

## Die verschiedenen Techniken zur Herstellung kapazitiver Berührungssensoren

Von (Ryan Seguire, Senior Product Manager, Cypress Semiconductor)

Kapazitive Berührungssensoren als Eingabemedium sind mittlerweile keine exotische, nur bei ganz besonderen Produkten eingesetzte Technologie mehr, sondern eine ausgereifte Lösung, die in Millionenstückzahlen und in Tausenden von Produkten Verwendung findet. Es handelt sich hier sogar um einen zügig expandierenden Markt, auf dem sich Designhäuser, Modulhersteller und Halbleiterunternehmen gerne als Spitzenreiter etablieren möchten und eine Steigerung ihres Marktanteils anstreben. Aus dieser Situation resultiert eine intensive Entwicklungstätigkeit, die sich vornehmlich auf die Erfassungsmethoden selbst konzentriert. Dabei geht es um die Verfahren, mit denen die Kapazität erfasst und in ein digitales Signal verwandelt wird, das sich anschließend weiterverarbeiten, manipulieren und interpretieren lässt. Ladungstransfer, sukzessive Approximation, Sigma-Delta und wechselseitige Kapazitätsmessung sind die gängigsten Erfassungsverfahren, die in diesem Artikel zur Sprache kommen.

### Das Problem

Eine Kapazitätsänderung von 10 pF auf 100 pF zu messen, bereitet keine Schwierigkeiten. Nicht ganz so trivial ist das Messen einer Kapazitätsänderung von 10,0 pF auf 10,5 pF, doch wirklich ernste Herausforderungen birgt auch dies nicht. Eine echte Aufgabe stellt jedoch das Erfassen einer Kapazitätsänderung von 10,00 pF auf 10,05 pF dar, speziell wenn dies unter dem Einfluss unterschiedlicher Umgebungsbedingungen, elektromagnetischer Interferenzen auf der System-Ebene und Toleranzen in der Messschaltung selbst zu geschehen hat. Noch gravierender können die Herausforderungen sein, wenn der Stromverbrauch, die Ansprechzeit und die Benutzerfreundlichkeit als weitere Aspekte hinzukommen.

Das Element, das in kapazitiven Berührungssensor-Applikationen vermessen wird, ist ein Kondensator, der zwischen einem Sensor-Pad (einer Fläche aus leitendem Material) und einem umgebenden leitenden Material (meist einer Massefläche von bestimmter Dichte und Distanz) gebildet wird. Die Kapazität eines solchen Sensors wird mit folgender Formel berechnet:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

Darin steht A für die Gesamtfläche des kompletten Sensors einschließlich der zugehörigen Verdrahtung, und d ist die Entfernung zwischen Sensor/Verdrahtung und den umgebenden Leitern. Nähert sich ein leitendes Objekt (beispielsweise ein Finger) dem Sensor, so beeinflusst dies die elektrischen Feldlinien des kapazitiven Sensors und damit die Kapazität, die von der angeschlossenen Auswerteschaltung gemessen wird.

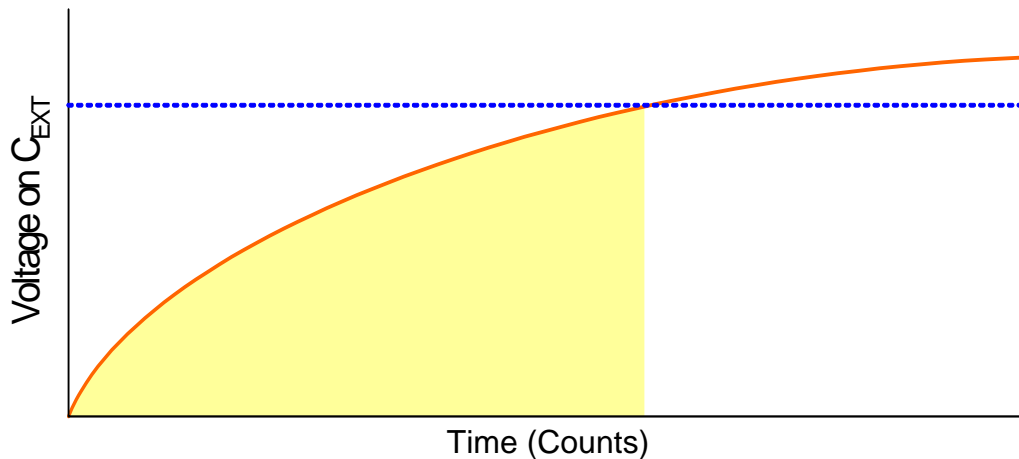
### Ladungstransfer

Eine bestimmte Kategorie kapazitiver Sensoren arbeitet nach dem Prinzip des Ladungstransfers. Dieses beruht auf der Verstärkung und Filterung von Ladung und misst die Summe sämtlicher Ladungsbeiträge in der Umgebung eines bestimmten Sensors. Die dabei generierte Wellenform wird mit einer Kombination aus verschiedenen Timing- und Filterfunktionen in einen repräsentativen Kapazitätswert verwandelt.

Der Begriff Ladungstransfer wird allerdings nicht ausschließlich im Zusammenhang mit kapazitiven Sensoren verwendet, sondern bezieht sich ganz allgemein auf das Transferieren von Ladung von einem Ort zum anderen mittels einer Reihe von Schaltern. In MEMS-Bausteinen etwa bedient man sich der gleichen Technik zum Messen physikalischer Größen. In kapazitiven Sensoren nutzt die Ladungstransfer-Technik ein Schaltkondensator-Netzwerk zum Ansammeln von Ladung in einem Integrations-Kondensator. Die Spannung an diesem Kondensator wird anschließend entweder mit einer Referenzspannung verglichen oder mit Hilfe eines A/D-Wandlers ausgelesen.

In der ersten von zwei einander nicht überlappenden Phasen wird ein Sensor-Kondensator mit einer Spannungsquelle verbunden, wobei Ladung in diesem Sensor-Kondensator angesammelt wird. In der zweiten Phase wird die in dem Sensor-Kondensator gespeicherte Ladung in den größeren Integrations-Kondensator übertragen. Dieser Prozess wird mehrmals wiederholt, was die Spannung am Integrations-Kondensator immer weiter ansteigen lässt. Die Ladungsmenge, die in der jeweils zweiten Phase an den Integration-Kondensator übertragen wird, nimmt von Mal zu Mal exponentiell ab. Die Sensorschaltung ist einfach aufgebaut und dient schlicht dazu, die Spannung am Integrations-Kondensator mit einer festgelegten Referenzspannung zu vergleichen.

**Bild. 1 Ladungs-Integration mit konstanter Schaltkondensator-Spannung**



Es wird gezählt, wie viele Ladungstransferzyklen vergehen, bis die Referenzspannung erreicht ist. Die Höhe dieses Zählwerts ist umgekehrt proportional zur Größe des Sensor-Kondensators, denn ein größerer Sensor-Kondensator lädt die Integrations-Schaltung schneller und benötigt daher weniger Schaltvorgänge, bis die Schwellenspannung erreicht ist.

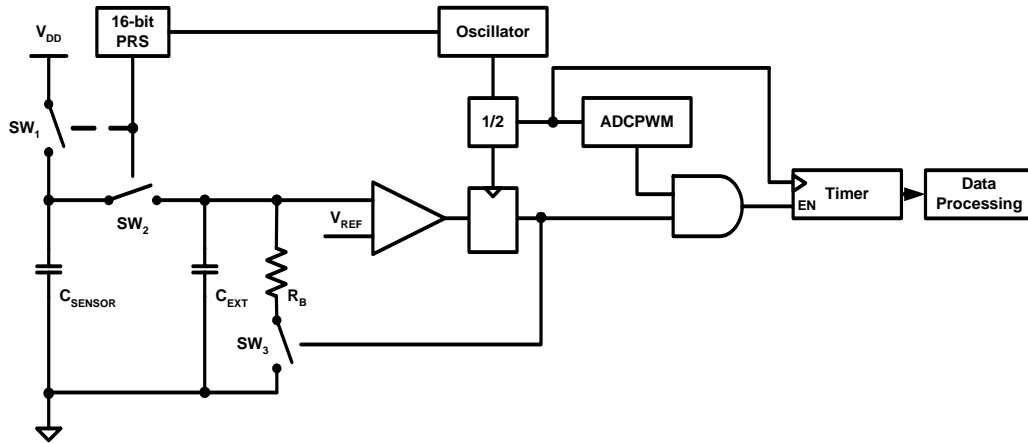
Als Alternative kann der Komparator durch einen A/D-Wandler ersetzt werden. In dieser Ausführung wird mit einer vorgegebenen Anzahl von Zyklen Ladung aus dem Sensor-Kondensator in den Integrations-Kondensator transferiert. Ist die vorgesehene Zykluszahl durchlaufen, wird die Spannung am Integrations-Kondensator gemessen. Hierzu wird ein A/D-Wandler verwendet, dessen Ausgangswert proportional zur Größe des Sensor-Kondensators ist.

Diese Erfassungsmethode ist einigermaßen betriebssicher und erreicht einen vergleichsweise hohen Signal-Rauschabstand. Allerdings ist die Implementierung der Ladungstransfer-Technik in existierenden kapazitiven Sensor-ICs nicht frei von Nachteilen, denn die meisten kapazitiven Sensor-Bausteine auf dem heutigen Markt verfügen über keine Multiplexing-Schaltungen. Ohne solche Schaltungen aber werden mehr Pins, Widerstände und Kondensatoren zum Erfassen sowie zum Abstimmen der Empfindlichkeit eines jeden Sensorelements benötigt. Die Referenzspannung muss außerdem mit externen Bauelementen (Widerständen) erzeugt werden. Nicht zuletzt benötigen existierende Ladungstransfer-Bausteine hochwertige spezialisierte Spannungsregler, um die Verfügbarkeit einer störungsfreien Versorgungsspannung für einen gegen Störeinflüsse gesicherten, fehlerfreien Schaltkondensator-Betrieb zu gewährleisten.

### ***Sigma-Delta-Modulation***

Auch bei der Sigma-Delta-Modulation kommt ein Schaltkondensator-Netzwerk zum Einsatz, das hier zum Laden eines großen ‚Bus-Modification‘-Kondensators dient. Allerdings wird in dieser Topologie der externe Kondensator nicht von einer Anfangsspannung auf eine Referenzspannung aufgeladen, sondern die am externen Kondensator liegende Spannung wird durch Lade- und Entladeschritte um die Referenz herum moduliert. Die Dauer dieser Schritte wird untereinander verglichen, indem die von einem Komparator ausgegebene Bitstream-Dichte ausgewertet wird. Bei genügend hoher Dichte wird der Sensor als ‚eingeschaltet‘ betrachtet.

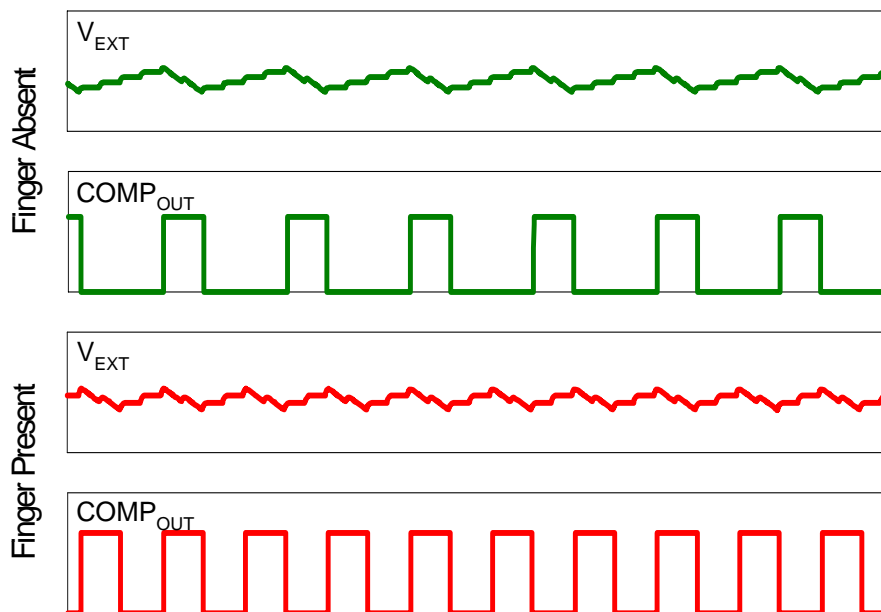
Bild. 2 Blockschaltbild CSD



Der Sensor-Kondensator dient als Schaltkondensator-Widerstand entsprechend dem analogen Eingang, der häufig über interne Schaltungen mit einem großen externen Kondensator verbunden wird. Je mehr die Ladung im externen Kondensator zunimmt, umso mehr steigt auch die Spannung an diesem Kondensator. Sobald der Eingang des Komparators die Schwellenspannung erreicht, wird eine Entladeschaltung (ein mit Masse verbundener Widerstand) angeschlossen, über den Ladung vom externen Kondensator abfließt. Dies geschieht mit einer Rate, die von der Anfangsspannung des Kondensators und dem Wert des Ableitwiderstands abhängt. Die Spannung am externen Kondensator geht zurück und unterschreitet schließlich die Schwellenspannung, worauf die Verbindung zum Ableitwiderstand wieder unterbrochen wird. Daraufhin nimmt die Spannung am externen Kondensator wieder zu und der gesamte Zyklus beginnt von vorn.

Der Lade/Entlade-Zyklus des externen Kondensators manifestiert sich als Bitstream am Komparatorausgang, Dieser Bitstream wird mit einem Pulsweiten-Modulator in einer AND-Funktion verknüpft und gibt einen Timer frei, dessen Ausgang benutzt wird, um das Maß der Kapazitätsänderung zu bestimmen und die Aktivierung des Sensors festzustellen.

Bild. 3 Ein- und Ausgangs-Wellenformen des Komparators



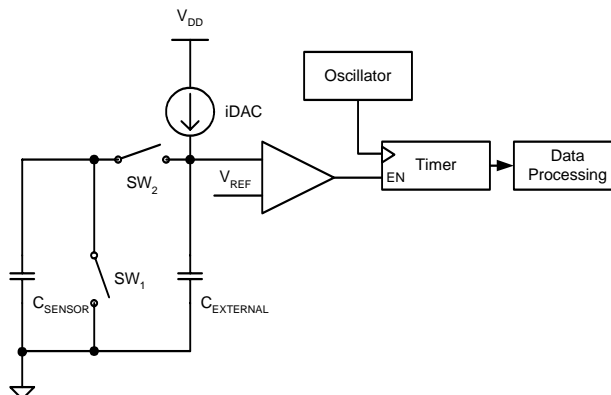
Einen zusätzlichen Vorteil dieses Beispiels einer Sigma-Delta-Modulation stellt die pseudo-zufällige Steuerung des Schaltkondensator-Netzwerks dar. Anstatt eines Takts von konstanter Frequenz kann ein PRS-Generator (Pseudo-Random Sequence) zum Takten des Schaltkondensator-Netzwerks verwendet werden. Dies vermindert sowohl die Empfindlichkeit kapazitiver Sensorschaltungen gegenüber elektromagnetischen Störungen als auch die Abstrahlung solcher Störungen durch diese Schaltungen. Dies ist besonders im Automobil- und Hausgerätebereich sowie in industriellen Anwendungen von Vorteil. Allerdings wird durch die PRS-Technik mehr Zeit zum Abtasten der einzelnen Sensoren benötigt, was den Nutzen dieses Verfahrens in schnellen Applikationen einschränkt.

Die Größe des externen Bus-Modifikations-Kondensators lässt sich so abstimmen, dass sich die Störimmunität der Messschaltung verbessert. Gelegentlich wird sogar nicht einmal ein externer Kondensator benötigt, doch kann es bei niedriger Bus-Kapazität und hoher Eingangs-Impedanz geschehen, dass ein normaler Betrieb der Schaltung durch elektromagnetische Störungen vereitelt wird. Zwar können höhere Kapazitätswerte die Störfestigkeit verbessern, doch kann hierdurch die Empfindlichkeit eingeschränkt oder die Abtastzeit auf so stark erhöht werden, dass ein übermäßig großer externer Kondensator benötigt wird. Cypress geht in seinen Applikationsschriften sowie den Beschreibungen zu seinen Code-Beispielen auf die Richtlinien zur Bestimmung der Kapazitäten der externen Kondensatoren ein.

### Sukzessive Approximation mit Single-Slope-A/D-Wandler

Kapazitive Sensoren mit sukzessiver Approximation und einem Single-Slope-A/D-Wandler bedienen sich eines ähnlichen Schaltkondensator-Netzwerks wie die beiden zuvor beschriebenen Verfahren. Ein Strom-D/A-Wandler (iDAC) wird an den Bus angeschlossen, an dem auch der externe Kondensator und das Schaltkondensator-Netzwerk liegen, um den externen Kondensator und den Komparatoreingang bis zum Erreichen einer Schwellenspannung aufzuladen. Die Zeit, die zum Aufladen des externen Kondensators auf diese Schwellenspannung erforderlich ist, wird gemessen und mit einem gespeicherten Wert verglichen, um den Aktivierungsstatus und die Stärke der Aktivierung zu ermitteln.

**Bild. 4 Blockschaltbild CSA**

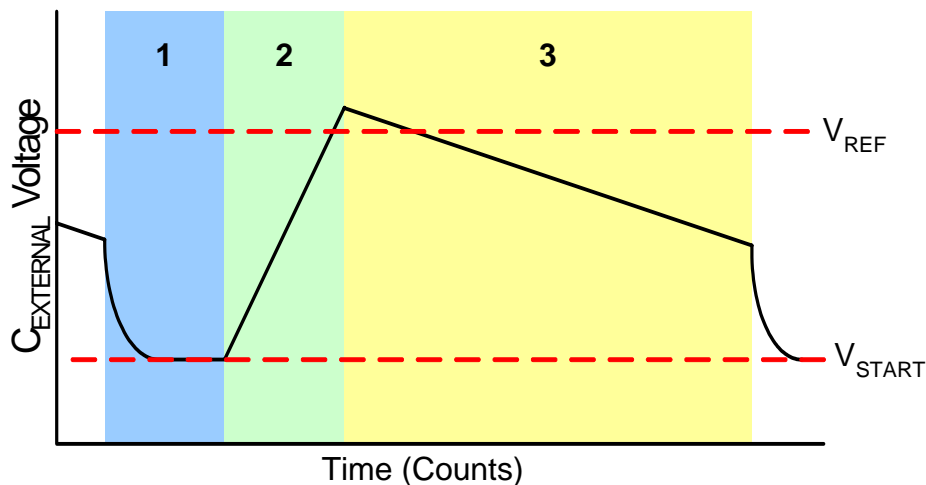


Nach dem Verfahren der sukzessiven Approximation wird der korrekte iDAC-Wert festgestellt, der zum Aufrechterhalten einer Spannung am externen Kondensator erforderlich ist, während der Ersatzwiderstand des Schaltkondensator-Netzwerks den externen Kondensator an die Masse entlädt. Dieser Wert wird abgespeichert und als Ladestrom für den Single-Slope-ADC benutzt. Die Schaltkondensator-Schaltung läuft, während der iDAC den Bus auflädt (Phase 1). Hieraus resultiert eine Startspannung für den ADC, deren Höhe von der Größe des Sensor-Kondensators abhängt.

$$V_{start} = \frac{1}{f \cdot C_X} \cdot iDAC$$

Die Schaltkondensator-Schaltung wird daraufhin vom Bus abgetrennt, und der externe Kondensator wird von  $V_{start}$  geladen (Phase 2). Niedrigere Startspannungen ergeben längere Ladezeiten, da aus dem iDAC derselbe Strom in den externen Kondensator fließt und die Spannung folglich mit derselben Rate ansteigt.

**Bild. 5 Verlauf des Ladevorgangs**



Die Spannung am externen Kondensator wird dann über einen mit dem Kondensatornetzwerk in Reihe geschalteten Tiefpassfilter abgesenkt und dem Eingang des Komparators zugeführt. Diese Zeit wird von der Steuerschaltung genutzt, um die Daten zu verarbeiten und auf Basis der kapazitiven Eingänge Entscheidungen zu fällen. Die Änderung des Zählwerts von einer einzelnen Abtastung auf einen gespeicherten Wert wird in Phase 3 berechnet. Bei einer hinreichend großen Änderung wird eine Aktivierung des Sensors angenommen.

Die Erfassung per sukzessiver Approximation, wie sie mit verfügbaren Schaltungen realisiert wird, verursacht den geringsten Bauteileaufwand. In den meisten Fällen wird nur ein einziger Kondensator benötigt, und selbst dieser kann abhängig von den jeweiligen Anforderungen unter Umständen entfallen. Möglicherweise reicht die Kapazität des internen Busses, an den der Komparator, der iDAC und der Sensor-Kondensator angeschlossen sind, um die gewünschte Störimmunität zu erreichen. Hinzu kommt, dass die sukzessive Approximation nicht durch Schwankungen der Versorgungsspannung beeinflusst wird, da sich das Schaltkondensator-Netzwerk wie ein mit Masse verbundener Widerstand darstellt und der iDAC aus internen Quellen und nicht direkt aus  $V_{DD}$  gespeist wird. Was die Funktionen außerhalb des Auslesens kapazitiver Sensoren betrifft, sind Bausteine nach dem Successive-Approximation-Verfahren eher eingeschränkt. Sie sind nur für diese eine Aufgabe optimiert, können aber elementare digitale Funktionen wie etwa die LED-Ansteuerung übernehmen. Mit der Zeit wird dieses Erfassungsverfahren jedoch in universelleren Bausteinen und solchen mit mehr Programmspeicher, analogen und digitalen Funktionen sowie mehr I/O-Leitungen verfügbar werden.

### **Kompensation**

Ein unverzichtbares Element aller kapazitiven Sensor-Implementierungen ist es, Schwankungen auf der System-Ebene sowie Störungen durch Temperatur, Feuchtigkeit, elektrostatische Entladungen und andere Einflüsse zu berücksichtigen. Fremdeinflüsse wie etwa Temperaturänderungen oder Feuchtigkeit haben graduelle Auswirkungen auf das System und müssen registriert werden. Nur so ist gewährleistet, dass temperaturbedingte Veränderungen in der Steuerungsschaltung ebenso ins Kalkül gezogen werden wie Änderungen der Systemkapazität. Die Wärmeausdehnung von Stoffen führt in der eingangs angeführten Gleichung dazu, dass sich sowohl  $A$  als auch  $d$  erhöhen. Darüber hinaus sind die Dielektrizitätskonstanten des Substrats und des Überzugmaterials des Sensors temperaturabhängig. Wie erwähnt, erfolgen diese Änderungen jedoch nicht sprunghaft, sondern schleichend, denn nicht selten kann es Minuten dauern, bis sich die Systemtemperatur auch nur um ein Grad ändert. Dies aber bedeutet, dass in dieser Zeit unabhängig von der jeweils verwendeten Methode Tausende von Abtastungen ausgeführt werden. Für die Steuerungsschaltung bietet sich hierdurch die Möglichkeit, auf diese Änderungen so zu reagieren, dass sich für den Anwender oder den Host-Controller kein wahrnehmbarer Unterschied ergibt.

Anders ist es mit Ereignissen wie etwa elektrostatischen Entladungen, die einen wenn auch kurzen, so doch dramatischen Einfluss auf ein kapazitives Berührungssensor-System haben. Bei korrekt konstruierter Hardware verschwinden derartige Einflüsse jedoch nach nur wenigen Scans und können somit durch Algorithmen, die die spezielle, unverwechselbare Signatur eines ESD-Ereignisses erkennen, problemlos ausgefiltert werden.



Bausteine wie die Programmable System-on-a-Chip (PSoC<sup>®</sup>) Produkte von Cypress geben dem Designer die Kontrolle über die Mehrzahl der Parameter der Kompensation, damit das richtige Gleichgewicht gefunden werden kann zwischen der Fähigkeit des Systems, auf geänderte Umgebungsbedingungen zu reagieren und der für das jeweilige Gerät geforderten Benutzerfreundlichkeit.

Die Technik der kapazitiven Berührungssensoren entwickelt sich weiter, und die hier beschriebenen Abtastmethoden können nicht das letzte Wort sein. Vielmehr werden fortlaufend neue Ideen ausprobiert, denn die Designer streben nach weniger Stromverbrauch, höherer Empfindlichkeit und kürzeren Abtastzeiten und müssen sich mit immer widrigeren Einsatzumgebungen auseinandersetzen.

### ***Biografie des Autors***

Ryan Seguine arbeitet als Senior Product Manager bei Cypress Semiconductor in Lynnwood, Washington/USA. Im Juni 2004 absolvierte er ein Studium an der University of Washington, und war in den vergangenen vier Jahren mit der Definition von Bausteinen und Technologien für kapazitive Sensor-Applikationen befasst. Er reichte auf diesem Sektor fünf Patente ein und arbeitet weiter an neuen Technologien und Implementierungen, während er auch Design-Vorhaben und Kundenprojekte in diesem Segment unterstützt.

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.