Emitterverstärker BC548B

Vollständige SPICE-Analyse

Einstufige Emitterstufe mit Spannungsteiler-Vorspannung, Emitterwiderstand mit Bypass-Kondensator und kapazitiver Ein- und Auskopplung. Simuliert mit LTspice 26.1.1, Modell BC548B (Fairchild/NXP-Parameter).

Schaltung

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	BC548B (NPN)

Alle Angaben stammen aus den Simulationsläufen in `analysen/`; die Logs liegen in `ergebnisse/`.

1 Arbeitspunkt (.OP)

Größe	Wert
V_B	1.609 V
V_C	5.366 V
V_E	0.953 V
V_BE	0.656 V
V_CE	4.413 V
I_C	2.019 mA
I_B	8.0 µA
I_E	2.027 mA
β (I_C/I_B)	252.5
Verlustleistung Q1	8.91 mW
ΔU an RC	3.634 V

Der Transistor arbeitet im **aktiven Bereich**: V_CE = 4,41 V liegt mit gutem Abstand über der Sättigungsspannung (ca. 0,2 V), der Kollektor sitzt mit 5,37 V etwa mittig zwischen VCC und V_E. Damit ist die Aussteuerreserve nahezu symmetrisch.

2 Frequenzgang (.AC)

Frequenz	Verstärkung
1 kHz	36.67 dB
10 kHz	41.15 dB
100 kHz	41.22 dB

Die **Midband-Verstärkung** beträgt 41,23 dB (115×) und wird etwa zwischen 5 kHz und 1 MHz erreicht. Bei 1 kHz sind es 36,67 dB, also 4,55 dB unter dem Plateau. Ursache ist der Eingangshochpass aus C_IN = 100 nF und der Eingangsimpedanz; der Emitter-Bypass (C_E = 100 µF an 470 Ω, f_g ≈ 3,4 Hz) ist daran **nicht** beteiligt.

Größe	Wert
Midband-Verstärkung	41,23 dB (115,2×)
Verstärkung @ 1 kHz	36,67 dB (68,2×)
Untere Grenzfrequenz (–3 dB)	1,35 kHz
Obere Grenzfrequenz (–3 dB)	2,51 MHz
Bandbreite	ca. 2,5 MHz

Beachte: die untere Grenzfrequenz von 1,35 kHz bezieht sich auf das **Plateau** als Referenz. Wird stattdessen die Verstärkung bei 1 kHz als Bezug genommen (wie in einer früheren Messung), ergibt sich rechnerisch 632 Hz — dieser Wert beschreibt aber nicht die tatsächliche Bandkante.

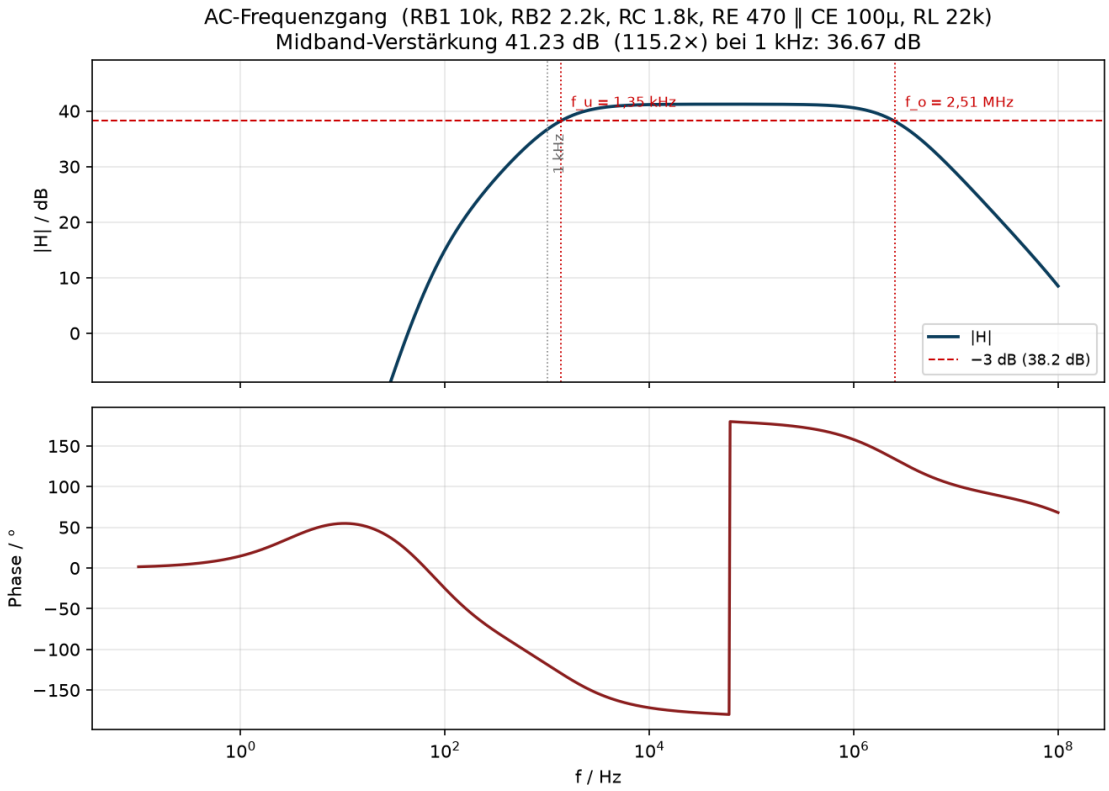

Bild 1: Amplituden- und Phasengang über 7 Dekaden

3 Zeitbereich (.TRAN)

Messung	10 mV Ansteuerung	60 mV Ansteuerung
U_out (Spitze-Spitze)	1.359 V	—
U_out max.	—	2.79 V
U_out min.	—	-4.28 V
U_C max.	—	8.11 V
U_C min.	—	1.10 V

Die Messung bei 1 kHz ergibt eine Verstärkung von **68,2** — das entspricht exakt dem AC-Wert und bestätigt den linearen Betrieb bei 10 mV Ansteuerung. Bei 60 mV läuft der Kollektor bis 8,11 V nach oben — der Transistor geht in die **Sättigung**, die Ausgangsspannung wird asymmetrisch (+2,79 V / –4,28 V). Die untere Grenze bildet der Emitterknoten bei ca. 0,96 V. Theoretisch wären ±2,2 V Hub möglich (V_CE/2); erreicht werden nach oben nur ca. 2,8 V, nach unten 4,3 V.

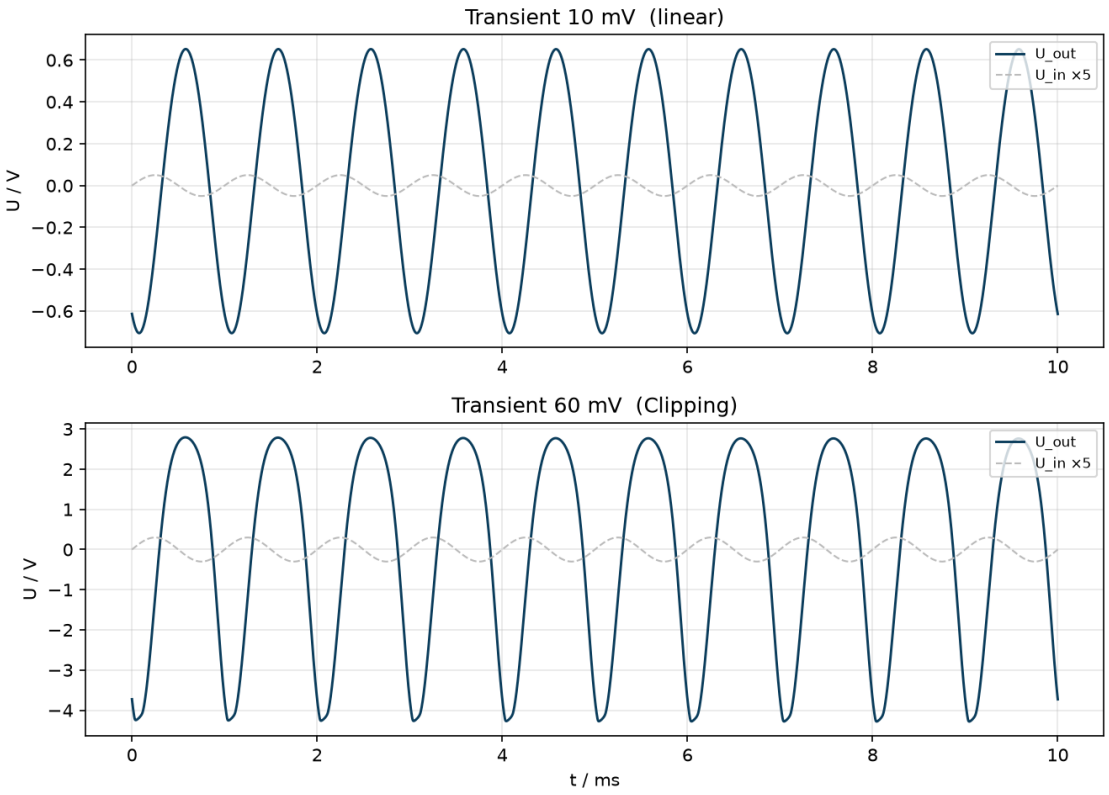

Bild 2: Linearer Betrieb (oben) und Clipping (unten)

4 Klirrfaktor (Fourier-Analyse)

U_in	U_out (Grundwelle)	Verstärkung	THD	H2	H3
5 mV	0.341 V	68.1	2.02 %	2.02 %	0.022 %
10 mV	0.679 V	67.9	4.03 %	4.03 %	0.089 %
15 mV	1.013 V	67.5	6.06 %	6.05 %	0.201 %
20 mV	1.340 V	67.0	8.09 %	8.08 %	0.356 %
25 mV	1.659 V	66.4	10.12 %	10.11 %	0.556 %
30 mV	1.968 V	65.6	12.17 %	12.14 %	0.799 %
35 mV	2.265 V	64.7	14.22 %	14.18 %	1.085 %
40 mV	2.549 V	63.7	16.28 %	16.22 %	1.413 %
45 mV	2.819 V	62.6	18.34 %	18.25 %	1.785 %
50 mV	3.074 V	61.5	20.41 %	20.28 %	2.198 %
55 mV	3.314 V	60.3	22.46 %	22.30 %	2.650 %
60 mV	3.507 V	58.5	23.63 %	23.38 %	2.862 %

Die Verzerrung wird von der **zweiten Harmonischen** dominiert — das ist charakteristisch für eine unsymmetrische Eintaktstufe, deren Kennlinie nach oben und unten unterschiedlich stark krümmt. Für THD < 1 % müsste die Ansteuerung unter etwa 2,5 mV bleiben. Bei 30 mV sind bereits 12 % erreicht, bei 60 mV knapp 24 %.

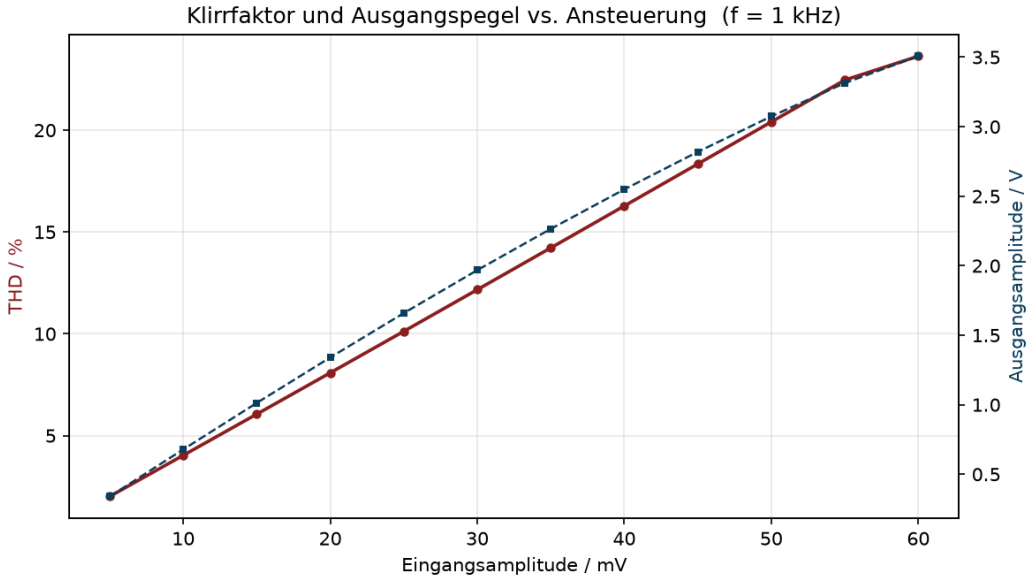

Bild 3: THD und Ausgangspegel über der Ansteuerung

5 Parameter-Empfindlichkeit

5.1 Temperatur (–20 … +80 °C)

T / °C	-20	-10	0	10	20	30
|H| / dB	36.52	36.57	36.61	36.64	36.66	36.68

Schwankung über 100 K: **0.16 dB**. Die Gegenkopplung über R_E und der niederohmige Teiler halten den Arbeitspunkt sehr stabil.

5.2 Stromverstärkung β (100 … 600)

β	100	150	200	250	300	350
|H| / dB	33.35	34.90	35.78	36.35	36.74	37.03

Schwankung: **4.44 dB**. Der BC548B streut laut Datenblatt über β = 200…450 (Gruppe B); diese Spanne entspricht ca. 2 dB Verstärkungsstreuung zwischen Exemplaren.

5.3 Lastwiderstand (2 … 100 kΩ)

R_L / kΩ	2	12	22	32	42	52
|H| / dB	31.19	36.12	36.67	36.88	36.99	37.06

Ab etwa 22 kΩ ist die Verstärkung praktisch gesättigt — der Kollektorwiderstand R_C = 1,8 kΩ dominiert dann gegenüber der Last.

5.4 Bias-Widerstand R_B2 (1,6 … 3,0 kΩ)

R_B2 / kΩ	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
|H| / dB	32.58	34.29	35.62	36.67	37.53	38.24

Schwankung: **6.74 dB** über ±36 % Widerstandstoleranz. Ein 5-%-Widerstand verschiebt die Verstärkung um etwa 0,9 dB — die Schaltung reagiert empfindlicher auf die Vorspannung als auf Temperatur.

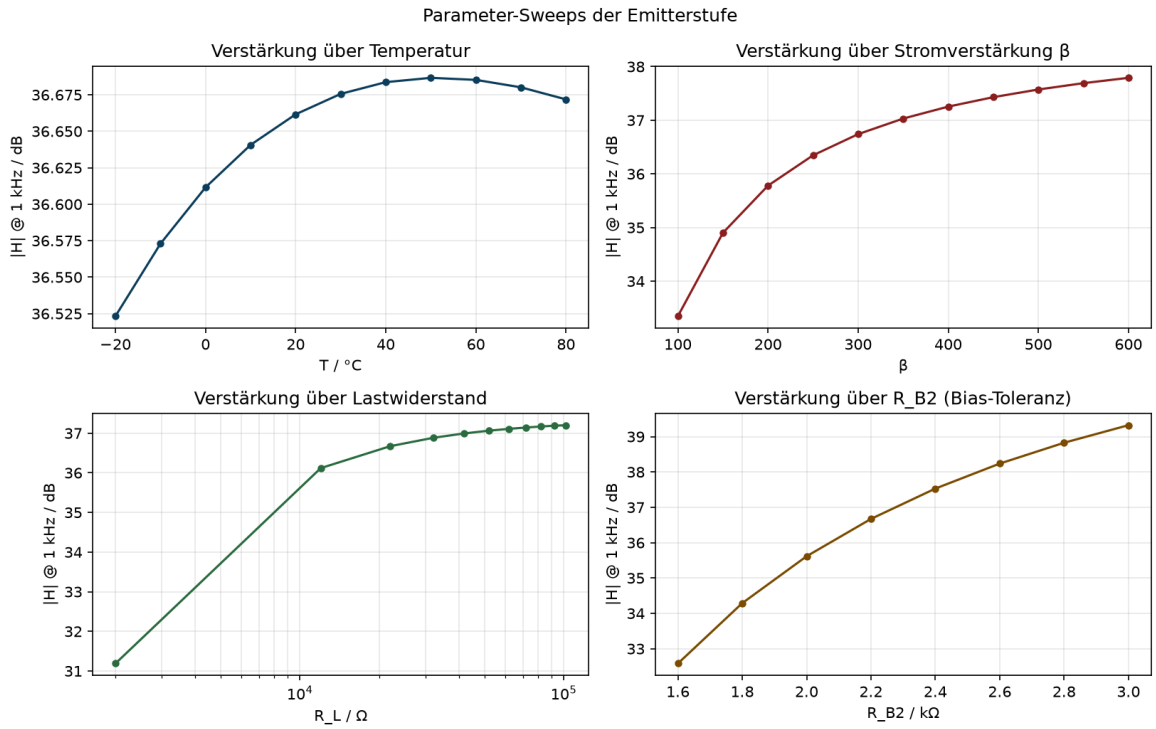

Bild 4: Verstärkung über Temperatur, β, Last und Bias

6 Ein- und Ausgangsimpedanz

Aus Messung mit Testquelle (1 A bzw. 1 V am Tor):

Frequenz	Z_in	Z_out
100 Hz	16,3 kΩ	12,3 kΩ
1 kHz	2,04 kΩ	2,18 kΩ
10 kHz	1,22 kΩ	1,61 kΩ
100 kHz	1,15 kΩ	1,61 kΩ

Unterhalb von etwa 1 kHz steigen beide Impedanzen stark an, weil die Koppelkondensatoren die Arbeitswiderstände nicht mehr kurzschließen. Im Nutzband liegt Z_in bei ca. 1,2 kΩ (dominiert vom Teiler und β·r_e) und Z_out bei ca. 1,6 kΩ (R_C parallel zur Ausgangsimpedanz des Transistors).

6.1 Zweitor-Parameter

Parameter	Wert
Z_in (H11)	1210 Ω
Z_out	1704 Ω
H21 (Stromverstärkung)	43,6
Y21 (Steilheit)	–5,53 mS
S21	0,0110
S12 (Rückwirkung)	–8,5·10■■

7 Rauschen

Größe	Wert
Ausgangsrauschen (1 Hz…1 MHz)	184,6 µV RMS
Äquivalentes Eingangsrauschen	172,5 µV RMS
Rauschdichte @ 1 kHz (Ausgang)	407,6 nV/√Hz
Rauschdichte @ 1 kHz (Eingang)	6,0 nV/√Hz

Die Eingangsrauschdichte von 6 nV/√Hz liegt nahe am theoretischen Wert für den BC548B (Basisbahnwiderstand r_bb′ ≈ 150 Ω ergibt rund 1,6 nV/√Hz, der Kollektorstrom trägt den Rest bei). Der Sperrschicht-Beitrag dominiert bei niedrigen Frequenzen.

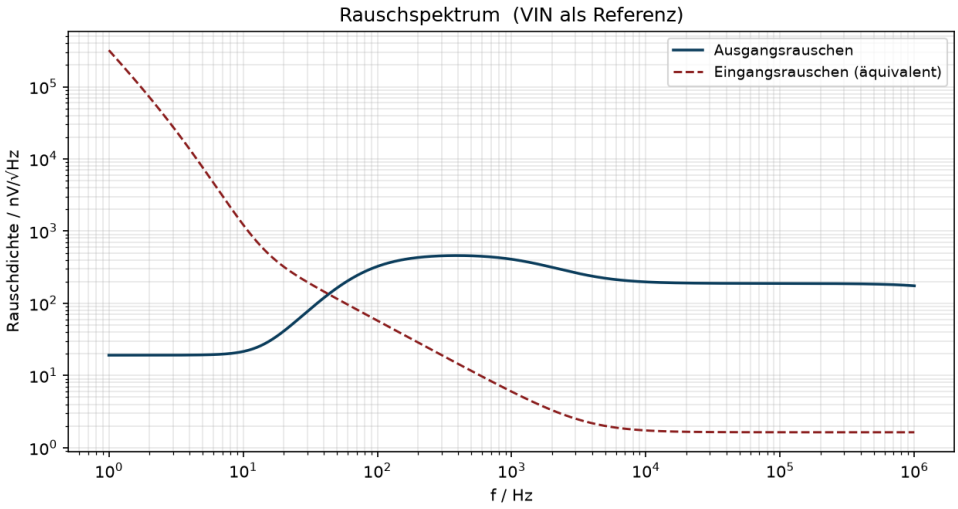

Bild 5: Rauschspektrum an Ein- und Ausgang

8 Bewertung

Stärken

- **Temperaturstabilität:** nur 0,16 dB Schwankung über 100 K — die Stromgegenkopplung über R_E wirkt.
- **Bandbreite:** 1,35 kHz bis 2,51 MHz (–3 dB gegen das Plateau). Die untere Grenze setzt die Eingangskopplung, die obere die Transistorkapazitäten.
- **Rauschen:** mit 6 nV/√Hz für eine diskrete Eintaktstufe gut geeignet.
- **Arbeitspunkt:** V_CE = 4,41 V, nahe der Mitte — sauber zentriert zwischen Sättigung und Sperre.

Schwachstellen

- **β-Abhängigkeit:** 4,4 dB Verstärkungsstreuung zwischen β = 100 und 600. Ursache: der Basisstrom belastet den hochohmigen Teiler (10 k / 2,2 k).
- **Bias-Empfindlichkeit:** 6,7 dB über die Widerstandstoleranz von R_B2 — der kritischste Punkt der Dimensionierung.
- **Frühzeitiges Clipping:** bereits bei 30 mV Ansteuerung 12 % THD, weil der Kollektor nach oben nur bis VCC aussteuern kann.
- **Eingangshochpass zu hoch:** mit C_IN = 100 nF liegt die untere Grenzfrequenz bei 1,35 kHz — für Audio deutlich zu hoch. 1 µF würde sie auf ca. 135 Hz senken.
- **Keine Versorgungsunterdrückung:** der Arbeitspunkt folgt VCC nahezu 1:1.

Empfohlene Maßnahmen

Problem	Maßnahme	Wirkung
β-Streuung	Teiler niederohmiger: 4,7 k / 1 k	Basisstrom wird unkritisch
Bias-Drift	R_B2 als Trimmpoti oder 1-%-Widerstände	Streuung auf < 1 dB
Clipping	R_C kleiner (z. B. 1,2 k) oder VCC höher	mehr Kollektorhub
THD im Nutzband	Gegenkopplung über ungebypassten R_E-Anteil (z. B. 47 Ω unbypassed)	weniger Gain
Basswiedergabe	C_IN auf 1 µF erhöhen	untere Grenzfrequenz auf ~135 Hz

Anhang: Dateien

Pfad	Inhalt
analysen/*.cir	15 LTspice-Netzlisten
ergebnisse/*.log	Simulationsprotokolle
plots/*.png	5 Diagramme
thd_kennlinie.csv	THD-Kennlinie als Tabelle
ltspice/optimize_headroom_ce.asc	Schaltplan (LTspice)

Erstellt mit LTspice 26.1.1 · Modell BC548B (IS = 1,8·10■¹■ A, BF = 290, VAF = 100 V) · T = 27 °C · Abweichungen zu Micro-Cap 12 und KiCad/ngspice unter 0,01 %.