



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA  
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

# **KANDIDAATINTYÖ**

## **KATSAUS PUTKIVAHVISTINTA KÄSITTELEVÄÄN KIRJALLISUUTEEN**

Tekijä

Selma Nikula

Ohjaaja

Anssi Mäkynen

Helmikuu 2022

**Nikula S. (2022) Katsaus putkivahvistinta käsittelevään kirjallisuuteen.** Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektronikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 29 s.

## **TIIVISTELMÄ**

Työssä perehdytään putkivahvistimia käsittelevään kirjallisuuteen ja muihin lähdemateriaaleihin. Työn tavoitteena on selvittää, mitkä lähteet soveltuvat parhaiten putkivahvistimien perusteiden oppimateriaaliksi. Lisäksi työssä esitellään perusteet putkivahvistimista sekä tutustutetaan lukija pikaisesti yhteen putkivahvistin tyyppiin nimeltään SE/84 Brachycera 2.0 eli Kärpänen. Työtä kirjoittaessa havaittiin, että yhtä hyvää materiaalia aiheen opiskeluun ei liene olemassakaan. Eri aineistot keskittyvät eri näkökulmiin ja erityyppisiin vahvistimiin, joten opiskelumateriaalin valinta määräytyy pitkälti tarpeen perusteella ja siksi on mahdotonta löytää yhtä oikeaa ja hyvää materiaalia.

**Avainsanat:** putkivahvistin, radioputkitekniikka, kirjallisuuskatsaus, putkivahvistin kirjallisuus.

**Nikula S. (2022) Review of the literature about valve amplifiers.** University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 29 p.

## **ABSTRACT**

**The purpose of this document is to explore literature and other kinds of materials that covers information about the valve amplifiers. The goal is to find out convenient materials to study about valve amplifiers. From this document the reader gets also basic knowledge about valve amplifiers and gets a quick introduction to a valve amplifier example called SE/84 Brachycera 2.0. When writing this paper, it was noticed that there is no such material that would be perfect to study everything about valve amplifiers. Different materials concentrate on different point of views and different kinds of amplifiers so choosing the material depends mainly on the purpose and needs. That is why it is impossible to find the source which covers the topic conveniently.**

**Key words: valve amplifier, tube amplifier, review of literature, valve technology, valve amplifier literature, valve technology literature.**

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO .....	5
ALKULAUSE.....	6
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET.....	7
1 JOHDANTO .....	8
2 PUTKIVAHVISTIN .....	9
2.1 Putkitekniikan perusteet .....	9
2.2 Yleistä putkivahvistimista .....	10
2.3 Perusteet .....	11
2.4 SE/84 Brachycera 2.0 .....	12
3 KIRJALLISUUTTA PUTKIVAHVISTIMESTA .....	14
3.1 <i>Valve Amplifiers</i> , Jones Morgan.....	14
3.1.1 Teoriapohja .....	15
3.1.2 Perusteet .....	15
3.1.3 Särö.....	16
3.1.4 Komponenttien valinta .....	17
3.1.5 Teholähteet .....	18
3.1.6 Tehovahvistin .....	18
3.1.7 Esivahvistin .....	19
3.2 Diplomityö: <i>Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi</i> , Tomi Kettunen.....	19
3.3 Erikoistyö: <i>Putkitekniikan perusteet</i> , Tomi Kettunen.....	20
3.4 Materiaalien vertailua.....	21
4 POHDINTA.....	23
5 YHTEENVETO.....	24
6 LÄHDELUETTELO .....	25
7 LIITELUETTELO .....	26

## ALKULAUSE

Kandidaatin työn aihe valikoitui osin yllätyksenä allekirjoittaneelle, sillä minulla ei ollut etukäteen minkäänlaista ideaa työni aiheesta. Putkivahvistin tuntui kuitenkin melko luontevalta valinnalta, sillä musiikki on aina ollut lähellä sydäntäni ja putkivahvistin on suosittu vahvistin musiikin alalla. Itselläni ei ole käytännön kokemusta vahvistimista ylipäänsä, mutta ehkäpä juuri siksi tuntuikin sopivalta perehtyä aiheeseen teoriassa.

Haluan kiittää ohjaajaani Anssi Mäkystä hyvästä ohjauksesta, jossa koin saavani mukavasti vapautta toteuttaa työ parhaaksi kokemallani tavalla, mutta sain myös riittävästi ohjausta ja tukea. Lisäksi vanhempani ansaitsevat ison kiitoksen siitä, että saivat minut vakuuttumaan, ettei työ ole mahdoton työmaa, vaikka se välillä etukäteen ajatellen tuntuikin sellaiselta.

Oulussa 28.3.2022

Selma Nikula

## LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

AC	vaihtovirta
FFT	Fourier-muunnos
DC	tasavirta
ESR	ekvivalentti sarjaresistanssi
RIAA	the Recording Industry Association of America
LC	kela – kondensaattori -liitos
$\phi$	irrotustyö
eV	elektronivoltti
°C	astetta Celsiusta
mA/cm <sup>2</sup>	milliampeeria neliösenttimetriä kohden
$R_L$	kuormaresistanssi
$A_v$	jännitevahvistus
$\Delta V_a$	anodijännitteen muutos
$\Delta V_g$	hilajännitteen muutos
W	Watti (tehon yksikkö)
$\mu$	vahvistuserroin
$g_m$	keskinäinen konduktanssi

# 1 JOHDANTO

Nykypäivänä äänitekniikkaa löytyy kaikkialta. Käytämme päivittäin kuulokkeita ja kaiuttimia musiikin ja muiden äänten toistamiseen. Meiltä jokaiselta löytyy todennäköisesti kotoa ainakin jonkinlainen äänentoistolaite, useimmilta niitä löytyy lukuisia. Kuulokkeiden ja kaiuttimien lisäksi äänitekniikkaa on muun muassa puhelimissa, tietokoneissa ja myös lasten leluissa. Sitä löytyy paikoista, joissa sitä ei tule ajatelleeksi olevan. Esimerkiksi digitaalinen kuumemittari hälyttää mittauksen päättymisen merkiksi. Ääni tuotetaan äänitekniikan avulla.

Äänitekniikan keskeinen elementti on vahvistaminen. Jotta ääni saadaan kuultavaan muotoon ja sille saadaan halutut ominaisuudet, tarvitaan jokin keino vahvistaa äänialtoja halutulla tavalla. Kiistellysti onkin väitetty, että vahvistaminen olisi yksi elektroniikan tärkeimmistä sovelluksista [1]. Vahvistamista käytetään toki muuallakin kuin äänitekniikassa, mutta tässä työssä tarkastellaan vahvistamista lähinnä äänitekniikan näkökulmasta.

Putkivahvistimet olivat aikanaan mullistava keksintö tekniikan saralla, mutta sittemmin niiden käyttö on vähentynyt huomattavasti, kun uudemmat ja paremmat vahvistinsovellutukset ovat korvanneet ne. Putkivahvistimia käytetään kuitenkin edelleen etenkin harrastelija piireissä. Muun muassa musiikkialalla, ne ovat säilyttäneet suosionsa, sillä monet ajattelevat putkivahvistimien toimivan paremmin soitinten vahvistukseen. [2]

Vahvistamisen tärkeyden vuoksi, on hyvä ymmärtää perusteet eri tavoista vahvistaa signaaleja. Tämä työn tavoitteena on etsiä ja esitellä muutama lähdemateriaali, jotka voisivat soveltua putkivahvistimien itseopiskelumateriaaliksi. Työssä käydään läpi kolme lähdemateriaalia ja pohditaan niiden etuja ja heikkouksia opiskelun näkökulmasta. Samalla esitellään putkivahvistimien perusteet. Työ on jaettu karkeasti kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa perehdytään putkivahvistimen perusteisiin sekä tutustutaan pintapuolisesti SE/84 Brachycera 2.0 putkivahvistimeen, toisessa osassa esitellään kolme aiheesta kertovaa materiaalia ja viimeisessä osassa pohditaan esiteltyjen materiaalien soveltuvuutta opiskelumateriaaliksi.



## 2 PUTKIVAHVISTIN

Seuraavassa luvussa käydään tarkemmin läpi putkivahvistimen teoriaa. Aluksi perehdytään radioputkitekniikan perusteisiin, jonka jälkeen käydään läpi hieman yleistietoa putkivahvistimista ja sen jälkeen teorian perusteet. Lopuksi esitellään esimerkkiputkivahvistin SE/84 Brachycera 2.0.

### 2.1 Putkitekniikan perusteet

Putkivahvistimen toiminta perustuu putkitekniikkaan, joka elektroniikassa tarkoittaa tekniikkaa, joka perustuu elektronien liikkeeseen tyhjiössä tai matalapaineisessa kaasussa. Tällainen matalapaineinen tila on yleensä luotu lasiputken sisälle. [3] Putkea kutsutaan yleisesti nimillä tyhjiöputki tai elektroniputki ja se on aktiivinen komponentti, jonka toiminta perustuu tyhjiössä kulkeviin elektroneihin tai kaasussa kulkeviin ioneihin [4]. Putkessa sijaistaa elektroneja emittoiva osa ja osa, johon elektronit liikkuvat sähkö- ja magneettikentän vaikutuksesta. Putken toiminta perustuu emissioon aineesta, elektronien liikkeeseen sähkö- ja magneettikentässä, väliaineen aiheuttamaan vaikutukseen elektroninen liikkeissä ja elektronien toisiinsa aiheuttamaan yhteisvaikutukseen. [3]

Emissiota on neljää eri tyyppiä. Ne kaikki perustuvat sille perusidealle, että kun johdinelektronille annetaan riittävä määrä energiaa, elektroni voi paeta aineen pinnasta. Emissiotyypit ovat lämpöemissio, sekundäärinen emissio, valosähköinen emissio ja sähkökentän aiheuttama emissio. Näistä tyypeistä yleisimpien putkien toimintaan liittyvät eniten lämpöemissio ja sekundäärinen emissio. Lämpöemissio syntyy, kun materiaalia kuumennetaan riittävän kuumaksi. Sekundäärinen emissio mahdollistuu siten, että materiaaliin törmää riittävän suurienergisiä hiukkasia esimerkiksi elektroneja tai positiivisia ioneja. Putkessa tämä tapahtuu anodilla. Valosähköisessä emissiossa energiaa annetaan esimerkiksi valosäteilyllä ja sähkökentän aiheuttamassa emissiossa energia saadaan hyvin suuresta ulkoisesta sähkökentästä. [3]

Matalapaineinen kaasu vaikuttaa elektronien liikkeeseen. Ilmiö perustuu kaasujen kineettiseen teoriaan, jonka mukaan kaasun ajatellaan muodostuvan pienistä hiukkasista tai molekyyleistä. Molekyylit ovat kuitenkin niin pieniä, että ne täyttävät vain pienen osan kaasun tilavuudesta ja näin ollen loppuosa on tyhjää mahdollistaen kaasumolekyylien satunnaista liikkumista. Kaasun paine muodostuu molekyylien törmäilystä toisiinsa ja tilan seinämiin ja siksi elektronien vapaan liikkuvuuden takaamiseksi paineen on oltava mahdollisimman matala, sillä elektronin ja kaasumolekyylin yhteentörmäyksessä elektroni voi vaihtaa suuntaansa, ionisoitua tai emittoitua. Nämä kaikki ovat putken toiminnan kannalta ei-toivottuja ilmiöitä, joten matalalla paineella pyritään minimoimaan niiden tapahtuminen. [3]

Radioputki muodostuu kolmesta eri osasta, katodista, hilasta ja anodista. Elektronit emittoituvat katodilta riittävän kuumenemisen eli hehkutuksen seurauksena. Sähkövirta syntyy siten, että katodin läheisyyteen sijoitetaan katodia positiivisemmassa jännitteessä oleva anodi, joka sähkökentän vuoksi vetää katodilla olevia elektroneja puoleensa. Katodin on tärkeää olla sellaista materiaalia, jolla on mahdollisimman pieni irrotustyö, pitkä käyttöikä ja hehkutusta ajatellen riittävän korkea lämmönsietokyky. Alla olevassa taulukossa esitellään kolme yleisintä katodimateriaalia sekä niiden tärkeimmät ominaisuudet. [3]

Taulukko 1. Eri katodimateriaaleja [3 s. 8]

Materiaali	Irrotustyö $\phi$ (eV)	Käyttölämpötila (°C)	Emissiovirta (mA/cm <sup>2</sup> )
Volframi	4.56	2200	300
Torioitu volframi	2.8	1400	3000
Katodioksidi	0.95	750	250

Katodia voidaan hehkuttaa suoraan tai epäsuorasti. Suorassa hehkutuksessa katodina toimii hehkutettava hehkulanka eli filamentti ja epäsuorassa hehkutuksessa kuumennus suoritetaan katodin sisälle rakennetun erillisen hehkulangan avulla. [3]

Ohjaushilan tarkoitus on mahdollistaa anodivirtaan vaikuttaminen hilajännitteen avulla. Hila vaikuttaa katodilla olevien elektronien liikkeeseen ja siksi se toimii tehokkaammin, mitä lähempänä se on katodia, sillä katodin läheisyydessä elektronien nopeus ei ole vielä kovin suuri ja niihin vaikuttaminen on näin ollen helpompaa. Hiloja voi olla useampia ja niillä pyritään vaikuttamaan putken eri ominaisuuksiin. Esimerkiksi suojahilaa käytetään minimoimaan hajakapasitansseja ja jarruhila estää sekundäärisen emission aiheuttamien elektronien kulun suojahilalle. [3]

Anodi on yleensä se, jonne elektronit päätyvät putkessa. Tavallisesti anodi on korkein potentiaali, sillä elektronit suuntaavat katodilta kohti korkeinta potentiaalia. Koska elektronien törmäminen anodiin aiheuttaa anodin kuumenemisen, on tärkeää, että anodi kestää korkeita lämpötiloja. Jos lämpötila kasvaa yli anodin kestämän rajan, seuraa kaasun purkautuminen ja putken tyhjiö pilaantuu. Lisäksi liian kuuma anodi voi aiheuttaa sekundääristä emissiota esimerkiksi ohjaushilalla. Sitä voi syntyä myös, jos anodiin törmäävät elektronit omaavat liian suuren nopeuden. [3]

Emme tässä mene syvemmin eri putkityyppeihin, mutta ne on esitelty Tomi Kettusen erikoistyössä *Putkitekniikan perusteet*.

## 2.2 Yleistä putkivahvistimista

Putkivahvistin on radioputken perustuva vahvistin. Radioputken yleisin käyttösovellus onkin nimenomaan vahvistimet [5]. Putkivahvistin perustuu tekniikalle, joka on pysynyt suurin piirtein samana yli sata vuotta, sen keksimisestä asti. [2] Radioputken käyttö vahvistimena sai alkunsa 1904 englantilaisen Ambrose Flemingin kehittäessä radiosignaalien ilmaisemiseen tarkoitettua ensimmäistä elektroniputken, diodin. Kehitys jatkui pari vuotta myöhemmin, kun vuonna 1906 amerikkalainen Lee De Forest lisäsi diodiin kolmannen elektrodin. Tämä elektrodi toimi hilana. Hilan lisääminen mahdollisti radioputken käyttämisen radiosignaalien vahvistamiseen. [6]

Radioputkiin perustuvat vahvistimet olivat varsin monipuolisia ja niitä voitiin käyttää monessa. Ne eivät olleet merkittäviä pelkästään radiotekniikassa vaan niitä käytettiin lisäksi myös tutkissa, puhelimissa, alkeellisissa tietokoneissa ja ensimmäisissä televisioissa. Niiden käyttöä kuitenkin rajoittivat merkittävästi niiden suuri koko, tehonkulutus ja se, että ne vikaantuvat herkästi. [4] Kun transistorivahvistin keksittiin, putkivahvistimet joutuivat syrjään lähes kaikilla aloilla.

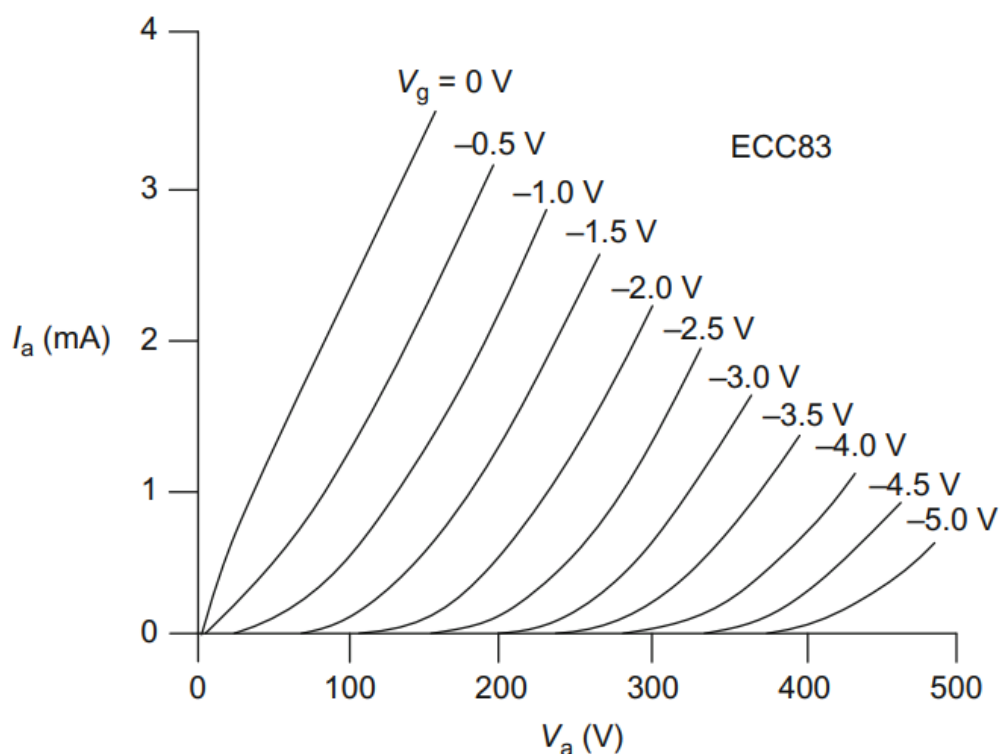
Nykyisin putkivahvistimen yleisimpiä käyttäjiä lienee musiikin harrastajat. Alun perin putkivahvistin oli ainoa olemassa oleva vahvistustekniikka, mutta kun transistoriin perustuvat vahvistimet syrjäyttivät putkivahvistimet lähes kaikilla muilla aloilla, musiikinalalla näin ei käynyt. Syynä tähän oli muun muassa se, että transistorivahvistinten tuottama ääni on

ihmiskorvaan kylmän ja ohuen kuuloista, ja tätä ongelmaa ei putkivahvistimissa ole, sillä putkien särö on pehmeämpää. Lisäksi ne kestävät paremmin hetkellistä ylikuormitusta, jolloin hankalat piikit jännitteessä voivat jäädä pois putkivahvistimen vahvistamasta ihmisen kuulemasta äänisignaalista. [2], [7]

Radioputkeen perustuvien audiovahvistinten rakentaminen on päässyt suosioon hifi- ja elektroniikkaharrastajien keskuudessa, sillä ne ovat melko helppoja rakennettavia ja internetistä löytyy valmiita rakennussarjoja, piirilevyjä ja kytkentäkaavioita [7]. Helpon rakennettavuuden lisäksi putkivahvistimia on melko helppo korjata toisin kuin monia nykypäivän kulutuselektroniikan laitteita [8].

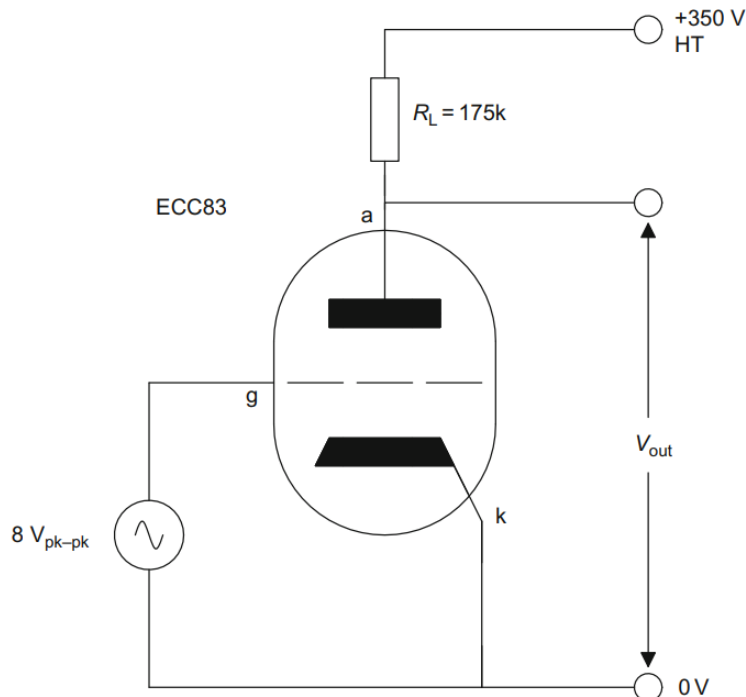
### 2.3 Perusteet

Putkivahvistinta käytettäessä on tiedettävä, miten putki valitaan ja biasoidaan siten, että vahvistus on lineaarinen ja särö on minimaalinen. Biasoinnin apuna käytetään usein anodin ominaiskäyrää, josta nähdään anodivirta anodijännitteen funktiona katodijännitteen eri arvoilla. Käytetään esimerkkinä triodiputkivahvistinta, jonka anodiominaiskäyrä on esitetty kuvassa 1. [5]



Kuva 1. Triodin anodiominaiskäyrä.

Tavallisella vahvistinasteella anodilla on kuormaresistanssi  $R_L$  kytkettynä anodin ja korkeajännitelähteen välille. Korkeajännitelähdettä pidetään nolla resistanssisena kaikilla taajuuksilla. Anodin olosuhteita voidaan säätää lisäämällä tulojännite hilan ja katodin välille. [5]



Kuva 2. Katodiputkivahvistimen rakenne.

Kuvassa 2 näkyy esimerkki katodiputkivahvistimen rakenteesta. Lisäämällä hilalle vielä kondensaattori ja vastus, voidaan estää edellisen asteen tasavirran vaikutus hilan biasointiin. [5]

Kun halutaan tarkastella vahvistimen ominaisuuksia, yleensä selvitetään ensimmäisenä jännitevahvistus  $A_v$ . Se saadaan laskemalla

$$A_v = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}, \quad (1)$$

missä  $\Delta V_a$  on anodijännitteen muutos ja  $\Delta V_g$  hilajännitteen muutos [5].

Putkivahvistimien toinen huomioitava ominaisuus on säröytymättömän jännitteen suurin mahdollinen arvo. On huomioitava, että positiivinen ja negatiivinen jännite voivat säröytyä eri arvoilla, joten merkittävä on se arvo, jolla särö alkaa ensimmäisenä. Maksimijännitteen arvoon voidaan vaikuttaa toimintapisteen arvolla tai kuormavastuksen ja/tai korkeajännitelähteen arvolla. [5]

## 2.4 SE/84 Brachycera 2.0

SE/84 Brachycera 2.0, suomenkieliseltä lempinimeltään ”Kärpänen” on kaksiasteinen putkivahvistin, joka on erityisesti harrastajien suosima. Kutsumanimi Kärpänen on suora käänös sanasta brachycera, joka on kärpälajin tieteellinen nimi. [9] Kärpänen on melko edullinen yleisluontoinen vahvistin, joka soveltuu moneen käyttöön, mutta sen pienehkön tehon (noin 2 W) vuoksi käyttökohteet ovat rajoittuneet. [9] Pienestä tehosta huolimatta Kärpänen kelpaisi vaativaankin kuunteluun ainakin työpöytäkäytössä [10].

Kärpäsen ensimmäinen aste käyttää ECC81-kaksoistriodista yhden puolikkaan yhtä kanavaa kohden. Ensimmäinen aste toimii samalla tulo- ja jännitevahvistinasteena. Tätä seuraa

tehovahvistinaste triodiksi kytketyllä EL84-putkella toteutettuna. Pääteaste katoditakaisinkytketään eli päätemuuntajan toisto kytketään pääteasteen katodille. Kytkentä alentaa hieman vahvistimen säröä ja lähtöimpedanssia. Virtalähde kytketään vahvistimeen kahden kondensaattorin ja yhden kelan läpi siten, että kela on kondensaattoreiden välissä. [10] Kärpäsän kytkentäkaaviot ja käytettävien komponenttien tiedot löytyvät liitteistä. (Liite 1)

Internetistä löytää kyseisen vahvistimen rakennussarjoja ja myös ohjeita sen kokoamiseen. Tieteellisesti luotettavan materiaalin löytäminen on kuitenkin haastavaa, sillä iso osa informaatiosta löytyy ainoastaan asiasta kiinnostuneiden keskustelupalstoilta. Alan harrastajien mielipiteitä ei kuitenkaan kannata täysin sivuuttaa, sillä niistä saa usein varsin luotettavaa informaatiota tai ainakin hyviä vinkkejä. Täytyy vain muistaa kriittisyys niitä tarkasteltaessa.

### 3 KIRJALLISUUTTA PUTKIVAHVISTIMESTA

Putkivahvistimista on kirjoitettu etenkin viime vuosina melko vähän, joten niistä kiinnostuneen voi olla vaikeaa löytää ajankohtaista ja luotettavaa tietoa aiheesta. Internetistä löytyvä materiaali on rajallista ja iso osa julkaisuista on jo melko vanhoja. Tietoa löytyy sieltä täältä, mutta lähdettä, jossa kerrottaisiin putkivahvistimen perusteista johdonmukaisesti yhdessä paikassa, on vaikeaa löytää. Tämän työn yksi tavoite on etsiä ja esitellä aiheesta kertovia lähteitä sekä arvioida niiden soveltuvuutta oppimateriaaliksi.

Joitakin hyviä lähdemateriaaleja kuitenkin löytyy. Vuonna 2012 julkaistu Morgan Jonesin kirjoittama kirja *Valve Amplifiers* kertoo melko kattavasti putkivahvistimista. Suomen kielellä aiheesta voi lukea muun muassa Tomi Kettusen vuonna 2008 tekemästä diplomityöstä *Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi*. Myös Aleksis Pehkorannan tutkintotyö *Putkivahvistin* toimii lähdemateriaalina, mutta työ keskittyy tarkastelemaan putkivahvistinta lähinnä suunnittelun näkökulmasta ja on melko suppea, joten aloittelijalle se ei ole niin hyvä materiaali kuin vaikkapa *Valve Amplifiers* -kirja.

Jotta voisi ymmärtää putkivahvistimen toimintaa, on hyvä perehtyä ensin tarkemmin radioputkeen ja vahvistamiseen yleensä. Vahvistamisen teoriaa kerrotaan Kasperin Raution Turun ammattikorkeakoululle tekemässä opinnäytetyössä *A-luokan kuulokevahvistin* (2016). Raution opinnäytetyö voisi toimia hyvänä taustalukemisenä pohjatietoa vailla olevalle asiasta kiinnostuneelle lukijalle. Itse putkivahvistimesta opinnäytetyössä ei puhuta paljoa, joten jos vahvistamisen perusteet ovat hallussa, lienee järkevää keskittyä lähteisiin, joissa käsitellään nimenomaan itse putkivahvistinta.

Kaiken kaikkiaan havaitaan, että suomen kielellä lähdemateriaalit ovat pitkälti opinnäyte- ja diplomitöitä, joiden lähteinä on käytetty englanninkielisiä alkuperäislähteitä. Nämä työt toimivat hyvinä tiedon kokoajina ja mahdollistavat aiheen opiskelun suomeksi. Kuitenkin, jos aiheeseen haluaa perehtyä syvemmin, on helpointa vaihtaa opiskelukieli englanniksi, sillä suuri osa lähdemateriaalista löytyy nimenomaan englannin kielellä.

Kirjallisuuskatsausta varten valittiin muutama aiheesta kertova teos, jotka voisivat soveltua itseopiskeluun. Seuraavaksi niitä käydään tarkemmin läpi. Aluksi esitellään kunkin lähteen sisältö tiivistelmänä ja seuraavassa luvussa pohditaan niiden soveltuvuutta opiskelumateriaaliksi sekä vertaillaan niitä keskenään.

#### 3.1 *Valve Amplifiers*, Jones Morgan

Jones Morganin kirjassa *Valve Amplifiers* perehdytään putkivahvistimien suunnitteluun ja rakentamiseen. Teoksessa käydään myös läpi algebran ja fysiikan perusteita sekä tavallisimpia aiheeseen liittyviä matemaattisia symboleita aihetta pohjustamaan. Kirjasta löytyy kattava sanahakemisto, josta voi olla hyötyä etsittäessä tietoa tietyistä ilmiöistä tai asiasta.

Kirjan kerronta on helposti ymmärrettävää ja teorioita pohjustetaan käytännön esimerkeillä. Se soveltuu hyvin radioputkitekniikan alkeita opettelevalle, sillä teoksessa esitetään varsinaisen aiheen lisäksi lukijan tarvitsemat esitiedot. Teoriapohjustus sijoittuu ensimmäiseen lukuun, joka on helppoa jättää väliin, jos lukijana on perusteet osaava henkilö. Varsinaisen aiheen käsittely alkaa siis vasta luvusta kaksi. Analyseissä käytetään sekä graafisia että algebrallisia tekniikoita, sillä niiden käyttö on nopeaa ja teoreettiset tulokset vastaavat hyvin käytännötilanteita [5].

### 3.1.1 Teoriapohja

Teoksen ensimmäisessä luvussa käsitellään alkeishiukkasten sähkövarauksia ja tuodaan esiin käytännön esimerkki, jossa tämä näkyy. Esimerkki auttaa lukijaa ymmärtämään käytännötasolla käsiteltävää ilmiötä. Esimerkin myötä lukija johdatellaan sähköisten piirien perusteisiin ja sähköopin keskeisiin lakeihin sekä erilaisiin komponentteihin ja niiden perusteisiin. Luvun lopussa perehdytään puolijohteisiin, sillä ne ovat keskeisessä asemassa nykyisissä putkivahvistimissa. Kirjan ensimmäisen luvun loppuosa on omistettu erilaisille vahvistintyypeille. Ensimmäinen luku toimii teoreettisena pohjana putkivahvistinten opiskeluun, mutta lukija, jolla nämä pohjatiedot jo ovat voinee huoletta jättää ensimmäisen luvun lukematta. [5]

### 3.1.2 Perusteet

Luvussa kaksi keskitytään pääasiassa triodiputken toimintapisteen valintaan sekä siihen, mitä vaikutuksia näiden valinnalla on AC-toiminnan kannalta. Putkivahvistimen onnistunut biasointi on tärkeää, jotta saavutettaisiin lineaarinen vahvistus, jonka särö on minimoitu [5]. Morgan esittelee menetelmän käyttäen esimerkkinä ECC83/12AX7 tyyppistä kaksitriodista tyhjiöputkea. Biasoinnin apuna käytetään anodin ominaiskäyrää, josta saadaan tarvittava informaatio kuormitussuoraa hyödyntäen. Tekniikka esitellään teoksessa. Lisäksi teoksessa esitellään putkivahvistinkytkentöihin liittyvien komponenttien arvojen valinnat sekä se, mihin komponentteja tarvitaan ja miten niiden arvot vaikuttavat kytkennässä. Morgan kertoo myös, mikä merkitys on jännitteen raja-arvoilla putkivahvistimen kestävyydelle.

Morgan selittää operaatiopisteiden merkityksen putkivahvistimen ominaisuuksiin. Biaspisteen valinnalla voidaan vaikuttaa signaalin lineaarisuuteen ja maksimijännitteen vaihteluun. Vahvistuksen sekä anodiresistanssin laskemiseen esitellään kaavat. Huomataan, että laskennassa tarvitaan lisäksi vahvistuserroin  $\mu$  ja keskinäinen konduktanssi  $g_m$ . [5]

Kun biaspiste ja komponentit arvoineen on määritelty, siirrytään pohtimaan käytännönratkaisuja laskettujen ominaisuuksien saavuttamiseen. Biasjännitteen jännitelähde täytyy määrittää. Morgan esittelee eri tapoja jännitteen tuottamiseksi.

Kaikkien arvojen määrittelyn jälkeen, täytyy putkivahvistimen oikea toiminta vielä todeta. Morgan esittelee tähän laskennalliset kaavat sekä ohjeistaa, mitä tehdä, jos tulos ei olekaan tyydyttävä. Tulosta voi säätää joko valitsemalla uuden anodikuormavastuksen arvon, kokeilemalla eri operaatiopistettä tai vaihtamalla radioputkea.

Vahvistimen toimintaan eivät vaikuta pelkästään siihen asetetut komponentit, vaan myös ei-halutut ominaisuudet, joista yksi on Miller-kapasitanssi. Luvussa kaksi kerrotaan, mikä Miller-kapasitanssi on, sekä esitellään tapoja vähentää sen vaikutuksia vahvistimen toimintaan. Tavoista yksi esitellään tarkemmin, muut mainitaan lähinnä yleisluontoisesti.

Seuraavaksi luvussa esitellään tarkemmin eri vahvistintyyppejä, kuten tetrodit (*tetrode*), pentodi (*pentode*), kaskadi (*cascode*), varausvahvistin (*charge amplifier*) sekä katodiseuraaja ja monia muita. Vahvistimista esitellään muun muassa kytkentäkaavioita, ominaiskäyriä sekä tärkeimpien ominaisuuksien laskentakaavoja.

Kun eri vahvistintyypit on esitelty, keskitytään niiden yhteisiin piirteisiin. Morgan esittelee vahvistimien lähteen ja nielun. Lähteeltä tulee vahvistimelle kuorman kautta päätyvä energia ja nielu puolestaan ohjaa ulkopuolisen energialähteen ominaisuuksia [5].

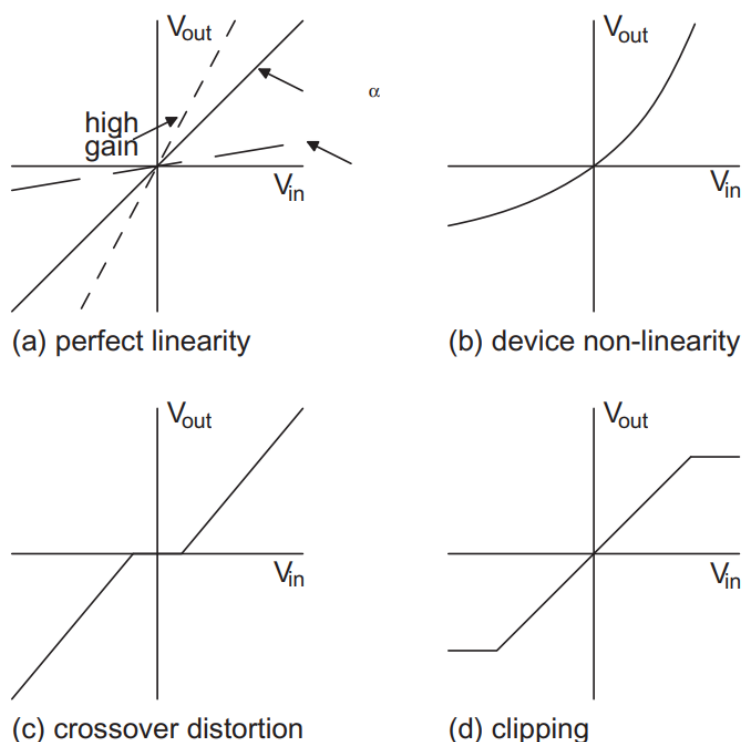
Luvun alkuosa keskittyy sellaisiin vahvistimiin, joissa on vain yksi ulostulo. On kuitenkin muistettava, että joissakin vahvistinsovelluksissa ulostuloja on kaksi. Tällaiset vahvistimet ovat

differentiaalivahvistimia. Kahden ulostulon lisäksi niissä on myös kaksi sisääntuloa ja vahvistus on ulostulosignaalien erotus. Differentiaaliparin muodostamiseen voidaan käyttää kahta tavallista katodi-triodi vahvistinta tai kaskadivahvistinta. [5] Morgan käyttää differentiaalisen parin analysoimiseen esimerkkinä tavallista katodi-triodi vahvistinta.

Vaikka nykypäivänä transistorivahvistimet ovat pääasiallisesti korvanneet putkivahvistimet, on olemassa sovellutuksia, joissa noita molempia käytetään. Transistoria voidaan käyttää aktiivisena kuormana radioputkelle ja näin voidaan vähentää säröä. [5] Morgan esittää kirjassaan esimerkin tällaisesta kytkennästä, sekä avaa hieman sen toimintaa teoreettisesti. Teoksessa esitetään transistorille myös muita käyttötarkoituksia putkivahvistinkytkennöissä. Niitä käytetään esimerkiksi vahvistimen lähteinä ja Morgan esitteleekin muutamia putkivahvistinkytkentöjä, joissa lähteenä on käytetty transistoria.

### 3.1.3 Särö

Luvussa kolme syvennyttään radioputken dynaamiseen alueeseen. Se on suurimman ja pienimmän signaalin välinen alue [5]. Luvussa keskitytään tutkimaan, miten putkivahvistimen särö voitaisiin minimoida. Jotta särö osattaisiin minimoida, täytyy ymmärtää sen perusteet. Erityyppiset vasteet aiheuttavat erilaista säröä. Morgan esittelee lineaarisen ja epälineaarisen vasteen aiheuttaman särön. Lineaarinen vaste nimensä mukaan on lineaarinen, eikä siis riipu signaalin amplitudista, kuten epälineaarinen vaste [5]. Kirjasta löytyy molemmista havainnollistava kaaviokuva, jossa lineaarisen ja epälineaarisen vasteen lisäksi esitetään myös ylimenosärö, sekä signaalin leikkautumisesta aiheutuva särö. Nämä on esitetty kuvassa 3 [5].



Kuva 3. Särön aiheuttajat kirjasta *Valve Amplifiers*.

Joskus on tarpeen muuttaa analoginen signaali digitaaliseksi (tai toisin päin). Kirjassa esitellään, miten tämä muutos voidaan suorittaa. Prosessi jaetaan karkeasti kahteen vaiheeseen,



näytteistykseen ja analogia – digitaalinen -muunnokseen [5]. Molemmat vaiheet ja niiden tarkemmat työvaiheet esitellään kirjassa. Kun analoginen signaali on muunnettu digitaaliseen muotoon, sitä voidaan tarkemmin analysoida esimerkiksi Fourier-muunnoksen (FFT) avulla. Morgan esittelee Fourier-muunnoksen tuomia analysointimahdollisuuksia kirjassaan.

Kun perusymmärrys säröstä on saatu, luvussa siirrytään tutkimaan, miten särö saadaan minimoitua. Aluksi esitellään syitä, mistä säröt muun muassa voivat johtua ja sitten ohjeistetaan, millä eri keinoilla voidaan vaikuttaa säröön.

Seuraavaksi keskitytään DC-biasointitapoihin ja niiden mahdollisiin haasteisiin. Biasointi voidaan suorittaa monin eri tavoin. On olemassa katodivastusbiasointi, lähdebiasointi ja katodibiasointi joko ladattavalla paristolla, diodilla tai vakiovirtanelulla. Kuitenkaan pelkästään hyvin valitut anodiominaisuudet eivät takaa, että särö olisi pienin mahdollinen, vaan lopulliseen tulokseen päästäkseen on suunniteltava sellainen radioputki, jonka särö on mahdollisimman pieni [5]. Morgan esittelee joitakin radioputkia, jotka soveltuvat hyvin sellaiseen käyttötarkoitukseen, jossa särön minimoiminen on tärkeää. Lisäksi Morgan esittelee myös testimenetelmät, joilla säröä voidaan mitata.

Särö voi syntyä myös siinä vaiheessa, kun eri asteet halutaan yhdistää toisiinsa kapasitiivisesti. Teoreettisesti täydellinen kondensaattori ei aiheuta säröä, mutta se voi silti pahentaa jo syntynyttä säröä. Kirjassa esitellään eri tapoja tämän ilmiön haittojen minimoimiseen. Yksi merkittävä keino on negatiivinen takaisinkytkentä, sillä se vähentää säröä. Menetelmä ei kuitenkaan ole ongelmaton ja siitä väitellään runsaasti. [5]

### **3.1.4 Komponenttien valinta**

Piirin komponenttien onnistunut valinta on tärkeää, koska komponenttien täytyy täyttää käyttötarkoituksensa vaatimukset, mutta toisaalta niiden ei kannata olla liian hyviä, sillä se on resurssien ja rahan tuhlaamista. Täytyy siis löytää sellaiset ominaisuudet, jotka ovat riittävät, mutta eivät vaatimuksia paremmat. [5] Morganin kirjan neljäs luku keskittyy komponenttien oikeaoppiseen valintaan.

Luvussa käydään läpi komponenttikomponentilta sen ominaisuuksien vaikutukset piirissä. Vastuksella tärkeää on huomioida toleranssi, lämmönsietokyky sekä jännite- ja teholuokitus. Kondensaattorin kohdalla huomioitavat ominaisuudet ovat jännitetaso, kapasitanssi, lämmönsieto, ESR eli ekvivalentti sarjaresistanssi, vuotovirta, mikrofoniiikka sekä se, voiko suuren kapasitanssin ohittaa käyttämällä apuna pienempää kapasitanssia sarjainduktanssin minimoimiseksi. [5]

Magneettisista komponenteista käydään läpi kelat ja muuntajat. Kelojen kohdalla ytimen valinta vaikuttaa kelan induktanssin määrittämiseen. Magneettinen ydin aiheuttaa epätarkkuuksia, joita ilmaytimisellä kelalla ei ole. Ydinmateriaalin vaikutuksista kerrotaan tarkemmin Morganin kirjassa. Lisäksi kelan valinnassa tulee huomioida sen sisäiset kapasitanssit. Muuntajan valinnassa tärkeää on huomioida keloissa syntyvät jännitehäviöt sekä DC-magnetoinnin aiheuttamat säröt signaalissa. Häviöön voi vaikuttaa eri ydinmateriaalilla ja säröön valitsemalla sopiva anodivirta putken ulostuloon. Muuntajan kohdalla myös tulokuorman valinta on tärkeää. Luvusta löytyy vielä yhteenveto muuntajan valintaan vaikuttavista asioista. [5]

Vahvistin kytkennöissä käytettävien komponenttien lisäksi myös itse radioputki käydään luvussa läpi osaosalta.

### 3.1.5 Teholähteet

Teholähteitä on kahdenlaisia, lineaarisia teholähteitä ja kytkimenä toimivia teholähteitä. Teholähteenvalinnalla on suuri vaikutus toimivaan lopputulokseen, sillä käytännössä vahvistinpiiri vain vahvistaa teholähteen lähettämää signaalia ja näin ollen, jos signaali on huono, ei edes hyvin suunniteltu vahvistinpiiri voi tehdä siitä hyvää. Teholähteen valinnassa on tärkeää valita sopiva tapa käsitellä signaalia. Näistä kerrotaan tarkemmin Morganin kirjassa. Tasasuuntaajan valinnasta Morgan kertoo, mitkä ominaisuudet tulee huomioida, sekä esittelee suositteluja vaihtoehtoja sekä myös sellaisia tasasuuntaajia, joita kannattaisi välttää. [5]

Regulaattori on paras tapa parantaa teholähdettä. Regulaattoreita on erityyppisiä ja ne soveltuvat eri tarkoituksiin. [5] Erityyppisiä regulaattoreita esitellään niin ikään luvussa viisi.

Teholähteeseen vaikuttaa myös yhteismuotoinen häiriö. Kirjassa kerrotaan, miten tämä vaikuttaa signaaliin ja millä keinoin sitä voidaan hallita. [5]

Käytännössä tilanne on usein eri, kuin teoriassa. Luvun alkuosa keskittyy käsittelemään teholähteisiin vaikuttavia ominaisuuksia ja ilmiöitä lähinnä teoreettisessa näkökulmassa, mutta loppupuolella mukaan otetaan myös käytännönelämän näkökulma. Tässä osiossa lukijalle esitellään myös matemaattisia kaavoja, joiden avulla eri ominaisuuksien matemaattiset arvot voidaan laskea. Viimeinen kappale keskittyy puhtaasti käytännön suunnitteluun pohjautuen edellä esiteltyyn teoriaan. Kirjassa suunnitellaan esimerkkinä kaksi teholähde tyyppiä. [5]

### 3.1.6 Tehovahvistin

Luvussa kuusi syvennyttään tehovahvistimiin. Alussa perehdytään tehovahvistimen ulostuloon ja siellä esiintyviin ongelmiin ja eri ominaisuuksien vaikutuksiin. Vahvistimet on jaettu eri luokkiin, jotka esitellään myös luvussa kuusi. [5]

Kun ulostuloon on perehdytty, siirrytään tarkastelemaan koko vahvistinpiiriä. Vahvistinpiirillä voidaan vähentää ulostulossa aiheutuvia ongelmia ja siksi on tärkeää tutustua ensin niihin, ennen koko vahvistimen suunnittelun aloittamista. Pääasiassa kirjassa tarkastellaan push-pull vahvistimia, sillä ne ovat yleisimpiä suunnittelussa. [5]

Luvussa käsitellään ohjausasteen suunnitteluun vaikuttavat tekijät esimerkkivahvistimien avulla. Myös ohjausastetta edeltävä vaiheenjakaja käsitellään yksityiskohtaisesti. Ohjausasteen lisäksi suunnitellaan sisääntuloaste, johon voidaan laittaa myös negatiivinen takaisinkytkentä. Morgan esittelee vaihtoehtoiset tuloastesovellukset sekä käy läpi vahvistimen stabiiliuteen vaikuttavat asiat. [5]

Kun eri asteiden suunnittelu on käyty läpi, kirjassa siirrytään tarkastelemaan tarkemmin muutamaa eri klassista vahvistinta, jotka ovat Williamson, the Mullard 5–20 ja the Quad II [5].

Seuraavaksi siirrytään esittelemään suunnitteluprosessi tarkemmin. Morgan kertoo myös yleisimpiä ongelmia liittyen eri suunnitteluvaiheisiin, sekä ratkaisuja niihin. Kirjan tästä osiosta suunnittelija saa melko hyvät eväät putkivahvistimen suunnitteluprosessia varten, sillä eri ominaisuuksien ja vahvistimen osien suunnittelu käydään tarkasti läpi. Edellä mainittujen klassisten vahvistimien lisäksi luvun loppuosassa esitellään myös muutama muu vahvistinesimerkki.

### 3.1.7 Esivahvistin

Usein vahvistimet tarvitsevat parikseen esivahvistimen, jotta kaikki halutut ominaisuudet saavutetaan. Jos käytetään digitaal-analogia-muunninta, esivahvistinta ei tarvita. Luvussa kuusi käytettiin sellaista, mutta luvussa seitsemän perehdytään esivahvistimen käyttöön. Esivahvistimen avulla voidaan vaikuttaa muun muassa sisääntulon valintaan, voimakkuuden, sävyn ja tasapainon kontrollointiin, kaapeliöuhjaukseen ja RIAA-asteeseen. Kirjassa esitellään esivahvistimen vaikutus ja valinta kunkin edellä mainitun ominaisuuden näkökulmasta. Erityisesti RIAA-aste käydään tarkoin läpi. [5]

## 3.2 Diplomityö: *Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi*, Tomi Kettunen

Tomi Kettusen diplomityössä *Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi*, perehdytään kitaroissa käytettyyn putkivahvistimeen näkökulmana sellaisen suunnittelu. Työssä käydään läpi hieman myös putkitekniikkaa, mutta kovin syvälle aiheeseen ei mennä. Työ on jaettu kolmeen eri osaan, joista ensimmäisestä löytyy perustietoa putkitekniikasta. Kaksi viimeistä osaa keskittyvät pääasiassa kitaravahvistimen suunnitteluun. Keskitymme kirjallisuuskatsauksessa lähinnä työn ensimmäiseen osaan, sillä suunnittelu ei ole suoranaisesti tämän työn aihealuetta.

Kettusen työn tarkoituksena on tarjota suunnittelijalle tarvittavat eväät putkikitaravahvistimen suunnitteluun. Oletuksena on, että lukija ymmärtää jo etukäteen aiheesta melko paljon, joten kovin syvälle perusteisiin materiaali ei mene. Esimerkiksi putkitekniikkaa käsittelevässä kappaleessa putkitekniikkaa esitellään ominaiskäyrästöjen, putkiparametrien ja piensignaalimallien muodossa selittämättä sen tarkemmin putkien sisäistä toimintaperiaatetta. Kettusen työssä keskitytään lähinnä pelkästään putkikitaravahvistimeen ja näkökulmana on suunnittelu. Siksi materiaali ei anna kovin laajasti tietoa putkivahvistimista yleensä. Lisäksi Kettunen keskittyy melko yksinkertaisiin vahvistinrakenteisiin, joten jos tavoitellaan monimutkaisempaa vahvistinrakennetta voi olla hyvä perehtyä aiheeseen muista lähteistä. Toisaalta kuitenkin vahvistimeen pätevät yleisesti samat teoriat, joten työstä saatavaa tietoa voi hyödyntää myös muihin vahvistimiin.

Diplomityössä esitellään yleisimmät putkityypit ja niiden ominaisuudet. Työstä löytyvät eri putkityyppien tärkeimmät parametrit ja toleranssit, sekä parametrien väliset yhteydet esitettynä Barkhausenin yhtälön avulla, joka on hyvä työkalu yhteyksien havaitsemiseen. Yhtälö esitetään yhtälömuodossa, mutta se myös avataan sekä sanallisesti että funktio muodossa.

Kytkeäntöjen toiminnan ymmärtämisen avuksi Kettunen esittää putkikytkentöjen piensignaalimalleja, sekä kertoo, mihin tarkoitukseen mallit soveltuvat parhaiten.

Biasointia eli putkivahvistimen tapauksessa putken lepoanodivirran asettamista käsitellään Kettusen työn luvussa 2.5.6 [8]. Kettunen esittelee biasointitavoista kiinteänbiasoinnin, katodibiasoinnin ja diodibiasoinnin sekä kertoo, mihin tarkoitukseen kukin biasointimenetelmä esimerkiksi soveltuu.

Perusteiden jälkeen työssä syvennyttään luku kerrallaan etuasteeseen, pääasteeseen ja teholahteeseen. Viimeisestä luvusta löytyy suunnitteluesimerkki lukijalle, joka haluaa syventää osaamistaan putkivahvistimen käytöstä kitaravahvistimena ja erityisesti sen suunnittelusta.

Etusteessa tapahtuu signaalin vahvistaminen pääasteelle [8]. Kettunen esittelee diplomityössään yleisimmät etusteisiin liittyvien vahvistinkytkentöjen toimintaperiaatteen asetukset, piensignaalimallit ja tärkeimmät suureet. Nämä kytkennät ovat yhteiskatodivahvistin ja katodiseuraaja ja niiden tärkeimmät suureet ovat jännitevahvistus, sisäänmenoresistanssi ja

ulostuloresistanssi. Myös putkikitaravahvistimissa käytetty ekvalisaattori kytkentä esitellään. [8]

Työssä käydään läpi esimerkkimenetelmä yhteiskatodivahvistimen biasointiin. Kettunen käyttää katodibiasointia. Diplomityössä kerrotaan, miten komponenttien arvot voidaan määrittää sekä annetaan tarvittavat kaavat. Työhön on lisätty katodibiasoidun yhteiskatodivahvistimen kytkentäkaavio sekä piensignaali malli.

Tyypillisesti puskurina käytetty katodiseuraaja on esitelty materiaalissa tarkemmin [8]. Kettunen esittelee kaksi eri tavalla biasoitua katodiseuraajaa, sekä esittelee niiden DC-toimintapisteen asetuksen ja piensignaali mallit ja niiden analysoimisen.

Putkivahvistinsuunnittelussa on ymmärrettävä, miten eri piirinosat vaikuttavat vahvistukseen ja sen ominaisuuksiin. Luvussa 3.3 Kettunen avaa sisäänmeno- ja ulostuloresistanssin vaikutuksia jännitevahvistin mallin avulla. 3.4 luvussa kerrotaan kytkentäkondensaattorien merkitys ja luvussa 3.5 hajakapasitanssien vaikutus. Lisäksi Kettunen esittelee tyypillisen ekvalisaattorin, jolla voidaan hienosäätää vahvistimen taajuusvastetta käyttötarkoitukseen sopivammaksi. [8]

Etuasteen jälkeen siirrytään lukuun neljä tarkastelemaan pääteastetta. Alussa esitellään yleisimmät pääteaste tyyppit ja toimintaluokat. Työssä tutustutaan kahteen single-ended pääteasteeseen, joista toinen on toteutettu triodilla ja toinen pentodilla. Näiden lisäksi tutustutaan push-pull pääteasteeseen.

Koska Kettunen näkökulmana on kitaravahvistin, kertoo hän luvun lopussa, miten kaiuttimelementti, jonka impedanssi vaihtelee taajuuden funktiona ja sisältää myös reaktiivisen komponentin, vaikuttaa kuormana vahvistinpiiriin. Tämä on hyvä huomioida tehtäessä käytännönelämän sovellutuksia liittyen äänitekniikkaan.

Luku viisi on viimeinen luku, joka käsittelee varsinaisesti tämän työn aihealuetta. Luvussa viisi perehdytään tehollähteeseen. Alussa esitellään tyypillinen lineaaritehollähteen rakenne sanallisesti ja myös yksinkertaistettuna lohko kaaviona sekä kytkentäkaaviona. Toiminta avataan sanallisesti. Tehollähde sisältää yleensä verkkojännitteen muuntajan ja tasasuuntaimen, sekä suotokondensaattorin tai LC-suotimen. Näiden avulla verkkojännite saadaan mahdollisimman tasaiseksi DC-jännitteeksi. Jännite voidaan lisäksi vielä reguloida tai suodattaa, jotta saataisiin pienempi jänniteheilunta. [8] Näihin vaiheisiin tutustutaan tarkemmin luvun seuraavissa kappaleissa. Lopuksi kerrotaan vielä, mikä merkitys on tehollähteen käynnistämiseen tarkoitetun jännitelähteen valinnalla.

Luvussa kuusi on suunnitteluesimerkki, johon voi halutessaan tutustua. Suunnitteluesimerkissä suunnitellaan kitaraputkivahvistin ja siitä saa hyödyllistä tietoa kaikenlaisten audioputkivahvistimien suunnitteluun, mutta näkökulma on kapeahko.

### 3.3 Erikoistyö: *Putkitekniikan perusteet*, Tomi Kettunen

Tomi Kettunen on tehnyt diplomityön lisäksi putkivahvistimiin liittyen myös erikoistyön *Putkitekniikan perusteet*, jossa käydään läpi työn nimen mukaisesti perusteet radioputkitekniikasta. Kyseinen työ sopii mainiosti aiheesta kiinnostuneelle perusteiden opiskelumateriaaliksi. Työ ei kerro suoranaisesti putkivahvistimista, mutta siitä saa tärkeää informaatiota putkitekniikasta, jonka ymmärrys toimii perustana putkivahvistimien opiskelulle, sillä putkivahvistimet perustuvat radioputkitekniikalle.

Työn alussa on lyhyt katsaus putkitekniikan kehityksestä historian saatossa ja tämän katsauksen myötä lukija johdatetaan varsinaiseen aiheeseen. Putkitekniikan perusteet -osiossa luvussa kaksi on kerrottu teoria radioputkien toiminnan taustalla. Putkitekniikka perustuu

emissioon ja materiaalissa esitelläänkin sekä lämpöemissio että sekundäärinen emissio. Lisäksi käydään läpi elektronien liikettä sähkö- ja magneettikentässä. Radioputket ovat joko tyhjiöputkia tai kaasuputkia ja Kettunen kertoo työssään, miten matalapaineinen kaasu vaikuttaa elektronien liikkeeseen.

Pelkästään radioputken toimintateorian ymmärtäminen ei riitä vaan lukijan on hyvä ymmärtää myös putken rakenne. Kettunen esittelee radioputken osat sekä niiden merkityksen ja sen, millaisilla erityyppisillä ratkaisuilla niitä on toteutettu. Radioputkessa on katodi, hila ja anodi [3].

Kun radioputkien perusrakenne on ymmärretty, voidaan siirtyä tarkastelemaan yksittäisiä esimerkkejä radioputkista. Näistä työssä käydään läpi diodi, triodi, tetrodi, pentodi ja beam power -putket kukin omassa luvussaan.

### 3.4 Materiaalien vertailua

Putkivahvistimen toiminnan ymmärtämiseksi on tärkeää, että hallitsee perustiedot radioputkitekniikasta. Perustietojen opiskeluun työssä on valittu Tomi Kettusen erikoistyö *Putkitekniikkaa*. Työ ei suoranaisesti kerro putkivahvistimista, joten se voi tuntua yllättävältä valinnalta putkivahvistinten opiskelua ajatellen, mutta putkivahvistinten sijaan työ tarjoaa hyvän tietopohjan, jonka avulla putkivahvistinten opiskelu on huomattavasti helpompaa. Jotta opiskelu olisi mielekästä ja tehokasta, on hyvä omata jonkinlainen teoriapohja, jonka päälle alkaa rakentaa osaamistaan varsinaisesta aiheesta. Juuri tähän tarkoitukseen Kettusen erikoistyö sopii mainiosti.

Jo lähdemateriaalien esittelyteksteistä voi huomata, että Jones Morganin kirja *Valve Amplifiers* on hyvin kattava teos putkivahvistimista. Kirjassa käsitellään putkivahvistimet teoriasta suunnitteluun ja lisäksi Morgan avaa teoriapohjaa ennen varsinaiseen asiaan eli putkivahvistimiin siirtymistä. Yksittäisistä lähdemateriaaleista se onkin todennäköisesti paras oppimateriaali, mutta sen haasteina ovat sen laajuus ja lisäksi osalle lukijakunnasta englanninkielisyys. Teos soveltuu aiheen perinpohjaiseen opiskeluun, mutta jos haluaa nopeasti tarkistaa muutaman yksityiskohtan tai saada yleiskuvan aiheesta, se ei ole kovin toimiva vaihtoehto. Tässä työssä esitellyistä materiaaleista se on kuitenkin ainoa, joka menee edes hieman syvemmin itse putkivahvistimiin teoreettisesta näkökulmasta, sillä Kettusen erikoistyössä putkivahvistimia sivutaan vain ohimennen itse putkitekniikan ohella ja diplomityössä puolestaan näkökulmana on suunnittelu, joten aiheeseen keskitytään lähinnä siltä kannalta eikä putkivahvistimen toimintaperiaatetta käsitellä perusteita enempiä. Siispä, jos haluaa oppia kattavasti aiheesta, olisi hyvä silmäillä myös Morganin teosta. Morganin teos on lisäksi esitellyistä materiaaleista ainoa, jossa on esitelty runsaasti eri putkivahvistin tyyppejä. Putkivahvistimia on monenlaisia ja aiheen opiskelijan olisi hyvä tietää perusteet siitä, millaisia erityyppisiä putkivahvistin sovellutuksia on olemassa. Tästäkin syystä teosta ei kannata hylätä sen laajuuden vuoksi vaikkakaan ei liene tarpeellista syventyä siihen myöskään kovin syvästi, jos tavoitteena on nimenomaan perusteiden ymmärtäminen. Iso osa perustiedoista käsitellään Morganin kirjan alussa parissa ensimmäisessä luvussa, mikä helpottaa opiskelijan työtä, sillä tämän ei tarvitse kahlata koko monisatasivuista kirjaa läpi, jos tavoitteena on vain perusteiden ymmärtäminen. Morganin teos on kuitenkin siinä mielessä loistava materiaali, että se mahdollistaa aiheen syvämmänkin opiskelun, jos on valmis satsaamaan siihen aikaa ja energiaa.

Putkivahvistimen rakenteen ja myös suunnittelun opiskeluun Kettusen diplomityö *Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi* voisi olla hyvä vaihtoehto. Diplomityö käsittelee

aihetta nimenomaan suunnittelun näkökulmasta, joten jos opiskelun tavoitteena on pystyä suunnittelemaan putkivahvistin, Kettusen diplomityön pitäisi antaa tarvittava teoriapohja. Suunnittelusta on asiaa myös Morganin teoksessa ja se voi olla toimiva valinta myös varsinkin, jos vahvistin poikkeaa suuresti Kettusen käyttämistä esimerkeistä. Kettusen näkökulmana on kitaravahvistimet, joten vaikka suunnittelu etenee melko samalla tavoin kaikkien vahvistimien kohdalla, eroja silti on ja siksi Morganin teosta voi olla hyvä käyttää apuna.

Yhteenvetona voisi todeta, että *Valve Amplifiers* -kirja ja *Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi* -diplomityö toimivat yleisopiskelumateriaalina putkivahvistimiin. *Putkitekniikkaa* -erikoistyö sen sijaan sopii pohjustukseksi varsinaiseen aiheeseen ja voi auttaa opiskelun alkuun pääsemisessä, mutta jos teoriapohja on jo hallussa, kannattaa siirtyä suoraan aiheetta suoranaisesti käsitteleviin materiaaleihin, eli Morganin teokseen ja Kettusen diplomityöhön. Riippuen oppimistavoitteesta materiaaliksi voi riittää myös vain joko Morganin teos tai Kettusen diplomityö, sillä molemmat käsittelevät jossain määrin samoja asioita. Kettusen diplomityössä aihe on tiivistetty melko pieneen pakettiin, joten syvempi ymmärrys voi olla vaikeaa saavuttaa pelkän diplomityön perusteella. Yleensä kuitenkin riittänee perusteiden ymmärtäminen, jolloin pelkästään diplomityön lukeminen voi antaa riittävät tiedot. Tässä on etuna se, että opiskeluun ei kulu aikaa ja energiaa määrättömästi. Diplomityö on selkeästi kirjoitettu ja siitä on helppo löytää tärkeimmät kohdat, kun taas Morganin kirja sisältää niin paljon informaatiota, että pääkohtien löytäminen on haastavaa. Diplomityö on ikään kuin tiivistävä teos putkivahvistimista ja siksi se soveltuu mainiosti nopeaan silmäilyyn, *Valve Amplifiers* -kirja puolestaan syventyy aiheeseen perusteellisesti.

## 4 POHDINTA

Materiaaleja etsiessä huomattiin, että tuoreen materiaalin löytäminen on haastavaa, sillä aiheesta on kirjoitettu viime vuosina melko vähän kenties siksi, että putkivahvistinten käyttö on nykyisin varsin vähäistä ja niiden käyttösovelluksia on nykyisin enää muutamilla aloilla. Parhaiten suomenkielistä materiaalia löytyi eri koulutusohjelmien lopputöiden joukosta ja vaikuttaakin siltä, että vaikka putkivahvistimet ovat nykyisin harvinaisempia ja jossain määrin eräänlainen jäännös menneisyydestä, ne ovat edelleen varsin suosittu aihe harrastelijoiden ja tekniikanalan osaajien parissa. Erityisesti kitaraharrastajat käyttävät putkivahvistimia ja tämä näkyi myös opinnäytetöiden aiheissa, sillä vastaan tuli useampia kitaraputkivahvistimiin liittyviä töitä erityisesti niiden suunnittelusta. Putkivahvistimista löytyy internetistä paljon valmiita rakennussarjoja ja ohjeita niiden rakentamiseen, mikä kertoo siitä, että ne ovat suosiossa harrastajien parissa.

Työtä tehdessä havaittiin, että putkivahvistinten niin sanotusti maallikkotason perusteiden löytäminen oli hyvin vaikeaa. Lähes kaikki tieteellinen teksti perustui ajatukselle, että lukijalla on jo yleiskäsitys siitä, mikä on putkivahvistin. Lisäksi haastavaa oli löytää materiaalia, jossa kerrottaisiin aiheesta riittävällä syvyydellä, kuitenkin menemättä liian perusteellisesti yksityiskohtiin tai yksittäisiin putkivahvistintyyppihin. Putkivahvistimien suunnittelusta tietoa löytyi melko runsaasti, mutta tämä näkökulma ei aina palvele sellaista, joka haluaa etsiä yleispätevää teoreettista tietoa ja ennen kaikkea ymmärtää, mikä putkivahvistin on.

Työssä kuitenkin onnistuttiin löytämään jonkinlainen materiaaliopetus perusteiden opiskeluun sekä perustiedon syventämiseen. Vaikka kysymykseen ”Mikä putkivahvistin on?” ei kyetty löytämään yksiselitteistä ja lyhyttä vastausta sisältävää materiaalia, pitäisi lukijan silti saada tarvittavat tiedot esitellyistä materiaaleista. Toiveena on myös, että asian opiskelija saisi jo tästä työstä hyödyllistä perustietoa putkivahvistimista ja sellaisen, jolle pintapuolinen osaaminen riittää, ei tarvitsisi välttämättä juurikaan tutustua muihin materiaaleihin. Lisäksi jos ja kun tarvetta syvempään osaamiseen on, työn tavoitteena oli esitellä materiaalit niin, että lukijan on helppo lähteä etsimään tietoa esitellyistä materiaaleista. Työssä pyrittiin esittelemään materiaalit niin, että lukija tietää, mistä materiaalista ja kohdasta kannattaa hakea tietoa juuri hänen kysymykseensä. Se, onnistuttiinko siinä jää lukijoiden arvioitavaksi.

## 5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli perehtyä radioputken ja putkivahvistimien toimintaperisäatteisiin ja ennen kaikkea löytää ja esitellä sopivia opiskelumateriaaleja aiheesta. Työssä esiteltiin kolme hyvää vaihtoehtoa oppimateriaaliksi, sekä pohdittiin, mihin käyttötarkoitukseen ne soveltuvat. Lisäksi työssä mainittiin myös muita aiheesta kertovia materiaaleja, mutta niihin ei syvennytty sen tarkemmin.

Työtä kirjoittaessa havaittiin, että yhtä hyvää materiaalia aiheen opiskeluun ei liene olemassakaan. Eri aineistot keskittyvät eri näkökulmiin ja erityyppisiin vahvistimiin, joten itselle parhaan materiaalin valinta määräytyy pitkälti tarpeen perusteella ja siksi on mahdotonta löytää yhtä oikeaa ja hyvää materiaalia. Toisaalta työssä kuitenkin löydettiin sellaisia materiaaleja, jotka antavat melko hyvää yleistietoa ja näiden käyttäminen on ehdottomasti suositeltavaa jokaiselle aiheesta kiinnostuneelle.

Jos kolmesta esitellystä materiaalista on valittava paras, on se todennäköisesti Jones Morganin *Valve Amplifiers* -kirja. Kirja on laaja ja syventyy asioihin perusteellisesti, joten perusteiden opiskelu voi olla työlästä siitä, mutta toisaalta se tarjoaa paljon tietoa ja käy putkivahvistimia läpi yleisestä näkökulmasta. Kuitenkin yhden yksittäisen materiaalin nostaminen ylitse muiden ei ole millään tavalla mielekästä, sillä ne on kaikki kirjoitettu vastaamaan eri tarpeisiin. Siksi materiaalin valinta riippuu pitkälti siitä, mihin sitä on tarkoitus käyttää.



## 6 LÄHDELUETTELO

- [1] Johnson J. L. (2017) Hydraulic-Electric Analogies: Transistors, Amplifiers, and Valves. Contributing Technical Expert (s. 24–27) (viitattu 8.2.2022)
- [2] Pehkoranta A. (2010) Putkivahvistin. (Tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu). (viitattu 11.2.2022)
- [3] Kettunen T. (2007) Putkitekniikan perusteet. (ELE-3600 Elektroniikan erikoistyö). (viitattu 11.2.2022)
- [4] Lehto A. (2007) Transistori 60 v. Maailma mullistui puolivahingossa. Tiede. [https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/transistori\\_60\\_v\\_maailma\\_mullistui\\_puoli\\_vahingossa](https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/transistori_60_v_maailma_mullistui_puoli_vahingossa) (viitattu 17.2.2022)
- [5] Morgan J. (2012) Valve Amplifiers (4<sup>th</sup> edition). Elsevier/Newnes. (viitattu 11.2.2022)
- [6] Janhunen R. Tekniikan Waiheita 1/05 <https://journal.fi/tekniikanwaiheita/article/download/63753/25061> (viitattu 11.2.2022)
- [7] Rautio K. (2016) A-luokan kuulokevahvistin. (Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu). (viitattu 17.2.2022)
- [8] Kettunen T. (2008) Putkikitaravahvistimen suunnitteluprosessi. (Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto). (viitattu 18.2.2022)
- [9] Kutvonen M. (2016) Putkivahvistinrakennusohje – SE/84 Brachycera – Osa 1. <https://audiovideo.fi/opas/putkivahvistinrakennusohje-se-84-brachycera-osa-1/>
- [10] Kutvonen M. (2016) Putkivahvistinrakennusohje – SE/84 Brachycera – Osa 2. <https://audiovideo.fi/opas/putkivahvistinrakennusohje-se-84-brachycera-osa-2/>

## **7 LIITELUETTELO**

Liite 1 SE/84 Brachycera 2.0 kytkentäkaavio

Liite 2 SE/84 Brachycera 2.0 komponentit



## Liite 2 SE/84 Brachycera 2.0 komponentit

Taulukko1

BRACHYCERA OSALISTA			
Arvo	UralTone koodi	määrä	osanumero, käyttökohde
JJ EL84-Standard	112-EL84-Standard	2	V2, V3
JJ ECC81	122-ECC81	1	V1
Hammond 125DSE	125DSE	2	T1, T2
Hammond 156L kuristin	156L	1	L1
Belton noval (PCB4) kanta	172-VT9-PT	3	putkien kannat
KBU8M Diodisilta 1000V 8A	188-KBU8M	1	D1
Audio Grade Rengassydänmuuntaja 120VA 230/250V 200mA/5.3VCT 4.5A	316-TSTLA120/001	1	
Muuntajan asennustarvikkeet, kumilevyt			
Sulake 100mA / 250V 5x20mm hidas (T)	411-20-0.1	4	F1, F2
Sulake 1000mA / 250V 5x20mm hidas (T)	411-20-1	2	Verkkosulake
Sulakepesä 3 - piirilevyille	411-ZHL31	2	F1, F2
Kojeliitin sulakkeella, Schurter 6200.2300	413-6200.2300	1	
Ruuviterminaali piirilevyille, kaksi liitäntää, 5mm rasteri	414-DG306-5.0-2P12	9	
Ruuviterminaali piirilevyille, kolme liitäntää, 5mm rasteri	414-DG306-5.0-3P12	5	
Rengasliitin M4, tinattu, suojaamaton, 1.5 – 2.5 mm2	417-ST-085/4	3	Suojamaa, verkkomuuntajan maado
Muovijalki 6,3mm, stereo, metallisella mutterilla	422-CN-CL1322	1	
Cliff 3.5mm stereojalki kytkimellä, pystyasennus	429-FC681374V	1	
RCA runko, eristetty, edestä asennettava, kullattu / musta	431-CC-222B	3	
RCA runko, eristetty, edestä asennettava, kullattu / punainen	431-CC-222R	3	
Kullattu kaiutinterminaali muovi eristeellä, Musta	435-BP-5-PC-BLACK-G	2	
Kullattu kaiutinterminaali muovi eristeellä, Punainen	435-BP-5-PC-RED-G	4	
Vishey / BC comp. 220uF / 10V elektrolyyttikondensaattori, vaaka	511-220-10	2	C1, C2
Vishey / BC comp. 220uF / 25V elektrolyyttikondensaattori, vaaka	511-220-25	2	C7, C8
Nichicon 100uF / 400V UCY elektrolyyttikondensaattori, pysty	5184-UCY2G101MHD	2	C6, C9
Nichicon 33uF / 400V UPW long life elektrolyyttikondensaattori, pysty	5184-UPW2G330MHD	1	C10
Kemet 100nF / 275Vac X2 Polypropyleenikondensaattori	538-R48K310000M1K	1	C3
Orange Drops 715P 100nF (0.1uF) / 600V polypropyleenikondensaattori, pysty	541-100n-600	2	C4, C5
Metallikalvovastus 1 Kohm 0,6W 1%	611-1K	2	R3, R4
Metallikalvovastus 1.2 Kohm 0,6W 1%	611-1K2	2	R11, R12
Metallikalvovastus 1.5 Kohm 0,6W 1%	611-1K5	2	R6, R8
Metallikalvovastus 330 Kohm 0,6W 1%	611-330K	2	R9, R10
Metallikalvovastus 470 Kohm 0,6W 1%	611-470K	2	R1, R2
Metallikalvovastus 100 ohm 2W 1%, 12mm	613-100ohm	4	R15, R16, R18, R19
Metallikalvovastus 47 Kohm 2W 1%	613-47Kohm	2	R5, R7
Alpha 100K DUAL LOG - 24mm	628-100K	1	
Metallikalvovastus 330 Kohm / 2W	641-330kohm	1	R20
Phoenix tehovastus 390 ohm / 5W	642-390SC	2	R13, R14
Keraaminen lankavastus 22k / 5W	643-AX5W-22K	1	R17
Chicken Head musta 2	691-PN-1B-6.4	2	
*taiwan* 2x on-on heavy duty vipukytkin	731-KS10	2	Verkkovirta, kaiuttimet
Alpha Kiertokytkin 4 pole, 3 position	753-4X3	1	Sisäntulon valitsin
Läpivierti kumia D=12MM, D=17.5	931-1203	4	Päätemuuntajat
Metallinen jatkomutteri M4 10mm	932-JMM4-10	4	Kytkenälevyn kiinnitys
Muovinen eristysosketti M5 x 40mm	7FF-M5X30/DR1188	1	Verkkomuuntajan kiinnitys
Kupukantaruuvi M3 x 8mm - DIN7985 10kpl	933-M3X8/D7985	2	IEC-liittimen kiinnitys
Kuusiokantaruuvi M4x8	B4x8/BN272	11	PCB, Muuntajat, maadoitus
Kuusiokantaruuvi M5x10	B5x10/BN272	5	Verkkomuuntaja, pohja
Kuusiokantaruuvi M5x16	B5x16/BN272	1	Verkkomuuntajan kiekko
Mutteri tähtialustalla, M3 - BN1364 10kpl	934-B3/BN1364	2	IEC-liittimen kiinnitys
Mutteri tähtialustalla, M4 - BN1364 10kpl	934-B4/BN1364	11	Päätemuuntajat, kuristin
Tähtialustavy M4, D=8mm, h=0.5mm - DIN6797A 10kpl	9353-B4/BN789	6	Korokepalat, maadoitukset
Tähtialustavy M5, D=10mm, h=0.6mm - DIN6797A 10kpl	9353-B5/BN789	1	Verkkomuuntaja
Brachycera EL84 piirilevy	951-BRACYCERA	1	
Sisäntulovalitsimen piirilevy		1	
SE/84 Brachycera elumiinikotelo - musta	951-BRACYCERA-CHASSIS	1	(*)
Hammond 1431-22BK3 / 305*203mm (L*S) - musta	1431-22BK3		(*)
Suojattu kaapeli	861-TASKER174	2,5m	
PVC kaapeli 0.5mm MU		1m	käytä päätemuuntajan johtoja
PVC kaapeli 0.75mm KE/VI		0,5m	kovaaäänisäätöjen johdotukseen
PVC kaapeli 0.75mm ruskea		0,5m	
PVC kaapeli 0.75mm sininen		0,5m	
Kutistesukka 2.4mm, musta	891-CB-HFT2.4/BK	20cm	
Kutistesukka 3.2mm, musta	891-CB-HFT3.2/BK	20cm	
Kutistesukka 3.2mm, punainen	891-CB-HFT3.2/RD	20cm	

OSIA VOIDAAN KORVATA VASTAAVILLA RIIPPUEN VARASTOSALDOSTA.  
TARKISTA AINA OSAN MITAT JA SOPIVUUS PIIRILEVYLLE

HUOM! R21 hypyytänkaa ei asenneta, kuten versiossa 1.0  
(\*) Koteloon porataan reikä kuristimen asennusta varten. Pohjan asennusreikä avataan



## SE/84 Brachycera

### Jännitteet mittapisteissä

Piste	Selitys	Jännite	Toleranssi
TP1	Käyttöjännite ennen kuristinta	350 VDC	±5 VDC
TP2	Käyttöjännite kuristimen jälkeen	325 VDC	±5 VDC
TP3	Etuasteen käyttöjännite	250 VDC	±10 VDC
TP4	Hehkujännite	6.3 VAC	±0.3 VAC
TPR1	Anodijännite, etuaste	165 VDC	±10 VDC
TPR2	Katodijännite etuaste	2.7 VDC	±0.20 VDC
TPR3	Katodijännite pääaste	13 VDC	±2 VDC
TPR4	Anodijännite, pääaste	320 VDC	±5V VDC
TPL1	Anodijännite, etuaste	165 VDC	±10 VDC
TPL2	Katodijännite etuaste	2.7 VDC	±0.20 VDC
TPL3	Katodijännite pääaste	13 VDC	±2 VDC
TPL4	Anodijännite, pääaste	320 VDC	±5V VDC