

Konstante Spannung mit 1 ppm/°C

Heiße Referenzen

Peter Somfalvy

Man nehme eine temperatur-kompensierte Referenzdiode, angeschlossen an eine Stromquelle und gepuffert von ei-nem Verstärker. Man stecke diese in einen Thermostaten, der dafür sorgt, daß die Temperatur konstant bleibt. Diese Idee ist keineswegs neu, ge-nau so arbeitet der LM 399. Der kostet allerdings eine reichliche Kleinigkeit.

Seine Innenschaltung diskret aufzubauen, wäre ungemein aufwendig, es sei denn, man fände ein Spezial-IC, in dem die wichtigsten Details schon vorhanden sind. Dieses 'Wunderding' gibt es. Es heißt LM 723. Ein Oldtimer.

Die Referenzquelle des 723 ist schon von Haus aus so präzise ausgelegt, daß der Temperaturkoeffizient (T_k) ganze 0,003% beträgt. Die Ausgangsspannung liegt zwischen 6,8 V und 7,5 V (typisch 7,15 V). Sie wird noch stabiler, wenn man für eine konstante Temperatur sorgt.

Eine Heizung tut also not. Diese Aufgabe übernimmt der IC-interne Ausgangstransistor T_{out} . Der ursprünglich für die Strombegrenzung gedachte Transistor T_{CL} dient als Temperaturfühler und Regler. Da es sich hierbei um einen Siliziumhalbleiter handelt (wie übrigens beim ganzen IC), ist die Basis-Emitter-Spannung temperatur-abhängig (die berühmten - 2 mV/°C). Mit dem Spannungsteiler R2-P1-R1 wird die benötigte Temperatur eingestellt. Um den Einschaltstrom auf 65 mA zu begrenzen, müssen mit T1

und R4 zwei zusätzliche Bauteile in Einsatz kommen, da der im 723 diese Aufgabe eigentlich vorgesetzt hat. Der Transistor T_{CL} ja schon anderweitig verplant ist.

C4 verhindert unerwünschte Schwingungen in der Ausgangsstufe, C5 sorgt dafür, daß die Temperatur den eingestellten Wert überschreitet. C3 glättet die Referenzspannung.

Die Heizungsregelung

Legt man den Ausgang der Schaltung gegen Masse (mit Br1), so erwärmt durch T_{out} fließende (Heiz-)Strom gesamte IC, und die Basis-Emitter-Spannung an T_{CL} sinkt ab. Wenn die Schwellenspannung kleiner als mit P1 eingestellte Wert, öffnet er und zieht Basisstrom von T_{out} , worauf dessen Stromfluß abnimmt und das IC wieder abkühlt. Ist dies geschehen, so läuft der beschriebene Prozeß in umgekehrter Richtung ab, daß die IC-Temperatur praktisch konstant bleibt.

Technische Daten

Die Temperaturstabilität der Ausgangsspannung beträgt:

- maximal 1 ppm (typ. 0,6 ppm) bei +10 °C...+50°C
- maximal 2,5 ppm (typ. 1,5 ppm) bei +1 °C...+61°C

Die Aufheizzeit ist kürzer als 10 s bei einer Abweichung vom Endwert von U_{refl} von 500 µV. Der Ausgangswiderstand ist kleiner als 1 Ω; ein Laststromanstieg von 1 mA verursacht ein Absinken der Ausgangsspannung um 1 mV.

Bei 15 V Versorgungsspannung nimmt die Schaltung einen Strom von 14 mA auf ($T_U = 22^\circ\text{C}$). Schwankungen der Betriebsspannung im Bereich 12 V...22 V haben eine Änderung von U_{refl} um weniger als 1 mV zur Folge. Die Arbeitstemperatur beträgt 55 °C. Um das thermische Gleichgewicht im 723 nicht zu stören, sollte der Anschluß U_{refl} nicht mit mehr als maximal 4...5 mA Stromentnahme belastet werden. Einen hier auftretenden Kurzschluß überlebt das IC, ohne Schaden zu nehmen, sofern die Störung nicht länger als 5 s anhält.

Schließlich noch ein Wort zur Langzeitstabilität: Innerhalb von 40 Tagen mit einem Aktiv/Pause-Verhältnis von 1 : 1 (20 Tage EIN, 20 Tage AUS) än-

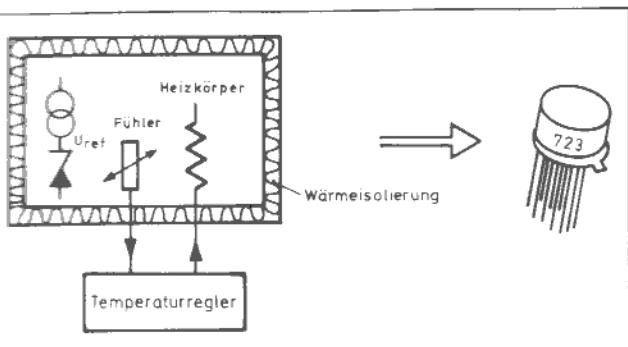


Bild 1. Für den Aufbau einer hochstabilen Spannungsreferenz eignet sich hervorragend ein Oldtimer: der 723.

derte sich U_{ref1} um weniger als $400 \mu V$, was einer Abweichung vom Sollwert von 0,006% entspricht. Dies liegt im Genauigkeitsbereich von Referenzquellen guter sechs- bis siebenstelliger Digitalmultimeter.

Erweiterung bringt Sorgen

Nun ist eine Referenzspannung von beispielsweise 7,06878 V nicht gerade gebräuchlich zu nennen. Um handlichere Werte zu erreichen, sollte man die Grundschaltung aus Bild 2 um einen kleinen Zusatz erweitern, wie er in Bild 3 gezeigt ist.

Sollte eine nicht stabilisierte Betriebsspannung von 17 V...30 V zur Verfügung stehen, kann man diese mit IC3 stabilisieren. In diesem Fall wird die (unstabilisierte) Versorgungsspannung am Punkt U_{B2} angeschlossen. Ist bereits eine stabilisierte Betriebsspannung zwischen 12 V und 20 V (am besten 15 V) vorhanden, so wird diese mit U_{B1} verbunden, dann allerdings darf IC3 nicht eingelötet werden, denn es soll ja nur der 723 heizen...

R5, R6 und P2 bilden einen Spannungsteiler, mit dem man die gewünschte Spannung U_{ref3} einstellt. Leider bildet diese Teilerkette auch die größte Fehlerquelle in der gesamten Schaltung. Die mühsam erreichte Stabilität von 1 ppm kann sich hier bei ungünstiger Dimensionierung und Verwendung von Bauteilen minderer Qualität leicht und locker auf 30 ppm verschlechtern.

IC2 arbeitet je nach Beschaltung entweder als Spannungsfolger oder als

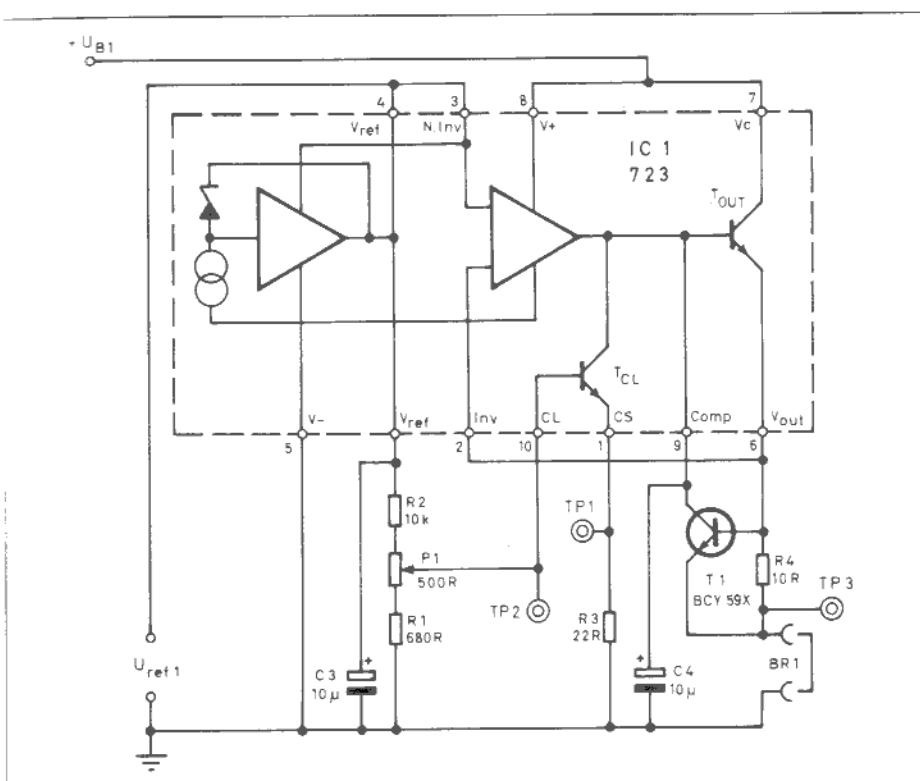


Bild 2. Gesamtschaltung der eigentlichen Spannungsreferenz. Das von Haus aus schon recht präzise arbeitende IC wird noch um Größenordnungen genauer, wenn man für konstante Temperatur sorgt.

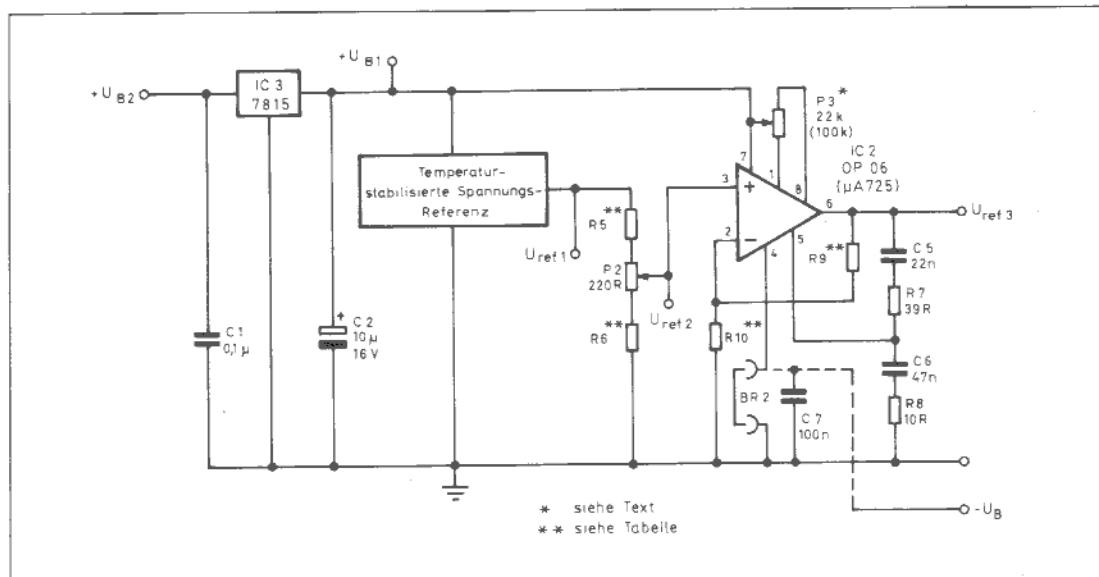


Bild 3. Mit dieser Schaltungserweiterung lassen sich praktisch alle gebräuchlichen Referenzspannungen aus der Grundspannung U_{ref} ableiten.

Bauanleitung

Uref 1 [V]	Uref 2 [V]	R5* [k]	R6* [k]	R9 [k]	R10 [k]	C7 [nF]
0,100	0,100	10	0,150	Drahtbrücke	entfällt	100
0,19—0,20	0,19—0,20	10	0,270	Drahtbrücke	entfällt	100
1,000	1,000	10	1,8	Drahtbrücke	entfällt	100
1,90—2,00	1,90—2,00	10	4,7	Drahtbrücke	entfällt	100
5,000	5,000	3,3	10	Drahtbrücke	entfällt	Drahtbrücke
10,000	5,000	3,3	10	22	22	Drahtbrücke

Tabelle 1. Die Platinenbestückung richtet sich nach der gewünschten Referenzspannung. R5,6,9 und 10 müssen vom gleichen Typ und vom gleichen Hersteller sein.

Verstärker mit $V = 2$ (vgl. Tabelle 1). Für den OpAmp muß unbedingt ein hochwertiger Typ mit extrem niedriger Drift eingesetzt werden, wie der in der Schaltung angegebene OP06 oder der μA725. 'Schrotflinten' des Typs 741 oder vergleichbare Teile kommen hier auf keinen Fall in Frage.

Soll für U_{ref3} eine Spannung von weniger als 2 V eingestellt werden, so muß an IC2 auch eine negative Speisespannung anliegen. Anstelle der Brücke Br2 ist in diesem Fall der Kondensator C7 einzusetzen. Die negative Betriebsspannung sollte zwischen -5 V und -15 V liegen. Da nur mit einer Stromaufnahme von maximal 6 mA zu rechnen ist, genügt für $-U_b$ eine einfache Stabilisierung mit Z-Diode.

Der Ausgangswiderstand von U_{ref3} erreicht sehr günstige Werte von weniger als $0,04 \Omega$; der maximale Ausgangstrom beträgt 20 mA. Die hier erreichbare Temperaturstabilität liegt bei 2...6 ppm (IC2 driftet kaum meßbar).

Störsicherer Einbau

Um unerwünschte Störungen von der Schaltung fernzuhalten, muß man für eine möglichst 'dichte' Abschirmung sorgen. Daher wird trotz einseitigen Platinenlayouts doppelseitiges Basismaterial verwendet, die Löcher für die Komponenten werden in gewohnter Weise gebohrt, anschließend fräst man mit einem größeren Bohrer die Löcher auf der Bestückungsseite so aus (nicht versehentlich ganz durchbohren!), daß beim Bestücken keine Kurzschlüsse entstehen.

Ebenfalls aus doppelseitigem Platinenmaterial schneidet man Seitenteile und Deckplatte für das Modul zu und bohrt Löcher, um später auch noch an die Abgleichtrimmer heranzukommen. Die Abmessungen der Seitenteile sowie die korrekten Bohrungpositionen sind in Bild 5 dargestellt. Zum Schluß wer-

den die Platine, Seitenteile und Deckel miteinander verlöten.

Aus Neu mach Alt

Die Platine wird zunächst vollständig nach Bestückungsplan (Bild 4) und Ta-

belle 1 bestückt. Ausnahme: Die Brücke Br1 wird noch nicht gesteckt.

Das Projekt tritt nunmehr in seine heiße Phase: Um die Temperaturstabilität zu erhöhen, wird IC1 vorgealtert — der 723 ist zwar an sich schon uralt, hier jedoch geht es um etwas anderes, nämlich um die Stabilisierung seiner 'inneren Werte'.

Diese erfolgt bei $70\dots75^\circ\text{C}$ Gehäuse-temperatur und dauert so etwa 14 Tage. Während dieser Zeit wird sich U_{ref1} um $3\text{ mV}\dots25\text{ mV}$ ändern, danach bleibt die Spannung konstant.

Da nur wenige über einen Temperaturfühler mit einigen mg effektiver Masse verfügen, liegt es nahe, als Sensor den IC-internen Transistor T_{CL} heranzu-

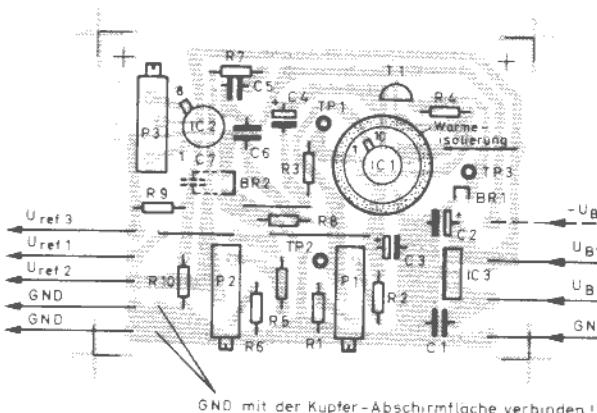


Bild 4. Der Bestückungsplan des Referenzmoduls inklusive Schaltungserweiterung.

Stückliste	
Temperaturstabilisierte Spannung mit 1 ppm / °C	
Widerstände (alle Metallschicht, 1% 1/4 W)	
R1	680R
R2	10k
R3	22R
R4,8	10R
R5,6	nach Tabelle 1
R7	39R
R9,10	nach Tabelle 1
Trimmer (Spindeltrimmer, Cermet)	
P1	500 R
P2	220 R
P3	20k (bei OP06), 100k (bei 723)
Kondensatoren	
C1	0,1μF
C2	10μ/16 V (radial)
C3	10μ/25 V Tantal
C4	47μ/16 V (radial)
C5	47μ ker
C6	22μ ker
C7	100n ker
Transistoren	
IC1	μA (LM, MC) 723, TO-Gehäuse
IC2	OP-06 oder μA725
IC3	7815
T1	BCY59x

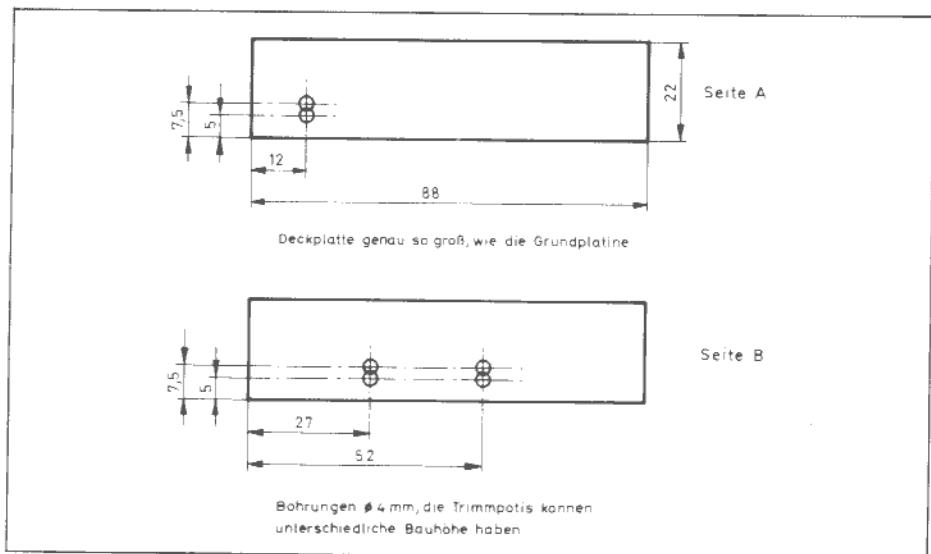


Bild 5. So müssen die Seitenteile zur Platinenabschirmung gesägt bzw. gebohrt werden.

ziehen. Laut Herstellerangabe soll U_{BE} 650 mV bei 25 °C betragen, die Erfahrung zeigt jedoch, daß diese Spannung zwischen den einzelnen Bausteinen so voneinander abweicht, daß eine exakte Temperatureinstellung nicht gewährleistet ist.

Eine andere Methode führt viel sicherer zum Ziel: Zuerst muß die Spannungsschwelle gefunden werden, bei der T_{CL} anspricht ($U_{Begrenzung}$). Dazu stellt man die Spannung zwischen TP1 und TP2 auf den Minimalwert ein (P1 im Uhrzeigersinn bis zum Anschlag drehen), schließt zwischen TP3 und Masse einen Spannungsmesser an und dreht P1 so weit zurück, bis U_{TP3} (Ausgang des 723) um 50 mV abgesunken ist. Jetzt wird die Sollspannung zwischen TP1 und TP2 bestimmt. Sie wird folgendermaßen berechnet:

$$U_{soll} = U_{BE} - 2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} [T_{soll} - (T_{Umgebung} + 5)]$$

Als letztes Glied in der Formel muß deshalb '+5' stehen, weil sich das IC, bedingt durch den Ruhstrom, im Betrieb um etwa 5 °C erwärmt.

Ein Berechnungsbeispiel wird an dieser Stelle die letzten Klarheiten beseitigen helfen: Bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C werden für U_{BE} von T_{CL} 610 mV gemessen; die gewünschte Gehäusetemperatur beträgt 75 °C. Die Rechnung (aber jetzt bitte ohne Taschenrechner!) lautet folglich:

$$U_{soll} = 610 \text{ mV} - 2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} [75 \text{ }^{\circ}\text{C} - (22 \text{ }^{\circ}\text{C} + 5 \text{ }^{\circ}\text{C})] = 514 \text{ mV}$$

Jetzt gilt es, die Brücke Br1 zu schließen und die soeben mühsam errechnete

Sollspannung zwischen TP1 und TP2 mit P1 einzustellen, um auf 75 °C Gehäusetemperatur zu kommen.

Die Voralterung besteht aus mindestens fünf Aufheiz- und Abkühlphasen. Für eine Abkühlphase wird Br1 für einen Tag gezogen, die Schaltung bleibt jedoch in Betrieb. Just in dem Moment, in dem einem der Geduldsfaden reißt (nach rund zwei Wochen), ist der Prozeß der Voralterung abgeschlossen. Mit der gleichen Formel kann man jetzt die endgültige Arbeitstemperatur einstellen. Ein günstiger Wert ist 55 °C. Wichtig: P1 immer langsam und sachte verstehen; die Steckbrücke Br1 bleibt geschlossen.

Um die Wärmeverluste von IC1 an die Umgebung niedrig zu halten, wird ein entsprechend ausgehöhlter Korken über das IC gesetzt und auf der Platine festgeklebt.

Falls IC2 als Spannungsfolger geschaltet wurde, ist P3 so einzustellen, daß $U_{ref2} = U_{ref3}$ ist. Mit diesem Abgleich driftet IC2 am geringsten. Bei 2-facher Verstärkung sollte P3 in Mittelstellung stehen.

Wir basteln uns einen Widerstand

Wie schon erwähnt, kann der Spannungsteiler R5-P2-R6 die trickreich erworbene Genauigkeit der Spannungsreferenz wieder zunehmen machen, da die Widerstände und der Trimmer unterschiedliche Temperaturkoeffizienten aufweisen können. Aus diesem Grund muß P2 im Verhältnis zu R5

und R6 so klein wie möglich gewählt werden. Der im Schaltbild angegebene Wert von 220 Ω stellt bereits die Grenze des nach oben hin Zulässigen dar. Eine Verkleinerung des Wertes wäre in jedem Fall vorteilhaft, es ist dann allerdings möglich, daß der gewünschte Spannungswert nicht mehr eingestellt werden kann. Abhilfe schafft man, indem man parallel zu R5 oder R6 (je nachdem, ob U_{ref3} höher oder niedriger liegt als erwünscht) Widerstände auflötet. Dies darf jedoch nur auf der Bestückungsseite geschehen! Die Widerstände R5, R6, R9 und R10 müssen unbedingt vom gleichen Typ und möglichst vom gleichen Hersteller sein.

Abweichungen vom Sollwert in der Größenordnung einiger Zehntel mV lassen sich mit P3 korrigieren.

Anwendungsbeispiele für eine hochkonstante Spannungsreferenz erübrigen sich eigentlich. Trotzdem seien einige genannt: Kalibrierspannungsquelle für Multimeter bis 5 1/2 Digits, Referenzspannung für A/D- bzw. D/A-Wandler mit bis zu 16 Bit Auflösung, allgemein als Ersatz für geheizte Referenz-ICs.

Da, wie gesehen, der Abgleich für die korrekte Funktion die entscheidende Rolle spielt, sei zum Schluß noch ausdrücklich angemerkt, was dem aufmerksamen Leser ohnehin längst aufgefallen sein dürfte: Die Genauigkeit des Referenzmoduls ist natürlich nur so gut wie die Qualität des Multimeters, das zum Abgleich verwendet wurde.

SELBSTBAU-TEST
HIFI-VISION AUGUST 1985
MAGNAT »NEBRASKA«
OBERKLASSE PLATZ 1

MHTL 26 M
mit
SOFT-METAL-DOME
Weichmetallkalotte
von 1500-34000 Hz

Der von Magnat neu entwickelte SOFT-METAL-DOME aus Spezial-Alu-Legierung hat Flachdrahtantrieb. Der SOFT-METAL-DOME garantiert gleichphasigen Antrieb der gesamten Membranfläche bis in die höchsten Frequenzen. Dieser Superhochtoner ist auch in dem Magnat Bausatz »NEBRASKA« enthalten.

Magnat

**SELBST BAUEN
MACHT SPASS-**
**SELBST BAUEN
SPART GELD!**

CD-tauglich