

KU LEUVEN



MA INGENIEURSWETENSCHAPPEN:
COMPUTERWETENSCHAPPEN

Digitale Elektronica en Processoren

LESNOTA'S

Author:
Helena BREKALO

2015-2016

Contents

1	Les 1	5
1.1	Slides: 1_Intro	5
1.2	Slides: 2_Digitaal_Ontwerp	6
2	Les 2	11
2.1	Slides: 2_Digitaal_Ontwerp	11
2.2	Sides: 3_Technologie	18
3	Les 3	21
3.1	Sides: 3_Technologie	21

Chapter 1

Les 1

1.1 Slides: 1_Intro

Slide 6: Die meerdere cores zorgen voor een grotere verwerkingskracht. Voorbeeld van de smartphone: het blokschema is hier van belang. Je hebt een aantal dingen die contact maken met de buitenwereld. In het blauw: de telecommunicatie, het echte gsm-gebeuren. Je hebt ook ergens iets draadloos (WiFi) (bruin). Het is dus heel specifieke hardware die een bepaalde taak vervult, die is geoptimaliseerd om één ding heel goedkoop, eenvoudig en compact te doen. Je hebt ook geheugen en powermanagement. De donkere blokjes in het midden zijn een algemene processor (rechts) die redelijk flexibel is en een specifieke processor (links) die alle signaalverwerking doet.

Slide 7: SoC: alles op 1 enkele chip. Heel wat verschillende dingen zijn weer aanwezig. 3 grote stukken: opgelijst met tweekleurige pijltjes:

- Programmeerbare processor: die kan vanalles en nog wat doen.
- Niet-programmeerbare processoren: specifieke processoren voor beeldverwerking bv. Ze zijn meestal beperkt programmeerbaar, om één specifieke familie van problemen op te lossen.
- Controle-eenheden.

Waarom die tweede groep? → Veel goedkoper! Je hebt ongeveer 1000 keer zoveel energie nodig op een programmeerbare processor dan bij een niet-programmeerbare. Bv i.p.v. 1W 1kW.

Slide 8: We vertrekken van een doel: we hebben een algoritme of beschrijving op gedragsniveau. Dat is een combinatie van software en hardware. Sommige dingen doe je via software omwille van flexibiliteit, andere dingen doen we via hardware. Dat is allemaal afhankelijk van elkaar. De keuze van welk programma je gaat gebruiken zal impact zal hebben op de hardware en de hardware die je hebt zal bepalen hoe programmeerbaar het is. Men spreekt daarom van hardware-software codesign. hardware gaat ook interageren met wat als algoritme gebruikt kan worden: sommige dingen zijn makkelijk te implementeren, andere moeilijker. Het kan zinvol zijn om de algoritmen eventueel wat aan te

passen.

Bij de hardware heb je een digitaal en een analoog gedeelte. Bij een smart-phone: alle telecommunicatie is analoog: continue signalen. Wat in het midden stond was meer digitaal: meer berekeningen. Beiden moeten geïmplementeerd worden, gewoonlijk op dezelfde componenten, momenteel gebeurt dat met transistoren en dat moet vertaald worden naar een chip (geïntegreerde schakeling). Wij gaan het hier enkel hebben over het linkerdeel. Dit kan nog opgesplitst worden in 3 lagen. Poorten liggen het dichtst aan bij transistoren, die kunnen gebruikt worden om basiscomponenten te maken (bv. basisprocessoren) die samengezet kunnen worden om systemen te bouwen.

Slide 9: Het gaat in eerste instantie over het ontwerp van elektronische schakelingen. We gaan daar ook voorbeelden van zien. Hardware kan je beschrijven via een schema, maar ook via een taal: hardware-beschrijvingstalen. We gaan die ook bekijken. We gaan dit ook toepassen in oefeningen en labo's.

Slide 10: Drie grote blokken:

1. Basis: principes van digitaal ontwerp en hoe je dat doet met elektronica. Veel van de dingen die we gaan zien kan ook met andere dingen dan elektronica.
2. Dan gaan we zien hoe we daar schakelingen mee kunnen maken. Eerst zonder geheugen en dan met geheugen.
3. Dan gaan ingewikkeldere algoritmen implementeren en dan kijken hoe dat geïmplementeerd kan worden.

Slide 11: Vereiste voorkennis.

Examen: FSM is schriftelijk, rest is ook mondeling. Eerst wordt de theorie ondervraagd, dan de vertaling van een algoritme (vraag 1).

1.2 Slides: 2_Digitaal_Ontwerp

Slide 3: Documentatie is heel belangrijk: als handleiding en om bij te houden wat geprobeerd is (en wat dus wel en niet werkt).

Slide 4: Specificatie: beschrijving, heel dikwijls in natuurlijke taal, van welke berekeningen je wilt/hebt. Specificaties zijn in de meeste gevallen te algemeen en te onvolledig om er een duidelijke implementatie van te maken omdat het in veel gevallen te weinig specificeert. Er kunnen heel veel verschillende algoritmes gebruikt worden om een probleem op te lossen. Langs de andere kant gaat het soms al zaken vastleggen waarvan je niet de bedoeling had dat het vastgelegd werd (bv. vaste of vlottende komma).

Slide 5: Het geheel is dikwijls iteratief (vandaar de lus). Synthese: schakeling maken. Het is niet het bouwen van de schakeling maar een iets algemenere beschrijving maken. Normaal doe je geen synthese van een algemene beschrijving om onmiddellijk op een geïntegreerde schakeling uit te komen. Je gaat daarom in niveau's werken: in stapjes oplossen: eerst op het hoogste niveau kijken en een heel algemene beschrijving doen: ik wil een FFT implementeren, wat houdt dat in, wat voor verwerking heb ik nodig?

Vervolgens ga je een niveau lager: welke blokken heb je allemaal nodig? Die ga je verder verfijnen tot op een niveau waarop je blokken krijgt waarvan je ongeveer weet hoe die geïmplementeerd moeten worden. Je gaat dat dan nog verder opsplitsen (in poorten en flip flops). Dan komt er nog een niveau onder: hoe maak ik een poort (met transistoren)?

Door dat in stukjes te doen en elk stukje per keer op te lossen is het doenbaar: je maakt ter hapklare brokken van die je kan verwerken. Wij gaan de twee middenste niveau's vooral bekijken.

Slide 6: Belangrijk is het gebruik van bibliotheken: de kennis van anderen, dingen die je zelf niet meer moet doen. We gaan componenten hergebruiken. Als iemand iets nog niet gedaan heeft ga je het zelf maken, het in de bibliotheek steken zodat het hergebruikt kan worden. Die bibliotheken komen op ieder van de niveau's terug. Waarom zo belangrijk? → Wet van Moore.

We krijgen dus heel wat mogelijkheden jaarlijks erbij. Uiteindelijk zal dat wel gaan vastlopen. Wat ontstaat er nu? We krijgen elk jaar meer en meer mogelijkheden. We kunnen dit jaar een twee keer zo complexe schakeling maken dan 2 jaar geleden. Een meer complexe schakeling ontwerpen duurt meer dan twee keer zo lang want je raakt volledig het overzicht kwijt. De processoren aan de rechterkant teken je niet zomaar op 1 blad, dat duurt eindeloos lang. De enige manier om dat doenbaar te krijgen is door zoveel mogelijk te hergebruiken. Dit betekent dat het ontwerpen altijd achterloopt op de mogelijkheden die we hebben.

Slide 7: Blauw: wat we als verwerkingskracht kunnen doen, dit is wat ons interesseert. Meer cores op 1 chip: kost qua ontwerpinspanning niet zoveel werk. In de toekomst gaan we dus veel meer in parallel moeten laten gebeuren. Vermogen (Typical Power): is belangrijk want je kan dat niet eindeloos laten toenemen. Het vermogengebruik hangt af van de spanning in het kwadraat (V), de grootte van de chip (C) en de frequentie (f). Hoe hoger de frequentie, hoe meer verwerkingskracht je hebt. Oorspronkelijk zaten we aan minder dan een Watt voor een geïntegreerde schakeling zitten we nu aan 100 Watt.

We willen het vermogen dus constant houden maar dat heeft zijn impact op de frequentie en de verwerkingskracht.

Slide 8: Analyse: nagaan of het voldoet aan de specificaties. Dat doe je niet helemaal op het einde: het ontwerp gebeurt in stapjes en ga je telkens testen of dat het wel voldoet aan zijn specificaties op dat niveau. Dat betekent meer dan alleen maar testen of het doet wat het moet doen. Het functionele is eigenlijk maar een aspect ervan, er hoort veel meer bij: het vermogenverbruik bv. mag niet eindeloos oplopen. De snelheid waaraan dat kan werken, de

kostprijs,... Dat soort zaken moet ook nagekeken worden. De testbaarheid is ook een belangrijke factor.

Slide 10: Schakelingen gebaseerd op logische werking. We werken met discrete signalen en in de praktijk met bits: de waarden worden enkel 0 of 1.

Slide 11: Er is een verband tussen het al dan niet ingedrukt zijn van de knop en de uitgang. Je kan ook andere functies hebben: een complementaire die in rusttoestand een verbinding maakt: in rusttoestand is er een verbinding en brandt de lamp. Druk je de knop in, gaat de lamp uit. Er zijn heel wat verschillende manieren om een logische functie aan te duiden, afhankelijk van welk boek/welke beschrijving je neemt: onderaan: verschillende manieren om NOT te schrijven. Wij gebruiken normaal altijd een accent (').

Slide 12: Andere logische functies:

- AND: schakelaars in serie zetten en dan brandt de lamp alleen als beide knoppen ingedrukt zijn.
- OR: schakelaars in parallel zetten: de lamp brandt als een van de twee schakelaars ingedrukt is of ze alletwee ingedrukt zijn.

We kunnen complexere schakelaars maken: je kan een lamp bedienen vanop twee plaatsen, dat is ook een logische functie: XOR. De lamp zal branden als de ene of de andere knop ingedrukt is, maar niet als ze alletwee ingedrukt zijn of alletwee niet ingedrukt zijn. Voor andere logische functies kan je ze herleiden tot de twee eersten (AND en OR): XOR is een parallelschakeling van een serieschakeling: je hebt alleen maar een parallel- en een serieschakeling nodig en de inverter. We hebben dus maar 3 logische schakelingen nodig: het inverse (NOT), een AND en een OR, daarmee kunnen we alle logische functies bepalen.

Slide 13: Hoe beschrijven we de functionaliteit van zo'n logische schakeling? → Met een waarheidstabel: een opsomming van alle mogelijke combinaties aan de ingang en daarbij wordt aangegeven wat de uitgang is. Vermits een waarheidstabel eigenlijk de functionaliteit beschrijft zijn twee implementaties met eenzelfde waarheidstabel volledig equivalent, die doen exact hetzelfde. Je kan dus ook zeggen dat als je een waarheidstabel hebt die je op verschillende manieren kan maken, je aan de hand van die waarheidstabellen verschillende schakelingen kan maken. Het is dus niet zo dat bij een functionaliteit altijd maar 1 implementatie mogelijk is, er zijn meerdere mogelijkheden.

Slide 14: Logische poorten: meer dan de inverter, de AND en de OR-poort heb je in principe niet nodig, hoewel men dikwijls gebruik maakt van complexe poorten. In CMOS is het bv. goedkoper om met complexe poorten te werken dan met de basispoorten. Een logische schakeling is dan een combinatie van die poorten. Je kan dit met een schema doen of een programma.

Slide 15: Als je zo'n schema hebt kan je ook makkelijk de waarheidstabel opstellen. Je gaat gewoon op alle tussenliggende draden kijken wat er gebeurt voor elke combinatie van ingangen aan de uitgangen: dus aan a en b en daarna f en op die manier kan je de functionaliteit gaan beschrijven van wat die schakeling doet.

Dat is een ding: je hebt een schakeling en je weet wat die doet.

Meestal wil men het omgekeerde: men wil het omgekeerde, wat is er de schakeling voor? Maar zelfs dit is een onvolledige beschrijving van wat die schakeling doet want het beschrijft alleen de logische functie en in praktijk is een schakeling meer dan alleen zijn logische functie.

Een schakeling wordt altijd nog aangevuld met een tijdsgedrag. Het gaat er hier niet over hoe traag die poorten werken, het is niet dat als er bij x iets verandert, er onmiddellijk iets bij b verandert, dat gebeurt nooit ogenblikkelijk; ogenblikkelijk bestaat niet: het duurt altijd een zekere tijd. Dat betekent dat als we iets veranderen bij x bv., dat een tijdje later a gaat veranderen. y veranderen gaat een tijdje later b veranderen. Als a en b veranderd zijn, zal f een tijdje later veranderen. Wat je dan ziet verschijnen zijn vertragingen: het ogenblik dat de ingang verandert en dat de uitgang verandert, in elke reële schakeling is dat zo. Die vertraging gaat meespelen in hoe efficiënt de schakeling werkt. Het is dus belangrijk om die te kennen, je gaat dat nooit terugvinden in een logische functie, dat is bijkomende informatie.

Het tijdsgedrag nakijken is ook heel belangrijk om problemen te detecteren, problemen die je niet gaat zien als je alleen maar naar de functionaliteit gaat kijken. Bv. a en b veranderen "tegelijkertijd" (dat bestaat niet! De ene gebeurtenis zal altijd iets voor de andere plaatsvinden.) → dat kan zijn gevolgen hebben: als b iets vroeger verandert dan a, dan krijgen we heel kortstondig een waarde 0, dan zie je aan de uitgang plots een piekje verschijnen, wat er niet zou mogen zijn. Als je gewoon naar de logica kijkt, zou die er niet mogen zijn, maar in praktijk is dat er wel en dit kan voor problemen zorgen. Dat piekje dat er is, dat we niet verwachten, kan opeens gevolgen hebben in de verdere verwerking van de schakeling, dus we moeten ons daar bewust van zijn. We moeten dus niet alleen de logische functies controleren, maar het tijdsgedrag is even belangrijk.

Slide 16: Kijken we dan naar het omgekeerde: we hebben een functionaliteit, hoe kunnen we dat implementeren? Er staan twee implementaties, als je die gaat uitrekenen, dan zie je dat die identiek zijn, die doen juist hetzelfde.

Als we dit gedaan hebben kunnen we kiezen voor een van de implementaties en vanuit logisch standpunt maakt het geen enkel verschil. Het is dan niet zo dat je eender welke realisatie zomaar mag kiezen: de linkse heeft meer poorten dan de rechtse: het gaat meer kosten (meer transistoren, een grotere chip, ...). De linkse gaat ook trager werken want als je van x naar de uitgang moet ga je door twee ingangen telkens moeten gaan waar dat rechts niet het geval is.

Als we dan toch kunnen kiezen willen we het zo goedkoop mogelijk en zo snel mogelijk hebben. Hoe sneller die schakeling is, hoe hoger de verwerkingskracht: we kunnen maar aan de volgende bewerking beginnen als de vorige gedaan is. Als die schakeling dus heel snel een resultaat levert kan die heel snel aan een volgende bewerking beginnen. Vandaar dat hoe sneller de schakeling werkt, hoe hoger de verwerkingskracht. Als we dan toch kunnen kiezen willen we die schakeling met de minimale kostprijs en die schakeling met de hoogste verwerk-

ingskracht (die zo snel mogelijk het resultaat geeft). We gaan daarvoor gebruik maken van de formules die erbij staan.

De snelheid is evenredig met het aantal ingangen, dus de linkse zal trager werken dan de rechtse. Op die manier kan men tussen de twee schakelingen kiezen en de beste kiezen.

Slide 18: Boole algebra kan gebruikt worden omdat we ook hier met twee (logische) waarden werken. In de Boole algebra vertrekt men van een aantal axioma's. De duale uitdrukkingen zijn hier ook steeds geldig: je mag 0 door 1 vervangen en omgekeerd en $+$ door $.$ en omgekeerd.

Slide 20: Wij gaan vooral gebruik maken van de wet van De Morgan: de inverse van het product is de som van de inversen en het inverse van de som is het product van de inversen.

In dit vak zal een distributiviteit voor de vermenigvuldiging ten opzichte van de optelling en distributiviteit van de optelling ten opzichte van de vermenigvuldiging gebruikt worden.

Chapter 2

Les 2

2.1 Slides: 2_Digitaal_Ontwerp

Slide 15: Je wil weten wat de vertragingen zijn: het duurt een poosje als je iets aan de ingang verandert eer je het resultaat aan de uitgang ziet. Het tijdsgedrag toont ook problemen met de implementatie. Het probleem op de tekening toont dat a en b quasi gelijktijdig veranderen. Als a van 0 naar 1 gaat en b van 1 naar 0 zal de uitgang ook 1 worden dus f zou 1 moeten blijven. Het probleem ontstaat wanneer b iets vroeger verandert dan a: het uiteinde zal even 0 zijn, hoewel dat logisch gezien niet zou mogen. Op het moment dat je het ontwerp maakt is het belangrijk te weten wat zou kunnen optreden als probleem en je moet dat testen aan de hand van de reële implementatie.

Slide 22: Wij willen iets doen met de schakeling, hoe maak ik de schakeling zodat die daaraan voldoet? Er zijn 2 manieren om dat te benaderen: een schema tekenen/zoeken dat eraan voldoet. Anderszijds kan je ook een beschrijving in een taal doen.

Vandaag gaan we beiden ingeleid zien.

Slide 23: Hoe best het gedrag beschrijven? → Aan de hand van een waarheidstabel. Het is nu de bedoeling om aan de hand van de waarheidstabel een implementatie te maken. De logische functie kun je ook altijd omzetten naar een waarheidstabel. Verschillende logische functies kunnen eenzelfde waarheidstabel geven. De basisfunctionaliteit voor combinatorische schakelingen is dus de waarheidstabel.

In die waarheidstabel staat dat de uitgang 1 is als x en y 0 zijn,...

Je kan dit rechtstreeks implementeren met poorten: zie tekening rechtsonder.

Ofwel zijn beiden nul, ofwel is x 0 en y 1 ofwel zijn ze beiden 1 geeft $f = 1$. We kunnen van een beschrijving altijd rechtsreeks overgaan naar een implementatie. Probleem: we zijn niet geïnteresseerd in *een* implementatie maar in de beste, afhankelijk van de factoren die we belangrijk vinden.

Er zijn natuurlijk verschillende oplossingsmogelijkheden. Het komt er dus op neer om de beste te zoeken.

Slide 24: Je kan daar naartoe werken door de bovenste uit te schrijven en dat eventueel te vereenvoudigen en daar wiskunding op te beginnen rekenen met de Boole-algebra. Het resultaat op deze slide getoond is veel eenvoudiger dan het voorgaande. Het gaat dus goedkoper zijn en een kleinere vertraging hebben en een kleiner vermogen verbruiken.

Hoe weet je nu dat je die regels moet toepassen? Niet: de prof wist wat hij moest vinden en heeft dan regels gebruikt om ertoe te komen. Je kan dus eindeloos vanalles proberen en als je dat op de zuiver wiskundige manier wil doen moet je heel veel proberen en dan de oplossing behouden tot je het beste resultaat bekomt. Je zou ook nog een regel kunnen toepassen die op zich een minder goede oplossing geeft. Het is dus heel moeilijk om te zien wanneer je moet stoppen met regels toe te passen. In CMOS is het tweede goedkoper dan het eerste: de technologie komt erbovenop om te weten wat het beste is.

Je hebt dus geen stappenplan/algoritme waarmee je er gegarandeerd komt. Hoe komen we dan tot een beter resultaat? → Gaan we later zien, in het volgende hoofdstuk: hoe kunnen we met een minimum aan uitproberen tot een goed resultaat komen?

Slide 25: Je kan dat formuleren in functie van min- en maxtermen. Een minterm is een functie zoals beschreven op de slide die alleen waar is voor een van de rijen van de waarheidstabel. Je hebt hier 3 variabelen dus 2^3 mogelijkheden. Hier staat geen functie of uitgang bij. Als je de functie erbij betreft spreekt men over 1-minterm: de functie waarvoor de uitgang van de schakeling 1 is. In dit geval zijn dat er 4.

Slide 26: Je kan dat als volgt omschrijven: je kan altijd een implementatie van een schakeling doen door de som van zijn 1-mintermen te nemen. Dus voor elke rij hebben we een 1-minterm (?). Men noemt dit de canonieke som van producten oplossing → de voor de hand liggende oplossing, waar je niet over moet nadenken en je zo kan realiseren.

Het mooie aan Boole is dat de duale uitdrukking ook altijd geldig is. Dit kunnen we ook hier gaan toepassen.

Slide 27: Maxterm = logische functie die 0 is voor 1 bepaalde rij van de kolom. Weerom kun je de functie er dan bij betrekken. Je krijgt hier geen 1-maxterm maar een 0-maxterm: maxterm waarvoor de functie 0 is en dus de rijen die er bij de 1-minterm niet bijzaten.

Slide 28: Als je dit gaat combineren krijg je een product van sommen. Voor elke beschrijving die we hebben weet je dat er 2 implementaties zijn. Dat zijn 2 verschillende implementaties en we gaan sowieso moeten kiezen wat het beste is.

Slide 29: Het probleem met de canieke: de duurste oplossing die er is (maar wel makkelijk op te schrijven): elke AND-poort heeft zoveel ingangen als er variabelen zijn. Een OR-poort heeft zoveel ingangen als er rijen zijn waar een 1 in voorkwam op het einde. Dat is dus niet de compactste oplossing. We zijn op zoek naar eenzelfde manier van werken (SOP of POS) maar met poorten met minder ingangen die zo ook minder vermogen verbruiken. We gaan niet

meer voor elke AND-poort alle ingangen proberen gebruiken en niet evenveel ingangen voor de OR-poort als in de waarheidstabellen.

Slide 30: De twee canonieke vormen bovenaan. Als je daar een paar regels op toepast kan je beiden vereenvoudigen zoals onderaan getoond. Dit zijn de standaardvormen: die vorm die het minimum aantal poorten en de poorten met de minste ingangen gaat proberen te gebruiken. Als je de bovenste rijen daarmee vergelijkt bevat de bovenste elke term 3 ingangen vs. 2. Dat is al een winst in alle randvoorwaarden die we willen. Daarenboven hebben we vanboven 4 OR-poorten en vanonder maar 2. Ook dit is dus een duidelijke reductie in hardware.

We weten nu wel nog niet hoe we overgaan naar standaardvorm.

Slide 31: We gaan dikwijls naar de SOP en POS-implementatie kijken omdat het zo is dat die standaardvorm eigenlijk de goedkoopste implementatie en dikwijls ook de snelste is, zeker wanneer je je beperkt tot 2 lagen. Een laag: bovenste tekening: een deel/laag AND-poorten en een laag OR-poorten (1 poort in dit geval). Die bepaalt de vertraging: je moet door 2 lagen om tot het einde te geraken. Hoe meer lagen, hoe trager het geheel gaat werken. We gaan dus proberen het aantal lagen te beperken. Het minimum dat we in normale omstandigheden nodig hebben zijn 2 lagen. Vandaar dat de getoonde tekening de snelste oplossing is.

We kunnen ook naar meer lagen gaan: onderste tekening. Hier gaat het duidelijk trager zijn: 3 lagen (dit was een examenvraag vorig jaar!). Soms is snelheid niet het belangrijkste: soms wil je een zo goedkoop/compact mogelijke implementatie en dan kan dit wel interessant zijn. Het onderste kan goedkoper zijn dan het bovenste: het verschil zit 'm in het feit dat er bovenaan een poort is met 3 ingangen en je die vanonder niet hebt. Als je dus niet in de snelheid geïnteresseerd bent, kan de onderste dus beter zijn.

Wij gaan meestal met 2 lagen werken omdat dat evidentier is om toe te komen, 3 lagen is minder evident.

Slide 32: We gaan nu ook nog kijken naar NAND en NOR.

Slide 33: We maken gebruik van 1 enkele soort poort. Dat is mogelijk door inverterende poorten zoals NAND of NOR-poorten te volgen. Het wordt als 1 poort beschouwd (de combinatie van AND en inverse of OR en inverse). In de CMOS-technologie is het makkelijker om een NAND-poort te maken dan een AND-poort:

- Je moet een AND maken door een NAND te gebruiken en er nog een inverter achter te zetten.
- Wanneer je NAND of NOR gebruikt moet je geen 3 basisschakelingen hebben, je hebt er maar 2 nodig. Schema onderaan: illustratie hoe je poorten kan maken met alleen NAND of alleen NOR. Denk tijdens het studeren na welk van de mogelijkheden het interessantst is om te gebruiken.

Ook een NOR-poort kan je maken met een NAND-poort: de wetten van De Morgan: product van inversen is hetzelfde als inverse van een som. Dat zie je in

de omkaderde vakjes. Met een enkele basispoort kan je dus alles maken. Het is nu wel zo dat de technieken die we later gaan zien altijd van deze basispoorten gebruik maken. Die gaan iets leveren dat bestaat uit AND en OR en invertoren. Er zijn geen specifieke technieken om alleen NAND of NOR te gebruiken. Op zich is dat geen probleem omdat een implementatie zoals op **Slide 34** kan omzetten naar alleen NAND of alleen NOR.

Slide 34: Maak gebruik van invertoren aan de uitgang en ingang. De drie schakelingen onder elkaar zijn dezelfde logische functies. Hetzelfde met iets alleen NOR-poorten.

Houd er rekening mee dat als je tot een implementatie met NAND-poorten wil komen je eerst een som van producten moet implementeren.

Slide 35: Als je gaat kijken naar de ontwerpmiddelen die bestaan, dan gaan die een ontwerp maken en die gaan je erbij helpen. Het grootste werk dat je zal hebben is het ingeven van het ontwerp hetzij via een schema, hetzij via VHDL. Daarna moet je doen wat we in de volgende hoofdstukken gaan bekijken. Die programma's zijn slim genoeg om alles te doen wat wij gaan zien, dus ze gaan in veel gevallen een automatische synthese doen. Op dat moment heb je een logische implementatie en kan je een functionele simulatie doen: testen of het doet wat het moet doen: als je een bepaalde combinatie van input geeft gaat het geven aan de uitgang wat het moet geven.

Het tijdsgedrag is even belangrijk, maar dat kan je op dit moment nog niet testen: je hebt alleen een logische beschrijving. Daarom komt er een stap achter: je moet ook het fysische ontwerp doen en nagaan wat het tijdsgedrag en de elektrische eigenschappen etc. zijn. Je moet een prototype bouwen en daarop metingen uitvoeren. Wanneer dat tot een geïntegreerde schakeling moet leiden is dat een verspilling van tijd en kosten dus normaal gaat de fabrikant van die geïntegreerde schakeling weten wat de eigenschappen gaan zijn van die componenten. → Al die details zijn gekend. Die zal een module aanbieden waarin alle gegevens verwerkt zijn en het fysische ontwerp nabootst. Op die manier kan je metingen doen qua tijd etc. Je kan ook naar alle problemen zoals glitches gaan zoeken. Pas dan ga je de finale stappen uitvoeren: implementeren of de chip laten maken.

Slide 37: Andere manier om hardware te omschrijven: hardware-omschrijvingstaal.

Wij gaan kijken naar VHDL. Dat is ontstaan uit subsidies van het Amerikaanse ministerie van defensie. De bedoeling was dat men een methode wou hebben om heel complexe ontwerpen te beschrijven en alle gegevens erbij te zetten, alle info om te simuleren en beschrijven en dat systeem op een voldoende hoog niveau te beschrijven.

De taal moet in staat zijn om gelijk welk digitaal systeem te beschrijven en alle aspecten ervan. Het moet het dus volledig kunnen specificeren. Dus niet alleen op poortniveau maar ook op hogere niveau's. Je begint dus op een hoog niveau en je daalt af. De bedoeling is hier dat je het systeem op alle niveau's kan beschrijven:

- Op het hoogst niveau heb je een beschrijving van het gedrag: "Dit blokje moet dat doen" .

- Je moet ook kunnen testen dus tijdsparameters erin beschrijven. Simulatie moet hier dus ook mogelijk zijn.
- Men zou ook graag hebben dat er een automatische synthese is: dat je je geen zorgen moet maken om de tussenstappen.
- Ook documentatie is belangrijk.

Het is ook belangrijk dat het gestandaardiseerd is. Dat zorgt ervoor dat verschillende fabrikanten die ieder hun eigen implementaties doen mekaar altijd verstaan: er kan geen verkeerde implementatie mogelijk zijn want in de taal is de implementatie exact beschreven. Nadeel: als er nieuwe ideeën komen/er zijn tekorten, dan kan men het niet meer veranderen → nieuwe versie van de taal/software nodig.

Slide 38: VHDL is voor digitale systemen, maar een systeem bestaat meestal uit digitale en analoge componenten. Men heeft het systeem dus uitgebreid naar het combineren met analoge signalen. Om een analoge schakeling op te lossen heb je 200-300 gekoppelde differentiaalvergelijkingen nodig om tot uw oplossing te komen.

Slide 39: Andere kandidaat die minstens evenwaardig is: Verilog. Wordt meer gebruikt in de VS. VHDL is populairder in Europa. De concepten die erachter zitten zijn speciaal: hardware beschrijven is niet hetzelfde als een programma schrijven. Er zitten dus speciale concepten achter die je moet begrijpen voor beide talen, alleen de syntax verschilt.

Slide 40: Wat is nu het interessantste: schema of hardwaretaal? → Hangt af van wat je ermee moet doen. Schema's zijn interessanter voor kleine ontwerpen, VHDL is gewoonlijk interessanter wanneer het over grotere ontwerpen gaat. Nadelen van VHDL t.o.v. schema's:

- De concepten achter VHDL zijn niet voor de hand liggend en je hebt dus enige tijd nodig om dat te leren beheersen.
- Het is nogal langdradig: om de kleinste component te beschrijven heb je onmiddellijk veel lijnen code nodig. Dit maakt dat het voor mensen moeilijk is om te begrijpen wat er allemaal gebeurt. Een schema is visueler en daarin zijn mensen getrainder.
- VHDL bevat alle mogelijkheden: alle mogelijkheden voor simulaties, maar om te begrijpen wat het doet, om alleen de functionaliteit te kennen heb je dat allemaal niet nodig.

Slide 41: Voordelen van VHDL t.o.v. schema's:

- Het is een standaard: je kan het gebruiken om informatie uit te wisselen tussen programma's/tools van verschillende fabrikanten. Het is dus makkelijk overdraagbaar.

- VHDL is goed in alles waar programma's goed in zijn. Wanneer je repetitieve structuren hebben (een aantal cores die allemaal hetzelfde zijn), dat is 1 instructie in VHDL. Als je een schema tekent, moet je dat zoveel keer tekenen. In een programma kan je ook parameters gebruiken. Als je een schema tekent moet je het helemaal uitgommen en opnieuw beginnen indien een parameter verandert. In een programma, als uw parameter bv. niet voldoende groot is, pas je dat gewoon aan.
- In een schema moet je onmiddellijk componenten kiezen om erop te zetten. VHDL heeft het voordeel dat je het gedrag kunt beschrijven, je moet dus niet per sé een implementatie kiezen.

Slide 42: Beperkingen:

- VHDL heeft zoveel mogelijkheden dat het enorm veel inspanning vraagt van de fabrikanten om alle aspecten uit de taal om te zetten naar hardware. Men heeft zich dus beperkt tot een subset die makkelijker om te zetten is in hardware. Wanneer je gaat synthetiseren ga je je dus moeten beperken.
- Van een hardwarecompiler verwachten we een enorme intelligentie. In vele gevallen zijn er een tiental mogelijkheden om een implementatie te realiseren. De compiler moet dus raden wat je bedoelt wat je neerschrijft. In de meeste gevallen raadt hij dat zo strict mogelijk. Je moet in de meeste gevallen de compiler dus wat helpen. Je moet ongeveer weten hoe hij interpreteert wat jij hebt neergeschreven. Je moet je dus aanpassen naar de mogelijkheden van de compiler. De hardware die uit een ontwerp van een beginnening komt zal minder optimaal zijn dan die an een meer ervaren ontwerper.

Slide 43: Schema tekenen: kan in een keer, maar in de praktijk ga je op de hiërarchische manier werken. Je gebruikt blokjes die je eventueel nog niet definiëert en waarvan je later de ontbrekende blokjes gaat specificeren. Je kan het als een doos bekijken met een aantal in- en uitgangen. Die hebben een aantal karakteristieken en wat er in die doos inzit. Wat zit er in die doos? De bewerkingen die we moeten doen. Stel dat we een component hebben die test of 2 getallen aan elkaar gelijk zijn. In die doos zitten dus componenten en die leveren resultaten af. We hebben ook verbindingen nodig.

We kunnen dit nog niet implementeren omdat we nog niet hebben aangegeven wat de component is. We hebben wel al aangegeven dat het twee keer hetzelfde is. Die component moeten we nu maar 1 keer ontwerpen en die kunnen we 2 keer gebruiken.

Nu de rechtse doos: op een lager niveau specificeren. We kiezen een mogelijke implementatie. Die twee stukken kunnen door 2 verschillende personen gemaakt worden. Men kan eerst het rechtse maken en dan het linkse. In veel gevallen is het rechtse beschikbaar in een bibliotheek.

Wanneer je met VHDL werkt, gaat dat eigenlijk juist hetzelfde zijn.

Slide 44: 2 stukken: entiteit die de doos beschrijft. We hebben een comparator comp die twee ingangen heeft: 2 ingangen en 1 uitgang en de ingangen zijn 8 bit en de uitgang 1 bit.

Daaronder staat de architectuur: wat er in de doos zit, wat we daarnet in de doos tekenden.

Het verschil met het schema is dat we nu ook het gedrag kunnen beschrijven zoals gedaan is op de slide: we kunnen schrijven wat de comparator doet. Er staat niet geschreven hoe dit geïmplementeerd moet worden, er is gewoon beschreven wat het doet.

Het is ook zo dat voor een bepaalde component er verschillende implementaties kunnen zijn: gedrag beschrijven, implementatie beschrijven, voor sommige theorieën zal iets goed zijn, in anderen niet. De architecturen krijgen daarom een naam omdat je zo kan kiezen voor een bepaalde implementatie.

Slide 45: Kijken we naar het topschema beschreven via de structuur. Een structurele beschrijving is juist hetzelfde als het schema tekenen. Entity Test is weer de doos en de architecture is weer de beschrijving hoe het geïmplementeerd is. We hebben een component Comparator nodig, dat is een virtuele component en we moeten die nog niet meteen beschrijven, gewoon de in- en uitgangen. Bij begin staat er dat je die twee keer gebruikt. Je kan die verschillende namen geven (Comp1 en Comp2) om een onderscheid te kunnen maken. Rechts worden de draden beschreven.

Dit is in woorden neergeschreven wat rechts vanboven met een schema staat. Belangrijk is om in gedachten te houden dat het een beschrijving van hardware is. De volgorde van instructies is hier niet belangrijk omdat het over hardware gaat. Het in een andere volgorde zetten gaat hetzelfde eindresultaat geven: de uiteindelijke manier van werken blijft hetzelfde. Ook de volgorde van de uitdrukkingen doet er dus niet toe: parallele uitdrukkingen. De volgorde is totaal onbelangrijk.

Slide 46: Hoe leg je het verband tussen de twee schema's/beschrijvingen? Dat gebeurt heel expliciet: VHDL is een heel stricte taal dus normaal moet je alles heel uitgebreid beschrijven, maar als je uw namen goed schrijft kan hij raden wat je bedoelt. Als de specificaties overeenkomen (naam Comparator met x ingangen en y uitgangen) dan zal die dat kunnen raden. Je kan ook een specifieke mapping maken: we gebruiken de component Comp met architectuur Behav1: we kiezen meteen een specifieke implementatie. Mapping: in het ene geval hebben we X,Y,Z gekozen, in het andere A,B,EQ. je kan dus heel specifiek aangeven hoe je de schema's met elkaar verbindt.

Slide 47: VHDL verschilt vrij hard van een gewone programmeertaal, het ziet er alleen uit als een programmeertaal. Vanboven: "gewone" programmeertaal: functie die je definiëert. In VHDL beschrijf je gedrag. Het topniveau is het hoofdprogramma: main() die de functie 2 keer gaat gebruiken. Belangrijk verschil: bij het vorige waren de uitdrukkingen parallel, hier sequentiëel: het ene wordt uitgevoerd na het andere, er is een stricte volgorde en dat kan zijn impact hebben. Bij hardware is dat niet zo: het is niet zo dat de bovenste component eerst werkt en dan de onderste.

Nog een verschil: een softwareprogramma start je op, die voert het programma uit en aan het einde van het programma stopt het. Bij hardware is het juist omgekeerd: hardware stopt niet. Hardware begint te werken zodra je de spanning opzet en die blijft eendeloos altijd maar hetzelfde doen tot je de spanning

afzet. Dat is de enige manier om die tot stilstand te brengen. Software: er is een bug aanwezig als het blijft runnen, hardware: er is een bug aanwezig als het stopt.

Slide 48:

- Datatypes: als je een computer gebruikt met bv. 32 bits of 64 en je wilt 2 8-bits optellen, zal dat toch een 32 of 64-bitoptelling zijn. Bij hardware is dat niet zo. Bij hardware ga je niet nodeloos bits gebruiken: als je het met 4 bits kan doen ga je dat doen. Je gaat altijd het minimaal aantal bits gebruiken omdat dat het goedkoopste is en de compactste oplossing is. In VHDL moet je dat daarom ook specificeren: gaat erin als 5 bit en komt eruit als 7 bits.
- Gelijktijdigheid: hardware werkt altijd gelijktijdig, niet de ene na de andere.
- Tijdsconcept: componenten werken continu, hardware stopt nooit. Qua tijdsconcept er ook rekening mee houden: de simulatie is niet de reële tijd. Het kan zijn dat je een minuut moet rekenen om de simulatie 1 nanoseconde vooruit te laten gaan.

2.2 Sides: 3_Technologie

Slide 3: Als we elektronische schakelingen willen implementeren, hoe gebeurt dat in de praktijk? Het eerste wat we moeten beslissen is welke fysische waarden we hebben. Als je een logische schakeling maakt, moet je een fysische waarde hebben. We gaan dat doen met fysische bereiken: als de blauwe pijl de spanning voorstelt; L is een lage waarde, H is een hoge waarde. Die twee bereiken raken elkaar niet: daartussen is een stuk waar het noch hoog, noch laag is: ongedefinieerd.

Waarom bereiken? We willen onze schakeling zo robuust mogelijk. We willen niet dat we de schakeling zo nauwkeurig moeten maken zodanig dat er schakelingen nodig zijn waar exact 3V uitkomt en niet 3.1V bv. Als je toelaat dat het 3V, 3.5V of 2.5V kan zijn, laat je veel meer variatie toe. Verschillende componenten hebben allemaal verschillende karakteristieken, er zijn fluctuaties. Het feit van een bereik te gebruiken laat fluctuaties toe. Op die manier kunnen we dat oplossen en kunnen we veel makkelijker ingewikkelde zaken maken, dat hebben we ook als we verschillende transistoren op 1 component willen zetten. Ook het gebruik beïnvloedt dit: elektronica is heel gevoelig aan temperatuur: enorm groot verschil of de schakeling werkt aan 20 graden Celcius of 40 graden Celcius. Hou er rekening mee dat de schakeling zelf ook opwarmt. Je wil dat uw schakeling blijft werken.

Ook de spanning is niet altijd juist dezelfde.

Waarom 2 bits: om het systeem minder gevoelig te maken. Hoe meer mogelijke waarden, hoe kleiner de bereiken zijn.

We hebben het nog niet over 0 of 1 gehad. Het hoeft niet per sé zo te zijn dat 0 laag is en 1 hoog \rightarrow positieve logica, maar je kan ook negatieve logica hebben waarbij men het omgekeerd doet (0 is hoog en 1 is laag).

Slide 4: Hoe die poorten maken? Los van de elektronica: we kunnen dat maken als we beschikken over schakelaars die we kunnen aansturen. We hebben een schakelaar die 2 standen heeft: open of gesloten. We moeten die kunnen aansturen. → 2 soorten schakelaars.

Slide 5: NMOS-transistor: poort geïsoleerd van het blokje p. Als de spanning klein is zal er niks gebeuren en zal de halfgeleider zich gedragen als een isolator. Wordt de spanning voldoende groot, zal die elektronen aantrekken om een geleidend pad te creëren en wordt er een verbinding gemaakt. Op die manier kunnen we die gebruiken als schakelaar.

PMOS: hetzelfde prentje waar de p en de n verwisseld zijn en de source en de drain verplaatst zijn. Dat zal ervoor zorgen dat de gesloten schakelaar lage spanning betekent: de negatieve spanning is heel groot.

Op die manier kunnen we die 2 soorten schakelaars maken. We krijgen dit op dezelfde geïntegreerde schakeling.

Slide 7: Er poorten mee maken.

1. Enkel gebruik maken van NMOS. Dan krijg je een schakeling zoals op de afbeelding. Stel dat er aan x een lage spanning is, dan zal de transistor (rood) niet geleiden. De uitgang zal via de weerstand verbonden zijn met de voedingsspanning. Als er geen (grote) stromen staan, dan zal de spanning ongeveer gelijk zijn aan de bronspanning. Als er een hoge spanning op zit zal de transistor een lage weerstand hebben (veel lager dan eerst) met als gevolg dat die de uitgangsspanning naar beneden trekt: de weerstand is niet krachtig genoeg om het tegen te houden. Daarom komt er een laag niveau op te staan. Als je dit met positieve logica doet, dan hebben we een inverter gebouwd. Dit is tegenwoordig niet de manier die meestal gebruikt wordt omdat er belangrijke nadelen zijn:

- (a) De weerstand zal nooit helemaal nul zijn. Je krijgt een spanningsdeling over de twee weerstanden. Dat is geen probleem als het maar laag genoeg is, maar het gaat niet echt nul zijn. Dat betekent dat de bovenste weerstand beduidend groter moet zijn want anders krijg je het omgekeerde.
- (b) Dit soort schakeling heeft een statisch vermogenverbruik: we verbruiken ook vermogen op het moment dat er geen veranderingen optreden: alles is constant en toch blijven we vermogen verbruiken. Als er een geleiding is, loopt er een stroom van boven naar beneden. Een stroom door een weerstand betekent vermogenverlies. We kunnen dat alleen maar klein houden als die R zeer hoog is. In het realistische voorbeeld zal het toch 1mW verbruiken, maar een schakeling bestaat niet uit maar 1 inverter/transistor, er zal dus een enorm hoog vermogenverbruik zijn.

Het wordt niet meer gebruikt behalve bij open-drain.

Slide 8: De weerstand wordt buiten de verpakking weergegeven (stippellijn). Als de schakeling nog niet gemaakt is, hangt die draad los dus vandaar een open drain. Wat is er hier specifiek aan? Als je 1 inverter hebt: niks. Als

je er meerdere hebt en je hangt de uitgangen aan elkaar, dan krijg je bv. de gegeven waarheidstabel. We hebben zo een NOR-poort gemaakt. We noemen dit een wired-AND functionaliteit: we hadden oorspronkelijk 2 op zichzelf staande invertoren. We hebben die uitgangen aan elkaar gehangen en zo een NOR gemaakt. Die NOR kan ook op rechtsonderstaande manier omschreven worden. In het logische schema zit ook een AND-poort. Dit komt omdat de twee uitgangen aan elkaar hangen. Door een bedrading aan te leggen is er een extra functionaliteit. Het nadeel is dat je met NMOS blijft werken en het statisch vermogenverbruik hebt.

Slide 9: Lichtschakelaars in serie of parallel zetten. Als we hier 2 transistoren in serie zetten krijgen we wat op de slide staat. We hebben hier een NAND-poort gemaakt. We kunnen dat ook in parallel zetten, we krijgen dan een NOR: zodra 1 van de twee 1 wordt, wordt de stroom weggeleid.

Slide 10: Stel dat we het statisch vermogenverbruik willen vermijden. Dit kan door te zorgen dat er nooit een geleidend pad is. Dit kan door 2 transistoren te voorzien: 1 boven- en 1 onderaan. Vanboven een PMOS en het ander een NMOS. Het een is een pull up, het ander een pull-down. Hier hebben we geen statisch vermogengebruik want in geen van de twee gevallen is er een geleidend pad van de bron naar onder want in elk geval zal een van de twee open zijn.

Slide 11: Je mag dit nooit met CMOS doen: die werkt alleen als PUN en PDN complementair zijn: als ze alletwee beginnen geleiden, dan loopt er een stroom die bepaald wordt door de weerstand van een transistor die geleid, wat een zeer lage weerstand is, er zal dus een enorm grote stroom doorlopen. Gevolg: uw schakeling ontploft (wordt getoond in de slides normaal gezien). Je moet dus altijd zorgen dat de twee nooit gelijktijdig geleiden.

Als je de uitgangen aan elkaar hangt kan je dit ook krijgen: ook een grote stroom en minstens een van de twee zal kapot gaan.

CMOS-uitgangen mag je dus nooit zomaar aan elkaar hangen!

Slide 12: Als we ze toch aan elkaar moeten hangen, gaan we een speciale oplossing moeten gebruiken. We hebben een inverter gemaakt en een serie- en parallelschakeling. Op deze manier kunnen ze nooit gelijktijdig geleiden. Het bovenste PUN is altijd complementair aan het PDN. Ook hier is een NAND-poort gemaakt. Je kan dit ook omkeren: boven serie en vanonder de parallel. Dat leidt tot een NOR-poort. Ook hier zijn de basiscomponenten een NAND en NOR poort.

Interessant hier is dat we daarnet 2 ingangen hadden en 2 transistoren. Hier 2 ingangen en 4 transistoren: per ingang 2 transistoren erbij, dit blijft gelden: per ingang die erbij komt hebben we 2 transistoren nodig. Daaruit volgt dat de kostprijs van een poort bij CMOS evenredig is met het aantal ingangen.

Slide 13: Negatieve logica en actief lage signalen.

Chapter 3

Les 3

3.1 Sides: 3_Technologie

Slide 13: Negatieve logica en actief lage signalen hebben strikt gezien niets met elkaar te maken. Het lage bereik komt overeen met een 1 (negatieve logica).

Slide 14: Impact op de implementatie: die implementatie geeft een NAND-poort. De onderste waarheidstabel hoort daar dus bij en niet de rechtsbovenste. De vertaling van een L naar een nul is positieve logica. Werk je met negatieve logica is het natuurlijk omgekeerd. Je krijgt dan een NOR-poort. In de praktijk werken we omgekeerd: we maken een schema en afhankelijk van de technologie kiezen we voor positieve of negatieve logica. Kiezen we voor positieve logica, dan zal het de afgebeelde afbeelding zijn, anders zal het een andere implementatie zijn.

In sommige schema's zie je een klein driehoekje staan: geeft aan dat die draad met negatieve logica werkt. In de praktijk ga je dat vrijwel nooit terugvinden: ofwel werk je met positieve ofwel met negatieve logica. Het is pas wanneer je gaat mengen dat je die driehoekjes nodig hebt.

Slide 15: Actief lage signalen: heeft niks met het lage en het hoge te maken, het actief zijn heeft enkel te maken met de interpretatie, niet met het binair signaal dat erop staat.

Voorbeeld: wanneer je een reset-signaal hebt (om een systeem in een initiële toestand te brengen: als je de spanning opzet, komt uw systeem in een random toestand. In praktijk wordt de spanning opgezet en onmiddellijk een reset aangebracht om het toestel in een gekende toestand te brengen). Het resetten van een toestand is een activiteit, je moet dat doen. Iets doen kan met een signaal dat 0 of 1 is. Het is niet de logische spanning die op de lijnen staat, maar wanneer iets wordt gedaan: wanneer het een 0 is wat erop staat of wanneer het een 1 is wat erop staat. Dat heeft dezelfde notatie als het inverse, maar daar heeft het dus niets mee te maken. Wij gaan inverse aangeven met ' en actief signaal met *.

Als het signaal 0 is, zal de schakeling op de slide gereset worden. Als je poorten/logische functies gaat bekijken treedt hier voor het eerst het verschil op tussen de poort en de functionaliteit. De functionaliteit beschrijft wat er moet gebeuren in welke omstandigheden (bv. uitgang zal actief zijn bij AND

als beide signalen actief zijn). Bekijken we nu de waarheidstabel op de slide verwachten we normaal een AND-functionaliteit, dat is er een voor actief hoge signalen. Als “er gebeurt iets” overeenkomt met een 0, dan is de waarheidstabel een OR-functionaliteit. Dat is en blijft een AND-poort en de positieve of negatieve logica staat hier totaal los van. De interpretatie van “er gebeurt iets” verandert afhankelijk van of het actief hoge of actief lage signalen zijn. Meestal wordt er gekozen om met actief hoge signalen te werken, dat vereenvoudigt de interpretatie.

Toch zijn er veel plaatsen met actief lage signalen. Er zijn typisch 2 plaatsen waar je het frequent tegenkomt: reset en bij afgesloten verbindingen. Wired OR = wired AND (want je kan geen wired OR maken op zich) met actief lage signalen waardoor die AND poort voor een OR-functionaliteit gebruikt kan worden.

Slide 16: Bedoeling: OR-functionaliteit nodig en die met wired AND organiseren, of ook: met een schakeling vanonder getoond: met RC-schakeling. De schakeling wordt opgezet en de spanning gaat blijven stijgen. In dat eerste deel kan je niks zeggen over de schakeling, daar gebeurt de rommel, je weet niet wat er gebeurt. Een keer die in werkende toestand is, kan je die resetten. De capaciteit gaat proberen de spanning laag te houden en via de weerstand gaat het opgebouwd worden. Die ingang van de schakeling RST (groene lijn op de grafiek) gaat langzaam opbouwen. De spanning bij RST* gaat dus vrij lang laag gehouden worden. Om dat soort zaken te doen moet het een actief laag signaal kunnen zijn.

Je wil een RST-knop hebben waar je op drukt en dan moet dat in orde zijn. Het is makkelijker om het met een wired-AND te doen dan met poorten. Het grote voordeel daarvan is dat je dat eindeloos kan uitbreiden: gewoon een draad erbij leggen, geen poort vervangen ofzo.

In de meeste schakelingen is de RST een actief laag signaal.

Slide 17: Tweede reden waarom er actief lage signalen gebruikt worden: wanneer dingen afgesloten zijn, zit je meestal in een hogere toestand. Op de slide getoond: langere lijnen, maar het hangt af van de frequenties waar je mee werkt. Verbinding: spanning aan de ene kant en verwachten die onmiddellijk aan de andere kant te zien. Bij een transmissielijn plant die overgang zich voort over de lijn en dat duurt een zekere tijd eer die de andere kant bereikt. Dan gaat niet alleen de spanning verhogen aan de andere kant maar eventueel slechts een deel van de energie opgenomen worden door degene die de spanning al dan niet meet en een deel gaat teruggekaatst worden, het zal daar ook gedeeltelijk geabsorbeerd worden en gedeeltelijk teruggekaatst worden.

Wat als je dat op een oscilloscoop bekijkt? Het rechtse signaal. Hoe meer reflecties er heen en weer gaan, hoe groter de overshoots zijn. Wat we eigenlijk willen is het linkse: je gaat naar een ander niveau en blijft daar. Dat kan je bereiken bij een transmissielijn door ervoor te zorgen dat degene die het signaal moet opnemen dezelfde impedantie heeft als de draden. Het komt erop neer dat je die draden moet afsluiten op de karakteristieke impedantie. Die kan soms redelijk laag zijn.

Hoe sluit je dat af? Zoals linksonder getoond: aan de ontvangtzijde 2 weerstanden zetten die ervoor zorgen dat de karakteristieke impedantie gelijk is aan

de parallelschakeling van die 2 weerstanden. Welke spanning er op de draad hangt wordt bepaald door de twee weerstanden. Als je uw spanning aanzet zal er 5V opstaan. Als die draad niet aangestuurd wordt, als daar niets mee gebeurt, dan staat daar een 1 op. Dat betekent dat we met actief lage signalen moeten werken: we doen niks en er staat een 1 op.

Vandaar, bij plusverbindingen (die tekening) ga je het regelmatig tegenkomen dat er ook daar met actief lage signalen gewerkt wordt.

Slide 19: Meer complexe schakelingen maken: bij CMOS moet je ervoor zorgen dat als de bovenste geleidt, de onderste niet mag geleiden en omgekeerd. Je kan ook heel wat andere combinaties van transistoren maken.

Het makkelijkste is te kijken wanneer de onderste tak gaat geleiden: wanneer a & b 1 zijn of wanneer x, y, z 1 zijn, dan zal het signaal nul zijn.

Dit is 1 enkele poort die iets meer doet dan alleen maar AND of OR implementeren: AOI.

Vanonder altijd NMOS, vanboven altijd PMOS.

Het aantal transistoren dat je nodig hebt is twee keer zo groot als het aantal ingangen. De kostprijs van de schakeling is evenredig met het aantal ingangen. Let wel: ook hier gaat het over inverterende poorten. De uitgangen van de twee ANDS of de twee ORS tellen niet mee als ingang!

Slide 20: Er zijn een aantal dingen die je niet kan maken met 1 enkele poort: je moet een NAND-poort maken gevolgd door een inverter \rightarrow impact op kostprijs en vertraging.

Buffer: doet op zichzelf niks, maar je kan meer aansturen.

Als je naar een XOR-poort gaat kijken: die gaat 1 zijn als ingang 1 of 2 1 is maar niet als ze alletwee 1 zijn. XNOR zal 1 zijn als beide ingangen 1 of 0 zijn. Hoe maak je dat? Met AND en OR-poorten, maar het kan efficiënter zoals in het blauw: dat is een OR-AND-inverter. Voordeel: bij gewone poorten heb je er 3 nodig met ieder een kostprijs, bij OAI heb je 1 poort nodig en 2 invertoren.

Slide 21: Mogelijkheid: uitgang is zwevend/open/nergens aan verbonden. Zwevende draden zorgen voor problemen dus wil je niet. Omdat ze door niets aangestuurd worden, is er niets dat ervoor zorgt dat die 0 of 1 blijven. Normaal staat daar geen spanning op, maar die reageren als antenne: je steekt de verlichting bv. aan en door inductie verandert de spanning op die draad. Loshangende draden wil je dus niet.

Waarom wil je dat toch kunnen doen (die aan niks laten hangen)? We hebben het al over wired-AND gehad, bij CMOS mag je de uitgangen nooit aan elkaar hangen, maar wat als je de ingangen aan elkaar wilt hangen? De enige oplossing om uitgangen bij CMOS aan elkaar te hangen is door gebruik te maken van een tristate buffer: geeft ingang door aan uitgang zonder functionaliteit, maar die kan de uitgang loskoppelen.

Hoe kan je dat implementeren? Met de getoonde schakeling: geen van beide zal geleidend zijn en dus losgekoppeld van de rest van de schakeling.

Slide 22: Bij een normale aansturing heb je 1 element dat aanstuurt en je op de meeste plaatsen gebruikt (denk ik). Als je een bus-verbinding hebt (kan

vanop verschillende plaatsen aangestuurd worden, wel van 1 plaats tegelijkertijd), moet je die vanaf 2 kanten kunnen aansturen, nooit tegelijkertijd (want dan heb je uitgangen die aan elkaar hangen!). Als je nu een intelligente sturing hebt die ervoor zorgt dat maximaal 1 of 2 verbonden kan zijn met de bus, dan kan dat wel op die manier. Je kan uitgangen van CMOS aan elkaar hangen als je gebruik maakt van een tristate buffer en die op een intelligente manier aanstuurt.

Slide 23: Praktische aspecten: wat voor soort transistoren we gebruiken, ... \rightarrow heeft impact op de karakteristieken van de schakeling (vooral op het tijdsgedrag, niet zozeer op de logische functie).

Slide 24: Gevoeligheid voor storingen: men zorgt er altijd voor dat er een ruismarge is: we hebben een hoog bereik en een laag bereik. Normaal verwacht je dat als een poort iets aanstuurt, de uitgang van de poort die aanstuurt moet hetzelfde bereik gebruiken als de poort die zijn uitgang moet bekijken. Die kan dus geen groter bereik hebben bij het produceren van de spanning dan wat gespecificeerd is. Je kan wel een kleiner bereik hebben. Eigenlijk heb je dus een stuk niet nodig: het groene stuk. Het is toch nuttig om het verschil te maken want dat is de ruismarge. Waarvoor gaan we de gebruiken? Stel dat je een spanning genereert aan de uitgang die verbonden wordt aan de ingang van de volgende. Op die draad ontstaan storingen. De spanning die de andere poort aan de ingang ziet kan hoger/lager zijn dan die gegenereerd door de eerste poort. Wanneer dat naar boven gaat is dat niet erg, maar als dat te laag gaat kan de ontvangende poort dat niet meer correct interpreteren. Die ruismarge dient dus om storing op te vangen. Daardoor wordt uw schakeling minder gevoelig voor storingen. Bij CMOS: hoogbereik: tussen 3.5 en 5V. Je hebt 0.9V ruismarge want de meesten gaan tussen 4.4 en 5V genereren. Bij CMOS is dat mooi symmetrisch maar dat hoeft niet zo te zijn. Bij TTL (transistor transistor logic) is dat niet symmetrisch.

Slide 25: Niet-ideale gedrag van de schakeling: als je een inverter bekijkt en je gaat naar de spanningen kijken. Horizontaal: ingangsspanning, verticaal: uitgangsspanning. L = laag bereik aan in- en uitgang, H = hoog bereik aan in- en uitgang. Wat in het groen aangegeven is is de normale werking: als er een hoog signaal aan de ingang is, zal er een laag signaal aan de uitgang zijn. Als we schakelen (overgaan van 0 naar 1 of omgekeerd) moeten we overgaan van het ene groene stuk naar het andere. We noemden het stuk ertussen ongedefinieerd, maar die zijn niet ongedefinieerd, die spanningen. De spanning zal niet met een 0 overeenkomen, ook niet met 1, ook niet met tristate, dat heeft logisch gezien geen enkele betekenis. Als je V_T aanlegt weet je totaal niet wat uw spanning gaat doen, ze gaat in elk geval niet meer digitaal werken, het zal zich analoog gedragen: als een versterker: kleine veranderingen aan de ingang hebben een grote uitgang. Het ideale zou zijn als we geen curve hebben zoals getoond, liever zouden we iets ideaal hebben: hoog tot aan de drempelspanning (V_T , wanneer schakelen we over van laag naar hoog). Zodra we over die drempelspanning zijn, zullen we van laag naar hoog gaan. In het tussengebied is de uitgang ook niet gedefinieerd. Het probleem van in het ongedefinieerde gebied te zitten: de schakeling werkt daar niet op een digitale manier en we kunnen niet voorspellen

wat de schakeling daar doet. We moeten daar aan heel hoge snelheid doorgaan: we hebben even een probleem, maar we zijn er onmiddellijk voorbij. We weten dat er bij elke overgang heel even in het gebied gezeten zal worden.

Een ander probleem is dat als je kijkt naar CMOS: dynamisch vermogenverbruik: bij tussenin zal niet 1 van de schakelaars open/gesloten zal zijn, ze zullen alletwee een beetje openstaan en er beiden een beetje tussenin zitten: gaat door alle tussenliggende waarden. Dat is het moment dat zowel de bovenste als onderste tak kunnen geleiden, waarbij je vermogenverbruik krijgt. Dus in het rode gedeelte ga je ook bij CMOS vermogenverbruik hebben. Je hebt dit vermogenverbruik ook alleen wanneer je een overgang maakt van de ene naar de andere toestand (vandaar dynamisch). Die curves zijn ook niet constant, die kunnen variëren omwille van het productieproces maar ook door temperatuursvariaties.

Slide 26: Het is belangrijk om zo snel mogelijk door dat gebied te gaan. Normaal zorgen we ervoor dat aan de ingang die signalen redelijk snel veranderen, dus we gaan daar maar korte tijd inzitten, in die overgang. Jammer genoeg hebben we dat niet altijd in de hand. Als je het signaal opmeet dat van de buitenwereld komt (je hebt een sensor die iets meet en de snelheid waaraan dat verandert wordt door de omgeving bepaald), dan bepaal je dat niet zelf. Het kan dus zeker zijn dat je traag variërende signalen hebt aan de ingang. Dat soort signalen heeft ook typisch wat ruis/verstoringen. Dat gaat niet mooi van laag naar hoog, daar zit variatie op. Als je het reële signaal in een digitale schakeling binnenbrengt en je steekt dat in een inverter, dan krijg je de tweede bovenste grafiek (de middelste). Rond die drempelspanning zal dat werken als een versterker en kleine veranderingen aan de ingang worden grote veranderingen aan de uitgang. Als je dat signaal verder gaat verwerken, dan gaan bepaalde van die piekjes misschien verdwijnen. Dus in plaats van 1 enkele overgang, wat je normaal wilt, ga je heel wat verschillende overgangen zien. Dat is niet wat we willen: we willen een signaal dat op een bepaald moment van laag naar hoog gaat.

Oplossing: Schmitt-trigger-ingangen: speciale implementaties van een ingang: we hebben niet 1 overgang, maar als we van hoog naar laag gaan volgen we de rechtse curve op de rechtsonderfiguur en als we van laag naar hoog gaan volgen we de linkse curve op de rechtsonder figuur.

Slide 27: Het dynamisch gedrag is heel belangrijk want het bepaalt het tijds-gedrag.

Slide 28: Wat hier getekend is, is onmiddellijk nadat er overgeschakeld is: de rode geeft geen doorverbinding meer en de bovenste wel. Je zou verwachten dat de spanning onmiddellijk verandert, maar dat gebeurt niet omdat er vertragende elementen in de schakeling zitten. Als je het elektrische equivalent tekent dan is dat het rechtse: je hebt 2 weerstanden (de rechtse: de ingangsimpedantie, wat je aan de ingang ziet en dus niet de weerstand van de rechtsondergroene transistor op de bovenste tekening). Het is de weerstand tussen de gate en de source. Vermits die van elkaar geïsoleerd zijn, verwacht je dat die zeer hoog/oneindig is. Er is ergens een weerstand tussen de gate en de source. Capaciteit: je hebt er een wanneer je 2 geleiders naast mekaar hebt, dus 2 draden boven elkaar (meestal geen grote capaciteit). Dus overal in de schakeling heb je eigenlijk een

capaciteit.

Overall In de schakeling heb je een grond en een verbinding.

Hoe langer uw draad is, hoe groter uw capaciteit is: bij lange draden is die groot, bij korte draden is die capaciteit klein. Bij de onderste overgang heb je iets vergelijkbaar. Deingangsimpedantie blijft altijd.

Slide 29: We hebben dit schema, wat we nu gaan doen is een plotse overgang maken van laag naar hoog. Dat heeft tot gevolg dat waar er oorspronkelijk geen spanning op stond, een spanning wordt aangebracht en die schakeling gaat beginnen reageren. Dit is een RC-netwerk. De spanning gaat exponentieel oplopen. De spanning tussen de uitgang van de ene poort naar de ingang van de andere gaat geleidelijk overgaan van een laag niveau naar een hoog niveau. De uiteindelijke spanning is niet de blauwe.

De eindspanning zal dan ongeveer gelijk zijn aan de voedingsspanning uiteindelijk.

Voor de rest zie je nog dat die overgang niet ogenblikkelijk gebeurt: het duurt een poosje voor je van het laag bereik in het hoog bereik terechtgekomen bent. Dat is heel belangrijk: de snelheid waaraan je kan werken hangt af van hoe snel je uw bewerkingen afwerkt. Je kan uw spanning niet laten zakken als ze nog nooit hoog geworden is. Hoe trager die curve dus omhoog gaat, hoe langer je moet wachten. We streven er dus naar dat de groene curve zo snel mogelijk stijgt. Dat hangt af van die tijdsconstante τ . Die wordt bepaald door de capaciteit en de twee weerstanden: de parallelschakeling ervan.

Hetzelfde gebeurt wanneer je een $H \rightarrow L$ overgang hebt.

Slide 30: Nu we dat weten, hoe kunnen we er nu voor zorgen dat die overgang zo snel mogelijk gebeurt? Dieingangsimpedantie moet zo hoog mogelijk zijn (groter dan de uitgangsimpedantie). Als uwingangsimpedantie zeer groot is, dan is het statisch vermogenverbruik verwaarloosbaar klein.

Hoe kiezen we onze uitgangsimpedantie? Hier zitten we met een conflict: stel dat deingangsimpedantie zeer hoog is, dan zal de tijdsconstante zich verhouden tot $R_{OH} * C$. We willen R_{OH} dus zo klein mogelijk hebben.

Nadeel aan te kleine weerstand: hoe kleiner die is, hoe groter het ogenblikkelijk vermogenverbruik: ogenblikkelijk grote stromen ($P(0)$). Je hebt dan over de uitgangsimpedantie de volledige voedingsspanning. Dat zorgt voor een groot vermogen. Het is maar ogenblikkelijk, maar als je plots een heel hoge stroom nodig hebt, kan uw voeding in de problemen geraken want die moet die stroom kunnen leveren (voor 1 is dat geen probleem, wel als je er meerdere hebt). Je moet dus dikwijls een compromisoplossing hebben.

Je kan ook proberen van uw C zo klein mogelijk te maken door korte draden te gebruiken: lange draden zorgen ervoor dat je traag moet beginnen werken.

Uitgangsimpedantie die je zo klein mogelijk wil (R_0): de NMOS-poort is niet erg populair want die heeft statisch vermogenverbruik, maar die is ook qua tijdsgedrag enorm slecht als je dat vergelijkt met CMOS. Waarom is die traag? Je kan geen te kleine weerstand zetten want dan heb je een enorm groot statisch vermogenverbruik, je moet dus een grote weerstand hebben, maar dan heb je dus een slechte tijdsconstante.

Je gebruikt NMOS dus niet tenzij je die echt nodig hebt om die open drain te implementeren.

Slide 31: Dynamisch gedrag van de poort: hoe snel kan je stijgen en dalen: stijgtijd: tijd om van 0 naar 1 te gaan, daaltijd: tijd nodig om van 1 naar 0 te gaan, daar is een zekere tijd voor nodig. We hebben niet een lage spanning en een hoge spanning maar een laag bereik en een hoog bereik, je kan dus meerdere dingen meten: hoe lang duurt het om van het einde van het laag bereik naar het begin van het hoogbereik te gaan,...

De stijg- en daaltijd is iets wat niet zo specifiek is aan de poort. De poort speelt daar ook in mee omdat die capaciteit deels door de eigenschappen van de poort bepaald wordt, maar dat heeft weinig/niks met de complexiteit van de poort te maken. Dat is niet het enige wat het tijdsgegedrag bepaalt, het bepaalt hoe snel je kan overschakelen van laag naar hoog of omgekeerd, het bepaalt de maximale snelheid waaraan we kunnen werken. Je ziet op die tekening ook dat die stijg- en daaltijd nogal verschillend kunnen zijn, ze wordt bepaald door de weerstand bovenaan (stijgtijd) terwijl de daaltijd bepaald wordt door de transistor (denk ik??). Vertragingstijd: ik zet een signaal op de ingang, hoe lang heeft die poort ervoor nodig om die berekening te doen en dat op de uitgang te zetten? Dat wordt gemeten als wat er op de ingang verschijnt en wat er aan de uitgang uitkomt.

Het probleem is, hoe meet je wanneer de ingang gebruikt wordt en wanneer het resultaat op de uitgang beschikbaar is? Je hebt ook weer 2 soorten vertragingstijd. In vele gevallen is dit ongeveer hetzelfde, in andere gevallen kan dat verschillen. Als je over *de* vertragingstijd spreekt, spreekt men over het gemiddelde.

Strikt gezien zou je kunnen zeggen dat de vertragingstijd gekoppeld is aan het interne van de poort. De stijg- en daaltijd heeft te maken met hoe poorten met elkaar verbonden zijn. Stijg- en daaltijd bepalen hoe snel je kan werken. Wanneer je dat op deze manier gaat meten, in de gemeten vertragingstijd zit de echte vertraging van de poort in plus hoe snel die verandert.

Slide 32: Korte stijgtijden links: geeft de tijd aan die nodig is om het resultaat te berekenen. Als je een slechte stijgtijd hebt (rechts), dan komt er nog de helft van de stijgtijd bij.

In de gemeten vertragingstijd zitten dus beide effecten in: complexiteit van de poorten en hoe ze met elkaar verbinden. Vandaar dat ook, als je wil gaan rekenen, kan je de vertragingstijd meten en met beide aspecten gelijktijdig rekening houden. In de gemeten vertragingstijd ga je dus altijd een combinatie van de twee hebben. \Rightarrow Heel belangrijk!

Slide 34: Vermogenverbruik: je moet het vermogen kunnen leveren (dat kost aan energie, batterijen,...) en dat vermogen wordt voor iets gebruikt: wordt gewoonlijk omgezet in andere energie, die gaat niet echt verloren. In ons geval betekent dat dat het omgezet wordt in warmte en die moet afgevoerd worden. Als je die niet snel afvoert, gaat uw schakeling enorm snel opwarmen en smelten. Je moet energie dus niet alleen kunnen leveren, ook wegnemen. Voor grote schakelingen is dit ondertussen een van de belangrijkste problemen geworden. Als je weet dat iets op een bepaald moment niet gebruikt wordt, ga je er gewoon de voeding vanaf nemen, maar als je het dan nodig hebt, heb je tijd nodig om in gang te geraken. Voor de rest zijn er heel wat technieken om schakelingen te maken die heel wat minder vermogen verbruiken.

Je hebt dus statisch vermogen: vermogen dat je constant hebt en dat je zeker wil vermijden (dat heb je bij NMOS), bij CMOS is dat verwaarloosbaar klein (de belangrijkste reden om CMOS te nemen). Ze hebben beiden dynamisch vermogenverbruik: als ze schakelen: die capaciteiten moeten opgeladen worden en ontladen worden.

Je kan nagaan hoeveel energie je nodig hebt om een capaciteit van de ene spanning naar de andere te gangnen. Dat is $CV^2/2$. of je dat nu snel doet of traag maakt niet uit, het verschil zit 'm wel in dat als je het snel doet je ogenblikkelijk veel energie nodig hebt op korte tijd. Om die van de ene spanning naar de andere te brengen is $CV^2/2$.

De meeste systemen werken op een klok, hoe dikwijls per seconde kunnen we het signaal veranderen? 2 overgangen (van nul naar 1 en omgekeerd): CV^2 aan energie nodig. Voor praktische gevallen kan het dynamisch vermogen beperkt gehouden worden. Hier moet je er ook rekening mee houden dat niet alle poorten tegelijkertijd schakelen, er is geen enkele schakeling waarbij alle poorten tegelijkertijd schakelen.

Slide 35: In alle schakelingen moet de PMOS vanboven staan en NMOS vanonder, waarom is dat? Als we die zouden omwisselen, kunnen we niet alleen inverterende schakelingen maken, maar ook een AND poort.

Slide 36: Waarom mag dat niet? NMOS-transistoren zijn zeer slechte pull-ups. Een NMOS-transistor is goed om een spanning naar beneden te trekken, PMOS om naar beneden te trekken, daarom staan ze ook in die takken.

Waarom is dat zo? Er zijn verschillende redenen. De meest evidente: stel dat we NMOS bovenaan zouden zetten: wanneer gaat de transistor geleiden bij de middelste tekening? Als de spanning voldoende groot is. Om ervoor te zorgen dat we een hoger niveau krijgen moet er een verschil zijn van de drempelspanning van de transistor tussen de gate en de source. Als je bij V een hoge spanning opzet, zal die nooit boven $-V_T$ kunnen geraken, moest die hoger geraken zou de transistor niet meer geleiden. In regimetoestand gaat de uitgang van de linkse poort de hoge spanning $-V_T$ hebben. Wanneer we een bepaalde spanning hierop hebben, wat die ook is, op de uitgang zal altijd een lagere spanning staan. Als je 2 van die poorten na elkaar hebt, dan gaat er hier eerst V_T af en daarna daar V_T erbij. Na een tijd ga je een spanning hebben die lager is dan het lage niveau. Is dat hetzelfde probleem als je die beneden zet? Nee, want daar is het niet de spanning tussen de gate en de uitgang maar tussen de gate en de source en de source ligt daar altijd op nul.

Nog een verklaring: die gaat zich zo instellen dat die altijd een beetje blijft geleiden dus gaat altijd ook statisch vermogenverbruik hebben. De boodschap van de dia is dat je nooit NMOS transistoren bovenaan mag zetten, je moet die altijd onderaan zetten. Hetzelfde met PMOS: nooit onderaan.

Daarom kunnen we alleen maar inverterende basispoorten maken.

Slide 38: Fan-in: aantal ingangen. Waarom komt dat van pas? Je kan niet een eindeloos aantal ingangen hebben, je kan geen poort maken met 100 ingangen omdat hoe meer ingangen je hebt, hoe slechter de poort gaat werken: de vertragingstijd gaat stijgen: hoe meer ingangen je hebt, hoe meer transistoren je hebt (ingangen \sim transistoren), ieder van die transistoren heeft een interne

capaciteit,...

Ander probleem: als je kijkt naar de tekening rechts boven: een groot aantal ingangen betekent een groot aantal transistoren in serie. Ieder van die transistoren is niet-ideaal: zelfs als die geleidt zal de spanning over die transistor niet exact 0V zijn. Als je er verschillende boven elkaar zet gaat dat allemaal optellen en kan je in het hoog bereik terechtkomen hoewel dat niet de bedoeling is. We gaan daar rekening mee moeten houden, een oplossing voor mogen zoeken.

Fan-out (!!!): \neq aantal uitgangen. Fanout = # ingangen dat aan die uitgang verbonden is. Waarom zijn we daarin geïnteresseerd? Ook dat zal onze snelheid gaan bepalen: hoe meer ingangen er aan de uitgang hangen, hoe groter de capaciteit, hoe trager de schakeling werkt. Er is maar een maximale stroom die geleverd kan worden. Dus hoe groter de fanout, hoe trager de schakeling gaat werken. Soms kunnen we daar niet aan ontsnappen: zolang je op een geïntegreerde schakeling werkt, heb je niet veel energie nodig om het te laten omschakelen. Een keer je vanaf een geïntegreerde schakeling naar een andere gaat, heb je een lange verbinding en heb je een veel grotere capaciteit. Wil je dus een hogere snelheid halen op een PCB moet je een andere methode zoeken. Het voordeel van op de chip te werken is dat je aan een grote snelheid kan werken. Gegevens uitwisselen met de buitenwereld (dus buiten de chip) gebeurt niet aan een hoog tempo om deze reden.

Je kan dat wat verhelpen door ervoor te zorgen dat je een schakeling hebt die wel grote stromen kan leveren: een poort die een hoge uitgangsimpedantie heeft (denk ik? Mss kleine!). Een driver/buffer dient om veel stroom te kunnen geven. Die stroom heb je nodig om dingen met een hoge capaciteit toch snel te kunnen laten veranderen. Een keer je vanaf uw schakeling naar uw PCB gaat of van PCB naar randapparatuur heb je buffers nodig die voldoende stroom kunnen leveren om een redelijke snelheid te halen.