

Halbleitertechnologie von A bis Z

Analog-/Mixed-Signal-Design

Komparatoren	3
<i>Grundfunktion und Abgrenzung zum Operationsverstärker</i>	3
<i>Regenerative Komparatoren (Latch-Komparatoren)</i>	3
<i>Offset, Hysteresis und Kickback</i>	3

Komparatoren

Grundfunktion und Abgrenzung zum Operationsverstärker

Ein Komparator vergleicht zwei Eingangsspannungen und liefert am Ausgang einen von zwei möglichen Logikpegeln, je nachdem, welcher Eingang der höhere ist. Anders als ein Operationsverstärker wird ein Komparator grundsätzlich ohne Rückkopplung betrieben und daher bewusst nicht auf Stabilität in einem linearen Arbeitspunkt ausgelegt; seine Verstärkung darf beliebig hoch sein – typische Open-Loop-Verstärkungen liegen bei 60 bis 100 dB –, ohne dass eine Frequenzkompensation nötig wäre, da der Ausgang stets in die Sättigung eines der beiden Logikpegel getrieben werden soll.

Wichtige Kenngrößen eines Komparators sind die Ansprechzeit (Propagation Delay), die je nach Schaltungsklasse von einigen Nanosekunden bei einfachen Komparatoren bis zu wenigen zehn Pikosekunden bei regenerativen Hochgeschwindigkeits-Latches reicht, sowie die Auflösung, mit der noch zuverlässig zwischen zwei nahe beieinanderliegenden Spannungen unterschieden werden kann und die bei präzisen Komparatoren im Bereich weniger Millivolt bis unter 1 mV liegt.

Regenerative Komparatoren (Latch-Komparatoren)

Für hohe Geschwindigkeit bei geringem Stromverbrauch werden in modernen ADCs überwiegend regenerative Komparatoren eingesetzt, deren bekanntester Vertreter der StrongARM-Latch ist. Er nutzt zwei kreuzgekoppelte Inverter, die sich nach dem Anlegen des Takts gegenseitig positiv rückkoppeln und eine anfangs winzige Eingangsspannungsdifferenz im Bereich weniger Millivolt exponentiell schnell – typischerweise innerhalb weniger hundert Pikosekunden – zu einem vollen Logikpegel verstärken.

Da der StrongARM-Latch nur während der aktiven Taktflanke Strom aufnimmt und im Ruhezustand stromlos ist, eignet er sich besonders für getaktete Systeme wie SAR-ADCs, die mit Taktraten von mehreren hundert Megahertz bis in den Gigahertz-Bereich arbeiten und bei denen der Komparator viele Male pro Wandlung ausgewertet werden muss, ohne dass dabei ein nennenswerter statischer Verlustleistungsanteil entsteht; der Energieverbrauch pro Vergleichsvorgang liegt bei modernen Implementierungen oft im Bereich weniger Femtojoule.

Offset, Hysterese und Kickback

Fertigungsbedingte Mismatch-Effekte zwischen den nominell identischen Transistorpaaren eines Komparators führen zu einer Offsetspannung von typischerweise wenigen Millivolt bis einigen zehn Millivolt bei unkalibrierten Schaltungen, um die sich die tatsächliche Schaltschwelle gegenüber dem idealen Nulldurchgang verschiebt; sie begrenzt letztlich die erreichbare Auflösung des Komparators, sofern sie nicht durch Kalibrierungsverfahren wie Offset-Trimmen auf unter 1 mV reduziert wird. Liegt das Eingangssignal in der Nähe der Schaltschwelle und ist zusätzlich verrauscht, kann der Ausgang wiederholt zwischen den beiden Pegeln hin- und herspringen.

Ein Schmitt-Trigger begegnet diesem Problem durch eine gezielt eingebaute Hysterese von oft einigen zehn bis wenigen hundert Millivolt, bei der die Schaltschwelle für steigende und fallende Signale unterschiedlich hoch liegt, so dass ein einmal erfolgter Übergang erst nach einer größeren Signaländerung wieder rückgängig gemacht wird. Bei regenerativen Latch-Komparatoren tritt zudem der sogenannte Kickback-Effekt auf: Die schnelle Umladung der internen Knoten während der Regeneration koppelt kurzzeitig auf die Eingänge zurück und kann vorgeschaltete, hochohmige Signalquellen um einige Millivolt stören.