

Halbleitertechnologie von A bis Z

Analog-/Mixed-Signal-Design

Bandgap-Referenzen	3
<i>Warum eine temperaturstabile Referenzspannung?</i>	<i>3</i>
<i>PTAT- und CTAT-Spannungen</i>	<i>3</i>
<i>Praktische Schaltungen und Restfehler</i>	<i>4</i>

Bandgap-Referenzen

Warum eine temperaturstabile Referenzspannung?

Viele analoge und digitale Schaltungen benötigen eine Referenzspannung, die unabhängig von Versorgungsspannung, Temperatur und Fertigungsstreuung möglichst konstant bleibt – etwa als Vergleichsspannung für ADCs und DACs, als Grundlage für Spannungsregler oder zur Erzeugung von Referenzströmen. Eine einzelne Diodenspannung oder eine Zener-Diode wäre dafür ungeeignet, da die Durchlassspannung einer Diode mit steigender Temperatur um etwa -2 mV/K abnimmt; über einen typischen Industrietemperaturbereich von -40 bis 125 °C ergäbe sich daraus unkompensiert eine Drift von mehr als 300 mV – für präzise Anwendungen viel zu groß.

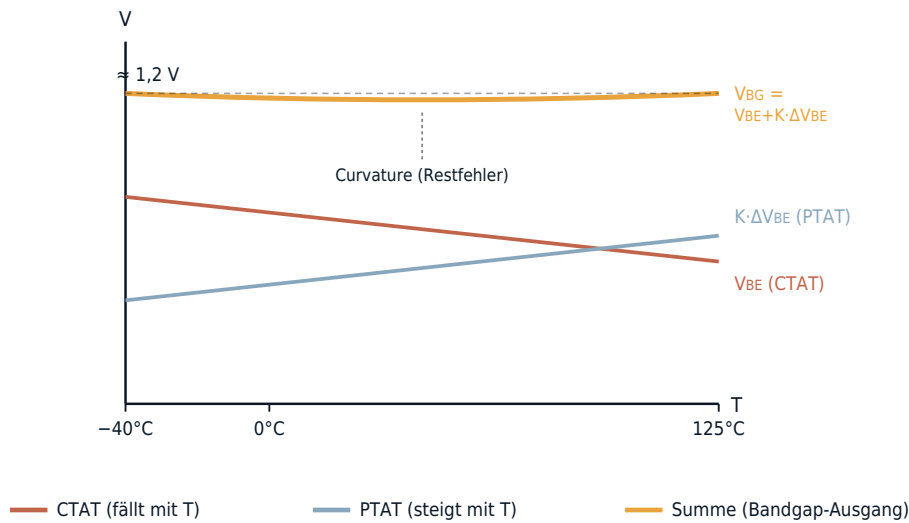
Die Bandgap-Referenz löst dieses Problem, indem sie zwei Spannungen mit entgegengesetztem Temperaturverhalten so gewichtet addiert, dass sich ihre Temperaturabhängigkeiten in erster Näherung gegenseitig aufheben. Die resultierende Ausgangsspannung liegt bei etwa $1,2 \text{ V}$, was der auf den absoluten Nullpunkt extrapolierten Bandlücke von Silicium entspricht – daher der Name. Gute integrierte Bandgap-Referenzen erreichen dabei Temperaturkoeffizienten von nur noch 10 bis 50 ppm/K , also mehr als zwei Größenordnungen weniger Drift als eine unkompensierte Diode.

PTAT- und CTAT-Spannungen

Die Basis-Emitter-Spannung eines Bipolartransistors nimmt mit steigender Temperatur ab und wird deshalb als CTAT-Größe bezeichnet (Complementary To Absolute Temperature). Betreibt man dagegen zwei Bipolartransistoren mit unterschiedlicher Emitterfläche oder unterschiedlicher Stromdichte, so wächst die Differenz ihrer Basis-Emitter-Spannungen ΔV_{BE} proportional zur absoluten Temperatur (PTAT, Proportional To Absolute Temperature): $\Delta V_{\text{BE}} = (kT/q) \cdot \ln(n)$, wobei n das Verhältnis der Stromdichten oder Emitterflächen ist.

PTAT- und CTAT-Spannung ergeben die Bandgap-Referenz

Gegenläufige Temperaturkoeffizienten heben sich in der Summe auf



Verstärkt man die PTAT-Spannung ΔV_{BE} mit einem geeigneten Faktor und addiert sie zu einer CTAT-Basis-Emitter-Spannung, heben sich die linearen Temperaturkoeffizienten beider Anteile in erster Ordnung auf, und die Summe bleibt über einen weiten Temperaturbereich nahezu konstant bei der extrapolierten Silicium-Bandlücke von etwa 1,2 V.

Praktische Schaltungen und Restfehler

Eine verbreitete Umsetzung ist die Brokaw-Bandgap-Zelle, bei der ein Operationsverstärker zwei Bipolartransistoren unterschiedlicher Stromdichte auf gleiches Kollektorpotential regelt und die PTAT-Spannung über einen Widerstand in einen PTAT-Strom umsetzt, der wiederum zur CTAT-Spannung addiert wird. Die Wahl des Verstärkungsfaktors bestimmt dabei, wie genau sich die linearen Temperaturanteile kompensieren; typische unkorrigierte Bandgap-Zellen erreichen Temperaturkoeffizienten von etwa 20 bis 50 ppm/K.

Da die Basis-Emitter-Spannung neben dem linearen Term auch einen schwächeren, nichtlinearen Temperaturanteil besitzt, verbleibt nach der einfachen Kompensation eine leichte Krümmung der Ausgangsspannung über der Temperatur (Curvature) von einigen Millivolt über den gesamten Temperaturbereich. Fortgeschrittene Schaltungen korrigieren diesen Restfehler durch zusätzliche, gezielt nichtlineare Kompensationsströme sowie durch Laser- oder elektrisches Trimmen einzelner Widerstände und erreichen so Temperaturkoeffizienten von nur noch 1 bis 5 ppm/K, wie sie etwa in Präzisions-ADC-Referenzen benötigt werden.