
Elektronica Kunst & Kunde 5

**Analoge techniek –
uitwerkingen bij de opgaven
en experimenten uit
deel 1 en 3**

Michael Herzogenrath

Uitgeverij Segment B.V.
Postbus 75, 6190 AB Beek (L)

Inhoud

	Inleiding	9
	Deel I: Opgaven uit het theorieboek	13
1	Beginselen	15
1.1	Opgaven 1.1 — 1.31	15
1.2	Aanvullende opgaven 1 — 8	40
2	Transistoren	47
2.1	Opgaven 2.1 — 2.14	47
2.2	Aanvullende opgaven 1 — 8	63
3	Veldeffect-transistoren	73
3.1	Opgaven 3.1 — 3.21	73
4	Terugkoppeling en operationele versterkers	91
4.1	Opgaven 4.1 — 4.14	91
4.2	Aanvullende opgaven 1 — 7	107
5	Actieve filters en oscillatoren	113
5.1	Opgaven 5.1 — 5.10	113
5.2	Aanvullende opgaven 1 — 4	120
6	Spanningsregelaars	123
6.1	Opgaven 6.1 — 6.12	123
6.2	Aanvullende opgaven 1 — 3	131
7	Precisieschakelingen	139
7.1	Opgaven 7.1 — 7.8	139
7.2	Aanvullende opgaven 1 — 6	147
	Deel II: Opgaven uit het praktijkboek	151
1	DC-schakelingen	153
1.1	De wet van Ohm	153
1.2	Gloeilamp	154
1.3	Diode	155

1.4	Spanningsdeler	156
1.5	De oscilloscoop	156
1.6	AC-spanningsdeler	157
2	Condensatoren	159
2.1	RC-schakeling	159
2.2	Differentiator	160
2.3	Integrator	162
2.4	Laagdoorlaatfilter	163
2.5	Hoogdoorlaatfilter	164
2.6	Filtertoepassing I: “rommeldetector”	165
2.7	Filtertoepassing II: signaal en ruis scheiden	165
2.8	Koppelcondensator	165
2.9	LC-filter	166
3	Schakelingen met dioden	167
3.1	LC-resonantiekring	167
3.2	Enkelzijdige gelijkrichter	169
3.3	Dubbelzijdige bruggelijkrichter	170
3.4	Rimpelspanning	171
3.5	Signaaldioden	172
3.6	Klemschakeling	172
3.7	Diode-begrenzer	174
3.8	De impedantie van meetinstrumenten	174
4	Transistoren I	179
4.1	Transistor-overgangen zijn dioden	179
4.2	Emittervolger	179
4.3	Ingangs- en uitgangsimpedantie van een emittervolger	180
4.4	Enkelzijdig gevoede emittervolger	182
4.5	Stroomversterking van de transistor	182
4.6	Stroombron	184
4.7	Gemeenschappelijke-emitterversterker	185
4.8	Emittervolger-buffer	187
4.9	De transistor als schakelaar	188
5	Transistoren II	191
5.1	Dynamische curve-tracer	191
5.2	Gemeenschappelijke-emitterversterker	193
5.3	Stroomspiegel	194
5.4	De vergelijking van Ebers-Moll	196
5.5	Gelijkstroominstelling: de goede en de verkeerde manier	196
5.6	Push-pull	198
6	Transistoren III	199
6.1	Verschilversterker	199
6.2	Bootstrapping	200
6.3	Het Miller-effect	202
6.4	Darlington	203
6.5	Superbèta	204

7	FET's I: een eerste kennismaking	207
7.1	FET-karakteristieken	207
7.2	FET-stroombronnen	208
7.3	Sourcevolger	210
7.4	De FET als variabele weerstand	212
8	Opamps I	215
8.1	Open-lus testschakeling	215
8.2	Inverterende versterker	215
8.3	Niet-inverterende versterker	216
8.4	Spanningsvolger	217
8.5	Stroombron	218
8.6	Stroom-naar-spanning omzetter	218
8.7	Optelversterker	220
8.8	Push-pull buffer	220
9	Opamps II	223
9.1	Tekortkomingen van de opamp	223
9.2	Integrator	225
9.3	Differentiator	226
9.4	AC-versterker	226
9.5	Actieve gelijkrichter	226
9.6	Verbeterde actieve gelijkrichter	227
9.7	Actieve klemschakeling	228
10	Opamps III	229
10.1	Twee comparatoren	229
10.2	RC-oscillator	230
10.3	7555 oscillator-IC	231
10.4	Zaagtand-oscillator	232
10.5	Driehoek-oscillator	232
10.6	Sinus-oscillator	233
10.7	Emittervolger	234
10.8	Instabiliteit bij de opamp	234
11	FET's II	235
11.1	De vermogens-MOSFET	235
11.2	R_{on}	237
11.3	Overspraak	238
11.4	Chopper-schakeling	238
11.5	Sample & hold	239
11.6	Negatieve spanning uit een positieve spanning	240
11.7	Geschakelde-condensator-filter I	240
11.8	Geschakelde-condensator-filter II	241
12	Spanningsregelaars	243
12.1	De 723 spanningsregelaar	243
12.2	Driebe-nige vaste-spanning-regelaar	244
12.3	Instelbare driebe-nige regelaar: de 317	245
12.4	Driebe-nige regelaar als stroombron	245

12.5	Spanningsreferenties	246
12.6	Crowbar-overspanningsbeveiliging	246
	Aanhangsel	249
1	Opmerkingen bij de experimenten uit het praktijkboek	249
2	Onderdelenlijst	250
3	Leveranciers	252
4	Literatuur	252
5	Woord van dank	254

Inleiding

In den beginne was daar een kleine verzameling aantekeningen bij en (pogingen tot) oplossingen van enkele opgaven in de vier delen *Elektronica Kunst & Kunde*. Samengevat in een manuscript van nog geen twintig kantjes, besloot de boekenredactie van Elektuur meteen om daar een boek van te maken. Het werd al snel duidelijk dat “Het boek der Oplossingen” het beste in twee delen kon worden opgesplitst, overeenkomstig de thematische tweedeling van *Kunst & Kunde*: een deel “analoge technieken”, corresponderend met *Kunst & Kunde* delen 1 en 3, en een deel “digitale technieken”, corresponderend met delen 2 en 4.

De opzet van het voor u liggende boek is denkbaar eenvoudig en gebaseerd op de oorspronkelijke boeken van Horowitz en Hill. Het eerste deel bevat de oplossingen van de in *Kunst & Kunde* deel 1 opgenomen opgaven. Daarbij heb ik de originele nummering aangehouden. Hoewel het aantal pagina’s beperkt is, zijn alle oplossingen tot in detail uitgewerkt, compleet met wiskundige afleiding. Het was wat al te mager geweest als ik alleen de uitkomst zou hebben gegeven. Bovendien zijn er talloze opgaven in de trant van “Bewijs dat...” of “Toon aan dat...” waarin de uitkomst al gegeven is, maar waarbij het gaat om de manier waarop men tot die oplossing komt.

Het is me duidelijk dat ik het onmogelijk alle lezers naar de zin kan maken. Voor de één zijn de wiskundige afleidingen met alle tussenresultaten veel te uitvoerig en voor de ander wellicht juist weer niet uitvoerig genoeg — dat hangt helemaal van de voorkennis van de lezer af. Het is echter mijn opzet geweest dat de afzonderlijke stappen van elke berekening snel doorgrond kunnen worden, zonder lang nadenken of narekenen. In de meeste gevallen heb ik in die opgaven waar een getalsmatige uitkomst wordt verlangd, eerst de algemene vergelijking afgeleid en pas daarna de betreffende waarden ingevuld. Daarbij heb ik waar mogelijk gangbare eenheden gebruikt (bijvoorbeeld $2\text{ k}\Omega$ in plaats van $2000\ \Omega$) — uiteraard wordt wel *gerekend* met $2000\ \Omega$ (tenzij uitdrukkelijk anders aangegeven). Tussenresultaten en de einduitkomst zijn in het boek overal afgerond, maar in het geval van tussenresultaten is altijd verdergerekend met de maximale nauwkeurigheid die de rekenmachine te bieden had.

Maar niet alleen het eindige aantal pagina's van dit boek stelde ons voor problemen — het bleek ook dat een groot aantal opgaven voor verschillende uitleg vatbaar is. Wanneer uw uitkomst dus niet met die van mij overeenkomt, dan moet u nog eens goed nalezen welke randvoorwaarden voor de betreffende oplossing gelden.

Bij een groot aantal andere opgaven is op grote schaal van schattingen gebruik gemaakt — zie bijvoorbeeld de oplossingen van de opgaven van hoofdstuk 6. Wanneer u kijkt hoe in andere boeken over schakelingstechniek de elko's van voedingsschakelingen worden gedimensioneerd, dan ziet u tenminste evenveel verschillende oplossingen als u boeken ter hand hebt genomen — iedere autoriteit heeft zo zijn eigen *goede* vuistregels waar hij ongaarne van afwijkt. Ik heb geprobeerd bij alle schattingen en “natte-vinger”-berekeningen de situatie te schetsen waarbinnen ze geldig zijn. Bij de opgaven waar de lezer wordt gevraagd zelf een schakeling te ontwerpen, heb ik getracht een schakeling te vinden die gemakkelijk gedimensioneerd kan worden of die me anderszins interessant voorkwam.

Het tweede deel van dit boek is gewijd aan de practicum-opgaven uit *Kunst & Kunde* deel 3. De uitwerkingen bestaan uit een bespreking van de experimenten en de verkregen meetwaarden plus de daaruit berekende resultaten en/of grafieken. Bovendien wordt een antwoord gegeven op de gestelde vragen. De hoofdstuknummers van dit tweede deel corresponderen met de nummers van de practica. Met betrekking tot de metingen moet ik nog opmerken dat ik geheel en al heb afgezien van enige vorm van foutenrekening. De reden is dat niet alleen componenten als weerstanden toleranties hebben, maar ook de meetwaarden zelf — ten gevolge van toleranties van het meetinstrument of ten gevolge van afleesfouten. Bij analoge meetinstrumenten wordt meestal afgerond op een half of een heel schaaldeel, en bij digitale instrumenten wordt meestal ± 1 digit aangehouden. Het gevolg van dit alles is dat in de meetwaarden en alle berekeningen die daarmee worden uitgevoerd, al deze fouten doorwerken.

Wanneer de uitkomst van een meting niet “spoort” met de theorie, dan mag u niet in de verleiding komen meetwaarden zodanig af te lezen dat de uitkomst alsnog “klopt”. Bij heel lastige experimenten nemen we er genoeg mee de *orde van grootte* van een grootheid (bijvoorbeeld $M\Omega$ of pF) correct te bepalen — de cijfertjes vóór de komma hebben meestal weinig betekenis. Pas vooral bij transistoren op voor de soms extreem grote productietoleranties: de ene BF256B is in het geheel niet identiek aan de andere — ondanks het gelijke typenummer! In het aanhangsel van dit boek treft u een volledige lijst van onderdelen aan; voor sommige halfgeleiders worden daar vervangende typen genoemd die voor de experimenten en metingen even goed bruikbaar zijn — en sommige metingen zijn dermate fundamenteel dat u daarvoor vrijwel elke huis-, tuin- en keuken-halfgeleider kunt gebruiken.

Wellicht stellen de geschetste grafieken in het tweede deel van het boek u enigszins teleur. U dient echter te bedenken dat wanneer u een weerstandslijn met enkele tientallen meetwaarden tekent, u daar geen nauwkeuriger resultaat mee bereikt. De tien punten van paragraaf 1.1 waren al meer dan genoeg —

nog meer punten zou onzinnig zijn geweest. In het hoofdstuk over condensatoren treft u eveneens simpele schetsjes aan van de beelden die we bij de verschillende experimenten op het scherm van de oscilloscoop te zien krijgen. Sommigen onder u zullen hier absolute waarden (spanningen, tijdsintervallen) missen, maar de tekeningen maken duidelijk waar het om gaat, en dan is een handmatig schetsje meer dan voldoende — temeer daar we bij veel experimenten niet aan absolute waarden gebonden zijn, noch waar het spanningen betreft noch met betrekking tot frequenties enzovoort.

In sommige paragrafen wordt verwezen naar figuren in het theorie- en het praktijkboek (delen 1 en 3 van de reeks *Kunst & Kunde*) die hier niet zijn overgenomen. In beide gevallen zijn de figuurnummers *cursief* gezet. Verwijzingen naar figuren in het theorieboek zijn herkenbaar aan het feit dat het figuurnummer uit het nummer van het hoofdstuk en een volgnummer bestaat: *figuur 5.12* bijvoorbeeld is de twaalfde figuur van hoofdstuk 5. De figuurnummers in het praktijkboek worden bovendien voorafgegaan door een hoofdletter N, X of L al naargelang het een les, een uitgewerkt voorbeeld of een practicum betreft. *Figuur L7.4* is bijvoorbeeld de vierde figuur van practicum 7. Op deze manier kunt u altijd zien in welk boek u een bepaalde figuur kunt vinden als dat niet expliciet wordt vermeld.

Omdat ik niet mag aannemen dat alle lezers over dezelfde wiskundekennis zullen beschikken, wil ik hier enkele woorden wijden aan de *minimaal* benodigde voorkennis. Het slechte nieuws is dat u zonder kennis van algebra en het rekenen met breuken niets aan dit boek zult hebben. Het goede nieuws is echter dat ik — net als de schrijvers van het theorie- en het praktijkboek — geen gebruik heb hoeven maken van *gevorderde* onderwerpen als Fourier-analyse, differentiaalvergelijkingen of matrices met vierpoolparameters. Niettemin dient de lezer over enige basiskennis op het gebied van complexe getallen en differentiaal- en integraalrekening te beschikken — een groot aantal opgaven kan alleen daarmee worden opgelost.

Op wiskundige problemen wordt meestal slechts zijdelings ingegaan; meer is in de elektronica meestal ook niet nodig. Een voorbeeld: in de wiskunde is het differentiëren van discontinue functies altijd weer lastig, maar in de werkelijke wereld bezorgen sprongfuncties ons in het geheel geen problemen. Zelfs een extreem goede functiegenerator heeft een eindige slew-rate zodat een blok golf in werkelijkheid een trapeziumvorm heeft en zodoende zonder meer gedifferentieerd en geïntegreerd kan worden.

De literatuurlijst in het theorieboek noemt vrijwel uitsluitend Engelstalige titels; in het aanhangsel van dit boek treft u daarentegen een aantal Nederlands- en Duitstalige werken aan. Dit is natuurlijk slechts een selectie; over de diverse onderwerpen is in de loop der tijd een groot aantal uitstekende boeken verschenen.

Voor ik het vergeet: in de figuren in dit boek zult u geen *zigzagweerstand* aantreffen. Hoewel ik besef dat dit een zekere stijlbreuk inhoudt, heb ik ervoor gekozen in schema's de in Europa gebruikelijke symbolen te hanteren.

Tenslotte rest nog de vraag hoe u als lezer een oplossingenboek als dit gebruikt. Uit mijn eigen studententijd weet ik maar al te goed dat simpelweg overschrijven of doorlezen van door anderen opgeloste opgaven geen kennis oplevert die beklijft. Pas wanneer we zelf door proberen en doen een oplossing hebben gevonden die aan de vraagstelling voldoet, mogen we beweren dat we wat geleerd hebben. Misschien is dat een van de redenen waarom de Amerikaanse auteurs tot nog toe geen oplossingenboek hebben gepubliceerd — het gerucht gaat dat elke student de neiging heeft oplossingen over te schrijven. In dat licht bezien hoeft het ons niet te verwonderen dat er onder studenten voorbeeldoplossingen voor practica in omloop zijn met in meer of mindere mate correcte oplossingen en antwoorden (ik heb dat slechts van horen zeggen).

Na bestudering van de boeken van Horowitz/Hill/Hayes staat ons hier te lande echter geen tentamen te wachten — we willen slechts door zelfstudie iets over elektronica leren. Zo beschouwd vormt dit oplossingenboek een zinvolle afsluiting van de elektronica-bijbel van Horowitz en Hill. Het is een naslagwerkje waaruit u hulp kunt putten wanneer u op een gegeven moment vastzit en er alleen niet meer uit komt. En hoewel veel opgaven op verschillende manieren kunnen worden opgelost (zoals ik al eerder heb opgemerkt) en bij andere opgaven talloze verschillende schakelingen kunnen worden ontworpen, heb ik in elk geval getracht u een weg te wijzen die tot een goed resultaat leidt.

Hoewel alle opgaven nauwgezet zijn doorgerekend en de tekst van dit boek met zorg is gezet, kunnen foutjes niet volledig worden uitgesloten. Iedereen die wel eens een manuscript met een hoog wiskundegehalte heeft gezet, weet hoe gemakkelijk het zetduiveltje kan toeslaan.

Rest mij nog u veel *plezier* toe te wensen bij het bestuderen van de in dit boek gegeven oplossingen!

Michael Herzogenrath
10 november 1999