

1 Einleitung

Die Spannungsversorgung eines Röhrenverstärkers beeinflusst das Klangbild erheblich. Zur Abschätzung und Dimensionierung des zu verwendenden Transformators und der Siebglieder sind einige Vorbetrachtungen notwendig. In nachfolgenden Abschnitten werden mittels Näherungsberechnung und Simulation die notwendigen Bauteilgrößen festgelegt.

2 Spannungs- und Strombetrachtung

Folgende Betriebsbedingungen werden als Ausgangspunkt heran gezogen:

$$V_{\text{Anode, KT88}} = 375\text{V}$$

$$I_{\text{Anode, KT88, max}} = 85\text{mA}$$

Ein Kanal des Verstärkers, bestehend aus Vor- und Endstufe, benötigt im Class A Betrieb max. 200mA (2x85mA pro KT88 + ca. 20mA für Vorstufe mit 2x 6SN7 + 10mA Reserve). Dies bedeutet für beide Kanäle, dass das Netzteil in der Lage sein muss einen Dauerstrom von insgesamt max. 400mA zur Verfügung zu stellen.

Weiterhin wollen wir unser Netzteil so dimensionieren, dass wir auf eine Brummspannung von max. 300mV nach den Siebgliedern des Netzteils kommen. Durch die zusätzliche Siebung auf der Verstärkerplatine kommt so an den Vorstufen eine absolut geringe Brummspannung an und an den Endstufen stört die Brummspannung von 300mV keines Wegs. Viele High-End Vollverstärker auf dem Markt leben mit Brummspannungen am Netzteil von größer 2V.

Es gilt die Vorstufe so rein wie möglich unter Spannung zu setzen, da die Vorstufe das entscheidende Glied in der Performance des Vollverstärkers ist.

Bei Verwendung einer Brückengleichrichtung ist darauf zu achten, dass der Trafo eine höhere Leistung aufbringen muss, als an der Last als Gleichstrom abfällt. Transformatoren sind in der Regel mit ihrer Sekundärwechselspannung und dem Sekundärwechsellennstrom angegeben. **Je nach Gleichrichtung ist am Trafo eine um 25% bis 40% höhere Leistung erforderlich.**

Die Ursache hierfür ist auf den Stromflusswinkel zurückzuführen und wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

3 Brückengleichrichtung und Stromflusswinkel

Der Stromflusswinkel ist ein Begriff aus der Elektrotechnik und bezeichnet besonders bei Netzspannungs-Verbrauchern die Zeit, während der periodisch ein Strom fließt, wenn er nicht während der gesamten Periodendauer der Wechselspannung fließt.

Der Stromflusswinkel kann je nach Schaltung 0 bis 360° oder 0 bis 180° betragen, wobei 360° für eine volle Periode der Wechselspannung steht. Statt des Winkels wird teilweise das Verhältnis des Winkels zu seinem Maximalwert angegeben, dieses kann dann 0 ... 1 bzw. 0 ... 100 % annehmen. Diese Angaben haben eher den Charakter eines Richtwertes als eines möglichst präzisen Messwertes. Stromflusswinkel < 360° oder < 180° treten bei nichtlinearen Verbrauchern auf. Dazu gehören Gleichrichter, Dimmer, Thyristorsteller oder Gasentladungslampen.

Bei gleicher Leistung am Verbraucher belastet ein Strom mit geringem Stromflusswinkel die Leitungen oder auch Transformatoren viel stärker als Strom mit sinusförmigem Verlauf, weshalb man einen möglichst großen Stromflusswinkel anstrebt. Andererseits wird in Gleichrichterschaltungen eine geringe Restwelligkeit gewünscht, wozu man einen geringen Stromflusswinkel anstrebt. Im zweiten Fall wählt man das Produkt aus Verbraucherwiderstand und Kapazität $R \cdot C$ möglichst groß ($\gg 10$ ms).

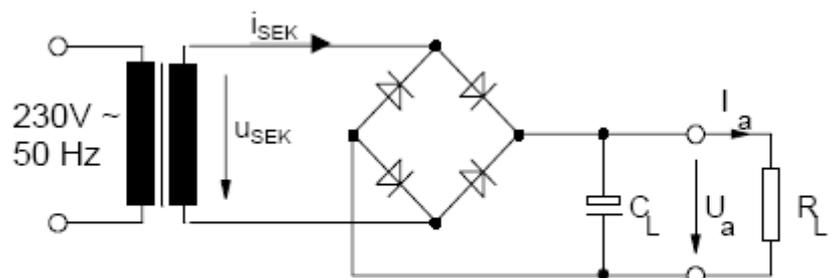


Abb. 1: Graetzgleichrichterschaltung

Der benötigte effektive Sekundärstrom des Trafo's kann bei bekanntem Stromflusswinkel und Ausgangsstrom näherungsweise nach folgender Formel berechnet werden:

$$I_{Sek,RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{Dmax}^2(t) dt}$$

$$I_{Dmax} \approx \frac{\pi^2 \cdot I_{DC,Last}}{4 \cdot \alpha} \quad [\alpha \text{ in rad}]$$

$$\Rightarrow I_{Sek,RMS} \approx I_{DC,Last} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{180^\circ}{2\alpha}} \quad [\alpha \text{ in grad}]$$

mit $\alpha =$ halber Stromflusswinkel

$$I_{Dmax} = \text{max. Diodenstrom}$$

$$I_{Sek,RMS} = \text{effektiver Sekundärstrom (AC)}$$

$$I_{DC,Last} = \text{Ausgangslaststrom (DC)}$$

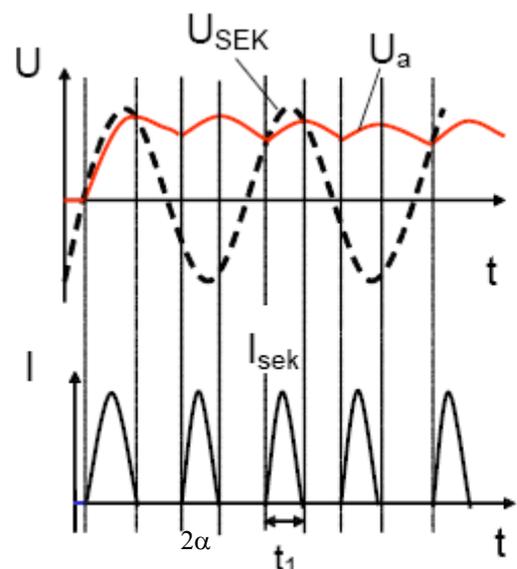


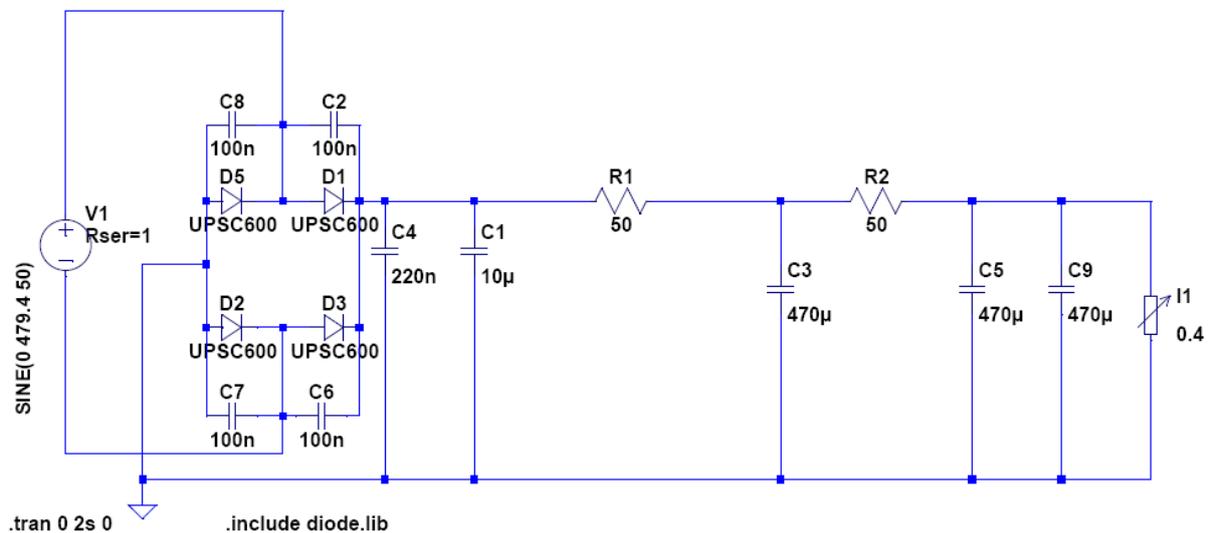
Abb. 2: Strom- und Spannungsverlauf an einem Graetzgleichrichter

4 Simulation und Berechnung

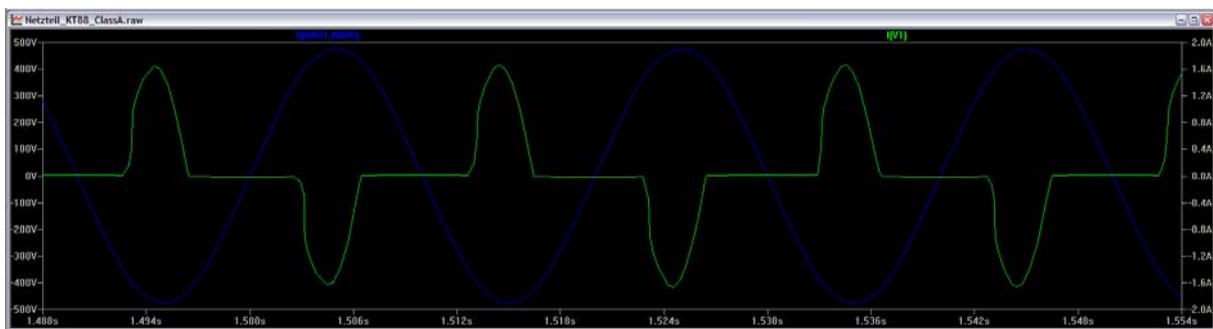
Mittels dem Simulationsprogramm LTSpice wurde unter Verwendung einer Trafo Sekundärwechselspannung von 340V (479,4V Spitze) und zweier Siebgliedstufen der Stromflusswinkel sowie Brummspannung und Ausgangsspannung simuliert.

Dabei kann folgendes gesagt werden:

- Eine geringe Brummspannung hat einen kleinen Stromflusswinkel, einen großen Ladekondensator und damit einen hohen Diodenstrom (Trafoleistung) zur Folge.
- Die Brummspannung lässt sich nicht durch die reine Vergrößerung der Kapazität verringern, wenn der vorhandene Trafo den benötigten Ladestrom (Effektivwechselstrom und Spitzenstrom) nicht zur Verfügung stellen kann.
- Der Ladekondensator hängt direkt mit dem Stromflusswinkel zusammen



Folgender Stromflusswinkel wurde ermittelt:



$$2\alpha = \underline{\underline{68,4^\circ}}$$

Mit diesem per Simulation erhaltenem Stromflusswinkel können wir den benötigten Effektivwechselstrom am Trafo berechnen und nochmals per Simulation vergleichen:

$$I_{Sek,RMS} \approx I_{DC,Last} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{180^\circ}{2\alpha}} \quad [\alpha \text{ in grad}]$$

$$I_{Sek,RMS} \approx 0,4A \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{180^\circ}{68,4^\circ}} \quad [\alpha \text{ in grad}]$$

$$I_{Sek,RMS} \approx \underline{\underline{0,72A}}$$

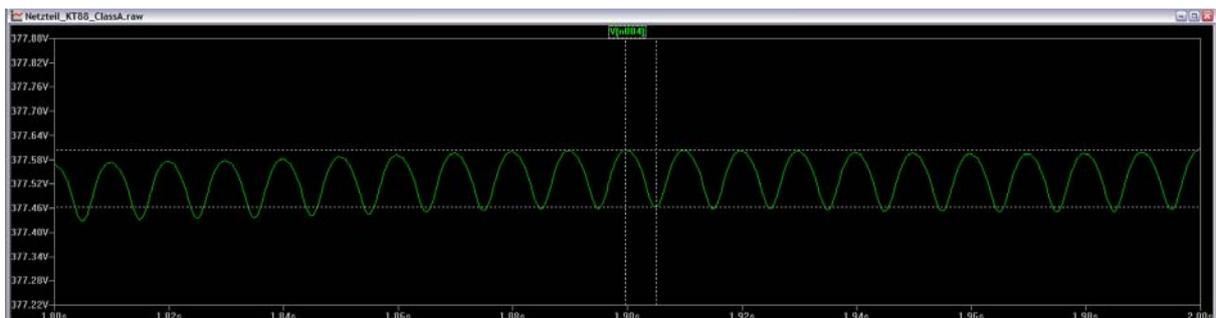
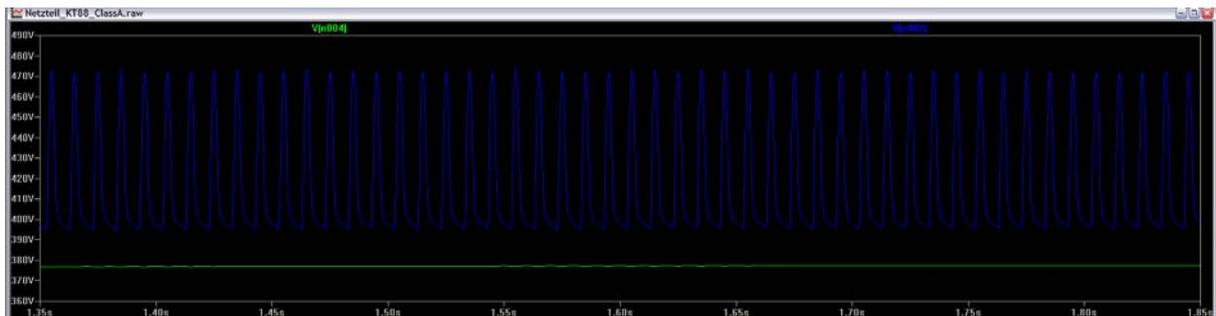
mit $\alpha = \text{halber Stromflusswinkel}$

$I_{Sek,RMS}$ = effektiver Sekundärstrom (AC)

$I_{DC,Last}$ = Ausgangslaststrom (DC)

Betrachtet man die Simulation kommt man auf ein Ergebnis von: $I_{Sek,RMS,simuliert} = 0,711A$

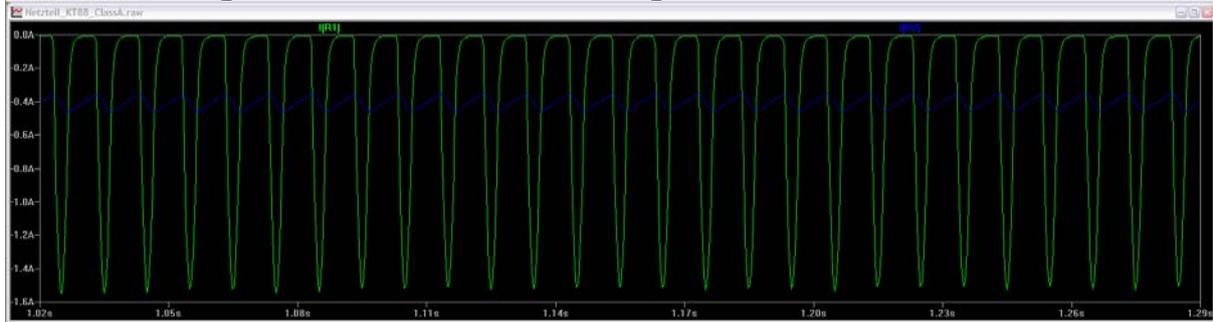
Folgende Brummspannungen wurden simuliert:



blau: Brummspannung vor Siebglieder ca. 75V

grün: Brummspannung nach Siebglieder ca. **141,3mV**, die gesiebte DC-Spannung liegt hierbei bei **377,5V**

Strombetrachtung durch die Widerstände der Siebglieder:



grün: Wechselstrom- und DC-Stromanteil durch R1 = 676mA effektiv

blau: Wechselstrom- und DC-Stromanteil durch R2 = 408mA effektiv

Hinweis: Es ist zu beachten, dass aus diesem Wechselanteil der Gleichspannungsanteil entsteht. Erst nach beiden Siebstufen ist der Spannungsverlauf soweit geglättet, das auch der Strom nach DC aussieht und mit 400mA effektiv vorhanden sein sollte. In dem im Diagramm dargestellten Verläufen befindet sich jeweils auch der Blindleistungsanteil der Ladekondensatoren.

5 Auswahl Trafo

Auf Grund der ermittelten Werte, der benötigten Wechselspannung und einem erforderlichen Heizstrom von 8,8A wurde folgender Trafo ausgewählt:

Amplimo Ringkerntrafo 8N608S, Sekundär: 340V, 0.8A und 6.3V 12.8A

(<http://www.amplimo.nl>)

6 Pulsfolge

Nachfolgend ist der Spannungsverlauf bei einer pulsformigen Strombelastung von 300mA auf 400mA dargestellt:

