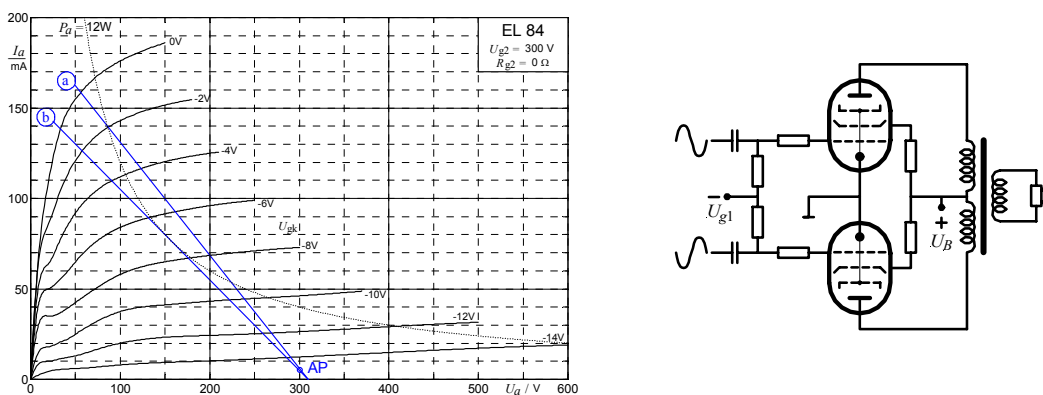


### 10.5.3 Gegentakt-B-Betrieb

Beim Gegentakt-B-Verstärker liegt der Arbeitspunkt nicht in der Mitte der Arbeitsgeraden, sondern an deren unteren Ende. Ohne Aussteuerung fließt nur ein kleiner Ruhestrom durch die Endröhren, das Netzteil wird weniger belastet, die Röhren nicht so heiß – und trotzdem ist die erzielbare Ausgangsleistung größer als beim Gegentakt-A-Verstärker.

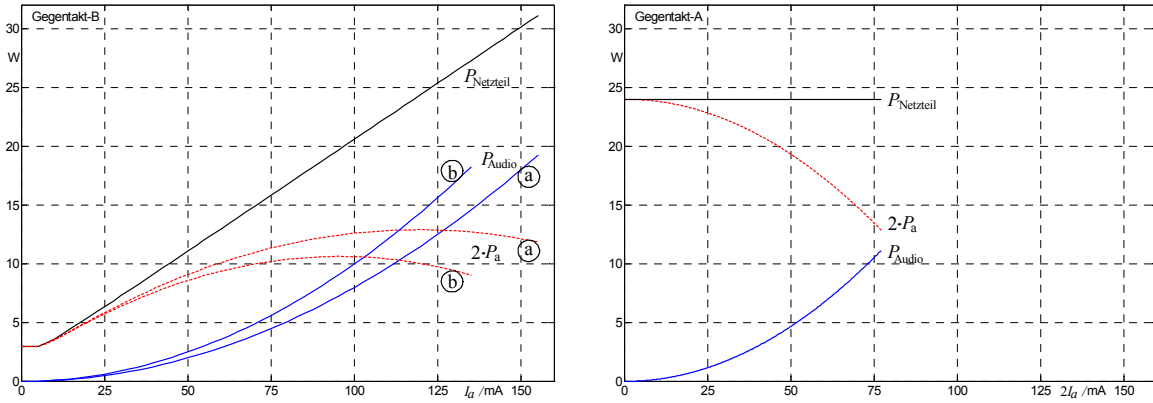
Damit der Anodenstrom ohne Aussteuerung klein bleibt, muss die **Gittervorspannung** ziemlich negativ werden. Das ist aber (gerade wegen des kleinen Stroms) nicht mehr als Spannungsabfall am Kathodenwiderstand realisierbar – deshalb liegen beide Kathoden auf Massepotential, und eine eigene Gleichspannungsquelle erzeugt die benötigte negative Gittervorspannung von immerhin  $-15 \dots -65 \text{ V}$ . In **Abb. 10.5.10** ist diese Gleichspannungsquelle  $U_{g1}$  genannt, sie wirkt über zwei hochohmige Querwiderstände (z.B.  $220 \text{ k}\Omega$ ) und zwei Gitter-Vorwiderstände (z.B.  $1 - 5 \text{ k}\Omega$ ; es gibt aber auch Schaltungen ohne Gitter-Vorwiderstand).



**Abb. 10.5.10:** Ausgangs-Kennlinienfeld der EL 84, Schaltung der Gegentakt-B-Endstufe.

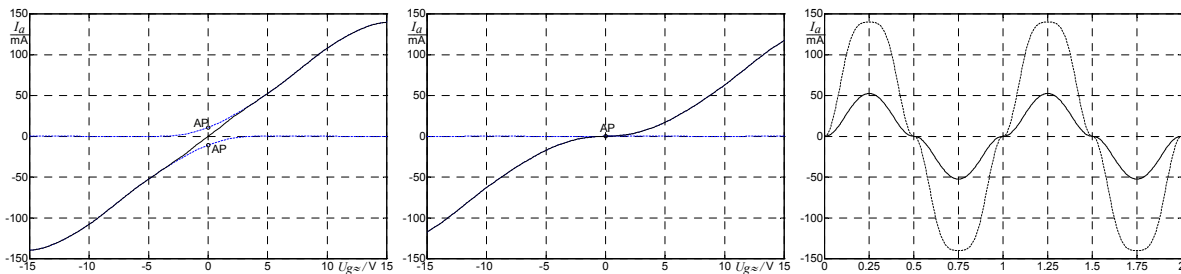
Die optimale Steigung der Arbeitsgeraden (und damit den **optimalen Lastwiderstand**) erhält man, wenn der Schnittpunkt zwischen der  $U_{gk} = 0\text{V}$ -Kennlinie und der Arbeitsgeraden maximale Entfernung vom Arbeitspunkt hat. In **Abb. 10.5.10** sind zwei verschiedene Arbeitsgeraden eingezeichnet: Die flacher verlaufende Gerade (b) gehört zu einem  $2.0\text{-k}\Omega$ -Lastwiderstand, bei (a) beträgt der Lastwiderstand  $1.6 \text{ k}\Omega$ . Dass dabei die Grenzleistungshyperbel geschnitten wird, ist unproblematisch: Die Röhre wird ja nur während einer Halbwelle belastet, somit bleibt der Mittelwert der Anoden-Verlustleistung unter dem zulässigen Grenzwert. Statische bzw. extrem tieffrequenter Ansteuerung ist bei typischen Gitarrenverstärkern nicht zu erwarten, ihre Endstufen werden über einen Hochpass angesteuert.

Die maximal abgebbaren **Leistungen** der beiden Varianten unterscheiden sich nur wenig: Bei (a) ca.  $19 \text{ W}$ , bei (b) ca.  $18 \text{ W}$ . Zum Vergleich: Eine entsprechende Gegentakt-A-Endstufe könnte nur ca.  $11 \text{ W}$  erzeugen. Neben der maximal abgebbaren Leistung verdient aber auch die vom Netzteil zu liefernde Leistung Beachtung – insbesondere, wenn die Endstufe wenig angesteuert wird. Bei der Gegentakt-A-Endstufe ist die Netzteil-Leistung aussteuerungsunabhängig, z.B.  $24 \text{ W}$  bei  $2 \times \text{EL}84$ . Demgegenüber muss bei der Gegentakt-B-Endstufe das Netzteil (je nach Ruhestrom) nur ca.  $3 \text{ W}$  liefern. **Abb. 10.5.11** zeigt die Leistungsbilanz, allerdings ohne Schirmgitterleistung; hierfür sind (bei Vollaussteuerung) pro Röhre ca.  $3 \text{ W}$  zusätzlich anzusetzen. Im B-Betrieb ist die Ausgangsleistung größer, und die Röhren-Verlustleistung (Differenz der beiden Kurven) kleiner: Die maximale Anoden-Verlustleistung ist im B-Betrieb nur ungefähr halb so groß wie im A-Betrieb.



**Abb. 10.5.11:** Zusammenhang zwischen Netzteile-Leistung (ohne  $g_2$ -Leistung) und Ausgangsleistung  $P_{\text{Audio}}$ . Die Differenz der beiden Kurven entspricht der Anoden-Verlustleistung  $2 \cdot P_a$  beider Röhren. ( $U_B = 300\text{V}$ ).

Der relativ gute Wirkungsgrad der Gegentakt-B-Schaltung ergibt sich daraus, dass jede Röhre nur dann einen großen Anodenstrom leitet, wenn tatsächlich Leistung an den Verbraucher abgegeben wird – hierzu muss der Arbeitspunkt an das untere Ende der Arbeitsgeraden gelegt werden. Dabei darf die Gittervorspannung aber nicht zu negativ werden, sonst kommt es zu **Übernahmeverzerrungen** (Abb. 10.5.12). Bei ausreichend großem Ruhestrom (linkes Bild) überlagern sich die beiden Röhrenkennlinien zu einer einigermaßen glatten Kurve, bei zu geringem Ruhestrom entsteht ein Sattelpunkt (Mitte und rechts), der einerseits die Verzerrungen ungerader Ordnung ansteigen lässt, und andererseits zu einer unerwünschten (progressiven) Aussteuerungsabhängigkeit der Kennliniensteigung führt (Kap. 10.5.8). Besondere Beachtung verdient die Tatsache, dass mit zunehmender Leistungsabgabe die Betriebsspannung, und damit auch die **Schirmgitterspannung** abnimmt – was die Übernahmeverzerrungen noch verstärkt (Kap. 10.5.8).



**Abb. 10.5.12:** Übertragungskennlinien bei unterschiedlicher Ruhestromeinstellung, Übernahmeverzerrungen. Rechts sind die zum mittleren Bild gehörenden Verzerrungen für zwei verschiedene Amplituden dargestellt.

In der Literatur ist **keine exakte Definition** für den Arbeitspunkt bei Gegentakt-B-Betrieb zu finden, vielmehr ist allgemein vom "kleinen Anodenstrom" die Rede, gelegentlich sogar vom Anodenstrom, der im AP "fast zu null" wird. Was Siemens (und andere Röhren-Hersteller) aber nicht hinderte, für die EL34 im Gegentakt-B-Betrieb einen Ruhestrom von immerhin 35 mA zu spezifizieren. Mit Recht, denn der theoretische Fall, dass der Anodenstrom ohne Aussteuerung "fast null" wird, hat für die NF-Praxis so gut wie keine Bedeutung. Dass 35 mA "etwas mehr als fast null" sind, ist unumstritten – ob diese Betriebsart aber überhaupt noch Gegentakt-B-Betrieb genannt werden darf, wird kontrovers diskutiert: Alternativ ist von **Gegentakt-AB-Betrieb** die Rede, oder vom **Gegentakt-D-Betrieb**, wobei man wissen muss, dass beide Bezeichnungen **mehrdeutig** sind! (Details in Kap. 10.5.4).

Nur bei kleiner Aussteuerung leiten im B-Betrieb beide Endröhren gleichzeitig, bei hoher Aussteuerung leitet jede Endröhre im Wesentlichen nur während einer Halbwelle. Dies ist bei der Dimensionierung der **Drahtquerschnitte** im Übertrager zu berücksichtigen: Nimmt man beispielsweise sinusförmige Aussteuerung an, und einen **Anoden-Spitzenstrom** von 141 mA (Abb. 10.5.10), so beträgt der Effektivwert nicht 100 mA, sondern nur 50 mA.

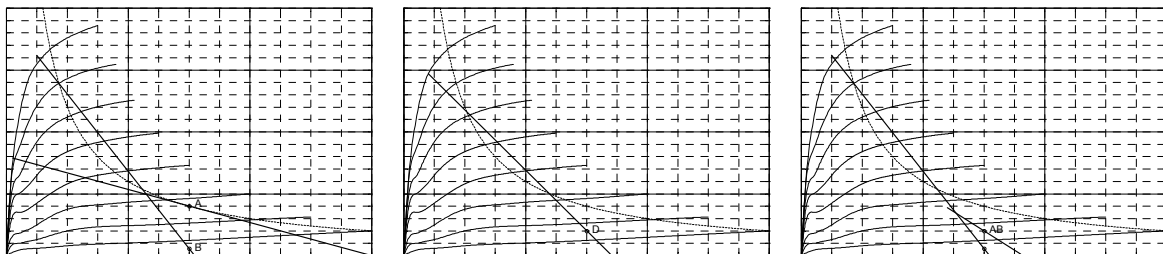
Die **Anodenspannung** liegt im B-Betrieb ohne Aussteuerung knapp unter der Betriebsspannung  $U_B$  (z.B. 300 V). Während der Halbwelle, bei der die Röhre leitet, nimmt die Anodenspannung bis zur Restspannung ab (z.B. 30 V). Während der anderen Halbwelle (Sperrbetrieb) verharrt die Anodenspannung aber nicht auf der Betriebsspannung, sondern nimmt bis fast zum Doppelten dieses Wertes zu (z.B. 570 V)! Die Primärwicklung ist bei gesperrter Röhre nämlich so gut wie unbelastet, und der von der anderen (aktiven) Röhre erzeugte Magnetfluss induziert an dieser unbelasteten Wicklung eine hohe Spannung. Bei Endstufen, die mit höherer Betriebsspannung arbeiten, können noch wesentlich gefährlichere Spannungen entstehen: Z.B. Fender-Verstärker: 850 V, 200-W-Marshall: 1100 V. Diese hohen Spannungen stehen nicht im Widerspruch zu Datenblattangaben, bei denen als maximale Anodenspannung z.B. 800 V spezifiziert wird; hiermit ist nämlich die Ruhespannung (ohne Aussteuerung) gemeint. Beispielsweise legt das Datenblatt der EL 34 als maximale Anodenspannung 800 V fest, lässt aber im Sperrbetrieb als maximale Anoden-Spitzenspannung 2000 V zu. Derart hohe Spannungen können leicht entstehen, wenn der Verstärker nicht am Nennwiderstand, sondern an einer höherohmigen Last (Leerlauf) betrieben wird. Häufig kommt es dann zu Funkenüberschlägen zwischen den Anschlussstiften 3 und 2 (Anode / Heizung), wodurch der Röhrensockel und/oder die Röhrenfassung zumeist irreversibel beschädigt wird. Noch gefährlicher ist ein isolationszerstörender Funkenüberschlag im Ausgangsübertrager, da für ihn oft kein adäquater Ersatz zur Verfügung steht.

Noch ein paar Bemerkungen zu scheinbar "nutzlosen" Bauteilen: Ihr Vorhandensein ist häufig praktischen Erkenntnissen zuzuschreiben. Der in Reihe zum (scheinbar hochohmigen) Steuergitter liegende Gitter-Vorwiderstand (1 – 5 k $\Omega$ ) reduziert die Schwingneigung der Endstufe. Hochfrequente Eigenschwingungen können auftreten – müssen aber nicht. Es kann gut sein, dass eine Endstufe auch ohne diese Widerstände problemlos arbeitet, trotzdem sollte man sie nicht generell weglassen: Bei jedem Röhren- oder Lautsprecherwechsel ergeben sich andere Stabilitätskriterien, sodass diese Mehrkosten gut investiert sind. Ähnlich verhält es sich mit kleinen Kapazitäten (10 – 100 pF): Sofern sie nicht direkt Teil der Klangfilterstufen sind, sollen sie vermutlich HF-Schwingungen unterbinden. Gut möglich, dass sie so groß dimensioniert wurden (werden mussten?), dass der Gitarrenklang hörbar an Brillanz verliert – dann eröffnet sich ein weites Feld für Verbesserungsmaßnahmen, aber auch die Chance, einen leistungsfähigen HF-Sender zu betreiben. Da Endstufen-Eigenschwingungen durchaus im UKW-Bereich (100 MHz) auftreten können, empfiehlt es sich, zur Stabilitätskontrolle ein breitbandiges Oszilloskop einzusetzen. Selbstverständlich darf man derartige Schwingungen nicht als "unhörbar" und damit irrelevant abtun: Zum einen ist der Betrieb eines derartigen Störsenders unzulässig, zum anderen werden hiermit die Endröhren u.U. massiv überlastet, und außerdem können durchaus hörbare Folgesymptome entstehen.

### 10.5.4 Gegentakt-AB-Betrieb, Gegentakt-D

Eine Gegentakt-AB-Endstufe arbeitet bei kleinen Steuerspannungen im Gegentakt-A-Betrieb, bei großer Aussteuerung im Gegentakt-B-Betrieb – soweit besteht Einigkeit in der Literatur. Im Detail beginnen die Unterschiede, lassen sich drei verschiedene Definitionen finden, die im Folgenden mit *alt*, *alternativ* und *neu* bezeichnet werden sollen. Nach der **alten Definition** ist der AB-Betrieb ein B-Betrieb mit etwas vergrößertem Ruhestrom, wobei zwischen  $AB_1$  (ohne Gitterstromfluss) und  $AB_2$  (mit Gitterstrom) unterschieden wird. Eine präzise Vorgabe für den AB-Arbeitspunkt existiert nicht, er liegt (im Ausgangskennlinienfeld) "irgendwo zwischen" dem A-AP und dem B-AP, was nicht selten dazu geführt hat, genau die Mitte zwischen dem A-AP und dem B-AP als AB-AP zu definieren. Beispiel: Wenn bei der EL84 der Ruhestrom im A-Betrieb 50 mA und im B-Betrieb 10 mA beträgt, dann muss er im AB-Betrieb (laut Datenblatt) 30 mA betragen.

Ob die Gittervorspannung der AB-Schaltung "automatisch" durch einen Kathodenwiderstand oder durch eine zusätzliche Spannungsquelle zu erzeugen ist, wird in der alten Literatur nicht spezifiziert. Hier bemüht sich die **alternative Definition** um Präzisierung: Im AB-Verstärker kann sich der Arbeitspunkt signalabhängig verschieben: Da mit zunehmender Aussteuerung der Kathodenstrom (wg. Kennlinien-Nichtlinearität) immer unsymmetrischer wird, vergrößert sich der Spannungsabfall am kapazitiv überbrückten Kathodenwiderstand und verschiebt dadurch die mittlere Gitter/Kathodenspannung zu negativeren Werten. Aus einem A-Betrieb wird so mit zunehmender Aussteuerung ein B-Betrieb (**Abb. 10.5.13**). Hingegen werden nach der alternativen Definition alle Endstufen **Gegentakt-D-Verstärker** genannt, die ihre Gittervorspannung ohne Kathodenwiderstand (nur) mit einer Spannungsquelle erzeugen und einen (gegenüber dem B-Betrieb) erhöhten Ruhestrom aufweisen [z.B. H. Schröder, W. Knobloch]. Generell unberücksichtigt bleibt aber die Polarisation des Koppelkondensators, die ebenfalls zu einer aussteuerungsbedingten Arbeitspunktverschiebung führt.



**Abb. 10.5.13:** Ausgangskennlinien und Arbeitspunkt: Gegentakt-A- bzw. -B-Verstärker (links), Gegentakt-D-Verstärker gemäß alternativer Definition (Mitte), Gegentakt-AB-Verstärker nach alternativer Definition (rechts).

Die **neue Definition** versteht unter dem D-Betrieb dann etwas ganz anderes, nämlich Schaltbetrieb (Puls-Weiten-Modulation PWM = Puls-Dauer-Modulation PDM). Der AB-Betrieb ist nach neuer Definition ein B-Betrieb mit erhöhtem Ruhestrom, der Arbeitspunkt ist fest. Vermutlich entstand diese "neue" Terminologie erst, als Bipolartransistoren die Endröhren verdrängten. Da die Arbeitspunkteinstellung beim Transistor nach anderen Kriterien verläuft, gab es keinen aussteuerungsabhängigen Arbeitspunkt mehr, und die Bedeutungen änderten sich.

Beim typischen Gitarrenverstärker steht Klirrfaktorminimierung – im Gegensatz zur HiFi-Endstufe – nicht im Vordergrund. Deswegen dominiert die AB-Endstufe alter Art, deren Ruhestrom nach speziellen Kriterien eingestellt wird (Kap. 10.5.8). Auch der **AC-30** gehört zu dieser Gruppe, und nicht zu den Gegentakt-A-Schaltungen (Kap. 10.5.10).