

Zur thermischen Stabilität von Halbleitern

von Arno Reinefeld (ArnoR)

Es ist bekannt, dass alle Halbleiter eine Abhängigkeit bestimmter Parameter von der Temperatur aufweisen. Diese Temperaturabhängigkeit bereitet oft Probleme, die sich durch inakzeptabel weglauende Arbeitspunkte bis hin zur Zerstörung von Bauelementen zeigen. Bekannte Beispiele dafür sind zerstörte Transistoren in Emitter- oder Kollektorschaltung z.B. in Stromsenken, Verstärkerendstufen oder Linearnetzteilen oder auch Power-LEDs.

Bisher ist keine Berechnungsmethode bekannt eine Schaltung so auszulegen, dass sie sicher thermisch stabil ist. In diesem Aufsatz wird für die oben genannten Beispiele gezeigt, wie man aus den gegebenen Betriebsparametern eine stabile Schaltung berechnen kann.

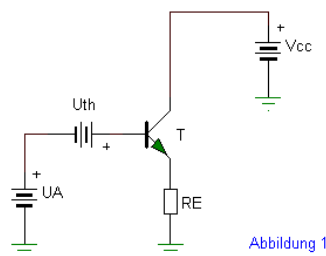


Abbildung 1 zeigt einen Bipolartransistor in einer typischen Anordnung, wie sie in Stromsenken oder Leistungsverstärkern benutzt wird. Die Spannungsquelle UA stellt die Arbeitspunktspannung dar und wird als konstant angenommen. Die Temperaturabhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung ist in die Quelle Uth verlagert, der Transistor selbst wird nun als driftfrei betrachtet und er besitzt eine Stromgegenkopplung durch den Emitterwiderstand RE.

In der Verstärkerstufe in Abbildung 1 führt z.B. eine Erhöhung der Sperrschichttemperatur zu einer Zunahme des Kollektorstromes und damit zu einem Anstieg der Verlustleistung im Transistor. Diese Verlustleistung hat am Wärmewiderstand eine weitere Erhöhung der Sperrschichttemperatur zur Folge, die durch die Temperaturabhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung ihrerseits zu einem weiter vergrößerten Kollektorstrom führt, usw.. Es tritt also eine thermische Mitkopplung auf, die zur thermischen Instabilität und damit zur Zerstörung der Transistoren führen kann.

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens wird die Anordnung in Abb. 1 in die äquivalente Darstellung eines rückgekoppelten Systems in Abb. 2 überführt, wobei T_j die Sperrschichttemperatur, Y_{th} der thermische Rückkoppelfaktor und V_{th} die thermische Verstärkung seien.

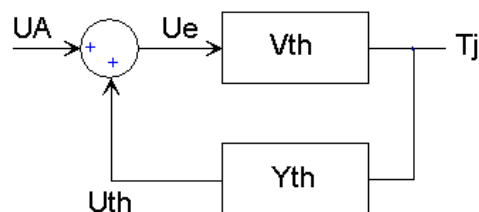


Abb. 2 regelungstechnisches Modell der thermischen Verhältnisse

Abb. 2 können folgende Zusammenhänge entnommen werden:

$$\Delta T_j = V_{th} * \Delta U_e \quad (1)$$

$$\Delta U_e = \Delta U_{th} \quad , \text{ da } U_A = \text{konstant} \quad (2)$$

$$\Delta U_{th} = Y_{th} * \Delta T_j \quad \text{bzw.} \quad Y_{th} = \frac{\Delta U_{th}}{\Delta T_j} \quad (3)$$

$$V_{th} = \frac{\Delta T_j}{\Delta U_e} \quad (4)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) in Gleichung (1) erhält man:

$$\Delta T_{j2} = V_{th} * Y_{th} * \Delta T_{j1} \quad (5)$$

Gleichung (5) gibt die Sperrschichttemperaturänderung ΔT_{j2} an, die durch die ursprüngliche Anregung ΔT_{j1} ausgelöst wird. Das System ist thermisch stabil, wenn die Antwort kleiner als die Anregung ist, woraus die Bedingung (6) folgt:

$$V_{th} * Y_{th} < 1 \quad (6)$$

Zur Lösung der Beziehung (6) müssen nun die thermische Verstärkung V_{th} und der thermische Rückkoppelfaktor Y_{th} bestimmt werden. Der thermische Rückkoppelfaktor Y_{th} beträgt für den Transistor in Abb. 1 (siehe Gl. (3)):

$$Y_{th} = \frac{\Delta U_{th}}{\Delta T_j} = T_K U_{be} \quad (7)$$

Die thermische Verstärkung V_{th} gewinnt man aus folgender Überlegung:

Die Stromgegenkopplung mit R_E reduziert die Steilheit des Transistors in Abb. 1 auf

$$\frac{dI_C}{dU_e} = S_{red} = \frac{1}{R_E + r_d} \quad \text{mit} \quad r_d = \frac{U_T}{I_C} . \quad (8)$$

Mit der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} erhält man die Abhängigkeit der Verlustleistung vom Eingangssignal zu:

$$\frac{dP}{dU_e} = \frac{dI_C}{dU_e} * U_{CE} = S_{red} * U_{CE} . \quad (9)$$

Zur Ermittlung der (quasistatischen) Temperaturänderung im Transistor wird die Gesamt-Wärmeimpedanz Z_{th} durch Summieren der einzelnen Wärmewiderstände und Weglassen der Wärmekapazitäten zum Gesamt-Wärmewiderstand R_{th} vereinfacht. Der Wärmestrom dP erzeugt im Wärmewiderstand R_{th} die Sperrschicht-Temperaturänderung dT_j nach der Beziehung

$$V_{th} = \frac{dT_j}{dU_e} = \frac{dP}{dU_e} * R_{th} = S_{red} * U_{CE} * R_{th} = \frac{U_{CE} * R_{th}}{R_E + r_d} . \quad (10)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (7) und (10) in die Relation (6) liefert nun die Dimensionierungsvorschrift für den Emitterwiderstand R_E

$$1 > V_{th} * Y_{th} = S_{red} * U_{ce} * R_{th} * T_{KUbe} \quad \text{bzw.}$$

$$R_{Emitterwiderstand} > T_{KUbe} * U_{ce} * R_{th} \quad (11)$$

Man sieht, dass der Emitterwiderstand mit dem Temperaturkoeffizienten, dem Wärmewiderstand und der Kollektor-Emitter-Spannung ansteigen muss.

Gleichung (11) gilt auch für komplementäre Leistungsverstärker-Endstufen, da dort infolge der Symmetrie beide Schaltungshälften das gleiche Verhalten wie Abb 1 besitzen. Das erkennt man sofort, wenn man Abb 1 komplementär ergänzt und die Eingangsspannung $=0$ ist. Dann ist auch die Ausgangsspannung $=0$, und zwar unabhängig vom Ruhestrom.

Analoge Überlegungen lassen sich auch auf Power-LEDs anwenden. Dort hat man z.B. das Problem, dass eine an Konstantspannung betriebene LED thermisch durchgehen kann und dabei zerstört wird.

Wenn man sich die LED durch eine Reihenschaltung aus Konstantspannungsquelle in Höhe der Flussspannung U_f für $I_f \rightarrow 0$ und Bahnwiderstand R_b ersetzt denkt, die an der konstanten Versorgungsspannung U_v betrieben wird und die einen Gesamtwärmewiderstand R_{th} zur Umgebung hat, ergibt sich die Stabilitätsbedingung zu:

$$R_b > T_{KUf} * U_v * R_{th} \quad (12)$$

Der Bahnwiderstand R_b kann aus der Steigung der Durchlasskennlinie bei großen Strömen dem Datenblatt entnommen werden. Ist die Bedingung (11) erfüllt, kann die LED ohne externen Vorwiderstand an Konstantspannung betrieben werden. Falls (11) nicht erfüllt ist, braucht die LED einen externen Vorwiderstand oder eine andere externe Strombegrenzung.

Die Gleichungen (11) und (12) geben an, ab wann die Schaltung gerade nicht mehr thermisch durchgeht, also der Strom oder die Leistung nicht mehr exponentiell ansteigt und das Bauteil zerstört. Wenn man möchte, dass die Schaltung eine gute thermische Stabilität hat, muss man die Widerstände deutlich größer dimensionieren.