

## Ruhestromeinstellung von Endröhren

- White paper - Überblick für Audio-Röhrenverstärker -

### **Zusammenfassung**

Für die Ruhestromeinstellung von Endröhren kommen im wesentlichen zwei unterschiedliche Möglichkeiten in Betracht. Vor allem bei den Nutzern von Audio-Verstärkern wird über Auswirkungen auf den Klang diskutiert. Technisch gesehen haben die verfügbaren Konzepte klare Vor- und Nachteile wobei auch die jeweiligen Einflüsse auf die Audiowiedergabe absehbar sind. Dieses white-paper stellt die gängigen Konzepte knapp vor und veröffentlicht das im Verstärker VI 72-2 verwendete Konzept.

## 1 Ruhestromeinstellung von Endröhren

Dieses white paper ist zunächst eine kurze Zusammenfassung der meistgenutzten Konzepte zur Ruhestromeinstellung. Abschliessend wird das im Verstärker VI 72-2 verwendete Konzept veröffentlicht. Auf Quellenangaben und technische Details wird in diesem Artikel weitgehend verzichtet. Sofern das für VI 72-2 entwickelte Konzept bereits veröffentlicht ist oder in einem Röhrenverstärker genutzt wird, bittet der Autor um einen entsprechenden Hinweis. Ansonsten wird dieses Konzept hiermit veröffentlicht, copyright Junghans-electronics.

### 1.1 Automatische Ruhestromeinstellung (Kathodenwiderstand)

Bei der automatischen Ruhestromeinstellung oder auch automatischen Gitter-Vorspannungserzeugung wird die nötige (negative) Gittervorspannung mittels eines Kathodenwiderstands durch den Kathodenstrom „automatisch“ erzeugt. Maßgeblich für die Dimensionierung ist der gewünschte Kathodenstrom  $I_K$  und die dafür erforderliche Gitterspannung  $U_{G1}$  bei gegebener Anoden- bzw. Schirmgitterspannung. Beispielsweise soll eine E130L mit 100mA Anodenstrom betrieben werden bei 210V Anodenspannung und 150V Schirmgitterspannung. Hieraus ergibt sich ein Kathodenstrom von etwa 110mA bei einer negativen Gittervorspannung von etwa 16,5V. Entsprechend wird der Kathodenwiderstand dimensioniert zu  $R_K = 16,5V/110mA = 150\Omega$ .

Die *Vorteile* sind:

- Kein Abgleich erforderlich
- Verstärkung wird maßgeblich durch  $R_K$  bestimmt (sofern nicht kapazitiv überbrückt).
- Geringe Drift des Arbeitspunktes bei gegebener Röhre

Demgegenüber stehen folgende *Nachteile*:

- Signifikanter Anteil der Leistung wird in  $R_K$  umgesetzt und steht für Audio nicht mehr zur Verfügung.
- Aufgrund der Röhrenstreuungen, speziell bezüglich  $U_{G1}$ , kann die einzelne Röhre nur mit  $\leq 80\%$  ihrer maximalen Leistung betrieben werden.
- Die effektive Steilheit wird deutlich reduziert (im obigen Beispiel von ca. 20mA/V auf ca. 5mA/V)
- Nur näherungsweise Einstellung des projektierten Arbeitspunktes. Hierdurch verbleibt ein DC-Offset, der vor allem bei Gegentaktkonzepten unerwünscht sein kann. Bei symmetrischen Verstärkern verbleibt eine Unsymmetrie.

Zur Vermeidung einiger der beschriebenen Nachteile wird oft der Kathodenwiderstand durch einen Kondensator überbrückt. Dies bedingt jedoch häufig den Einsatz von Elektrolytkondensatoren mit kürzerer Lebensdauer und schlechteren Toleranzen. Weiterhin wird hierdurch ein zusätzlicher Hochpaß eingefügt, der unter Umständen unerwünscht ist.

### 1.2 Feste Ruhestromeinstellung (festes $U_{G1}$ )

Sollen alle Nachteile der automatischen Ruhestromeinstellung vermieden werden, so bietet sich die Ruhestromeinstellung mittels „fester“, konstanter Gittervorspannung  $-U_{G1}$  an. Tatsächlich vermeidet diese Variante

alle Nachteile der automatischen Ruhestromeinstellung. Leider verkehren sich alle Vorteile der automatischen Einstellung nun in Nachteile wozu noch weitere hinzukommen.

Zusammenfassend ergeben sich also folgende *Vorteile*:

- Die volle Steilheit der Endröhre steht zur Verfügung.
- Die volle Betriebsspannung steht für Audioverstärkung zur Verfügung.
- Bei korrektem Abgleich kann die einzelne Röhre mit 100% Ihrer maximalen Leistung betrieben werden.
- Wählbare Ruhestromeinstellungen (z.B. class A, class AB) können einfach realisiert werden.
- Exakte Einstellung des projektierten Arbeitspunktes möglich. Hierdurch kann der DC Offset eliminiert werden.

Und *Nachteile*:

- Abgleich erforderlich, unter Umständen regelmäßig.
- Verstärkung wird maßgeblich durch die Endröhre und ihre Toleranzen bzw. Alterung bestimmt.
- Drift des Arbeitspunktes (thermisch und alterungsbedingt) der Röhre wird nicht durch Gegenkopplung ausgeglichen.

Zur Einstellung (Justage) des Arbeitspunktes ist es erforderlich den Kathodenstrom (alternativ Anodenstrom) der Röhre zu messen und die negative Gittervorspannung entsprechend zu justieren. Meist erfolgt die Messung des Kathodenstromes über einen (im Vergleich zur automatischen Einstellung kleinen) Kathodenwiderstand. Die Gittervorspannung wird über eine einstellbare Hilfspannungsquelle je Endröhre justiert.

### 1.2.1 Feste Ruhestromeinstellung - manuelle Einstellung

Bei ausgeführten Geräten kann die Messung des aktuellen Kathodenstromes erfolgen über

1. Ein im Gerät eingebautes Meßinstrument
2. Herausgeführte Meßbuchsen (zur Messung des Spannungsabfalls am Kathodenwiderstand)
3. Anklemmen eines Voltmeters am Kathodenwiderstand

Hierbei ist anzumerken, daß ausschließlich die erste Variante für den Endkunden zumutbar bzw. zulässig ist - und das auch nur unter speziellen, meist nachteiligen Bedingungen. Die anderen Varianten sind ohnehin Servicepersonal vorbehalten.

Die Einstellung der korrekten Gitterspannung  $-U_{G1}$  erfolgt mittels eines Stellgliedes. Bei der manuellen Einstellung ist dies in der Regel ein Spannungsteiler (Potentiometer).

### 1.2.2 Feste Ruhestromeinstellung - analoge Regelung

Die analoge Regelung der Gittervorspannung wird auch als „Bias-Servo“ bezeichnet. Hierbei wird der Kathodenstrom als Zielgröße am Kathodenwiderstand gemessen und mit einer Referenz verglichen (z.B.

mittels eines OPV). Die *Vorteile* einer Bias-Regelung sind die stetige, exakte Regelung des Arbeitspunktes auf seinen Sollwert und damit der Wegfall des Offsets bei Gegentaktkonzepten. Bei der Dimensionierung einer Bias-Regelung, vor allem der Zeitkonstanten muß sorgfältig vorgegangen werden, da der gemessene DC-Anteil am Kathodenwiderstand (Zielgröße) aussteuerungsabhängig ist. Damit ergibt sich eine Abhängigkeit des eingestellten Arbeitspunktes von der Aussteuerung. Eine Arbeitspunktregelung in DC-gekoppelten Verstärkern ist in der Regel nicht möglich.

Für die Regelung des Kathodenstromes über  $-U_{G1}$  ist eine Messung des Ruhestromes erforderlich. Aufgrund der gleichzeitigen Überlagerung mit der tonfrequenten Wechselfspannung müssen Maßnahmen ergriffen werden nur den DC Anteil in die Regelung einfließen zu lassen. Zusätzlich kann bei hoher Aussteuerung der Endstufe ein Gleichanteil im Meßsignal auftreten, welcher die Regelung beeinflusst.

Nach dem Einschalten des Verstärkers wird - ohne Zusatzmaßnahmen - die Regelung einen Ist-Wert von etwa Null messen, solange mangels Heizung kein Strom durch die Röhre fließt. Dies wird die Regelung dazu veranlassen, die negative Gitterspannung  $-U_{G1}$  auf den Minimalwert einzustellen. Sofern wie üblich die Zeitkonstante des Aufheizvorganges kleiner ist als jene der Regelung wird die Röhre nach dem Einschalten überlastet oder zumindest mit erhöhtem Ruhestrom betrieben. Um dies zu vermeiden, sind zusätzliche Maßnahmen für den Einschaltvorgang und ggf. den Umschaltvorgang zwischen verschiedenen Arbeitspunkteinstellungen nötig.

### 1.2.3 Feste Ruhestromeinstellung - digitale Regelung

Die digitale Regelung der Gittervorspannung entspricht weitgehend der analogen. Es wird ebenfalls der Kathodenstrom als Zielgröße am Kathodenwiderstand gemessen und mit einer Referenz verglichen. Die Messung erfolgt hier jedoch mittels eines ADC und der Vergleich mit der Referenz bzw. die digitale Regelung und Filterung erfolgt mittels Prozessor. Die Ausgabe der Stellgröße ( $-U_{G1}$ ) erfolgt über einen DAC. Hier bietet sich ein linearer DAC an. Alternativ existieren Konzepte mit einem PWM-DAC. In diesem Falle werden HF-Störungen an das Steuergitter der Röhre verschleppt was einen erhöhten Filter- und Entstöraufwand nach sich zieht. Sofern kein EMV-Labor zur Verfügung steht, sollte davon ausgegangen werden, daß bei Einsatz eines PWM-DAC der Audio-Verstärker auch auf den Lang- und Mittelwellebändern auf Sendung ist.

### 1.2.4 Feste Ruhestromeinstellung - digitale, automatische Einstellung

Im Gegensatz den oben beschriebenen Konzepten implementiert der Verstärker VI 72-2 eine digitale Steuerung der Gittervorspannung mit konstanter negativer Gitterspannung. Im wesentlichen entspricht dies der manuellen Einstellung, jedoch wird der Ruhestrom der Endröhren nicht manuell sondern mittels einer Mikrocontroller-Steuerung justiert. Als Stellglied kommt ein DAC zum Einsatz, vorzugsweise ein nichtflüchtiger, linearer DAC. Damit ergeben sich folgende Vorteile:

1. Schneller (Neu-)abgleich innerhalb weniger Sekunden durch den Benutzer
2. Einfacher Wechsel zwischen verschiedenen Einstellungen (z.B. class A und class AB)
3. Kein Mikroprozessor für den Normalbetrieb nötig (bei Verwendung eines non-volatile DAC als Stellglied)
4. Keine zusätzlichen Regelzeitkonstanten und keine aussteuerungsabhängige Verschiebung des Arbeitspunktes

5. Einsatz in DC-gekoppelten Verstärkern möglich
6. Einfache Protokollierung der Ruhestrome zur Abschätzung des Zustandes der Endröhre

Mindestens zwei Hersteller weltweit bewerben das Prinzip einer festen Gitterspannung mit der Möglichkeit einer automatischen Justage. Dem Autor ist jedoch keine Veröffentlichung bekannt wie dies technisch umgesetzt ist (zielführende Hinweise sind gerne willkommen). Aus diesem Grunde soll hier das Prinzip von Junghans-electronics näher beschrieben werden, wie es zum Beispiel im Verstärker VI72-2 implementiert ist.

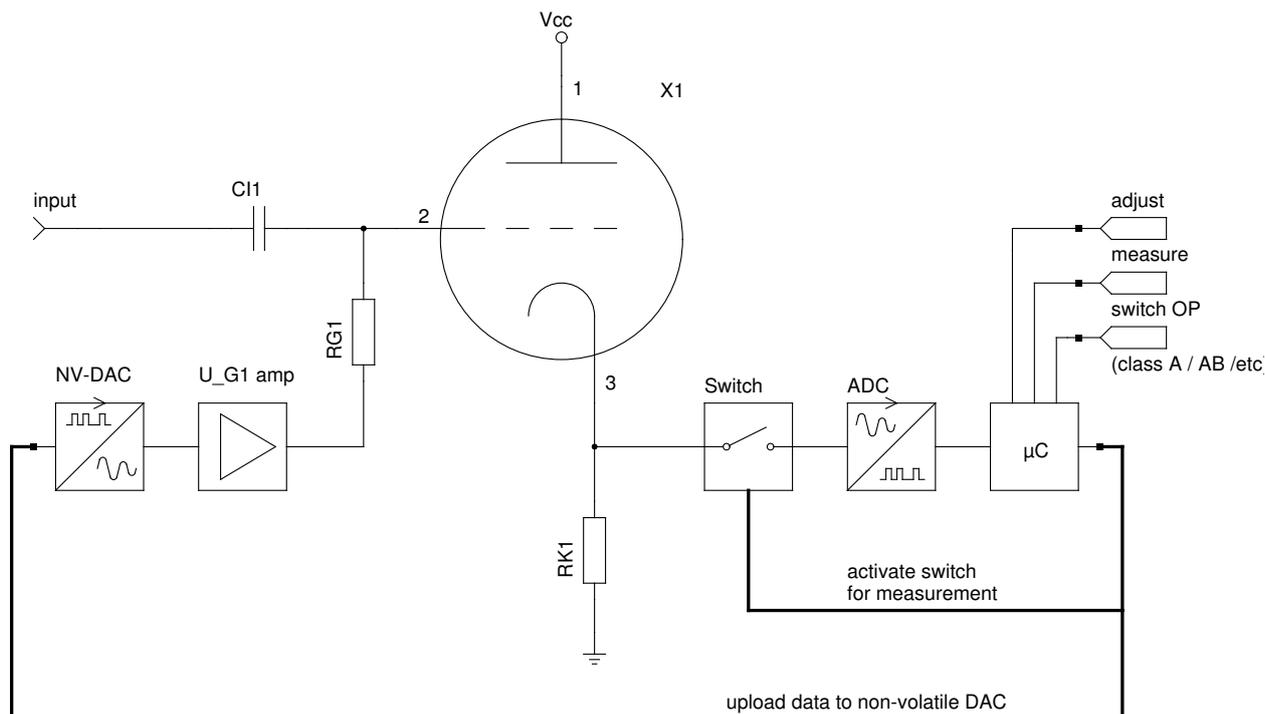


Abbildung 1: Prinzip der automatischen Bias-Justage

Abbildung 1 zeigt das Prinzip mit allen wesentlichen Elementen. Die Erzeugung der negativen Gitterspannung  $-U_{G1}$  erfolgt mittels je eines DAC per Röhre. Bei Verwendung eines non-volatile DAC ist der rechte Teil der Schaltung bestehend aus ADC und Mikrocontroller für die Funktion zunächst nicht erforderlich. Beim Einschalten stellt der NV-DAC seine zuletzt programmierte Ausgangsspannung ein. Diese wird über einen Verstärker in den erforderlichen Spannungsbereich verschoben und dem Steuergitter über den Gitter-Ableitwiderstand  $R_{G1}$  zugeführt.

Der (optionale) Schalter zusammen mit einem ADC und dem Controller bilden das Meßsystem. Auf Anfrage oder je nach Programmierung beispielsweise vor dem Ausschalten des Gerätes kann der Controller den Ruhestrom der Endröhre messen und mit einem Sollwert vergleichen. Bei Abweichungen vom Sollwert wird der NV-DAC mit einer neuen Gitterspannung programmiert um den Kathodenstrom wie vorgegeben einzustellen. Anzumerken ist hier, daß im Normalbetrieb, ausserhalb einer Messung oder Justage, der Mikrocontroller nicht benötigt wird und daher abgeschaltet werden kann.

Zusätzlich zu den bereits genannten Vorteilen dieser Lösung ergeben sich folgende weitere Möglichkeiten und Vorteile ohne die Notwendigkeit weiterer Hardware:

- Nur ein ADC für alle Röhren im System erforderlich wegen möglicher Umschaltung der Messung
- Einfache Auswahl zwischen verschiedenen Betriebsmodi (z.B. class A, class AB)
- Protokollierung und Anzeige von  $I_K$  und  $U_{G1}$  für jede Röhre
- Möglichkeit der „online“ Leistungsmessung während des Betriebs und Auswertung bezüglich Spitzenleistung, mittlerer Leistung, Übersteuerung etc.
- Automatische Messung der Steilheit der Röhren, „Röhrenprüfung“

## 2 Paarung von Endröhren, „matching“

Das gewählte Konzept der Ruhestromeinstellung hat Auswirkungen auf die Anforderungen die an die Röhrentoleranzen gestellt werden. Generell muß bei Elektronenröhren mit großen Streuungen bei bestimmten Parametern gerechnet werden. Ein gutes Design wird jedoch weitgehend unempfindlich sein gegenüber Toleranzen bei Endröhren.

Ohne innerhalb dieses Artikels auf die Details und das Für und Wider des Röhrenmatchings eingehen zu wollen, soll sich der Leser jedoch einen Überblick über Sinn oder Unsinn der Verwendung gepaarter Röhren machen können.

Hierzu gehen wir davon aus, daß in einem gegebenen Verstärker die Betriebsspannungen für Anode  $U_{anode}$  und bei Pentoden die Schirmgitterspannung  $U_{G2}$  konstant ist. Der Ruhestrom bzw. der Arbeitspunkt wird wie oben beschrieben eingestellt.

Idealerweise bestückt man nun den Verstärker mit paarweise identischen Röhren wobei identisch hier meint

- Identischer Anodenstrom im Arbeitspunkt  $I_{anode}$
- Identische Gitterspannung  $-U_{G1}$
- Identische Steilheit in der Schaltung  $S_{eff}$

Bei Röhren muß allerdings leider mit einer deutlichen Streuung gerechnet werden, bei vorgegebenem Anodenstrom speziell in den Parametern  $-U_{G1}$  und  $S$  wobei als Abschätzung jeweils durchaus  $\pm 20\%$  angesetzt werden sollten. Mit vertretbarem Aufwand werden sich demnach kaum identische Röhren finden lassen, was direkt zur Frage führt welche Parameter denn vorzugsweise gleich sein sollen.

Der *Anodenstrom* im Arbeitspunkt bestimmt zusammen mit der Betriebsspannung  $U_{anode}$  die Anodenverlustleistung. Zusätzlich bestimmt er den Aussteuerbereich der jeweiligen Endröhre und damit die maximale Ausgangsleistung. Aus diesen Gründen ist ein Betrieb mit identischen Anodenströmen wünschenswert, da dann sowohl die thermische Belastung der Röhren als auch der Aussteuerbereich gleich sind. In der Folge wird der Verschleiß bzw. die Lebensdauer der Endröhren in etwa gleich sein und symmetrische Konzepte (Gegentakt) bleiben symmetriert.

Die *Steilheit* der Endröhren im Arbeitspunkt bestimmt wesentliche projektierte Eigenschaften der Schaltung, meist die Verstärkung und/oder den Ausgangswiderstand. An die Stelle der Verstärkung tritt bei gegengekoppelten Schaltungen die Schleifenverstärkung womit die Steilheit der Endröhren eine direkte Auswirkung auf die Stabilität der Schaltung haben kann. Gleiche und/oder eine zumindest bekannte Steilheit der Endröhren innerhalb eines Verstärkers ist demnach in fast allen Verstärkerkonzepten vorteilhaft wenn nicht notwendig.

An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, daß für die Eigenschaften des Verstärkers die effektive Steilheit innerhalb der Schaltung maßgeblich ist und nicht der Datenblattwert der Röhre. Speziell bei automatischer Gitterspannungserzeugung mittels unüberbrücktem Kathodenwiderstand wird die effektive Steilheit maßgeblich vom Kathodenwiderstand bestimmt, was für Symmetrie und die Einhaltung projektierter Eigenschaften ein großer Vorteil sein kann.

Die *Gitterspannung*  $-U_{G1}$  hat hingegen nur untergeordneten Einfluß auf die wichtigen Parameter des Verstärkers wie Verlustleistung, Verstärkung, Ausgangswiderstand oder Stabilität. Je nach Verstärkerschaltung kann aber der Aussteuerbereich durch die Höhe der negativen Gitterspannung begrenzt sein. Spezielles Augenmerk benötigt die Streuung der Gitterspannung bei automatischer Erzeugung mittels Kathodenwiderstand. Hier besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Ruhestrom und Gitterspannung  $-U_{G1}$ .

Bias-Konzept	Selektionsparameter
Automatische Gitterspannung über $R_K$ <sup>1</sup>	Anodenstrom (Design-Vorgabe) Gitterspannung $U_{G1} \rightarrow$ Anodenstrom Steilheit $\rightarrow$ Verstärkung <sup>2</sup>
Feste Gitterspannung <sup>3</sup>	Anodenstrom (Design-Vorgabe) Steilheit $\rightarrow$ Verstärkung <sup>2</sup>

Tabelle 1: Selektionsparameter nach Bias-Konzept

Aus diesen Ausführungen ergibt sich, daß die Erfordernisse der Röhrenpaarung vom gewählten Bias-Konzept und von der Schaltung abhängen. Eine Zusammenfassung ist in Table 1 gegeben.

Für Konzepte mit automatischer Gitterspannung über  $R_K$  ist eine Selektion nach Gitterspannung  $U_{G1}$  bei gegebenem Anodenstrom offenbar sinnvoll. Bei fester (einstellbarer) Gitterspannung ist eine Selektion nach  $U_{G1}$  jedoch unnötig. In beiden Fällen ergibt sich für einen bestimmten Arbeitspunkt ( $U_{anode}$ ;  $I_{anode}$ ) eine bestimmte Steilheit, welche von der Röhre und deren Streuung abhängt.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Auswirkungen von Röhrentoleranzen je nach Verstärkerschaltung von sehr deutlich bis hin zu vernachlässigbar gering sein können. Es liegt dabei am Entwickler die für sein Konzept optimale Lösung zu wählen. Insgesamt stellt ein Bias-Konzept mit fester, einstellbarer (oder geregelter) Gitterspannung geringere Anforderungen an die Paarung der Endröhren.

### 3 Varianten

Dieses white paper widmet sich vornehmlich der automatischen Justage im Verstärker VI72-2 gemäß 1.2.4. Hierzu sind ohne Konzeptänderung verschiedene Abwandlungen möglich, auf welche nachfolgend hingewiesen werden soll.

<sup>1</sup>Gemäß 1.1

<sup>2</sup>Relevanz abhängig von Schaltungsauslegung

<sup>3</sup>Justiert oder geregelt gemäß 1.2

## DC Gegenkopplung

Es ist möglich das automatische Bias Konzept gemäß 1.1 mit dem Konzept fester Gitterspannung gemäß 1.2 zu kombinieren. Konkret bedeutet dies in der Regel, für den Kathodenwiderstand  $RK1$  in Abbildung 1 einen Wert zu wählen, der zu einer signifikanten DC-Gegenkopplung führt und dadurch maßgeblich die effektive Steilheit der Stufe bestimmt (z.B.  $RK1 = 1/(2S)$  mit  $S$ : Steilheit der Endröhre). Auf diese Weise kann ein optimaler Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Bias-Konzepte gefunden werden. Der optimale Weg ist dabei selbstverständlich abhängig von der Schaltungsauslegung des individuellen Verstärkers.

## Position des Stellgliedes

Vorgestellt wurde ein Stellglied für die direkt Einstellung der negativen Gittervorspannung  $-U_{G1}$ . Dies hat den Vorteil, daß das Stellglied ohne Verlustleistung arbeitet und das Stellglied parkatisch vollständig vom Nutzsinal entkoppelt ist. Alternativ kann das Stellglied anstelle von  $RK1$  eingesetzt werden. Sofern dieses jedoch keinen Kurzschluß für das Nutzsinal darstellt, werden verschiedene Eigenschaften dieser Verstärkerstufe wieder von der aktuellen Einstellung beeinflusst. Daher ist diese Variante nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

## Ausführung des Stellgliedes

Unabhängig von der Sinnhaftigkeit besteht unter Umständen die Forderung oder der Wunsch ohne Halbleiter innerhalb des Verstärkers auszukommen. Diese Forderung lässt sich ebenfalls mit dem Bias-Konzept gemäß Abschnitt 1.2.4 einfach realisieren, indem der DAC zum Beispiel durch ein konventionelles Potentiometer mit Antrieb ersetzt wird.

## Ausführung des Messwerkes

Ähnliches gilt für die Ausführung der Strommessung. Es ist natürlich möglich, jeder Endröhre einen eigenen ADC beizustellen um eine kontinuierliche Messung zu ermöglichen. Speziell die geregelten Konzepte gemäß 1.2.3 und 1.2.2 können hiervon profitieren. Sofern jedoch im Normalbetrieb keine Halbleiter erwünscht sind, so ist dies mit dem vorgestellten Konzept gemäß 1.2.4 einfach möglich durch Einsatz je eines Schalters pro Endröhre wie in Abbildung 1 gezeichnet.

## 4 Zusammenfassung

Die Tabelle 2 stellt nochmals die wesentlichen Vor- und Nachteile verschiedener Ruhestromeinstellungen gegenüber. Alle vorgestellten Bias-Konzepte sind geeignet hervorragende Verstärker zu konstruieren - richtige Anwendung vorausgesetzt. Für die Fälle wo eine feste Gittervorspannung bevorzugt wird, wurde ein Konzept vorgestellt, welches die Vorteile einer festen manuellen Einstellung mit den Vorteilen einer wartungsfreien Regelung vereint.

Einstellung	Vorteil	Nachteil
Automatisch über Kathodenwiderstand	Kein Abgleich erforderlich $R_K$ bestimmt eff. Steilheit (wenn $R_K$ nicht kapazitiv überbrückt) Geringe Drift	Leistungsverlust in $R_K$ Röhre bestimmt die eff. Steilheit ( $R_K$ kap. überbrückt) Reduktion der effektiven Steilheit ( $R_K$ nicht kap. überbrückt) Berücksichtigung der Toleranzen nötig, daher Betrieb mit 100% $P_{anode}$ nicht möglich Keine exakte Einstellung möglich
Manuelle Einstellung über $-U_{G1}$	Volle Steilheit der Endröhre steht zur Verfügung Kapazitive Überbrückung von $R_K$ nicht erforderlich Betrieb der Röhren mit 100% $P_{anode}$ möglich Exakte Einstellung möglich Wählbare Einstellungen möglich	Röhre bestimmt die Steilheit Abgleich erforderlich Regelmäßige Kontrolle und ggf. Neuabgleich erforderlich Drift des Arbeitspunktes wird nicht automatisch ausgeglichen
Regelung über $-U_{G1}$	Volle Steilheit der Endröhre steht zur Verfügung Kapazitive Überbrückung von $R_K$ nicht erforderlich Betrieb der Röhren mit 100% $P_{anode}$ möglich Exakte Einstellung möglich Wählbare Einstellungen möglich	Röhre bestimmt die Steilheit Nur für AC gekoppelte Stufen Zusatzmaßnahmen beim Einschalten erforderlich
Automatische Justage über $-U_{G1}$	Volle Steilheit der Endröhre steht zur Verfügung Kapazitive Überbrückung von $R_K$ nicht erforderlich Betrieb der Röhren mit 100% $P_{anode}$ möglich Exakte Einstellung möglich Wählbare Einstellungen möglich DC Kopplung möglich Keine zusätzlichen Zeitkonstanten Justage innerhalb weniger Sekunden durch den Benutzer möglich	Röhre bestimmt die Steilheit Eventuelle Drift der Endröhren muß durch Neujustage ausgeglichen werden

Tabelle 2: Gegenüberstellung