

Netzteil-Science-Fiction

"Jede weit genug fortgeschrittene Technologie ist von Magie nicht zu unterscheiden"

Arthur C. Clarke (Science-Fiction Schriftsteller)

1. Die Sache mit der Spannung

1.1 Wozu das Ganze?

Das Netzteil eines Röhren-Verstärkers muss vor allem die Versorgungsspannung $U_{\pm}$ und den passenden Strom $I_{\pm}$ liefern. Aus Gründen der Übersicht werden Heiz- und weitere Hilfsspannungen zunächst weggelassen.

1.2 Es gibt kein perpetuum mobile

Die Nennspannungen U_N der Sekundärseite von Netztrafos werden als Effektivwerte angegeben, nach Gleichrichtung und Glättung liegt aber der Spitzenwert $U_{\pm}$ an. Für die sinusförmige Netzspannung gilt:

$$U_{\pm} = U_N \cdot \sqrt{2}$$

Unabhängig von den in Kap. 4 behandelten Verlusten durch Spannungsabfall am Gleichrichter liegt hinter diesem eine höhere als die Nennspannung des Trafos an. Da ein Trafo aber keine Energiequelle, sondern nur Energiewandler ist, muss der zu liefernde Strom um den selben Faktor höher ausgelegt werden.

- *Erstes Ergebnis: Die für Gleichrichtung vorgesehenen Sekundärwicklungen eines Trafos benötigen folgende Nennwerte (U_N , I_N) in Abhängigkeit der benötigten Gleichwerte ($U_{\pm}$, $I_{\pm}$):*

$$U_N = \frac{U_{\pm}}{\sqrt{2}}$$

$$I_N = I_{\pm} \cdot \sqrt{2}$$

2. Die Sache mit dem Strom

2.1 Zweiweg-Gleichrichtung ...

Im besten Fall kann ein Gleichrichter bei einphasiger Einspeisung die "unter 0 liegenden Anteile der Wechselspannung umklappen". Die eher unhandliche mathematische Beschreibung

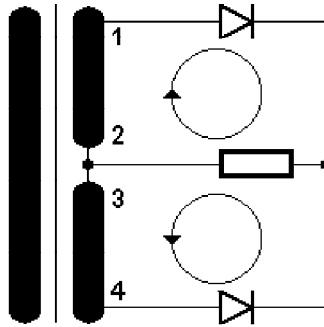
$$U_{\pm} = |U_s \cdot \sin(t)|$$

sieht mit dem Spitzenwert U_s grafisch so aus:



2.2 ... mit Doppeldiode ...

Es gibt zwei gebräuchliche Schaltungen dafür, die erste nutzt eine Doppeldiode, wobei es bis Kap. 4 egal ist, ob man die als Halbleiter oder Röhre realisiert.



Bei der positiven Halbwelle sei Klemme 1 positiv, dann ist Klemme 4 notwendigerweise negativ. Die untere Diode sperrt, Klemme 4 liegt in der Luft, der untere Stromkreis ist komplett abgehängt. Der einzig mögliche Strom fließt von Klemme 1 über die obere Diode und die Last zur Klemme 2. Da jeder Stromkreis geschlossen sein muss, fließt der Strom im Trafo von 2 nach 1.

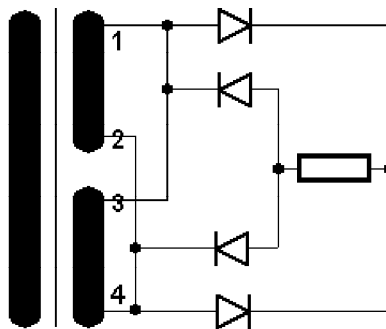
Bei der negativen Halbwelle ist dann Klemme 4 positiv, Klemme 1 negativ. Der Strom fließt von Klemme 4 über die untere Diode und die Last zur Klemme 3, schließt sich im Trafo von 3 nach 4. Hier liegt Klemme 1 in der Luft, der obere Stromkreis ist komplett abgehängt

Für das Verständnis der Schaltung ist es hinderlich, den Trafo mit doppelter Spannung und Mittelanzapfung zu interpretieren, da die Reihenschaltung der Sekundärwicklungen nur "in der Luft" existiert. Für die Schaltung sind die Wicklungen 1, 2 und 4, 3 - durch Spannungsverlauf und Dioden zeitlich gesteuert - mit allen Konsequenzen parallelgeschaltet:

Jede Einzelwicklung liefert Nennspannung und den halben benötigten Strom, der Innenwiderstand des Trafos ist der halbe (nicht doppelte) Innenwiderstand einer Einzelwicklung.

2.3 ... und mit Brückengleichrichter

Wenn die ohnehin effektiv parallelgeschalteten beiden Sekundärwicklungen auch galvanisch parallelgeschaltet werden, entsteht die zweite gebräuchliche Schaltung mit Brückengleichrichter, hier aus Analogiegründen mit dem selben Trafo gezeichnet:



Wieder soll bei der positiven Halbwelle die Klemme 1 (und 3) positiv sein. Der Strom fließt aus den Klemmen 1 und 3 über die obere Diode durch die Last und dann über die zweite Diode von unten über die Klemmen 2 und 4 wieder zurück in die Wicklungen.

Bei der negativen Halbwelle ist dann Klemme 4 (und 2) positiv. Der Strom fließt aus den Klemmen 2 und 4 über die untere Diode durch die Last und dann über die zweite Diode von oben über die Klemmen 1 und 3 wieder zurück in die Wicklungen.

2.4 Erstaunliche Ergebnisse?

Die beiden Sekundärwicklungen im Fall des Brückengleichrichters können zu einer zusammengefasst werden. Diese muss dann den gesamten Strom liefern und hat daher den halben Innenwiderstand der Einzelwicklungen. Das ist einsichtig, weil alle Parameter des Trafos gleich bleiben: Sekundärseitig wird die selbe Last versorgt, primärseitig ändert sich auch am europäische Verbundnetz nichts.

Die zeitgenössische Fachliteratur der Röhrenhochzeit kennt beide Schaltungen und die beschriebenen Zusammenhänge. Was jeweils verwendet wurde, war technologisch bedingt.

Die damals üblichen Selen-Brückengleichrichter konnten nur relativ geringe Ströme führen, die Doppeldiodenschaltung war optimal für die damals kostengünstig vorzunehmende Integration in einem Glaskolben mit gemeinsamer Kathode geeignet. Leistungshungrige Schaltungen der Konsumelektronik wurden daher mit Doppeldioden versorgt, Schaltungen mit geringem Strombedarf mit Brückengleichrichtern. Erst die billige Erhältlichkeit leistungsfähiger Silizium-Dioden änderte das.

Die Schaltung mit Brückengleichrichter kann mit symmetrischer Trafo-Mittelanzapfung um einen immer genau zwischen den beiden Ausgangspotentialen liegenden Referenzpunkt erweitert werden. Für symmetrische Versorgungen dient der als Masse. Röhrenschaltungen brauchen zwar keine symmetrische Versorgung, man kann damit aber die Spannung in Reihe geschalteter Glättungskondensatoren symmetrieren.

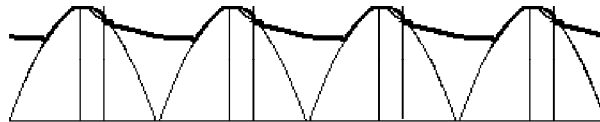
- *Zweites Ergebnis: Bezüglich der wirksamen Netztrafodaten Spannung, Strom und damit Innenwiderstand sind die Schaltungen mit Doppeldiode und Brückengleichrichter prinzipiell gleich.*

3. Die Sache mit der Zeit

3.1 Spannung glätten ...

Keine der beiden in Kap. 2 genannten Schaltungen ist ohne Glättungskondensator als Netzteil für Verstärker geeignet: Die abgegebene Leistung pulsiert entsprechend der dargestellten Kurve und schlägt als unerträgliches Brummen durch.

Wenn die gleichgerichtete Spannung an einen Kondensator gelegt wird, wird dieser auf deren Spitzenwert aufgeladen. Da am anderen Ende des Netzteils der Verstärker saugt, wird sich der Kondensator in der Zeit, in der die Spannung des Gleichrichters unter der Spannung am Kondensator liegt, der Last entsprechend entladen und sich mit dem nächsten "Buckel" wieder auf den Spitzenwert aufladen. Die dadurch erfolgte Glättung der Spannung ist in der untenstehenden Zeichnung - zur Verdeutlichung übertrieben - als dicke Linie dargestellt.



3.2 ... bedeutet Strom spiken!

Die Dioden des Gleichrichters können nur in den markierten kleinen Zeitbereichen leiten, da zu allen anderen Zeiten die im Kondensator gespeicherte Ladung eine Spannung erzeugt, die die Dioden sperrt. In dieser kurzen Zeit muss der gesamte mittlere Strombedarf des Netzteils nach Kap. 1 befriedigt werden, was zu hohen Stromspitzen führt. Die Zeichnung übertreibt zur Verdeutlichung die Entladung des Kondensators, der "Zeitschlitz" ist in der Realität deutlich kleiner.

Der Kondensator entlädt sich zwischen zwei "Buckeln" nach der e-Funktion

$$U(t) = U_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Die Geschwindigkeit der Entladung hängt dabei von der Last des Netzteils R und der Kapazität des Kondensators C ab. Je größer diese Kapazität bei gegebener Last, desto langsamer sinkt die Spannung, desto kleiner wird der "Zeitschlitz" des Stromflusses und desto größer wird die darin auftretende Stromspitze.

Datenblätter von Gleichrichterröhren geben die maximal zulässige Kapazität des Glättungskondensators an: Größere Kapazitäten führen trotz durchschnittlich möglicher Nennlast zum Überschreiten der Emissionsfähigkeit der Röhre im "Zeitschlitz".

In der Halbleiter-Gleichrichter Bezeichnung $BxCy$ mit x als Spannungswert in Volt und y als Stromwert in Milliampere bedeutet das "B" Brückengleichrichter. Das "C" zeigt die Eignung des Gleichrichters für die Verwendung mit einem Glättungskondensator, was schlicht darauf hinausläuft, daß kurzzeitig deutlich höhere Ströme möglich sind.

- *Drittes Ergebnis: Die im Netzteil bis zum Glättungskondensator fließenden Ströme sind weder Gleichstrom noch sinusförmig, sondern im Vergleich zum Nennstrom sehr starke Spikes mit der Grundfrequenz der gleichgerichteten Pulse (100Hz) und Oberwellen im gesamten Hörbereich. Erst hinter dem Glättungskondensator herrschen auch strommäßig "ruhige" Verhältnisse.*

4. Die Sache mit der Realität

4.1 Die Welt ist nicht ideal ...

Reale Bauteile weichen von den bisher betrachteten Idealisierungen ab. Trafos haben Verluste, Dioden schalten nicht exakt, Kondensatoren sind nicht perfekt, der Verstärker als Last ist nicht rein ohmsch.

Für Glättungskondensator und Last ist das vernachlässigbar: Der Leckwiderstand des Kondensators liegt parallel zur ohnehin vorhandenen Last und fällt ihr gegenüber nicht ins Gewicht. Der Phasenwinkel der Gesamtlast ist durch den Glättungskondensator immer kapazitiv. Bleiben Trafo und Gleichrichter.

Nicht die sinusrunden oder exponentiell abfallenden Spannungen, sondern die spikeförmigen Ströme bestimmen das thermische und magnetische Verhalten des Trafos. Die Verlustwärme bestimmt der in Kap. 1 ermittelte Effektivwert: Der Spitzenstrom ist zwar hoch, der "Zeitschlitz" jedoch entsprechend gering.

Bleiben die magnetischen Konsequenzen: Sobald der Kern durch Überlastung in die Sättigung geht, strahlt er ein den Spikes nach Kap. 3 entsprechendes Magnetfeld aus...

4.2 ... macht aber nix!

Die nicht idealen Eigenschaften der Gleichrichter machen Einiges wieder gut: Sie haben keinen definierten "Schaltpunkt", Röhren noch weniger als Halbleiter. Die Spikes nach Kap. 3 werden dadurch zwar schmaler und höher, deren scharfe Kanten jedoch abgerundet.

Bei gleichen Dioden hat die Brückengleichrichter-Schaltung einen höheren Innenwiderstand als das Doppeldioden-Pendant, fließt der Strom hier doch durch zwei statt nur eine Diode. Das hat aber keine praktischen Konsequenzen, wichtiger ist der höhere Innenwiderstand von Röhrendioden beim Durchschalten gegenüber Halbleiterdioden. An modernen Silizium-Brückengleichrichtern fällt im Leerlauf die doppelte Durchlassspannung ab, das sind ca. 1,4V. Bei Nennlast kann man mit einem typischen Spannungsabfall von ca. 2V rechnen. Der Spannungsabfall eines Röhrengleichrichters ist sehr viel stärker lastabhängig.

Das Einbrechen der Versorgungsspannung bei zunehmender Aussteuerung hat den Marketing-Namen "Sag". Ein konstanter Spannungsabfall ist dabei nicht gemeint, sondern die Abhängigkeit des durch aussteuerungsabhängigen Spannungsabfall im Netzteil verursachte Sättigung der Endstufe, damit kann der Gitarrist "spielen".

- *Viertes Ergebnis: "Sag" sollte nicht durch Überlasten des Netztrafos erreicht werden, da dies zu starken Störgeräuschen durch die den Stromspikes entsprechende Kernsättigung führt.*

4.3 Was zu "sag"en ist

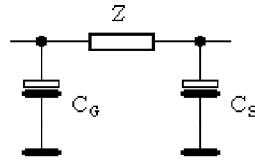
Die Stromaufnahme - und damit die Belastung des Netzteils - von Klasse-A-Verstärkern ist von der Aussteuerung unabhängig. Ein aussteuerungsabhängiger "Sag" ist daher in Theorie und Praxis unmöglich.

Bei Klasse-AB-Verstärkern ist die Lastabhängigkeit der Stromaufnahme - und damit der aussteuerungsabhängige "Sag" - verschieden ausgeprägt. Kandidaten mit hohem Ruhestrom, wie der manchmal sogar irrtümlich als Klasse-A bezeichnete AC30, verursachen prinzipiell weniger "Sag" als Kandidaten mit geringem Ruhestrom, wie die fast im B-Betrieb laufenden großen Dynacords, z.B. der Imperator. Dennoch ist gerade der AC30 für gute Kompression bekannt, der Imperator dagegen für klare Übertragung bis in hohe Aussteuerbereiche.

- *Fünftes Ergebnis: Unbestreitbar gibt es aussteuerungsabhängigen "Sag" für Klasse-AB-Verstärker, Haupt- oder gar einziger Grund für "sahnige Kompression" ist er sicher nicht. Dafür ist es besser, nicht den Strom, sondern die Spannung des Netzteils zu begrenzen.*

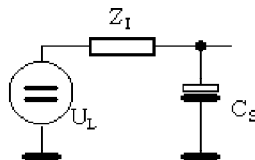
4.4 "Sag" gegen Brumm: Unentschieden

So gut wie kein Röhrenverstärker wird an einem Netzteil nur aus Trafo, Gleichrichter und Glättungskondensator betrieben. Die Schaltung zwischen Gleichrichter und Verbraucher sieht eigentlich immer so aus:



Dieses wegen der Ähnlichkeit mit dem griechischen Buchstaben pi-Glied genannte Siebglied zur Unterdrückung von Netzbrummen besteht aus dem in Kap. 3 behandelten Glättungskondensator C_G , einem weiteren Siebkondensator C_S und der Längsimpedanz Z . Letztere wird bei geringem Strombedarf als Widerstand, bei hohem Strombedarf als Spule ("Netzdrossel") ausgeführt. Spulen sieben nicht nur besser, es fällt auch deutlich weniger - theoretisch gar keine - Spannung und Verlustleistung ab.

In jedem Fall liegt am Ende der Kette mit C_S wieder ein Kondensator, der aus Gründen der Siebung relativ groß ist, in der Praxis $50\mu\text{F}$ oder mehr. Aus Sicht des Verstärkers kann man die gesamte Netzteilschaltung daher mit folgendem Ersatzschaltbild darstellen:



Alle Innenwiderstände "vor" C_S , also des europäischen Verbundnetzes, Trafos, Gleichrichters, Glättungskondensators und der Längsimpedanz, sind zu Z_I zusammengefasst, U_L ist die dann übrigbleibende ideale Spannungsquelle. Da deren Innenwiderstand Null ist, liegt C_S dem gesamten sonstigen Innenwiderstand Z_I parallel.

Damit reduziert C_S den Innenwiderstand des Netzteiles. Es gibt immer einen prinzipiellen Zielkonflikt zwischen guter Siebung und aussteuerungsabhängigem "Sag"! Sobald das Netzteil in die Knie geht - egal wo - brummt der Verstärker. Die Frage ist nur, ob das bei den dann auftretenden Lautstärken auffällt...

- *Sechstes Ergebnis: Netzteil-bedingten, aussteuerungsabhängigen "Sag" gibt es bei Klasse-A-Endstufen prinzipiell nicht. Bei Klasse-AB-Endstufen ist der Effekt um so stärker, je geringer der Ruhestrom der Endstufe eingestellt ist. Aber auch in diesem Fall wird der Einfluss der Innenwiderstände von Trafo und Gleichrichter durch die Siebung deutlich abgeschwächt. Großen Einfluss auf den aussteuerungsabhängigen "Sag" hat die Dimensionierung des letzten Siebglieds der Anodenversorgung.*

5. Die Sache mit der Praxis

5.1 Warum hängt der Amp Head schief am Griff?

Außer dem reinen Schaltungsdesign des Netzteils ist bis zum Glättungskondensator auch das Layout des Verstärkers so auszulegen, daß unerwünschte Auswirkungen der Stromspikes nach Kap. 3 vermieden werden. Stromspitzen verursachen hauptsächlich magnetische Anteile des elektromagnetischen Feldes. Da hilft nur Abstand und Eisenblech, abgeschirmte Leitungen und Kupferfolien wehren nur die elektrischen Anteile des Feldes ab.

- *Alle Leitungen zwischen Trafo, Gleichrichter und Glättungskondensator so kurz und direkt wie möglich verlegen. Mindestens einen Leitungsquerschnitt größer wählen als rechnerisch für rein sinusförmige Ströme benötigt.*
- *Diese Bauteile so weit weg vom Eingang des Verstärkers wie irgend möglich platzieren, Eisenblech-Abschirmung hilft immer.*

Die häufig schlechte Gewichtsverteilung guter Amp Heads liegt daran, daß zum Vermeiden unerwünschter Einkopplungen auch der Ausgangsübertrager weit weg vom Eingang sein sollte. Meist befindet sich daher der schwere Netztrafo an einer Seite ganz außen, daneben der Ausgangsübertrager. Auf der anderen Seite steckt dagegen nur leichtes Zeug...

5.2 Wie geht's denn?

Konkrete Schaltbilder gibt es zu Hauf, hier nur die Dimensionierung der wesentlichen Komponenten am

Beispiel eines kleinen Übungsamps mit EL84. Die Berechnung "dicker Brummer" geht aber genauso:

- Bedarf des Verstärkers:

$$U_{\pm} = U_{AEL86} = 250V$$

$$I_{\pm} = I_{AEL86} + I_{G2EL86} + I_{AVorverstärker} = 48mA + 10mA + 4mA = 62mA$$

- Als weitere Siebung soll eine Längsimpedanz von 1k mit einem Siebkondensator von 50 μ F wie in Kap. 4.3 beschrieben mit dem Glättungskondensator ein pi-Glied bilden. An der Längsimpedanz von 1k werden 62 V abfallen ($U = R \cdot I$), was die benötigte Spannung $U_{\pm}$ von 250V auf 310V erhöht.
- Die Formeln aus Kap. 1 ergeben für die Daten der Trafo-Sekundärwicklung:

$$U_N = \frac{U_{\pm}}{\sqrt{2}} = \frac{310V}{\sqrt{2}} = 220V$$

$$I_N = I_{\pm} \cdot \sqrt{2} = 62mA \cdot \sqrt{2} = 88mA$$

- Für einen Doppeldioden-Gleichrichter sind daher folgende Trafos geeignet:

2 x 220V/44mA (wie in Kap. 2.2 verschalten)

1 x 440V/44mA mit Mittelanzapfung (absolut das Selbe)

Wenn der Doppeldioden-Gleichrichter mit einer Röhre realisiert werden soll (EZ80: 500V/90mA), ist der laut Datenblatt maximale Wert des Glättungskondensators (EZ80: 50 μ F) zu beachten. Außerdem braucht der Netztrafo dann noch eine separate Heizwicklung (EZ80: 6,3V/0,6A). Nicht über die Eignung der EZ80 wundern: Sie ist genau für diesen Einsatzzweck ausgelegt.

- Für einen Brückengleichrichter sind folgende Trafos geeignet:

2 x 220V/44mA (wie in Kap. 2.3 verschalten)

1 x 220V/88mA (elektrisch das Selbe)

50 μ F sind auch hier als Glättungskondensator OK, bei den Dioden für den Gleichrichter ist auf Spannungsfestigkeit und Spitzenstrom zu achten.

Beide Trafos brauchen in jedem Fall noch die Wicklung(en) für die Heizung der Verstärkerröhren, was im allgemeinen deutliche Mehrleistung gegenüber der reinen Anodenleistung des Trafos bedeutet.

Soll eine Gegentakt-Endstufe mit fester Gittervorspannung versorgt werden, kommt noch die dafür benötigte Wicklung dazu. Die Belastung des Trafos bleibt jedoch gering, hier soll ja kein Laststrom fließen.

Mit weiteren Wicklungen z.B. für Umschaltrelais oder andere Hilfsspannungen dann genau so verfahren.