



Kapazitive Sensoren – Die Richtige Bedieneroberfläche Nicht Nur für Gaming-Applikationen

Von (Ryan Seguire, Product Manager, Cypress Semiconductor Corp.)

Zusammenfassung

Die Technik der kapazitiven Sensoren wird am häufigsten in PC-Touchpads und portablen Media-Playern eingesetzt. Auch Mobiltelefon-Hersteller profitieren von der Popularität dieser Lösung und bieten den Konsumenten verschiedene Modelle mit dieser Technik an. Einfache Konstruktion, Abdichtung gegen Umwelteinflüsse und mechanische Robustheit zählen zu den attraktiven Merkmalen kapazitiver Bedienelemente.

Vorteile kapazitiver Sensoren

Die Technik der kapazitiven Sensoren wird am häufigsten in PC-Touchpads und portablen Media-Playern eingesetzt. Auch Mobiltelefon-Hersteller profitieren von der Popularität dieser Lösung und bieten den Konsumenten verschiedene Modelle mit dieser Technik an. Einfache Konstruktion, Abdichtung gegen Umwelteinflüsse und mechanische Robustheit zählen zu den attraktiven Merkmalen kapazitiver Bedienelemente.

Welche Methoden gibt es?

Obwohl es verschiedene Methoden zur Implementierung kapazitiver Sensoren gibt, sind allen Lösungen bestimmte Grundkomponenten gemein. Meist besteht ein kapazitiver Sensor aus wenig mehr als einer Kupferfläche auf einer Leiterplatte. Daran angeschlossen ist eine geeignete Controller-Schaltung. Die Sensorfläche und die zu ihr führende Leiterbahn weisen gegenüber ihrer Umgebung eine bestimmte Kapazität auf, die von Ground-Plane-Strukturen, Metalleinfassungen oder anderen elektrischen bzw. mechanischen Bauteilen beeinflusst wird. Meist stellt man sich die Kapazität des Sensors bezogen auf die Masse vor. Wird nun ein leitendes aktivierendes Objekt – zum Beispiel ein Finger – genügend nah an den Sensor gebracht, nimmt die Kapazität zur Masse zu. Ein leitendes Objekt erhöht die Zahl der leitenden Pfade zwischen Sensor und Masse. Mehr Pfade bedeuten mehr Feldlinien und mehr Feldlinien bedeuten höhere Kapazität.

Der Front-End-Teil der zu den kapazitiven Sensoren gehörenden Ansteuerschaltung besteht aus einer Schaltkondensator-Struktur sowie internen Strom- oder Spannungsquellen mit externen Widerständen. Mit diesen Methoden baut man am Sensor-Kondensator eine Spannung auf. Diese wird entweder einem Analog-Digital-Wandler (ADC) oder einer Schaltung zum Messen der Ladezeit zugeführt. Letztere besteht aus einem Komparator und einem Zähler oder Timer. Für die Datenverarbeitungs- und Entscheidungs-Funktion eines kapazitiven Sensorsystems wird ein digitaler Ausgang verwendet. Änderungen des digitalen Ausgangsworts am ADC bzw. des digitalen Zählwerts deuten auf eine Änderung der Kapazität hin. Zwei Verfahren (Kippgenerator und die Successive-Approximation-Technik) werden in diesem Artikel beschrieben.

Die praktische Umsetzung

Die Implementierung eines kapazitiven Sensors in einem realen Design ist keineswegs schwierig. Wie schon erwähnt, besteht der eigentliche Sensor aus nichts weiter als einer leitenden Fläche (meist aus Kupfer) auf einer Leiterplatte. Diese Fläche ist an eine Controller-Schaltung angeschlossen und interagiert direkt mit dem aktivierenden Element (normalerweise einem Finger). Die Sensorfläche wird mit der Außenhülle verbunden und befindet sich direkt unter der gewünschten berührungsempfindlichen Fläche. Empfehlenswert ist, jeglichen Luftspalt zwischen Sensor und Außenhülle zu vermeiden und das Sensor-Substrat stattdessen mit Hilfe eines nichtleitenden Materials unmittelbar mit der Außenhülle zu verbinden. Die Controller-Schaltung kann in unmittelbarer Nähe des Sensors (was optimal ist) oder in einiger Entfernung angeordnet werden. Wo der Controller im Einzelfall platziert wird, hängt von den mechanischen Gegebenheiten des jeweiligen Designs ab. Zu beachten ist dabei, dass mit der Distanz zwischen Sensor und Controller auch die Eigenkapazität des Sensors in Bezug zur Masse zunimmt, da die Leiterbahnen ebenfalls mit der Umgebung interagieren und die Kapazität erhöhen. Bei langen

Leiterbahnen kann diese zusätzliche Kapazität erhebliche Ausmaße annehmen. Eine Obergrenze für die Entfernung anzugeben, ist nicht einfach, doch dürfte das Maximum in der Praxis bei 15 bis 30 cm liegen.

Hinsichtlich der Substrate für kapazitive Sensoren gibt es grundsätzlich keine Einschränkungen. Am verbreitetsten sind einfache FR4-Leiterplatten mit Kupfer-Leiterbahnen, doch findet man häufig auch flexible Leiterplatten (oft auf Polyimid-Film – Kapton®) mit kupfernen Leiterbahnen vor. Letztere erleichtern die mechanische Konstruktion speziell in Verbindung mit gewölbten Flächen. Leittinte auf Kohlenstoff- oder Silberbasis, aufgebracht auf ein flexibles Material, erlaubt eine besonders kostengünstige Implementierung kapazitiver Sensoren. Jedoch ist hier eine eigene Controller-Platine mit einem entsprechenden Steckverbinder erforderlich, da das flexible Material nicht lötlbar ist. Darüber hinaus gewinnen transparente leitende Materialien wie Indium-Zinn-Oxid (Indium Tin Oxide, ITO) in Touchscreen-Applikationen rasch an Verbreitung. ITO-Sensoren werden auf Glas oder Polyethylen-Terephthalat (PET) gedruckt und in die engültige Konstruktion eingebaut. Für die Controller solcher Applikationen bietet sich die Chip-on-Glass-Technik an. Wirtschaftlicher kann jedoch die Verwendung eines flexiblen Steckverbinders oder die Hot-Bar-Lötung auf eine Leiterplatte sein.

Kapazitive Bedienelemente

Kapazitive Sensoren gibt es in den unterschiedlichsten Bauarten. Die einfachste Variante ist eine simple Taste, verbunden mit der zugehörigen Controller-Schaltung. Auch eine solche Taste hat analoge Eigenschaften, doch als Ausgang wird in erster Linie eine digitale Ein/Aus-Information benötigt. Die Empfindlichkeit dieses Bedienelements wird von seinen Abmessungen bestimmt. Faustregel ist: je größer der Sensor, umso höher die Empfindlichkeit. Die Grenze wird dabei durch die Größe des Fingers gesetzt, denn eine sehr kleine Fingerkuppe kann nur mit einem Teil eines großflächigen Sensors in Wechselwirkung treten. Bei einer Taste mit standardmäßigen 7 mm Durchmesser darf die Dicke der Überzugsschicht ohne weiteres 10 mm betragen.

Für Schieberegler verwendet man gerade oder in einem Bogen verlaufende Arrays aus mehreren kapazitiven Sensoren. Indem man die Kapazitäten aller Sensorelemente misst, kann man die Position des Fingers auf dem Array mit einer Auflösung interpolieren, die höher ist als die eigentliche Auflösung des Sensors. Bei dieser Interpolation nutzt man die analoge Charakteristik des Sensors. Der Finger interagiert stets mit mehreren Sensorelementen des Arrays. Die Kapazitätsänderung im Sensor genau unter dem Finger ist am höchsten, während sie mit zunehmender Distanz zwischen Sensorelement und Finger langsam abnimmt. Mit einfachen Rechenverfahren lässt sich an Hand der Kapazitätsänderung das Zentrum der Aktivierung bestimmen. Die Auflösung eines solchen Schiebereglers hängt von der Kapazitätsänderung und dem benutzten Algorithmus ab. Abgesehen davon gilt auch bei Schieberegler die bereits für normale Sensoren gemachte Aussage: je größer der Sensor, umso höher die Empfindlichkeit. Die Form der Sensoren kann ebenfalls Einfluss auf die Änderungen mehrerer kapazitiver Interaktionen haben. Genau wie bei einfachen Tasten lässt sich eine Empfindlichkeitsgrenze nur schwierig angeben. Als maximale Überzugsdicke können jedoch 4 mm angesetzt werden.

Als Näherungssensoren werden grundsätzlich sehr große Sensoren verwendet, mit denen sich größere aktivierende Elemente in größerer Entfernung detektieren lassen. Wenn ein Finger mittels einer Taste bei 10 mm Überzugsdicke festgestellt lässt, kann eine Hand über eine Distanz von 150 mm und durch einige Millimeter Überzug detektiert werden. Selbstverständlich lässt sich mit Näherungssensoren nicht die Präzision einer Taste oder eines Schiebereglers erreichen. Außerdem benötigen sie längere Erfassungszeiten zum Detektieren von leitenden Objekten in größerer Entfernung.

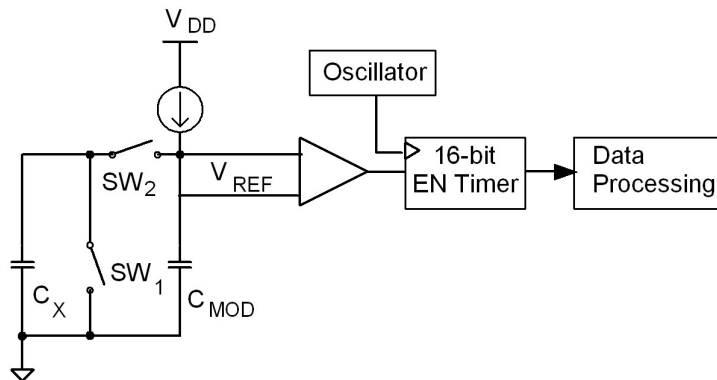
Details der kapazitiven Sensoren

Grundsätzlich bieten sich mehrere Möglichkeiten zur Implementierung kapazitiver Sensoren an, doch soll sich dieser Artikel auf die Successive-Approximation-Technik beschränken.

Das Successive-Approximation-Verfahren

Die von Cypress Semiconductor zum Patent angemeldete und mit einem PSoC-Element implementierte Successive-Approximation-Methode verwendet einen Kapazitäts-Spannungs-Wandler und einen Single-Slope-ADC. Die eigentliche Kapazitätsmessung erfolgt durch Umwandlung der Kapazität in eine Spannung, die in einem Kondensator gespeichert wird. Diese Spannung wird daraufhin mit Hilfe einer einstellbaren Stromquelle gemessen.

Bild 1.



Den Kapazitäts-Spannungs-Wandler implementiert man mit Hilfe der Schaltkondensator-Technik. Die verwendete Schaltung lädt den Sensor-Kondensator auf eine Spannung relativ zur Kapazität des Sensors. Dabei wird der Schaltkondensator vom internen Hauptoszillator des PSoC-Bausteins getaktet.

- Schritt 1

Der Sensor-Kondensator C_X wird mit einem analogen Multiplex-Bus verbunden. Sensor- und Bus-Kapazität sind parallelgeschaltet und haben damit die gleiche Kapazität. Auf den analogen Multiplex-Bus wird daraufhin ein programmierbarer Strom IDAC gegeben, der die Kondensatoren auflädt. Die Spannung an beiden Kondensatoren ist gleich, doch die von ihnen gespeicherte Ladung ist verschieden, denn es gilt:

$$q = CV$$

- Schritt 2

Wenn nun der Schalter SW_2 geöffnet und SW_1 geschlossen wird, wird die Spannung an C_X Null und die am Bus liegende Ladung reduziert sich um die in C_X gespeicherte Ladung. Die Kapazität am analogen Multiplex-Bus wird nach wie vor von IDAC geladen.

Die Schritte 1 und 2 werden wiederholt, sodass der geschaltete Kondensator C_X einen Laststrom aufnimmt, der in folgender Weise von seiner Kapazität abhängt:

$$I_X = f_{OSC} C_X V$$

- Schritt 3

Während die Schaltkondensator-Schaltung arbeitet, wird die Kalibrierung von IDAC abgeschlossen. IDAC nutzt eine binäre Suche zur Ermittlung des Wertes, bei dem die Spannung auf dem Bus (mit zugeschaltetem C_X) konstant bleibt. Dies ergibt eine Spannung, die durch den Sensor vom Bus abgeleitet und sich folgendermaßen berechnet:

$$V_X = \frac{1}{f_{OSC} C_X} I_{DAC}$$

$$V_{BUS} = V_{REF} - V_X$$

Die resultierende Busspannung hängt von der Schaltfrequenz, der Sensorkapazität und dem Strom IDAC ab. C_{BUS} fungiert als Bypass-Kondensator zur Stabilisierung der resultierenden Spannung. Zur weiteren Verbesserung der Stabilität kann eine zusätzliche Kapazität an den Bus angeschlossen werden, wobei allerdings zu beachten ist, dass externe Kondensatoren Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und das Timing haben.

- Schritt 4

Ist der IDAC-Wert für den Sensor ohne aufgelegten Finger ermittelt, wird die Sensorkapazität mit SW2 wieder mit dem Bus verbunden. IDAC lädt daraufhin den Bus und es wird die Zeit gemessen, die nötig ist, um die Kapazität von der Anfangsspannung auf die Ansprechschwelle des Komparators zu laden. Diese Zeitmessung wird mit einem 16-Bit Timer im Verbund mit dem eingebauten Hauptoszillator vorgenommen. Die neue Gleichung für die Spannung bezogen auf die Kapazität lautet:

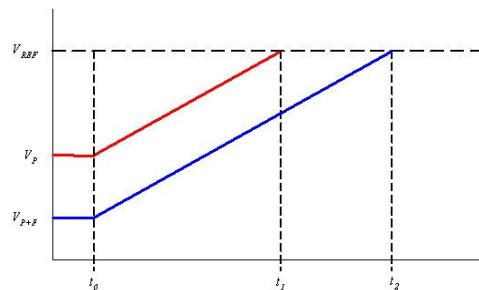
$$V_{P+F} = \frac{1}{f_{OSC}(C_P + C_F)} I_{DAC}$$

$$V_{BUS} = V_{REF} - V_{P+F}$$

Darin steht CP für die Eigenkapazität des Sensors, während es sich bei CF um die Kapazität handelt, um die sich die Kapazität des Sensors durch Annähern des Fingers erhöht.

Wird eine höhere Sensorkapazität (bei aufgelegtem Finger) an den Bus angeschlossen, fällt die Busspannung stärker ab, sodass mit der Messung bei einer niedrigeren Spannung begonnen wird. Da mit einer Konstantstromquelle gearbeitet wird, verlängert sich dadurch auch die Ladezeit bis zum Erreichen der Schwellenspannung. Der Unterschied der Zählwerte bei einem Sensor ohne Finger und einem solchen mit aufgelegtem Finger dient zur Entscheidungsfindung.

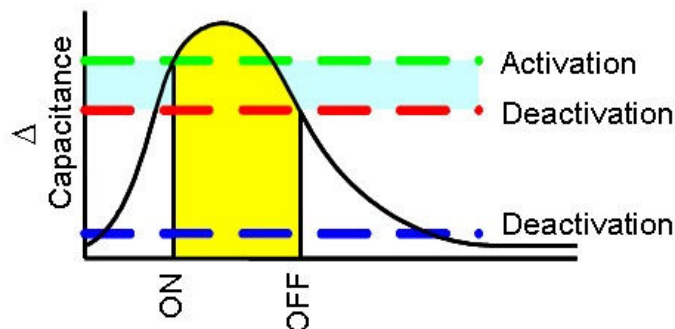
Bild 2.



Aktivierung des Sensors

Der Aktivierungsstatus eines Sensors wird mit einer Reihe von Basiswerten und verschiedenen Schwellenwerten ermittelt, um dem kapazitiven Sensor eine gewisse Intelligenz zu verleihen. Der obere und der untere Grenzwert der Aktivierungsregion können die Aktivierung mit einer Hysterese versehen. Das heißt: zum Aktivieren des Sensors muss der obere Grenzwert überschritten werden, während zum Deaktivieren ein Unterschreiten des unteren Zählwerts erforderlich ist.

Bild 3.





Cypress Semiconductor
198 Champion Court
San Jose, CA 95134-1709
Phone: 408-943-2600
Fax: 408-943-4730
<http://www.cypress.com>

© Cypress Semiconductor Corporation, 2007. The information contained herein is subject to change without notice. Cypress Semiconductor Corporation assumes no responsibility for the use of any circuitry other than circuitry embodied in a Cypress product. Nor does it convey or imply any license under patent or other rights. Cypress products are not warranted nor intended to be used for medical, life support, life saving, critical control or safety applications, unless pursuant to an express written agreement with Cypress. Furthermore, Cypress does not authorize its products for use as critical components in life-support systems where a malfunction or failure may reasonably be expected to result in significant injury to the user. The inclusion of Cypress products in life-support systems application implies that the manufacturer assumes all risk of such use and in doing so indemnifies Cypress against all charges.

PSoC Designer™, Programmable System-on-Chip™, and PSoC Express™ are trademarks and PSoC® is a registered trademark of Cypress Semiconductor Corp. All other trademarks or registered trademarks referenced herein are property of the respective corporations.

This Source Code (software and/or firmware) is owned by Cypress Semiconductor Corporation (Cypress) and is protected by and subject to worldwide patent protection (United States and foreign), United States copyright laws and international treaty provisions. Cypress hereby grants to licensee a personal, non-exclusive, non-transferable license to copy, use, modify, create derivative works of, and compile the Cypress Source Code and derivative works for the sole purpose of creating custom software and or firmware in support of licensee product to be used only in conjunction with a Cypress integrated circuit as specified in the applicable agreement. Any reproduction, modification, translation, compilation, or representation of this Source Code except as specified above is prohibited without the express written permission of Cypress.

Disclaimer: CYPRESS MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, WITH REGARD TO THIS MATERIAL, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Cypress reserves the right to make changes without further notice to the materials described herein. Cypress does not assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit described herein. Cypress does not authorize its products for use as critical components in life-support systems where a malfunction or failure may reasonably be expected to result in significant injury to the user. The inclusion of Cypress' product in a life-support systems application implies that the manufacturer assumes all risk of such use and in doing so indemnifies Cypress against all charges.

Use may be limited by and subject to the applicable Cypress software license agreement.