

Quarzoszillatoren – der Quarz bestimmt

Das Herzstück vieler elektronischer Systeme ist heute ein Quarzoszillator. Der Einsatz von Quarzoszillatoren beruht im Wesentlichen darauf, dass die mechanische Resonanz eines piezoelektrischen Materials – zumeist eines Quarzkristalls – in der Oszillatorschaltung dazu genutzt wird, ein elektrisches Signal mit einer genauen und stabilen Frequenz zu erzeugen.



Das so erzeugte Signal wird üblicherweise als Taktsignal bezeichnet. Seine Funktion ist es, den Betrieb der anderen elektronischen Bauteile in dem jeweiligen System zu synchronisieren. Grundkenntnisse über Quarze – welche als Basiskomponente die Funktion und Performanz eines Quarzoszillators ausschlaggebend definieren – sind daher ausgesprochen hilfreich. Dieser Beitrag konzentriert sich vor allem auf den Schwingquarz und dessen Produktion, der überhaupt erst den Aufbau einer modernen Oszillatorschaltung ermöglicht.

Das Phänomen des piezoelektrischen Effekts, also der Fähigkeit eines Materials, infolge eines angewendeten Drucks eine Spannung zu erzeugen, wurde im Jahr 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Quarz zeigt wie einige andere Kristalle (u.a. Seignette-Salz, Turmalin) diesen piezoelektrischen Effekt. Hierunter versteht man die Erscheinung, dass unter mechanischem Druck oder Zug an den Oberflächen des Kristalls elektrische Ladungen entstehen (typische Anwendung ist z.B. der Zündmechanismus bei Gasfeuerzeugen). Dieser Effekt ist umkehrbar, d.h. dass sich ein Quarzkristall, beim Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Seiten, mechanisch

verformt (reziproker piezoelektrischer Effekt) und eine sehr schwach gedämpfte periodische Schwingung erzeugt. Das Kristallplättchen führt dann als ein in sich elastisches Gebilde mechanische Schwingungen mit seiner Eigenfrequenz aus. Bedingt durch diesen Piezoeffekt ist eine oszillierende Spannung an den Elektroden messbar.

Etwa 30 Jahre später wurde in den Bell Laboratories der erste Oszillator aufgebaut, der sich diesen Effekt zunutze machte. Zu dieser Zeit wurden dafür natürlich vorkommende Kristalle verwendet. Dabei besaßen jedoch nur geringe Mengen die für den Einsatz in der Quarzindustrie erforderliche Qualität. Die immer populärer werdende Nutzung von Radiogerä-

ten und die wachsende Anzahl von Rundfunksendern ließen in den 1920er- und 1930er-Jahren des letzten Jahrhunderts eine wirtschaftliche Nachfrage nach quarzbasierten Oszillatoren entstehen. Mit dem Beginn des digitalen Zeitalters in den 1950er-Jahren stieg die Nachfrage dann gewaltig an. Dank eines ebenfalls in den Bell Laboratories entwickelten kommerziellen Prozesses zur Herstellung synthetischer Quarzkristalle war es möglich, diesen Nachfrageboom zuverlässig zu decken.

Moderner synthetischer Quarz wird bis heute künstlich in einem Autoklav gezüchtet, einem Druckbehälter, in dem unter hohen Temperaturen die Quarzkristalle („Seeds“) zu Quarzen heranwachsen. Mit die-



Niels Hagen
WDI AG
www.wdi.ag

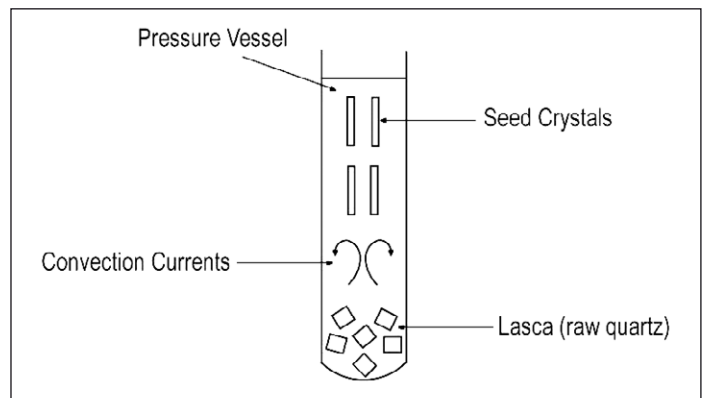


Bild 1: Autoklav



Bild 2: Rohquarzbarren

ser Methode kann die Reinheit des produzierten Quarzes kontrolliert werden, sodass der Einsatz in modernen Anwendungen möglich wird.

Der auf diese Weise entstandene Quarzbarren (Bild 2) wird anschließend in Wafer geschnitten. Da die Temperaturstabilität des Quarzes durch den Schnittwinkel beeinflusst wird, ist eine präzise Schnittführung sehr wichtig. Mit Hilfe eines Röntgengeräts wird sichergestellt, dass der Schnitt den kristallografischen Achsen entspricht. Neunzig Prozent aller Quarze werden mit dem so genannten AT-Schnitt gefertigt. Dabei wird der Quarz in einem Winkel von $35^\circ 15'$ zur Achse des ursprünglichen Barrens geschnitten.

Zum Schneiden der Rohquarzbarren werden spezielle Mehrblattsägen verwendet. Diese Sägen können mit einem Laser-Refraktometer - in Verbindung mit einer Befestigungs- und Klebevorrichtung - ausgestattet sein. Damit lassen sich Quarzbarren mit gegeneinander ausgerichteten kristallografischen Winkeln zusammenkleben. Die Barren werden dann in Endprodukte mit Abweichungen von etwa 10 Winkelsekunden (ein 360stel Grad) geschnitten.

Die Temperaturkurve von AT-Schnittquarzen entspricht in etwa $y = x^3$. Dabei wirken sich Abweichungen des Schnittwin-

gewinnen, die hohen Anforderungen in Bezug auf die Winkelgenauigkeit entsprechen, müssen größere Mengen produziert werden, die dann in Gruppen sortiert werden können. Die restlichen Quarze werden dann für andere Anwendungen mit z.B. breiter gefassten Spezifikationen genutzt. Daher haben Quarzfabriken häufig eine ganze „Bibliothek“ von Quarzscheiben (sog. Blanks) vorrätig.

Nach der Fertigung des Blanks (Bild 6) muss die Frequenz eingestellt werden, mit der der Quarz schwingen soll. Die Frequenz ist umgekehrt proportional zur Masse des Quarzes. Bei

Dicke bei etwa 0,168 mm liegt. Bei jedem Verarbeitungsschritt können Absplitterungen, Risse, Kratzer oder Parallelitätsverlust auftreten, die zu Fehlfunktionen des Endprodukts führen und Störsignale oder unter bestimmten Umständen plötzliche Frequenzänderungen verursachen können.

Im Zuge der Nachfrage nach immer höheren Frequenzen wird irgendwann der Punkt erreicht, an dem eine Verarbeitung der Blanks nicht mehr praktikabel ist, weil sie schlichtweg zu dünn sind. Typischerweise beträgt die höchste noch für die praktische Anwendung herstellbare Grundfrequenz etwa 40 MHz. Es gibt allerdings eine Reihe von Techniken, mit denen sich auch höhere Frequenzen erzeugen lassen.

Zunächst einmal kann der Quarz mit einem Oberton seiner Grundfrequenz betrieben werden. Wie bei allen Schwingensystemen gibt es harmonische Schwingungen mit ungeraden Vielfachen des Grundmodus. Wird die Oszillatorschaltung durch einen geeigneten Filter ergänzt welcher die Grundfrequenz unterdrücken kann, so lässt sich ein Betriebsmodus mit höherer Frequenz erzeugen. Jedoch wird mit jedem weiteren Oberton-Modus die Stabilität geringer und damit die Schaltung anfälliger. Um aus einem niederfrequenten Quarz eine Hochfrequenzschaltung herzustellen, kann auch eine Multi-

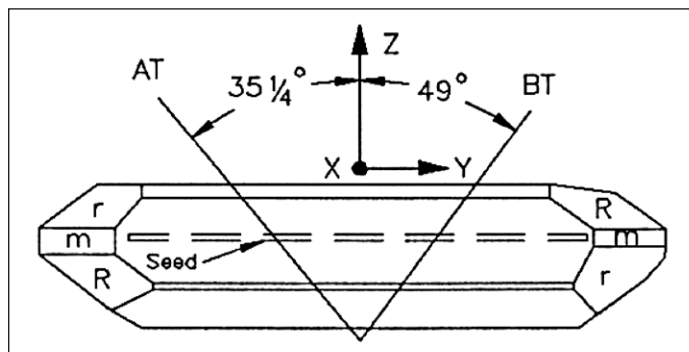


Bild 3: Quarzschnitte

kels auf den Verlauf der Kurve und die Frequenzstabilität des Endprodukts aus.

Wie bei jedem Produktionsprozess muss das Ergebnis der Quarzproduktion kontrolliert werden (Bild 5). Um Quarze zu

Blanks im AT-Schnitt beträgt die Schwingfrequenz der Teile etwa 1680 geteilt durch die Dicke in Millimeter.

Ein 10-MHz-Quarz muss beispielsweise geschliffen, geläppt, geätzt und poliert werden, bis die

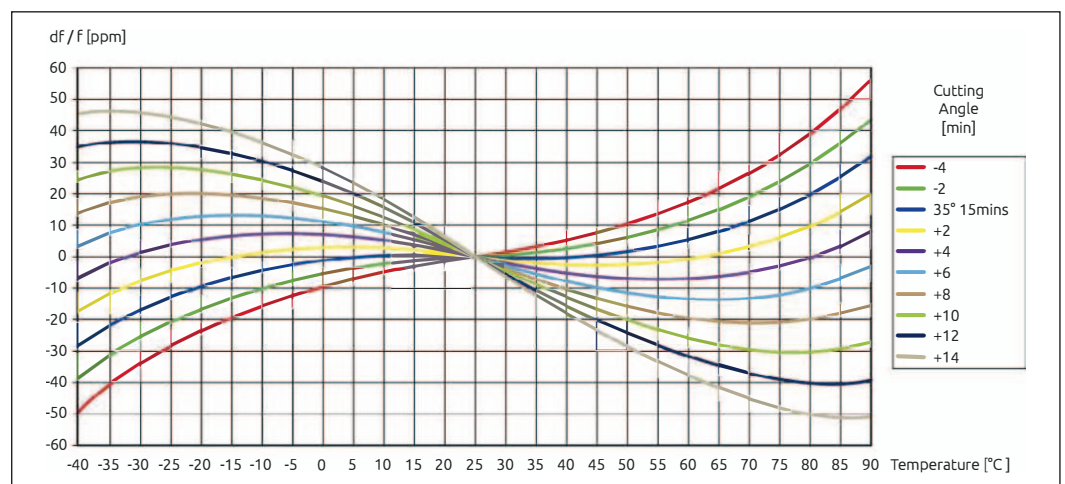


Bild 4: Temperaturkurve eines AT-Schnittquarzes



Bild 5: Klimaschrank für Quarz-Blanks

pikator-Schaltung genutzt werden. Das Problem dabei ist, dass solche Schaltungen einen höheren Stromverbrauch und eine deutlich längere Anschwingdauer haben und sich überdies ungünstig auf das Rauschverhalten auswirken.

Bei den meisten Standard-Quarzoszillatoren werden optimierte Schaltungen verwendet, die beide Methoden nutzen, um Frequenzen bis zu 800 MHz zu erzielen. Wenn jedoch für hohe Frequenzen das Rauschen ein kritischer Faktor ist, können sogenannte Inverted-Mesa-Quarzblanks verwendet werden. Dieses Design wird auch als HFF- (High Frequency Fundamental) Blank bezeichnet. Dabei wird ein Quarz-Blank verwendet, dessen Mitte weggeätzt wurde, um die für eine hochfrequente Oszillation notwendige Dicke des Blanks zu erreichen. Um den Quarz zu stabilisieren, bleibt der Außenrand dagegen dicker (Bild 7.)

Bei Inverted-MESA-Quarzen muss zwar nur ein kleiner Bereich der Oberfläche geätzt werden, der Prozess ist jedoch komplex und kann nur einzeln durchgeführt werden. Die Inverted-Mesa-Methode ist eine hervorragende Lösung zur Herstellung von Hochfrequenz-Qualitätsquarzen, solange die Kosten kein kritischer Faktor sind.

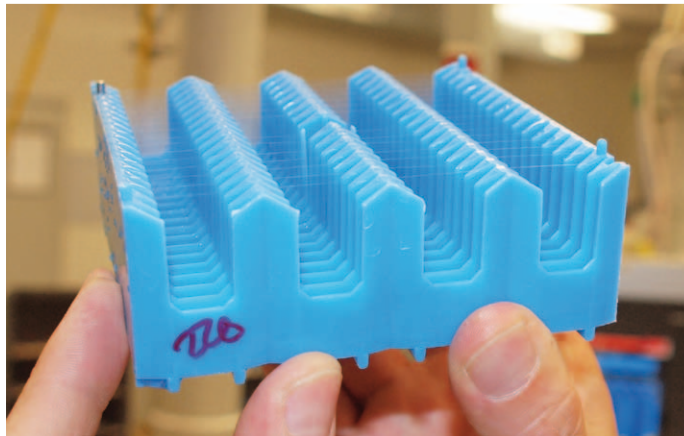


Bild 6: Quarz-Wafer

Nach der Fertigung des Quarz-Blanks werden beide Seiten des Quarzes metallisiert. So entstehen die Elektroden für den externen elektrischen Anschluss. Im nächsten Schritt wird der Quarz hinter einer Schablone montiert und in einer Vakuumkammer dann entweder Silber oder Gold auf die freiliegende Oberfläche aufgedampft. Die Wahl des verwendeten Metalls ist durch die Vorgaben hinsichtlich der Kosten und Alterung bestimmt. Bei einem Gold-Plating wird typischerweise eine Alterung im Bereich von $\pm 1\text{ppm}$ im ersten Jahr erreicht, bei Silber im Regelfall von $\pm 3\text{ppm}$.

Danach kann der Quarz in einem Gehäuse montiert und verklebt werden. Traditionell wurde bei diesem Prozess ein Silberepoxyd-Kleber verwendet, der die mecha-

nische Fixierung und elektrische Leitfähigkeit sicherstellt. Mit Einführung von SMD-Gehäusen aus Keramik wurde dieser Prozess jedoch automatisiert und anstelle von Epoxid ein silikonbasierter Klebstoff verwendet.

Dies hat den Vorteil, dass die Klebeverbindung etwas weniger starr ist, was einen besseren Schutz vor Stoß- und Vibrationswirkungen bietet. Außerdem verringert sich das Risiko von mechanischen Spannungen innerhalb des Quarz-Blanks, was unerwünschte Frequenzänderungen und eine verstärkte Alterung zur Folge haben kann.

werden. Noch bis vor kurzem wurde dazu die Quarzelektrode erneut metallisiert und dabei die Resonanzfrequenz gemessen. Wie bei der ersten Plattierung wurde auch dieser Prozess in einer Vakuumkammer unter Verwendung einer Schablone durchgeführt. Die Nachfrage nach immer kleineren Komponenten hat diese Technik jetzt an ihre Grenzen stoßen lassen. Die Schablonen sind mittlerweile so klein, dass die Auftragung bei Gehäusen mit Abmessungen von $3 \times 2,5 \text{ mm}$ und kleiner nicht mehr mit der erforderlichen Genauigkeit kontrolliert werden kann.

Bei der neuesten Technik kommt daher nun ein Ionenstrahl zum Einsatz, mit dem durch eine Schablone Material von der Elektrode abgetragen wird. Dadurch wird die Masse verringert und die Frequenz des Quarzes erhöht.

Die Einheit mit dem fertig bearbeiteten Quarz muss danach verschlossen werden (Bild 9). Bei keramischen SMD-Gehäusen werden hauptsächlich zwei Techniken angewendet, das sog. Seam-Seal- oder das ältere Glass-Seal-Verfahren. Beide Methoden ergeben einen hermetisch dichten Verschluss, der notwendig ist, um eine inerte Innenatmosphäre zu erzeugen und übermäßige Alterung zu vermeiden. Die Glasversiegelung ist

Der im Gehäuse montierte Quarz kann nun auf die endgültige Frequenz eingestellt („getrimmt“)

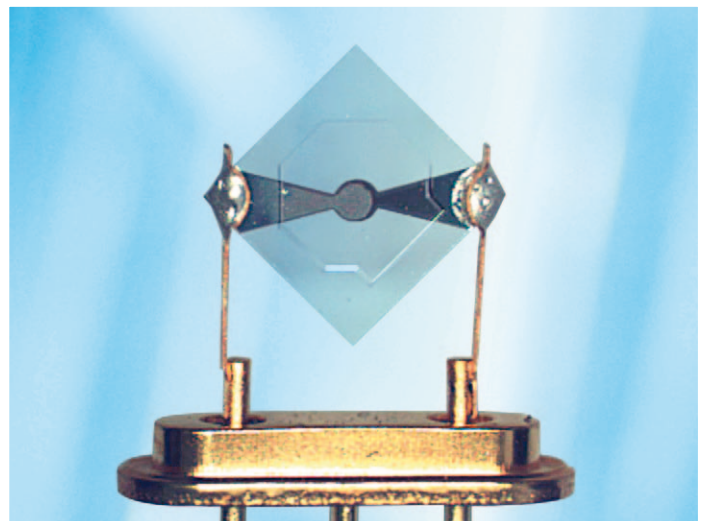


Bild 7: Inverted-MESA-Quarz

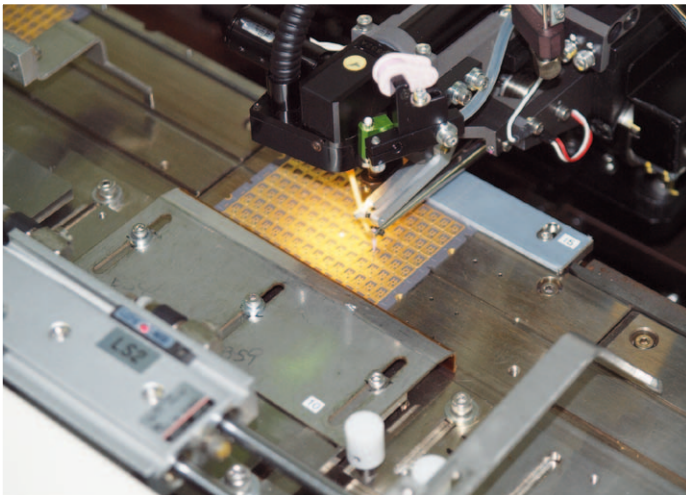


Bild 8: Quarz-Montage

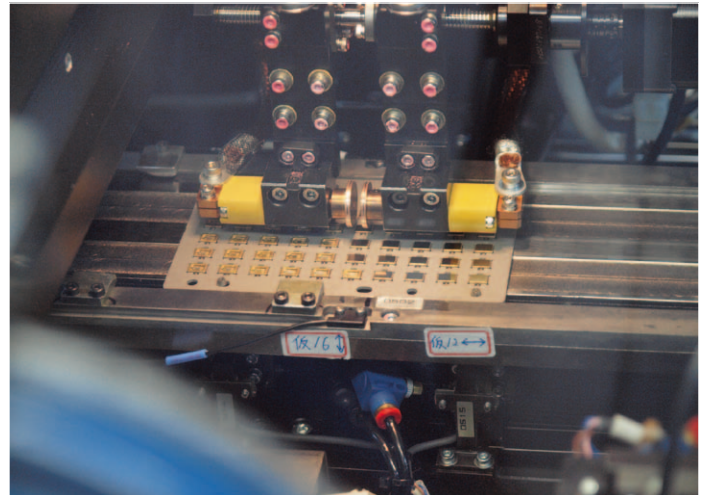


Bild 9: Gehäuse-Montage

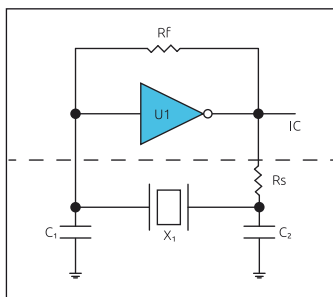


Bild 10: Oszillatorschaltung am Beispiel des Pierce-Gate-Oszillators

billiger, das Bauteil wird dabei jedoch in einem Reflow-Prozess Temperaturen von über 350 °C ausgesetzt, was sich im Einzelfall negativ auf die interne Struktur des Bauteils auswirken kann. Das Seam-Seal-Verfahren ist ein besser kontrollierbarer Prozess, der in einer abgedichteten Kammer unter reiner Stickstoffatmosphäre durchgeführt werden

kann. Bei den neuen kleineren Bauteilen wurden die Verfahren so verändert, dass das fertige Teil unter Vakuum verschlossen wird.

Quarze werden zu Oszillatoren

Da ein Schwingquarz an sich weder Oszillator noch Taktgeber darstellt, sondern einzig zur Festlegung der verwendeten Frequenz dient, muss dieser entsprechend beschaltet werden, um eine quarzstabilisierte Oszillatorschaltung (vereinfacht Quarzoszillator genannt) darzustellen. In der Praxis wird dazu entweder eine der möglichen bekannten Oszillatorschaltungen aus diskreten Bauteilen aufgebaut oder man verwendet einen „externen Oszillator“, bei dem die elektronische Schaltung zusammen mit dem frequenzbestimmenden Schwingquarz

bereits in ein i.d.R. genormtes Gehäuse eingesetzt ist.

In einer Quarzoszillatorschaltung wird die Schwingung aufrechterhalten, indem das vom sogenannten Quarzresonator aufgenommene Spannungssignal verstärkt und per Rückkopplung an den Resonator zurückgeführt wird. Ein Resonator besteht aus zwei elektrisch leitenden Platten, zwischen denen sich ein Quarz-Blank befindet (Bild 7). Um die Oszillation in Gang zu setzen, erzeugt ein Steuerschaltkreis ein Feld, das den Quarz in ein instabiles Gleichgewicht bringt. Durch die positive Rückkopplung im System wird jedes Signal verstärkt und die Oszillation erhöht. Der Resonator wirkt dabei wie ein Frequenzfilter, das nur für ein sehr schmales Frequenzband um die Eigenfrequenz des Quarzes durchlässig ist. Quarzoszillatoren zeichnen

sich durch ein sehr geringes Phasenrauschen aus. Da der Quarz vorwiegend entlang einer Achse schwingt, ist nur eine Phase dominant. Auf diese Weise kann er ein sehr stabiles Signal erzeugen. Die Resonanzfrequenz eines Quarzes kann jedoch durch Umweltfaktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, Druck und Vibration beeinflusst werden.

Um die Wirkungen solcher Faktoren zu minimieren, haben die Hersteller in den vergangenen Jahrzehnten temperaturkompensierte und temperaturstabilisierte Quarzoszillatoren (so genannte TCXO bzw. OCXO) entwickelt, die eine hohe Signalstabilität gewährleisten, um den heutigen technologischen aber auch kommerziellen Anforderungen des Marktes zu genügen. ◀