

2.8 Schaltungstechnik mit Power-FETs

Die Schaltungstechnik für Power-MOSFETs wird durch eine Besonderheit gekennzeichnet, die eventuell einer näheren Erläuterung bedarf: Der Eingang der Schaltung ist im Gegensatz zum Transistoreingang keineswegs hochohmig.

Eingangs(be)schaltung

Eine Leistungs-FET-Stufe kann aus zwei Gründen nicht hochohmig ausgelegt werden:

Erstens käme die hohe Rückwirkungskapazität voll zur Geltung, diese parasitäre Kapazität würde fast die volle Drainspannung auf das Gate legen – höchste Selbsterregungsgefahr!

Merke: Die Bedeutung einer parasitären Kapazität ist in erster Linie im Zusammenhang mit dem Strom zu sehen: geringer Strom – hohe Bedeutung, hoher Strom – geringe Bedeutung.

Da die Rückwirkungskapazität im zweistelligen Picofarad-Bereich liegt, wäre ihr Blindwiderstand gegenüber der Strecke Gate-Source sehr gering. Über den Spannungsteiler Blindkapazität/Gate-Source-Strecke würde fast die volle Drainspannung an den Eingang gelangen.

Zweitens: Die übliche höchstzulässige Gate-Source-Spannung von ± 20 V bedeutet praktisch, dass

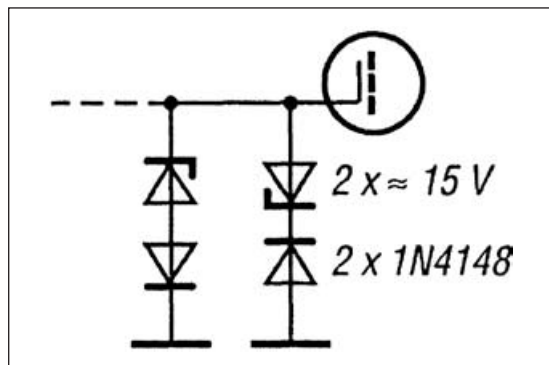


Bild 183: Empfehlenswerte Eingangsschutzbeschaltung – Verlustleistung der Dioden je nach möglichem Strom

Resonanzkreise im Eingang kaum möglich sind. Die Resonanzüberhöhung lässt sich nicht präzise kontrollieren, und jedes Überschreiten des Grenzwerts würde zum Tod des Transistors führen.

Merke: Die begrenzte Gate-Source-Spannung von Power-MOSFETs verhindert oft einen selektiven Eingang.

Da Power-FETs in der Regel keine interne Eingangsschutzdiode besitzen, wie etwa VN10KM und VN10KT (max. +15 V Gate-Source-Spannung zulässig), sollte man sie extern schützen. Hierzu kann eine Schutzschaltung nach Bild 183 vorgesehen werden.

Merke: Eine \pm Angabe (z. B. ± 20 V) für die maximale Gate-Source-Spannung bedeutet: kein interner Schutz.

Die gute Nachricht: Die hohe Frequenzunabhängigkeit der Transistorkapazitäten macht es möglich, einfache Gegenkopplungsnetzwerke einzusetzen, mit denen der Verstärker stabil über mehrere Oktaven arbeitet. (Hinweis: Oktave bedeutet in der HF-Technik nicht etwa Faktor 8, sondern lediglich Faktor 2.) Besondere Frequenzkompensationsschaltungen am Eingang können ebenfalls entfallen.

Vorspannen – aber wie?

Während der Power-FET bei typisch 3,3 V Gate-Source-Spannung erst überhaupt zu leiten beginnt, benötigt er für linearen Betrieb 5 bis 6 V. Leistungs-Bipolartransistoren erfordern oft eine aufwändige Stromquelle, während FETs mit einer einfachen Widerstandsschaltung auskommen, beispielsweise nach Bild 184.

Der Ruhestrom (quiescent current), der für den linearen Betrieb benötigt wird, kann normalerweise dem Datenblatt entnommen werden. In dieser Hinsicht reagieren MOSFETs wesentlich empfindlicher auf die Höhe des Ruhestroms als Bipolartransistoren. Sie erfordern auch etwas höhere Ströme.

Merke: Bei MOSFETs führt eine Temperaturänderung von 1 K zu einer Ruhestromänderung ent-

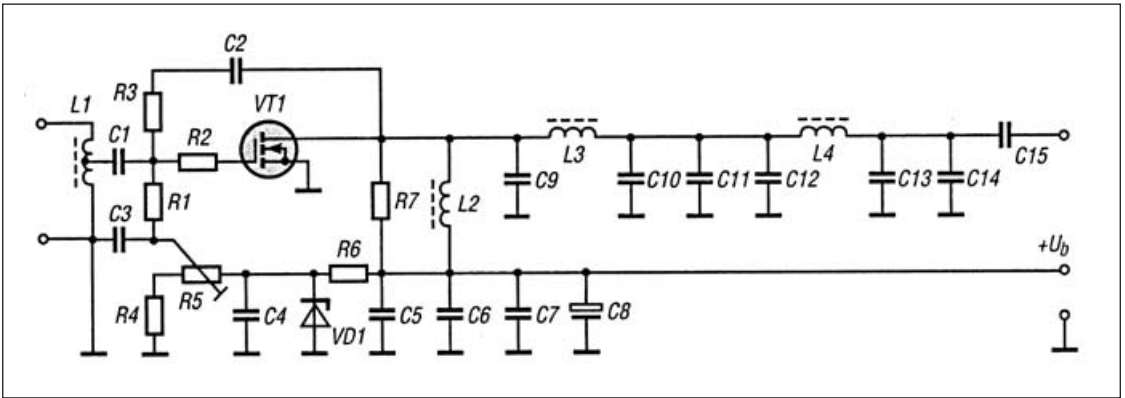


Bild 184: Vorspannungseinstellung bei einem 5-W-Linearverstärker für 80 m mit IRF 520

sprechend etwa 1 mV Änderung von U_{GS} .

Das bedeutet natürlich: Da Ruhestrom und Vorspannung über die Steilheit verknüpft sind, müssen nicht gegengekoppelte MOSFETs mit hoher Steilheit besser stabilisiert werden. Erschwerend kommt nun allerdings dazu, dass auch die Steilheit mit steigender Temperatur sinkt. Dies führt zum Einsatz eines Thermistors.

Parallelschaltung

Power-FETs können relativ problemlos parallel geschaltet werden.

Mit der Parallelschaltung verhält es sich so: Im Herstellungsprozess werden die FETs bereits intern durch Parallelschaltung von Wabenstrukturen für hohe Ströme bzw. Leistungen ausgeprägt. Jede Parallelschaltung vergrößert dabei schonungslos die interne Gesamtkapazität, während die zulässige Verlustleistung durch den gedrängten Aufbau leider nicht so besonders zulegen kann – die Waben befeuern sich ja gewissermaßen untereinander mit Wärme. Daher macht es Sinn, mehrere Einzeltransistoren parallel zu schalten.

Merke: Die Parallelschaltung von Power-MOS-FETs ist wärmetechnisch sinnvoll.

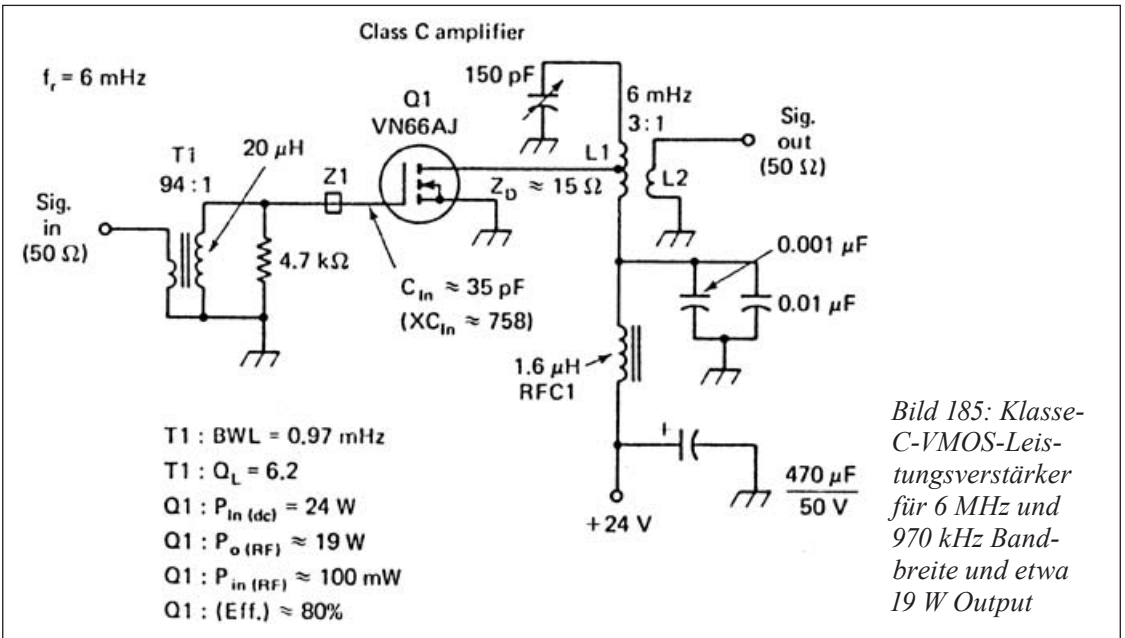


Bild 185: Klasse-C-VMOS-Leistungsverstärker für 6 MHz und 970 kHz Bandbreite und etwa 19 W Output

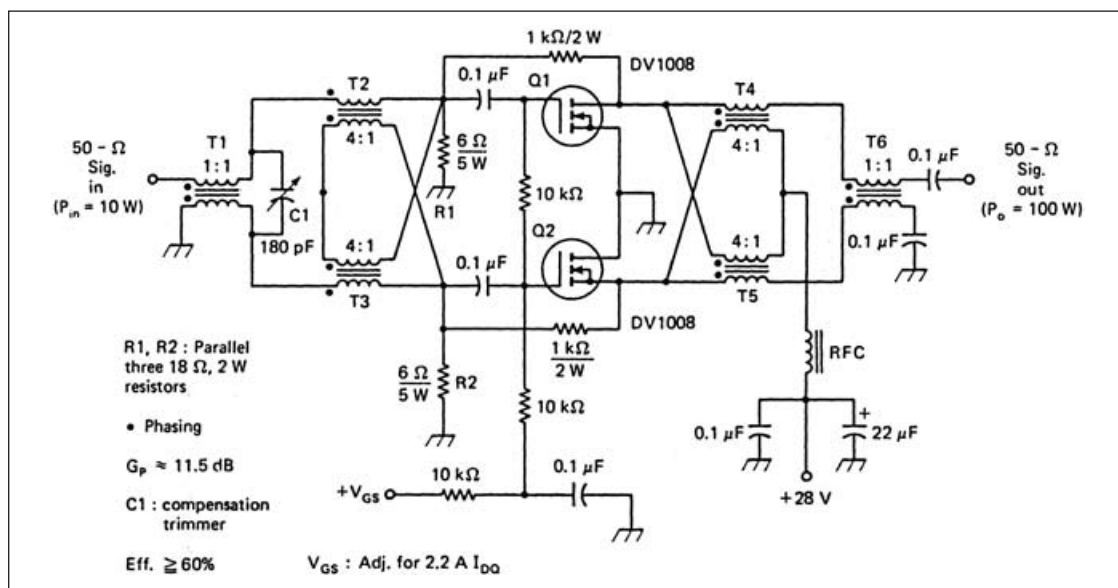


Bild 186: Klasse AB-VMOS-Leistungsverstärker für 30...88 MHz

Sie gelingt auch schaltungstechnisch problemlos. Die Fertigungsstreuungen sind unproblematisch gering, und der positive Temperaturkoeffizient (höhere Temperatur = höherer Source-Drain-Widerstand) sorgt automatisch für ausgeglichene Leistungsverhältnisse. Allerdings sollte man den Gate-Leitungen eine Ferritperle spendieren, um die Gates zu entkoppeln und so parasitäre Schwingungen zu vermeiden.

Ein-Widerstand beachten

Je kleiner der Ein-Widerstand (on resistance), umso kleiner die Restspannung über der Drain-Source-Strecke. Ein kleiner Ein-Widerstand bedeutet also hohe Effizienz. Dieses Problem verschärft sich umso mehr, je geringer die Betriebsspannung ist, denn es kommt auf das Verhältnis von Aussteuerbereich zu Restspannung an. Leider bedeutet ein geringer Ein-Widerstand relativ große interne Kapazitäten – große interne Fläche = kleiner Widerstand, aber auch große Kapazität! Man muss daher oft einen Kompromiss schließen.

Welche Klasse?

Bei den FET-Klassen ist es wichtig, sich am sinnvollen Kriterium „Stromflusswinkel“, also an der Signalverarbeitung, und nicht an der Vorspan-

nung wie beim „Bipo“ zu orientieren. An folgender Überlegung wird das deutlich:

Der Power-FET benötigt typisch 3,3 V Vorspannung, um erst einmal zu leiten, daher: keine Vorspannung bedeutet hier einen sehr geringen Stromflusswinkel – wie bei Bipolar Klasse C.

Dies kann für Verwirrung sorgen, man schaue immer genau auf das Schaltbild! So wird die Schaltung in Bild 185 korrekt als Class C ausgewiesen, arbeitet aber „vorspannungsmäßig“ wie ein „Bipo“ im B-Betrieb. Anders bei der Gegentakt-schaltung nach Bild 186, wo der Hinweis auf 2,2 A Ruhestrom wichtig ist – hier also AB-Betrieb und damit kaum mehr als 60% Effizienz.

Merke: B-Betrieb beim Power-MOSFET verlangt theoretisch eine exakte Vorspannung in Höhe der temperaturabhängigen Schwellspannung und somit hohen Aufwand, daher legt man die Vorspannung praktisch etwas unter den Schwellwert.

Die Leistungsverstärkung ist höher als bei C-Betrieb, der Wirkungsgrad aber 10...15 % geringer (65...70%).

Power-MOSFETs können in Klasse C auf zwei Arten, nämlich

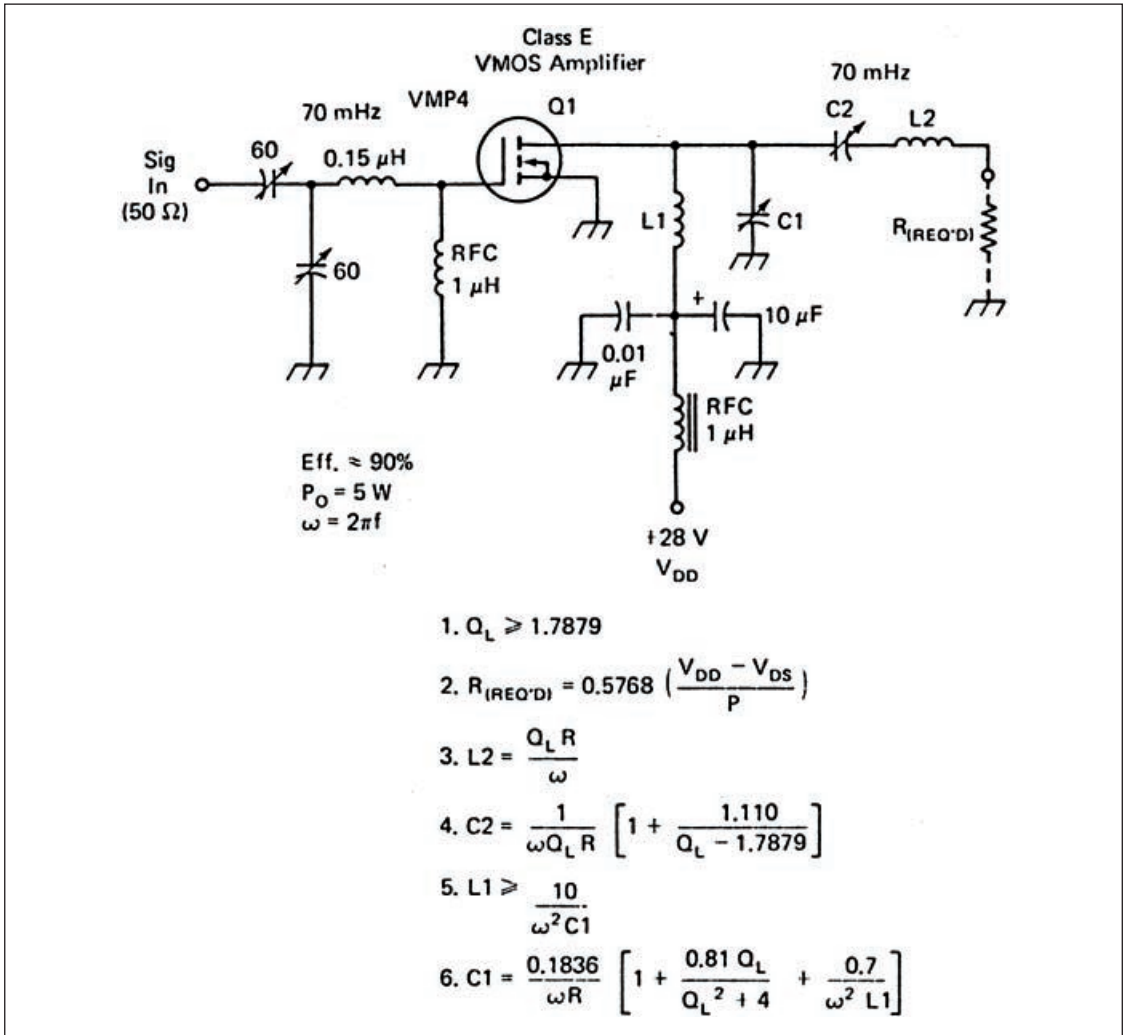


Bild 187: Klasse-D-VMOS-Verstärker für 70 MHz und 5 W Output

- ohne Vorspannung und
- mit Vorspannung deutlich unter dem Schwellwert

betrieben werden. Im ersten Fall nur mit geringer Leistungsverstärkung. Die Amplitude der Eingangsspannung muss dann über etwa 4 V liegen.

Liegt sie deutlich höher oder kommt Vorspannung ins Spiel, ist Klasse-D-Betrieb möglich (Übersteuerung).

Solche nicht oder wenig vorgespannten Verstärker werden oft für CW- und FM-Anwendungen benutzt,

wobei Wirkungsgrade um 80% die Regel sind.

Merke: Mit der Klasse C trifft man einen Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Leistungsverstärkung.

Bei höheren Frequenzen (UHF) kann Klasse AB die bessere Wahl sein.

Klasse E – der Eintakt-Schalterbetrieb

Während Class D Gegentaktbetrieb mit Übersteuerung bedeutet, stellt Class E Eintakt-Schalterbetrieb dar. Auch mit diesem, reichlich Oberwellen erzeugenden Verfahren sind HF-Leistungsverstär-

ker praktisch möglich. Das Ausgangsnetzwerk hat dabei die wichtige Funktion, gleichzeitig hohe Spannung und hohen Strom für den Transistor zu vermeiden. Manchmal bezeichnet man die Klasse E als „bessere Klasse C“. Ihre beiden Vorteile:

- gegenüber Class B/C weniger als 50% Verlustleistung bei gleicher Frequenz und Leistung möglich
- gegenüber Class B/C auch „Breitbandbetrieb“ mit einem Frequenzverhältnis bis 2 möglich

So kann man beispielsweise einen Klasse-B-Verstärker für 300 MHz und mit 65% Wirkungsgrad zu einem Klasse-E-Verstärker für 225...400 MHz und mit 85% Wirkungsgrad modifizieren.

Natürlich nutzt man wie bei Class D auch bei Class E gern Power-MOSFETs, die speziell für Schalteranwendungen entwickelt wurden. Bild 187 zeigt eine einfache Klasse-D-Schaltung nach N. Sokal mit leider nicht ganz einfach verständlichen Bemessungsgleichungen.