

Inleiding in de Elektronica

een ontwerpgerichte benadering

omslagtekening: Wil Straver

Inleiding in de Elektronica

een ontwerpgerichte benadering

ir. C. Wissenburgh

© VSSD

Eerste druk 1991, verbeterd 1992, 1997, 1998, 2007

Uitgegeven door de VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

webpagina: <http://www.vssd.nl/hlf/elektro.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-10 90-407-1243-3

ISBN-13 978-90-407-1243-2

NUR 959

Trefw.: elektronica

Voorwoord

Deze handleiding is ontstaan uit een collegehandleiding, zoals die gedurende de laatste jaren ten behoeve van de eerstejaars studenten van de Faculteit der Elektrotechniek van de Technische Universiteit te Delft werd uitgegeven.

De behandelde stof beoogt een eerste aanzet te geven tot het methodisch leren ontwerpen van elektronische schakelingen, waarbij de lezer wordt verondersteld een elementaire kennis van de theorie der elektrische netwerken te bezitten.

Voor de meeste studenten betekent de kennismaking met het vakgebied der elektronica tevens een eerste kennismaking met een technisch vak: fysische mechanismen worden technisch toegepast om een gesteld doel, hier meestal bewerking van informatie, te bereiken. Hiertoe dient men te beschikken over zowel een goed inzicht in de werking en constructie van de componenten als over de vaardigheid in het hanteren van wiskundige gereedschappen om aan de hand van modellen berekeningen aan schakelingen te kunnen uitvoeren. Voorts zal men in staat moeten zijn de verkregen resultaten op hun praktische realiseerbaarheid te beoordelen. Al deze aspecten komen in deze handleiding — zij het in bescheiden mate — aan de orde.

Als eerste worden de werking en de opbouw van halfgeleider componenten en hun netwerkmodellen behandeld. Daarna wordt een begin gemaakt met het methodisch ontwerpen van versterkers. Aan de hand van ideale netwerkelementen wordt een ontwerpconcept geïntroduceerd en worden enige daarmee ontworpen basisconfiguraties voor nauwkeurige signaalversterking behandeld. Vervolgens komen eenvoudige praktische uitvoeringsvormen ter sprake, eerst op het niveau van het gebruik van standaard bouwstenen zoals operationele versterkers en daarna op transistorniveau.

Tot slot worden elementaire aspecten van de fabricage van monolitische geïntegreerde schakelingen belicht.

De reden van het tot stand komen van deze handleiding is een reeds enige jaren geleden door de vakgroep Elektronica genomen besluit, het onderwijs in het vak Elektronica voortaan reeds vanaf het begin sterk te richten op de synthese van schakelingen. Het was de taak van de auteur te trachten hier invulling aan te geven. Hij heeft daarbij veel steun gevonden in de destijds sedert 1969 bij de colleges gebruikte serie 'Grondslagen van de elektronica' van de hand van zijn leermeester prof.dr.ir. J. Davidse en in het latere werk van prof.dr.ir. E.H. Nordholt.

Het is de bedoeling dat binnen afzienbare tijd ook een bundel oefenopgaven ter beschikking komt.

Veel dank is de auteur verschuldigd aan de medewerkers van de vakgroep Elektronica die aan de totstandkoming van dit boek hebben meegewerkt. Met name worden genoemd Olfien Lefèbre die de oorspronkelijke collegehandleiding heeft getypt en Rob Janse die de figuren heeft verzorgd. Tot slot is een woord van dank op zijn plaats voor de medewerkers van de VSSD die de uiteindelijke opmaak van deze handleiding verzorgd hebben.

C. Wissenburgh
december 1990

Bij de eerste verbeterde druk

In deze nieuwe oplage zijn de gesignaleerde fouten zijn verbeterd. Voorts zijn op enkele plaatsen in de tekst en de figuren kleine wijzigingen of aanvullingen aangebracht.

De schrijver houdt zich aanbevolen voor suggesties die tot verbeteringen kunnen leiden.

C. Wissenburgh
juli 1992

Inhoud

1.	ALGEMENE INLEIDING	11
1.1.	Plaats en functie van de elektronica	11
1.2.	Informatie, signalen	16
1.3.	Overdrachtseigenschappen	18
1.4.	Componenten	22
1.5.	Hiërarchie in beschouwingwijze	26
2.	EIGENSCHAPPEN VAN HALFGELEIDERS	29
2.1.	Energiebandenmodel, intrinsieke halfgeleider	29
2.2.	De extrinsieke halfgeleider	35
2.3.	Meerderheids- en minderheidsladingdragers	39
2.4.	Levensduur van minderheidsladingdragers	40
2.5.	Diffusie, diffusielengte	41
2.6.	Stromen tengevolge van elektrische velden	44
2.7.	De pn-overgang	45
2.8.	Pn-dioden of junctiedioden	54
2.9.	Capaciteit van de pn-overgang	56
3.	DE BIPOLAIRE TRANSISTOR	59
3.1.	Principe van de transistorwerking	59
3.2.	Relaties tussen spanningen en stromen	62
3.3.	Basisstroom	64
3.4.	Early-effect	67
3.5.	Werkgebieden	68
3.6.	Karakteristieken	69
4.	VELDEFFECTTRANSISTOREN	73
4.1.	Inleiding	73
4.2.	De JFET	73
4.3.	De MOS-transistor	77
5.	MODELLERING VAN DIODE EN TRANSISTOREN	83
5.1.	Inleiding	83
5.2.	Groot-signaalmodel versus klein-signaalmodel	84
5.3.	Modellering van de bipolaire transistor	88
5.4.	Modellen van veldeffecttransistoren	99
5.5.	Slotopmerkingen	102

6.	LINEAIRE VERSTERKING, KWALITEIT	104
6.1.	Inleiding	104
6.2.	FET in gemeenschappelijke sourceschakeling	106
6.3.	Bipolaire transistor in gemeenschappelijke emitterschakeling	109
6.4.	Vervorming	112
6.5.	Frequentie afhankelijkheid	113
7.	REALISATIE VAN EEN NAUWKEURIGE OVERDRACHT	118
7.1.	Inleiding	118
7.2.	Tegenkoppeling	120
7.3.	Keuze van het tegenkoppelnetswerk	122
7.4.	Beschrijving van de overdracht van een lineaire tweepoort door middel van de kettingmatrix	124
7.5.	De nullor	127
7.6.	Versterkerconfiguraties met tegengekoppelde nullor	128
8.	OPERATIONELE VERSTERKERS ALS BOUWSTENEN	133
8.1.	Gebiedsafbakening	133
8.2.	De operationele versterker	133
8.3.	Versterker configuraties	135
8.4.	Eigenschappen van praktische operationele versterkers	142
9.	VERSTERKERCONFIGURATIES MET ÉÉN TRANSISTOR	146
9.1.	Inleiding	146
9.2.	De CE-schakeling en de CS-schakeling	148
9.3.	Emittervolger (CC-schakeling)	149
9.4.	Serietrap	152
9.5.	Shunttrap	155
9.6.	CB-schakeling	159
9.7.	Versterkerschakelingen met veldeffecttransistoren	161
9.8.	Cascaderen van versterkertrappen	165
9.9.	Samenvatting	168
10.	INSTELLING	171
10.1.	Inleiding	171
10.2.	Uitsturingsgrenzen van een transistor	172
10.3.	Dissipatie, toelaatbare spanningen en stromen	172
10.4.	Algemene overwegingen voor het instellen	175
10.5.	Instelcircuits	176
10.6.	Een eenvoudige stroombronschakeling	183
10.7.	Voorbeelden	185

11. TECHNOLOGIE	189
11.1. Inleiding geïntegreerde schakelingen	189
11.2. Intrinsiek en extrinsiek silicium	190
11.3. Monolithische techniek	194
11.4. Een traditioneel bipolair proces	198
11.5. Veldeffecttransistoren	208
11.6. Slotopmerkingen	209
LITERATUUR	211
NOTATIES EN SYMBOLEN	212
INDEX	214

1

Algemene inleiding

1.1. Plaats en functie van de elektronica

In het dagelijkse leven zijn de producten van de elektronica niet meer weg te denken. Woorden als computer, micro-elektronica, chip, analoog, digitaal zijn gemeengoed geworden. De hedendaagse zogenoemde informatiemaatschappij heeft zich als zodanig kunnen ontwikkelen, omdat de elektronische middelen beschikbaar waren die zin gaven aan de uitbouw van theoretische disciplines gericht op de processen van informatie-beheersing. Voor degenen die zich professioneel met elektronica bezig houden, betekent dit dat zij zich de maatschappelijke consequenties van hun activiteiten wel moeten realiseren.

Elektrische systemen hebben als kenmerk dat hun werking berust op het exploiteren van vrije elektrische ladingdragers, de elektronen. Zij zijn dragers en transporteurs van energie en informatie; zij zijn indirect waarneembaar in de vorm van spanningen en stromen.

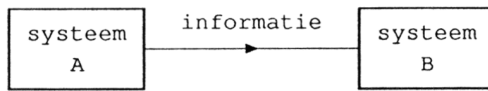
Een speciale klasse van elektrische systemen vormen de elektronische systemen. Men spreekt van elektronica als er componenten gebruikt worden waarin elektrische stromen worden gemanipuleerd. Het gaat daarbij steeds om manipulatie met behulp van informatiedragende grootheden ten behoeve van de bewerking en het transport van die informatie. Praktisch gesproken spreekt men van elektronica als er transistoren (veelal in de vorm van geïntegreerde schakelingen) en/of elektronenbuizen worden toegepast.

Bij de opbouw van technische systemen wordt veel gebruik gemaakt van de elektronica. De toepassingen liggen vooral daar waar:

- informatie moet worden getransporteerd
- informatie moet worden opgeslagen
- informatie moet worden aangepast, veelal ten behoeve van zintuigelijke waarneming
- processen moeten worden geregeld aan de hand van informatie, die uit het proces zelf afkomstig is of die extern wordt toegevoerd.
- mathematische berekeningen moeten worden uitgevoerd.

De begrippen *elektronica* en *informatie* zijn onverbreekbaar met elkaar verbonden. Voor het begrip informatie zijn verscheidene definities te geven; wij zullen ons hier beperken tot een ruwe omschrijving aan de hand van figuur 1.1: voor systeem B is informatie alles wat in systeem A aan kennis of gegevens aanwezig is en in systeem B niet, terwijl daaraan in systeem B wel behoefte bestaat. Door de informatiestroom neemt de kennis

in B toe. Het begrip systeem moet hier ruim opgevat worden; er kunnen ook levende wezens onder vallen.



Figuur 1.1. Door de informatiestroom neemt de kennis in B toe.

De wens om de genoemde bewerkingen en verwerkingen op informatie toe te kunnen passen is even oud als de techniek zelf, lang voor de opkomst van de elektronica bestonden er reeds oplossingen voor van bijvoorbeeld optische, akoestische, mechanische en chemische aard. Het is niet moeilijk om voorbeelden hiervan te vinden: rooksignalen, de tam-tam en de brief als transportmiddel, de foto en het orgeldraaiboek als opslagmiddel, de thermometer, het lakmoesstrookje en braille als aanpassing op zintuigelijke waarneming, de centrifugaalregelaar van een stoommachine als procesregelaar, het telraam en de mechanische rekenmachine als rekenruigen. Veel van deze oplossingen zijn bij de opkomst van de elektronica buiten gebruik geraakt. Andere hebben langer stand gehouden, omdat de elektronica niet steeds in elk opzicht een verbetering biedt. Niet-technische factoren spelen hierbij vaak een doorslaggevende rol.

Informatie is een abstract begrip. Om nu abstracte informatie in een technisch systeem hanteerbaar te maken is een informatiedrager nodig. Om de gewenste manipulatie met informatie goed te kunnen uitvoeren zijn in het algemeen beschouwd dragers nodig die snel, goed beïnvloedbaar en ook stuurbaar in ruimtelijke zin zijn. Wat snelheid betreft komen als dragers onmiddellijk naar voren: elektronen in geleidende materialen of in vacuüm en elektromagnetische golven in de vorm van radiogolven of licht. In het gebruik van elektronen als informatiedragers ligt nu precies de grote kracht van de elektronica. Elektronen bezitten een zeer kleine massa (9×10^{-31} kg) en een relatief grote lading ($1,6 \times 10^{-19}$ C). Daardoor kunnen ze vrijwel traagheidsloos beïnvloed worden met relatief zwakke elektrische en magnetische velden, zodat de voortplantings-snelheid van informatie in geleiders vrijwel gelijk kan zijn aan de lichtsnelheid en bovendien de hoeveelheid verwerkte informatie per tijdseenheid groot kan zijn.

De beperkingen bij het gebruik van elektronen liggen in het feit dat hanteerbare stromen alleen in geleiders en in vacuüm opgewekt kunnen worden. Elektromagnetische golven, zoals licht en radiostraling, zijn informatiedragers die ook buiten deze media kunnen functioneren en die een minstens even grote snelheid en capaciteit bezitten. Hun beperking is echter de slechte manipuleerbaarheid. Door de uitvinding van de optische fibers (glasvezelkabel), is licht in ruimtelijke zin veel hanteerbaarder geworden, en als informatiedrager in betekenis sterk toegenomen.

Toepassing van elektronica biedt vele voordelen, maar kent ook beperkingen:

- De huidige technieken om elektronische schakelingen te vervaardigen maken het

- mogelijk zeer omvangrijke systemen met zeer geringe afmetingen te realiseren.
- De belangrijkste benodigde grondstof (silicium) is volop aanwezig. De energieconsumptie van elektronische systemen is in het algemeen relatief laag. Een elektrische energiebron is echter vrijwel steeds vereist.
 - Elektronische circuits zijn in principe gevoelig voor elektromagnetische en radioactieve straling, hetgeen zeer bezwaarlijk kan zijn.
 - De betrouwbaarheid van elektronische systemen kan zeer hoog zijn. Toepassing van de elektronica kan echter in zowel technisch als economisch opzicht bemoeilijkt worden, bijvoorbeeld doordat de omstandigheden waaronder deze moet functioneren zeer ongunstig zijn, zoals in een auto (schokken, trillen, grote variaties in temperatuur, elektromagnetische storingen, en dergelijke).
 - Het invoeren van elektronische systemen kan bemoeilijkt worden doordat een niet-elektronisch equivalent reeds op zeer ruime schaal wordt toegepast en min of meer gestandaardiseerd is. In het algemeen zal bij de invoering of wijziging van elektronische systemen binnen een bestaande standaard (bijvoorbeeld telefonie, omroep televisie) een nieuwe oplossing compatibel moeten zijn met de reeds aanwezige. Zo moest na de invoering van kleurentelevisie en stereogeluid het gebruik van ‘zwart-wit’- respectievelijk mono-apparatuur mogelijk blijven.

Informatie is aanvankelijk bijna altijd in niet-elektrische vorm aanwezig, zoals in de vorm van mechanische, magnetische, thermische of chemische energie of straling. Het zal duidelijk zijn, dat bij het gebruik van elektronische systemen deze primaire informatie eerst overgezet moet worden op een elektrische grootheid. De hiertoe benodigde omzeters noemen we *ingangstransducenten*.

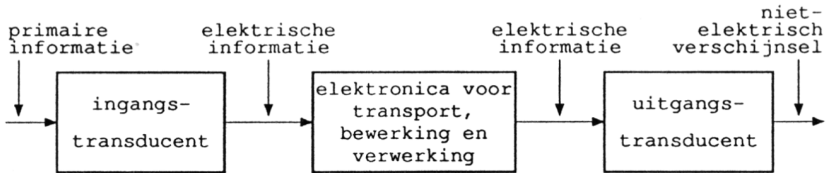
Na behandeling in het elektronische systeem zal de informatie meestal weer moeten worden omgezet in een niet-elektrisch verschijnsel, zoals geluid, licht, druk, snelheid, etc. Hiervoor gebruikt men *uitgangstransducenten*.

De nauwkeurigheid waarmee elektronische systemen kunnen werken, wordt vrijwel steeds bepaald door de nauwkeurigheid van de omzeters of transducenten aan het begin en het einde van de keten. De transducenten bepalen daardoor meestal of een elektronisch systeem wel of niet nauwkeuriger kan werken dan een niet-elektronisch.

De algemene opbouw van een elektronisch systeem is te zien in figuur 1.2.

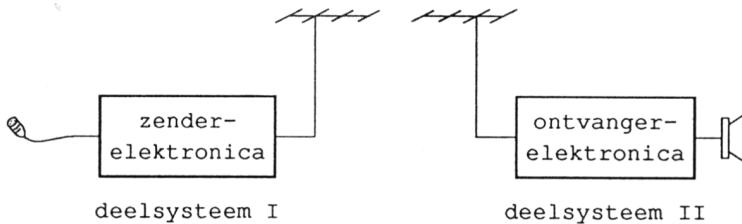
Voorbeelden zijn niet moeilijk te vinden:

- Bij audio-installaties zullen microfoons, mechanische of optische aftasters en magneetkoppen gebruikt worden als ingangstransducenten. Het elektronische systeem kan versterkers en meengeenheden bevatten. Als uitgangstransducenten treden onder andere op: luidsprekers voor reproductie van geluidsdruk en opneemkoppen voor het opslaan van informatie op magneetband.



Figuur 1.2. Algemene opbouw van een elektronisch systeem.

- Bij video-installaties dient bijvoorbeeld een camerabuis als ingangstransducent. Na de nodige video-elektronica eindigt het systeem in een beeldbuis of een opneemkop voor respectievelijk omzetting van de informatie in licht of in een magnetische structuur op een band.
- Bij draadloze communicatie bestaat het totale systeem uit een keten van elektronische deelsystemen (zie figuur 1.3). Het eerste begint met een microfoon als ingangstransducent. De verworven elektrische informatie wordt behandeld in de zender-elektronica, terwijl de daaropvolgende uitgangstransducent de zendantenne is, waarmee de informatie wordt overgedragen op een elektromagnetisch veld. Het tweede deelsysteem bestaat uit een ontvangerantenne als ingangstransducent, gevolgd door ontvanger-elektronica, die tenslotte de als uitgangstransducent fungerende luidspreker aanstuurt.



Figuur 1.3. Elektronisch systeem, opgebouwd uit twee deelsystemen.

- Met behulp van elektronische systemen kan aan andere systemen een gewenst gedrag worden opgedrongen. Met behulp van geschikte ingangstransducenten wordt informatie over bijvoorbeeld snelheid, druk en temperatuur in elektrische informatie omgezet. In de dan volgende regelelektronica wordt deze totale informatie geschikt gemaakt om het technische systeem de gewenste eigenschappen te geven. Dit geschiedt via uitgangstransducenten in de vorm van bijvoorbeeld kleppen, hefboomen en dergelijke.
- De computer is een elektronisch systeem, waarbij als ingangstransducent onder andere een toetsenbord of een magneetkop fungeert, terwijl de uitgangstransducent bijvoorbeeld een beeldbuis, een printer of weer een magneetkop kan zijn.

Functies

Eén van de meest belangrijke functies waaraan men bij de verwerking van informatie behoefte heeft is *versterking* van het informatie dragende signaal. Waarom dit zo is,

moge blijken uit het volgende:

Informatie impliceert het aanwezig zijn van een zekere mate van ordening, zekerheid en staat dus tegenover wanorde, onzekerheid. Verkregen informatie doet onzekerheid afnemen: het aflezen van een thermometer bijvoorbeeld vermindert de onzekerheid omtrent de temperatuur. De dode natuur, aan haar lot overgelaten, blijkt te tenderen naar vergroting van de wanorde (dit is vastgelegd in de zogenaamde entropiewet). De aan een ordening gekoppelde informatie gaat zo op den duur verloren. Twee fysische verschijnselen die hiermee nauw samenhangen en die in elektrische systemen optreden zijn *ruis* en *dissipatie*.

Ruis hangt samen met het feit dat alle fysische systemen *statistische fluctuaties* (toevallige door de statistiek beschreven schommelingen) vertonen. In elektronische systemen zijn deze een gevolg van wanordelijke bewegingen van ladingdragers in de materie. Neemt men bijvoorbeeld een weerstand, dan kan men met behulp van een zeer gevoelige spanningsmeter, aangesloten op de uiteinden van die weerstand, een sterk fluctuerende spanning waarnemen. De momentane resulterende beweging van de ladingdragers is niets anders dan een stroom. Als de weerstand zich in een veldvrije ruimte bevindt, zullen de ladingdragers gemiddeld op hun plaats blijven, hetgeen betekent dat de gemiddelde waarde van de spanning over de weerstand nul is. Als men de fluctuaties voldoende versterkt en via een transducent hoorbaar maakt, neemt men ze waar als geruis, vandaar de benaming ruis (noise).

Aan ruis valt in een fysisch systeem niet te ontkomen. Bij verwerking van informatie moet men er dus in de eerste plaats voor zorgen dat de primaire signaalenergie groot is ten opzichte van de ruisenergie in het systeem, wil de informatie herkenbaar blijven. Men zegt: de signaal-ruisverhouding (zie paragraaf 1.3) moet voldoende groot zijn; en blijven. Het laatste is zonder meer helaas niet het geval, ten gevolge van het als tweede genoemde fysische verschijnsel: dissipatie.

Dissipatie omschrijft het verschijnsel dat aan een systeem toegevoerde geordende energie (informatie) deels wordt omgezet in een vorm van ongeordende energie: warmte. Men spreekt ook van verliezen (vergelijk wrijving in mechanische systemen). Door deze verliezen wordt de signaal-ruisverhouding gaandeweg slechter en zal de informatie ten slotte niet meer te onderscheiden zijn van de ruis (is dan 'verdronken in de ruis'). Om dit te voorkomen zal men het signaal tijdig moeten *versterken*, dat wil zeggen de signaalenergie weer moeten vergroten.

Met versterking kan men in het algemeen een verslechterde signaal-ruisverhouding helaas niet verbeteren (de versterker is niet in staat signaal en ruis onderscheidenlijk te verwerken). De maximale signaal-ruisverhouding in een systeem wordt meestal vastgelegd bij de koppeling tussen de ingangstransducent (welke meestal een zwak elektrisch signaal afgeeft) en het elektronisch gedeelte. Het realiseren van optimale overdracht op deze plaats is dan ook een van de essentiële functies van elektronische schakelingen.

Naast de meest voorkomende functie van versterking, kan men in elektronische systemen velerlei bewerkingfuncties aantreffen. Enkele hiervan zijn bijvoorbeeld:

- het bij elkaar optellen, van elkaar aftrekken en met elkaar vermenigvuldigen van signalen
- het ontwarren van signaalmengsels (onder andere frequentie-selectief filteren)
- het opslaan van informatie (geheugenfunctie)
- het aftasten van informatie (herverdeling in de tijd).

De materiële middelen die de elektronica ten dienste staan maken het dankzij hun vervaardigingstechnieken (geïntegreerde schakelingen) mogelijk binnen een zeer klein volume bijzonder gecompliceerde, zeer vele functies omvattende, systemen te realiseren. Dit vooral waar het structuren betreft die zijn opgebouwd uit overwegend grote aantallen eenvoudige identieke elementen, zoals computersystemen.

1.2. Informatie, signalen

Informatie is afkomstig van een informatiebron en wordt gedragen door een energetisch verschijnsel: een signaal.

De informatiedragende elektrische grootheden hebben de vorm van met de tijd variërende spanningen of stromen. De spanning van het lichtnet wordt meestal niet opgevat als een signaal. De bedoeling is in de eerste plaats energiedistributie.

Signalen zijn tijdsfuncties: de momentane amplitude is een functie van de tijd.

De tijdsfuncties kunnen continu of discreet zijn, zowel in amplitude als in tijd. Men kan daardoor vier typen signalen onderscheiden (zie figuur 1.4).

		tijd	
		continu	discreet
amplitude	continu	analoog	bemonsterd
	discreet	gekwantiseerd	digitaal

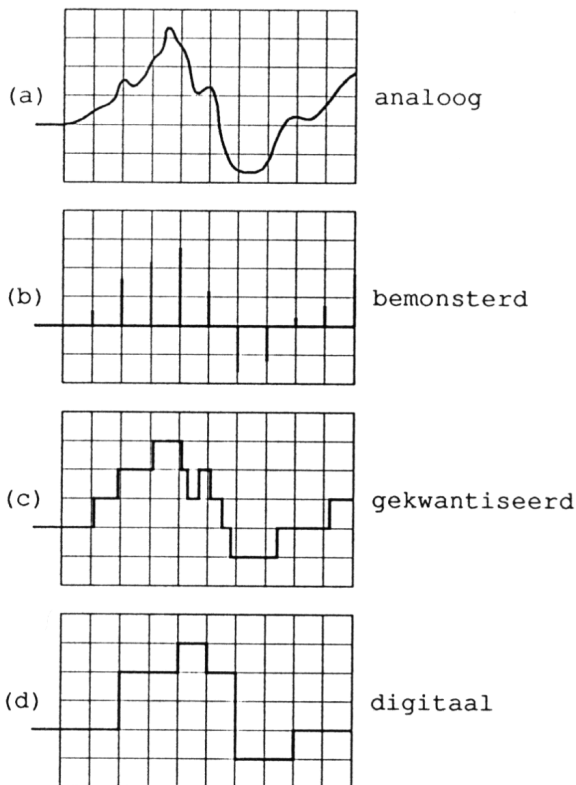
Figuur 1.4. Matrix van onderscheiden signaaltypen.

- Een *analoog* signaal is een signaal dat zowel in amplitude als in tijd continu is. Het is een analogon van de primaire informatie.
- Een *bemonsterd* ('gesampled') signaal is een signaal waarvan de amplitude slechts

op discrete tijdstippen is gegeven. (Volgens het zogenaamde bemonsterings-theorema van Shannon beschrijft een dergelijk signaal het amplitudeverloop op elk tijdstip exact als de tijd gelegen tussen de equidistante bemonsteringstijdstippen niet groter is dan de halve periodetijd van de hoogste in het signaal voorkomende frequentie).

- Een signaal heet *gekwantiseerd*, indien de amplitude-waarden gelegen binnen de discrete deelintervallen waarin het waardebereik wordt opgedeeld, steeds op vaste waarden worden ‘afgerond’. Een dergelijk signaal is dus amplitude-discreet en tijd-continu.
- Wordt een signaal bemonsterd en gekwantiseerd, dan is het discreet zowel in amplitude als tijd en spreekt men van een *digitaal* signaal.

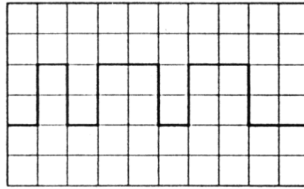
In figuur 1.5 zijn de onderscheiden gevallen grafisch weergegeven.



Figuur 1.5. Illustratie van onderscheiden signaaltypen.

Bemonsteren en kwantiseren (‘digitaliseren’) zijn bewerkingen die meestal worden uitgevoerd om een signaal uiteindelijk om te zetten in een binaire code, zodat er nog slechts twee amplitudes worden onderscheiden (figuur 1.6). Zo’n binair signaal wordt in de praktijk vrijwel altijd als digitaal betiteld. Het begrip digitaal signaal zal dan ook

meestal als binair signaal moeten worden geïnterpreteerd. In bijvoorbeeld computers en zgn. digitale audiosystemen wordt de informatie door binaire signalen gedragen.



Figuur 1.6. Binair signaal.

Men moet bedenken dat strikt genomen het onderscheid tussen discrete en analoge signalen fysisch beschouwd niet bestaat. Tijd-discrete signaalfuncties zijn op energetische gronden fysisch onbestaanbaar: eindige veranderingen in oneindig korte tijd zouden gepaard gaan met oneindig grote energieën. Praktisch kan men spreken van digitale signalen als er sprake is van twee onderscheiden relevante signaalniveaus en de overgangstoestanden van relatief korte duur zijn.

De beantwoording van de belangrijke vraag welke van de genoemde signaalformen onder omstandigheden de mogelijke dan wel meest geschikte is om de informatie te bewerken of over te dragen, valt buiten het bestek van dit boek.

1.3. Overdrachtseigenschappen

Bij de overdracht van signalen zal de informatie vervat in het signaal bijna altijd worden aangetast in kwalitatieve zin. De overdrachtseigenschappen van een elektronisch systeem hebben dan ook naast een kwantitatief aspect betrekking op de kwaliteitsaspecten van de overdracht.

We kunnen de overdrachtseigenschappen onderscheiden in *statische* en *dynamische* eigenschappen die een beschrijving geven van de overdracht, waarbij het tijdsafhankelijke karakter of de frequentie van de over te dragen signalen niet respectievelijk wel een directe rol speelt.

1.3.1. Statische overdrachtseigenschappen

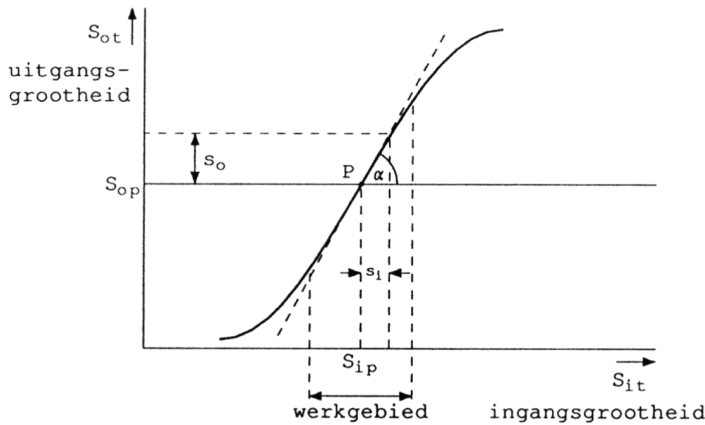
Nauwkeurigheid van de amplitudeoverdracht

De zogenaamde *statische overdrachtkarakteristiek* geeft het verband aan tussen de ingangs- en uitgangsgrootte van een overdrachtselement. De eventuele onnauwkeurigheid bij de overdracht van signalen wordt veroorzaakt door de afwijking van de voorgeschreven relatie tussen ingangs- en uitgangsgrootte; veelal wordt de eis gesteld dat er een evenredig verband tussen beide grootheden bestaat. De overdrachtkarakteristiek is dan *lineair*. Een veel voorkomende vorm van een overdrachtfunctie is geschetst in figuur 1.7. Het overdrachtselement is ingesteld op een bepaalde rustspanning en/of -stroom in het instelpunt P. De toegevoerde ingangsgrootte S_{it}

varieert dan rondom S_{ip} . Men zegt ook wel dat het overdrachtselement wordt uitgestuurd rond S_{ip} . Stel de momentane verandering in S_{it} ten opzichte van S_{ip} is s_i (ingangssignaal) en de hierdoor veroorzaakte verandering in de uitgangsgrootheid is s_o (uitgangssignaal). We kunnen dan schrijven:

$$S_{it} = S_{ip} + s_i$$

$$S_{ot} = S_{op} + s_o$$



Figuur 1.7. Voorbeeld van een overdrachtskarakteristiek.

De signaalgrootheden s_i , respectievelijk s_o zijn gesuperponeerd op de instelgrootheden S_{ip} , respectievelijk S_{op} .

Bij de overdracht van signalen kan men in de beschrijving de instelgrootheden buiten beschouwing laten en bedoelt men met bijvoorbeeld de ingangs- en uitgangsspanning de signalen s_i en s_o .

We zien dat slechts een bepaald deel van de overdrachtskarakteristiek geschikt is om een evenredig verband te realiseren tussen ingangs- en uitgangssignaal. In figuur 1.7 geldt in de buurt van punt P

$$\frac{s_o}{s_i} = \text{tg } \alpha$$

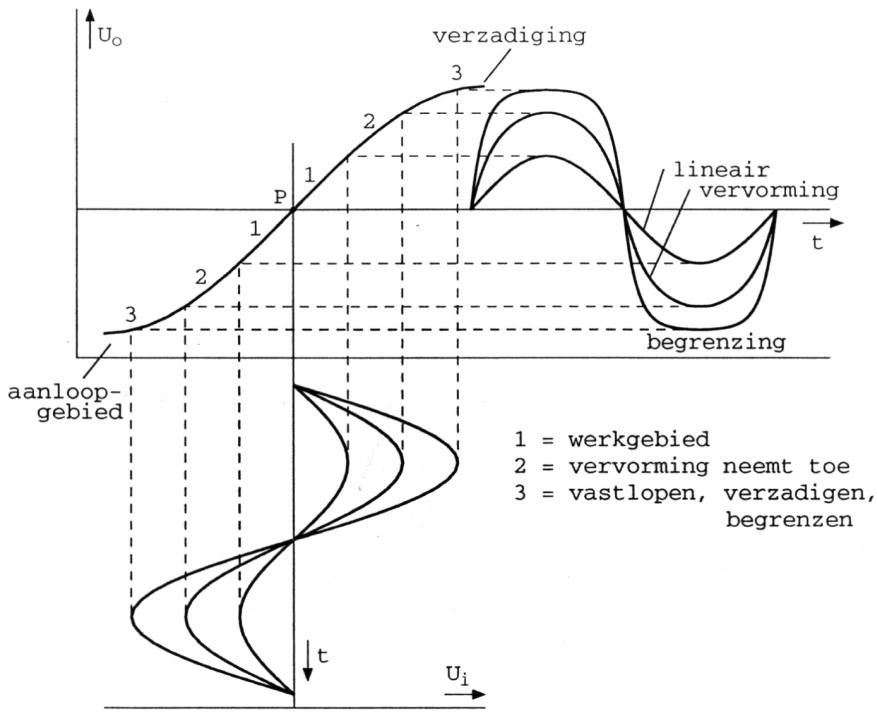
Men noemt $\text{tg } \alpha$ wel de *gevoeligheid* van een systeem.

Niet-lineariteit van de signaaloverdracht

Wanneer de amplitudes van de signalen toenemen en dus het overdrachtselement verder wordt uitgestuurd, zal de relatie tussen s_i en s_o zelden lineair blijven. De optredende *niet-lineariteit* is een maat voor de kwalitatieve eigenschappen van de overdracht.

Figuur 1.8 geeft een indruk hoe de overdracht voor sinusvormige signalen met

toenemende amplitude eruit zou kunnen zien. We zien dat buiten het lineaire werkgebied (1) de sinusvorm van de signalen wordt aangetast (geen vormgetrouwe overdracht). Men noemt dit verzadiging (gebied 2). Wordt het overdrachtselement nog verder uitgestuurd (gebied 3), dan treedt zogenaamde begrenzing op. De amplitude van het uitgangssignaal neemt niet verder toe. Ernstige aantasting van lineaire overdracht treedt altijd op als een component wordt uitgestuurd buiten fysieke grenzen zoals die gesteld worden door bijvoorbeeld maximaal toelaatbare waarden van de spanning of stroom en de beschikbare spanning en/of stroom. De vereiste lineariteit van de overdracht bepaalt meestal de maximaal toelaatbare uitsturing van een component.



Figuur 1.8. Overdracht van grote signalen, ontstaan van vervorming.

Stabiliteit van de statische overdrachtseigenschappen

In de loop van de tijd kunnen veranderingen optreden in de overdrachtselementen zelf (veroudering) of in de omgevingscondities (externe parameters). De stabiliteit zegt nu iets over de mate van constantheid van een overdracht ondanks genoemde veranderingen.

Verandering van de overdracht door veroudering bepaalt de *lange-termijn stabiliteit* (long-term stability). De invloed van de temperatuur op bepaalde overdrachtseigenschappen wordt *drift* genoemd, uitgedrukt in een temperatuurcoëfficiënt. Verder

heeft de voedingsspanning dikwijls invloed op de overdracht. Deze invloed wordt uitgedrukt door middel van het begrip voedingsspanningsreëctie. Een grote waarde van de reëctiefactor betekent een geringe gevoeligheid voor veranderingen van de voedingsspanning.

Gevoeligheid en resolutie van de overdracht

Door middel van versterking kan de gevoeligheid van een overdrachtssysteem onbepert worden opgevoerd. Dat dit niet zinvol is, komt doordat de overdrachtscomponenten niet alleen een informatiedragend signaal afgeven aan de uitgang maar ook storende signalen. Met een toenemende gevoeligheid neemt helaas de grootte van deze storingen ook toe. We noemen enkele typen storingen.

Ruis (random noise)

In paragraaf 1.1 is de oorzaak van ruis reeds genoemd. Het ruissignaal is meestal gesuperponeerd op het informatiedragende signaal. De momentane amplitude van de ruis vertoont veelal een normale kansverdeling; de effectieve waarde van zo'n ruissignaal komt dan overeen met de standaarddeviatie (σ). Het ruisvermogen neemt in het algemeen toe met de bandbreedte.

Stoorsignalen

Zeer bekende stoorsignalen zijn capacitef of inductief op het elektronische systeem overgedragen 50 Hz (Amerika 60 Hz) spanningen en stromen van het 'lichtnet', alsmede de harmonischen van deze frequentie ('brom'). Verder kunnen stoorsignalen afkomstig zijn van onder andere machines, verbrandingsmotoren (ontsteking), maar ook van andere elektronische systemen (computers!). Men vat deze storingen samen onder de term: *man-made noise* (in tegenstelling tot random noise). Door passende maatregelen kunnen deze storingen in het algemeen tot aanvaardbare proporties worden teruggebracht.

Het optreden van ruis, stoorsignalen, drift, enz., stelt een ondergrens aan de grootte van nog zinvol of betrouwbaar te verwerken ingangssignalen. Deze ondergrens bepaalt de *grensgevoeligheid* van een overdrachtssysteem. Wanneer men wil aangeven wat de minimaal betrouwbare onderscheidbaarheid van signaalgrootte (dus signaalverschillen) is, gebruikt men de term *resolutie* of *oplossend vermogen*.

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn geworden dat nauwkeurigheid en gevoeligheid belangrijke eigenschappen zijn bij de overdracht van informatie. Een nauwkeurige overdracht kan belast zijn met ruis en storing en hoeft dus niet een grote bruikbare gevoeligheid te bezitten. De overdracht van kleine signalen is dan onbetrouwbaar en in feite dus niet nauwkeurig. Aan de andere kant kan een overdracht een indrukwekkende resolutie vertonen met overigens onnauwkeurige en niet-stabiele overdrachtseigenschappen.

Dynamiek en signaal-ruisverhouding

In het voorgaande is gebleken dat het optreden van vervorming als gevolg van niet-lineariteit een bovengrens stelt aan de te verwerken signaalamplituden, terwijl storingen een ondergrens aangeven. De *dynamiek* van een overdrachtssysteem is nu de verhouding van de grootste verwerkbaar signaalamplitude (uitstuurbereik) en de kleinste nog te onderscheiden signaalamplitude. De verhouding tussen de maximaal optredende signaalgrootte en de aanwezige ruis wordt de *signaal-ruisverhouding* genoemd. Evenzo wordt van *signaal-stoorverhouding* gesproken als men de verhouding tussen het maximaal voorkomend signaal en de aanwezige storing op het oog heeft.

1.3.2. Dynamische overdrachtseigenschappen

Het dynamische gedrag van een elektronisch systeem is van groot belang voor de informatie verwerking. Bij de bewerking van signalen wil men steeds dat de uitgangsgrootheid nauwkeurig overeenkomt met het resultaat dat wordt beoogd met de bewerking die op de ingangsgrootheid wordt toegepast. Als de ingangsgrootheden in de tijd variëren (dynamisch zijn), is het van belang te onderzoeken hoe het overdrachtssysteem de variaties volgt; anders gezegd: men moet de responsie van het systeem onderzoeken. Zo onderscheidt men bijvoorbeeld de responsie op een sinusvormig ingangssignaal, die kan worden gekarakteriseerd door de amplitude- en fasekarakteristiek en de responsie op een stapvormig ingangssignaal, weergegeven door de zogenaamde stap- of sprongkarakteristiek. Welke responsie de meest relevante informatie geeft omtrent het dynamische gedrag van een systeem, hangt af van de kenmerken van het informatiedragende signaal.

1.4. Componenten

1.4.1. Inleiding

Elektronische systemen worden samengesteld uit diverse (deel)schakelingen (circuits) elk voor zich ontworpen om een bepaalde (deel)functie te realiseren. De elektronicus heeft hiertoe de beschikking over een uitgebreid assortiment aan elementaire bouwstenen of componenten. Ze kunnen ruwweg worden onderscheiden in *actieve* en *passieve* componenten. Tot de actieve componenten rekent men die componenten waarmee vermogensversterking mogelijk is; in concreto transistoren, elektronenbuizen. De andere groep componenten noemt men passieve componenten. Hiertoe rekent men weerstanden, spoelen, condensatoren, transformatoren, en dergelijke. Om het gedrag van elektronische systemen te kunnen beschrijven vindt modelvorming plaats met behulp van door mathematische betrekkingen gedefinieerde netwerkelementen. Men spreekt van *vervangingschema's*. De complexiteit van een vervangingschema hangt af van de aard van de component en de gewenste nauwkeurigheid van de benadering van de fysische realiteit door middel van het model. In het algemeen zal het vervangingschema van een component in eerste instantie de primair beoogde functie

vertolken. Daarnaast kan het netwerkelementen bevatten die andere met de fysische opbouw of constructie samenhangende effecten beschrijven. Deze worden, ofschoon veelal inherent aan de aard van de component, meestal *parasitaire effecten* genoemd. Zo zal een spoel naast de primaire functie van zelfinductie onvermijdelijk ook weerstand en capaciteit vertonen.

Het gedrag van veel — en met name de actieve — componenten wordt mathematisch beschreven door niet-lineaire functies. Een modelvorming met behulp van lineaire netwerkelementen is dan slechts mogelijk, indien er sprake is van kleine — in principe infinitesimale — stroom- en spanningsvariaties rondom een bepaalde rustwaarde of instelling. In hoofdstuk 5 wordt nader op de modelvorming van actieve componenten ingegaan.

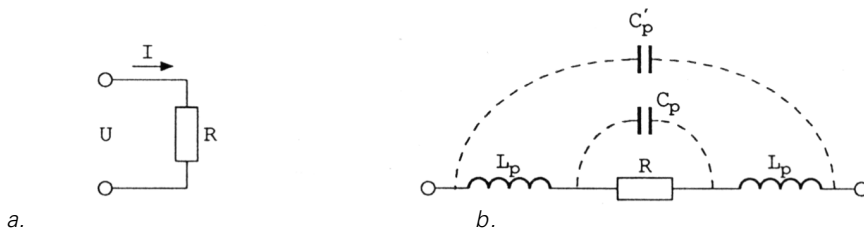
1.4.2. Passieve componenten; vervangingsschema's

Om bij het bestuderen dan wel ontwerpen van schakelingen bedacht te kunnen zijn op ongewenste neveneffecten, zullen van enige veel gebruikte passieve componenten de netwerkmodellen worden besproken.

De weerstand

Voor de weerstand geldt de Wet van Ohm: $U = RI$. Mits constant fungeert R als evenredigheidsconstante tussen de spanning U en de stroom I . Ten gevolge van het gedissipeerde vermogen $P = UI$ kan echter de temperatuur toenemen en daardoor de weerstandswaarde veranderen. Bij een gegeven spanning zal de weerstandswaarde dus via de temperatuur beïnvloed worden door de stroom. De relatie tussen U en I is derhalve in feite niet-lineair; $U = R(I)I$. Bij praktische weerstanden geeft het geschetste fenomeen echter niet spoedig aanleiding tot problemen; een weerstand kan echter ook door andere oorzaken een niet-lineair gedrag vertonen.

Parasitaire effecten die bij weerstanden een rol kunnen gaan spelen bij zeer hoge frequenties en daardoor een uitbreiding aan het model geven, zijn: de zelfinductie van de aansluitdraden (orde van grootte 10^{-8} H/cm) en de capaciteit tussen deze draden (orde van grootte 10^{-14} F). In figuur 1.9 zijn de betreffende modellen weergegeven.



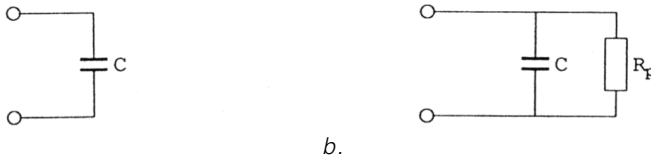
Figuur 1.9. a. Weerstand; b. model van een weerstand met parasitaire effecten.

De condensator

Primair wordt de condensator in het netwerkmodel vertolkt door een capaciteit en geldt de relatie

$$i = C \frac{du}{dt}$$

Ook hier treden in de praktijk niet-lineariteiten en parasitaire effecten op. Ze zijn afhankelijk van de constructie en bepalen daarmee de bruikbaarheid van verschillende typen condensatoren voor bepaalde toepassingen. De meest in het oog springende parasiet is een gevolg van de eindige isolatieweerstand van het diëlektricum en wordt vertolkt door een weerstand R_p parallel aan de capaciteit; zie figuur 1.10. Deze weerstand geeft aanleiding tot verliezen (dissipatie).



Figuur 1.10. a. Condensator; b. model van een condensator met verliezen van diëlektricum.

De spoel

Spoelen zijn componenten die in het algemeen slechts zeer beperkt hun primaire functie vervullen en bovendien uit constructief oogpunt onaantrekkelijk zijn. Ze worden primair vertolkt door de zelfinductie en de relatie

$$u = L \frac{di}{dt}$$

De fysieke afmetingen van een spoel zijn al gauw groot. Men beperkt zich in elektronische schakelingen dan ook over het algemeen tot het gebruik van spoelen met zelfinducties van de orde van grootte van hooguit enkele tientallen mH. Dit heeft tot gevolg dat de toepassing beperkt blijft tot het gebied van de hogere frequenties (> 10 kHz). Bij spoelen zijn de parasitaire effecten zelden verwaarloosbaar. Ze bestaan uit verliezen en capaciteit. De verliezen zijn een gevolg van de weerstand van het draad waarvan de spoel is gewikkeld en eventuele 'ijzerverliezen', indien de spoel een kern heeft van magnetisch materiaal. De genoemde verliezen worden in rekening gebracht door middel van een serieweerstand R_s respectievelijk een parallelweerstand R_p . De parasitaire 'windingscapaciteit' C_p staat parallel aan de zelfinductie. Zoals uit figuur 1.11 blijkt is een spoel in wezen een parallelkring met alle consequenties van dien. Dat wil zeggen dat het netwerk slechts voor frequenties onder de resonantiefrequentie inductief is en voor frequenties daarboven capacitief wordt, in welk geval de primaire functie zelfs in het geheel niet meer vervuld wordt.