

White Paper No. 1

HUBERT 4-Quadranten Verstärker

Einleitung

In der industriellen Messtechnik werden für diverse Aufgaben NF-Hochleistungsverstärker eingesetzt. Die Erzeugung von Magnetfeldern oder speziellen Testsignalen für Material-Prüfplätze und in der EMV-Messtechnik sind typische Aufgaben. Der Verstärker muss ein breites Spektrum an Signalformen und Lasten zuverlässig und dauerhaft bewältigen können. Besondere Bedingungen für den Leistungsverstärker ergeben sich bei Betrieb an reaktiven Lasten wie z.B. Induktivitäten und Elektromotoren, die Energie an den Verstärker zurückspeisen können. Der Verstärker muss also Strom abgeben und aufnehmen können.

Wie diese Aufgabe von den HUBERT Verstärkern erfüllt wird, ist das Thema der folgenden Abschnitte.

Grundlagen

In analogen Leistungsverstärkern kommen typischerweise bipolare Leistungstransistoren im Gegentaktbetrieb zum Einsatz. Die Forderung nach hohen Ausgangsleistungen wird durch eine entsprechende Anzahl parallel geschalteter Emitterfolger erfüllt.

Die maximal erreichbare Ausgangsleistung hängt von diversen Grenzdaten des Leistungstransistors ab, die insbesondere bei komplexen Lasten mit einem hohen Blindleistungsanteil schnell erreicht sind.

Die wichtigsten Grenzdaten sind der maximal zulässige Strom I_{ce} der durch den Transistor fließt und die an ihm abfallende maximal zulässige Spannung V_{ce} . Das Produkt dieser beiden Größen ist die anfallende Transistor-Verlustleistung P_v .

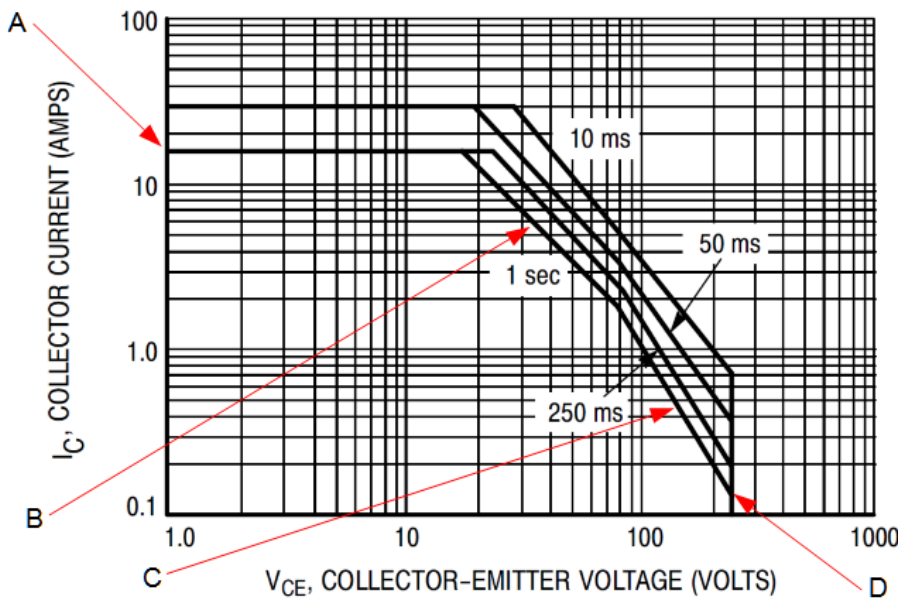


Abbildung 1: Safe Operating Area

Das Vce / Ice Diagramm in Abbildung 1 beschreibt den sicheren Arbeitsbereich, die Safe Operating Area (SOA) eines bipolaren Leistungstransistors in Abhängigkeit der Belastungsdauer, bei 25° C Temperatur am Transistorgehäuse. Der Bereich wird durch vier Geraden begrenzt:

- A: max. Kollektorstrom $I_{ce} = 15 \text{ A} @ t = 1 \text{ sec}$
- B: max. Verlustleistung $P_v = 200 \text{ Watt} @ t = 1 \text{ sec}$
- C: Second Breakdown, hier ist die Verlustleistung nicht mehr konstant!
- D: max. Kollektor-Emitter-Spannung $V_{ce} = 260 \text{ V} @ t = 1 \text{ sec}$

Je nachdem wie hoch die anliegende Spannung am Transistor ist, lässt sich der maximale Strom ablesen. Zu höheren Spannungen hin nimmt der zulässige Strom signifikant ab. Der maximale Strom I_{ce} ist eine Funktion von V_{ce} .

Beispiele:

- Bei einer Spannung $V_{ce} = 10 \text{ V}$ ist $I_{ce} = 15 \text{ A}$ wenn das Signal 1 sec am Transistor anliegt.
- Bei einer Spannung $V_{ce} = 100 \text{ V}$ ist $I_{ce} \sim 1 \text{ A}$ wenn das Signal 1 sec am Transistor anliegt.

Zu beachten ist auch die Abnahme des zulässigen Stroms der SOA im Bereich B um ca. 10% pro 10°C, oberhalb 30°C Gehäusetemperatur.

Durch eine entsprechende Anzahl von parallel geschalteten Leistungstransistoren lässt sich jedoch der maximale Ausgangsstrom des Verstärkers erhöhen.

Was ist ein 4-Quadranten Verstärker ?

Basierend auf der SOA-Kurve des verwendeten Leistungstransistors kann auch der sichere Arbeitsbereich des kompletten Leistungsverstärkers in einem U_{out} / I_{out} Diagramm dargestellt werden. Dabei ist U_{out} die Ausgangsspannung und I_{out} der Ausgangsstrom des Verstärkers.

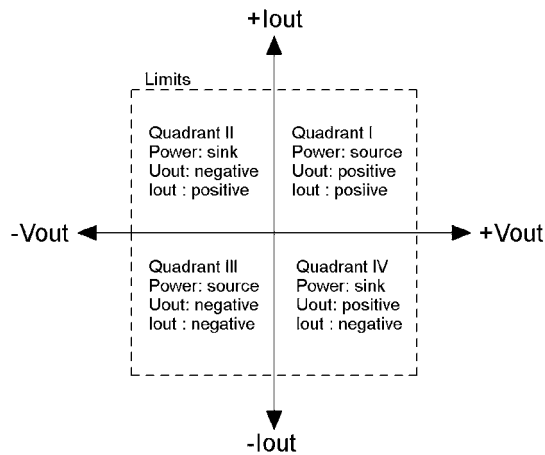


Abbildung 2: 4 Quadrant Definition

Aus der Abbildung 2 lassen sich die möglichen maximalen Betriebszustände ablesen. Maximale positive bzw. negative Ausgangsspannung bei positivem bzw. negativem Ausgangsstrom:

Das U_{out} / I_{out} Diagramm ist in 4 Quadranten unterteilt.

Ein Leistungsverstärker, der in allen 4 Quadranten betrieben werden kann, wird als 4-Quadranten-Verstärker bezeichnet. In den Quadranten 1 und 3 gibt er Energie an die angeschlossene Last ab (Quellenbetrieb) und in den Quadranten 2 und 4 nimmt er Energie von einer angeschlossenen Last (Senkenbetrieb) auf.

Diese Eigenschaften haben in der Regel alle Leistungsverstärker. Im Besonderen Audioverstärker, bei denen der angeschlossene passive Lautsprecher eine reaktive Last darstellt und somit Energie in den Leistungsverstärker zurückspeist.

Einige wichtigen Fragen bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines 4-Quadranten Verstärkers sind:

- Ist die Leistung des Verstärkers in allen vier Quadranten gleich?
- Oder wie unterscheiden sich Quellen- und Senkenleistung?
- Wie hoch ist die Leistungsbandbreite?
- Wie lange wird die angegebene Leistung zur Verfügung gestellt?

Speziell der Betrieb in den Quadranten II und IV stellt eine hohe Anforderung an den Leistungsverstärker. Da die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom um 180° phasenverschoben sind, kann V_{ce} am stromführenden Transistor sehr hoch werden.

Folgendes Beispiel mit einer niederohmigen Spule als Last verdeutlicht diesen Sachverhalt:

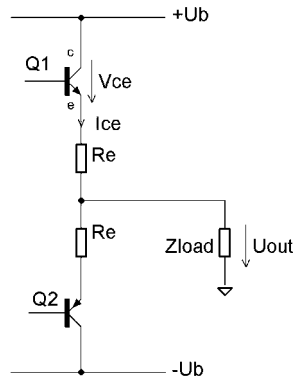


Abbildung 3: Output stage

Die Abbildung 3 veranschaulicht vereinfacht die typische Ausgangsstufe eines Leistungsverstärkers.

Die dargestellten Transistoren Q1 und Q2 symbolisieren die Summe aller parallelgeschalteten Leistungstransistoren. Der Spannungsabfall an R_e und die Transistorsättigungsspannung werden bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Der Ausgangsstrom I_{out} entspricht der Summe aller Kollektorströme I_{ce} .

Die Spannung am Transistor ist: $V_{ce} = U_b - U_{out}$

Der Verstärker habe eine Leistungsfähigkeit von 1000 W an 3 Ohm und somit eine Betriebsspannung $U_b = 90$ Volt. Die Daten der verwendeten Leistungstransistoren (8 Stück pro Polarität) entsprechen der obigen SOA-Kurve.

Die angedachte Applikation benötigt eine Ausgangsspannung von

$\hat{U}_{out} = 50$ V / 4 kHz sinus an der Last $Z_{load} = 0.04$ Ohm + 86 uH.

Mit $Z_{load} = R_{load} + jX_{load}$ ergibt sich:

$$|Z| = 2.16 \text{ Ohm, Phase} = 89^\circ \text{ bei } 4 \text{ kHz}$$

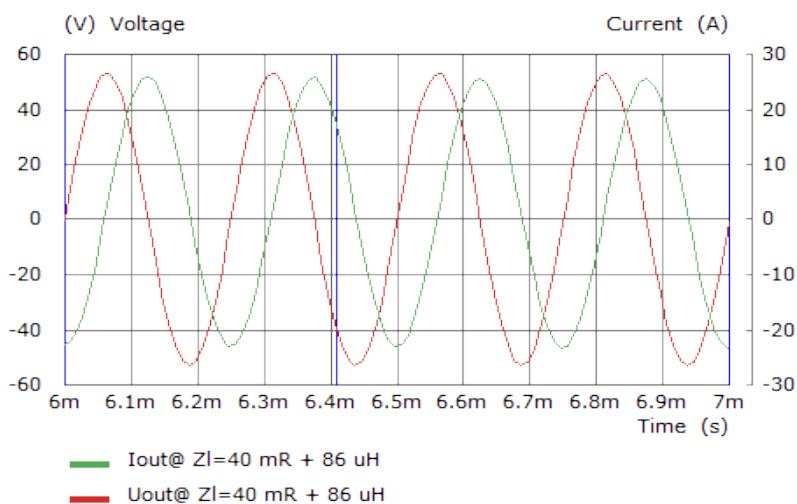


Abbildung 4: Output Voltage / Current @ 4 kHz

In der Abbildung 4 zeigt zum Zeitpunkt t1 (Position des blauen Markers) die Ausgangsgrößen $\hat{U}_{out} = -40\text{ V}$ und $\hat{I}_{out} = +16\text{ A}$.

Der Strom I_{ce} ist in diesem Augenblick positiv und die Spannung am stromführenden Transistor Q1 mit $V_{ce} = 90\text{ V} - (-40\text{ V}) = 130\text{ V}_p$ höher als seine Betriebsspannung. Der Blick in die SOA Kurve zeigt, dass die Leistungstransistoren im kritischen Bereich C arbeiten:

Kurve für 10ms \rightarrow max 2 A * 8 Transistoren \rightarrow max 16 A bei 25° C Transistorgehäuse-Temperatur.

Dieser Betriebszustand ist bei steigender Temperatur über einen längeren Zeitraum sicherlich nicht möglich.

Bei einer resistiven Last, d.h. der Phasenwinkel zwischen den Ausgangsgrößen Spannung und Strom ist 0 Grad, ergibt sich ein wesentlich entspannterer Betrieb für die Leistungstransistoren:

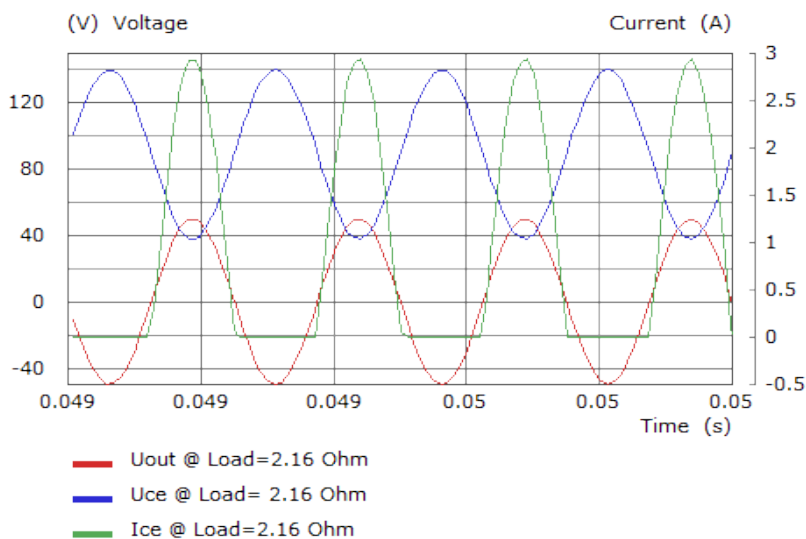


Abbildung 5: U_{out} , V_{ce} and I_{ce} (1 Transistor) @ $R_{load} = 2.16\text{ Ohm}$

In der Abbildung 5 sind die zeitlichen Verläufe der Ausgangsspannung U_{out} , der Spannung am Transistor V_{ce} und des Ausgangsstroms I_{ce} dargestellt. Die Last ist $Z_{load} = 2.16\text{ Ohm}$.

Zum Zeitpunkt der maximalen V_{ce} ist $I_{ce} = 0\text{ A}$ bzw. I_{ce} ist maximal bei $V_{ce} = 40\text{ V}_p$! Mit $\hat{U}_{out} = 50\text{ V} / 4\text{ kHz}$ ergibt sich „nur“ eine Verlustleistung von:

$$P_t = (((\hat{U}_{out} * U_b) / \pi) - \hat{U}_{out}^2 / 4) / R_l = 373.8\text{ W}$$

Aus den Beispielen folgt:

Die Verlustleistung des Transistors steigt mit zunehmendem Phasenwinkel der Last.

Hier trennt sich bei dem großen Angebot an Leistungsverstärkern die Spreu vom Weizen. Die angesprochenen Audioverstärker sind für so einen harten Dauerbetrieb an reaktiven Lasten nicht konzipiert: die Schutzschaltung unterbricht

den Betrieb und verhindert (hoffentlich) eine mögliche Zerstörung. Die Quellen- und Senkenleistung unterscheidet sich deutlich.

Von den Antworten der HUBERT Verstärkerfamilie auf die Fragen zur Leistungsfähigkeit und den damit verbunden Konzepten handelt das nächste Kapitel.

Die Versorgung

Aus den vorangegangenen Überlegungen ist deutlich geworden, dass ein wichtiges Ziel bei der Konzeption eines 4-Quadranten-Verstärkers sein muss, zur Optimierung der Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit, die Spannung am Leistungstransistor in allen Lastfällen möglichst klein zu halten. Somit wird auch die entstehende Verlustleistung minimiert; der Wirkungsgrad des Verstärkers verbessert sich.

Bei der HUBERT Verstärkerfamilie wird diese Entlastung der Leistungsstufe durch eine variable Versorgungsspannung realisiert. Es stehen 3 symmetrische wählbare Betriebsspannungen zur Verfügung.

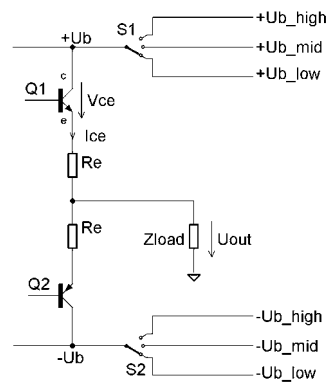


Abbildung 6: HUBERT Output stage

Die Abbildung 6 veranschaulicht vereinfacht die typische Ausgangsstufe eines HUBERT Leistungsverstärkers mit den drei möglichen Betriebsspannungen:

$$\pm U_{b_low} = 30V; \quad \pm U_{b_mid} = 60V \quad \text{und} \quad \pm U_{b_high} = 90V$$

Die Betriebsspannung wird für die Leistungstransistor $+U_b$ bzw. $-U_b$ der gewünschten Ausgangsspannung angepasst und somit die Spannung V_{ce} klein gehalten.

Mit diesem Konzept ergibt sich für das oben genannte „reaktive“ Beispiel ein sicherer Betriebszustand.

Mit $\pm U_{b_mid} = 60V$ ist die benötigte Ausgangsspannung $\hat{U}_{out} = 50V$ realisierbar.

Zum Zeitpunkt t_1 ist $V_{ce} = 60V - (-40V) = 100V_p$ und somit sind die Transistoren aus der „Gefahrenzone“ gerückt:

SOA-Kurve für 10ms \rightarrow max 3,5 A * 8 Transistoren \rightarrow max. 28 A bei 25° C Transistorgehäuse-Temperatur.

In der HUBERT A1110-X-E Verstärkerfamilie werden die nötigen Versorgungsspannungen $+U_b$ und $-U_b$ manuell synchron (Schalter $S1=S2$), durch ein Bedienfeld auf der Frontplatte des Verstärkers eingestellt. Eine entsprechende Anwendersoftware ermöglicht die Fernbedienung dieser Funktion und die Speicherung der gewünschte Start-Konfiguration. Zur Einbindung der A1110 Familie in automatisierte Testsysteme stehen eine Reihe von Befehlssätzen zur Verfügung.

Die A1110-X-QE Verstärkerfamilie verfügt über eine „auto-commutating“ Spannungsversorgung. Dabei werden die nötigen Versorgungsspannungen automatisch und asynchron ($S1 \neq S2$) in Abhängigkeit der Ausgangsspannung eingeschaltet.

Die verfügbaren Betriebsspannungen sind:

$$\pm U_{b_low} = 10V; \pm U_{b_mid} = 45 V \text{ und } \pm U_{b_high} = 90 V$$

Anhand des obigen Beispiels zur reaktiven Last wird die Funktionsweise nachfolgend erläutert.

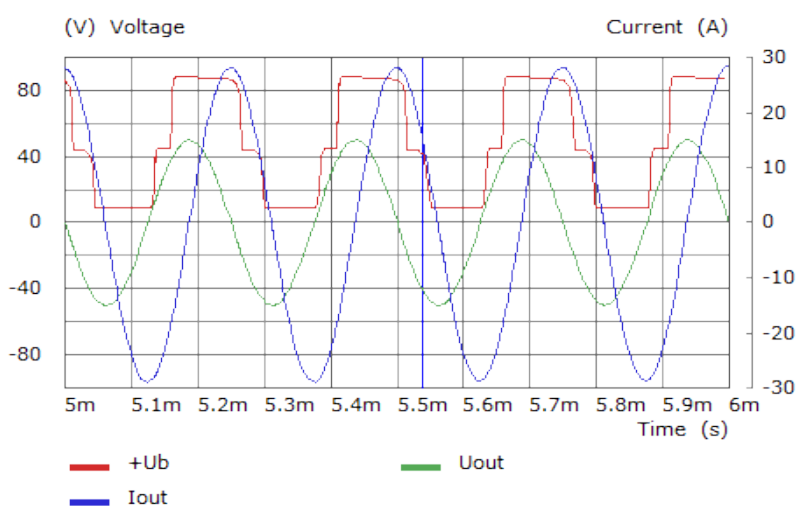


Abbildung 7: Supply Voltage; Output Voltage and Current @ 4 kHz

Die Abbildung 7 zeigt die zeitlichen Kurvenverläufe: Betriebsspannung $+U_b$ (zur besseren Veranschaulichung ist nur die positive Betriebsspannung dargestellt), Ausgangsspannung U_{out} und den Ausgangsstrom I_{out} .

Die Betriebsspannung wird der Ausgangsspannung entsprechend auf das jeweils nötige Potential geschaltet. Zum Beispiel ist zum Zeitpunkt $t1 = 5.54 \text{ ms}$ (blauer Marker) der Strom $I_{out} = 16 \text{ A}_p$ positiv und die Ausgangsspannung $U_{out} = -40 \text{ V}$ negativ. Da aber die Betriebsspannung auf $U_b = 45 \text{ V}$ geschaltet wurde ist die Spannung am Transistor nur $U_{ce} = 85 \text{ V}$, und nicht wie im obigen Beispiel 130 V !

Das führt zur einer signifikanten Entlastung der Leistungstransistoren und damit zu einem sicheren Dauerbetrieb ohne Aktion der Schutzschaltungen.

Da die Versorgungsspannungen asymmetrisch geschaltet werden können, ist der Betrieb der A1110-X-QE Verstärkerfamilie auch als aktive Last möglich.

Die wichtigsten Leistungsdaten der HUBERT 4-Quadranten Verstärker sind in den entsprechenden Datenblättern aufgeführt. Die Grenzwerte für den Betrieb in den einzelnen Quadranten zeigen die zugehörigen U_{out} / I_{out} Diagramme.

Schlussfolgerung

Besonders reaktive Lasten verdeutlichen den „Leistungsstress“ von Leistungsverstärkern und „belasten“ den zulässigen Betrieb in allen 4-Quadranten.

Das vorgestellte Konzept der HUBERT 4-Quadranten Verstärker ermöglicht eine erhebliche „Entlastung“ der Ausgangsstufe. In Abhängigkeit von der Signalform kann die Verlustleistung der Transistoren bei allen Betriebsarten im unkritischen Bereich gehalten werden.