$ naast! Waar we eigenlijk een lengte $20T$ hadden moeten uitlezen, meten we, ten gevolge van bijvoorbeeld ruis, een lengte van $18T$. Om dit soort fouten te voorkomen, is afgesproken dat de putjes voor bijvoorbeeld Blu-ray Disc maximaal 8 klokslagen lang mogen zijn.

Van gebruikersbits naar kanaalbits

We gaan nu de gebruikersbits omzetten in zogenaamde kanaalbits. Hiervoor gebruiken we een codeertabel. Hieronder vind je de codeertabel voor een zogenaamde 17-kanaalcode (minimaal $(1+1)T$, maximaal $(1+7)T$).

Gebruikersbits	Kanaalbits
00 00	101 000
00 01	100 000
10 00	001 000
10 01	010 000
00	101
01	100
10	001
11	010

Hoe ga je te werk?

1. Neem onze reeks gebruikersbits en scan deze reeks langzaam van links naar rechts af.
2. Wanneer je in de gebruikersbits een patroon tegenkomt dat gelijk is aan een patroon in de linker kolom van de tabel, dan vervang je deze gebruikersbits door de bijbehorende kanaalbits uit de rechterkolom.
3. Ga zo door met de overgebleven gebruikersbits, tot ze allemaal gecodeerd zijn in kanaalbits. Als er meerdere mogelijkheden zijn dan neem je de hoogste rij in de tabel. Bijvoorbeeld: de gebruikersbits **10 01** worden gecodeerd als **010 000**, en niet als **001 100**.

De nieuwe reeks kanaalbits wordt als volgt geïnterpreteerd. Telkens wanneer een **1** voorbij komt schakelt de laser van lezen naar schrijven, of van schrijven naar lezen. Ofwel: telkens wanneer een **1** voorbij komt, hebben we een overgang van een putje naar een niet-putje, of van een niet-putje naar een putje. De runlengte (in klokslagen) van de putjes of niet-putjes krijg je door het aantal nullen te tellen tussen twee opeenvolgende **1**-en in de stroom kanaalbits, en daar 1 bij op te tellen. Je zult zien, dat ongeacht welk patroon aan gebruikersbits je ook aanbiedt, er altijd een reeks kanaalbits uitkomt met minimale runlengte $2T$ en maximale runlengte $8T$.



Opgave 21

(i) Codeer de volgende reeks gebruikersbits met behulp van bovenstaande 17-kanaalcoderingstabel (het begin is al voorgedaan):

10-10-1001-01-100000010010111101000100101110010110

wordt gecodeerd in:

001 – 001 - 010 000 – 100 -

(ii) Reken de runlengtes in klokslagen uit voor de berekende kanaalcodering in (i). De runlengte is gelijk aan 1 + het aantal "0"-en tussen twee opeenvolgende "1"-en. Vul aan:

3T-3T-2T-5T-

(iii) Deze runlengtes bepalen uiteindelijk de benodigde ruimte op de disc, waarbij je weet dat T gelijk is aan $1/2 a$. Bereken voor de bitreeks in (i) de benodigde lengte langs het spoor van de disc. Doe dit ook voor de situatie waarbij je geen kanaalcodering gebruikt, en elk gebruikersbit overeenkomt met lengte a. En tel uit je winst !

Module

4

SCHERPSTELLEN EN SPOORVOLGEN (meet- en regeltechniek, elektrotechniek)

Voor je staat het grote model van een échte dvd-speler. Waarom is dit een dvd-speler? In het model wordt dezelfde rode laser gebruikt als in een echte dvd-speler. En ja, dit model werkt ook echt! Aan de hand van dit schaalmodel, ga je leren hoe een dvd-speler al die gegevens op een disc zo snel kan lezen.

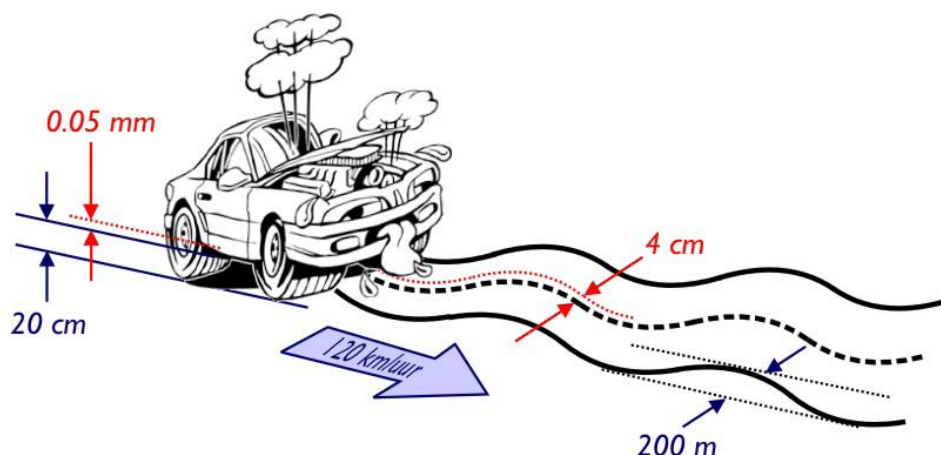
Zoals je weet, staat er op een cd, dvd, of Blu-ray Disc data geschreven langs een spiraal in de vorm van putjes. De laser herkent deze putjes, doordat de laserstraal op een detector gereflecteerd wordt als er een putje voorbij komt. Komt er geen putje voorbij, dan valt er minder licht op de detector.

4.1 Ongewenste bewegingen

Het is natuurlijk de kunst, om het spoor van putjes te blijven volgen. En dit spoor is al zo smal! Het is net als met de ouderwetse platenspeler: als de 'naald' buiten de juiste groef komt, klinkt het niet meer.

Horizontale beweging

Om je een voorstelling te geven, hoe nauwkeurig dit spoor gevolgd moet worden, bekijk dan onderstaande afbeelding:



figuur 14. Vergelijking tussen de slingerbeweging van een auto en een dvd-speler

Vergelijk de uitleeseenheid in een dvd-speler maar eens met een auto, die 120 km/uur op de een weg rijdt die 200 meter heen en weer slingert. Het midden van de weg slingert dus ook 200 meter

heen en weer. Om het midden van de weg te blijven volgen, moet de auto dus ook slingers van 200 m breed maken, maar hij mag daarbij niet meer dan 4 cm afwijken van het midden van de weg!!

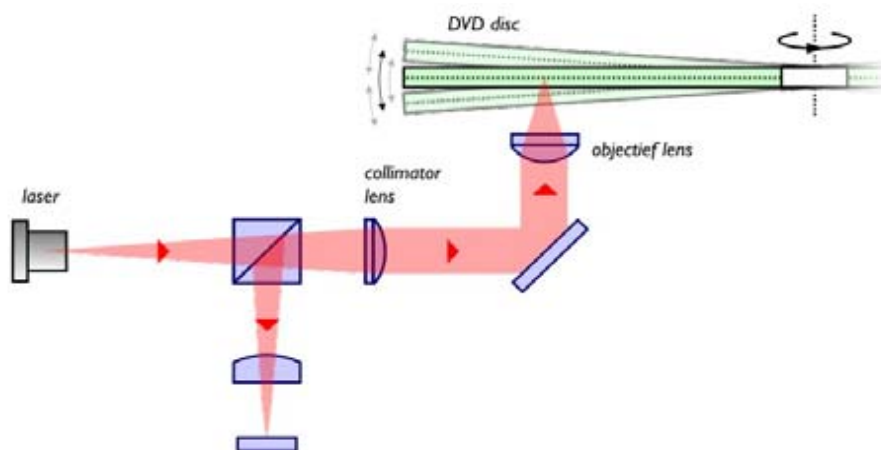
Dit is nodig omdat het middelpunt van de dataspiraal nooit exact samenvalt met het middelpunt van de as van de motor die de schijf laat ronddraaien.

De disc of de speler kan ook gaan trillen, de disc kan een beetje krom zijn, enzovoorts. Allemaal redenen waarom het dataspoor nooit precies samenvalt met de laserspot. Om dit op te lossen, maken cd-, dvd- en Blu-ray Disc-spelers gebruik van actieve spoorvolgning of *Radial Tracking*.

Verticale beweging

Een tweede probleem is het verticaal trillen van de schijf! Bedenk dat de snelheid van een cd, dvd of Blu-ray Disc in een high-speed drive aan de rand kan oplopen tot wel 200 km/uur! Ten gevolge van onbalans en luchtwervelingen zal de disc hierdoor gaan trillen. Behalve het slingeren van links naar rechts, slingert de schijf dan ook nog eens omhoog en omlaag. Dit heeft invloed op het 'scherpstellen', ofwel 'focuseren' van de laser.

De laser wordt door middel van een lens tot een zo scherp mogelijk puntje gefocusseerd op de schijf. Op het model kun je dit ook zien. Beweeg de schijf eens een beetje omhoog en omlaag: wat gebeurt er met het puntje?



figuur 15. Projectie van de laserbundel op de disc. Als de disc op en neer beweegt, raakt de laserbundel uit focus.

Figuur 15 laat zien hoe de laser geprojecteerd wordt. Je ziet ook, dat de disc op en neer slingert. Als je zou weten waar de schijf zich op een bepaald moment bevindt, kun je - door de objectieflens te verplaatsen - er steeds voor zorgen dat het laserpuntje scherp op de disc wordt geprojecteerd. Het systeem dat hier voor is ontworpen, noemen we actieve focusvolgning of *focus tracking*.

4.2 Meten en regelen

Om – ondanks allerlei slingerbewegingen van de disc – het spoor met de putjes goed te kunnen volgen, heb je dus twee volgsystemen nodig: radial tracking en focus tracking. Deze systemen zijn gecombineerd in één belangrijk onderdeel: de *tracking actuator*.



figuur 16. Een tracking actuator uit een dvd-speler

Een tracking actuator zit als volgt in elkaar:

- ▶ Hij bestaat uit een houder waarin de lens is opgehangen die de laserbundel focuseert;
- ▶ Deze houder is losjes opgehangen aan vier dunne sprietten en kan daardoor vrij bewegen in horizontale en verticale richting.
- ▶ Aan de houder zijn een aantal spoelen bevestigd, die zich in een magneetveld bevinden dat wordt opgewekt door twee sterke magneten. De magneten zijn ook onderdeel van de actuator, maar zitten aan de 'vaste wereld' vast.

Magneten en spoelen in een luidspreker



Ditzelfde principe wordt ook toegepast in luidsprekers: ook hier zit een bewegende spoel opgesloten in een vast magneetveld. Muziek (bijvoorbeeld je iTunes-bestand) wordt omgezet in een in de tijd variërende elektrische stroom.

Als er een stroom door een spoel wordt gestuurd die zich in een magneetveld bevindt, dan wordt er een kracht uitgeoefend op de luidspreker, waardoor die gaat bewegen en geluid opwekt. In ons geval zal de lenshouder van de actuator gaan bewegen waardoor de lens in verticale en horizontale richting kan worden bijgestuurd.

Gebruik van de Lorentz-kracht

De kracht die ervoor zorgt dat de luidspreker of de actuator gaat bewegen, wordt ook wel de Lorentz-kracht genoemd. Deze Lorentz-kracht F_{Lorentz} is evenredig met de stroom I_{spoel} en het magneetveld B . Hoe groter de stroom, des te groter de kracht die op de lenshouder wordt uitgeoefend en dus de uitwijking die de lens kan maken. Door de stroom I_{spoel} in te stellen kunnen we de positie van de lens heel

nauwkeurig aanpassen en er voor zorgen dat de laserspot altijd precies in het midden van het dataspoor zit.

Foutsignaal

Hoe weet een cd-, dvd- of Blu-ray Disc-speler nu welke stroom hij door de spoelen moet sturen? Hij heeft informatie nodig over de actuele positie van de schijf ten opzichte van de laserspot. Deze informatie noemen we het 'foutsignaal' dat wordt afgeleid uit het waargenomen detectorsignaal.

Zowel voor de focussing (verticaal) als voor de spoorvolgning (horizontaal) hebben we zo'n foutsignaal ter beschikking. Is bijvoorbeeld het focus-foutsignaal positief, dan zit de schijf te hoog. Is het focus-foutsignaal negatief dan zit de schijf te laag. Is het spoorvolg-foutsignaal negatief dan zit de laserspot links van het dataspoor. En is het spoorvolg-foutsignaal positief, dan zit de laserspot rechts van het spoor uit te lezen data.

We kunnen de informatie op de disc alleen correct uitlezen als de laserspot precies samenvalt met de schijf (focus-foutsignaal = 0), en als de laserspot precies samenvalt met het midden van het data spoor (spoorvolg-foutsignaal = 0).

Regelaar

Als we weten hoe groot het foutsignaal is, dan hebben we nog een 'regelaar' nodig. Deze zet het foutsignaal om in een elektrische stroom die door de spoelen wordt gestuurd.

Cruise control



Vergelijk dit maar met de 'cruise control' van een auto. Hier wordt ook een regelaar gebruikt die ervoor zorgt dat de snelheid altijd precies gelijk is aan de ingestelde snelheid. De regelaar probeert automatisch de fout (actuele snelheid minus ingestelde snelheid) tot nul terug te brengen. Ga je berg af, dan geeft de cruise control automatisch iets minder gas. Ga je berg op, dan wordt er iets meer gas gegeven. Je hoeft daar zelf niets voor te doen.

In een cd-, dvd- en Blu-ray Disc-speler zitten een aantal van deze regelaars. Als het focus-foutsignaal positief is (schijf zit te hoog), dan zorgt de focusregelaar automatisch voor een positieve stroom die de actuator, en dus ook de lens, omhoog beweegt. Is het focus foutsignaal negatief (schijf zit te laag), dan stuurt de focus regelaar een negatieve stroom door de actuator spoelen waardoor de actuator plus lens, omlaag bewegen. Op deze manier blijft de afstand tussen de disc en de lens steeds hetzelfde.

Hetzelfde gebeurt voor de spoorvolgning. De spoorvolgregelaar zorgt ervoor dat de laserspot altijd precies samenvalt met het midden van het spoor.

Regelsnelheid

Als de focus- en spoorvolg-regelaar aanstaan, dan zit de laserspot als het ware aan de schijf 'vastgeplakt'. We kunnen nu beginnen met het eigenlijke uitlezen van de data. Nu moet je weten dat zo'n regelaar, die uit een stukje elektronica bestaat, een bepaalde maximale regelsnelheid heeft. Deze maximale regelsnelheid is lager als het gewicht van de actuator groter is. Immers, het kost meer moeite om een zwaar object snel te verplaatsen, dan een licht object.

Ook de regelaars in een cd-, dvd- of Blu-ray Disc-speler hebben een maximale regelsnelheid. Die snelheid wordt ook wel *bandbreedte* genoemd. Het kan dus gebeuren, bijvoorbeeld als de speler een schokje te verwerken krijgt, dat de regelaar deze snelle verandering van het foutsignaal niet kan bijhouden. In dat geval 'vliegt de regeling eruit' en worden stukjes data niet of foutief uitgelezen. Maar geen nood: daar hadden we juist de fout correctie voor uitgevonden.

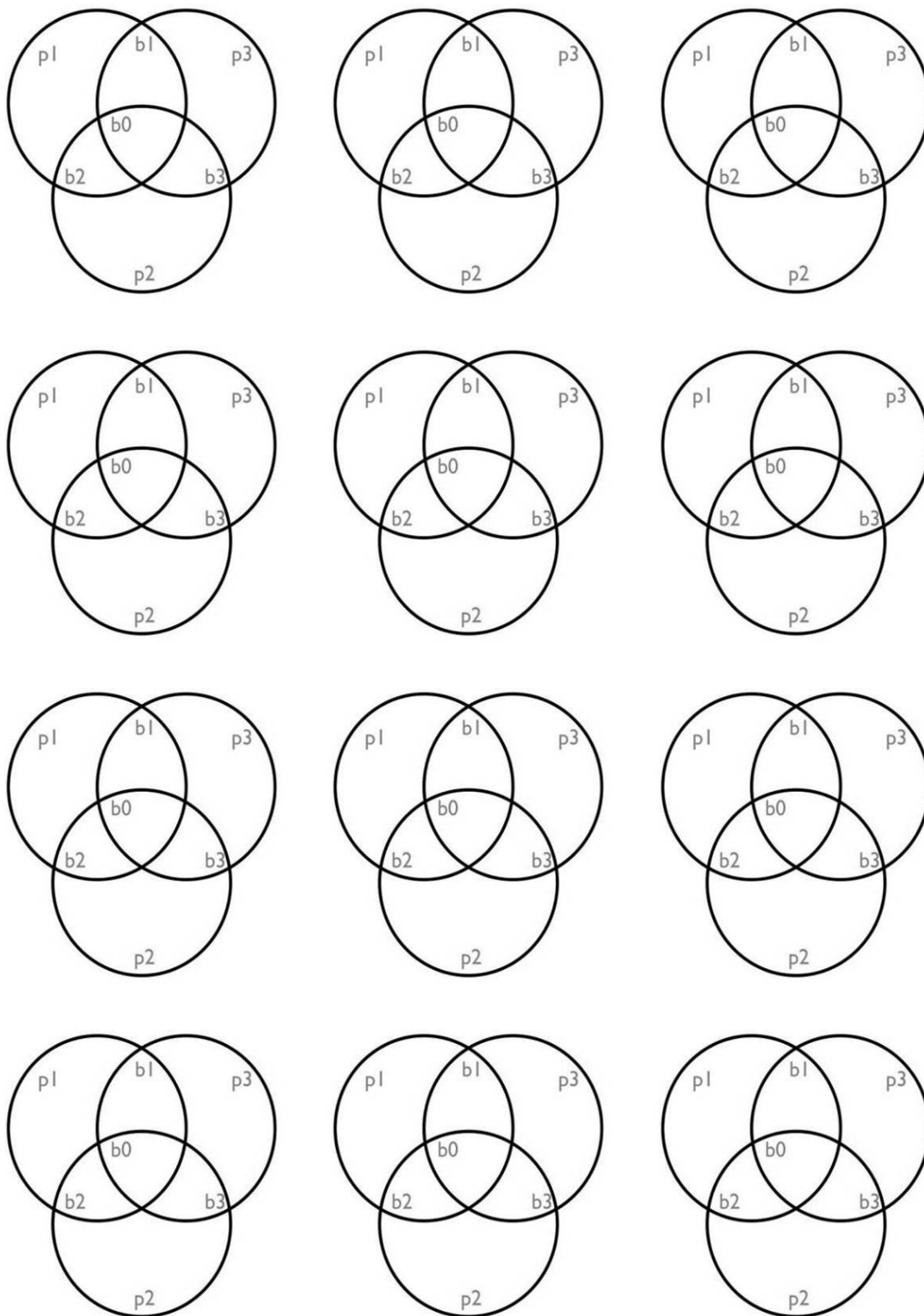
Hoe dit allemaal precies gaat werken, ga je ontdekken met behulp van het grote dvd-speler model!

Bijlage A: Werkblad 'binair'

In deze tabel staan de letters van het alfabet, hun ASCII-code en hun binaire weergave. ASCII is de American Standard Code for Information Interchange die letters, cijfers en andere symbolen aan een getal koppelt zodat een computer ermee kan 'rekenen'.

letter	ASCII-code	binair
hoofdletter A	101	01000001
hoofdletter B	102	01000010
hoofdletter C	103	01000011
hoofdletter D	104	01000100
hoofdletter E	105	01000101
hoofdletter F	106	01000110
hoofdletter G	107	01000111
hoofdletter H	110	01001000
hoofdletter I	111	01001001
hoofdletter J	112	01001010
hoofdletter K	113	01001011
hoofdletter L	114	01001100
hoofdletter M	115	01001101
hoofdletter N	116	01001110
hoofdletter O	117	01001111
hoofdletter P	120	01010000
hoofdletter Q	121	01010001
hoofdletter R	122	01010010
hoofdletter S	123	01010011
hoofdletter T	124	01010100
hoofdletter U	125	01010101
hoofdletter V	126	01010110
hoofdletter W	127	01010111
hoofdletter X	130	01011000
hoofdletter Y	131	01011001
hoofdletter Z	132	01011010

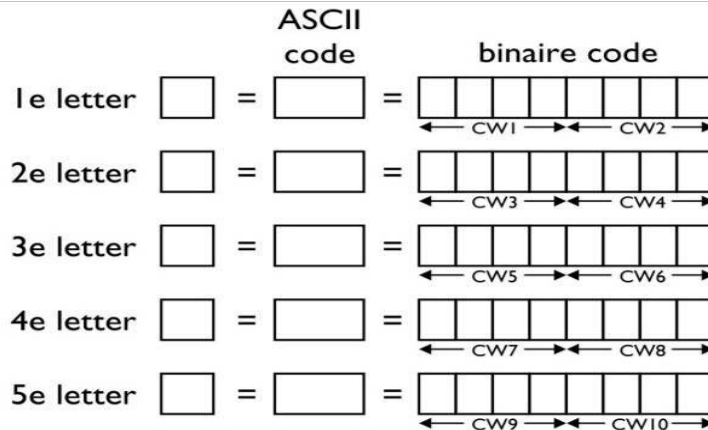
Bijlage B: Werkblad 'pariteitabel'



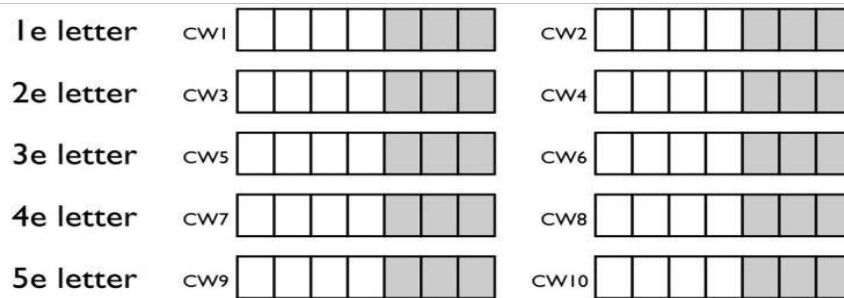
Bijlage C: Werkblad 1 - 'Maak je eigen cd'

Opnemen

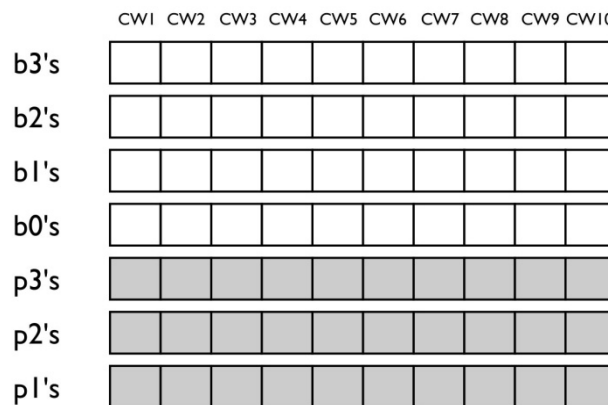
Schrijf hier je gedigitaliseerde (binaire) boodschap:



Schrijf hier de codewoorden. In de grijze vakjes komen de pariteitbits. Cw1 staat voor codewoord1, cw2 staat voor codewoord 2, enzovoort.



Schrijf hier de reeks enen en nullen nadat je interleaving hebt toegepast. Let op de volgorde van de codewoorden. Als het goed is komen de pariteitbits in de grijze vakjes terecht.



Schrijf nu regel voor regel (van links naar rechts, van boven naar beneden) de bits op je cd (1 cijfer per vakje).

Begin bij START en **vervang op de plaats van de kras je eigen informatie door 0-en.**

Bijlage D: Werkblad 2 - 'Maak je eigen cd'

Afspelen

Schrijf hier de reeks enen en nullen van de cd die je gaat afspelen.
 Begin bij START (vul eerst de rij met de b3's, dan de rij met de b2's, enzovoort)

	CW1	CW2	CW3	CW4	CW5	CW6	CW7	CW8	CW9	CW10
b3's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b2's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b1's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b0's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
p3's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
p2's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
p1's	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Schrijf hier de gereconstrueerde codewoorden na 'de-interleaven' (dit is de omgekeerde bewerking van interleaven). In de grijze vakjes komen de pariteitbits. Vervang waar nodig een foute bit na controle met de Hamming-code.

1e letter	CW1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CW2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2e letter	CW3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CW4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3e letter	CW5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CW6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4e letter	CW7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CW8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5e letter	CW9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CW10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Schrijf hier de digitale boodschap:

	binaire code	ASCII code	letter
1e letter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ← CW1 → ← CW2 →	= <input type="checkbox"/>	= <input type="checkbox"/>
2e letter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ← CW3 → ← CW4 →	= <input type="checkbox"/>	= <input type="checkbox"/>
3e letter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ← CW5 → ← CW6 →	= <input type="checkbox"/>	= <input type="checkbox"/>
4e letter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ← CW7 → ← CW8 →	= <input type="checkbox"/>	= <input type="checkbox"/>
5e letter	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ← CW9 → ← CW10 →	= <input type="checkbox"/>	= <input type="checkbox"/>

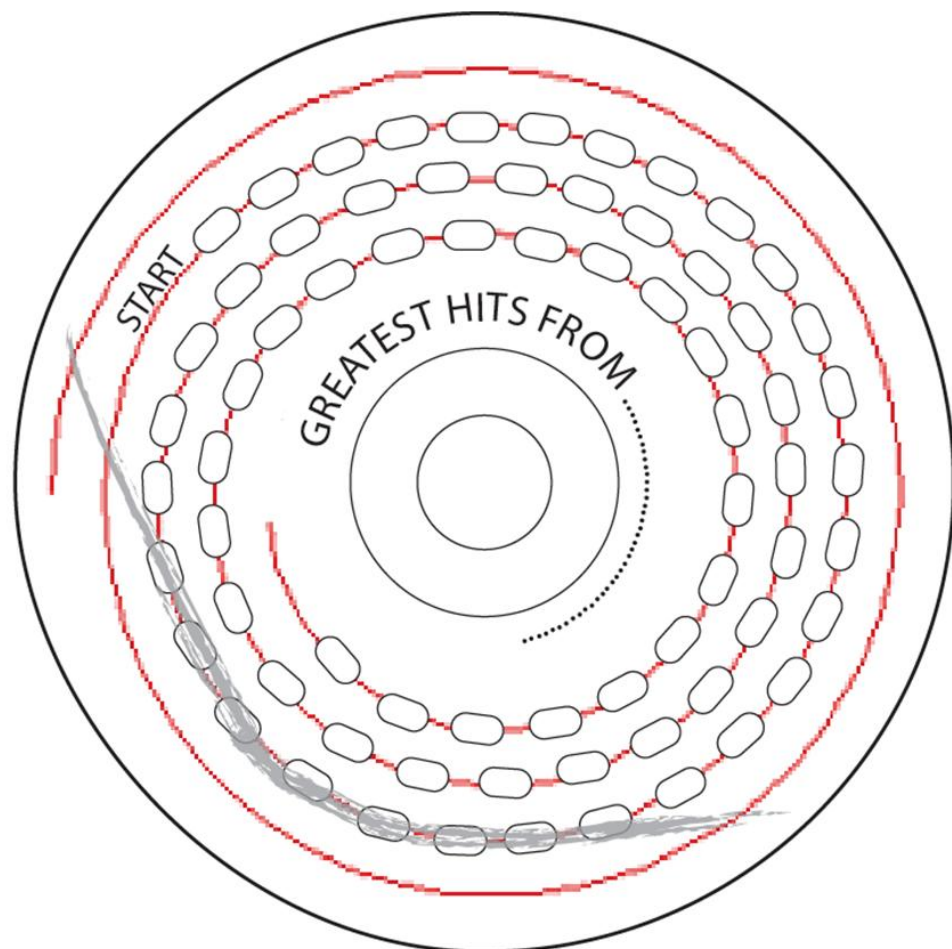
De boodschap is: _ _ _ _ _

Klopt dit met de boodschap die je medeleerling heeft gecodeerd?

Bijlage E: Werkblad 3 - 'Maak je eigen cd'

Schrijf de 0-en en 1-en in de vakjes. Je kunt ook de vakjes met twee kleuren inkleuren. Zet er dan wel bij welke kleur een 1 voorstelt en welke kleur een 0.

Vervang op de plaats van de kras je eigen informatie door 0-en. **Let op:** noteer hier **niet** eerst je originele, foutloze, bits. Deze zouden dan immers achterhaald kunnen worden door het team dat deze cd gaat uitlezen, en dat is nu juist niet de bedoeling!



Maak hier je eigen cd.

Kijk voor meer informatie over Jet-Net op:

www.jet-net.nl