

Inhoudsopgave

| | | |
|---------|--|-----|
| 1 | INLEIDING | 13 |
| 1.1 | Het doel van dit boek | 13 |
| 1.2 | Het toepassingsgebied van elektronenbuizen | 14 |
| 1.3 | Audioversterkers versus instrumentaalversterkers | 14 |
| 1.4 | Korte historie | 15 |
| 1.5 | Codering van elektronenbuizen | 17 |
| 1.6 | Literatuurlijst hoofdstuk 1 | 17 |
| 2 | GRONDBEGINSELEN VAN ELEKTRONENEMISSIE | 18 |
| 2.1 | Soorten elektronenemissie | 18 |
| 2.2 | Ruimtelading | 19 |
| 2.3 | Emissierendement | 20 |
| 2.4 | Literatuurlijst hoofdstuk 2 | 21 |
| 3 | DE DIODE | 22 |
| 3.1 | Constructie van dioden met direct en indirect verhitte kathode | 22 |
| 3.2 | De werking van dioden | 23 |
| 3.3 | Soorten dioden en hun toepassingen | 24 |
| 3.4 | Het meten van diodekarakteristieken | 25 |
| 3.5 | Toepassing van de diode als gelijkrichter | 37 |
| 3.5.1 | Enkelzijdige diodegelijkrichter met buffercondensator | 37 |
| 3.5.2 | Dubbelzijdige diodegelijkrichter met buffercondensator | 39 |
| 3.5.3 | Dimensionering van de diodegelijkrichter met de voedingstransformator | 42 |
| 3.5.4 | Afvlakfilters | 48 |
| 3.5.4.1 | Het π -filter C-R-C | 48 |
| 3.5.4.2 | Het π -filter C-L-C | 50 |
| 3.5.5 | Dubbelzijdige diodegelijkrichter zonder buffercondensator | 54 |
| 3.5.6 | Het meten aan buisgelijkrichterschakelingen | 58 |
| 3.5.6.1 | De testopstelling | 58 |
| 3.5.6.2 | Analyse van de uitgangs- en de rimpelspanning als functie van de stroom in relatie met de buffercondensator en de zijdigheid van gelijkrichting | 62 |
| 3.5.6.3 | Analyse van de rimpelspanning als functie van grootheden van het π -filter C-R-C | 73 |
| 3.5.6.4 | Analyse van de rimpelspanning als functie van grootheden van het π -filter C-L-C | 75 |
| 3.5.6.5 | Analyse van de uitgangs- en de rimpelspanningen als functie van de grootheden van de dubbelzijdige diodebuisgelijkrichter zonder buffercondensator | 77 |
| 3.5.6.6 | Enkele gelijkrichterschakelingen gemeten | 81 |
| 3.6 | Filament- en negatieve roostervoedingen | 88 |
| 3.7 | Praktische tips | 93 |
| 3.8 | Literatuurlijst hoofdstuk 3 | 96 |
| 4 | DE TRIODE | 97 |
| 4.1 | Constructie van trioden met direct en indirect verhitte kathode | 97 |
| 4.2 | De werking van trioden | 98 |
| 4.3 | De statische triodenkarakteristieken en de triodengrootheden | 105 |
| 4.3.1 | De statische triodenkarakteristieken | 106 |
| 4.3.2 | De steilheid | 106 |
| 4.3.3 | De versterkingsfactor | 108 |
| 4.3.4 | De inwendige weerstand | 109 |
| 4.3.5 | De roosterruimte | 111 |
| 4.3.6 | De formules van Barkhausen | 112 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.3.7 | De triodengrootheden versus de anodestroom..... | 113 |
| 4.3.8 | De dissipatie en het vermogen..... | 115 |
| 4.3.9 | De statische triodenkarakteristieken van ECC81, ECC82 en ECC83 gemeten | 116 |
| 4.3.10 | Rekenvoorbeelden met statische triodengrootheden | 122 |
| 4.4 | De dynamische triodenkarakteristieken met een anodeweerstand | 127 |
| 4.4.1 | De theorie van de dynamische triodengrootheden met een anodeweerstand | 127 |
| 4.4.2 | De praktijk van de dynamische triodengrootheden met een anodeweerstand | 138 |
| 4.5 | De filamentvoeding gezien vanuit de trioden..... | 143 |
| 4.5.1 | De filamentvoeding gezien vanuit direct verhitte trioden | 143 |
| 4.5.2 | De filamentvoeding gezien vanuit indirect verhitte trioden | 146 |
| 4.6 | Laagfrequent versterking met weerstandskoppeling | 149 |
| 4.6.1 | De automatische negatieve roosterspanning..... | 149 |
| 4.6.2 | De roosterstroom | 151 |
| 4.7 | De triode basisschakelingen | 154 |
| 4.7.1 | De kathode basisschakeling..... | 155 |
| 4.7.2 | De anode basisschakeling of kathodevolger..... | 156 |
| 4.7.3 | De tegenkoppeling basisschakeling..... | 158 |
| 4.7.4 | De rooster basisschakeling | 162 |
| 4.7.5 | De cascode basisschakeling..... | 166 |
| 4.7.6 | De Serial Regulated Push Pull basisschakeling..... | 168 |
| 4.7.7 | Samenvatting van de triode basisschakelingen | 171 |
| 4.7.8 | De praktijk van de triode basisschakelingen | 173 |
| 4.8 | De fasendraaierschakelingen in theorie en praktijk..... | 189 |
| 4.8.1 | De transformator fasendraaier | 190 |
| 4.8.2 | De kathodedyne fasendraaier..... | 191 |
| 4.8.3 | De cascade fasendraaier..... | 197 |
| 4.8.4 | De verschilversterker fasendraaier | 198 |
| 4.8.5 | De omkeertrap fasendraaier..... | 204 |
| 4.8.6 | De zelfinstellende fasendraaier..... | 206 |
| 4.8.7 | Samenvatting van de fasendraaierschakelingen | 208 |
| 4.9 | De stuurtrapschakelingen in theorie en praktijk | 209 |
| 4.9.1 | De kathodevolger stuurtrap | 209 |
| 4.9.2 | De verschilversterker stuurtrap..... | 211 |
| 4.9.3 | De Serial Regulated Push Pull-stuurtrap | 215 |
| 4.10 | De triode eindversterkers..... | 219 |
| 4.10.1 | Indelingen van triode eindversterkers..... | 219 |
| 4.10.1.1 | Indeling van triode eindversterkers naar klasse..... | 219 |
| 4.10.1.2 | Indeling van triode eindversterkers naar negatieve voorspanning | 220 |
| 4.10.1.3 | Indeling van triode eindversterkers naar zonder of met roosterstroom | 222 |
| 4.10.1.4 | Indeling van triode eindversterkers naar enkelvoudig en gebalanceerd..... | 223 |
| 4.10.2 | Uitgangstransformatoren voor frequenties in het audiobereik | 224 |
| 4.10.3 | De luidsprekerimpedantie en de dempingsfactor | 228 |
| 4.10.4 | De ohmse en de inductieve belastingslijn..... | 234 |
| 4.10.5 | De theorie van de enkelvoudige triode eindversterker | 237 |
| 4.10.5.1 | Het waarschijnlijke maximale afgestane vermogen en het waarschijnlijke rendement | 238 |
| 4.10.5.2 | De vermogens en het rendement als functie van de roosterwisselspanning..... | 244 |
| 4.10.5.3 | Het parallel schakelen van eindtrioden..... | 247 |
| 4.10.5.4 | Het werkelijke maximale afgestane vermogen en het werkelijke rendement | 249 |
| 4.10.6 | De praktijk van de enkelvoudige triode eindversterker | 258 |
| 4.10.6.1 | Het werkelijke maximale vermogen en het werkelijke rendement als functie van r_a/r_i voor <i>vaste</i> roosterwisselspanning | 262 |
| 4.10.6.2 | Het werkelijke maximale vermogen en het werkelijke rendement als functie van r_a/r_i voor <i>variable</i> roosterwisselspanning | 264 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4.10.6.3 | De gemeten vermogens en het gemeten rendement als functie van de roosterwisselspanning | 266 |
| 4.10.6.4 | De vermogensbalans en het rendement bij maximaal afgestaan vermogen | 268 |
| 4.10.6.5 | De gemeten ohmse en inductieve belastingslijn | 270 |
| 4.10.6.6 | Voorbeelden van het ontwerpen van een enkelvoudige triode eindversterker | 272 |
| 4.10.7 | De theorie van de gebalanceerde triode eindversterker | 279 |
| 4.10.7.1 | De B.J. Thomson-methode | 280 |
| 4.10.7.2 | De gebalanceerde triode eindversterker in klasse A | 284 |
| 4.10.7.3 | De gebalanceerde triode eindversterker in klasse B | 285 |
| 4.10.7.4 | De gebalanceerde triode eindversterker in klasse AB | 295 |
| 4.10.7.5 | Over wat er nog meer is maar ook erg moeilijk | 298 |
| 4.10.8 | De praktijk van de gebalanceerde triode eindversterker | 303 |
| 4.10.8.1 | De toepassing van de B.J. Thomson-methode voor klasse A, B en AB | 306 |
| 4.10.8.2 | De gemeten vermogens en het rendement als functie van de roosterwisselspanning voor klasse A, B en AB | 319 |
| 4.10.8.3 | De vermogensbalans bij maximaal afgestaan vermogen voor klasse A, B en AB | 324 |
| 4.10.8.4 | Voorbeelden van het ontwerpen van een gebalanceerde triode eindversterker | 328 |
| 4.10.9 | Samenvatting van de triode eindversterkers | 338 |
| 4.10.10 | Andere eindtriodes | 341 |
| 4.11 | Literatuurlijst hoofdstuk 4 | 344 |
| 5 | DE TETRODE | 346 |
| 5.1 | Constructie van tetroden | 346 |
| 5.2 | Waarom de tetrode werd gemaakt | 347 |
| 5.3 | De werking van tetroden | 347 |
| 5.4 | De straalbundeltetrode | 350 |
| 5.5 | Schakelingen en berekeningen met toegepaste tetroden | 354 |
| 5.6 | Literatuurlijst hoofdstuk 5 | 355 |
| 6 | DE PENTHODE | 356 |
| 6.1 | Inleiding | 356 |
| 6.2 | Constructie van penthoden | 357 |
| 6.3 | De werking van penthoden | 358 |
| 6.4 | De statische penthodekarakteristieken en de penthodegrootheden | 364 |
| 6.4.1 | De statische penthodekarakteristieken | 364 |
| 6.4.2 | De stuurroostersteilheid | 366 |
| 6.4.3 | De stuurroosterversterkingsfactor | 369 |
| 6.4.4 | De stuurrooster inwendige weerstand | 370 |
| 6.4.5 | De schermroostersteilheid | 372 |
| 6.4.6 | De schermroosterversterkingsfactor | 373 |
| 6.4.7 | De schermrooster inwendige weerstand | 375 |
| 6.4.8 | De formules van Barkhausen | 376 |
| 6.4.9 | De stuurroosterruimte | 377 |
| 6.4.10 | De penthodegrootheden versus de anodestroom | 379 |
| 6.4.11 | De dissipatie en het vermogen aan de anode en het schermrooster | 384 |
| 6.4.12 | De statische penthodekarakteristieken van EF86 gemeten | 386 |
| 6.4.13 | Rekenvoorbeelden met statische penthodekarakteristieken | 395 |
| 6.5 | De dynamische penthodekarakteristieken met een anodeweerstand | 401 |
| 6.5.1 | De theorie van de dynamische penthodegrootheden met een anodeweerstand | 401 |
| 6.5.2 | Extra diepgang van de theorie van de dynamische penthode | 414 |
| 6.5.3 | De praktijk van de dynamische penthodegrootheden met een anodeweerstand | 420 |
| 6.6 | Een eerste tussentijdse vergelijking tussen trioden en penthoden | 428 |
| 6.7 | Laagfrequent versterking met weerstandskoppeling | 429 |
| 6.7.1 | Realisatie van de schermroosterspanning | 429 |
| 6.7.2 | De kathode basisschakeling met automatische $-U_{g1,k}$ in theorie en praktijk | 433 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 6.8 | De penthode eindversterkers | 441 |
| 6.8.1 | De theorie van de enkelvoudige penthode eindversterker..... | 441 |
| 6.8.1.1 | Het waarschijnlijke maximale afgestane vermogen en het waarschijnlijke rendement | 442 |
| 6.8.1.2 | De vermogens en het rendement als functie van de roosterwisselspanning..... | 450 |
| 6.8.1.3 | Het werkelijke maximale vermogen en het werkelijke rendement | 451 |
| 6.8.2 | De praktijk van de enkelvoudige penthode eindversterker | 456 |
| 6.8.2.1 | Het werkelijke maximale vermogen en anoderendement als functie van r_a/R_i | 457 |
| 6.8.2.2 | De gemeten vermogens en het anoderendement als functie van $u_{g1,k}$ | 459 |
| 6.8.2.3 | De vermogensbalans en de rendementen bij maximaal afgestaan vermogen | 461 |
| 6.8.2.4 | Voorbeelden van het ontwerpen van een enkelvoudige penthode eindversterker..... | 464 |
| 6.8.3 | Een tweede tussentijdse vergelijking tussen trioden en penthoden..... | 469 |
| 6.8.4 | De theorie van de gebalanceerde penthode eindversterker | 470 |
| 6.8.4.1 | De gebalanceerde penthode eindversterker in klasse A | 473 |
| 6.8.4.2 | De gebalanceerde penthode eindversterker in klasse B..... | 473 |
| 6.8.4.3 | De gebalanceerde penthode eindversterker in klasse AB..... | 484 |
| 6.8.4.4 | Over wat er nog meer is maar erg moeilijk | 485 |
| 6.8.5 | De praktijk van de gebalanceerde penthode eindversterker | 489 |
| 6.8.5.1 | Voorbeelden van ontwerpen van een gebalanceerde penthode eindversterker | 492 |
| 6.8.5.2 | De werkelijke vermogens en rendement als functie van $u_{g1,k}$ klasse A, B en AB..... | 500 |
| 6.8.5.3 | De vermogensbalans bij maximaal afgestaan vermogen klasse A, B en AB..... | 507 |
| 6.8.6 | Een derde tussentijdse vergelijking tussen trioden en penthoden | 512 |
| 6.9 | De ultralineaire eindversterkers..... | 513 |
| 6.9.1 | De theorie van de ultralineaire eindversterker..... | 513 |
| 6.9.1.1 | Op avontuur tussen triode en penthode | 514 |
| 6.9.1.2 | De vermogens en het rendement bij ultralineaair..... | 519 |
| 6.9.1.3 | Een netwerkanalyse voor een ultralineaire eindversterker | 522 |
| 6.9.2 | De praktijk van de ultralineaire eindversterker | 532 |
| 6.9.2.1 | Het bepalen van de schermroosteraftakking..... | 532 |
| 6.9.2.2 | De versterking en uitgangsweerstand versus de schermroosteraftakking | 538 |
| 6.9.2.3 | Een praktische vermogensvergelijking tussen triode, ultralineaair en penthode | 544 |
| 6.9.2.4 | De anodestroom- en schermroosterstroombijdrage voor ultralineaair vermogen..... | 547 |
| 6.10 | Samenvatting van de penthode en de ultralineaire eindversterker | 549 |
| 6.11 | Literatuurlijst hoofdstuk 6 | 550 |
| 7 | FREQUENTIEAFHANKELIJK GEDRAG..... | 551 |
| 7.1 | Definities en begrippen..... | 551 |
| 7.2 | Frequentieafhankelijk gedrag van versterkeronderdelen..... | 561 |
| 7.2.1 | Frequentieafhankelijk gedrag van de eindtransformator | 562 |
| 7.2.2 | Frequentieafhankelijk gedrag van de overige passieve onderdelen | 567 |
| 7.2.3 | Frequentieafhankelijk gedrag van de triode | 573 |
| 7.2.4 | Frequentieafhankelijk gedrag van de penthode | 582 |
| 7.3 | Versterking van signalen met lage frequenties..... | 584 |
| 7.4 | Versterking van signalen met hoge frequenties..... | 595 |
| 7.5 | Versterking van signalen met lage en hoge frequenties | 605 |
| 7.6 | De praktijk van frequentieafhankelijk gedrag | 616 |
| 7.6.1 | Het meten van frequentiekenmerken | 616 |
| 7.6.2 | Het toetsen van een praktijksituatie..... | 620 |
| 7.7 | Nabeschouwing | 633 |
| 7.8 | Literatuurlijst hoofdstuk 7 | 636 |
| 8 | NIET-LINEAIRE VERVORMING EN RUIS..... | 637 |
| 8.1 | De klank van elektronenbuizenversterkers..... | 637 |
| 8.2 | Niet-lineaire vervorming die we al gezien hebben..... | 638 |
| 8.3 | Harmonische analyse..... | 640 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 8.4 | Toegepaste harmonische analyse..... | 642 |
| 8.4.1 | Harmonische analyse van de eindtransformator..... | 642 |
| 8.4.2 | Harmonische analyse van elektronenbuizen..... | 644 |
| 8.4.2.1 | Kromming van de steilheidkarakteristiek..... | 644 |
| 8.4.2.2 | Algebraïsche bepaling van de coëfficiënten van de machtreeks..... | 650 |
| 8.4.2.3 | Grafische bepaling van een 2 ^e en een 3 ^e harmonische..... | 656 |
| 8.4.2.4 | Intermodulatievervorming..... | 665 |
| 8.4.3 | Harmonische analyse van passieve onderdelen..... | 668 |
| 8.5 | Remedies tegen niet-lineaire vervorming zonder tegenkoppeling..... | 669 |
| 8.5.1 | De anodeweerstand tegen niet-lineaire vervorming..... | 669 |
| 8.5.2 | De gebalanceerde eindversterker tegen niet-lineaire vervorming..... | 670 |
| 8.6 | De praktijk van niet-lineaire vervorming..... | 672 |
| 8.6.1 | De spectrumanalyser, de zuivere signaalbron en het meten in cascade..... | 672 |
| 8.6.2 | De niet-lineaire vervorming van passieve componenten..... | 676 |
| 8.6.3 | De bepaling van de coëfficiënten van de machtreeks en de 2 ^e en 3 ^e harmonischen..... | 678 |
| 8.6.4 | De invloed van de anodeweerstand op de niet-lineaire vervorming..... | 684 |
| 8.6.5 | De SRPP-basisschakeling versus de kathode basisschakeling..... | 686 |
| 8.6.6 | De cascode basisschakeling versus de penthode basisschakeling..... | 689 |
| 8.6.7 | Gemeten niet-lineaire vervorming van enkele bekende versterkers..... | 690 |
| 8.7 | Nabeschouwing niet-lineaire vervorming..... | 695 |
| 8.8 | Ruis..... | 696 |
| 8.8.1 | Thermische ruis..... | 697 |
| 8.8.2 | Ruis in elektronenbuizen..... | 698 |
| 8.8.3 | Signaal-Ruisverhouding en de Ruisfactor..... | 700 |
| 8.8.4 | Een beetje “ruispraktijk”..... | 701 |
| 8.9 | Literatuurlijst hoofdstuk 8..... | 704 |
| 9 | TEGENKOPPELING..... | 705 |
| 9.1 | Soorten tegenkoppeling..... | 705 |
| 9.1.1 | Parallel-serie tegenkoppeling..... | 705 |
| 9.1.2 | Serie-serie tegenkoppeling..... | 706 |
| 9.1.3 | Parallel-parallel tegenkoppeling..... | 707 |
| 9.1.4 | Serie-parallel tegenkoppeling..... | 707 |
| 9.1.5 | Spanningstegenkoppeling..... | 708 |
| 9.1.6 | Stroomtegenkoppeling..... | 708 |
| 9.1.7 | Eerste samenvatting tegenkoppeling..... | 709 |
| 9.2 | De gevolgen van tegenkoppeling..... | 710 |
| 9.3 | Invloed van tegenkoppeling op versterking, in- en uitgangsimpedantie..... | 712 |
| 9.3.1 | Berekeningen bij parallel-serie tegenkoppeling..... | 712 |
| 9.3.2 | Berekeningen bij serie-serie tegenkoppeling..... | 714 |
| 9.3.3 | Berekeningen bij parallel-parallel tegenkoppeling..... | 715 |
| 9.3.4 | Berekeningen bij serie-parallel tegenkoppeling..... | 717 |
| 9.3.5 | Tweede samenvatting tegenkoppeling..... | 719 |
| 9.4 | Berekeningen aan applicatievoorbeelden..... | 720 |
| 9.5 | Invloed van tegenkoppeling op storende signalen en ruis..... | 732 |
| 9.6 | Invloed van tegenkoppeling op de frequentiekarakteristieken..... | 734 |
| 9.6.1 | Invloed van tegenkoppeling voor lage frequenties..... | 735 |
| 9.6.2 | Invloed van tegenkoppeling voor hoge frequenties..... | 736 |
| 9.6.3 | Invloed van tegenkoppeling voor lage en hoge frequenties..... | 737 |
| 9.6.4 | Invloed van tegenkoppeling voor een cascade van versterkertrappen..... | 738 |
| 9.6.5 | Frequentieonafhankelijk en frequentieafhankelijk tegenkoppeldeel..... | 742 |
| 9.6.6 | Over het ontstaan van een nieuw stukje theorie voor tegenkoppeling..... | 744 |
| 9.6.7 | Stabiliteit en het Nyquistdiagram..... | 750 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 9.7 | Tegenkoppeling tussen eindbuizen en eindtransformator | 753 |
| 9.8 | Invloed van de klank door tegenkoppeling..... | 755 |
| 9.9 | De praktijk van tegenkoppeling..... | 755 |
| 9.9.1 | De praktische testschakelingen..... | 755 |
| 9.9.2 | De tegengekoppelde versterking als functie van de tegenkoppelfactor | 759 |
| 9.9.3 | De kantelpunten als functie van de tegenkoppelfactor..... | 761 |
| 9.9.4 | De harmonische vervorming visueel als functie van de tegenkoppelfactor | 762 |
| 9.9.5 | De harmonischen als functie van het uitgangsvermogen versus tegenkoppeling | 764 |
| 9.9.6 | De THD als functie van de tegenkoppeling mathematisch | 767 |
| 9.9.7 | Het reduceren van nuldoorgangvervorming voor gebalanceerd klasse B | 768 |
| 9.10 | Literatuurlijst hoofdstuk 9 | 770 |
| 10 | HET BOUWEN VAN ELEKTRONENBUIZENVERSTERKERS | 771 |
| 10.1 | Inleiding..... | 771 |
| 10.2 | Elektronicamaterialen..... | 771 |
| 10.3 | Verbindings- en montage materialen..... | 772 |
| 10.4 | Elektrotechnische bouwtechnieken | 777 |
| 10.4.1 | Bouwen met onderdelenstrips | 777 |
| 10.4.2 | Bouwen in de lucht..... | 780 |
| 10.4.3 | Bouwen op experimenteerprint | 782 |
| 10.4.4 | Bouwen met printen met gedrukte bedrading..... | 785 |
| 10.5 | Proefopstellingen..... | 786 |
| 10.6 | ElektroMagnetische Compatibiliteit (EMC) | 787 |
| 10.6.1 | Overspraak..... | 788 |
| 10.6.2 | Voedingsdistributie..... | 792 |
| 10.6.3 | Aarding | 793 |
| 10.6.4 | Afscherming | 793 |
| 10.7 | Veiligheid | 793 |
| 10.8 | Koeling | 794 |
| 10.9 | Leveranciers voor onderdelen en kennis | 795 |
| 10.10 | Ontwerpstrategie..... | 796 |
| 10.11 | Literatuurlijst hoofdstuk 10 | 799 |
| | Trefwoordenregister | 800 |