Emitterverstärker BC548C

Vollständige SPICE-Analyse

Einstufige Emitterstufe mit Spannungsteiler-Vorspannung, Emitterwiderstand mit Bypass-Kondensator und kapazitiver Ein- und Auskopplung. Transistor **BC548C**, h_{FE}-Gruppe **C (420–800)**, Modellparameter BF = 600. Simuliert mit LTspice 26.1.1.

Schaltung

Element	Wert
VCC	9 V
RB1 / RB2	10 kΩ / 2,2 kΩ
RC	1,8 kΩ
RE	470 Ω
CE (Bypass)	100 µF
CIN / COUT	100 nF / 100 nF
RL	22 kΩ
Q1	BC548C (NPN, Gruppe C)

Alle Zahlen sind aus den Logs in `ergebnisse_bc548c/` geparst. Vergleichswerte für BC548B unter `ergebnisse/`.

1 Arbeitspunkt (.OP)

Größe	BC548C	BC548B	Differenz
V_B	1.615 V	1.609 V	+0.006 V
V_C	5.334 V	5.366 V	-0.032 V
V_E	0.959 V	0.953 V	+0.007 V
V_BE	0.656 V	0.656 V	-0.000 V
V_CE	4.374 V	4.413 V	-0.039 V
I_C	2.037 mA	2.019 mA	+0.000 mA
I_B	4.4 µA	8.0 µA	-0.0 µA
β	459.2	252.5	+206.7
Verlust Q1	8.91 mW	8.91 mW	-0.00 mW

Der höhere β-Wert der C-Gruppe senkt den Basisstrom von 8.0 µA auf **4.4 µA** (–45 %). Der Teiler wird dadurch weniger belastet, die Basisvorspannung steigt leicht und der Kollektorstrom wächst um +0.9 % auf 2.037 mA. V_CE sinkt entsprechend auf 4.374 V — immer noch weit über der Sättigung.

2 Frequenzgang (.AC)

Frequenz	BC548C	BC548B	Differenz
1 kHz	37.79 dB	36.67 dB	+1.12 dB
10 kHz	41.41 dB	41.15 dB	+0.26 dB
100 kHz	41.46 dB	41.22 dB	+0.24 dB

Die Verstärkung liegt durchgehend um rund 1 dB höher als beim B-Exemplar. Ursache ist die geringere differentielle Eingangsimpedanz der Basis (β·r_e wächst mit β), wodurch der Teiler die Signalspannung weniger stark teilt.

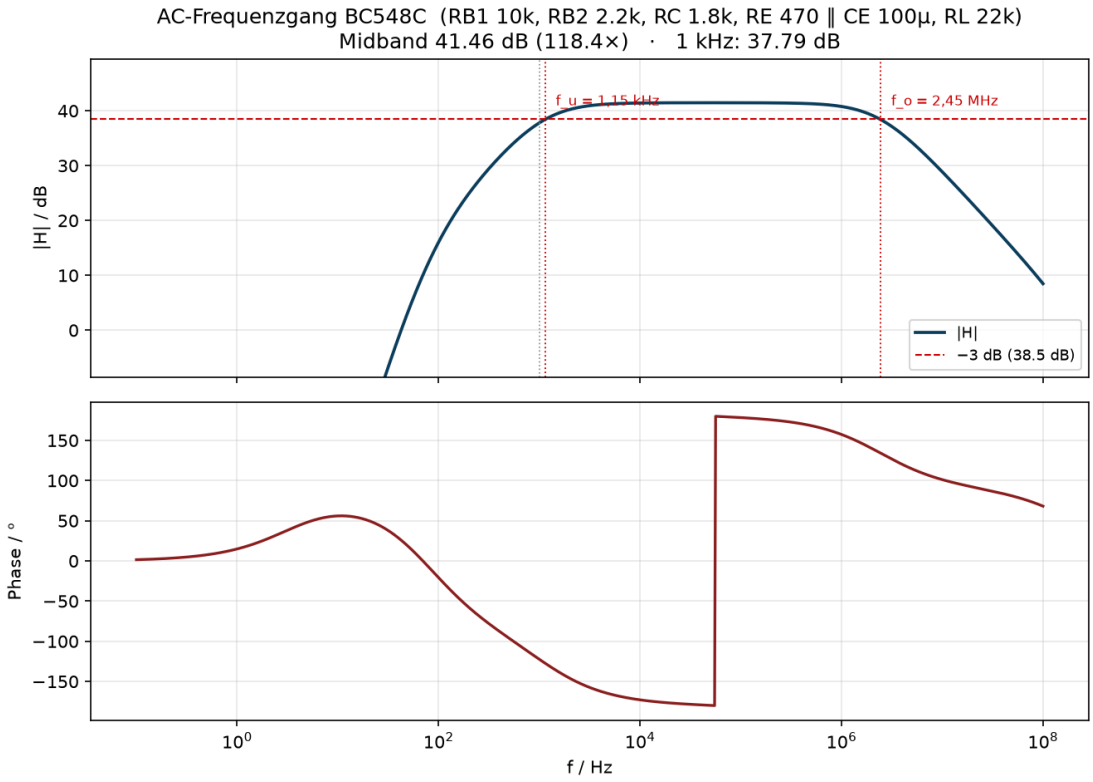


Bild 1: Amplituden- und Phasengang

3 Zeitbereich (.TRAN)

Messung	BC548C	BC548B
Verstärkung @ 10 mV	77.21	67.94
U_out pp @ 10 mV	1.544 V	1.359 V
U_out max @ 60 mV	2.906 V	—
U_out min @ 60 mV	-4.333 V	—
U_C max @ 60 mV	8.188 V	—

Im Zeitbereich zeigt sich der Unterschied deutlicher als im AC: die Großsignalverstärkung steigt von 67.94 auf **77.21** (+13.6 %). Grund ist die im Arbeitspunkt verschobene Steilheit (g_m = I_C/U_T steigt mit I_C).

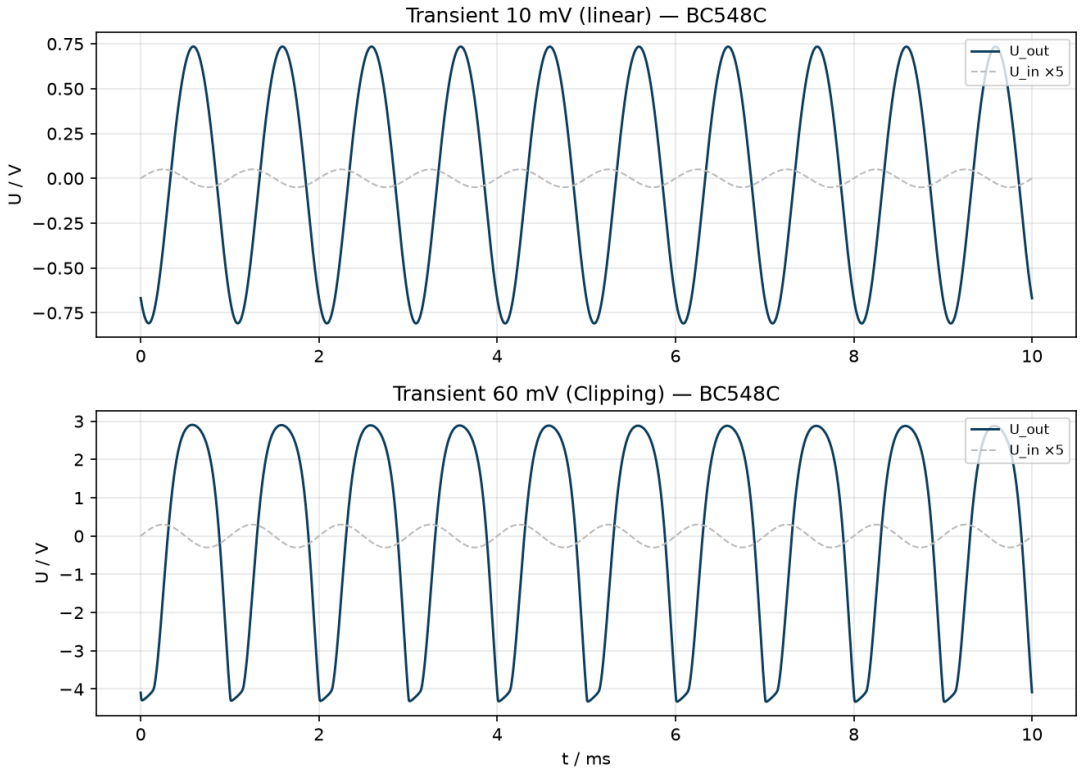


Bild 2: Linearer Betrieb und Clipping

4 Klirrfaktor

U_in	THD BC548C	THD BC548B	U_out
5 mV	2.44 %	2.02 %	0.387 V
10 mV	4.88 %	4.03 %	0.771 V
15 mV	7.31 %	6.06 %	1.148 V
20 mV	9.75 %	8.09 %	1.516 V
25 mV	12.19 %	10.12 %	1.871 V
30 mV	14.62 %	12.17 %	2.211 V
35 mV	17.04 %	14.22 %	2.535 V
40 mV	19.45 %	16.28 %	2.841 V
45 mV	21.85 %	18.34 %	3.127 V
50 mV	23.78 %	20.41 %	3.380 V
55 mV	24.22 %	22.46 %	3.555 V
60 mV	24.40 %	23.63 %	3.695 V

Bei 30 mV liegt der Klirrfaktor mit 14.62 % über dem B-Exemplar (12.17 %). Die höhere Verstärkung bedeutet bei gleicher Ansteuerung einen größeren Ausgangshub und damit früheres Clipping.

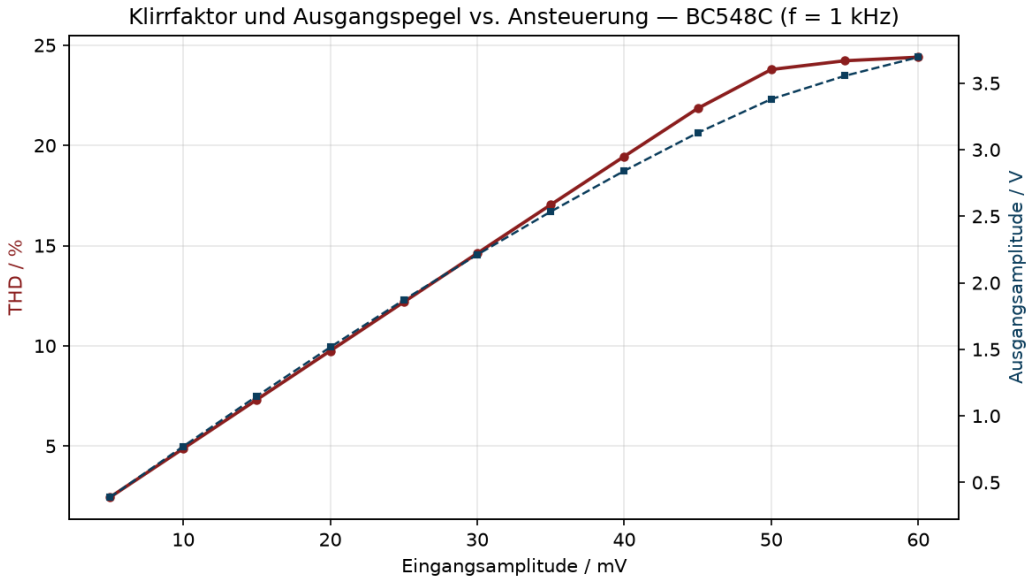


Bild 3: THD und Ausgangspegel

5 Parameter-Empfindlichkeit

Sweep	BC548C	BC548B	Bewertung
Temperatur (–20…+80 °C)	0.47 dB	0.16 dB	kritisch ab 0,4 dB
β-Streuung (Gruppe)	0.74 dB	4.44 dB	kleiner = besser
Last (2…100 kΩ)	6.01 dB	6.01 dB	unverändert
R_B2 (1,6…3,0 kΩ)	7.61 dB	6.74 dB	kritischste Größe

Wichtigster Unterschied: Die β-Streuung innerhalb der Gruppe sinkt von 4.44 dB auf **0.74 dB**. Das ist erwartbar — der relative Abstand zwischen den Gruppengrenzen ist bei C enger (420…800, Faktor 1,9) als bei B (200…450, Faktor 2,25), und die Schaltung reagiert auf β mit einer Wurzelfunktion.

Die Temperaturdrift steigt dagegen von 0.16 dB auf 0.47 dB. Der höhere Kollektorstrom erzeugt mehr Verlustleistung, daher wirkt die Temperaturabhängigkeit von V_BE und g_m stärker.

Die Bias-Empfindlichkeit bleibt hoch (7.61 dB). Sie wird vom Spannungsteiler und nicht vom Transistor bestimmt — hier hilft nur ein niederohmigerer Teiler oder ein Trimmpoti.

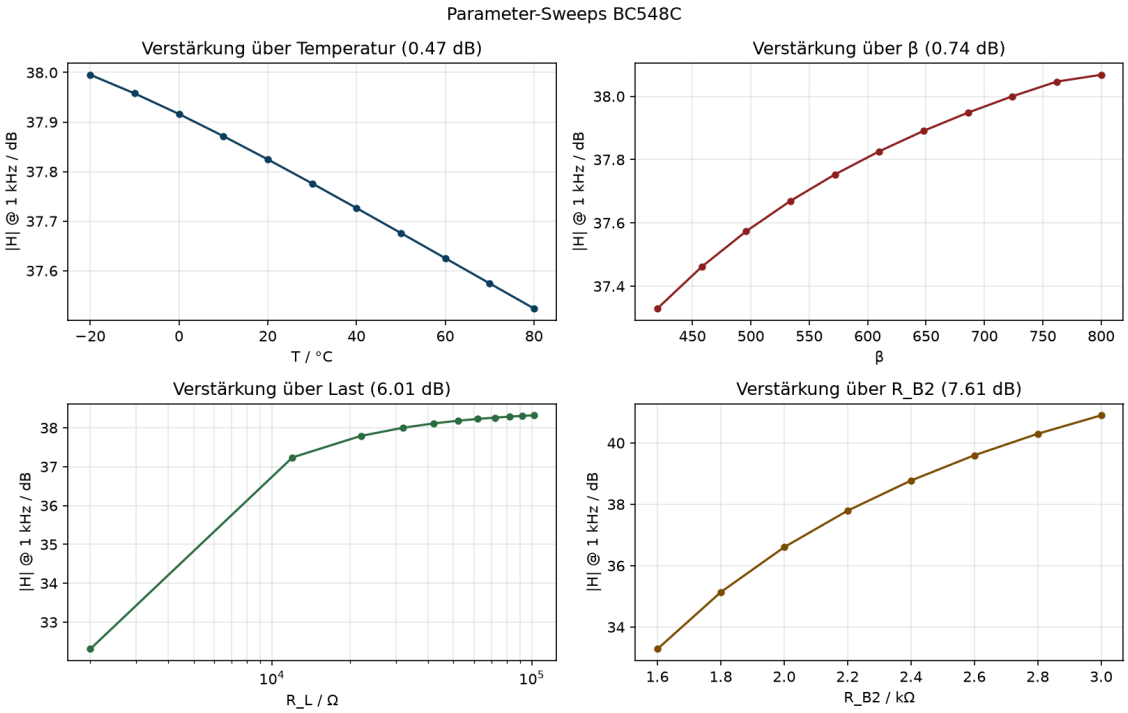


Bild 4: Parameter-Sweeps

6 Impedanzen und Rauschen

Frequenz	Z_in	Z_out
100 Hz	16,18 kΩ	12,33 kΩ
1 kHz	2,17 kΩ	2,19 kΩ
10 kHz	1,44 kΩ	1,61 kΩ
100 kHz	1,33 kΩ	1,61 kΩ

Die Eingangsimpedanz liegt im Nutzband bei ca. 2,2 kΩ, die Ausgangsimpedanz bei ca. 1,6 kΩ. Beide sind vom Transistortyp nahezu unabhängig, weil der Spannungsteiler (1,8 kΩ) bzw. R_C (1,8 kΩ) dominieren.

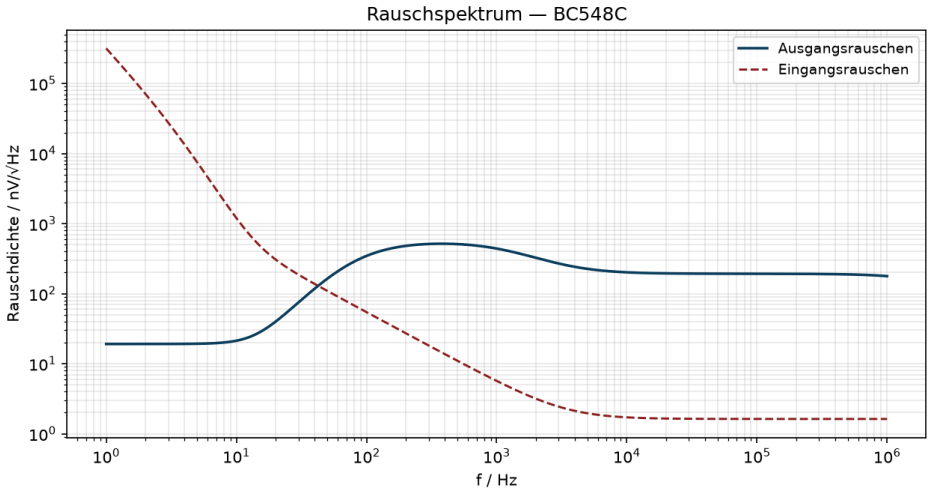


Bild 5: Rauschspektrum

7 Bewertung

Was sich durch den Wechsel auf C ändert

Eigenschaft	Änderung	Bewertung
Basisstrom	8.0 → 4.4 µA	günstig: Teiler weniger belastet
Kollektorstrom	2.02 → 2.04 mA	neutral, +0,9 %
Klein-signal-Verstärkung	+1,12 dB @ 1 kHz	günstig
Großsignal-Verstärkung	+13.6 %	günstig
β-Streuung	4.44 dB → 0.74 dB	deutlich besser
Temperaturdrift	0.16 dB → 0.47 dB	etwas schlechter
Bias-Empfindlichkeit	6.74 dB → 7.61 dB	unverändert kritisch
Verlustleistung	8.91 mW	unverändert

Fazit

Der BC548C ist für diese Schaltung **die bessere Wahl**: höhere und über die Gruppe gleichmäßigere Verstärkung, geringerer Basisstrom. Die verbleibenden Schwachstellen — Bias-Empfindlichkeit (7.61 dB) und frühes Clipping — liegen in der Dimensionierung des Teilers und des Kollektorwiderstands, nicht am Transistor. Wer β-Streuung wirklich eliminieren will, kommt um einen niederohmigeren Teiler (z. B. 4,7 k / 1 k) nicht herum.

Empfehlungen

Problem	Maßnahme	Wirkung
Bias-Drift	Teiler 4,7 k / 1 k oder Trimmpoti	< 1 dB Streuung
Clipping ab 30 mV	R_C 1,2 k oder VCC 12 V	mehr Kollektorhub
Basswiedergabe	C_IN auf 1 µF	f_u von 1,35 kHz auf ~135 Hz
THD	47 Ω von R_E ungebypasst lassen	Gegenkopplung, weniger THD

Anhang: Dateien

Pfad	Inhalt
analysen_bc548c/*.cir	15 LTspice-Netzlisten
ergebnisse_bc548c/*.log	Simulationsprotokolle
plots_bc548c/*.png	5 Diagramme
thd_kennlinie_bc548c.csv	THD-Kennlinie
ergebnisse/ (BC548B)	Referenzwerte zum Vergleich

Erstellt mit LTspice 26.1.1 · BC548C, BF = 600, IS = 1,8·10■¹■ A, VAF = 100 V · T = 27 °C. Systematische Abweichung zu BC548B: nur über β, alle übrigen Modellparameter identisch.