

Diplomarbeit

# Hochleistungsverstärker mit Tetroden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter Leitung von

Dipl.-Ing. Michael Fischer

und

Ao. Univ.Prof. Univ.Prof. Arpad L. Scholtz

E389

Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

**Andreas Aigner**

8926710

Hohenwartherstraße 108, 3471 Großriedenthal

Großriedenthal, Oktober 2008

# Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Betreuern Michael Fischer und Arpad L. Scholtz für ihre Hilfestellungen und ihre Unterstützung bedanken. Ohne deren Hilfe und zahlreichen Ratschläge wäre die Diplomarbeit in dieser Form nur sehr schwer möglich gewesen.

Allergrößte Dankbarkeit und Anerkennung gebühren allerdings meiner Familie, die in den letzten Monaten auf so manches verzichten mußte, und meinen Eltern, die mir das Studium erst ermöglichten und stets ein sicherer Rückhalt in dieser nicht sehr einfachen Zeit waren.

# Zusammenfassung

Im Gebiet der Ionosphärenforschung und der damit verbundenen Ausbreitungsvorhersagen sind in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt worden. Es bleiben allerdings noch viele Fragen unbeantwortet, die intensive Untersuchungen der Ionosphäre rechtfertigen. Diese Untersuchungen selbst erfordern entsprechend leistungsfähige Sendeanlagen.

*Die Problemstellung* dieser Diplomarbeit war, zwei Sendeendstufen für das Kurzwellenband in Betrieb zu nehmen. Es waren eine Schrittmotorsteuerung und eine Kreismotorsteuerung für die Abstimmereinheit des Telefunken Senders und eine Gitterstabilisierungsschaltung für die Schirmgittervorspannung eines ehemals militärischen Senders zu entwickeln und aufzubauen. Zusätzlich zu den Motorsteuerungen wurde zwecks Visualisierung eine Anzeigeeinheit entworfen.

*Der Weg*, um die Forschungen mit Hilfe dieser Hochfrequenzsender aufnehmen zu können, ist in dieser Diplomarbeit beschrieben.

Neben einer allgemein gehaltenen Einführung beschreiben die ersten Kapitel die einführenden Grundlagen über die Wellenausbreitung und die in Hochleistungsverstärkern auch heute noch verwendeten Elektronenröhren.

Die beiden wesentlichen Kapitel dieser Arbeit beschreiben daran anschließend den Aufbau der beiden Sender, und die Entwicklung der für ihre Inbetriebnahme notwendigen Schaltungen.

Den Abschluß bilden ein paar Gedanken, wie hochmoderne Systeme zukünftig in diese Geräte integriert werden können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>ii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Wellenausbreitung</b>	<b>3</b>
2.1 Unterscheidung der Wellen nach Wellenlänge . . . . .	3
2.2 Aufbau der Ionosphäre . . . . .	4
2.3 Ausbreitungsbedingungen . . . . .	7
2.4 Störungen in der Ionosphäre . . . . .	9
<b>3 Röhren – noch zeitgemäß?</b>	<b>11</b>
3.1 Funktionsweise und Aufbau . . . . .	12
3.1.1 Heizung . . . . .	13
3.1.2 Getterung der Röhren . . . . .	14
3.1.3 Die Diode – Zweielektrodenröhre . . . . .	15
3.1.4 Die Triode – Dreielektrodenröhre . . . . .	15
3.1.5 Mehrgitterröhren . . . . .	17
3.1.6 Der Aufbau einer Röhre . . . . .	17
3.2 Gegenüberstellung Elektronenröhre - Transistor . . . . .	19
3.3 Röhregrundschaltungen . . . . .	19
3.3.1 Katodenbasisschaltung . . . . .	20
3.3.2 Neutralisation . . . . .	21
3.4 Besonderheiten von Elektronenröhren . . . . .	22
3.4.1 Vakuumdrehkondensatoren . . . . .	23
3.4.2 Kühlung . . . . .	23
3.4.3 Reihenfolge der Inbetriebnahme . . . . .	24
<b>4 Der Telefunken - Sender</b>	<b>25</b>
4.1 Der Endverstärker – eine Übersicht . . . . .	27
4.1.1 Gitterbandpaß . . . . .	29
4.1.2 Leistungsendstufe . . . . .	29
4.1.3 Anodenkreis . . . . .	30
4.2 Schrittmotorsteuerung . . . . .	30
4.2.1 Blockschaltbild . . . . .	31
4.2.2 Schaltungsbeschreibung der Schrittmotorsteuerung . . . . .	32
4.2.3 Layout der Schrittmotorplatine . . . . .	34
4.2.4 Pinbelegung der Schrittmotorkarte . . . . .	34

4.2.5	Schrittmotoranschlußkabel . . . . .	34
4.2.6	Bild der Schrittmotorplatine . . . . .	36
4.3	Anzeigeelektronik . . . . .	36
4.3.1	Schaltbild der Anzeigeelektronik . . . . .	37
4.3.2	Siebensegmentanzeige . . . . .	38
4.4	Kreismotorsteuerung . . . . .	40
4.4.1	Schaltungsbeschreibung der Kreismotorsteuerung . . . . .	40
4.4.2	Layout der Kreismotorplatine . . . . .	41
4.4.3	Pinbelegung der Kreismotorkarte . . . . .	41
4.4.4	Bild der Kreismotorplatine . . . . .	41
4.5	Der „intelligente“ Schalter . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Der militärische Sender - Typ „LV6“</b>	<b>46</b>
5.1	Grundfunktion der Serienstabilisierung . . . . .	46
5.2	Schaltung der aufgebauten Stabilisierung . . . . .	47
5.3	Bild der Schrittmotorplatine . . . . .	49
5.4	Meßergebnisse . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>53</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>55</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>56</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>58</b>

# Kapitel 1

## Einführung

*Nachrichtenübertragung:* Schon von jeher besteht das Bedürfnis des Menschen, Nachrichten über mehr oder weniger große Entfernungen schnell zu übertragen. Im Laufe der langen Zeit, entwickelte der Mensch viele Verfahren diesem Wunsch zu genügen. Es hat allerdings viele Jahrhunderte gedauert, bis mit der Entdeckung der Elektrizität eine Fülle von Erfindungen den Alltag des Menschen erleichterte.

Einige dieser Entdeckungen legten auch die Basis für eine revolutionierte Übertragungstechnik. Es wurde eine neue Form der Nachrichtenübertragung möglich. Man brauchte keine Rauchzeichen mehr, mußte keine erschöpften Läufer mehr beklagen und konnte schließlich und endlich auch auf Reiter und Pferd verzichten. Informationen konnten plötzlich innerhalb sehr kurzer Zeit über sehr weite Strecken übermittelt werden.

Aus diesen grundlegenden Entdeckungen entwickelten sich sowohl militärische als auch kommerziell nutzbare Nachrichtenübertragungssysteme. Die Ziele dieser Systeme könnten jedoch unterschiedlicher nicht sein. Obwohl man dazu geneigt ist sich auf diese beiden Entwicklungsrichtungen zu beschränken, sei ganz kurz erwähnt, daß das weltumspannende Netz der Amateurfunken einen nicht unerheblichen Anteil an der Entwicklung so mancher technischer Verfahren und Systeme hat.

So unterschiedlich die verschiedenen Übertragungssysteme auch sind, haben sie grundsätzlich den gleichen Aufbau: Sender – Übertragungsweg – Empfänger. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich im Wesentlichen auf den Sendeteil. Es handelt sich in diesem Fall um zwei Sendeverstärker die im Kurzwellenband arbeiten, und im Dauerbetrieb deutlich mehr als 1 kW an Leistung abgeben können. Das erste Gerät ist vom Typ „S2525“ der Firma Telefunken. Dies ist eine kommerzielle Sendeanlage welche z.B. zur Ausstrahlung von Radioprogrammen verwendet werden kann. Zusätzlich zu diesem Sender befaßt sich diese Diplomarbeit auch mit einem für militärische Zwecke hergestellten Sender. Hierbei handelt es sich um das Modell „LV6“ eines Herstellers aus Osteuropa<sup>1</sup>.

Der kommerziellen Nutzung der Kurzwelle begegnet man nur allzu leicht mit

---

<sup>1</sup>Die genaue Herkunft und der Hersteller dieses Senders sind nicht eindeutig zu bestimmen. Er stammt vermutlich aus alten Armeebeständen und wurde zu Zwecken der hochfrequenten Ionosphärenforschung kostengünstig erworben.

dem Vorurteil einer schlechten Übertragungsqualität. Dieses mag in Anbetracht der heute üblichen Qualität einer FM<sup>2</sup>-Übertragung durchaus gerechtfertigt sein, jedoch wiegt der Vorteil einer *weltweiten* Reichweite diesen Nachteil wieder auf.

Zur qualitativen Verbesserung dieser Aussendungen wurden auch schon digitale Übertragungsverfahren über Kurzwelle entwickelt. Diese Systeme (unter anderem DRM<sup>3</sup>) sind vielversprechend, und man wird sehen wie sie sich in Zukunft weiterentwickeln werden.

Im Einführungskapitel (Kapitel 1) findet man einen kurzen, historischen Überblick über die Motive der Entwicklung unterschiedlicher Übertragungstechniken. Es wird versucht einen Zusammenhang der Nachrichtensysteme der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft herzustellen.

Die daran anschließenden zwei Kapitel geben eine einführende Darstellung der ionosphärischen Wellenausbreitung (Kapitel 2) und der für Hochleistungsverstärker nach wie vor unverzichtbaren Elektronenröhren (Kapitel 3) an. Sie sind theoretisch gehalten und sollen einen Einblick einerseits in die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen unter Ausnutzung der Ionosphäre, und andererseits in die grundlegenden Methoden und Eigenschaften der Röhrentechnik geben.

Als zentrale Kapitel dieser Diplomarbeit behandeln die nächsten Kapitel zwei Röhrenverstärker mit Tetroden als verwendete Verstärkerelemente. Das Kapitel 4 behandelt sowohl die theoretischen Grundlagen als auch den praktischen Aufbau der für diesen Sender notwendigen Steuerungen. Im Kapitel 5 folgt der zweite Sender für den eine Schaltung praktisch aufgebaut wurde.

Die Verbindung der bewährten Röhrentechnik mit hochmodernen Schaltkreisen wird im abschließenden Kapitel 6 hergestellt.

---

<sup>2</sup>Frequenzmodulation

<sup>3</sup>Digital Radio Mondiale

# Kapitel 2

## Wellenausbreitung

Dieses Kapitel ist eine grundlegende Einführung in die physikalischen Besonderheiten der Wellenausbreitung. Die Einflüsse physikalischer Effekte auf die Ausbreitungsrichtung sind unterschiedlich [1]:

- **Reflexion:** Sobald eine elektromagnetische Welle auf eine Grenzschicht mit unterschiedlichen elektromagnetischen Eigenschaften trifft, wird ein mehr oder weniger großer Teil dieser Welle reflektiert.
- **Beugung:** Je nach dem Verhältnis von elektromagnetischer Wellenlänge zu Größe eines Hindernisses, wird beim Auftreffen dieser Welle, diese um dieses Hinderniss „herumgebeugt“. Man könnte sich das bildlich in etwa wie eine „Ablenkung“ vorstellen.
- **Streuung:** Kleine Inhomogenitäten entlang des Ausbreitungspfades bewirken eine *Zerstreuung* der sich ausbreitenden Welle.
- **Absorption:** Durch ein verlustbehaftetes oder ionisiertes Medium werden Anteile der sich ausbreitenden Welle verschluckt (absorbiert). Bei sehr hohen Frequenzen (GHz-Bereich) bewirken fallweise Resonanzen der Molekularstruktur des Mediums ebenfalls eine deutliche Schwächung des Feldes.

Diese Effekte treten nun je nach verwendeter Frequenz und „Beschaffenheit“ des Übertragungsmediums in mehr oder weniger ausgeprägter Form in Erscheinung. Zum besseren Verständnis der Ausbreitungsbedingungen sind die folgenden zwei Abschnitte sehr hilfreich.

### 2.1 Unterscheidung der Wellen nach Wellenlänge

Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen reicht von den Längstwellen mit Wellenlängen von einigen tausend Kilometern bis herab zu den Gammastrahlen mit Wellenlängen die bis in den subatomaren Bereich hineinreichen [2]. Die in dieser Arbeit betrachteten Sendeanlagen strahlen elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen beginnend von etwa hundert Meter herab bis etwa zehn Meter ab. Diesen sogenannten KW<sup>1</sup>-Bändern entsprechen somit Frequenzen von näherungsweise 3 MHz bis 30 MHz (selten auch Dekameterwellen genannt).

---

<sup>1</sup>Kurzwelle

Innerhalb dieses Kurzwellenbandes sind den unterschiedlichen Funkdiensten fixe Frequenzen zugewiesen, die sie für ihre Aussendungen verwenden müssen. Der Hintergrund dieser Regelungen ist, daß ein reibungsloser Funkverkehr ohne gegenseitige Störungen sichergestellt werden muß. Die wichtigsten zugewiesenen Frequenzen sind in Tabelle 2.1 angegeben.

Tabelle 2.1: Die wichtigsten zugewiesenen Frequenzen im Kurzwellenband von 3 MHz bis 30 MHz.

Funkdienst	zugewiesene Bänder bzw. Frequenzen
Rundfunk	49 m-, 41 m-, 31 m-, 25 m-, 19 m-, 11 m-Band
Flugfunk	3,453 MHz, 5,645 MHz, 6,526 MHz
Seefunk	4,0 MHz, 6,2 MHz, 13,2 MHz, 22,0 MHz
Amateurfunk	80 m-, 40 m-, 20 m-, 15 m-, 10 m-Band

In obiger Tabelle sind nur die jeweils wichtigsten Frequenzen angegeben. Neben diesen angeführten Frequenzen und Funkdiensten gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Dienste die ebenfalls im Kurzwellenbereich arbeiten, wie z.B. Wetterfunk, Zeitzeichensender, Fernsteuerfrequenzen, Satellitenkommunikation, usw.

## 2.2 Aufbau der Ionosphäre

Für das bessere Verständnis der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ausbreitungsbedingungen erscheint es sinnvoll, zuerst den Aufbau der zur Erde gehörenden Atmosphäre zu erläutern.

Der in Abbildung 2.1 skizzenhaft dargestellte Aufbau der Gashülle um die Erde macht den Schichtaufbau unseres Planeten deutlich [3]. Die Ausdehnungen dieser Schichten werden durch den Vergleich mit den höchsten Bergen deutlich sichtbar. Die verschiedenen meteorologischen und physikalischen Eigenschaften und Phänomene sind anschaulich dargestellt, obgleich sie für die Wellenausbreitung selbst nur in vereinzelt Fällen von Bedeutung sind. Dies ist dann der Fall, wenn sich in den untersten Schichten (Troposphäre und Stratosphäre) einzelne leitfähige Bereiche befinden, an denen Reflexionen auftreten können. Diese Bereiche können Flugzeuge, Gebiete ionisierter Luft (etwa durch Gewitter oder verglühende Meteoriten) oder andere lokal begrenzte Ausdehnungen mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit sein.

Für die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen ist jedoch die an die Stratosphäre in einer Höhe von etwa 80 km angrenzende Ionosphäre von fundamentaler Bedeutung. Der Aufbau dieser Schicht soll nun kurz dargelegt werden [3], [4].

Die Ionosphäre reicht an ihrem oberen Ende bis in eine Höhe von etwa 800 km und geht dort allmählich in den interstellaren Raum über. Namensgebend für die



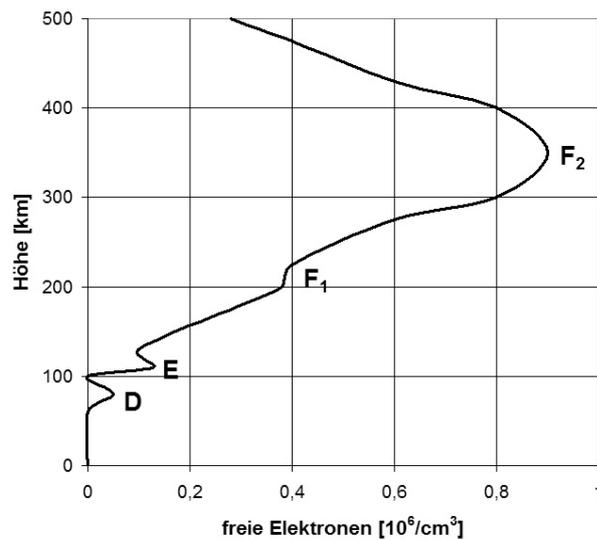


Abbildung 2.2: Die Dichte der freien Elektronen in Abhängigkeit von der Höhe nach [5].

In diesem Bild kann man deutlich drei mit „D“, „E“ und „F<sub>2</sub>“ bezeichnete lokale Maxima erkennen. Bei genauerer Betrachtung kann man noch ein viertes, mit „F<sub>1</sub>“ bezeichnetes Maximum entdecken. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, daß die Ausprägung der einzelnen Maxima von mehreren Faktoren abhängt, wovon Tages- bzw. Jahreszeit und die Sonnenaktivität die wichtigsten sind. Diesen vier Maxima entsprechen die in der gängigen Literatur angegebenen D-, E-, F<sub>1</sub>- und F<sub>2</sub>-Schichten, die den Ansatz für die Ausbreitungsbedingungen darstellen.

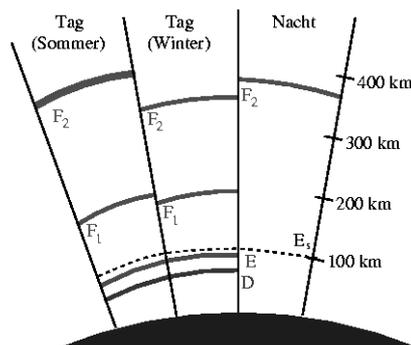


Abbildung 2.3: Der in Abschnitt 2.2 angeführte Aufbau der Ionosphäre bildlich dargestellt.

In Abbildung 2.3 ist der Schichtaufbau noch einmal bildlich kurz zusammengefaßt. Die Angaben zu den Tages- und Jahreszeiten werden jetzt zum Abschluß dieses Abschnittes noch kurz zusammengestellt.

Da die unterschiedlichen Schichten in [3], [4] und [6] ausführlich beschrieben sind, möchte ich mich hier auf eine kurze Zusammenfassung beschränken.

- *D-Schicht*: Diese Schicht ist die erdnächste und jene mit der niedrigsten Elektronenkonzentration. Aufgrund der niedrigen Konzentration bildet sie sich nur in den Tagesstunden. Durch das Fehlen der Sonneneinstrahlung verschwindet sie in der Nacht vollständig.
- *E-Schicht*: Sie ist etwas weiter entfernt von der Erdoberfläche und besitzt gleichzeitig auch eine etwas höhere Elektronenkonzentration. Sie reicht allerdings noch immer nicht aus, um bei fehlender Sonneneinstrahlung aufrecht bleiben zu können. Sie verschwindet genauso wie die D-Schicht in den Nachtstunden.
- *F-Schicht*: Durch die große Höhe und die gleichzeitig bestehende hohe Elektronenkonzentration, ist sie jene Schicht, die den größten Anteil am Reflexionsvermögen der Ionosphäre hat. In den Sommermonaten spaltet sich tagsüber diese Schicht durch die hohe Sonneneinstrahlung in eine  $F_1$ - und eine  $F_2$ -Schicht auf. Nachts und im Winter rekombinieren<sup>4</sup> wieder viele dieser ionisierten Teilchen und verlieren dadurch einen Großteil ihrer reflektierenden Wirkung.
- *$E_s$ -Schicht*: Diese bis jetzt nicht erwähnte Schicht tritt nur sporadisch<sup>5</sup> auf und hat auf das Reflexionsverhalten der Ionosphäre ganz interessante Eigenschaften, auf die im nächsten Abschnitt 2.3 eingegangen wird. Der Name dieser Schicht kommt naheliegenderweise von ihrem sporadischen Auftreten, dessen Ursache noch nicht restlos geklärt ist. Einen ersten Ansatz dazu liefert die sogenannte *Windscherungstheorie von Dungey und Whitehead* [7], [3].

## 2.3 Ausbreitungsbedingungen

Grundsätzlich sind die in Abbildung 2.4 angeführten Ausbreitungsformen möglich. Je nach der verwendeten Frequenz ergeben sich jedoch aufgrund physikalischer Gegebenheiten bevorzugte Ausbreitungswege. Die für die Ausbreitung der Kurzwellen im Wesentlichen relevante Ausbreitungsform ist jene der Raumwelle [3], [4].

In Abbildung 2.5 sind in Abhängigkeit unterschiedlicher Abstrahlwinkel  $\Theta$  verschiedene Raumwellen dargestellt. Wenn man der Raumwelle „1“ folgt, erkennt man, daß der Abstrahlwinkel sehr flach ist. Dieser flache Winkel bewirkt, daß die Welle nach der Reflexion an der Ionosphäre wieder an der Erdoberfläche ankommend, die weiteste Entfernung zurückgelegt hat. Die Distanz zwischen Abstrah-

---

<sup>4</sup>Die durch die hohe Strahlungsenergie aus dem Gitterverband gelösten negativ geladenen Elektronen „verbinden“ sich wieder mit dem positiven Gitter zu neutralen Atomen und Molekülen.

<sup>5</sup>engl: sporadic

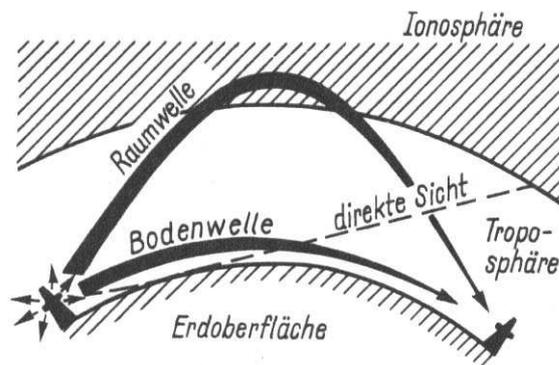


Abbildung 2.4: Die Bodenwelle und Raumwelle als prinzipiell möglichen Ausbreitungsformen elektromagnetischer Wellen.

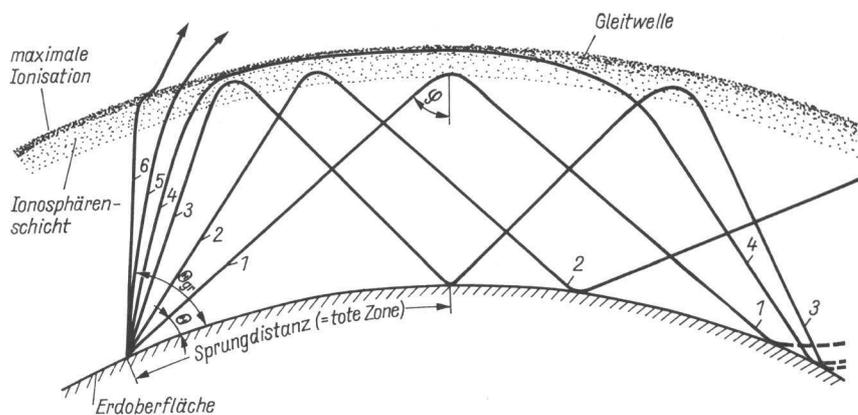


Abbildung 2.5: Durch die unterschiedlichen Abstrahlwinkel  $\theta$  der verwendeten Antenne ergeben sich unterschiedlich ausbreitende Raumwellen.  $\theta_{Gr}$  ist der Grenzwinkel und  $\varphi$  ist der Einfallswinkel an der Ionosphäre [3].

lung und erstem Auftreten auf der Erdoberfläche wird „Sprungdistanz“ bzw. „Tote Zone“ genannt, da innerhalb dieser Zone dieses Signal nicht empfangen werden kann. Je größer der Abstrahlwinkel wird, umso kleiner wird dieser sogenannte erste „Hopp“. In diesem Bild sind außerdem zwei bemerkenswerte Phänomene zu beobachten:

Zum Ersten gibt es einen maximalen Abstrahlwinkel  $\theta_{Gr}$ , bei dem die elektromagnetische Welle gerade noch von der Ionosphäre reflektiert wird. Jede weitere Vergrößerung des Abstrahlwinkels führt dazu, daß die Welle nicht mehr reflektiert wird, sondern durch die Ionosphäre hindurchtritt und in den Weltraum abgestrahlt wird.

Der zweite interessante Sonderfall ist dann gegeben, wenn die Welle, so wie die mit „4“ bezeichnete, in die Ionosphäre eindringt, in dieser entlangläuft, und erst nach vielen Kilometern diese Schicht wieder verläßt. Da diese Welle in der Iono-

sphäre entlanggleitet, wurde ihr in [3] der passende Name „Gleitwelle“ gegeben.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde einfachheitshalber eine einzelne Reflexionsschicht angenommen. Wie jedoch in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt wurde, gibt es mehrere solcher Reflexionsschichten. An jeder einzelnen dieser Schichten kann eine elektromagnetische Welle mehr oder weniger stark reflektiert werden.

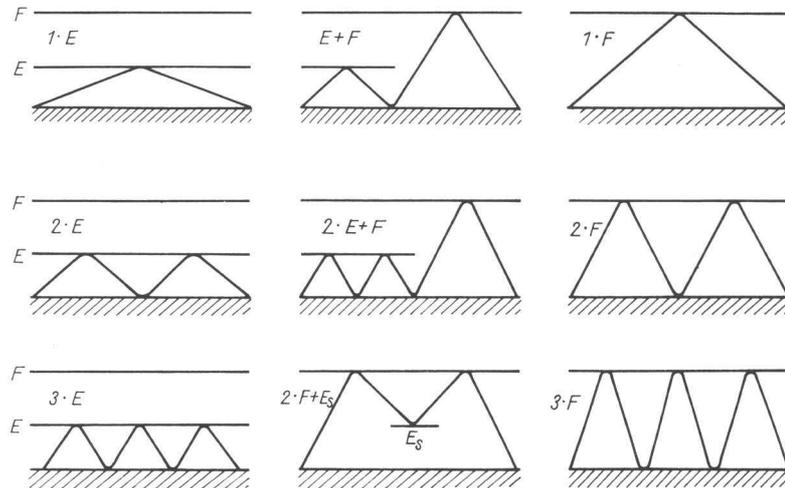


Abbildung 2.6: Durch das Vorhandensein unterschiedlicher Schichten in der Ionosphäre ergeben sich unterschiedliche Reflexionsmöglichkeiten der elektromagnetischen Wellen.

In Abbildung 2.6 ist skizzenhaft dargestellt, wie sich diese unterschiedlichen Schichten in der Ionosphäre auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen auswirken kann. Man erkennt Reflexionen an den unterschiedlichsten Schichten und die daraus entstehenden Auswirkungen. Beachtenswert ist das mittlere Bild in der unteren Bildreihe. Hier taucht eine bisher nur kurz im Abschnitt 2.2 erwähnte Schicht auf, die sogenannte „sporadic-E-Schicht ( $E_S$ -Schicht)“.

## 2.4 Störungen in der Ionosphäre

Die Ionosphäre und deren Aufbau ist fast ausschließlich von der Ultraviolett- und Röntgenstrahlung abhängig, die von der Sonne abgestrahlt wird. Außergewöhnliche Störungen der Ionosphäre sind nun die Auswirkungen einer *erhöhten* Sonnentätigkeit. Da diese Störungen elektromagnetischer Natur sind, brauchen sie etwa 500 Sekunden bis sie auf der Erde merkbar in Erscheinung treten [3].

Zum Abschluß dieses Kapitels möchte ich nun in Kurzform die wichtigsten Störeffekte auflisten. Eine detaillierte Beschreibung dieser Störungen ist im Buch von Rothammel ([3]) zu finden.

- *SID*. Mit  $SID^6$  werden alle plötzlich auftretenden Störungen bezeichnet, die

<sup>6</sup>Sudden Ionospheric Disturbance

auf eine erhöhte Ultraviolett- und Röntgenstrahlung zurückzuführen sind. Die Auswirkungen sind am ehesten in der D-Schicht zu finden und führen im Extremfall zum *Mögel-Dellinger-Effekt*.

- *Ionosphärenstürme*. Durch Wechselwirkungen des irdischen Magnetfeldes mit dem solaren Plasma entstehen Schwankungen des Erdmagnetfelds (Magnetsturm). Das vom Erdmagnetfeld abgelenkte Plasma der Sonne dringt vermehrt in die Erdatmosphäre ein und verursacht dadurch den sogenannten Ionosphärensturm.
- *E<sub>s</sub>-Schicht* (siehe Abschnitt 2.2). Diese Schicht tritt in etwa im Höhenbereich der E-Schicht auf. Die Erscheinungsform unterscheidet sich jedoch erheblich von den anderen Schichten. Da sie zeitlich und räumlich nur unregelmäßig auftritt, nennt man sie *sporadische E-Schicht*. Die Entstehungsursachen werden mit Hilfe der *Windscherungstheorie von Dungey und Whitehead* teilweise erklärt [3], [7].
- *Backscattering (Rückstreuung)*. Dies ist zwar keine Störung der Ionosphäre im eigentlichen Sinn, wird aber häufig in diesem Zusammenhang genannt. Beim ersten Auftreffen des Signals nach der Reflexion auf der Erdoberfläche, wird ein kleiner Teil des Signals wieder in Richtung des Senders zurückgestreut und erreicht diesen nach neuerlicher Reflexion.

# Kapitel 3

## Röhren – noch zeitgemäß?

Sobald das Thema „Elektronenröhren“ in einer Diskussion zur Sprache kommt, werden die Gespräche emotionell. Am ehesten sind solche Unterhaltungen in der Musikindustrie zu finden, wo es darum geht, aus einem Musikinstrument mittels Verstärker brauchbare Signale zu erhalten. Man ist dabei oft dazu verleitet subjektiv zu urteilen, und vergißt dann allzu leicht technisch und wissenschaftlich korrekt zu argumentieren. Der Ursprung dieser kontroversen Meinungen dürfte durchaus einen geschichtlichen Hintergrund haben.

Historisch gesehen waren Röhren die ersten Bauelemente mit Verstärkerwirkung. In den Jahren 1883 bis 1932 (und darüber hinaus) gab es eine Reihe von Entdeckungen und Erfindungen, die die Entwicklung der Röhre erst ermöglichten. Maßgeblich beteiligt an der Entwicklung der Röhre als Verstärkerbauelement dürften Robert von Lieben und Lee de Forest gewesen sein [8], [9].

Nachdem man nun schon in der Lage war, Sender mit diesen Röhren zu bauen, konnte man schon erste elektromagnetische Wellen aussenden und empfangen. Man erkannte damals auch, daß es nicht nur sinnvoll ist die Sendeleistungen zu erhöhen, sondern gleichzeitig auch die Empfangsleistungen zu verbessern. Vorangetrieben durch die Suche nach immer empfindlicheren Detektoren gelang schließlich 1948 der entscheidende Durchbruch. Die Physiker Shockley, Bardeen und Brattain konnten den Verstärkereffekt an Halbleiterkristallen aus Germanium nachweisen. Dies war die Geburtsstunde des Transistors<sup>1</sup> [9].

Es begann eine technologische Entwicklung, die in dieser Form und Geschwindigkeit von keinem auch nur annähernd erwartet worden war. Die gesamte Industrieelektronik wie wir sie heute kennen, basiert auf diesen Entdeckungen. Obwohl zu dieser Zeit sowohl die Entwicklung der Röhre als auch die des Transistors mit rasantem Tempo voranschritt, war man bald der Meinung, daß der Transistor die Röhre technologisch ablösen und vollständig ersetzen würde. Heute, viele Jahre später, wissen wir, daß die Röhre auch Eigenschaften hat, die sie in manchen Anwendungen bis heute unersetzbar macht.

---

<sup>1</sup>Im Buch von Fischer ([9]) wird eine interessante Erklärung für das Wort „Transistor“ gegeben: Es besteht aus den beiden Wörtern „transfer“ und „resistor“. Wörtlich übersetzt hieße es in etwa „Übertragungswiderstand“. Damit soll angedeutet werden, daß der Transistor eine Stromänderung im Eingangskreis in eine Stromänderung im Ausgangskreis überträgt. Diese Stromänderung bewirkt dann an einem Arbeitswiderstand eine entsprechend hohe Spannungsänderung.

In der nachfolgenden Auflistung werden einige wichtige Vorteile und Nachteile des Transistors aufgeführt:

*Vorteile* des Transistors:

- Der Transistor ist mechanisch wesentlich unempfindlicher als die Röhre. Er übersteht wesentlich höhere Stoßbeschleunigungen unbeschadet.
- Wesentlich kleinere Abmessungen als die Röhre in einer vergleichbaren Leistungsklasse. Dieser Vorteil kann jedoch in manchen Anwendungen aufgrund der kleineren Wärmekapazität auch ein Nachteil sein, da er dann schneller überhitzt.
- Das Gewicht ist wesentlich kleiner.
- Die Lebensdauer einer Elektronenröhre ist aufgrund von Emissionserscheinungen stark eingeschränkt.
- Die notwendigen *Betriebsspannungen* sind bei Transistorschaltungen wesentlich kleiner.
- Man benötigt für Transistorschaltungen keine Heizung. Der Wirkungsgrad wird dadurch deutlich verbessert.

Der Transistor hat allerdings auch entscheidende *Nachteile*:

- Die elektrischen Eigenschaften des Transistors sind in viel höherem Maße temperaturabhängig.
- Der Herstellungsprozeß mit den erforderlichen Toleranzen ist viel aufwendiger.

Wenn man diese Erläuterungen objektiv betrachtet, kann man die Überschrift durchaus bejahend beantworten. Ihre große Stärke spielt die Röhre bei den Hochleistungs-Sendeverstärkern aus. Es ist ungleich einfacher hohe Spannungen (Röhre) zu erzeugen als hohe Ströme (Transistor). Die Röhre ist deshalb in manchen Anwendungen dem Transistor nach wie vor überlegen und wird dies auch noch eine absehbare Zeit lang bleiben.

## 3.1 Funktionsweise und Aufbau

Das grundsätzliche Prinzip jeder Röhre beruht darauf, daß erhitzte Metalle aus ihrer Oberfläche Elektronen an die Umgebung abgeben können. Die Heizung selbst erfolgt nun mit der sogenannten Heizwendel. Jene Elektrode die die Elektronen abgibt ist die Katode. Die zweite wichtige Elektrode einer Röhre ist die Anode. Diese ist jene Elektrode, die jene von der Katode abgegebenen Elektronen durch ihr hohes Potential „absaugt“. Je nach Funktion der Röhre kommt jetzt noch eine unterschiedliche Anzahl an Steuergittern dazu.

Grundsätzlich sind die Röhren im Inneren des Glaskolbens luftleer gepumpt (Vakuum). Es gab jedoch auch spezielle Röhren mit einer besonderen Gasfüllung, die jedoch heute kaum mehr Bedeutung haben. Im Gegensatz dazu gibt es

noch die sogenannten Gasentladungsröhren, dessen Grundprinzip die Ionisation des im Inneren enthaltenen Edelgases ist. Die wichtigsten Anwendungsgebiete dieser Röhren sind Anzeigeröhren (Glimmlampen, Nixie-Röhren), Leuchtstoffröhren und Überspannungsableiter [10]. Diese Röhren sind nicht unbedingt als Verstärkeröhren geeignet und sollen hier nur vollständigkeithalber erwähnt werden.

Kurz zusammengefaßt besteht eine Röhre aus folgenden Anschlüssen:

- Heizung (je nach Art der Heizung ein oder zwei Anschlüsse. Siehe auch Abschnitt 3.1.1)
- Katode
- Anode
- Steuerelektroden (siehe Tabelle 3.1)

Je nach Röhre gibt es die in Tabelle 3.1 angegebene Anzahl an Steuerelektroden. Sie legen den Typ und die Funktion der Röhre fest. Zusätzlich gab es auch Röhren, die durch geeignete Anordnung der Elektroden im Inneren mehrere Einzelröhren in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht hatten. Auch diese sogenannten *Verbundröhren* haben so gut wie keine Bedeutung mehr.

Tabelle 3.1: Die Anzahl der Steuerelektroden legen die Benennung für unterschiedliche Röhrentypen fest.

Steuerelektroden	Röhrentyp
0	Diode
1	Triode
2	Tetrode
3	Pentode
4	Hexode
5	Heptode
6	Oktode

### 3.1.1 Heizung

Wie in Abschnitt 3.1 bereits einleitend erwähnt wurde, ist eine genügend hohe Anzahl an freien Elektronen die Grundvoraussetzung für die Funktion einer Röhre. Diese freien Elektronen stehen in ausreichendem Ausmaß zur Verfügung, wenn die Katode mittels einer Heizung erhitzt wird. Diese Erwärmung kann entweder indirekt oder direkt erfolgen.

Bei der indirekten Heizung wird ein zusätzlich in die Röhre eingebauter Heizfaden erhitzt und dieser erwärmt indirekt, mittels Wärmestrahlung, die Katode, die diese Heizwendel wie in Abbildung 3.1 skizziert, eng umschließt. In diesem

Bild erkennt man deutlich die emissionswirksame Schicht, die mit Isoliermasse überzogene Schicht und das Röhrchen, das die Heizwendel umschließt. Die Isoliermasse ist notwendig, um einen Kurzschluß zwischen Heizwendel und Katode zu verhindern. Dieser Aufbau hat zwar den Nachteil einer größeren Wärmeträgheit, dies kann allerdings bei Netzspannungsschwankungen sogleich als Vorteil genutzt werden.

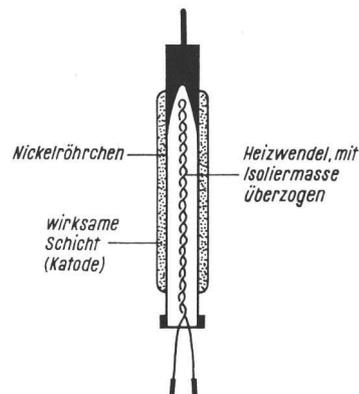


Abbildung 3.1: Aufbau einer indirekt geheizten Katode nach [11].

Bei der direkten Heizung dient ein Teil der Katode selbst als Heizung.

Es gibt verschiedene Materialien die ein gutes Emissionsvermögen aufweisen. Sehr oft verwendet man mit Strontium- und Bariumoxyd beschichtete Nickeloberflächen. Diese Struktur hat eine optimale Oberflächentemperatur von etwa 750 °C. Eine andere Möglichkeit ist ein mit Thorium beschichteter Wolframfaden. Dieser erreicht eine Temperatur von etwa 1650 °C.

#### 3.1.2 Getterung der Röhren

Der Innenraum einer Röhre muß möglichst luftleer sein. Je höher das Vakuum ist, umso qualitativ höherwertiger ist die hergestellte Röhre. Da jedoch bei Raumtemperatur noch Gase in den Elektroden gebunden sind, werden diese Elektroden während des Abspumpvorganges mittels Hochfrequenzheizung zum Glühen gebracht. Dies bewirkt, daß die im Metall gebundenen Gase entweichen und ebenfalls abgesaugt werden. Da jedoch im Betrieb an den Elektroden mitunter auch hohe Temperaturen auftreten, wird eine sogenannte „Getterpille“ in die Röhre mit eingebaut. Diese Pille ist ein kleines Erdalkalimetallstück, das die Eigenschaft hat eventuell auftretende Sauerstoff- oder Stickstoffreste an sich zu binden, da diese sonst das Vakuum verschlechtern würden. Diese Maßnahme verbessert die Qualität des Vakuums und die Lebensdauer der Röhre. Falls die silbrige Getterschicht flockig weiß geworden ist, deutet das darauf hin, daß die Röhre undicht geworden, und Luft ins Innere gelangt ist<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Man sagt auch: „Sie hat Luft gezogen“

### 3.1.3 Die Diode – Zweielektrodenröhre

Die im Abschnitt 3.1 einführend angegebenen zwei Anschlüsse genügen, um das einfachste Röhrenelement, nämlich die Diode, zu erhalten.

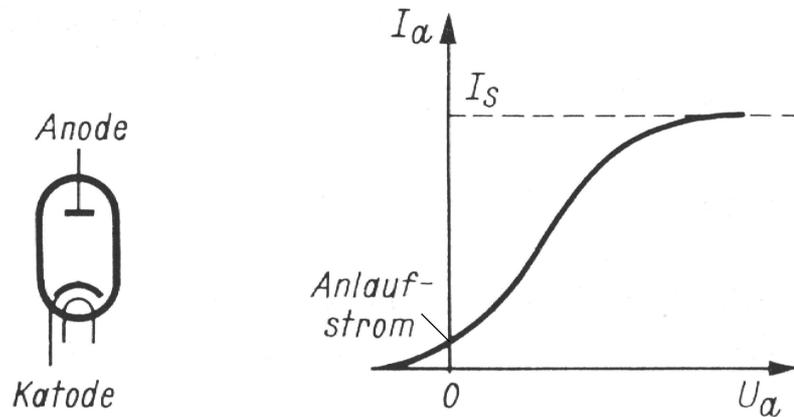


Abbildung 3.2: Schaltbild und Kennlinie einer Röhrendiode.  $U_a$  ist die Anodenspannung und  $I_a$  ist der entsprechende Anodenstrom. Bei fehlender Anodenspannung fließt bereits ein kleiner „Anlaufstrom“ [11].

In Abbildung 3.2 ist diese Diode mit der dazupassenden Kennlinie angegeben. Man erkennt, daß der Strom mit steigender Spannung ebenfalls ansteigt, bis er einen Sättigungszustand (Sättigungsstrom) erreicht. Dieser Sättigungsstrom hängt vom Material und der Temperatur der beheizten Katode ab. Wird die Anodenspannung verringert und kehrt sie sogar die Polarität um, so wird der Anodenstrom immer kleiner, bis er schließlich verschwindet. Das Verhalten ist ähnlich einer Halbleiterdiode, nur daß im Gegensatz zu dieser im Falle einer verschwindenden Anodenspannung ein deutlich höherer, sogenannter Anlaufstrom, fließt.

### 3.1.4 Die Triode – Dreielektrodenröhre

Wenn man nun der Diode zwischen Katode und Anode eine weitere Elektrode einfügt, erhält man die *Triode*. Diese weitere Elektrode heißt *Steuergitter* oder kurz *Gitter*. In Abbildung 3.3 ist das Schaltbild einer Triode und die Triodenkennlinie angegeben.

Die Aufgabe dieses Gitters ist es, den Elektronenstrom von der Katode zur Anode weitestgehend unabhängig von Anodenspannungsänderungen zu halten. Die Änderung der Steuerspannung wirkt dabei wesentlich stärker auf den Anodenstrom als eine etwaige gleichgroße Änderung der Anodenspannung. Diese Steuerwirkung des Gitters gibt die Grundlage für die Verwendung der Triode und der Mehrgitterröhre als Verstärkerelement [9].

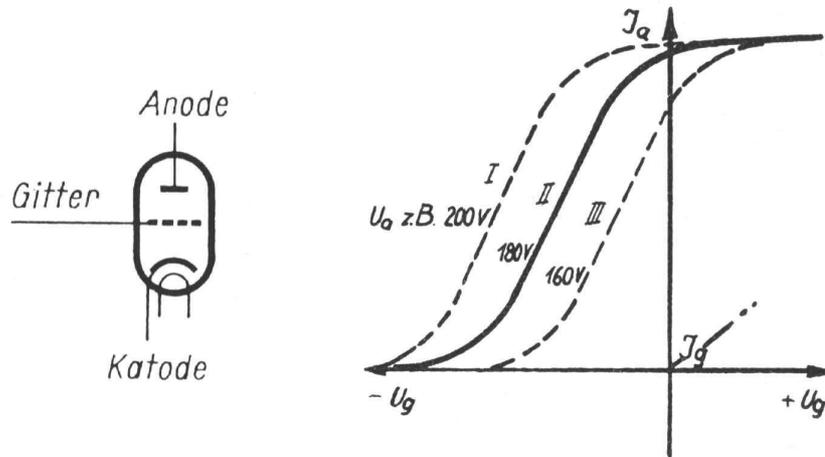


Abbildung 3.3: Schaltbild und Kennlinie einer Röhrentriode. Anodenstrom als Funktion der *Gitterspannung* bei drei verschiedenen Anodenspannungen (200 V, 180 V, 160 V). Zusätzlich ist der *Gitterstrom* als Funktion der Gitterspannung angedeutet [9], [11].

Ein weiteres interessantes Detail ist in Abbildung 3.3 abzulesen. Der Steuer-gitterstrom  $I_g$  verschwindet für negative Gitterspannungen. Er tritt erst bei einer positiven Gitterspannung auf. Dieses Detail ist ausschlaggebend dafür, ob eine Triode leistungslos ( $I_g=0$ ) oder leistungsbehaftet ( $I_g > 0$ ) gesteuert wird.

Ein wichtiger Begriff, der vor allem bei Tetroden eine große Auswirkung im Betrieb hat, ist der sogenannte *Durchgriff*. Er kann auf folgende Weise durch eine Messung bestimmt werden:

1. Zuerst wird die Anodenspannung konstant gehalten und jene Differenz der Gitterspannung  $\Delta U_g$  gemessen, die eine gewisse Anodenstromänderung  $\Delta I_a$  ergibt.
2. Im nächsten Schritt wird die Anodenspannung solange um  $\Delta U_a$  (bei konstant gehaltener Gitterspannung) geändert, bis die gleiche Anodenstromänderung  $\Delta I_a$  wie im obigen Punkt zu messen ist.
3. Der Durchgriff berechnet sich nun zu  $D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a}$ .

Die Stromänderung bei der Durchgriffsbestimmung kann prinzipiell beliebig gewählt werden, sollte jedoch je nach der verwendeten Röhre und dem geplanten Arbeitspunkt geschickt ausgewählt werden.

Man kann sich den Durchgriff in etwa vorstellen, als den Einfluß der Anode auf den Anodenstrom durch das dazwischen liegende Steuergitter *hindurch*. Da die Gitterspannung einen deutlich größeren Einfluß auf den Anodenstrom als die Anodenspannung hat, ist der Durchgriff stets kleiner als 1 und wird oft mit 100 multipliziert in % angegeben.

### 3.1.5 Mehrgitterröhren

Nun gibt es noch Röhren mit mehr als nur einem Gitter. In Tabelle 3.1 wurde bereits eine Übersicht über diese Röhrentypen angegeben. Da es sich in dieser Diplomarbeit um zwei Hochleistungsverstärker handelt, die jeweils eine Tetrode als Verstärkerelement haben, soll in diesem Abschnitt Augenmerk auf diesen Röhrentyp gelegt werden.

Um nun zur Tetrode zu kommen, fügt man der Triode einfach ein weiteres Gitter hinzu. Dieses Gitter wird zwischen Steuergitter und Anode eingefügt und heißt *Schirmgitter* oder kurz *Schirm*. Es erhält eine positive Spannung die jedoch in jedem Betriebszustand kleiner als die Anodenspannung sein muß.

Tetroden haben gegenüber Trioden zwei entscheidende *Vorteile*:

- Die Gitter-Anodenkapazität ist wesentlich kleiner, da sie nun (aus der Sicht der Elektronen) aus zwei in Serie geschalteten *Ersatzkondensatoren* besteht. Diese kann man sich entstanden denken aus der Gitter-Schirm und der Schirm-Anodenkapazität. Diese verkleinerte Kapazität ist zur Vermeidung unerwünschter Rückwirkungen vom Ausgangs- auf den Eingangskreis sehr wichtig (siehe auch den Abschnitt 3.3.2 über die *Neutralisation*).
- Der Durchgriff von der Anode auf das Steuergitter ist wesentlich kleiner. Aus diesem Grund kann der Verstärkungsfaktor größer gewählt werden.

Es soll jedoch auch ein Effekt nicht unerwähnt bleiben, der den Betrieb einer Tetrode unter Umständen nachteilig beeinflussen kann.

- Durch die zweifache Beschleunigung der Elektronen, zuerst durchs Schirmgitter und anschließend durch die Anode, treffen sie mit einer sehr hohen Energie auf die Anodenoberfläche auf. Dies bewirkt, daß Sekundärelektronen aus dem Anodenblech herausgeschlagen werden, die bis zum Schirmgitter zurückfliegen können. Dies hat unter Umständen gravierende Auswirkungen auf die Kennlinie und somit auf den Betrieb der Tetrode [9], [11].

In der Abbildung 3.4 ist noch ein abschließender Überblick über die weiteren Mehrgitterröhren gegeben. Die Abbildung wurde aus [9] entnommen, in dem diese Röhrentypen auch näher beschrieben sind. Dieses Buch ist als weiterführende Literatur, nicht nur zum Thema Röhren, sehr zu empfehlen.

### 3.1.6 Der Aufbau einer Röhre

Zum besseren Verständnis des physikalischen Aufbaus einer Röhre, möchte ich hier ein Bild angeben, das den prinzipiellen Aufbau einer Triode wiedergibt. Es ist aus dem Buch von Diefenbach ([11]) und soll einen Einblick in den Aufbau einer Röhre geben.

Die Erweiterung der in Abbildung 3.5 angegebenen Triode in eine Mehrgitterröhre ist einfach durch das Einfügen der gewünschten Steuergitter an geeigneter Stelle möglich.

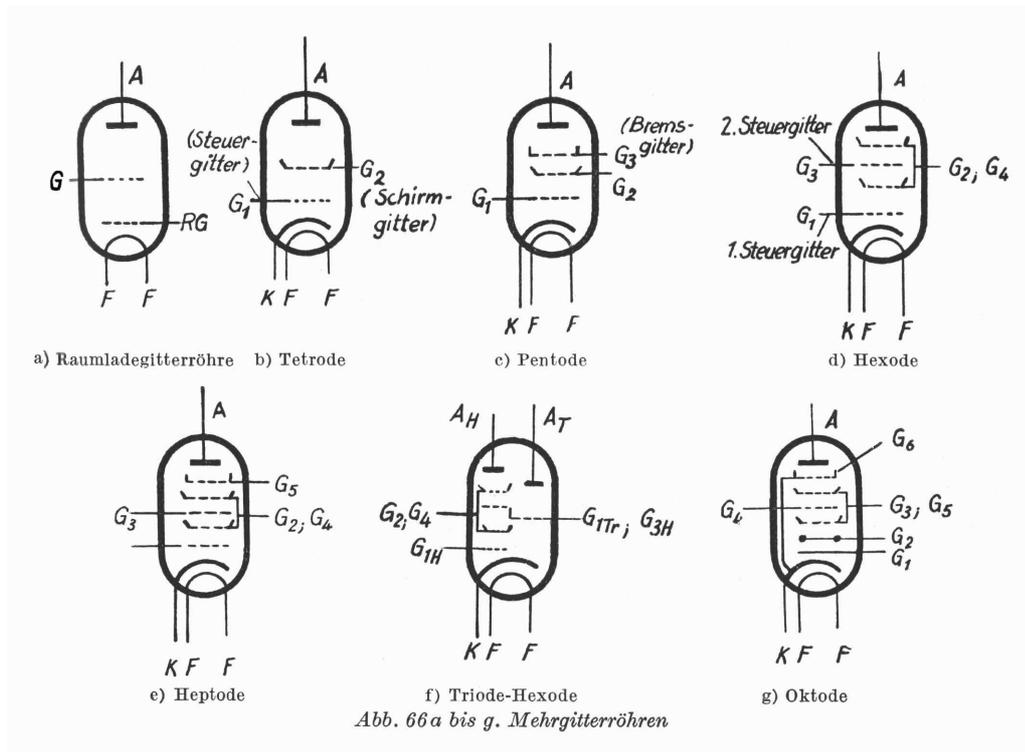


Abbildung 3.4: Übersicht über die weiteren, hier nicht näher beschriebenen Mehrgitterröhrentypen [9].

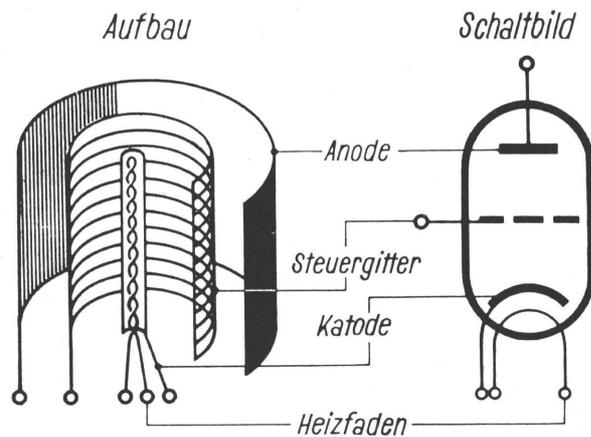


Abbildung 3.5: Aufbau einer Röhrentriode. Die Entstehung einer Mehrgitterröhre kann man sich gedanklich durch das zusätzliche Einfügen konzentrisch angeordneter Steuer- (Steuer-gitter) Gitter an der jeweiligen Stelle bildlich vorstellen [11].

## 3.2 Gegenüberstellung Elektronenröhre - Transistor

Obwohl die Elektronenröhre und der Transistor nach einem vollkommen unterschiedlichen physikalischen Prinzip arbeiten, sind sie sich doch ähnlicher als man vermuten könnte. In einer Verstärkerschaltung werden von beiden Bauteilen die entsprechenden Ausgangsspannungen von den jeweiligen Steuereingängen gesteuert. In der folgenden Abbildung 3.6 werden die beiden Verstärkerelemente bezüglich ihrer Anschlußbezeichnungen gegenübergestellt [12], [13].

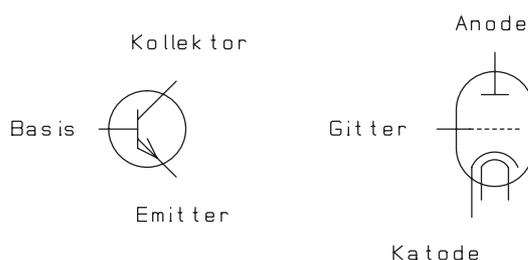


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Schaltbilder von Transistor und Elektronenröhre. Links: Transistor mit Basis, Kollektor und Emitter. Rechts: Röhre mit Gitter, Anode und Katode. Die Heizung ist bei der Röhre nicht explizit beschriftet, aber für die Funktion essentiell [12], [13].

Auf der linken Seite der Abbildung 3.6 ist der Transistor mit seinen Anschlußpins Kollektor, Basis und Emitter dargestellt. Demgegenüber ist auf der rechten Seite zusätzlich die Elektronenröhre ihrerseits mit Anode, Gitter und Katode angegeben.

## 3.3 Röhregrundschaltungen

Wie beim Transistor gibt es auch bei den Röhren die entsprechenden Grundschaltungen. Da es bei den Röhren genauso wie bei den Transistoren, außer bei Spezialanwendungen, die wir hier außen vor lassen, drei Steuereingänge gibt, unterscheidet man drei Grundschaltungen. Jene Elektrode die in Bezug auf den Eingang und den Ausgang auf gleichem Potential liegt, legt den Namen für die jeweilige Grundschaltung fest.

In der Abbildung 3.7 sind diese drei Grundschaltungen der Röhren gegenübergestellt. Die am häufigsten verwendete Schaltung ist die Katodenbasisschaltung. Aus diesem Grund, und da beide in dieser Diplomarbeit behandelten Sender in der Katodenbasisschaltung betrieben werden, möchte ich mich in diesem Abschnitt auf diese beschränken. Als weiterführende Literatur können hier die Bücher von Hiller [8] und Lechner [14] empfohlen werden.

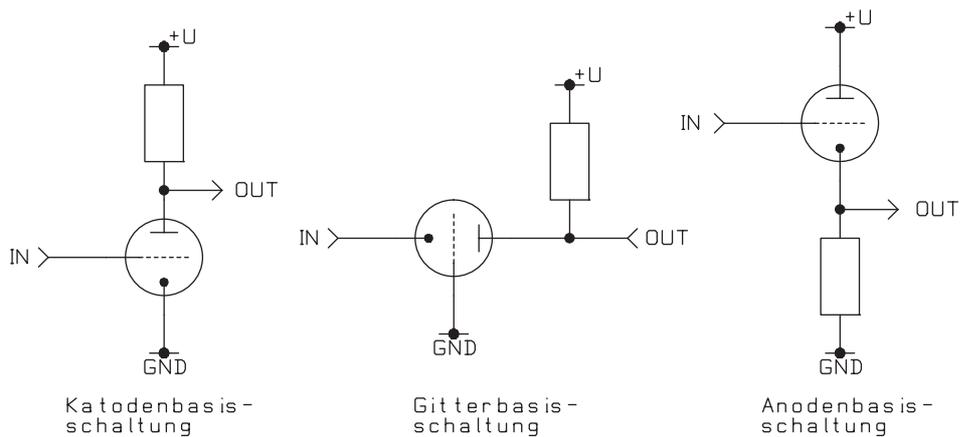


Abbildung 3.7: Drei mögliche Röhren-Grundschaltungen. Diese Schaltungen sind nicht vollständig, sondern sollen nur das Prinzip der jeweiligen Grundschaltung aufzeigen.

### 3.3.1 Katodenbasisschaltung

Die Katodenbasisschaltung ist die für größere Leistungen am ehesten verwendete Grundschaltung. In Abbildung 3.8 ist ein Prinzipschaltbild für diese Grundschaltung dargestellt.

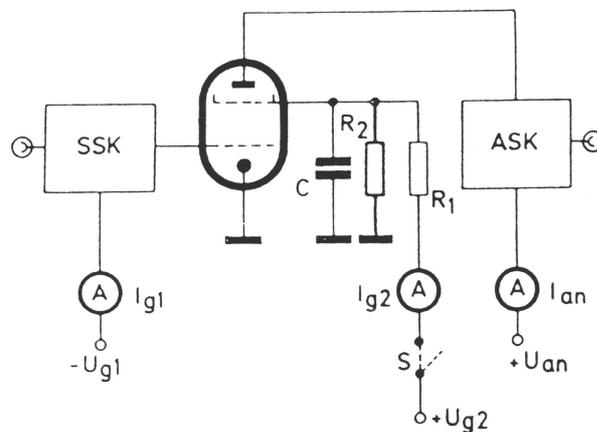


Abbildung 3.8: Prinzipschaltbild der Katodenbasisschaltung. SSK...Steuergitterschwingkreis, ASK...Anodenschwingkreis, A...Meßgeräte [6].

Die beiden Schwingkreise SSK (Steuergitterschwingkreis) und ASK (Anodenschwingkreis) haben im Wesentlichen drei Aufgaben:

1. Transformation der beidseitig wirkenden (unterschiedlichen) Impedanzen.

Um Leistungsanpaßung zu erzielen, müssen diese Impedanzen gegenseitig angepaßt werden.

2. Unterdrückung der Oberwellen. Die nicht erwünschten Oberwellenanteile werden entsprechend den einzuhaltenden gesetzlichen Bestimmungen auf einen Mindestpegel reduziert.
3. Ein- bzw. Auskoppelung der entsprechenden Betriebsspannungen.

Der Aufbau und die Funktion der beiden Schwingkreise sind im Abschnitt 4.1 detailliert erklärt.

Die Schirmgitterspannung  $+U_{g2}$  wird abschaltbar über eine Überwachungsvorrichtung an den entsprechenden Anschluß zugeführt. Die Anoden- und Gitteranschlüsse werden bei Leistungsverstärkern generell überwacht, um im Fehlerfall entsprechend schnell abschalten zu können und so die Anlage zu schützen.

Der Arbeitspunkt des Steuergitters kann jetzt nach folgendem Gesichtspunkt gewählt werden:

- *gitterstromfreier* Betrieb: in diesem Fall wird der Arbeitspunkt der Röhre so gewählt, daß zu keinem Zeitpunkt der Aussteuerung ein Gitterstrom fließt *oder*
- *gitterstrombehafteter* Betrieb: hier ist es sehr wohl möglich, daß bei entsprechend hoher Aussteuerung ein Steuergitterstrom fließen kann.

Jeder dieser beiden Betriebsarten hat seine Vor- und Nachteile, die in den Büchern [8], [9], [14] und [15] ausführlichst beschrieben sind. Wichtig in diesem Zusammenhang, ist die unterschiedliche Belastung und damit einhergehende Dimensionierung der ansteuernden Treiberstufe.

#### 3.3.2 Neutralisation

Zum Abschluß dieses Kapitels wird als wichtigste Maßnahme zur Unterdrückung der Schwingneigung noch der Begriff der *Neutralisation* behandelt.

Über die aufbaubedingt stets vorhandenen parasitären Kapazitäten ( $C_1$  und  $C_{ag1}$  in Abbildung 3.9) ergibt sich eine störende Rückkopplung des Ausgangssignals zurück an den steuernden Eingang. Diese Rückkopplung verstärkt bei ungünstigen Verhältnissen (Stichwort: Amplituden- und Phasenbedingungen bei negativ rückgekoppelten Verstärkern in den Büchern [16], [17] und [18]) eine unerwünschte Schwingneigung.

Durch eine Art „Frequenzkompensation“ wird dieses ungünstige Verhalten verbessert bzw. fast vollständig unterbunden. In Abbildung 3.9 sind mit  $C_2$  und  $C_n$  jene Kondensatoren angegeben, die für diese Kompensation zuständig sind. Als Dimensionierungsvorschrift kann man  $\frac{C_{ag1}}{C_1} = \frac{C_n}{C_2}$  angeben ([4], [6], [8] und [9]).  $C_n$  kann als Trimmkondensator ausgeführt werden, um Streuungen der Röhrenkapazitäten ausgleichen zu können.

Durch das Einfügen des Schirmgitters haben Tetroden generell kleinere parasitäre Kapazitäten als Trioden. Die Schwingneigung ist deshalb bei der Verwendung

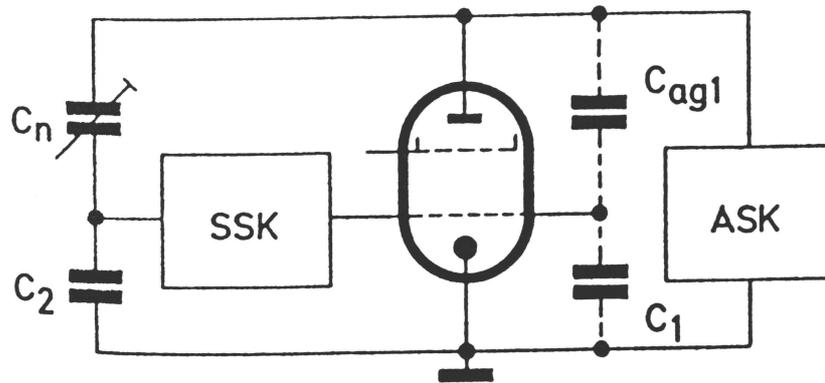


Abbildung 3.9: Katodenbasisschaltung mit den in der Röhre aufbaubedingt vorhandenen parasitären Kapazitäten  $C_{ag1}$  und  $C_1$ . Diese beiden Kondensatoren werden über die Neutralisationskondensatoren  $C_2$  und  $C_n$  neutralisiert [6].

von Tetroden nicht so ausgeprägt wie es bei den Dreielektrodenröhren der Fall ist.

Um beim Aufbau des Senders die Schwingneigung günstig zu beeinflussen, können mitunter folgende Maßnahmen sehr hilfreich sein:

- Gitter- und Anodenkreis räumlich trennen
- Abschirmwände zwischen diesen Kreisen einbauen
- Chassis falls möglich *elektrisch* mitverwenden
- die Versorgungsleitungen kurz halten und verdrillen
- verdrosseln der empfindlichen Leitungen (Ferritperlen)
- Neutralisationskondensatoren nicht zu nahe an Gehäuseteilen oder Frontplatte platzieren

Die Neutralisation wie sie in der Abbildung 3.9 dargestellt ist, ist nur eine von mehreren möglichen. Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene, mehr oder weniger brauchbare Verfahren zur Neutralisation entwickelt. Siehe auch die Literatur zur *Anodenneutralisation* und *Gitterneutralisation* in [4], [11] und [15].

### 3.4 Besonderheiten von Elektronenröhren

Es wurden bereits einige Fakten angeführt, welche die wesentlichen Unterschiede zwischen Transistoren und Röhren aufzeigen sollen. Nun möchte ich zum Abschluß dieses Themas noch einige beachtenswerte Punkte anführen, die beim

praktischen Aufbau eines Sendeverstärkers nützlich sind. Obwohl es im Wesentlichen um Röhrenverstärker geht, ist der eine oder andere Punkt durchaus auch für Transistorverstärker anwendbar.

#### 3.4.1 Vakuumdrehkondensatoren

Das Dielektrikum eines Vakuumdrehkondensators ist Vakuum. Die Toleranzen dieser Kondensatoren können bei sorgfältiger Herstellung auch entsprechend klein gehalten werden. Die Umwelteinflüsse können aufgrund der isolierten Bauweise ebenfalls sehr klein gehalten werden.

Um den für hohe Qualität hinreichend kleinen ESR<sup>3</sup> erreichen zu können, ist es notwendig für die Elektroden ein Material mit hoher Leitfähigkeit zu verwenden. Bei Hochfrequenzanwendungen wird des Öfteren die Oberfläche eines Leiters versilbert, um die aufgrund des Skin效ekts an der Oberfläche wirksame Leitfähigkeit zu erhöhen. Zusätzlich ergibt eine versilberte Oberfläche auch sehr kleine Übergangswiderstände.

Aufgrund des mechanisch sehr empfindlichen Gehäuses ist es wichtig, dieses keiner allzu großen Erschütterungen auszusetzen.

Nicht zuletzt sollte man bei Verwendung dieser Kondensatoren auf entsprechende Isolationsabstände achten, da sie meistens aufgrund ihrer Eigenschaften mit hohen Spannungen betrieben werden.

#### 3.4.2 Kühlung

In Hochleistungsverstärkern wird eine enorme Menge an Energie umgesetzt. Ein Teil dieser Energie ist Verlustwärme die abgeführt werden muß, um keinen Schaden durch Überhitzung zu verursachen. Bei höheren Verlustleistungen, so wie in unserem Fall bei der Endröhre, ist es am günstigsten diese durch Zwangskonvektion abzuführen.

Das bedeutet nichts anderes, als eine durch Lüfter erzeugte, verstärkte Luftkonvektion hervorzurufen und damit die wärmeerzeugenden Röhren zu kühlen. Zu diesem Zweck sind an der Röhre entsprechende Löcher und Schlitze angebracht. Diese bewirken ein optimales Vorbeistreichen der Kühlluft an der heißen Röhre.

Die folgenden Regeln erscheinen mir hier angebracht:

- Das Gebläse muß spätestens mit der Röhrenheizung eingeschaltet werden, und nach dem Ausschalten des Senders einige Minuten nachlaufen (Nachlaufdauer ist röhrenabhängig). Eine ständige Überwachung des Luftstroms wird dringend empfohlen.
- Vor der Erstinbetriebnahme ist zu überprüfen, ob die Kühlluft tatsächlich ungehindert den Weg durch den Röhrensockel und die vorgesehenen Kühlschlitze findet.

---

<sup>3</sup>Equivalent Serial Resistance = Ersatzserienwiderstand

- Um sogenannte *Wärmereflexionen* zu vermeiden, ist ein Mindestabstand zu den umgebenden Objekten einzuhalten. Als Faustregel gilt hier etwa ein Abstand von einem Röhrendurchmesser.
- Eine Lockerung der Röhre ist durch eine entsprechende mechanische Verriegelung zu verhindern.
- Beim verwendeten Gebläse muß auch bei zwangsläufig auftretendem Rückstau die Funktion gewährleistet bleiben.

#### 3.4.3 Reihenfolge der Inbetriebnahme

Das Einschalten eines Röhrenverstärkers ist nicht trivial und bedarf einer einzuhaltenden Reihenfolge. Besonders die Gitterelektroden und die Heizwendel sind sehr empfindlich auf Überlastung.

Zum Schutz der Röhre wird deshalb folgende Einschaltreihenfolge dringend empfohlen:

1. Einschalten des Ventilators.
2. Einschalten der Heizung. Manche Röhren benötigen regelrecht ein schonendes Hochfahren der Heizspannung.
3. Nach dem Abwarten einer Vorheizzeit (röhrenabhängig), können nun *gleichzeitig* die Anodenspannung, die Schirmgitterspannung und die Steuergittervorspannung angelegt werden. Auf keinen Fall darf jedoch die Schirmgitterspannung *vor* der Anodenspannung an der Röhre anliegen. Als Richtwert kann eine Vorheizzeit von 3 bis 5 Minuten angenommen werden.

Das Ausschalten des Senders geschieht sinngemäß in der umgekehrten Reihenfolge. Der Ventilator muß jedoch noch eine gewisse Zeit nachlaufen, um eine ausreichende Kühlung der nach wie vor heißen Endröhre zu gewährleisten. Erst wenn die Röhre aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität ausreichend abgekühlt ist, darf das Gebläse ausgeschaltet werden.

Im Fehlerfall ist der Sender natürlich sofort abzuschalten. Bei entsprechend kluger Steuerung ist es natürlich auch möglich (und ratsam) nur die dem Fehler entsprechenden Baugruppen abzuschalten, und den Lüfter nach Möglichkeit noch nachlaufen zu lassen.

# Kapitel 4

## Der Telefunken - Sender

Dieser Sendeverstärker ist ein professionell zu verwendender Leistungsverstärker im KW-Band. Er dient dazu, das am Signaleingang anliegende amplituden- oder frequenzmodulierte Signal zu verstärken. Dabei spielt es keine Rolle, ob dieses Signal ein militärisches, Fernseh-, Radio-, Amateurfunk- oder anderwärtiges Signal ist.

In Abbildung 4.1 ist der gesamte Sendeverstärker zu sehen. Er besteht im Wesentlichen aus einem Steuersender, einem Modulationsgerät, dem Netzgerät, einem Organisator und dem eigentlichen Endverstärker, die jeweils in einem 19"-Einschub zu einem Gesamtrack kombiniert sind [19]. Der als Zubehör integrierbare Automatiktuner ist in der Lage ein Stehwellenverhältnis  $s \leq 3$  automatisch anzupassen. Die voreingestellte Ausgangsleistung wird im Automatikbetrieb innerhalb einer Toleranz von +15% und -10% eingehalten. Die wichtigsten technischen Daten des Verstärkers sind in Tabelle 4.1 kurz zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Telefunken-Senders (Details siehe unter [19]).

Frequenzbereich	1,5 MHz bis 30 MHz
Ausgangsleistung	1 kW (Dauerleistung)
Antennenausgang	50 $\Omega$ unsymmetrisch
Dämpfung des nichtlinearen Nebensprechens	$\geq 40$ dB
Nebenwellendämpfung	$\approx 75$ dB
Oberwellendämpfung	$> 46$ dB
Netzspannung	230 V -10% +5%
Netzfrequenz	50/60 Hz $\pm 5\%$
Leistungsaufnahme	3000 VA

Da es in dieser Diplomarbeit im Wesentlichen um den Leistungsverstärker geht, möchte ich die anderen Baugruppen im Folgenden nur kurz zusammenfassen (weiterführende Informationen siehe [19]).

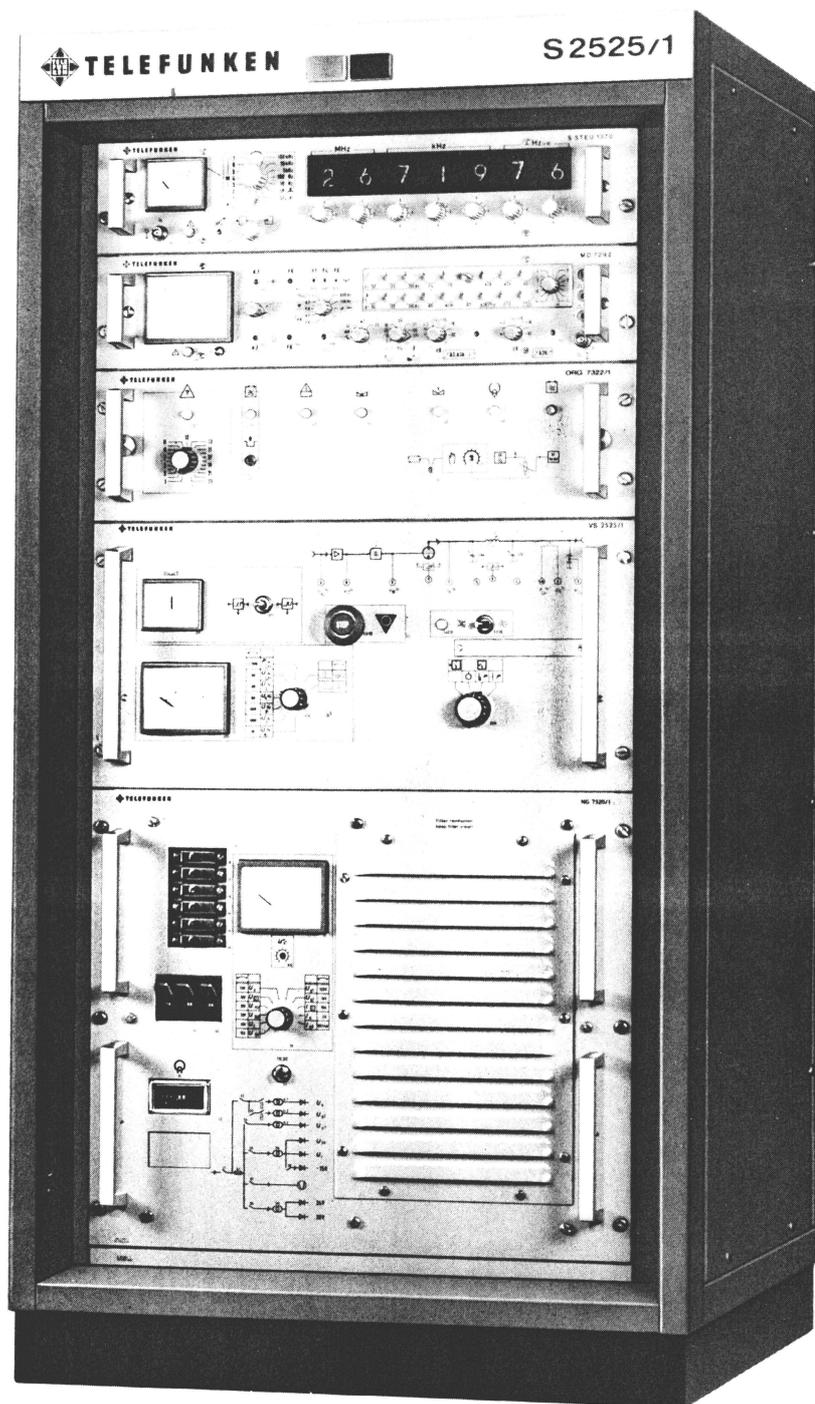


Abbildung 4.1: Bild der kompletten Sendeanlage. In 19-Zoll Einschüben sind sowohl die Steuervorstufe, der Organisator, das Netzgerät und die Leistungs-Endstufe untergebracht [19].

## Steuervorstufe

Je nach Modell besteht die Steuervorstufe entweder aus der Kombination Steuer-sender und separatem Modulationsgerät oder dem Steuersender mit integriertem Tast- und Modulationsteil.

## Organisator

Die Funktionseinheiten des Organisators lassen sich folgendermaßen zusammen-fassen:

- Steuerung der Stummabstimmung
- Steuerung der Grob- bzw. Feinabstimmung der Kondensator- und Spulen-antriebe
- Regelung der Sendeleistung
- Bedienschnittstelle nach außen (Human Interface)
- Überwachung und Auswertung der einzelnen Kontroll- und Meßsignale
- meßtechnische Integration der als Zubehör erhältlichen Sonderfunktionen (z.B. Automatiktuner)

## Netzgerät

Im Netzgerät werden alle für den Betrieb des Sendeverstärkers notwendigen Span-nungen erzeugt. Zusätzlich ist im Einschub des Netzgerätes auch der Lüfter für die Kühlluftversorgung der Endröhre untergebracht.

## Endverstärker

Der Endverstärker ist der eigentliche Leistungsverstärker der das von der Vor-stufe kommende Signal verstärkt. Der Aufbau und die Funktionsgruppen dieses Einschubs werden im Folgenden detailliert beschrieben.

## 4.1 Der Endverstärker – eine Übersicht

Aus der Abbildung 4.2 ist das Blockschaltbild des Endverstärkers zu sehen [19]. Er besteht aus:

- Treiberverstärker
- Gitterbandpaß
- Leistungsendstufe
- Anodenkreis

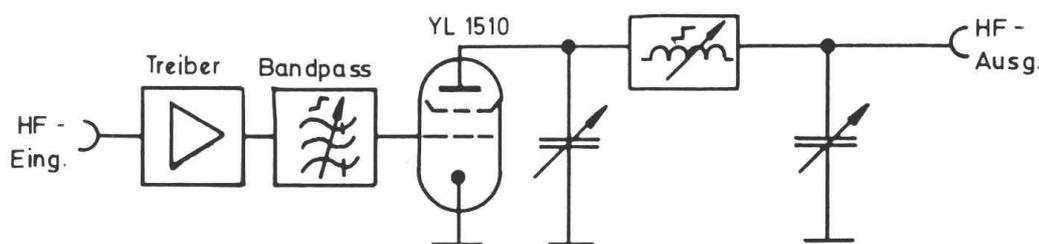


Abbildung 4.2: Blockschaltbild der gesamten Leistungsstufe. Sie besteht aus Treiberstufe, Bandpaßfilter, Endstufenröhre und dem Anodenbandpaß [19].

Der Treiberverstärker ist breitbandig ausgeführt und verstärkt das Eingangssignal von etwa 100 mW auf ungefähr 50 W.

Über einen Breitbandübertrager gelangt dieses Signal zum Gitterbandpaß. Dieser Bandpaß dient als Anpaßung und stellt dem Treiber annähernd gleichbleibende Verhältnisse zur Verfügung. Dies ist notwendig, da sich die Impedanzverhältnisse am Eingang der Leistungsendlöhre über das gesamte Kurzwellenband gravierend ändern. Diese Änderung wird vorwiegend durch die Eingangskapazität der Röhre hervorgerufen.

Die Leistungsstufe selbst ist eine Hochleistungs-Tetrode und wird leistungslos angesteuert („gitterstromfreier Betrieb“). Als Tetrode bezeichnet man eine Vakuumröhre, die neben den grundsätzlich notwendigen Anschlüssen wie Heizung, Katode und Anode noch zusätzlich ein Steuergitter und ein Schirmgitter enthält (siehe Abschnitt 3.1).

Am Ausgang dieser Leistungsstufe (an der Röhrenanode) schließt nun der Anodenkreis an. Dies ist ebenfalls eine Anpaßschaltung die jetzt den Röhrenarbeitswiderstand von etwa  $700\ \Omega$  an einen  $50\ \Omega$ -Anschluß anpaßt. Zusätzlich liegt seine Aufgabe noch darin, Oberwellenanteile ausreichend zu dämpfen und somit von der Antenne fernzuhalten.

Vollständigkeitshalber sollte noch erwähnt werden, daß sowohl der Gitterbandpaß als auch der Anodenkreis nicht für das gesamte Kurzwellenband ausgelegt, sondern in mehrere Bereiche aufgeteilt ist. Je nach verwendeter Frequenz werden automatisch im Organisator die passenden Kreise ausgewählt.

Bevor nun dieses verstärkte Signal an den Antennenanschluß gelangt, wird ein Richtkoppler dazwischengeschaltet. Dessen wesentliche Aufgabe ist die Messung der reflektierten Leistung. Diese ist in einem korrekt abgeschlossenen System gleich Null. Ist der Abschlußwiderstand außerhalb der zulässigen Toleranz, entsprechend einem Stehwellenverhältnis größer als drei, dann schaltet der Organisator den Sender aus Sicherheitsgründen ab, bevor er Schaden nimmt [19].

Da sowohl der Gitterbandpaß als auch der Anodenkreis sowie vor allem die Leistungsstufe von dieser Diplomarbeit betroffen sind, werden diese Baugruppen etwas näher beschrieben.

### 4.1.1 Gitterbandpaß

Da der Gitterbandpaß nicht für den gesamten Kurzwellenbereich dimensioniert werden kann, ist er in sechs Frequenzbereiche aufgeteilt. Diese sechs Bandpässe befinden sich räumlich gesehen auf einem gemeinsamen Aufbau, dem sogenannten „Gitterkarussell“. Je nach gewünschter Frequenz wird einer dieser sechs Bandfilter durch das Drehen dieses „Karussells“ ausgewählt. Der Antrieb erfolgt durch einen Stellmotor, der von der Kreismotorsteuerung seine Ansteuersignale erhält. Diese Kreismotorsteuerung wurde adaptiert und für den zur Verfügung stehenden Sender aufgebaut. Zu diesem Zweck wurde ein Schaltplan entworfen und mit Hilfe eines Layoutprogramms das entsprechende Layout für eine selbsthergestellte Platine gezeichnet. Danach wurde diese Platine im Labor hergestellt, mit Bauteilen bestückt und nach einer intensiven Testphase in Betrieb genommen. Den genauen Aufbau dieser Platine und detaillierte Informationen hierzu sind im Abschnitt 4.4 („Kreismotorsteuerung“) nachzulesen.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang noch folgendes interessante Detail: Wie in Abschnitt 4.1 bereits beschrieben, wird die Leistungsendstufe leistungslos angesteuert. Der Gitterbandpaß ist in diesem Zusammenhang auch dafür zuständig, die von der Treiberstufe zugeführte Leistung zu absorbieren. Das darf keinesfalls unterschätzt werden, denn es sind immerhin knapp 50 W die in den thermischen Berechnungen miteinbezogen werden müssen, um eine Überlastung der Bauteile zu verhindern.

### 4.1.2 Leistungsendstufe

Der wichtigste Bestandteil der Endstufe ist zweifellos die Leistungs-Elektronenröhre. Die wichtigsten Daten der in diesem Sender verwendeten Röhre sind in Tabelle 4.2 zusammengefaßt.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften der im vorliegenden Telefunken Sender verwendeten Endröhre [19].

Bezeichnung	YL1510
Typ	Tetrode mit indirekter Heizung
Heizdaten	12,6 V @ 3,7 A
max. Anodenverlustleistung	1500 W
max. Anodenspannung	1850 V
max. Frequenz	30 MHz

Auffallend bei dieser Röhre ist der großzügig dimensionierte Kühlkörper. In diesem Zusammenhang sei nur kurz darauf hingewiesen, daß die maximale Anodenverlustleistung immerhin 1500 W beträgt. Schließlich muß diese Verlustleistung durch geeignete Kühlmaßnahmen auch entsprechend abgeführt werden. Der Lüfter der diese Kühlluft erzeugt, ist im Netzgerät dieses Senders untergebracht.

Durch die schwierige Beschaffbarkeit und den hohen Preis wird bereits darüber nachgedacht, diese Röhre durch eine Parallelschaltung von mehreren, einfacher beschaffbarer Einzelröhren zu ersetzen. Die Detailplanung und Umsetzung dieser Idee wird jedoch Gegenstand einer nachfolgenden Diplomarbeit sein.

Eine genauere Beschreibung und der prinzipielle Aufbau von Röhren ist im Abschnitt 3.1 näher beschrieben.

### 4.1.3 Anodenkreis

Der grundsätzliche Aufbau ist dem des Gitterbandpaßes in Abschnitt 4.1.1 sehr ähnlich. Anstelle von sechs Filtern sind es im Anodenkreis insgesamt elf Filter, die je nach ausgewählter Frequenz vom Organisator ausgewählt werden können. Diese Filter sind ebenso wie beim Bandpaß auf einem gemeinsamen „Anodenkarussell“ montiert, welches von einem Stellmotor angetrieben wird. Für Frequenzen unterhalb von 8,5 MHz bildet das Anodenfilter ein  $\pi$ -L-Netzwerk. Im Frequenzbereich 8,5 MHz und darüber ist nur mehr ein  $\pi$ -Filter wirksam.

Die Spulen dieser Bandpässe sind auf dem Karussell untergebracht und mit diesem mechanisch starr verbunden. Die beiden Kondensatoren sind als Vakuumdrehkondensatoren ausgeführt und nicht auf dem Karussell, sondern im Chassis des Senders untergebracht.

Die elf Stellungen des Anodenkarussells bewirken jeweils eine Grobabstimmung des Anodenkreises. Zu diesem Zweck werden die Spulen in vorprogrammierte, vom Organisator aufgrund der ausgewählten Frequenz vorgegebene Positionen gebracht. Bei der Feinabstimmung werden danach die beiden Vakuumdrehkondensatoren durch Schrittmotoren in die gewünschte Position gebracht. Die Ansteuerung dieser Drehkondensatoren wurde ebenfalls im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelt. Dazu wurde wiederum ein Leiterplattenlayout gezeichnet, eine Platine aufgebaut, getestet und in Betrieb genommen. Details zu dieser Platine sind im Abschnitt 4.2 zu finden.

## 4.2 Schrittmotorsteuerung

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden einige Platinen für den Telefunken-Sender entwickelt und aufgebaut. Eine davon dient als Ansteuerung der Schrittmotoren für die beiden Vakuumdrehkondensatoren. Die prinzipielle Aufgabe dieser Drehkondensatoren wurde in Abschnitt 4.1.3 erläutert. Um einen Gesamtüberblick über diese Steuerung zu erhalten, ist in Abbildung 4.3 ein Blockschaltbild angegeben [19].

In Bildmitte sind die beiden mit „Karte.021“ bezeichneten Schrittmotorkarten zu erkennen. Diese steuern die beiden Vakuumdrehkondensatoren (C286 und C287) an, die im Anodenkreis (hier in  $\pi$ -Schaltung dargestellt) des Leistungsverstärkers liegen. Um die Schrittmotoren schnell und gezielt ansteuern zu können, werden dafür die entsprechenden Signale generiert.

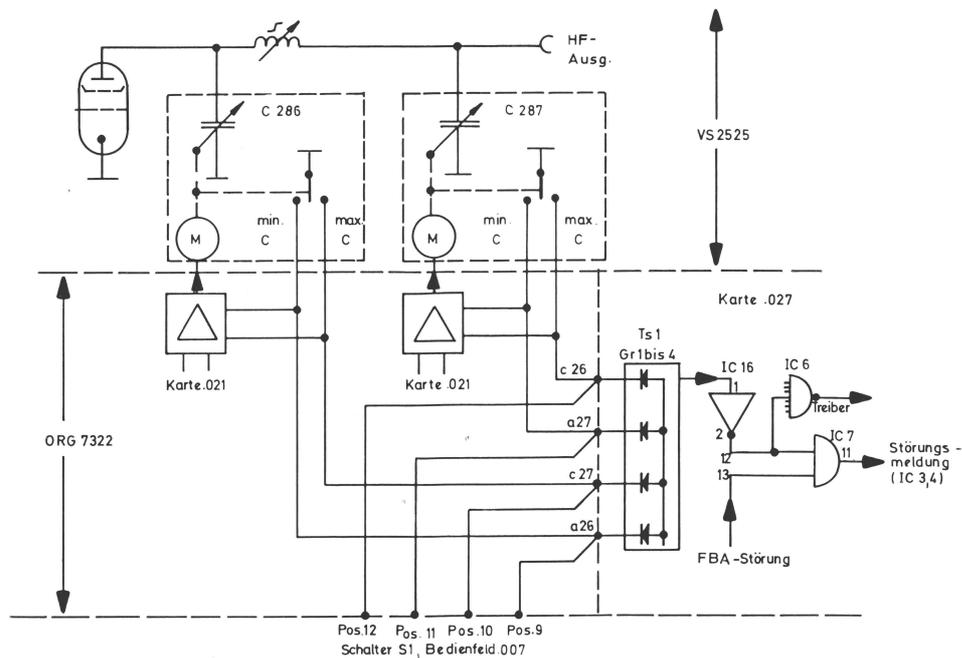


Abbildung 4.3: Die beiden Drehkondensatoren C286 und C287 werden jeweils von den Schrittmotoren „M“ und den als Verstärker dargestellten Schrittmotorkarten „Karte.021“ angesteuert. Die beiden Schalter stehen symbolisch für die verwendeten Endschalter und sind mit den Schrittmotoren mechanisch gekoppelt [19].

Die Schrittmotorsteuerung für den Kondensator C286, er entspricht dem anodenseitigen Kondensator des Anodenkreises, erhält ihr Steuersignal aus einem Phasendiskriminator. Dieser Phasendiskriminator vergleicht die Phasenlage der Gitterspannung und der Anodenspannung zueinander. Ist sie  $180^\circ$ , dann ist der Anodenarbeitswiderstand reell und der Kondensator optimal eingestellt.

Für die Motorsteuerung des Kondensators C287, dieser ist der antennenseitige Kondensator, wird das Kontrollsignal von einem Komparator abgeleitet. Dieser Komparator, ein Bestandteil des Richtkopplers, leitet ein Signal aus der Anodenspannung und der an die Antenne abgegebenen Spannung ab.

### 4.2.1 Blockschaltbild

Die Eingangssignale der Schrittmotorkarte liegen an den Pins a28 und a30 an. Zusätzlich sind noch drei Steuereingänge vorgesehen (Signale a20, a21 und a22), welche die Drehung der Kondensatoren gegebenenfalls stoppen können. Dies geschieht im Betrieb entweder durch das Erreichen einer Endposition von einem der beiden Kondensatoren, (a21, a22), oder durch eine Abstimm Sperre hervorgerufen durch einen außergewöhnlichen Systemzustand (a20). Dieser Zustand liegt unter

anderem im Fehlerfall vor (kritischer Systemzustand). Zusätzlich wird ein Abstimmvorgang auch während der Aufheizphase der Röhre unterbunden. In diesen genannten Fällen sperrt die Auswertelogik, neben zusätzlichen sicherheitsbedingten Maßnahmen, eine Abstimmung des Anodenkreises.

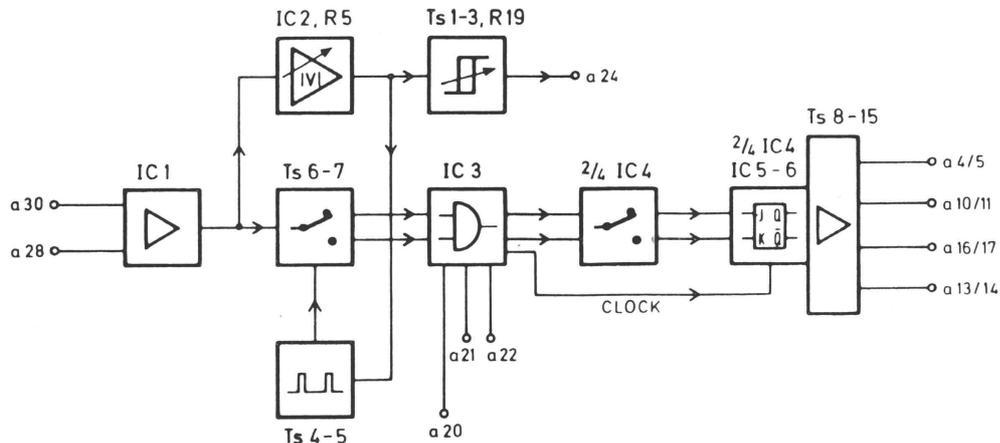


Abbildung 4.4: Blockdiagramm der Schrittmotorsteuerung nach [19].

Am Ausgang der Schrittmotorsteuerung liegen die vier Phasenspannungen für den anzusteuern den Schrittmotor (a4/5, a10/11, a13/14, a16/17) und ein zusätzliches Statussignal, das der Steuereinheit einen sich drehenden Motor anzeigt (a24).

### 4.2.2 Schaltungsbeschreibung der Schrittmotorsteuerung

Zu dem in Abbildung 4.4 angegebenen Blockschaltbild wurde die nachfolgend beschriebene Schaltung entworfen. Der genaue Schaltplan ist in Abbildung 4.5 detailliert wiedergegeben.

Der Verstärker IC1 ist mit Hilfe eines OPV<sup>1</sup> als Differenzverstärker der beiden Eingangssignale (a28, a30) beschaltet. Aus dessen Ausgangssignal bildet der Verstärker IC2 den Absolutwert des Signals und verstärkt es. Dieses Signal steuert den Taktgenerator und liefert zugleich am Ausgangspin a24 ein Statussignal, das die laufende Kondensatorabstimmung hysteresebehaftet anzeigt.

Der Taktgenerator selbst ist mit einem bipolaren und einem Unijunction Transistor aufgebaut. Die Kippfrequenz dieses Generators hängt von der am Unijunction Transistor anliegenden Spannung ab. Die so erzeugten Impulse dienen als Takt für die Ausgangs-FFs<sup>2</sup>, und sind somit maßgeblich für die Frequenz des erzeugten Drehfelds der Schrittmotoren.

Da durch das Abstimmen die Eingangsspannung immer kleiner wird, verringert sich die Drehzahl des Schrittmotors entsprechend diesem Signal. Dies bewirkt ein

<sup>1</sup>OperationsVerstärker

<sup>2</sup>Flip Flops

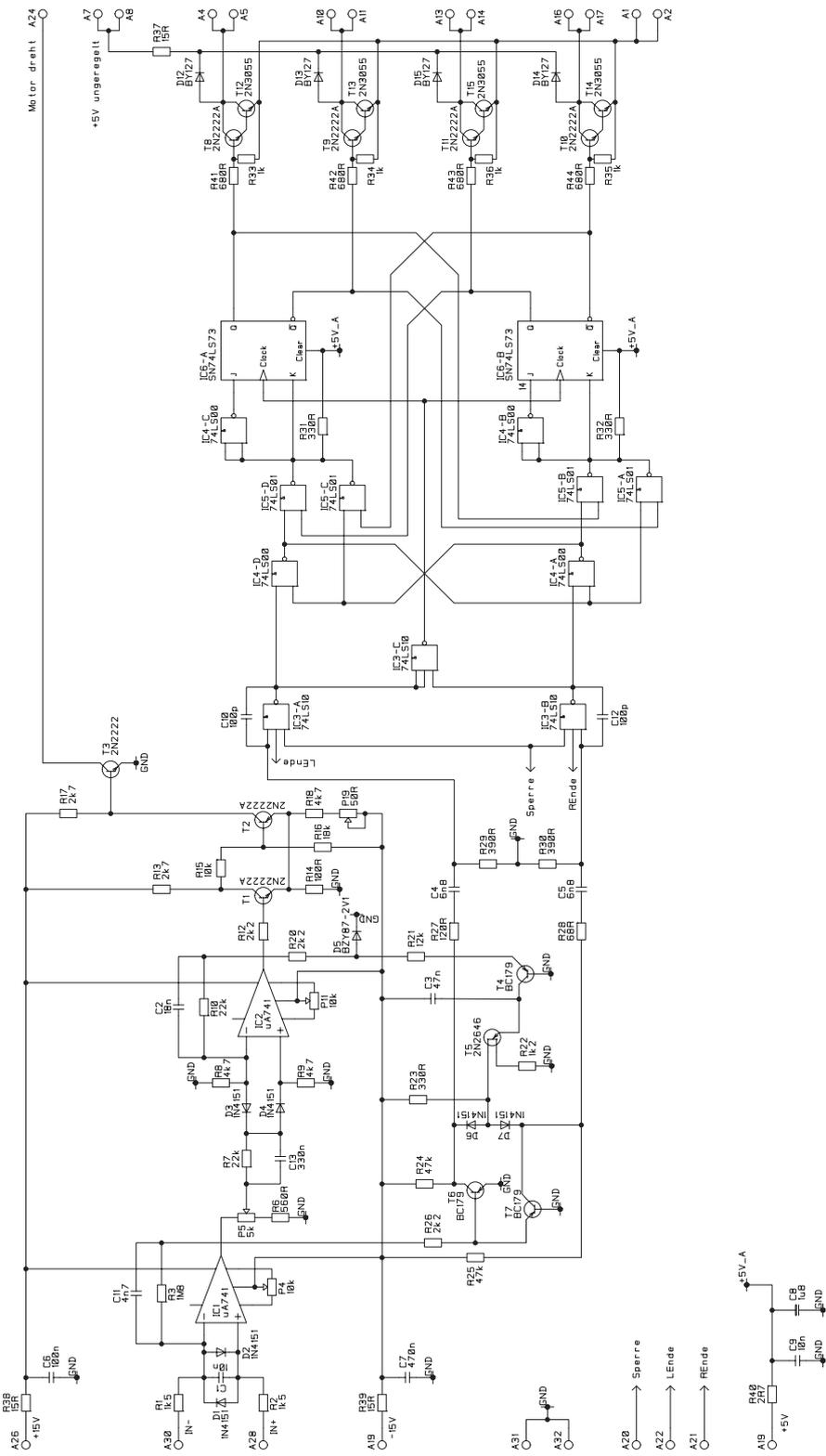


Abbildung 4.5: Schaltplan der Schrittmotorsteuerung.

langsameres „Einlaufen“ des Kondensators in seine gewünschte Position. Sobald der Kondensator in der gewünschten Position stehen bleibt, gibt die Steuerung am Ausgang a24 ein entsprechendes Signal aus. Dies teilt dem Organisator mit, daß der Abstimmvorgang beendet ist und somit die nächsten Schritte eingeleitet werden können. Um die mechanisch bedingte Höchstdrehzahl des Schrittmotors entsprechend zu begrenzen, wird die an den Taktgenerator gelieferte Spannung begrenzt.

Durch das Transistorpaar T6 und T7 wird ein einfacher Umschalter realisiert, der je nach Polarität der Eingangsspannung die Drehrichtung des Motors vorgibt (Linkslauf bzw. Rechtslauf). Diese Vorgabe wird vom Drehrichtungs-FF (erster Teil von IC4) an die Ausgangs-FFs weitergegeben. Die Gatter im IC3 sind so beschaltet, daß der in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Abstimmstop wirksam werden kann.

Die Endtransistoren stellen die für die Schrittmotoren benötigte Leistung zur Verfügung. Verwendet werden hierfür Leistungstransistoren vom Typ 2N3055 die in Verbindung mit je einem 2N2222A in Darlington-Schaltung<sup>3</sup> arbeiten.

### 4.2.3 Layout der Schrittmotorplatine

Das Layout dieser Platine wurde mit einem professionellen Layoutprogramm erstellt. Zuerst wurde der Schaltplan gezeichnet, mit dessen Daten die Bauteile platziert und schließlich die Leiterbahnen entflochten<sup>4</sup>. Mit den fertigen Layoutdaten wurde ein Fotofilm erstellt, der dann die Grundlage für die Herstellung der „physischen“ Leiterplatte mittels gängiger Ätzverfahren war.

### 4.2.4 Pinbelegung der Schrittmotorkarte

Die Schrittmotorkarte ist mittels einer einreihig belegten 3x32-poligen Stiftleiste mit dem Organisator verbunden<sup>5</sup>. Die Belegung der einzelnen Pins ist in Tabelle 4.3 angegeben.

### 4.2.5 Schrittmotoranschlußkabel

Jeder der beiden Schrittmotoren ist mit zwei Endschaltern und einem Potentiometer als Ist-Wert-Geber in einer mechanischen Gesamteinheit aufgebaut. Diese Einheit befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Drehkondensator und ist mechanisch starr mit ihm verbunden. Die elektrische Verbindung mit dem Sender erfolgt

---

<sup>3</sup>Darlington Schaltung ist die Bezeichnung einer Anordnung von zwei Transistoren, die wie ein einzelner Transistor wirkt, jedoch eine wesentlich höhere Stromverstärkung erreicht als jeder Transistor für sich allein.

<sup>4</sup>Im Fachjargon auch „Routen“ genannt

<sup>5</sup>Obwohl nur eine Reihe benötigt wird, kam aus Kompatibilitätsgründen zum vorhandenen System eine dreireihige Stiftleiste zum Einsatz.

Tabelle 4.3: Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Schrittmotorsteuerung. Alle nicht explizit angegebenen Pins sind nicht beschaltet.

Anschlußpin	Funktion
1,2,31,32	GND (Masse)
4,5	Wicklungsstrang A
7,8	Motorversorgung (+5V unregelt) E
10,11	Wicklungsstrang B
13,14	Wicklungsstrang C
16,17	Wicklungsstrang D
19	+5V Versorgung
20	Eingang - Drehsperre
21	Kondensator - Endposition rechts K
22	Kondensator - Endposition links L
24	Ausgang - Motor in Bewegung
26	+15V Versorgung
28	Signaleingang plus
29	-15V Versorgung
30	Signaleingang minus

mit Hilfe eines zehnpoligen Steckverbinders, dessen Belegung in Abbildung 4.6 ersichtlich ist.

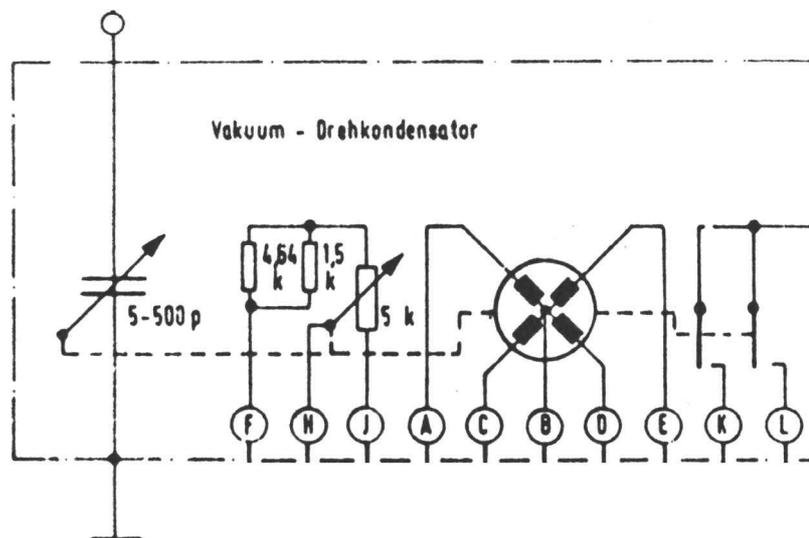


Abbildung 4.6: Anschlußbelegung der Vakuumdrehkondensatoren.

Die Anschlüsse A bis E sind die Phasenanschlüsse der Schrittmotoren und kommen von der Schrittmotorkarte. Das Potentiometer wird mit den Anschlüssen F (Spannungsversorgung), H (Abgriff) und J (Masse) herausgeführt. Die beiden

Endschalter sind über die Anschlüsse K und L zugänglich, die in der jeweiligen Endposition an Masse gelegt werden. Die Masseverbindung erfolgt über das Gehäuse, somit darf der Sender mit dem demontierten Schrittmotor nicht betrieben werden.

#### 4.2.6 Bild der Schrittmotorplatine

Zur Vervollständigung dieses Projekts folgt hier noch die Abbildung 4.7 zur Illustration der aufgebauten Platine.

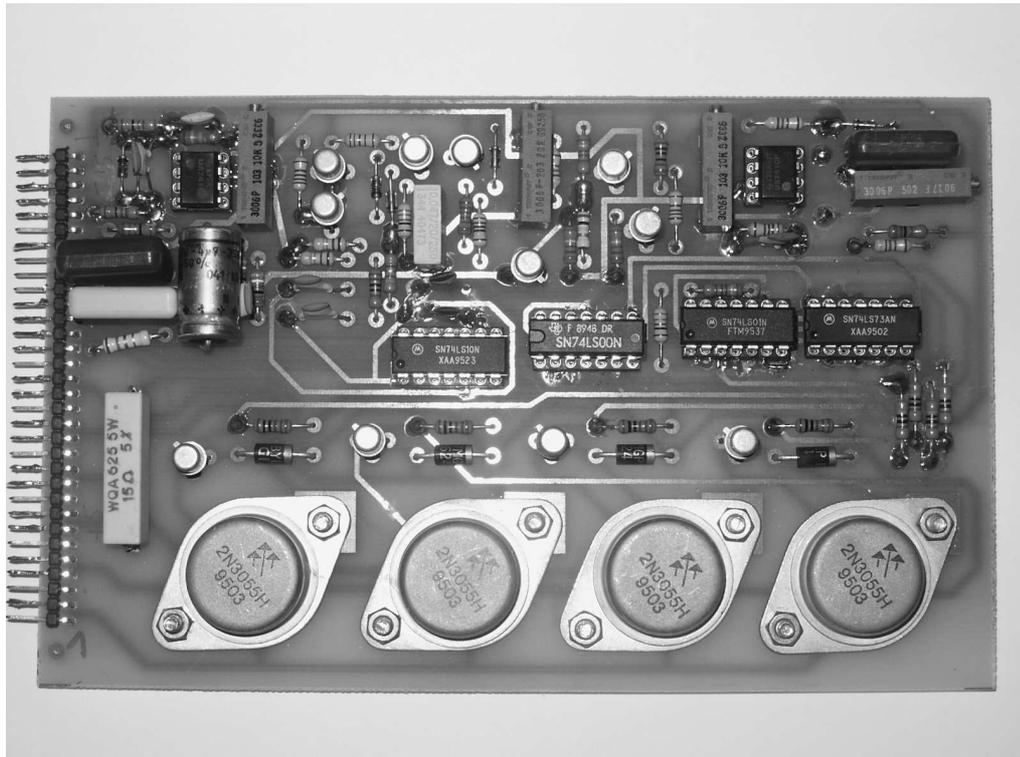


Abbildung 4.7: Fertig aufgebauter Prototyp der Schrittmotorplatine. In der ersten Version wurde noch eine einreihige Stiftleiste verwendet.

### 4.3 Anzeigeelektronik

Die Anzeigeelektronik wurde realisiert, um die Stellung der Vakuumdrehkondensatoren auf einem Siebensegmentdisplay darstellen zu können. Als Eingangssignal in die Anzeigeelektronik dient der Abgriff des Potentiometers, das mit dem Schrittmotor mechanisch verbunden ist und als Positionsanzeige verwendet werden kann. Eine einführende Erklärung zu diesem Potentiometer ist in Abschnitt 4.2.5 zu finden. Da im Sender insgesamt 2 Drehkondensatoren anzu-

steuern sind, wurden gleich beide Meßelektroniken auf einer Platine realisiert. Die Anschlußpins dieser 32-poligen Stiftleiste sind in Tabelle 4.4 angegeben.

Tabelle 4.4: Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Anzeigeelektronik. Nicht angeführte Anschlüsse sind unbelegt.

Anschlußpin	Funktion
4	Eingang 1
6	Eingang 2
10	Spannung +5V
12	Masse (GND)
14	Spannung -5V
18	Testeingang 2
20	Testeingang 1

### 4.3.1 Schaltbild der Anzeigeelektronik

Die Hauptaufgabe dieser Anzeigeelektronik übernimmt ein IC<sup>6</sup> der Firma Intersil [20]. Von der Webseite dieses Herstellers können Datenblätter und Anwendungsbeispiele heruntergeladen werden. Die in Abbildung 4.8 angegebene Schaltung ist ein solches Anwendungsbeispiel, das in unser Projekt übernommen wurde.

Die Schaltung enthält den ADC<sup>7</sup> ICL7107 in Standardbeschaltung. Die anzuzeigenden Spannungen der Drehkondensatoren werden am Eingang 1 bzw. Eingang 2 angelegt. Der Eingangsspannungsteiler mit den Widerständen R11 & R12 (bzw. R13 & R14) ist so dimensioniert, daß die Anzeigen der Vakuumdrehkondensatoren einen Bereich von 0 bis 99 durchlaufen. Dieser Spannungsteiler ist nur deshalb notwendig, weil sowohl die Eingangsspannung als auch die Betriebsspannung +5V betragen.

An den beiden 26-poligen Steckern wird jeweils ein passendes Flachbandkabel angeschlossen, das zur Anzeigeplatine führt. Diese Anzeigeplatine dient im Wesentlichen zur optischen Anzeige der mittels Anzeigeelektronik gemessenen Drehkondensatorstellung.

Durch die Testeingänge (Pins 18 & 20) kann überprüft werden, ob die Displays der 7-Segment-Anzeige noch intakt sind. Durch das Anlegen eines logisch „High“-Pegels an den Testpin müssen alle entsprechenden Segmente dieses Displays leuchten.

Die Anzeigeplatine selbst ist im Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

<sup>6</sup>Integrated Circuit = integrierte Schaltung

<sup>7</sup>Analog Digital Converter = Analog Digital Wandler

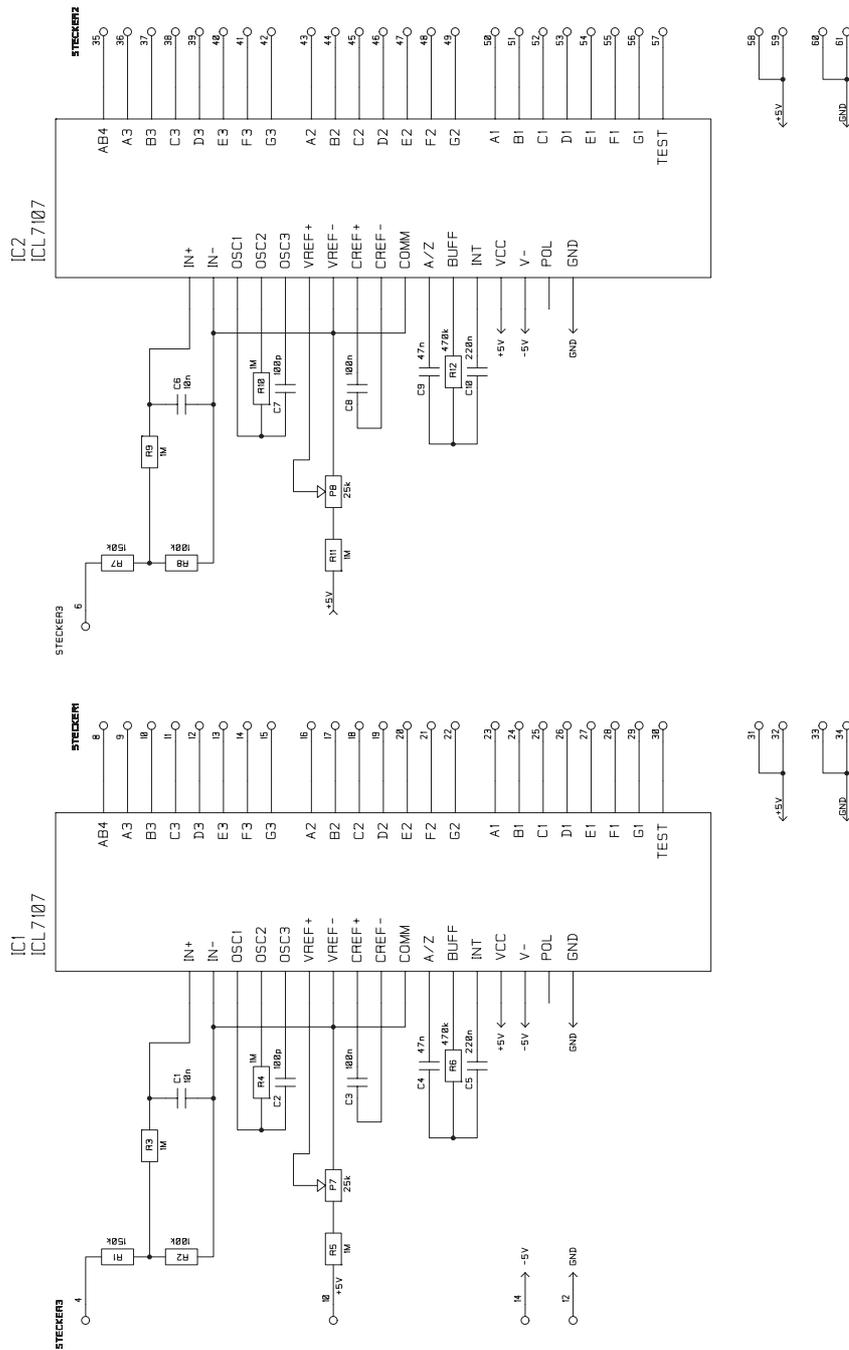


Abbildung 4.8: Schaltplan der Anzeigeelektronik nach [20].

### 4.3.2 Siebensegmentanzeige

Für die optische Anzeige wurde eine eigene Platine entwickelt, um sie abgesetzt von der Anzeigeelektronik im Sender an einer beliebigen Position montieren zu können. Die Verbindung mit der Elektronik erfolgt mittels eines 26-poligen Flachbandkabels, das die benötigten Signale zuführt. Die Ziffernhöhe wurde mit 20 mm

bewußt groß gewählt, um die Ablesung auch aus größerer Entfernung zu ermöglichen.

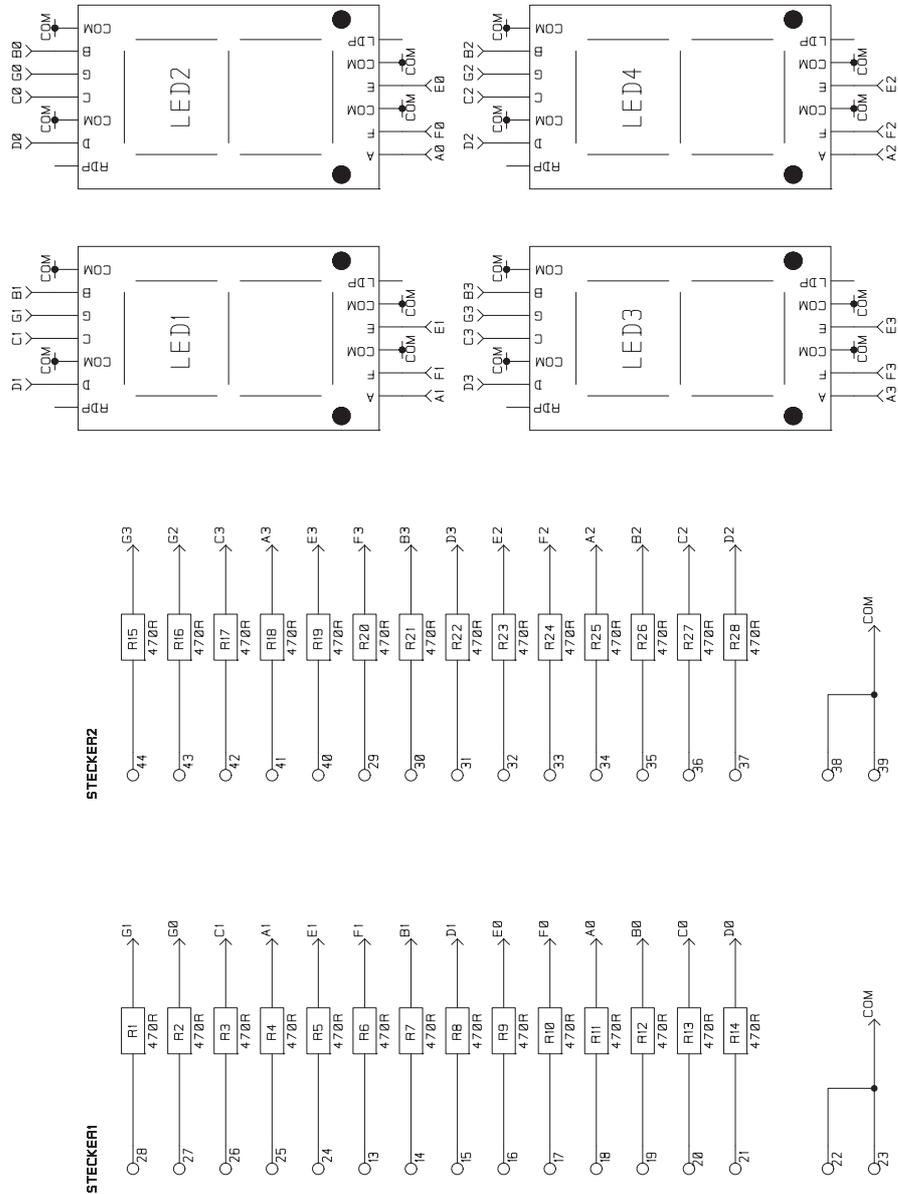


Abbildung 4.9: Schaltplan der 7-Segmentanzeige.

Wie aus dem Schaltplan ersichtlich ist, befinden sich auf der 7-Segmentanzeige nur die Displays und die passenden Vorwiderstände um den Strom durch die Dioden zu begrenzen. Da mit einer Platine nur die Anzeige eines Drehkondensators

angezeigt werden kann, sind somit für den Sender (mit zwei Drehkondensatoren) insgesamt zwei Displayplatinen notwendig.

## 4.4 Kreismotorsteuerung

Dieser Sendeverstärker ist wie bereits erwähnt für das gesamte Kurzwellenband ausgelegt. Im Abschnitt 4.1 wurde bereits der grundlegende Aufbau des Senders erläutert. Es wird auch beschrieben, daß für das gesamte Kurzwellenband nicht ein und derselbe Gitter- bzw. Anodenbandpaß verwendet wird, sondern daß die einzelnen Bandpässe nur vordefinierten Frequenzabschnitten zugeordnet sind.

Für den vorliegenden Sender sind insgesamt sechs Gitterbandpässe und elf Anodenbandpässe einstellbar. Der Organisator wählt aufgrund der gewünschten Frequenz die passenden Kreise aus und steuert die Motoren der beiden „Karusselle“ entsprechend an. Wie dies im Detail funktioniert ist im Abschnitt 4.5 genau beschrieben.

Die Bauteilwerte der Induktivitäten und Kapazitäten in den einzelnen Bandpässen unterscheiden sich je nach der verwendeten Frequenz. Es wurden daher die Schwingkreise für sämtliche Frequenzbänder auf einem sogenannten „Karussell“ aufgebaut. Ein Gleichstrommotor sorgt zusammen mit einer geeigneten Steuerplatine dafür, daß je nach verwendeter Frequenz die passenden Bandpässe ausgewählt werden. Da mit dieser Steuerplatine sowohl der Gitterkreis als auch der Anodenkreis angesteuert werden, ist „Kreismotorsteuerung“ wohl ein geeigneter Name für diese Platine. In diesem Zusammenhang ist auf den Umstand hinzuweisen, daß die Kreismotorsteuerung *einen* Motor ansteuern kann. Für die Ansteuerung sowohl des Gitter- als auch des Anodenkreises sind somit zwei Motorsteuerkarten notwendig.

### 4.4.1 Schaltungsbeschreibung der Kreismotorsteuerung

Die Eingangssignale in die Kreismotorsteuerung sind „Rechtslauf“, „Linkslauf“ und „Stop“. Die Entstehung dieser Signale ist sehr trickreich und wird ausführlich in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Der Motor soll seine Drehung in zwei Fällen stoppen. Der erste Fall tritt ein, wenn der mit dem „Karussell“ starr verbundene Mikroschalter öffnet. Aus welchem Grund er öffnet und welche Funktion sich dahinter verbirgt, wird detailliert in Abschnitt 4.5 beschrieben. Der zweite Fall eines Drehstops tritt im Fehlerfall auf. Der Organisator überwacht die Drehung der Kreismotoren und schaltet diese im Fehlerfall ab. Um einen undefinierten Zustand des Senders beim Wiedereinschalten zu vermeiden, wird der Drehstop erst in der nächstgültigen Bandpaßstellung aktiv. Die beiden Signale für die Drehrichtungen werden von einem mechanisch sehr ausgeklügelten Schalter abgeleitet. Die Herleitung dieser Signale wird einem eigenen Abschnitt gewidmet und dort auch genauer beschrieben (Abschnitt 4.5). Als Betriebsspannungen benötigt die Schaltung +5 V für die

Logikbausteine und +24 V für die Motoren. Als Statusanzeige kann ein TTL<sup>8</sup>-Ausgang (solange sich der Motor dreht ist dieser Ausgang logisch „High“) oder der Schaltausgang eines Transistors verwendet werden. Im zweiten Fall kann z.B. eine LED<sup>9</sup> als optische Anzeige angeschlossen werden (Anode dieser LED an „Diode +“).

An den beiden Signaleingängen „Rechtslauf“ („RL“) und „Linkslauf“ („LL“) können nur die beiden Zustände „Low“ und „floating“<sup>10</sup> auftreten. Die Transistoren T6 und T7 sind als Schalttransistor beschaltet und legen die Eingänge der nachfolgenden Gatter auf definierte Pegel. Die beiden Gatter des IC3 können nun diese Steuersignale durchlassen oder sperren, je nach dem Zustand der Steuerleitung „Stop“ (Ein „High“-Pegel am Steuereingang invertiert das Eingangssignal und umgekehrt). Die nachfolgende Stufe ist ein Standard-FF, dessen Ausgänge jeweils einen Leistungstransistor ansteuern mit dessen Hilfe ein Relais anzieht. Diese Relais versorgen die Kreismotoren schließlich mit der +24 V Versorgungsspannung, wobei aus sicherheitstechnischen Gründen eine gegenseitige Verriegelung implementiert wurde, die sicherstellen soll, daß beide Drehrichtungen nicht gleichzeitig aktiv werden können. Aus den beiden Ausgängen des FFs werden nebenbei noch die beiden Ausgänge zur Statusanzeige abgeleitet, sodaß das Signal „Drehen“ als Kontrollsignal weiterverarbeitet werden kann.

### 4.4.2 Layout der Kreismotorplatine

Auch dieses Layout wurde mit einer Layoutsoftware erstellt. Die Reihenfolge und der gesamte Herstellungsprozeß ist identisch mit dem in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Ablauf.

### 4.4.3 Pinbelegung der Kreismotorkarte

Die geometrischen Abmessungen und die Geometrie der Anschlüsse sind identisch mit jenen der Schrittmotorsteuerung in Abschnitt 4.2.4. Es ist wiederum nur eine Reihe einer dreireihigen Stiftleiste belegt. Die Belegung der einzelnen Pins ist in Tabelle 4.5 angegeben.

### 4.4.4 Bild der Kreismotorplatine

Zum Abschluß der Beschreibung der Kreismotorplatine ist die Abbildung 4.11 als Illustration der aufgebauten Platine abgebildet.

---

<sup>8</sup>Transistor Transistor Logik

<sup>9</sup>Light Emitting Diode = Leuchtdiode

<sup>10</sup>gleichbedeutend mit „ohne Anschluß“, hochohmig



Tabelle 4.5: Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Kreismotorsteuerung. Alle nicht explizit angegebenen Pins sind nicht beschaltet.

Anschlußpin	Funktion
1	+5V Versorgungseingang
3	+24V Versorgungseingang
5	GND (Masseanschluß)
9	Motoranschluß A
11	Motoranschluß B
19	GND (Masseanschluß)
21	Statusausgang (TTL-Pegel)
23	Statusausgang
26	Steuereingang „Rechtslauf“
28	Steuereingang „Linkslauf“
30	Steuereingang „Stop“

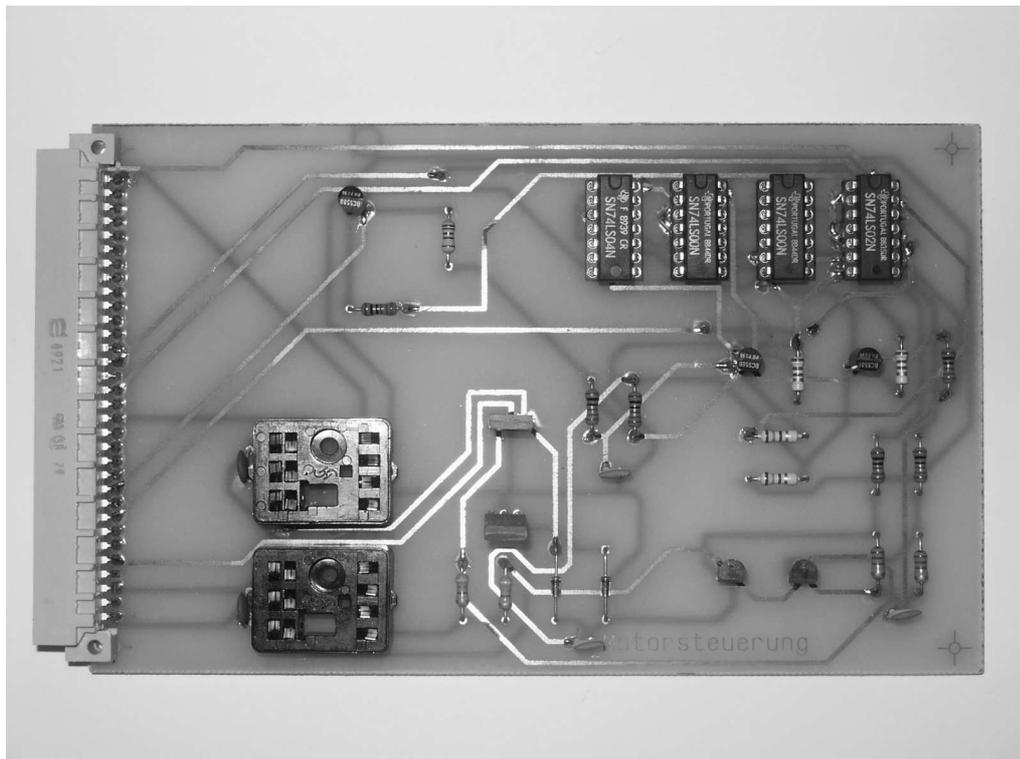


Abbildung 4.11: Fertig aufgebauter Prototyp der Kreismotorplatine (ohne Relais- nur die zugehörigen Sockel sind bestückt).

## 4.5 Der „intelligente“ Schalter

In diesem Abschnitt wird die Generierung der Steuersignale für die Kreismotorsteuerung dargestellt (Abschnitt 4.4.1). Das Prinzip zur Erzeugung dieser Steuersignale ist in Abbildung 4.12 ersichtlich.

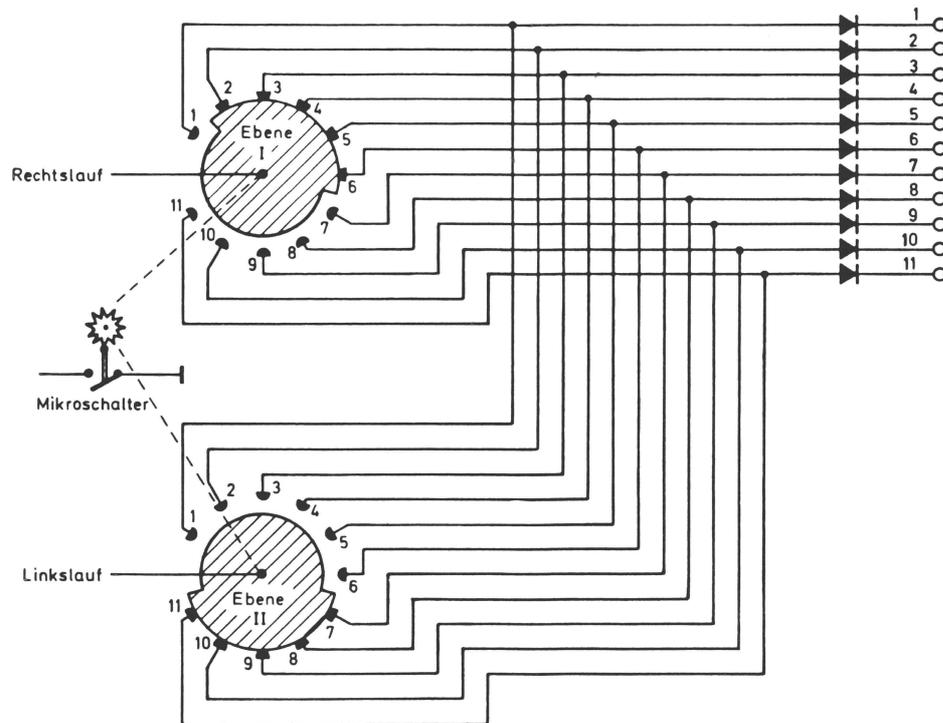


Abbildung 4.12: Prinzipdarstellung für die Ansteuerung des Anodenkreismotors. Die Anschlüsse 1 bis 11 kommen vom Organisator, die Signale „Rechtslauf“ und „Linkslauf“ gehen zur Kreismotorsteuerung und legen somit die gewünschte Drehrichtung des Motors fest.

Der Organisator legt den Pegel von einer einzigen Leitung (bezeichnet mit 1 bis 11) auf Masse, je nach eingestellter Frequenz. Alle anderen zehn Leitungen sind „floating“, und somit nirgends angeschlossen. Jede einzelne dieser elf Leitungen geht an beide Ebenen des Schalters. Der besondere Aufbau dieses Schalters bewirkt, daß der Kreismotor so angesteuert wird, daß er sich auf dem kürzesten Weg in die gewünschte Position dreht.

Von den insgesamt elf Eingangsleitungen werden je nach Schalterstellung fünf Leitungen an den Ausgang der ersten Ebene weitergeschaltet, fünf Leitungen an den Ausgang der zweiten Ebene, und eine Leitung besitzt keine Verbindung an den Ausgang. Da mit diesen Ausgangssignalen die Kreismotorsteuerung eine Drehung des Motors in der entsprechenden Richtung startet, wird mit der Auswahl einer dieser elf Steuerleitungen festgelegt mit welcher Drehrichtung sich das

„Gitterkarussell“ in die neue Position dreht. Falls eine Eingangsleitung in beiden Ebenen nicht an den Ausgang weitergeschaltet wird, bedeutet das nur, daß sich die Bandpässe bereits in der richtigen Position befinden.

Betrachten wir nun jenen Bereich, in dem in beiden Ebenen kein Kontakt zu einer der beiden Steuerleitungen vorliegt. Dieser Bereich ist (geometrisch gesehen) relativ groß. Damit der Motor genau dann abschaltet wenn sich die einzelnen Kontakte in der Idealposition befinden, das ist dann der Fall wenn sich die einzelnen Kontaktzungen mittig berühren, ist in der Masseleitung des Motors ein Mikroschalter eingebaut. Dieser Mikroschalter ist mechanisch mit dem „Karussell“ verbunden und öffnet genau im optimalen Zeitpunkt die Masseverbindung des Motors.

Die Ansteuerung des „Gitterkarussells“ erfolgt in exakt der gleichen Weise, nur mit dem Unterschied, daß der Schalter des Gitterkreises anstelle von elf Positionen nur sechs beschaltet hat.

# Kapitel 5

## Der militärische Sender - Typ „LV6“

Der zweite Sender der im Rahmen dieser Diplomarbeit bearbeitet wurde, ist ein Kurzwellensender vom Typ „LV6“. Er dürfte aus einem militärischen Bestand in Osteuropa stammen und wird dazu verwendet, die hochfrequente Ionosphärenausbreitung auf dem Kurzwellenband zu untersuchen.

Dieser Sender hat ebenfalls nominell eine Ausgangsleistung von 1000 W. Er ist, ebenso wie der in Kapitel 4 ausgeführte Sender in der Lage, diese Leistung dauerhaft und unter schwierigsten Bedingungen abzugeben. Eine genaue Beschreibung des Senders und der Baugruppen findet sich in [6].

Ein Teil der vorliegenden Diplomarbeit bestand darin, für die Gleichspannungsgitterversorgung der Leistungstetrode eine geeignete Schaltung aufzubauen, auszumessen und für den Betrieb mit diesem Sender anzupassen.

Als Grundlage dieser Stabilisierung diente ein Artikel in der Zeitschrift *CQ-DL* [21]. Es galt diese Schaltung für unsere Bedürfnisse abzuändern. Der Vorteil dieser Schaltung liegt darin begründet, daß der gesamte Aufbau gegen Hochfrequenzeinstrahlung immun ist. Diese Tatsache kann nicht immer von vornherein angenommen werden. Dieser Eigenschaft ist umso mehr Beachtung zu schenken, da dieser Aufbau in einem Hochfrequenzsender verwendet werden soll, wo hochfrequente Schwingungen geradezu zwangsläufig mit hohem Störpegel produziert werden. Es gibt nicht wenige Netzteile, die im Störfeld versagen, die Spannung unkontrolliert hochregeln und die angeschlossenen Verbraucher damit schädigen.

Grundlage dieser Stabilisierungsschaltung ist die im nächsten Abschnitt 5.1 beschriebene „Serienstabilisierung“.

### 5.1 Grundfunktion der Serienstabilisierung

In Abbildung 5.1 ist das Grundprinzip der verwendeten Serienstabilisierung bildlich dargestellt [21].

Der Regelverstärker ist in diesem Fall als Differenzverstärker ausgeführt und vergleicht die Referenzspannung mit einem Teil der Ausgangsspannung. Die Referenzspannung kann dabei auf mehrere Arten erzeugt werden.

Prinzipiell genügt es, so wie in Abbildung 5.1 angedeutet, eine Zenerdiode mit Vorwiderstand zu verwenden. Damit diese Referenzspannung unempfindlicher ge-

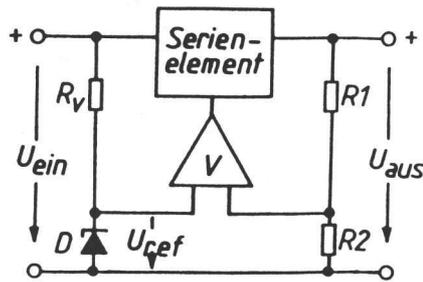


Abbildung 5.1: Blockdarstellung einer Serienstabilisierung mittels einer Zener-Diode [21].

genüber eventuell auftretender Eingangsspannungsschwankungen wird, kann man anstelle des Vorwiderstandes eine Stromquelle implementieren.

Den zweiten Eingang des Regelverstärkers bildet eine Spannung, die über einen Spannungsteiler von der Ausgangsspannung abgeleitet wird. Wenn man diese Spannung mittels eines Potentiometers einstellbar ausführt, kann die Höhe der geregelten Ausgangsspannung je nach der Dimensionierung dieses Spannungsteilers variiert werden.

Je nach der Differenz am Eingang des Differenzverstärkers steuert es das Serienelement so aus, so daß an diesem ein mehr oder weniger großer Spannungsabfall auftritt. Je stabiler die Referenzspannung ist, umso genauer kann der Regler die Ausgangsspannung auf den gewünschten Wert regeln. Als wichtigste Einflußgröße auf die Stabilität der Referenzspannung kann in diesem Zusammenhang die Temperatur erwähnt werden.

## 5.2 Schaltung der aufgebauten Stabilisierung

Die erwähnte Serienstabilisierung dient nun als Grundlage der Schaltung, die im Zuge dieser Diplomarbeit aufgebaut wurde. Diese Schaltung funktioniert folgendermaßen (siehe [21]):

Zwecks Übersichtlichkeit wird die Schaltung in folgende Komponenten aufgeteilt:

- Die *Konstantstromquelle* zur Referenzspannungsgewinnung besteht im Wesentlichen aus T3 und R5. Sie liefert den Strom  $I = \frac{0,6V}{R_5}$ . R4 und T5 liegen parallel zum Referenzspannungswiderstand R5 und überwachen den Referenzstrom. Im gleichen Zug stellen sie auch eine Temperaturkompensation für diese Stromquelle dar.
- Der Widerstand R3 wird benötigt um beim Einschalten der Spannung, die Stromquelle zu „aktivieren“.
- Die Diode D1 ist die verwendete *Zener-Diode*.

## 5.2 Schaltung der aufgebauten Stabilisierung

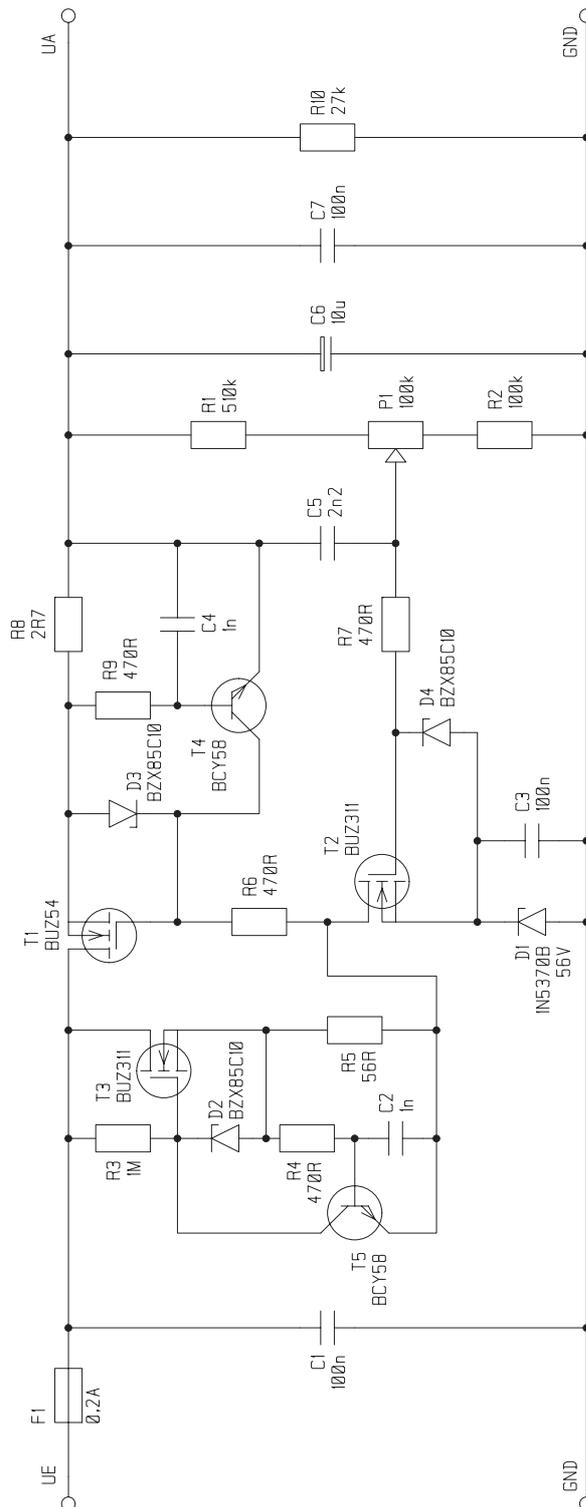


Abbildung 5.2: Schaltung der aufgebauten Serienstabilisierung.

- Als Serienelement wirkt der Transistor T1.
- Als *Regelverstärker* dient in dieser Schaltung T2. An dessen Gate liegt die Ist-Spannung (über den Spannungsteiler R1, P1 und R2) an. Durch einen geringfügigen Abfall dieser Spannung (etwa durch Belastung) läuft folgender Regelvorgang ab: Am Gate von T2 sinkt die Spannung, dadurch wird die Drain-Source Spannung ansteigen (der Drain-Source-Widerstand  $R_{DS}$  steigt und der Referenzstrom bewirkt somit einen höheren Spannungsabfall). Der Spannungsabfall am Serienelement T1 wird nun kleiner, da das Potential am Gate dieses Transistors größer geworden ist. Somit steigt die Ausgangsspannung geringfügig an. Diese Erhöhung wirkt der angenommenen Belastungszunahme entgegen und hält somit die Spannung konstant. Entsprechend funktioniert auch der entgegengesetzte Fall einer Belastungsabnahme.
- Die Strombegrenzung übernimmt der Transistor T4. Ein steigender Ausgangsstrom bewirkt am Widerstand R8 einen zunehmenden Spannungsabfall. Diese Spannung steuert die Basis-Emitter-Strecke dieses Transistors. Kommt dieser Spannungsabfall nun in die Nähe der Durchlaßspannung, verringert sich die Gate-Source Spannung des Serienelements (da der Transistor T4 niederohmiger wird) und wirkt der (exzessiven) Stromzunahme entgegen.
- Sämtliche MOSFET<sup>1</sup>-Transistoren sind mit einer 10 V-Zenerdiode zwischen Gate und Source gegen Überspannungen geschützt.
- Die Kondensatoren haben einerseits die Aufgabe die Spannungen zu stabilisieren, und verbessern andererseits die EMV<sup>2</sup>-Eigenschaften<sup>3</sup> der Schaltung.

Als Besonderheit dieser Schaltung ist zum Abschluß noch der Widerstand R10 parallel zum Verbraucher erwähnenswert. Unter gewissen Umständen<sup>4</sup> ist es möglich, daß der Gitterstrom negativ wird. Um in diesem Fall eine ordnungsgemäße Funktion der Schaltung zu garantieren, wird diesem Strom ein Fluß über diesen Widerstand ermöglicht, ohne daß der Gesamtstrom dieser Stabilisierungsschaltung negativ wird.

## 5.3 Bild der Schrittmotorplatine

Um dieses Projekt zu vervollständigen, folgt auch hier noch die Abbildung 5.3 zur Illustration der bestückten Platine.

---

<sup>1</sup>Metal-Oxide-Semiconductor Fieldeffecttransistor

<sup>2</sup>Elektromagnetische Verträglichkeit

<sup>3</sup>Um einerseits andere Betriebsmittel durch Abstrahlung hochfrequenter Strahlung nicht zu beeinflussen, andererseits aber durch äußere Störstrahlung nicht beeinflusst zu werden, müssen die in EMV-Normen angegebenen Grenzwerte eingehalten werden.

<sup>4</sup>Das ist bei Röhrenschaltungen dann der Fall, wenn von der Anode unter ungünstigen Betriebsbedingungen Sekundärelektronen emittiert werden.

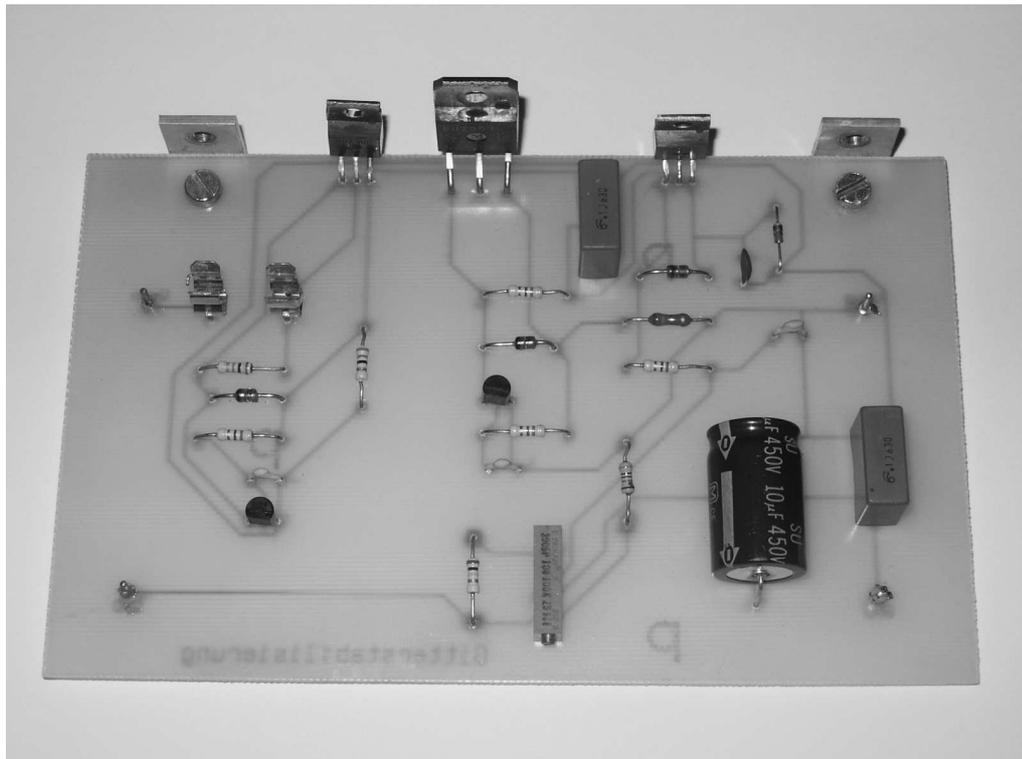


Abbildung 5.3: Fertig aufgebauter Prototyp der Gitterstabilisierungsplatine.

## 5.4 Meßergebnisse

Zum Abschluß soll hier nun noch ein Diagramm der erfolgten Messungen der Stabilisierungsschaltung angegeben werden. In der Abbildung 5.4 ist das Diagramm mit insgesamt zwei Messkurven angegeben. Man erkennt deutlich daß sich die Ausgangsspannung beim Anstieg der Eingangsspannung auf einen stabilen Wert einstellt und von der Schaltung auf diesem Wert nahezu konstant gehalten wird.

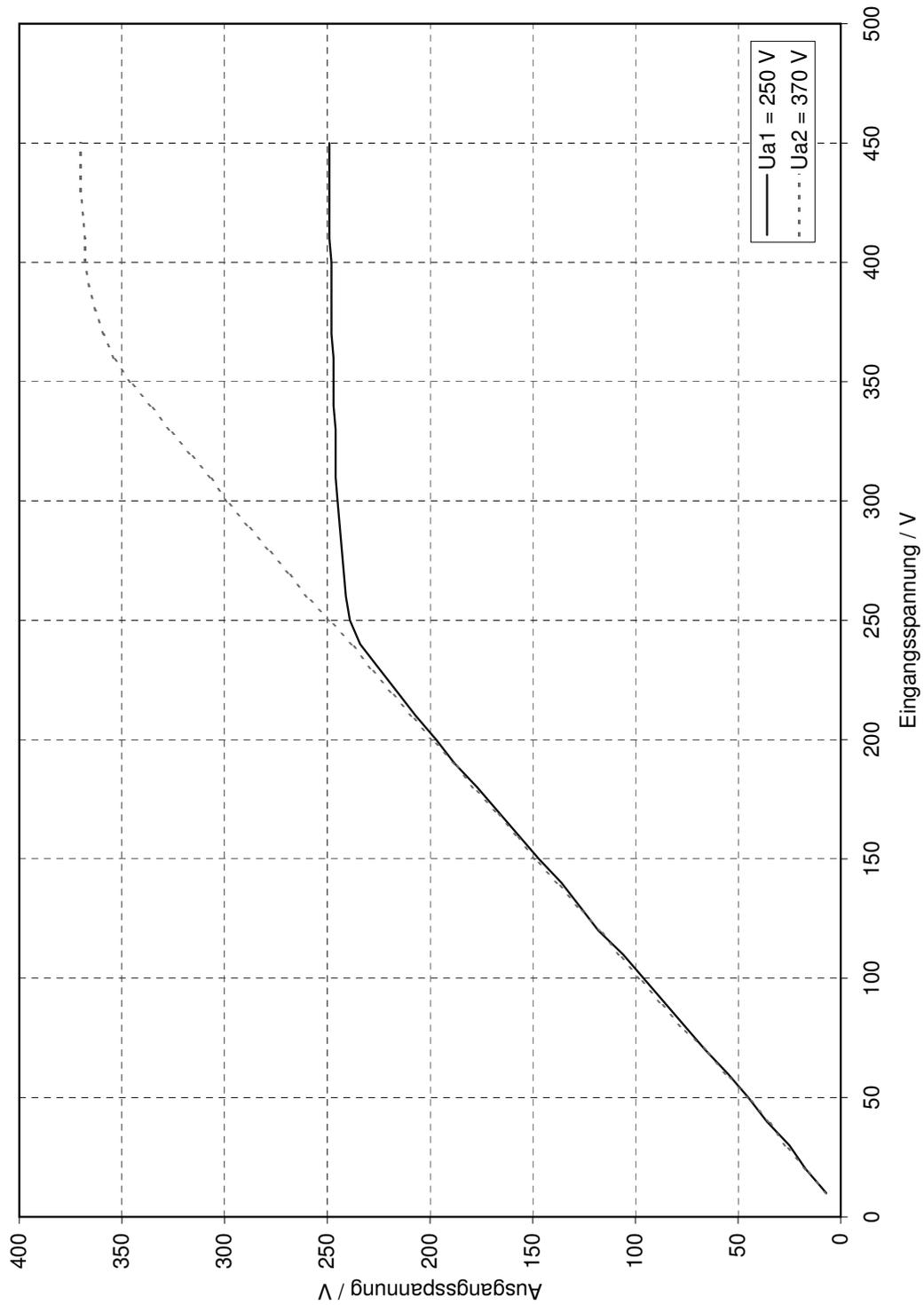


Abbildung 5.4: Zwei Messreihen der realisierten Gitterstabilisierung. Dargestellt sind die Kurven für zwei unterschiedliche Ausgangsspannungen (entsprechend den Gitterspannungen 250 V und 370 V).

# Kapitel 6

## Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt den Aufbau zweier unterschiedlicher Kurzwellen-Leistungsendstufen. Funktionell sind sich die beiden Sender sehr ähnlich. Vom mechanischen Aufbau unterscheiden sie sich jedoch teilweise ganz erheblich. Wenn man die vorgesehenen Einsatzgebiete in Betracht zieht, ist das allerdings nur allzu verständlich.

Für zukünftige Entwicklungen gibt es viele interessante Ansätze. Das interessante Gebiet der Wellenausbreitung wurde schon mehrfach erwähnt. Als *Sender* sind sie überall dort sinnvoll einsetzbar, wo es auf die Aussendung von Signalen mit höherer Leistung ankommt.

Als eine interessante Idee könnte folgendes realisiert werden:

Mittels *moderner, flexibel programmierbarer* Logikbausteine (zum Beispiel mittels VHDL<sup>1</sup> programmiertes CPLD<sup>2</sup> oder FPGA<sup>3</sup>) könnte versucht werden, sämtliche Steuerungs- und Regelungsaufgaben dieser Sender in einem Chip zu integrieren. An der Leistungsendstufe selbst würde dies zwar kaum Einsparungen bringen, aber der Platzbedarf für die restlichen Einschübe würde sich auf ein Minimum reduzieren.

Zusätzlich zu diesen Platzeinsparungen würde die Betriebssicherheit enorm steigen, da nun nicht mehr viele einzelne Platinen aufgebaut werden müssten, sondern alles auf einer Platine Platz finden könnte.

---

<sup>1</sup>Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

<sup>2</sup>Complex Programmable Logic Device

<sup>3</sup>Field Programmable Gate Array

# Literaturverzeichnis

- [1] Herter/Lörcher, *Nachrichtentechnik, Übertragung-Vermittlung-Verarbeitung*, Hanser-Verlag, München/Wien, 1987
- [2] Ralf Th. Kersten, *Einführung in die optische Nachrichtentechnik*, Springer-Verlag, Berlin, 1983
- [3] Karl Rothammel, *Antennenbuch*, Franckh-Kosmos, Stuttgart, 10. Auflage
- [4] Hans-Joachim Pietsch, *Kurzwellen-Amateurfunktechnik*, Franzis-Verlag, München, 1979
- [5] Wikipedia Homepage, <http://de.wikipedia.org/wiki/Ionosph%C3%A4re>
- [6] Christian Fuchs, *Fernbedienbare Leistungsendstufe für experimentelle Ionosphärenphysik im Kurzwellenbereich*, Diplomarbeit, TU-Wien, 1997
- [7] Kaiser, *UKW/TV-DX*, Wolfgang Scheunemann Verlag, Köln, 1984
- [8] Ing. Erwin Hiller, *Elektronen-Röhren*, Albrecht Philler Verlag Minden (Westf), 1962
- [9] Hans-Joachim Fischer, *Amateurfunk*, Franckh-Verlag, Stuttgart, 1962
- [10] Erwin Böhmer, *Elemente der angewandten Elektronik*, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 9. überarbeitete und erweiterte Auflage, 1994
- [11] Werner W. Diefenbach, *Amateurfunk-Handbuch*, Franzis Verlag, München, 10. Auflage, 1976
- [12] Klaus Beuth, *Elementare Elektronik*, Vogel-Verlag, Würzburg, 3. überarb. Auflage, 1991
- [13] Johannes G. Lehmann, *Dioden und Transistoren*, Vogel-Verlag, Würzburg, 2. überarbeitete und ergänzte Auflage, 1971
- [14] Lechner/Fink, *Kurzwellensender*, Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1. Auflage, 1979
- [15] Varian Eimac, *Care And Feedings Of Power Grid Tubes*, Eigenverlag, 4th printing, 1982
- [16] Horowitz/Hill, *The Art Of Electronics*, Cambridge University Press, 2nd Ed, 1989
- [17] Seifart, *analoge Schaltungen*, VEB Verlag, Berlin, 3. bearbeitete Auflage, 1989

- [18] Tietze/Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin, 10. Auflage, 1993
- [19] Fa. Telefunken, *1 kW Kurzwellen-Sender S2525, Beschreibung und Bedienungsanleitung*, Beschreibung Nr. N 111 007, Ausgabe 477Pi(Gr)
- [20] Intersil Homepage, <http://www.intersil.com>
- [21] Dr. Martin Faust, *CQ-DL*, DARC-Verlag, Berlin, Jänner 1991

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ADC</b>	<u>A</u> nalog <u>D</u> igital <u>C</u> onverter = Analog Digital Wandler
<b>CPLD</b>	<u>C</u> omplex <u>P</u> rogrammable <u>L</u> ogic <u>D</u> evice
<b>DRM</b>	<u>D</u> igital <u>R</u> adio <u>M</u> ondiale
<b>EMV</b>	<u>E</u> lektromagnetische <u>V</u> erträglichkeit
<b>ESR</b>	<u>E</u> quivalent <u>S</u> erial <u>R</u> esistance = Ersatzserienwiderstand
<b>FF</b>	<u>F</u> lip <u>F</u> lop
<b>FM</b>	<u>F</u> requenz <u>m</u> odulation
<b>FPGA</b>	<u>F</u> ield <u>P</u> rogrammable <u>G</u> ate <u>A</u> rray
<b>IC</b>	<u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit = integrierte Schaltung
<b>KW</b>	<u>K</u> urz <u>w</u> elle
<b>LED</b>	<u>L</u> ight <u>E</u> mitting <u>D</u> iode = Leuchtdiode
<b>MOSFET</b>	<u>M</u> etal- <u>O</u> xide- <u>S</u> emiconductor <u>F</u> ieldeffect <u>t</u> ransistor
<b>OPV</b>	<u>O</u> perations <u>V</u> erstärker
<b>SID</b>	<u>S</u> udden <u>I</u> onospheric <u>D</u> isturbance
<b>TTL</b>	<u>T</u> ransistor <u>T</u> ransistor <u>L</u> ogik
<b>UV</b>	<u>U</u> ltraviolett
<b>VHDL</b>	<u>V</u> ery <u>H</u> igh <u>S</u> peed <u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit <u>H</u> ardware <u>D</u> escription <u>L</u> anguage

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Temperaturverlauf, Ozonanteil und der Aufbau der Atmosphäre um die Erde [3] . . . . .	5
2.2	Die Dichte der freien Elektronen in Abhängigkeit von der Höhe nach [5] . . . . .	6
2.3	Der in Abschnitt 2.2 angeführte Aufbau der Ionosphäre bildlich dargestellt . . . . .	6
2.4	Die Bodenwelle und Raumwelle als prinzipiell möglichen Ausbreitungsformen elektromagnetischer Wellen . . . . .	8
2.5	Durch die unterschiedlichen Abstrahlwinkel $\Theta$ der verwendeten Antenne ergeben sich unterschiedlich ausbreitende Raumwellen. $\Theta_{Gr}$ ist der <i>Grenzwinkel</i> und $\varphi$ ist der <i>Einfallswinkel</i> an der Ionosphäre [3] . . . . .	8
2.6	Durch das Vorhandensein unterschiedlicher Schichten in der Ionosphäre ergeben sich unterschiedliche Reflexionsmöglichkeiten der elektromagnetischen Wellen . . . . .	9
3.1	Aufbau einer indirekt geheizten Katode nach [11] . . . . .	14
3.2	Schaltbild und Kennlinie einer Röhrendiode. $U_a$ ist die Anodenspannung und $I_a$ ist der entsprechende Anodenstrom. Bei fehlender Anodenspannung fließt bereits ein kleiner „Anlaufstrom“ [11] . . .	15
3.3	Schaltbild und Kennlinie einer Röhrentriode. Anodenstrom als Funktion der <i>Gitterspannung</i> bei drei verschiedenen Anodenspannungen (200 V, 180 V, 160 V). Zusätzlich ist der <i>Gitterstrom</i> als Funktion der Gitterspannung angedeutet [9], [11] . . . . .	16
3.4	Übersicht über die weiteren, hier nicht näher beschriebenen Mehrgitterröhrentypen [9] . . . . .	18
3.5	Aufbau einer Röhrentriode. Die Entstehung einer Mehrgitterröhre kann man sich gedanklich durch das zusätzliche Einfügen konzentrisch angeordneter Steuergitter an der jeweiligen Stelle bildlich vorstellen [11] . . . . .	18
3.6	Gegenüberstellung der Schaltbilder von Transistor und Elektronenröhre. Links: Transistor mit Basis, Kollektor und Emitter. Rechts: Röhre mit Gitter, Anode und Katode. Die Heizung ist bei der Röhre nicht explizit beschriftet, aber für die Funktion essentiell [12], [13] . . . . .	19

3.7	Drei mögliche Röhren-Grundsaltungen. Diese Schaltungen sind nicht vollständig, sondern sollen nur das Prinzip der jeweiligen Grundsaltung aufzeigen . . . . .	20
3.8	Prinzipschaltbild der Katodenbasisschaltung. SSK...Steurgitterschwingkreis, ASK...Anodenschwingkreis, A...Meßgeräte [6] . . . .	20
3.9	Katodenbasisschaltung mit den in der Röhre aufbaubedingt vorhandenen parasitären Kapazitäten $C_{ag1}$ und $C_1$ . Diese beiden Kondensatoren werden über die Neutralisationskondensatoren $C_2$ und $C_n$ neutralisiert [6] . . . . .	22
4.1	Bild der kompletten Sendeanlage. In 19-Zoll Einschüben sind sowohl die Steuervorstufe, der Organisator, das Netzgerät und die Leistungs-Endstufe untergebracht [19] . . . . .	26
4.2	Blockschaltbild der gesamten Leistungsendstufe. Sie besteht aus Treiberstufe, Bandpaßfilter, Endstufenröhre und dem Anodenbandpaß [19] . . . . .	28
4.3	Die beiden Drehkondensatoren C286 und C287 werden jeweils von den Schrittmotoren „M“ und den als Verstärker dargestellten Schrittmotorkarten „Karte.021“ angesteuert. Die beiden Schalter stehen symbolisch für die verwendeten Endschalter und sind mit den Schrittmotoren mechanisch gekoppelt [19] . . . . .	31
4.4	Blockdiagramm der Schrittmotorsteuerung nach [19] . . . . .	32
4.5	Schaltplan der Schrittmotorsteuerung . . . . .	33
4.6	Anschlußbelegung der Vakuumdrehkondensatoren . . . . .	35
4.7	Fertig aufgebauter Prototyp der Schrittmotorplatine. In der ersten Version wurde noch eine einreihige Stiftleiste verwendet . . . . .	36
4.8	Schaltplan der Anzeigeelektronik nach [20] . . . . .	38
4.9	Schaltplan der 7-Segmentanzeige . . . . .	39
4.10	Schaltplan der Kreismotorsteuerung . . . . .	42
4.11	Fertig aufgebauter Prototyp der Kreismotorplatine (ohne Relais- nur die zugehörigen Sockel sind bestückt) . . . . .	43
4.12	Prinzipdarstellung für die Ansteuerung des Anodenkreismotors. Die Anschlüsse 1 bis 11 kommen vom Organisator, die Signale „Rechtslauf“ und „Linkslauf“ gehen zur Kreismotorsteuerung und legen somit die gewünschte Drehrichtung des Motors fest . . . . .	44
5.1	Blockdarstellung einer Serienstabilisierung mittels einer Zener-Diode [21] . . . . .	47
5.2	Schaltung der aufgebauten Serienstabilisierung . . . . .	48
5.3	Fertig aufgebauter Prototyp der Gitterstabilisierungsplatine . . .	50
5.4	Zwei Messreihen der realisierten Gitterstabilisierung. Dargestellt sind die Kurven für zwei unterschiedliche Ausgangsspannungen (entsprechend den Gitterspannungen 250 V und 370 V) . . . . .	51

# Tabellenverzeichnis

2.1	Die wichtigsten zugewiesenen Frequenzen im Kurzwellenband von 3 MHz bis 30 MHz . . . . .	4
3.1	Die Anzahl der Steuerelektroden legen die Benennung für unterschiedliche Röhrentypen fest . . . . .	13
4.1	Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Telefunken-Senders (Details siehe unter [19]) . . . . .	25
4.2	Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften der im vorliegenden Telefunken Sender verwendeten Endröhre [19] . . . . .	29
4.3	Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Schrittmotorsteuerung. Alle nicht explizit angegebenen Pins sind nicht beschaltet . . . . .	35
4.4	Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Anzeigeelektronik. Nicht angeführte Anschlüsse sind unbelegt . . . . .	37
4.5	Pinbelegung der 32-poligen Stiftleiste der Kreismotorsteuerung. Alle nicht explizit angegebenen Pins sind nicht beschaltet . . . . .	43