

### 2.2.5 Oberflächen-kapazitive Touchscreens

Oberflächen-kapazitive Touchscreens bestehen aus einer isolierenden Oberfläche, wie Glas, die mit einem Leiter beschichtet ist. Als Leiter kann ein Metalloxid, wie Indiumzinnoxid (ITO), verwendet werden. Die Schicht wird so dünn aufgetragen, dass sie lichtdurchlässig ist. An die leitende Schicht wird eine Wechselspannung angelegt, so dass ein elektrisches Feld entsteht. Berührt ein Finger die isolierende Seite der Oberfläche, so bildet die leitende Schicht mit dem Finger am Berührungspunkt einen Kondensator. Wird diese Kapazitätsänderung während des Entladezyklus über die vier Ecken des Touchscreens mit einem Mikrocontroller ausgewertet, kann auf die Position des Fingers geschlossen werden. (Bhalla & Bhalla, 2010, S. 13)

Eine mögliche Art der Auswertung wird beispielhaft in Kapitel 4.4.3 erläutert. Diese Variante der Touchscreens wird in vielen Bereichen von projiziert-kapazitiven Touchscreens abgelöst, da mit Oberflächen-kapazitiven Touchscreens nur ein Berührungspunkt erkannt werden kann und sie für Störungen durch parasitärere Kapazitäten mit der Umgebung anfällig ist (Hal, 2008).

### 2.2.6 Projiziert-kapazitive Touchscreens

Moderne Touchscreens, wie sie zum Beispiel in Smartphones, Tabletcomputern und Fahrkartenautomaten vorkommen, basieren auf dem Prinzip der projiziert-kapazitiven Touchscreens. Hierbei wird ein Gitter aus Leiterbahnen gebildet, wobei in der Regel zwei im 90° Winkel zueinander ausgerichtete Schichten, auf denen parallele Leiterbahnen aus Indiumzinnoxid geätzt

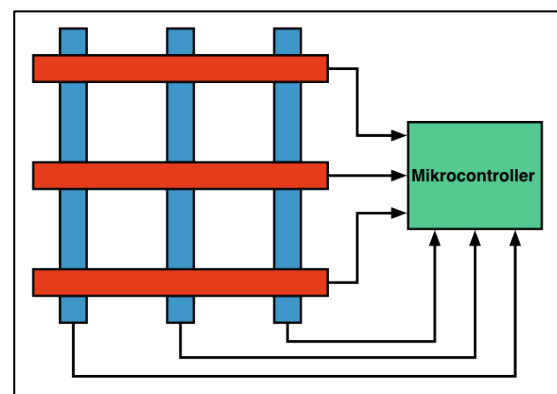


Abbildung 13: Aufbau projiziert-kapazitiver Touchscreens

sind, übereinander liegen (Abb. 13). Die Elektroden auf den Schichten sind durch einen Isolator voneinander getrennt. Kapazitätsänderungen an den Kreuzungspunkten der Leiterbahnen werden mit einer Messelektronik ausgewertet. Kommt ein Finger in die Nähe eines oder mehrerer Kreuzungspunkten ändert sich dort die Kapazität und es wird eine Berührung erkannt. (Bhalla & Bhalla, 2010, S. 14)

Die Idee auf diese Art und Weise Touchscreens zu fertigen ist nicht neu und wurde bereits in den 70er Jahren in Kontrollpulten des Cern SPS Teilchenbeschleuniger angewendet (Stumpe, 1977, S. 1f). Eine zunehmende Popularität und Verbreitung in Touchscreens bis zu einer Bildschirmgröße von 10 Zoll erfährt die Technik nach der Markteinführung des iPhones der Apple Computer Inc. (Barrett & Omote, 2010 S. 16). Diesem Unternehmen wurde das Patent für diese Touchscreen-Technologie zugesprochen (Apple Computer Inc., 2005).

Die oben erwähnte Kapazitätsänderung kann auf verschiedene Arten realisiert und ausgewertet werden. Zwei wichtige Ausführungen sollen im Folgenden vorgestellt werden. Bei der ersten Methode wird die sogenannte Eigenkapazität der Elektroden bestimmt. Die Elektroden bilden dabei, analog zu kapazitiven Schaltern, Kondensatoren mit ihrer Umgebung. Diese Kapazitäten werden der Reihe nach für jede Elektrode bestimmt. Nähert sich ein Finger dem Touchscreen, so erhöht die Kapazität des menschlichen Körpers die Kapazität der umliegenden Elektroden (Fischetti, 2001, S. 109/ Beck, F. & Stumpe, 1973, S. 3/ Stumpe, 1977, S. 1). Die Kapazitätsänderung der Elektroden der Reihen und Spalten bilden die X- und Y-Koordinaten des Berührungspunktes. Da der Finger im Verhältnis zu den Abmessungen des Gitters wesentlich größer ist, schirmen die Elektroden der oberen Schicht die unten liegenden Schicht nur teilweise gegen den Finger ab, sodass dort dennoch eine Kapazitätsänderung festgestellt werden kann (Stumpe, 1977, S. 3).

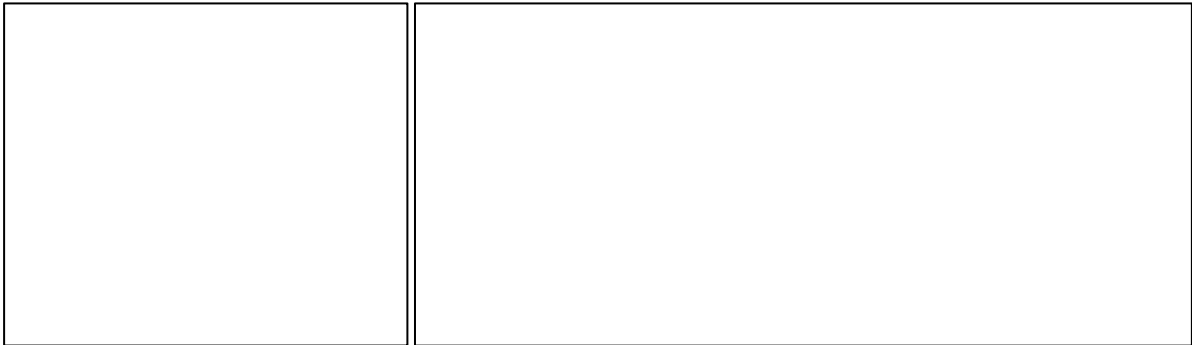
Ein Problem dieser Methode ist, dass die gleichzeitige Berührung diagonal gelegener Kreuzungspunkte nicht eindeutig zugeordnet werden können und als vier Berührungspunkte erfasst werden (Barrett & Omote, 2010 S. 16f).

In der zweiten Methode formen die Elektroden der oberen Schicht mit den Elektroden der unteren Schicht an jedem Kreuzungspunkt einen Kondensator. Es wird die gegenseitige Kapazität der Elektroden gemessen. Die oben liegenden Elektroden werden dabei als Drivelines und die unten liegenden Elektroden als Senselines bezeichnet. Soll die Änderung der gegenseitigen Kapazität an einem Kreuzungspunkt bestimmt werden, ist die jeweilige Driveline mit einer Spannungsquelle verbunden, ansonsten liegt sie auf dem Potential der Masse. Die beteiligte Senseline liegt ebenfalls auf dem Potential der Masse. Auf Grund der gegenseitigen Kapazität der Driveline und der Senseline am jeweiligen Kreuzungspunkt, findet ein Ladungstransport in beiden Leiterbahnen statt. An der Senseline wird die Menge der Ladungen, die bei dem Ladungstransport fließen, gemessen. (Apple Computer Inc., 2005, S. 7f)

Berührt ein Finger einen Knotenpunkt, sinkt dort die gegenseitige Kapazität der Leiterbahnen aufgrund des abschirmenden Einflusses des menschlichen Körpers (Baxter, 1996, S. 139). An der Senseline wird damit ein geringerer Ladungstransport festgestellt und als Berührung registriert. Mit dieser Methode können theoretisch beliebig viele gleichzeitige Berührungspunkte erkannt werden. In der Praxis werden bis zu 15 gleichzeitige Berührungspunkte realisiert (Apple Computer Inc., 2005, S. 6). Gegenüber den in Kapitel 2.2.4 vorgestellten Touchscreens, womit ebenfalls mehrere gleichzeitige Berührungen registrieren werden können, bietet diese Methode den Vorteil, dass weniger Anschlüsse benötigt werden. Bei einer Auflösung von  $N$  möglichen Berührungspunkten sind nur  $\sqrt{N}$  Leiterbahnen und damit  $\sqrt{N}$  Anschlüsse erforderlich. Weitere Vorteile dieser Methode sind eine höhere Genauigkeit, eine geringere Anfälligkeit für Störquellen und eine hohe Lichtdurchlässigkeit (Barrett & Omote, 2010, S. 16f).

### 2.3 Mikrocontroller und ihre Anwendung im Physikunterricht

Mikrocontroller sind funktionsfähige Mikrorechner, bei denen alle benötigten Bauelemente auf einem Chip integriert sind. Ein Mikrocontroller enthält neben dem Prozessorkern auch Schreiblesespeicher (RAM), Festwertspeicher (ROM, EEPROM), Zähler, Zeitgeber, digitale sowie analoge Ein- und Ausgabegeräte, Erweiterungsschnittstellen und Unterbrechungssteuerungen (Brinkschulte & Ungerer, 2010, S. 73ff). Aus der Vielzahl an auf dem Markt befindlichen Mikrocontrollern kann dieser auf das spezifische Einsatzgebiet hin ausgewählt werden und so die Zahl der externen Bauteile gering gehalten werden. Darüber hinaus zeichnen sich Mikrocontroller durch einen geringen Energieverbrauch, niedrigen Platzbedarf und günstige Herstellungskosten aus. Diese Eigenschaften führen dazu, dass in elektronischen Geräten zunehmend analoge Schaltungen durch Mikrocontroller ersetzt werden (Wüst, 2003, S. 190). Die folgende Auflistung einiger Einsatzbeispiele verdeutlicht, dass Mikrocontroller, auch wenn sie oft unbemerkt bleiben, allgegenwärtig sind.



#### 4.4.3 Oberflächen-kapazitive Touchscreens

Der Aufbau des Modells entspricht im Wesentlichen der Darstellung aus Kapitel 2.2.5. Anstelle von Glas, das mit einem Metalloxid beschichtet wird, soll ein quadratisches Blatt Papier mit Graphit beschichtet und anschließend mit einer Tageslichtprojektorfolie gegen den Finger isoliert werden. Um die Graphitschicht auf das Papier zu bringen eignet sich ein Graphitstift der Stärke B6. Mit einem Messer kann Graphit vom Stift abgekratzt werden und mit einem Finger auf dem Blatt verrieben werden. Bei der Herstellung ist zu beachten, dass die Schicht möglichst gleichmäßig aufgetragen wird. Dazu kann der ohmsche Widerstand der Schicht mit einem Widerstandsmessgerät vermessen werden. Der Widerstand sollte sich proportional mit dem Abstand der Messelektroden verändern. Die Schicht sollte nicht zu dick aufgetragen werden, damit der Widerstand groß genug bleibt. In der Praxis haben sich für den Widerstand der Schicht zwischen zwei diagonal gegenüberliegenden Ecken Werte um  $70\text{k}\Omega$  als günstig erwiesen. Die Kontaktfläche und damit die Fläche des Kondensators,

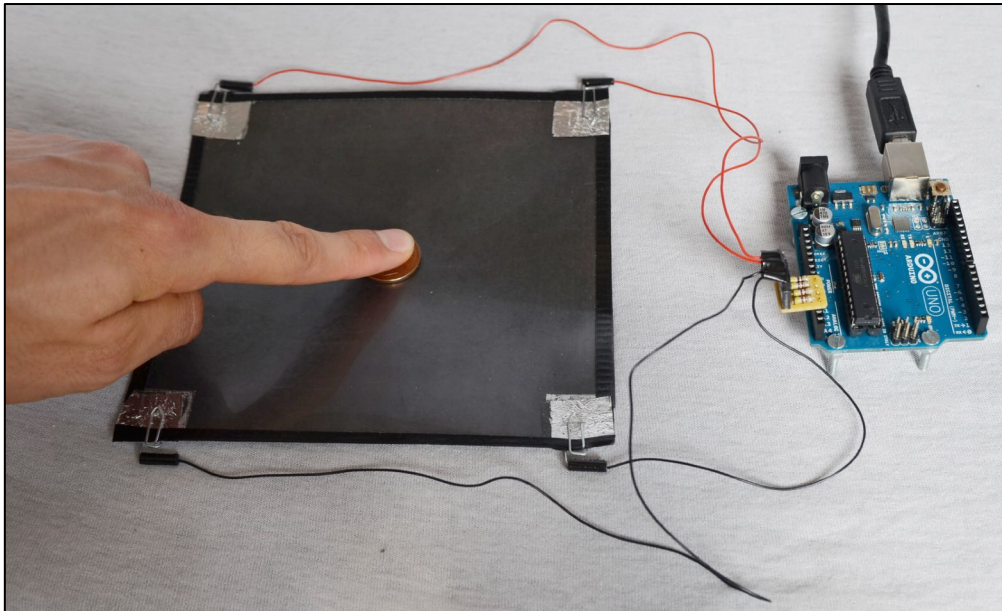


Abbildung 48: Modell eines Oberflächen-kapazitiven Touchscreens

die der Finger bei einer Berührung mit der Folie bildet, kann mit dem Anpressdruck variieren (Abb. 45). Um diesen Störeffekt zu minimieren, wird zwischen Folie und Finger ein 5-Cent-Münze gelegt (Abb. 48). Die Kapazität die so gebildet wird, kann dadurch als konstant angenommen werden. Über Kabel von den vier Ecken des Graphitpapiers ausgehend, werden vier analoge Ein- und Ausgänge des Mikrocontrollers mit dem Aufbau verbunden. Bei einer Berührung bildet der Kondensator aus Finger und Graphitpapier mit dem Widerstand, der durch den Teil des Graphitpapiers zwischen dem Berührungspunkt und einer der Ecken des Papiers besteht, ein RC-Glied (Abb. 49 links und rechts). Der Kondensator kann mit dem Mikrocontroller über eine der vier Ecken geladen werden. Dazu schaltet der Mikrocontroller, den jeweiligen IO-Port als Ausgang und als Pluspol der Stromversorgung. Die IO-Ports der unbeteiligten Ecken werden als Eingänge hochohmig geschaltet. Der Kondensator wird über eine Ecke für  $4\mu\text{s}$  geladen. Die Spannung, die sich nach dem Ladevorgang zwischen den Kondensatorplatten befindet hängt nur von der Kapazität, die konstant ist, und dem Widerstand ab (Gl. ( 8 )). Vergrößert sich der Abstand  $d_i$  des Fingers zu einer Ecke  $i$ , steigt auch der Widerstand  $R_i$ . Dieser Zusammenhang ist in der Theorie linear (Meschede, 2010, S. 342). Dies ist in dem vorliegenden Modell nur annähernd der Fall, da das Graphit von Hand nicht gleichmäßig genug aufgetragen werden kann. Die Erhöhung des Widerstandes  $R_i$  bewirkt eine Verminderung der Spannung  $U_i$  an der Ecke  $i$  (Gl. ( 8 )). Der Abstand  $d_i$  des Fingers zu einer Ecke steht damit in einer Beziehung mit der

dort gemessenen Spannung  $U_i$ . Eine Linearisierung dieser Beziehung ergibt für das vorliegende Modell wenig Sinn, da der Zusammenhang zwischen  $R_i$  und  $d_i$  in der Praxis von der theoretischen Linearität abweicht. Über einen analogRead-Befehl kann die Spannung gemessen werden, indem der Mikrocontroller den Ausgang, über den der Kondensator geladen wurde, vor der Messung als Eingang, ohne Pullup-Widerstand, schaltet. Während des Umschaltvorgangs können Ladungen über die unbeteiligten Eingänge an den übrigen Ecken abfließen, was als Fehlerquelle berücksichtigt werden muss. Die Spannungsmessung erfolgt über einen Spannungsteiler, bestehend aus dem Widerstand der leitenden Schicht und einem hochohmigen Widerstand, der den analogen Eingang gegen die Masse schaltet (Abb. 49 rechts). Nach der Spannungsteilerregel ( 11 ) gilt

$$U_G = U_C \left( \frac{R_G}{R_i + R_G} \right) = U_C \left( \frac{1}{\frac{R_i}{R_G} + 1} \right) \xrightarrow{R_G \gg R_i} U_C$$

und die dort gemessene Spannung  $U_G$  entspricht ungefähr der Spannung am Kondensator  $U_C$ . Theoretisch sollten sich mit den hier angegebenen Werten für die Kapazität von 25pF und einem Widerstand von maximal 70k $\Omega$  Spannungsdifferenzen von bis zu 0,5V ergeben (Gl. ( 8 )). In der Praxis konnten Spannungsdifferenzen von maximal 0,4V gemessen werden. Die Abweichungen lassen sich mit den oben beschriebenen Fehlerquellen erklären, nach welchen während des Umschaltvorgangs des messenden IO-Ports Ladungen über die unbeteiligten hochohmigen IO-Ports abfließen können und der Widerstand der Graphitfläche nicht überall proportional zum Abstand des Fingers von einer Ecke ist. Die hier gemessenen Spannungsdifferenzen eignen sich dennoch um die Position des Fingers abzuschätzen. An die Visualisierung aus Abschnitt 3.7 sollen die Spannungen  $U_i$  gesendet werden. Ein einfacher Tiefpass-Filter lässt sich realisieren, indem für jede Ecke die Messfunktion mehrmals (hier viermal) durchlaufen wird und die Ergebnisse aufsummiert werden. Der Quellcode des hier beschriebenen Programms ist im Anhang unter Punkt 8 zu finden.

In einem Schülerversuch, kann zunächst das Messprogramm nachvollzogen werden und in eigenen Worten wiedergegeben werden. Dann sollten die RC-Glieder im Aufbau identifiziert werden. Im Messprogramm können die Ladezeiten variiert werden. Zu große Ladezeiten führen dazu, dass der Kondensator unabhängig von der Position des Fingers und damit des Widerstandes, immer vollständig geladen wird. In diesem Fall ist kein Unterschied in den

Spannungen messbar, dies kann als eine Bestätigung des theoretischen Modells des RC-Gliedes gewertet werden. Mit der Visualisierungssoftware soll der Zusammenhang zwischen der gemessenen Spannung und dem Abstand des Fingers zu einer Ecke deutlich werden. Die Darstellung der Spannung durch Radien der Kreise soll die Positionsbestimmung des Fingers durch Triangulation motivieren, ohne explizit die Kreisgleichungen zu lösen. Aufgrund des Arbeitsaufwands scheint es nicht sinnvoll zu sein die Graphitoberfläche von SuS in der Unterrichtszeit herstellen zu lassen.

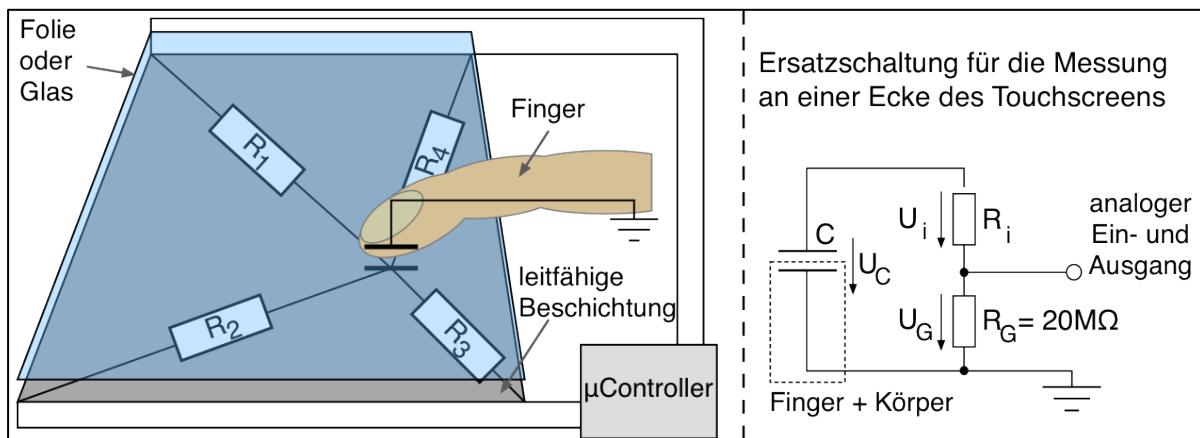


Abbildung 49: Aufbau des Modells eines Oberflächen-kapazitiven Touchscreens (links) und das zugehörige Schaltbild einer Ecke (rechts)

#### 4.4.4 Projiziert-kapazitive Touchscreens

Für das Modell eines projiziert-kapazitiven Touchscreens soll sich an dem in Kapitel 2.2.6 vorgestellten Aufbau orientiert werden, bei welchem Leiterbahnen als Gitter angeordnet und über ein Dielektrikum getrennt sind (Abb. 13 und 50). Das hier vorgestellte Modell besteht aus drei senkrecht und drei waagrecht angeordneten Leiterbahnen aus Aluminiumfolie. Die

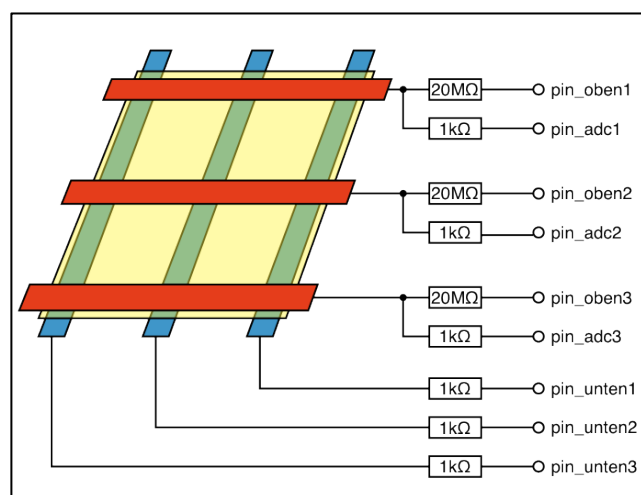


Abbildung 50: Schema des Modells eines projiziert-kapazitiven Touchscreens

Aluminium-streifen sind 1,5cm breit und 22cm lang. Sie werden von zwei Seiten auf eine

Tageslichtprojektorfolie geklebt. An überstehenden Enden kann der Mikrocontroller angeschlossen werden. Zwei weitere Folien isolieren die Streifen gegenüber Kontakten mit den Fingern. Die waagrecht verlaufenden Leiterbahnen liegen oberhalb der mittleren Tageslichtprojektorfolie und die horizontal verlaufenden Leiterbahnen liegen unterhalb dieser Folie. Bei einer Berührung sollte der Finger so auf einen Kreuzungspunkt gelegt werden, dass er sowohl die obere als auch die untere Leiterbahn teilweise überdeckt. Es hat sich in der Praxis als sinnvoll herausgestellt, einen Kreuzungspunkt mit zwei nebeneinander liegenden Fingern zu berühren (Abb. 51).

Mit den in Kapitel 3.1 bis 3.4 vorgestellten Methoden zur Kapazitätsmessung kann die gegenseitige Kapazität der Leiterbahnen nicht bestimmt werden. Stattdessen wird die Berührung durch den Finger anhand der Änderung der Eigenkapazitäten der Leiterbahnen registriert. Dazu werden Ladezeiten in RC-Gliedern gemessen (Abb. 50). Der Ablauf und die Funktionsweise des Messverfahrens soll im Folgenden für ein Paar aus oberer Leiterbahn und unterer Leiterbahn am Kreuzungspunkt  $i$  skizziert werden. Die obere Leiterbahn ist über einen  $20\text{M}\Omega$ -Widerstand mit dem IO-Port `pin_oben` und die untere Leiterbahn mit dem IO-Port `pin_unten` verbunden. Beide IO-Ports sind niederohmig und zunächst auf LOW geschaltet. Der IO-Port `pin_adc` ist mit der oberen Leiterbahn verbunden und dient der Spannungsmessung (Abb. 50). Vor der Messschleife werden beide Leiterbahnen auf das Massepotential gelegt und so lange entladen, bis an `pin_adc` eine Spannung von annähernd 0V gemessen wird. In einer Messschleife, an deren Ende die Messwerte gemittelt werden, wird

zuerst `pin_unten` auf HIGH geschaltet und die untere Leiterbahn für 7ms geladen. Befindet sich der Finger in der Nähe der Leiterbahn, ist die Kapazität größer und die Ladezeit steigt (Gl. ( 8 )). Die

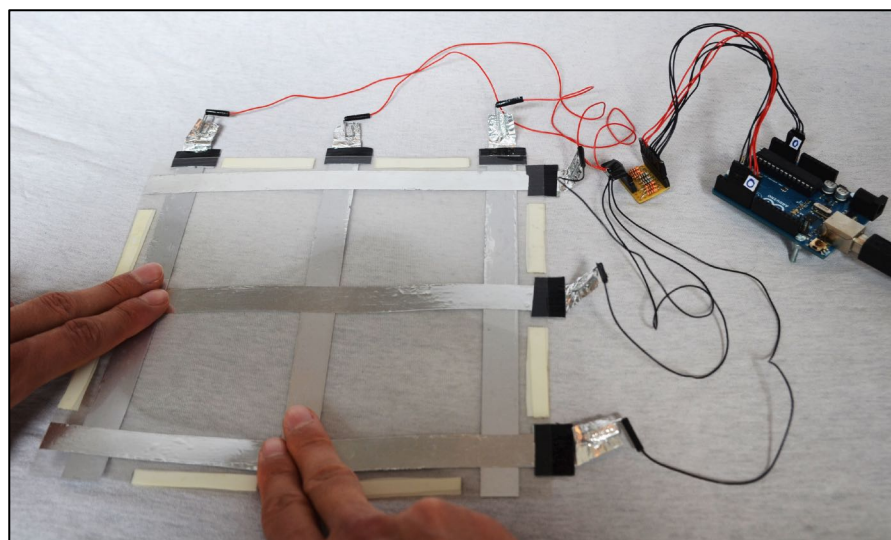


Abbildung 51: Modell eines projiziert-kapazitiven Touchscreens



7ms Ladezeit sind so gewählt, dass die Leiterbahn auch bei einer Berührung vollständig geladen werden kann.

Danach liegt pin\_unten und damit die untere Leiterbahn auf dem Potential der Masse. Direkt im Anschluss daran wird pin\_oben auf HIGH geschaltet, eine Zeitmessung gestartet und durchgehend die Spannung an pin\_adc gemessen. Zunächst wird die untere Leiterbahn entladen. Bei einer Berührung vergrößert sich die Entladezeit durch die Steigerung der Kapazität (Gl.( 9 )). Danach kann die obere Leiterbahn geladen werden. Der Ladevorgang und die Zeitmessung werden gestoppt, sobald an pin\_adc eine größere Spannung als eine vorher definierte Schwellenspannung registriert wird. Die obere Leiterbahn gilt als geladen. Befindet sich ein Finger in der Nähe dieser Leiterbahn, führt die Kapazitätserhöhung zu einer Verlängerung der Ladezeit (Gl. ( 8 )). Die so ermittelte Zeit ist also die Summe der Entladezeit der unteren Leiterbahn und der Ladezeit der oberen Leiterbahn. Diese Zeit stellt den Messwert  $\tau_i$  dar und steigt mit der Kapazitätserhöhung durch den Finger.

Nach der Inbetriebnahme des Mikrocontrollers werden alle Kreuzungspunkte auf diese Weise ausgemessen. Die so ermittelten Werte dienen als Ausgangswerte  $\rho_i$ . Die Abweichungen der danach gemessenen Messwerte von den Ausgangswerten  $\tau_i - \rho_i$  an den neun Kreuzungspunkten werden über die USB-Schnittstelle an einen Computer übertragen und können mit dem, in Kapitel 3.7 vorgestellten Programm, visualisiert werden. Zusätzlich werden vom Mikrocontroller bis zu zwei Berührungspunkte bestimmt und ebenfalls übertragen.

Berührt nur ein Finger einen Kreuzungspunkt, so kann diese Berührung über die größte Abweichung  $\tau_i - \rho_i$  des Messwerts vom Ausgangswert bestimmt werden. Abbildung 49 zeigt die Berührung des Modells mit zwei Fingern. Das Bildschirmfoto der dazugehörigen Visualisierung ist in Abbildung 29 links in Kapitel 3.7 zu finden. Es ist zu erkennen, dass im blauen Kasten die größten Abweichungen  $\tau_i - \rho_i$  aufgelistet sind. Die Erkennung von zwei Berührungen gestaltet sich etwas aufwändiger. Eine zweite Berührung ist durch den orangefarbenen Kasten dargestellt. Dazu werden die maximalen Abweichungen  $\tau_{max,j}$  ( $j = 1, 2$  oder  $3$ ) jeder oben liegenden Leiterbahn, die hier die Reihen sind, bestimmt. Werden zwei Reihen berührt ergeben sich zwei Maxima, die über einem Schwellenwert von 350 liegen und bei nur einer Berührung entsprechend nur ein Maximum, welches über dem Schwellenwert liegt. Wird die gleiche Reihe  $j$  von zwei Fingern berührt, liegen die Maxima der übrigen Reihen unter dem Schwellenwert. In der Reihe die berührt wird gibt es neben

dem Maximum  $\tau_{max,j}$  eine weitere Abweichung, die über einem Schwellenwert von 450 liegt. Mit diesen Beobachtungen kann ein Algorithmus aus if-else-Abfragen entwickelt werden, welcher die Auswertung durch den Mikrocontroller erlaubt. Der Quellcode des hier beschriebenen Programms ist im Anhang unter Punkt 9 zu finden. Dieser umfasst neben dem Messvorgang auch den Algorithmus zur Bestimmung der Berührungspunkte.

Im Kontext des Physikunterrichtes ist es vorstellbar das Modell zuerst von den SuS nachbauen zu lassen. Anschließend besteht die Möglichkeit den Ablauf des Messvorgangs vorzugeben und von den SuS in die Programmiersprache übersetzten zu lassen oder den Teil des Programms, der die Messvorschrift enthält, vorzugeben und den SuS den Ablauf mit ihren eigenen Worten wiedergeben zu lassen. Zudem kann die Ladezeit der unteren Leiterbahnen variiert werden. Nach diesem ersten Teil können die Messwerte mit der Software aus Kapitel 3.7 visualisiert werden. Die oben dargestellten Beobachtungen zur Bestimmung von einem oder zwei Berührungspunkten können die SuS im Schülerexperiment eigenständig aufstellen und unter Umständen einen Algorithmus zur Erkennung der Berührungspunkte entwickeln.

## 6 Literatur

Apple Computer Inc. (2005). *Patentschrift WO2005114369A2*, World Intellectual Property Organisation

Arduino (2005). *Language Reference*, <http://arduino.cc/en/Reference/HomePage> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Arduino (2010). *Arduino Uno*, <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Arduino (2013). *Arduino Startseite*, <http://www.arduino.cc> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Atmel Corporation (2006), *AVR120: Characterization and Calibration of the ADC on an AVR*, <http://www.atmel.com/Images/doc2559.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Atmel Corporation (2009), *8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash, ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA, ATmega328P*, <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Atmel Corporation (2011), *QTAN0079 Buttons, Sliders and Wheels, Sensor Design Guide*, <http://www.atmel.com/Images/doc10752.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Atmel Corporation (2013), *Atmel QT113B, 1-Channel QTouch® Touch Sensor IC, DATASHEET*, [http://www.atmel.com/Images/Atmel-9525-AT42-QTouch-BSE-QT113B\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-9525-AT42-QTouch-BSE-QT113B_Datasheet.pdf) letzter Aufruf am 25.07.2013)

*Beispiel einer Anwendung der Ergebnisse der Arbeit im den Informatikunterricht.*

<http://mcaf.ee/f3t0j> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Badger, P. (2008). *Capacitance Meter and RC Time Constants*.

<http://arduino.cc/en/Tutorial/CapacitanceMeter> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Bähring, H. (2010). *Anwendungsorientierte Mikroprozessoren, Mikrocontroller Und Digitale Signalprozessoren*, Berlin: Springer

Barrett, G. & Omote, O. (2010). *Projected-Capacitive Touch Technology*,

<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee2/docs/art6.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Baxter, L. K. (1996). *Capacitive Sensors: Design and Applications*, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers

Beck, F. & Stumpe, B. (1973). *Two devices for operator interaction in the central control of the new CERN accelerator*, <http://cds.cern.ch/record/186242/files/p1.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Bhalla, M. R. & Bhalla, A. V. (2010). *Comparative Study of Various Touchscreen Technologies*, in: International Journal of Computer Applications, Ausgabe 6 Nr. 8, New York: Foundation of Computer Science

Brinkschulte, U. & Ungerer, T. (2010). *Mikrocontroller und Mikroprozessoren*, Berlin: Springer

Bruun, R. (2010). *Capacitance Measurement*,

<http://playground.arduino.cc//Main/CapacitanceMeasurement> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Byte Works Inc. (2013). techBASIC App Builder,

[http://www.byteworks.us/Byte\\_Works/techBASIC.html](http://www.byteworks.us/Byte_Works/techBASIC.html) (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Conde, M., Casado, V., Güell, J., García, J., Delgado, J. & Citilab Smalltalk Programming Group (2013). *scratch for arduino*, <http://seaside.citilab.eu/scratch/arduino> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*, Berlin/Heidelberg: Springer

Dixon-Waren, St. J. (2010). *Motion Sensing in the iPhone 4: MEMS Accelerometer*, <http://www.memsjournal.com/2010/12/motion-sensing-in-the-iphone-4-mems-accelerometer.html> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Eckert, B., Stetzenbach, W., Jodl, H. J. (2006). *Low Cost-High Tech Freihandversuche Physik, Anregungen für einen zeitgemäßen Physikunterricht*, Köln: Aulis

Fischetti, M. (2001). *Touchscreens Bildschirme mit Fingerspitzengefühl*, in: Spektrum der Wissenschaft, Ausgabe Dezember 2001, Heidelberg: Spektrum

Hal, P. (2008). *Please Touch! Explore The Evolving World Of Touchscreen Technology*, <http://electronicdesign.com/components/please-touch-explore-evolving-world-touchscreen-technology> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Heckt, N. (2001). *Almost All Digital Electronics, L/C Meter IIB*, [http://www.qsl.net/dl2lux/pdf/lcmeter\\_dl.pdf](http://www.qsl.net/dl2lux/pdf/lcmeter_dl.pdf) (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Hering, E. & Schönfelder, G. (2012). *Sensoren in Wissenschaft und Technik, Funktionsweise und Einsatzgebiete*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner

Hesse, S. & Schnell, G. (2011). *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Funktion-Ausführung-Anwendung*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner

Hoile, C. (2012). *The Shrimp*, <http://shrimping.it/blog/shrimp/> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Kainka, B. (2010). *Kapazitiver Touch-Slider*, <http://www.elektronik-labor.de/Projekte/Slider1.html> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Meschede, D. (2010). *Gerthsen Physik*, Berlin/Heidelberg: Springer

Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1999), *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen, Physik*, Frechen: Ritterbach

Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1999), *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen, Informatik*, Frechen: Ritterbach

Nawrath, M. (2010). *Theremin as a Capacitive Sensing Device*, <http://interface.khm.de/index.php/lab/experiments/theremin-as-a-capacitive-sensing-device/> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Nawrath, M. (2012). *Programmbibliothek: FreqCounter\_1\_12*, [http://interface.khm.de/wp-content/uploads/2009/01/FreqCounter\\_1\\_12.zip](http://interface.khm.de/wp-content/uploads/2009/01/FreqCounter_1_12.zip) (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Niebuhr, J. & Lindner, G. (1994). *Physikalische Messtechnik mit Sensoren*, München/Wien: R. Oldenbourg

Nolting, W. (2004). *Grundkurs Theoretische Physik 3, Elektrodynamik*, Berlin/Heidelberg/New York: Springer

Processing (2013). *Processing 2*, <http://www.processing.org> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Raith, W. (1999). *Bergmann Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Elektromagnetismus*, Berlin/New York: de Gruyter

Red Bear Company (2013). *BLE Shield*, <http://redbearlab.com/bleshield/> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Rice, P. (2004). *A Surprisingly Accurate Digital LC Meter*, <https://sites.google.com/site/vk3bhr/home/lcm1> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Schmidt, W.-D. (2002). *Sensorschaltungstechnik*, Würzburg: Vogel

Seguine, R. (2007) *Die verschiedenen Techniken zur Herstellung kapazitiver Berührungssensoren*, <http://www.cypress.com/?docID=3348> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Stoffregen, P. (2011). *FreqCount Library*, [http://www.pjrc.com/teensy/td\\_libs\\_FreqCount.html](http://www.pjrc.com/teensy/td_libs_FreqCount.html) (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Stumpe, B. (1977). *A New Principle for an X-Y Touch Screen*, <http://cds.cern.ch/record/1266588/files/StumpeMar77.pdf> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Tipler, P. A. & Mosca, G. (2006). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, München: Elsevier

Van Ess, D. (2006), *Kapazitive Berührungsschalter*, in *Automotive 10. 2006*, München: Carl Hanser

Weisstein, E. W. (2010). *Least Squares Fitting-Exponential*, <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFittingExponential.html> (letzter Aufruf am 25.07.2013)

Wüst, K. (2003). *Mikroprozessortechnik, Mikrocontroller, Signalprozessoren, Speicherbausteine und Systeme*, Wiesbaden: Vieweg