

# **Digitale Techniek**

van probleemstelling tot realisatie

deel 1



# **Digitale Techniek**

van probleemstelling tot realisatie

deel 1

ir. A.P. Thijssen, ir. H.A. Vink

5e geheel herziene druk

## **CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek Den Haag**

Thijssen, A.P.

Digitale Techniek : van probleemspecificatie tot realisatie / door A.P. Thijssen en H.A. Vink

Delft : Delft University Press

Met lit. opg., reg.

ISBN 90-407-1793-1

NUGI 832

Trefw.: digitale techniek

### **© VSSD**

Eerste druk 1982

Vijfde druk 1999

Uitgegeven door:

Delft University Press

Mekelweg 4, 2628 CD Delft

tel. 015 278 3254, telefax 015 278 1661, e-mail [dup@dup.tudelft.nl](mailto:dup@dup.tudelft.nl)

In opdracht van:

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Poortlandplein 6, 2628 BM Delft

tel. 015 - 2782124, telefax 015 - 2787585, e-mail: [vssd@tudelft.nl](mailto:vssd@tudelft.nl)

internet: [www.oli.tudelft.nl/vssd/hlf/handleidingen/html](http://www.oli.tudelft.nl/vssd/hlf/handleidingen/html)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

ISBN 90-407-1793-1

## Voorwoord

Na vele jaren trouwe dienst van de vorige druk zijn we toe aan een nieuwe druk. Hoewel de schakelalgebra hetzelfde is gebleven, er zijn geen regels bijgekomen, en aan het vak nog steeds de statische discipline ten grondslag ligt is het onderwijs in de Digitale Techniek allesbehalve statisch gebleken. Er zijn diverse redenen op te noemen voor een grondige herziening van de tekst. Allereerst is er de technologische ontwikkeling geweest. De CMOS technologie is de grote winnaar gebleken. Daarnaast zijn de prestaties van de logische schakelingen drastisch omhoog gegaan, zowel voor wat betreft de schakelsnelheid van de componenten als voor het aantal componenten op een chip. Dit betekent dat het onderwijs in de Digitale Techniek niet meer beperkt kan worden tot de strikt logische benadering van het digitale ontwerpen.

Steeds meer moet er op het logisch ontwerpniveau rekening gehouden worden met de onderliggende, meer fysisch georiënteerde, ontwerpnieaus. Een onderwerp als timing moet extra aandacht krijgen om de gewenste betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van snelle CMOS schakelingen te kunnen garanderen. Het verschijnsel clock skew en het creëren van marges hiervoor staan recent zeer in de belangstelling. Ook komt de ontwerper door de technologische ontwikkelingen meer in aanraking met de grenzen van wat er technisch nog mogelijk is. Naarmate er meer componenten op een chip geplaatst kunnen worden neemt bijvoorbeeld de dissipatie van de werkende chip toe. Gedeeltelijk kan dit probleem opgelost worden door over te gaan op lagere voedingsspanningen. Dit gaat echter onder meer ten koste van de ruismarges, die rond de logische signaalniveaus gedefinieerd moeten zijn. En kleinere ruismarges kunnen weer negatieve gevolgen hebben voor de betrouwbare werking van een schakeling. Een logisch ontwerper, die deze afhankelijkheden niet onderkent, zal vaker dan in het verleden verkeerde ontwerpbeslissingen nemen.

Testbaarheid van schakelingen is een ander voorbeeld van een vakgebied dat recent tot ontwikkeling is gekomen. De voornaamste reden hiervoor is de toegenomen complexiteit van de schakelingen. Zonder ingebouwde voorzieningen voor testbaarheid kan een geproduceerde schakeling niet of niet economisch op zijn juiste werking geverifieerd worden.

Bij het samenstellen van deze druk hebben we ervoor gekozen de grensvlakken tussen het logisch ontwerp en het meer fysisch georiënteerde deel van het ontwerp in de tekst op te nemen. Dit betekent een toename van de omvang. Deel 1 is gewijd aan de combinatoriek. Deel 2 behandelt het ontwerpen van sequentiële schakelingen. Ten behoeve van een korte introductie cursus in de Digitale Techniek is achter in beide delen een lijst opgenomen van paragrafen, welke hiervoor kunnen dienen. Dit maakt het boek ook geschikt voor informatica-type opleidingen. Ten behoeve van het onderwijs is bij de auteurs tevens een serie overheads te verkrijgen.

In deze druk, die in eerste instantie verschijnt ten behoeve van het onderwijs aan de Technische Universiteit te Delft, voor de colleges Digitale Techniek, is veel ervaring verwerkt die is opgedaan tijdens externe cursussen in het Nederlandse bedrijfsleven. De vaak zeer pittige discussies met de deelnemers aan deze cursussen bij onder meer de Stichting Post-HTO van de Haagse Hogeschool, Lucent Technologies Nederland b.v., het Philips Natuurkundig Laboratorium - CTT te Eindhoven en Philips Semiconductors te Nijmegen en met deelnemers afkomstig uit veel andere bedrijven, hebben in belangrijke mate bijgedragen tot de inhoud. Zoals vaak geldt ook hier dat de praktijk de beste

leerschool is. Veel problemen, die tijdens de cursussen kwamen boven drijven, hebben geresulteerd in meer inzicht in wat voor de praktijk belangrijke onderwerpen zijn. Samen met een goede cursus VHDL, een veel gebruikte beschrijvingstaal voor het ontwerpen van digitale hardware, heeft de lezer een voldoende basis voor het ontwerpen van digitaal werkende schakelingen.

Natuurlijk bevat dit boek fouten. Wij vragen de gebruiker daarom dringend eventuele opmerkingen en suggesties voor verbeteringen aan ons door te geven. Elke *eerste* aanmelding van een fout, hoe klein ook, wordt beloond met een bon. Vijf bonnen geven recht op een goede fles wijn, of op een sapjespakket. Deze regeling heeft bij vorige drukken uitstekend gewerkt. Zoals u heeft kunnen constateren zijn de wijnprijzen recent gestegen, vanwege de grotere vraag. Het zal ons een genoegen zijn de nodige flessen uit te reiken. Stuur uw commentaar toe aan A.P. Thijssen, werkeenheid CARDIT, Faculteit ITS, TU Delft, Mekelweg 4, 26 28 CD Delft of stuur een mailtje aan [A.P.Thijssen@its.tudelft.nl](mailto:A.P.Thijssen@its.tudelft.nl).

Wij wensen u succes met uw studie in dit boeiende vakgebied.

Delft/Eindhoven, november 1998

Loek Thijssen

Hans Vink

# Inhoud

<b>0 Inleiding</b>	13
<i>Tijdcontinue/intensiteitcontinue signaalbewerking</i>	14
<i>Tijddiscrete/intensiteitcontinue signaalbewerking</i>	15
<i>Tijddiscrete/intensiteitdiscrete signaalbewerking</i>	16
<i>Binaire signaalbewerking</i>	17
<i>Het ontwerptraject</i>	21
Literatuur	22
Opgaven hoofdstuk 0	23
<b>1 Getalrepresentaties en codes</b>	
1.1 Het decimale en het binaire talstelsel	25
<i>Talstelsels</i>	26
<i>Fracties</i>	27
<i>Aantal cijfers</i>	27
<i>De BCD representatie</i>	28
1.2 Andere getalrepresentaties	29
<i>De hexadecimale representatie</i>	29
<i>De octale representatie</i>	29
<i>De excess-3 representatie</i>	30
<i>m-uit-n codes</i>	31
1.3 Grondtal conversie	31
1.4 De conversie BIN-OCT-HEX	33
1.5 Codes voor alfanumerieke karakterverzamelingen	35
<i>De ASCII code</i>	35
<i>Parity</i>	36
<i>De EBCDIC code</i>	36
1.6 Equidistante codes	37
1.7 Binair rekenen	40
1.8 Getalrepresentaties in Z	43
<i>Rekenen in teken-en-modulus</i>	44
1.9 De two's complement representatie	45
<i>De representatie</i>	46
<i>Het tekenbit</i>	48
<i>Alternatieve introductie two's complement</i>	49
1.10 De optelling in het two's complement	49
1.11 Optellen en aftrekken in het two's complement	51
<i>De representant van het tegengestelde getal</i>	52
1.12 Capaciteitoverschrijding in het two's complement	53
<i>Samenvatting van het two's complement</i>	55
<i>De two's complement cirkel</i>	55
1.13 De one's complement representatie	55
1.14 De floating point representatie	57
<i>ANSI/IEEE 32-bit single format</i>	58
Literatuur	59
Opgaven hoofdstuk 1	60

## 2 De schakelalgebra

2.1	De logische werking van een component	67
	<i>Keuze van de proposities</i>	69
	<i>Logische variabelen en Booleaanse variabelen</i>	70
	<i>Logische nullen en enen</i>	70
2.2	Bewerkingen in de symbolische logica	71
	<i>De logische operator EN</i>	71
	<i>De logische operator OF</i>	73
	<i>De logische operator NIET</i>	73
	<i>De inclusieve OF en de exclusieve OF</i>	74
	<i>Volgorde van bewerkingen</i>	75
2.3	De schakelalgebra	75
	<i>Volgorde van bewerkingen</i>	76
	<i>Rekenregels voor constanten</i>	76
	<i>Rekenregels voor logische variabelen</i>	77
	<i>Het bewijzen van schakelwetten</i>	81
2.4	Uitbreidbaarheid van schakelwetten	81
2.5	De mintermvorm van logische functies	83
	<i>De mintermvorm</i>	84
	<i>De som-van-produktenvorm</i>	85
	<i>Venn diagrammen</i>	86
2.6	De maxtermvorm van logische functies	87
	<i>Verband tussen de mintermvorm en de maxtermvorm</i>	87
2.7	Logische bewerkingen op functies	90
2.8	Decompositie van functies	92
	<i>Herhaalde decompositie</i>	94
	<i>Volgorde bij decompositie</i>	96
2.9	Toepassing van decompositie op kontaktschakelingen	97
2.10	De ON set, OFF set en DC set van logische functies	99
	<i>Afhankelijkheid van logische variabelen</i>	101
2.11	De keuze van proposities en logische variabelen	102
	<i>Ondubbelzinnigheid van proposities</i>	103
2.12	Voorbeeld opstellen van formules	104
	Literatuur	107
	Opgaven hoofdstuk 2	107

## 3 Bewerkingen op logische functies

3.1	Karnaughdiagrammen	115
	<i>Waarheidstabellen en Karnaughdiagrammen</i>	115
	<i>De constructie van Karnaughdiagrammen</i>	117
3.2	Reductie van logische functies	120
	<i>Don't cares</i>	122
3.3	Het systematisch uitlezen van Karnaughdiagrammen	123
3.4	De somvorm en de produktvorm van logische functies	127
	<i>De produkt-van-sommenvorm</i>	128
	<i>Recept conversie somvorm <math>\leftrightarrow</math> produktvorm</i>	129
3.5	Toepassingen van Karnaughdiagrammen 1	130



	<i>Logische bewerkingen op functies</i>	130
	<i>Onderzoek van specificaties</i>	131
	<i>Logische schakelingen met meer dan één uitgang</i>	132
	<i>Volgorde van de randschriften</i>	133
3.6	Toepassingen van Karnaughdiagrammen 2	134
3.7	Cube representatie van logische functies	136
3.8	De eenvoudigste vorm van een formule	138
3.9	Het genereren van priemimplicanten	139
3.10	Het bepalen van een dekking	142
3.11	Uitbreidingen op het Quine-McCluskey algoritme	146
	<i>Iteratieve consensus</i>	146
	<i>Multiple-output networks</i>	149
3.12	Binary Decision Diagrams	151
3.13	Het opstellen van BDD's	154
	<i>Vereenvoudigingsregels</i>	155
	<i>Volgorde van de variabelen</i>	156
	<i>Don't cares in BDD's</i>	157
3.14	Van BDD naar som-van-produktenvorm	158
	Literatuur	161
	Opgaven hoofdstuk 3	162

#### **4 Inleiding tot het ontwerpen van combinatorische schakelingen**

4.1	Het ontwerpproces	169
	<i>Indeling ontwerpproces</i>	169
	<i>Het ontwerptraject van een opteller</i>	170
	<i>Scope van deze tekst</i>	172
4.2	Het logisch ontwerp van een n-bit full adder	173
	<i>Van numerieke naar logische specificatie</i>	174
	<i>Half adder en full adder</i>	176
	<i>Capaciteitoverschrijding</i>	176
4.3	Ontwerpen met de operatoren {AND, OR, NOT}	177
	<i>Twolthree-level NOT-AND-OR schakelingen</i>	177
	<i>Twolthree-level NOT-OR-AND schakelingen</i>	178
	<i>Passingsproblemen</i>	179
	<i>Open ingangen</i>	181
	<i>Don't care signaalwaarden</i>	182
4.4	Ontwerpen met de operatoren {NAND, NOR}	182
	<i>NAND en NOR, universeel toepasbare componenten</i>	182
	<i>Twolthree-level NAND-NAND schakelingen</i>	183
	<i>Twolthree-level NOR-NOR schakelingen</i>	184
4.5	Ontwerpen met fanin beperkingen	186
	<i>Opbouw van n-input AND en OR poorten met NAND en NOR poorten</i>	187
	<i>Multilevel decompositie met NAND en NOR poorten</i>	188
	<i>Het decompositieprobleem</i>	191
4.6	Ontwerpvrijheid	192
4.7	Permissible functions	194
	<i>Het optimaliseren van combinatorische schakelingen</i>	198

	<i>Procedure voor het bepalen van permissible functions</i>	200
4.8	De afbeelding op hardware	201
	<i>Het signaalmodel: scheiding van logica en tijd</i>	201
	<i>Positieve en negatieve logica</i>	202
	<i>De logische formule bij een gegeven component</i>	203
	<i>Dualiteit</i>	206
	<i>Individuele logica</i>	207
4.9	Symbolen voor poorten	207
	<i>Vorm van de symbolen</i>	208
	<i>Functiesymbolen</i>	209
	<i>Het aanduiden van negaties</i>	209
	<i>Embedded symbols</i>	211
	<i>Signaaloverdracht op fysisch niveau</i>	212
4.10	Ontwerpverificatie en produktverificatie	214
	<i>Ontwerpverificatie</i>	214
	<i>Produktverificatie of testen</i>	216
	<i>Correct-by-design</i>	216
4.11	Het testen van combinatorische schakelingen	216
	<i>Defecten en fouten</i>	217
	<i>Een foutmodel voor combinatorische poortschakelingen</i>	218
4.12	Testen op basis van het stuck-at-0/1 foutmodel	218
	<i>Testen van multilevel combinatoriek</i>	220
	<i>Instelbaarheid en observeerbaarheid</i>	221
4.13	Permissible functions en Stuck-at testbaarheid	222
	Literatuur	225
	Opgaven hoofdstuk 4	226

## 5 Het fysisch ontwerpniveau

5.1	Het schakelen van spanningen	237
	<i>Schakelaars</i>	238
5.2	De MOS transistor als schakelaar	241
	<i>De MOS transistor</i>	242
	<i>MOS transistor types</i>	243
	<i>De CMOS invertor</i>	245
5.3	De opbouw van CMOS poorten	246
	<i>Complexe poorten</i>	249
	<i>Extra voorzieningen</i>	250
5.4	De pass Transistor en de transmission gate	251
5.5	Uitgangsschakelingen	253
	<i>De 3-state uitgang</i>	253
	<i>De open-drain (open-collector) uitgang</i>	255
5.6	Overzicht van TTL logische families	256
	<i>De bipolaire transistor</i>	257
	<i>Poorten in de TTL technologie</i>	259
	<i>TTL logische families</i>	261
5.7	Overzicht van CMOS logische families	262
	<i>Lagere spanningen</i>	264

5.8	Logische familie-aangelegenheden	264
	<i>Ruismarges</i>	265
	<i>Voedingsspanningen</i>	267
	<i>Ground bounce</i>	268
	<i>Schmitt-trigger ingangen</i>	269
	<i>Compatibele impedanties</i>	271
	<i>Fanin en fanout</i>	271
	<i>Conclusies ten aanzien van het compatibel zijn</i>	272
5.9	Tijdmodellen	273
	<i>Het tijdmodel voor een logisch signaal</i>	273
	<i>Het tijdmodel voor een verbinding</i>	275
	<i>Het tijdmodel voor een poort</i>	277
5.10	Timing van multilevel combinatoriek	279
	<i>Het modelleren van modulair opgebouwde schakelingen</i>	281
	<i>Multilevel combinatoriek en dissipatie</i>	283
5.11	De toepassing van (tijd)modellen	283
	<i>Meten is weten</i>	284
	<i>Een best case / worst case model of een statistisch model?</i>	285
	<i>Modellering van het dynamisch gedrag van poorten</i>	285
5.12	Defecten en foutmodellering	286
	<i>Defect statistics</i>	290
	<i>Sequentiële fouten</i>	292
	Literatuur	293
	Opgaven hoofdstuk 5	295

## 6 Het logisch ontwerpniveau

6.1	Standaardcomponenten	307
6.2	Carrypropagatie in optellers	308
	<i>Carry generate en carry propagate hulpfuncties</i>	308
	<i>Optimalisatie van het full adder ontwerp</i>	311
6.3	Carrypropagatie in 4-bit full adders	312
6.4	Arithmetic logic units	314
6.5	Parallelvermenigvuldigers	317
6.6	Modulair opgebouwde vermenigvuldigers	320
6.7	Het dynamisch gedrag van poorten in optellers	322
	<i>Carry-skip adders</i>	322
	<i>End-around carry</i>	324
6.8	Data-overdracht	326
	<i>Selectoren/multiplexers</i>	327
	<i>Decoders/demultiplexers</i>	328
	<i>priority encoders</i>	329
6.9	Decompositie van logische functies met selectoren	330
	<i>Minimale BDD's en logica met selectoren</i>	332
	<i>Logisch functies in andere componenten dan poorten</i>	334
6.10	Foutendetectie en foutencorrectie	335
	<i>Foutendetectie</i>	335
	<i>De parity check</i>	336

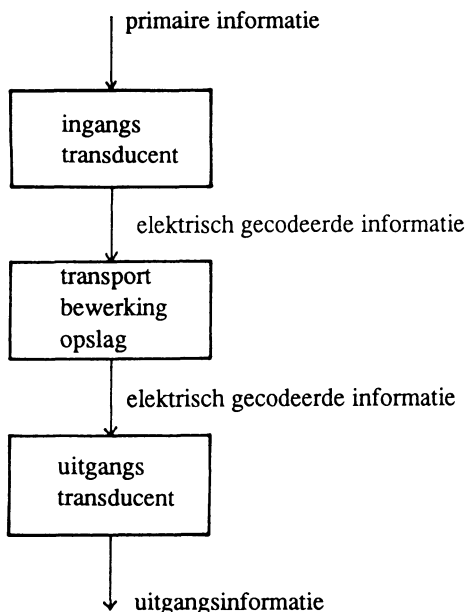
	<i>Parity generators and parity checkers</i>	337
	<i>Hamming afstand en foutendetectie/correctie</i>	340
6.11	Samenvatting	341
	Literatuur	343
	Opgaven hoofdstuk 6	344
<b>7 Het structureel ontwerpniveau</b>		
7.1	Probleemaanpak	355
7.2	Structurele aspecten van de optelling	358
	<i>Kenmerken van de operanden</i>	359
	<i>Worst case of gemiddelde propagatietijd</i>	360
	<i>Carry-completion optellers</i>	362
7.3	Pipeline optellers	364
7.4	De look-ahead carry generator	366
7.5	Overzicht van de optelling	369
	<i>Schema optelling / Domein en representatie van de getallen</i>	370
	<i>Schema optelling / Algoritmekuze</i>	371
	<i>Schema optelling / Het logisch ontwerp van de schakeling</i>	372
7.6	Ontwerpdocrucht	374
	Literatuur	375
	Opgaven hoofdstuk 7	376
<b>8 Programmeerbare logica</b>		
8.1.	Read only memories	381
	<i>Read only memories</i>	382
	<i>De interne structuur van een ROM</i>	382
	<i>Enkele details</i>	384
8.2.	Enkele toepassingen van ROM's	386
	<i>BCD-naar-7-segment decoder</i>	386
	<i>Don't cares</i>	388
	<i>Het vervangen van random logica</i>	389
	<i>Het corrigeren van een overdrachtskarakteristiek</i>	390
	<i>Instructiedecodering</i>	391
8.3.	Programmeerbare logische arrays	391
	<i>PAL's</i>	393
8.4.	Optimalisatie in array logica	396
	<i>Bit partitioning</i>	397
	<i>Folding</i>	400
	Literatuur	401
	Opgaven hoofdstuk 8	401
<b>Appendix symbolen</b>		409
<b>Antwoorden van de opgaven</b>		453
<b>Studie-advies</b>		455
<b>Index</b>		457

# 0

## Inleiding

Waarom zoveel aandacht voor digitale/binaire signaalbewerking? Het antwoord op deze vraag kan kort zijn. Kijk om je heen en zie wat er de laatste 10-20 jaar veranderd is op het gebied van (personal) computers, in de telecommunicatie, bij consumentenelektronica en huishoudelijke apparatuur, digitale horloges, chipkaarten, enz. [Bloembergen, 1987; Dinklo, 1994]. Een verdere motivatie om aandacht te besteden aan de keuze voor digitale signaalbewerking lijkt dan ook nauwelijks nodig.

Voor een goed inzicht in het waarom van digitale signaalbewerking, vooral ook in de grenzen van de toepassingsmogelijkheden, is het noodzakelijk wat langer stil te staan bij de gestelde vraag. We doen dit aan de hand van een overzicht van enkele veel gebruikte vormen van informatiedragende signalen in de elektrotechniek. Een voorbeeld van een *informatiedragend signaal* is een signaal waarvan de *intensiteit* (niveau bij spanningen en sterkte bij stromen) niet van te voren vastligt en afhangt van de in het signaal opgeslagen informatie. (Er zijn ook andere manieren van informatie-opslag in signalen, bijvoorbeeld door frequentiemodulatie. Deze vormen laten we buiten beschouwing.)



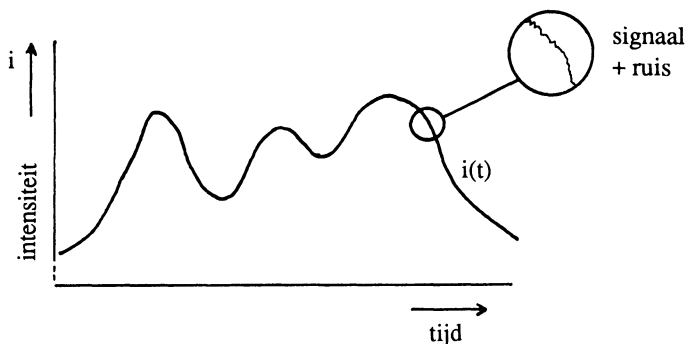
**Figuur 0.1.** Informatieverwerkend systeem.

Figuur 0.1 schetst de structuur van een elektronisch informatieverwerkend systeem. De primaire informatie (over temperatuur, druk, kracht, veld of beweging) wordt via een ingangstransducent omgezet in een elektrisch signaal, waarin de informatie gecodeerd is opgeslagen. Dit signaal wordt getransporteerd, bewerkt, opgeslagen en weer gereproduceerd in een informatieverwerkend systeem. Het resultaat is een al dan niet bewerkt elektrisch signaal, dat via een uitgangstransducent meestal weer wordt omgezet in een niet-elektrisch verschijnsel.

Bij het omzetten van informatie in een elektrisch signaal kunnen we kiezen uit verschillende signaaltvormen om de informatie te representeren. Deze zijn globaal onder te verdelen in tijdcontinue of tijddiscrete en in intensiteitcontinue of intensiteitdiscrete signaaltvormen. Drie van de vier combinaties bekijken we hieronder wat uitgebreider.

### *Tijdcontinue/intensiteitcontinue signaalbewerking*

Bij een *tijdcontinu/intensiteitcontinu signaal* is de intensiteit (momentele signaalwaarde ten opzichte van een bepaald referentieniveau) op elk moment van het interval waarin het signaal toegepast wordt van belang (tijdcontinu) en kan de intensiteit een willekeurige waarde in een bepaald interval aannemen (intensiteitcontinu). De informatie-inhoud is opgeslagen in de *vorm van het signaal*. Zie figuur 0.2. Het is derhalve van belang de vorm zo goed mogelijk te behouden bij het bewerken van tijdcontinue/intensiteitcontinue signalen. Iedere verandering van de vorm van het signaal kan de informatie-inhoud aantasten. De toepassing bepaalt hoeveel vervorming kan worden toegestaan.



**Figuur 0.2.** *Tijdcontinu/intensiteitcontinu signaal.*

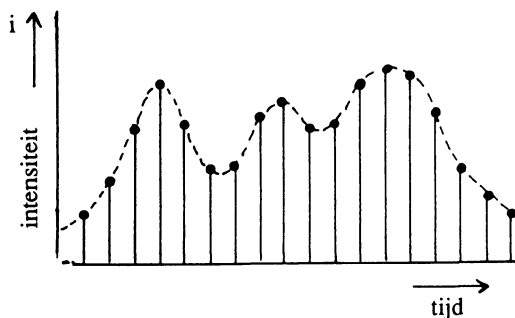
Elk signaal en dus ook een tijdcontinu/intensiteitcontinu signaal kan men opgebouwd denken uit een aantal sinusvormige signalen, waarbij elk signaal een verschillende frequentie, fase en intensiteit heeft. Het signaal zelf is dan de *superpositie* (momentele waarde van het signaal volgt uit de optelling van alle momentele signaalwaarden) van alle samenstellende sinusvormige signalen. Op grond van deze eigenschap bezit een signaal een *frequentiespectrum*, dit is een overzicht van alle frequenties van de samenstellende signalen [Papoulis, 1980; Oppenheim, 1983]. In theorie kan een frequentiespectrum zeer breed zijn. Bij praktische toepassingen benut men een deel van het spectrum en kapt men de rest af. Bij

telefonie loopt het frequentiespectrum traditioneel van 300 Hz tot 3400 Hz. Dit is voldoende om spraak over te dragen. Bij muziek loopt het frequentiespectrum van circa 30 Hz tot 20 KHz. De verschillen in bandbreedte hebben te maken met de eisen aan het systeem. Bij telefonie is het criterium een goede verstaanbaarheid. Bij muziek liggen de eisen veel hoger.

De fysica leert dat in elektrische systemen altijd verstoringen van signalen optreden. Deze komen onder andere voort uit de (statistische) fluctuaties van stromen in geleiders, *ruis* genoemd [Davidse, 1991]. Ook elektromagnetische koppeling met naburige geleiders zorgt voor een zekere beïnvloeding, die we *overspraak* noemen. Al deze verstoringen beïnvloeden de signaalform van tijdcontinue/intensiteitcontinue signalen. Een signaal kan dus nooit exact vormgetrouw overgedragen of bewerkt worden. Storingen in dezelfde frequentieband als het informatiedragende signaal zijn in veel gevallen niet of zeer moeilijk te onderscheiden van het signaal zelf. Storingen en signaal hebben min of meer dezelfde eigenschappen. Dit gegeven beperkt de afstand waarover tijdcontinue/intensiteitcontinue signalen getransporteerd kunnen worden, of de mate waarin zij gereproduceerd kunnen worden. Men heeft daarom gezocht naar andere signaalformen, die beter bestand zijn tegen vervorming.

### ***Tijddiscrete/intensiteitcontinue signaalbewerking***

Volgens het *bemonsteringstheorema* van Shannon [Shannon, 1964] kan een elektrisch signaal volledig gekarakteriseerd worden door het signaal op equidistante tijdstippen te bemonsteren, mits de bemonstertijdstippen niet verder uit elkaar liggen dan de halve periode van de signaalcomponent met de hoogste frequentie in het spectrum van het signaal. Uit de bemonsterde waarden (samples genoemd) van het signaal kan het oorspronkelijke signaal gereconstrueerd worden [Shannon, 1964]. Een dergelijk bemonsterd signaal heet *tijddiscreet* en *intensiteitcontinu*. Bij een tijddiscreet signaal is de intensiteit slechts op bepaalde tijdstippen van belang. Ertussen is de signaalwaarde niet relevant. Figuur 0.3 beschrijft de tijddiscrete/intensiteitcontinue versie van het signaal uit figuur 0.2.



***Figuur 0.3. Tijddiscreet/intensiteitcontinu signaal.***

In een tijd- en intensiteitcontinu werkend systeem moet men er bij de bewerking van signalen rekening mee houden dat een signaal zowel in de tijd als in intensiteit continu