



# Facharbeit der Kollegstufe

Abiturjahrgang 2008 / 2009

Kurs: Physik  
Kursleiter: Herr Claus Hübl  
Verfasser: Patrick Schulte  
Thema: Aufbau und Funktionsweise von Beschleunigungssensoren

Abgabetermin: 30.01.2009

Note: \_\_\_\_\_

Punkte: \_\_\_\_\_

Dem Direktorat vorgelegt am: \_\_\_\_\_

Punkte eingetragen am: \_\_\_\_\_

Unterschrift des Kursleiters: \_\_\_\_\_

---

## **Inhaltsverzeichnis**

---

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Überblick über Trägheitssensoren</b>	<b>4</b>
2.1	Gyroskope und Beschleunigungssensoren	4
2.2	Unterordnungen bei linearen Beschleunigungssensoren	4
<b>3</b>	<b>Funktionsweise von Beschleunigungssensoren</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Erfassung und Verarbeitung der Messdaten</b>	<b>10</b>
4.1	Die Hardware des Beschleunigungssensor-Moduls	10
4.2	Messgenauigkeit	12
4.3	Die Software des Beschleunigungssensor-Moduls	13
4.4	Die PC-Anwendung	13
<b>5</b>	<b>Versuche mit dem Beschleunigungssensor</b>	<b>15</b>
5.1	Ruhige waagerechte Lage auf dem Tisch	15
5.2	Freier Fall	16
5.3	Das Pedometer	17
5.4	Messgerät für die Lage eines Objekts	18
5.5	Die Fahrt mit dem Auto	19
<b>6</b>	<b>Moderne Anwendungen</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Quellen</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>Anhang (CD)</b>	<b>23</b>

## 1 Einführung

Höher, schneller, weiter – das ist im Sport der Schlüssel zum Erfolg. Egal ob man schneller fahren, weiter werfen oder höher springen möchte, in jedem Prozess muss man versuchen, physikalische Größen zu verändern, um das gewünschte Ziel zu erreichen. Um einen Ball immer weiter zu werfen, wird der Abwurfwinkel solange verändert, bis die besten Ergebnisse erzielt werden. Ist der perfekte Winkel erreicht, dann führt eine größere Geschwindigkeit im Zeitpunkt des Abwurfes zum Erfolg. Da der Weg konstant ist und der Ball somit in kürzerer Zeit auf eine größere Geschwindigkeit kommt, ist die Geschwindigkeitszunahme in dem Zeitintervall des Wurfvorgangs von entscheidender Bedeutung – anders gesagt: der Ball muss stark beschleunigt werden, um auf Tempo zu kommen. Im Rennsport zählt die Leistung, und letzten Endes die Kraft, mit der der Wagen beschleunigt wird und am Gegner vorbeizieht.

Die Mechanik definiert Beschleunigung als Änderung der Momentangeschwindigkeit  $\Delta v = v_2 - v_1$  eines Teilchens in einem Zeitintervall  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Das Verhältnis aus diesen zwei Größen wird als Durchschnittsbeschleunigung definiert. Man kann die Momentanbeschleunigung als Grenzwert der Durchschnittsbeschleunigung für immer kleiner werdende Zeitintervalle definieren. Somit entspricht in einem v-t-Diagramm die Steigung der Tangente in einem Punkt der Kurve der Momentanbeschleunigung für diesen Zeitpunkt. Da dieser Zusammenhang analog für die Geschwindigkeit und den zurückgelegten Weg gilt, kann man mit Hilfe der Integralbildung von der Beschleunigung auf den zurückgelegten Weg oder mit Ableitung andersherum schließen [1]. Es gilt:

$$a = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \frac{d(dx/dt)}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$$

Beschleunigungen mit einem Sensor zu messen kann sowohl Aufschluss über die Geschwindigkeit als auch über den Ort eines Objektes geben, wenngleich dies in der Regel nicht seine primäre Aufgabe ist.

Die vorliegende Facharbeit fokussiert auf mikromechanische kapazitive Beschleunigungssensoren, da in den Versuchen ein Sensor von diesem Typ verwendet wurde.

## 2 Überblick über Trägheitssensoren

Beschleunigungssensoren gehören in die Gruppe der Trägheitssensoren [2]

### 2.1 Gyroskope und Beschleunigungssensoren

Lineare Beschleunigungssensoren sind eine Untergruppe von so genannten Trägheitssensoren. Die zweite Untergruppe dieser Trägheitssensoren sind die Gyroskope, die Drehbewegungen um die 3 Hauptachsen messen. Ein Gyroskop ist eine Art Kreisel, der in einer Aufhängung befestigt wurde. Mit Gyroskopen misst man die Winkelbeschleunigung, da aufgrund des Drehimpulses der Kreisel des Gyroskops seine Lage bei einer Drehung im System nicht verändert, sondern nur die Aufhängung. Diese Eigenschaft ist unabhängig von der Schwerkraft, wohingegen ein Beschleunigungssensor für lineare Bewegungen eine in Richtung und Stärke konstante Kraft wie die Schwerkraft braucht, um daraus die Lage im System auszurechnen. Deswegen ist der Einsatz eines Beschleunigungssensors als Lagesensor auf der Erde im Gegensatz zum Einsatz im Weltraum möglich [2]. Dreht sich ein Bewegungssensor allerdings um die Achse der Gewichtskraft (oder die Achse der Kraft, die er dazu benutzt, um sich zu kalibrieren), kann man diese Veränderung der Lage an den Messungen nicht nachvollziehen, da die Verteilung der Schwerkraft in den Raumrichtungen gleich bleibt. Eine lineare Bewegung aus den Messungen eines Gyroskops zu errechnen ist wesentlich komplizierter. Die Kombination eines 3-Achsen-Beschleunigungssensors mit einem 3-Achsen Gyroskop, ein so genannter „6 DOF (6 Degrees Of Freedom) Motion Sensor“ [2], ermöglicht also die Aufnahme aller möglichen Bewegungen eines Systems [3]. Im Bereich der Beschleunigungssensoren gibt es verschiedene Techniken, mit der man die Beschleunigung aufnehmen kann.

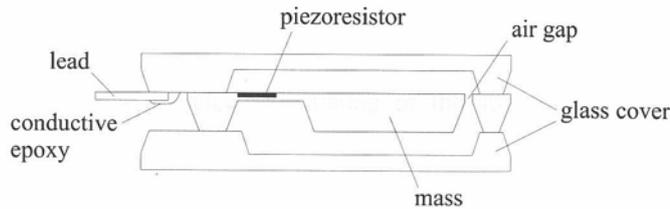
Der in den Versuchen verwendete Sensor kann lediglich lineare Beschleunigungen aufnehmen, die er für 3 Raumrichtungen ausgibt.

### 2.2 Unterordnungen bei linearen Beschleunigungssensoren

Im Bereich der linearen Beschleunigungssensoren gibt es viele verschiedene Techniken, mit denen Messwerte erhoben werden können.

Piezo-Sensoren nutzen zum Beispiel den piezoelektrischen Effekt, bei dem durch das Zusammendrücken eines Kristalls zwischen den Atomen ein Potenzial entsteht. Diese Sensoren sind also nichts anderes als Drucksensoren, wobei der Druck  $P$  gemessen wird, den ein träger Körper der Masse

m auf ein Kristall der Fläche  $A$  ausübt. Der Druck ist proportional zu der Kraft  $F$ , da die Fläche konstant bleibt. Aus diesem Zusammenhang kann man eine Proportionalität zwischen dem Druck und der Beschleunigung herstellen, da die beschleunigende Kraft  $F$  proportional zur Beschleunigung ist. Sensoren, die sich den piezoresistiven Effekt zu Nutze machen, funktionieren auf eine ähnliche Art und Weise, wobei hier keine Spannung erzeugt wird, sondern sich der spezifische Widerstand ändert [4].

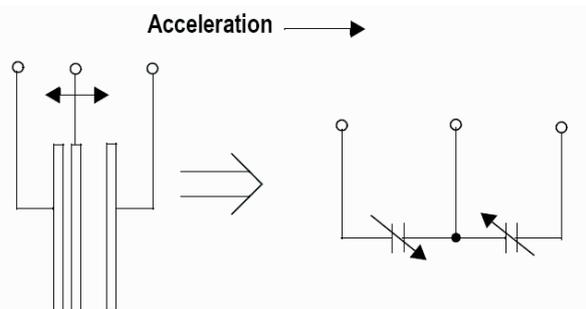


**Abbildung 1: Struktur eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors [5]**

Daneben gibt es Sensoren, die, indem sie sich den Hall-Effekt zu Nutze machen, aus der Veränderung des Magnetfeldes Lage und Beschleunigung errechnen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Standort einer erhitzten Prüfmasse über Temperaturmessungen zu ermitteln [6].

In den praktischen Versuchen wird der mikromechanische kapazitive 3-Achsen-Beschleunigungssensor „MMA7260QT“ von Freescale verwendet [7]. Dieser arbeitet mit Kapazitäten von Kondensatoren.

Vereinfacht dargestellt ist das Herzstück des Sensors wie ein normaler Kondensator mit zwei Platten der Fläche  $A$  und dem Abstand  $d$  aufgebaut. Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich eine weitere Platte mit der so genannten Prüfmasse, die an zwei Federn aufgehängt ist. Die mittlere Platte teilt den Kondensator in zwei Kondensatoren mit den Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$ .

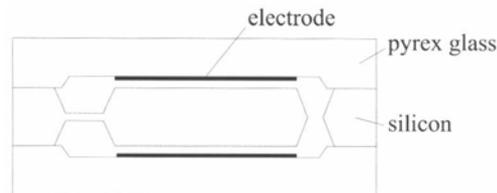


**Abbildung 2: Vereinfachtes Prinzip eines Beschleunigungssensors [7]**

Wird der Sensor beschleunigt, wirkt auf Grund der Trägheit eine Kraft auf die mittlere Platte, weswegen sie sich gegenüber den anderen beiden Platten verschiebt, bis die Federkraft so groß wie die durch die Trägheit erzeugte Kraft ist.

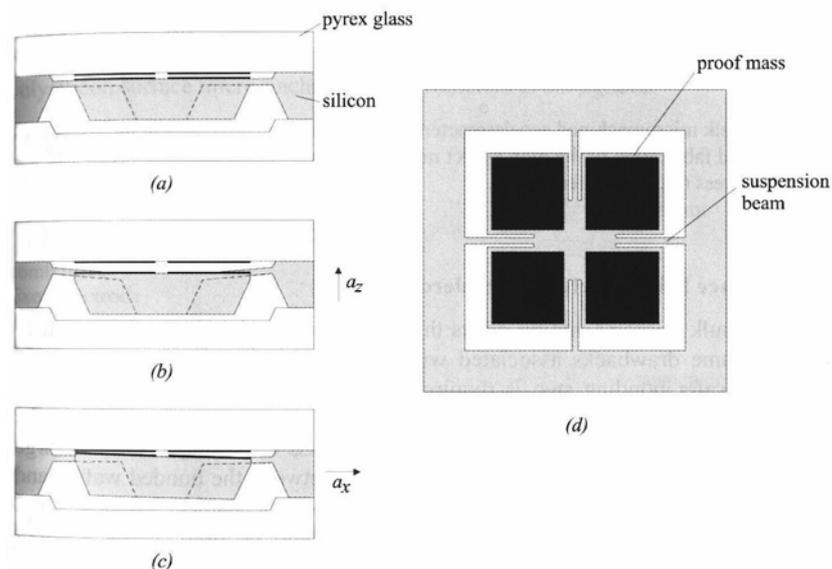
Durch die Verschiebung der mittleren Platte verändern sich auch die Kapazitäten der Kondensatoren. Der Unterschied der Kapazitäten ist durch eine Spannung messbar (Abbildung 2).

Der physikalische Aufbau eines möglichen Grundelements mit nur zwei Elektroden wird in Abbildung 3 dargestellt. Die Prüfmasse wurde durch ein oder zwei frei hängende Balken ersetzt, auf denen sich die Elektroden befinden. Die Balken sind an einem Silikonkörper befestigt, welcher den Federeffekt erzeugt.



**Abbildung 3: Basisstruktur eines kapazitiven Sensors [5]**

Wenn man diese Technik verwendet, benötigt man für jede Raumrichtung eine eigene Messeinheit. Außerdem müssen die 3 Einheiten gut aufeinander ausgerichtet werden, was im Bereich der mikroelektronischen Sensoren eine gewaltige Herausforderung darstellt. Abhilfe für dieses Problem brachte zum Beispiel 1998 die Struktur von Puers, die Abbildung 4 zeigt.



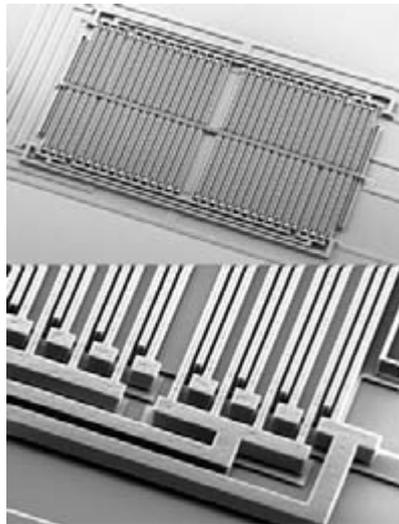
**Abbildung 4: Dreiachsen Beschleunigungssensor mit nur einer Prüfmasse [5]**

Bei diesem Beschleunigungssensor besitzt die Prüfmasse vier Elektroden. Eine Beschleunigung in Z-Richtung verursacht eine Verschiebung der Prüfmasse in dieselbe Richtung, was sich dadurch bemerkbar macht, dass sich bei den vier Kondensatoren die Kapazität um den gleichen Betrag ändert (vgl. Abbildung 4b). Bei einer Beschleunigung in X- oder Y-Richtung tritt eine Neigung der Prüfmasse auf. In diesem Fall werden die Kapazitäten von zwei Sensoren

zunehmen und zwei abnehmen. Eine gute Abschätzung der Beschleunigung erhält man aus der Ableitung der Werte aller vier Kondensatoren (vgl. Abbildung 4c) [5].

Eine Besonderheit des kapazitiven Beschleunigungssensors ist die Tatsache, dass er auch in Ruhelage eine Beschleunigung anzeigt. Das ist kein Fehler, denn der Sensor zeigt die Gewichtskraft an. Mit Hilfe dieser wirkenden Kraft kann man den Sensor auf 1 g kalibrieren und die Lage des Sensors im Raum nachvollziehen, da sich bei einer Schiefelage des Sensors die Gewichtskraft auf die X-, Y- und Z-Komponente verteilen.

In der Welt der Mikrosensoren würde ein Kondensator, der aus 2 Platten besteht viel zu geringe Kapazitäten erzeugen, um brauchbare Messergebnisse zu liefern. Um die Kapazität zu vergrößern, wird die Oberfläche vergrößert. Das geschieht mit einer Vielzahl von Platten, die zusammen eine Art Kamm bilden, wie Abbildung 5 zeigt.



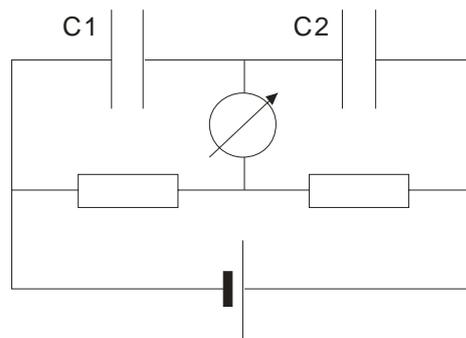
**Abbildung 5: Detailansicht eines Beschleunigungssensors [2]**

Diese Sensoren haben lediglich Chip-Größe und können deshalb in einer Vielfalt von Geräten eingesetzt werden. Dank der günstigen Produktionskosten sind sie für den Massenmarkt tauglich. Außerdem haben sie gegenüber piezoelektrischen Sensoren den Vorteil, von Wärmeeinflüssen unabhängig zu sein und sehr genaue Werte zu liefern [3].

### **3 Funktionsweise von Beschleunigungssensoren**

Nach der Klärung des Aufbaus bleibt die Frage, durch welche physikalischen Zusammenhänge es möglich ist, Beschleunigung messbar zu machen. An dem Beispiel des kapazitiven Beschleunigungssensors soll der proportionale Zusammenhang zwischen der ausgegebenen Spannung  $U_{\text{out}}$  und der Beschleunigung

a nachgewiesen werden. Hierzu wird ein mikroelektronischer Beschleunigungs-sensor mit dem schematischen Aufbau von Abbildung 2 hergenommen: Die bewegliche Platte M lagert zwischen den Platten P<sub>1</sub> und P<sub>2</sub>. An der mittleren Platte kann man den Potentialunterschied zwischen den Kondensatoren mit einem Spannungsmessgerät ermitteln, wie in dem Ersatzschaltbild aus Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: Ersatzschaltbild**

C<sub>1</sub> entspricht der Kapazität des Kondensators, der aus den Platten P<sub>1</sub> und M besteht. Analog resultiert C<sub>2</sub> aus den Platten M und P<sub>2</sub>.

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{d_1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} + \frac{d_2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} =$$

$$\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} \cdot (d_1 + d_2) \quad (I)$$

$$d_1 + d_2 = d_{ges} = konst \quad (II)$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{d_{ges}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} = konst \quad (I \rightarrow II)$$

Beide Kondensatoren sind durch die gleiche anliegende Spannung und der konstanten Gesamtkapazität C<sub>ges</sub> mit der Ladung Q<sub>0</sub> aufgeladen (Q<sub>0</sub> = C<sub>ges</sub> · U<sub>0</sub>).

Durch Induktion ist die innere Platte genauso wie die äußeren mit |Q| = Q<sub>0</sub> geladen. Da das Spannungsmessgerät den Potentialunterschied zwischen den in Reihe geschalteten Kondensatoren misst, ist dieser null, wenn an beiden Kondensatoren das gleiche Potential anliegt, also U<sub>1</sub> = U<sub>2</sub> = ½ U<sub>0</sub>.

Das ist nur dann der Fall, wenn beide Kondensatoren die gleiche Kapazität haben. Da die Dielektrizitätskonstante und die Fläche der Kondensatorplatten konstant sind, sind die Kapazitäten von C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub> nur noch von dem Abstand der Kondensatorplatten abhängig. Ist die Platte M genau in Mittelstellung, messen wir den Potentialunterschied zwischen zwei gleichen Kondensatoren,

der folglich null ist. Es macht also Sinn von einer Abweichung  $d_x$  aus der Mittelstellung zu sprechen.  $d_x = \frac{d_{ges}}{2} - d_2 = d_1 - \frac{d_{ges}}{2}$ .

Das Messgerät misst den Potenzialunterschied zwischen  $C_1$  und  $C_2$ .

$$U_{mess} = \frac{Q}{C_1} - \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{e_0 \cdot e_r \cdot \frac{A}{d_1}} - \frac{Q}{e_0 \cdot e_r \cdot \frac{A}{d_{ges} - d_1}} =$$

$$= \frac{Q}{e_0 \cdot e_r \cdot A} \cdot (d_1 - d_{ges} + d_1) = \frac{2Q}{e_0 \cdot e_r \cdot A} \cdot \left( d_1 - \frac{d_{ges}}{2} \right)$$

Der 2. Faktor des Produkts wurde als  $d_x$  definiert, und als Abweichung aus der Mittelstellung bezeichnet.

$$U_{mess} = \frac{2Q}{e_0 \cdot e_r \cdot A} \cdot d_x$$

Hieraus folgt:  $U \sim d_x$

Aus

$$F = m \cdot a \quad (I)$$

$$F = D \cdot d_x \quad (II)$$

$$m \cdot a = D \cdot d_x \quad (I \rightarrow II)$$

$$\frac{a}{d_x} = \frac{D}{m} = konst \quad (III)$$

$$a \sim d_x$$

$$U_{mess} \sim d_x$$

$$\Rightarrow U_{mess} \sim a$$

folgt, dass  $a \sim d_x$  und somit auch  $U \sim a$  ist.

## 4 Erfassung und Verarbeitung der Messdaten

Die Erfassung der Messdaten erfolgt über einen Mikrocontroller, der die aufbereiteten Daten des Beschleunigungssensors für Anwendungen am PC bereit stellt. Der Mikrocontroller hat die Aufgabe, die Spannungen der Richtungs-kanäle des Sensors aufzunehmen. Die gesammelten Spannungen müssen in digitale Größen umgewandelt und aufbereitet werden. Es folgt die Ausgabe oder Speicherung für die Weiterverarbeitung am PC.

### 4.1 Die Hardware des Beschleunigungssensor-Moduls

Die Hardware des Beschleunigungssensors besteht aus dem Sensorchip „MMA7260QT“ von der Firma „Freescale“ [7] und einem Mikrocontroller der die Analogdaten des Sensors aufbereitet und wahlweise speichert oder weiterleitet. Der „MMA7260QT“ wurde für das Projekt gewählt, da er durch seine einstellbare Empfindlichkeit vielseitig verwendet werden kann. Außerdem war für die Wahl wichtig, dass der Sensor über 3 Achsen verfügt, da dies umfangreichere Versuche ermöglicht. Zwei Muster des „MMA7260QT“ wurden auf Anfrage bei Freescale USA kostenlos zur Verfügung gestellt.

Abbildung 7 zeigt die äußere Beschaltung des Bausteins, dessen Abmessungen nur 6 mm x 6 mm x 1,45 mm betragen. Der Sensor wird mit 3,3 Volt ( $V_{DD}$ ,  $V_{SS}$ ) betrieben. Er liefert an seinen drei Ausgängen  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$  und  $Z_{OUT}$  eine Ausgangsspannung, die proportional zur momentanen Beschleunigung ist. Über die beiden Eingänge g-Select1-2 kann die Empfindlichkeit auf 1.5 g, 2 g, 4 g oder 6 g eingestellt werden. Die Möglichkeit über den Eingang Sleepmode Strom zu sparen, wird bei den Versuchen nicht genutzt.

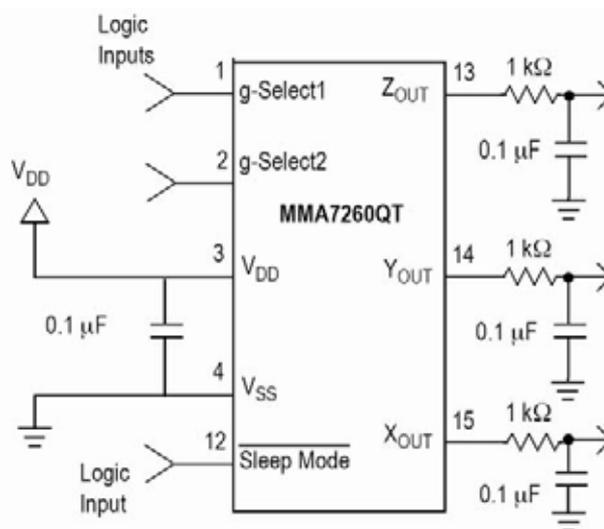
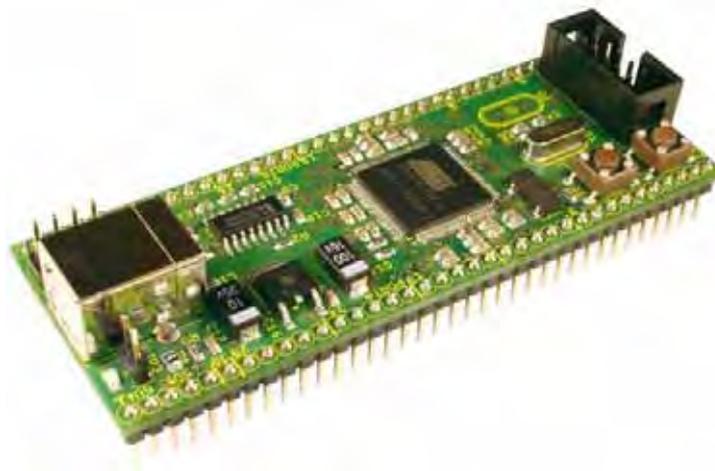


Abbildung 7: Beschaltung des Beschleunigungssensors[7]

Bauartbedingt generiert der Sensor leichte Störungen, die sich als Rauschen der Ausgangsspannung der drei Analogausgänge messen lässt. Jeder Analogausgang erhält deshalb ein Tiefpass-Filter aus Widerstand und Kondensator, das nur niederfrequente Signale durchlässt.

Die zeitliche Erfassung der X-Y-Z-Spannungen ist Aufgabe eines Mikrocontrollers, da ein PC für diese Anwendung nicht ausgelegt ist und mit der Aufgabe überlastet wäre. Vor allem aber ist ein PC nicht mobil genug. Die Wahl fiel auf den AVR32 von ATMEL, der neben einem niedrigem Stromverbrauch (Batteriebetrieb) eine Entwicklungsumgebung mit einer kostenlosen Bibliothek zum Lesen und Beschreiben von SD-Karten zur Verfügung stellt. Außerdem verfügt er über die notwendigen 3 Analog-Digital-Wandler (ADC), mit denen die Messdaten des Sensors aufgenommen werden können [8].



**Abbildung 8: Mikrocomputermodul mit AVR32 [9]**

Es gibt ein kompaktes AVR32-Modul (Abbildung 8), das eine relativ einfache Implementierung der Hardware ermöglicht, ohne die die Realisierung des Moduls nahezu unmöglich gewesen wäre [9].



**Abbildung 9: Das Modul**

Basierend auf diesem Modul wurde auf einer Platine der Sensor mit den 3 ADCs des AVR32 verbunden. Die Beschaltung des SD-Karten-Slots konnte den Unterlagen eines AVR32-Kits der Firma ATMEL entnommen werden [10]. Die Kommunikation via serielle Schnittstelle wird vom Modul unterstützt – lediglich die entsprechenden Stecker müssen noch zur Verfügung gestellt werden. Als Spannungsversorgung dient ein Batteriepack. Mit Hilfe eines Schalters kann die Zahl der Messwerte pro Sekunde festgelegt werden. Eine Leuchtdiode blinkt im Takt der Messwerterfassung (Abbildung 9).

## 4.2 Messgenauigkeit

Wie alle Versuchsanordnungen sind auch die Versuche, die mit dem Beschleunigungssensor durchgeführt werden, von Messfehlern betroffen. Man muss sich über Art und Umfang der Fehler im Klaren sein und Messungen in kritischen Bereichen mit Vorsicht genießen. Von Handhabungsfehlern einmal abgesehen sind folgende Fehler immer vorhanden:

- Nichtlineare Umsetzung der Gravitationsmesseinrichtung in die Ausgangsspannungen  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$  und  $Z_{OUT}$
- Fehlerhafte Ausrichtung innerhalb des Sensors [5]
- Fehler durch nicht optimale Ausrichtung des Sensors auf der Oberfläche der Leiterplatte und innerhalb des Gehäuses
- Störungen auf den Analogausgängen durch interne Schaltvorgänge [7]
- Nichtlineare Umsetzung der Spannung am ADC-Eingang in einen digitalen Wert [8]
- Einflüsse durch Betriebsspannung und Temperatur
- Beeinflussung des Messsignals zwischen ADC und Mikrocontroller

Laut Herstellerangaben kann die Abweichung der Ausgangsspannungen bis zu 10% betragen [7]. Das bedeutet konkret, dass bei einem Skalenendmesswert von 2 g der Sensor eine Spannung aufbaut, die einem Messwert von 2,2 g bis 1,8 g entsprechen würde. Diese Fehler treten dadurch auf, dass aufgrund der sehr kleinen Architektur des Sensors eine völlig exakte Produktion nicht möglich ist und deswegen jeder Sensor, der gebaut wird, eine andere Abweichung hat [5]. Diese Abweichung ist absolut, was bedeutet, dass wenn die Abweichung gegenüber dem Skalenendmesswert beispielsweise 0,1 g ist, diese Abweichung immer gleich groß ist. Bei einer Kalibrierung des Gerätes ist es also möglich diese konstante Abweichung zu ermitteln und von der gemessenen Beschleunigung einfach abzuziehen (siehe auch Versuch 5.1).

Bei den Versuchen mit dem Sensor wurden Messstörungen erfasst, die sich als Schalteinflüsse erklären lassen. Das können Schaltvorgänge im Sensor, im Mikrocontroller, aber auch auf dem Messsignal selbst sein. Da sich diese Fehler nicht vermeiden lassen, werden die Messwerte durch eine Mittelung „geschönt“ (siehe Kapitel 4.3)

### **4.3 Die Software des Beschleunigungssensor-Moduls**

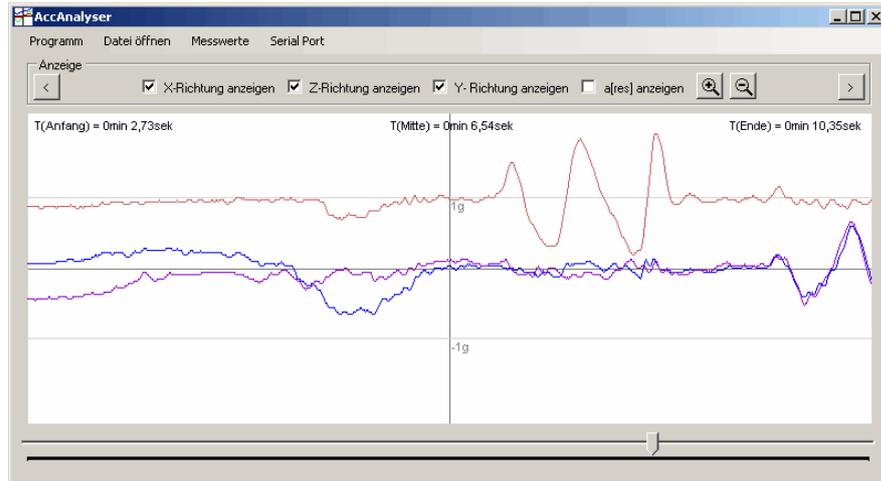
Die Aufgabe der Software des Mikrocontrollers ist relativ einfach. Je nach Schalterstellung werden alle 10 bzw. 100 Millisekunden die Analogwerte X, Y und Z des Beschleunigungssensors vom Mikrocontroller erfasst, aufbereitet auf die SD-Karte geschrieben und über die serielle Schnittstelle an den PC weitergegeben.

Die analoge Spannung wird vom ADC des Mikrocontrollers in 10-Bit [8] Ganzzahlen umgewandelt, die direkt proportional zur gemessenen Beschleunigung sind. Bei Messungen auf einer ruhigen Unterlage liefert der Mikrocontroller allerdings keine konstanten Messwerte, sondern ein Rauschen, das um den Sollwert scheinbar konvergiert. Um dieses Rauschen zu vermindern wird aus den jeweils 5 letzten Messungen fortwährend ein Mittelwert gebildet. Obwohl die maximale Auflösung des Mikrocontrollers die des Sensors weit übertrifft, wird bei der Datenaufbereitung zunächst mit den 10-Bit-Werten gearbeitet. Dieser Wert wird am Ende auf 8-Bit reduziert. Es stehen somit Messwerte von 0 – 255 zur Verfügung. Die Genauigkeit eines Bits pro Richtung, bezogen auf den Skalenendwert, ist besser als 1%.

Zur Datenaufbereitung gehört außerdem die Offsetkorrektur, dessen Untersuchung Bestandteil des ersten Versuchs (Kapitel 5.1) ist.

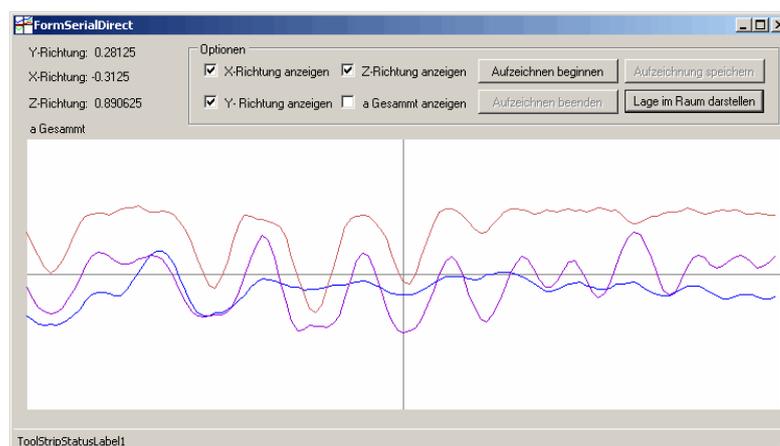
### **4.4 Die PC-Anwendung**

Die wesentliche Aufgabe der PC-Anwendung, die für die Facharbeit entwickelt wurde, ist die grafische Auswertung der Messwerte (Abbildung 10). Da die Messwerte sowohl über SD-Karte, als auch über die serielle Schnittstelle übertragen werden, ist das Programm in zwei Bereiche aufgeteilt, die die jeweilige Datenübertragung unterstützen. Die Daten auf der SD-Karte sind in der Datei „acc.log“ gespeichert (dieser Name wurde vorher beim Programmieren des Mikrocontrollers festgelegt). Sie können über einfachen Klick in der Menüleiste (Messwerte → laden) über einen „Datei-Öffnen-Dialog“ geladen werden.



**Abbildung 10: Das Hauptfenster**

Auf die serielle Schnittstelle kann man per Klick auf „Serialport öffnen“ (eng. serialport = serielle Schnittstelle) zugreifen. Es öffnet sich ein Anwendungsfenster (Abbildung 11), das in einem Diagramm die momentane Beschleunigung und die letzten 127 Messwerte der 3 Raumrichtungen angibt. In beiden Modi kann man einstellen, welche Raumrichtungen gleichzeitig angezeigt werden sollen. Außerdem gibt es einen Auswahlkasten „a[res]“, mit dem der Betrag der Summe der Beschleunigungsvektoren angezeigt wird, also eine Art resultierende Beschleunigung. Von dieser Beschleunigung wird allerdings nur die Stärke und nicht die Richtung angegeben. Außerdem darf man nicht vergessen, dass die Erdbeschleunigung immer ein Teil dieser resultierenden Beschleunigung ist und nicht oder nur mit großen Schwierigkeiten herausgerechnet werden kann.



**Abbildung 11: Die serielle Schnittstelle ansprechen**

Der SD-Modus verfügt über ein paar zusätzliche Anzeigeeoptionen, mit denen man in das Diagramm hineinzoomen kann. Eine Trackbar mit zwei Buttons stellt sicher, dass man das Diagramm seitlich verschieben kann. Für die Orientierung

beim Scrollen dienen Zeitangaben, die für den ersten Messwert, den letzten Messwert und den Messwert in der Mitte gelten.

Wenn man die Daten aus der seriellen Schnittstelle ausliest gibt es die Möglichkeit, einen Mitschnitt zu machen und diesen in einer \*.log-Datei abzuspeichern um ihn später im Hauptfenster zu analysieren.

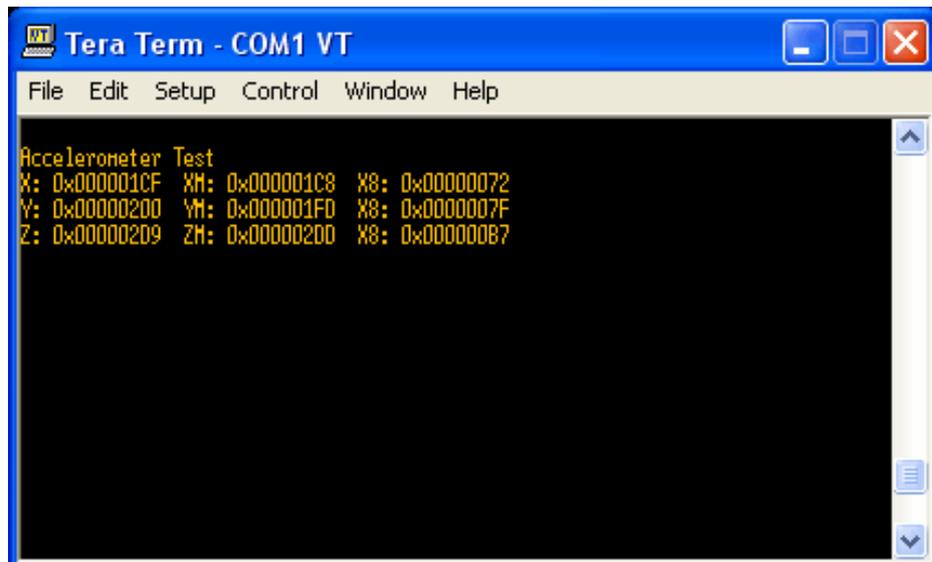
Für den Versuch „Messgerät für Lage eines Objekts“ wurde ein Modul implementiert, das aus den Richtungskanälen die Neigung des Sensors zur Erde berechnen kann.

## 5 Versuche mit dem Beschleunigungssensor

In diesem Kapitel werden einige Versuche mit dem Beschleunigungssensor durchgeführt.

### 5.1 Ruhige waagerechte Lage auf dem Tisch

Der erste Versuch dient zur Kalibrierung des Gerätes, da man nur in der Ruhelage weiß, welche Kräfte auf die Platten der Sensoren wirken. Der Sollwert liegt bei einem Skalenendwert von 2 g beim Hexadezimalwert 0xC0. Abbildung 12 zeigt das Terminalprogramm, über welches der momentan gemessene 10-Bit-Wert (1. Spalte), der Mittelwert aus allen 10-Bit-Werten(2. Spalte) und der momentan gemessene 8-Bit-Wert (3. Spalte) ausgegeben wird



```
Tera Term - COM1 VT
File Edit Setup Control Window Help
Accelerometer Test
X: 0x000001CF XM: 0x000001C8 X8: 0x00000072
Y: 0x00000200 YM: 0x000001FD X8: 0x0000007F
Z: 0x00000209 ZM: 0x00000200 X8: 0x000000B7
```

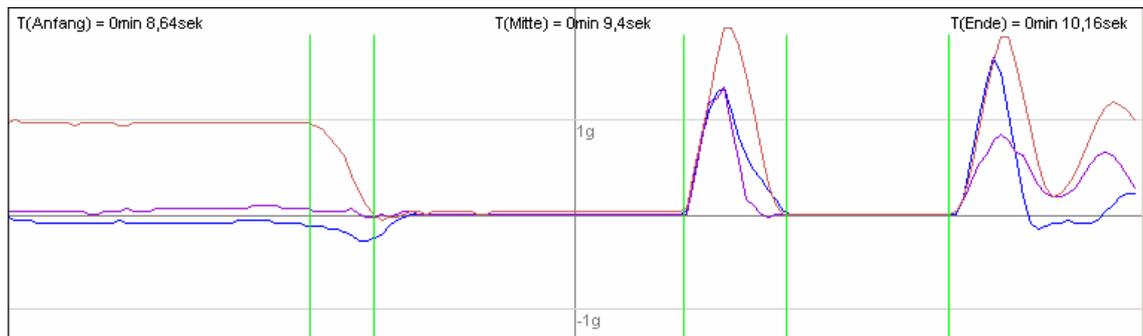
Abbildung 12: Messwerte über ein Terminalprogramm

Dadurch, dass die Anordnung nicht bewegt wird, wirken in X- und Y-Richtung keine Kräfte, man sollte also den Hexadezimalwert 0x80 empfangen. In der Z-Richtung dagegen wirkt auf die Platte die Gewichtskraft  $F_g$ , sodass der

Beschleunigungssensor eine nicht reale Beschleunigung in Z-Richtung misst, und zwar genau 1 g. Aufgrund von verschiedenen Faktoren, die im Kapitel Messgenauigkeit (4.3) behandelt werden, ist der Sollwert nicht gleich dem Istwert, was durch den Begriff Offsetfehler beschrieben ist. In X-Richtung liegt die Abweichung bei 0x0D, in Y-Richtung bei 0x01 und in Z-Richtung bei 0x09. Durch einfaches Addieren der Gegenzahl des Offsetfehlers, der oben ermittelt wurde, wird das Gerät kalibriert. Die Kalibrierung wird nach diesem Versuch Bestandteil der Software des Mikrocontrollers. In stabiler Position liefert das Programm die zu erwartenden Werte. Das Zappeln des letzten Bits ist völlig normal.

## 5.2 Freier Fall

In diesem Versuch wurde das Messgerät aus einer Höhe von 0,8 m, 1,00 m und 1,20 m fallengelassen, um die Abhängigkeit von der Gewichtskraft darzustellen. In der Einführung wurde beschrieben, dass der Sensor immer die Gewichtskraft misst. Wenn man das Messgerät fallen lässt, befindet sich die Prüfmasse in einer Art Schwerelosigkeit.



**Abbildung 13: Der freie Fall (Z rot, X blau, Y lila)**

Der Verlauf des t-a-Diagramms (Abbildung 13) zeigt in dem Intervall vom 2. bis zum 3. und vom 4. zum 5. Balken, dass der Sensor in keine Raumrichtung eine Beschleunigung misst. Es kam bei dem Versuch zu 2 Intervallen, in denen keine Beschleunigung gemessen wurde, da der Sensor auf eine abfedernde Unterlage fallengelassen wurde und ein kleines Stück in die Luft katapultiert wurde. Es wurde also ein erneuter, aber kürzerer freier Fall initiiert. Auffällig ist außerdem das Intervall zwischen dem 1. und 2. grünen Balken. Zu erwarten wäre ein sofortiges Absinken der Beschleunigung in Z-Richtung auf Null. Die Trägheit des Sensors, das Tiefpassfilter aber mehr noch die Anwendung des arithmetischen Mittels führt zu einer Glättung der Messwerte. Bei 100 Messungen pro Sekunde ist diese Glättung nicht weiter schlimm, da die Intervalle so klein sind, dass sich die Messungen während einer Sekunde nicht

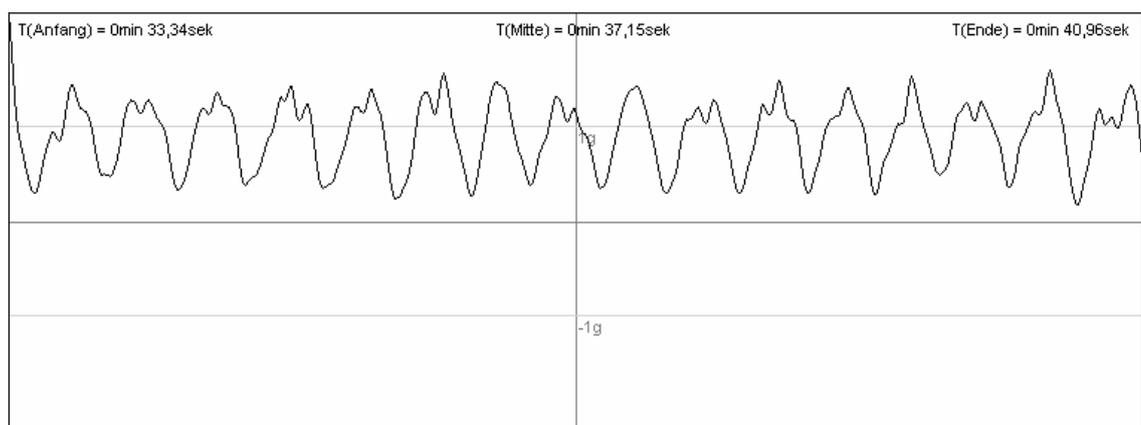
übermäßig beeinflussen. Es ergibt sich eine Latenzzeit 0.05s, was toleriert werden kann. Im Fall von 10 Messungen pro Sekunde ist die Glättung viel deutlicher zu erkennen. Im Beispiel des freien Falls dauert es  $5 * 100 \text{ ms} = 0.5\text{s}$ , bis im Diagramm tatsächlich ein freier Fall angezeigt wird.

### 5.3 Das Pedometer

Ein Pedometer ist ein Gerät, das Schritte erkennt. Mit Hilfe dieses Gerätes können z.B. Jogger messen, wie weit sie gelaufen sind, wenn sie ihre mittlere Schrittgröße kennen. Will man wie im Datenblatt des „MMA7260Q“ vorgeschlagen ein Pedometer mit Hilfe eines Beschleunigungssensors bauen, muss man sich fragen, woran der Sensor einen Schritt erkennen kann. Bei der Versuchsausführung ist zu beachten, dass die Schritte anscheinend eine sehr große Belastung darstellen, weil im Datenblatt „MMA73x0L XYZ Three-Axis Low g Analog Output Acceleration Sensor“ von Freescale eine Belastung von 10-20 g angegeben ist. Dieser Belastungsbereich geht allerdings weit über den angegebenen maximalen Messbereich von 6 g hinaus. Um den Versuch dennoch durchführen zu können werden die Vorraussetzungen ein wenig verändert, sodass nicht allzu große Kräfte wirken.

Das Messgerät wird dazu nicht am Bein befestigt, sondern an einem Arm, da dieser beim Laufen genauso wie das Bein einem charakteristischen Bewegungsablauf folgt und ein Armzyklus mit einem Beinzyklus zusammenhängt, also ähnliche Folgerungen gezogen werden können.

Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt aus den Messwerten. Hieran kann man die Schrittfrequenz abschätzen.



**Abbildung 14: Messdaten im Pedometer-Versuch (a[res])**

Es sind innerhalb von ca. 7,5 Sekunden 16 Spitzen, oder Schritte erkennbar, was bedeutet, dass sich der Proband gemächlich mit ca. 2 Schritten pro Sekunde bewegt hat.

## 5.4 Messgerät für die Lage eines Objekts

Bei dem Lagesensor geht es darum festzustellen, in welchem Winkel sich ein Gerät zum Bezugssystem befindet. In dem vorliegenden Fall ist das Bezugssystem die Erde. Wenn man einen normalen Beschleunigungssensor als Lagesensor benutzt, macht man sich die Eigenschaft zu Nutze, dass Beschleunigungssensoren immer die Erdanziehungskraft anzeigen, selbst wenn sie sich in Ruhe befinden. Befindet sich ein Beschleunigungssensor auf einer waagerechten Platte wie im ersten Versuch, dann wirkt nur in Z-Richtung eine Beschleunigung von 1 g. Rollt und schwenkt man das Gerät um den Schwerpunkt, verteilt sich die gemessene Beschleunigung so auf die verschiedenen Messachsen, dass der Betrag der Summe aller Beschleunigungsvektoren wieder 1 g ergibt. Da die Achsen zueinander im 90° Winkel stehen kann man mit Hilfe der Winkel-funktionen die Lage des Sensors zur Gewichtskraft ermitteln.

Im Versuch soll der Lagesensor als Joystick benutzt werden um einen Würfel zu steuern. Als Sensibilität reichen in diesem Versuch 2 g, da unter normalen Umständen keine Messachse mehr als 1 g misst.

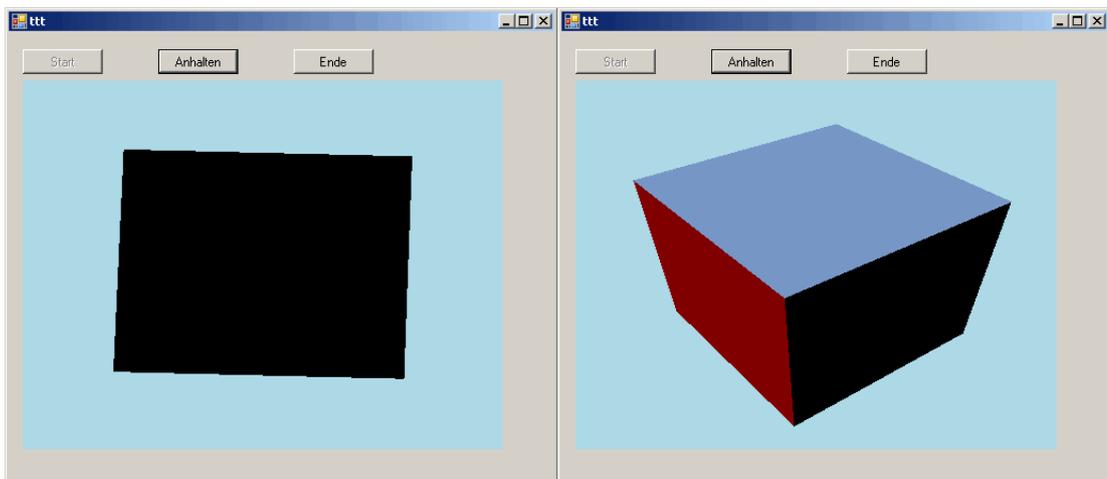


Abbildung 15: Kubus im Grundzustand (links) und gedreht (rechts)

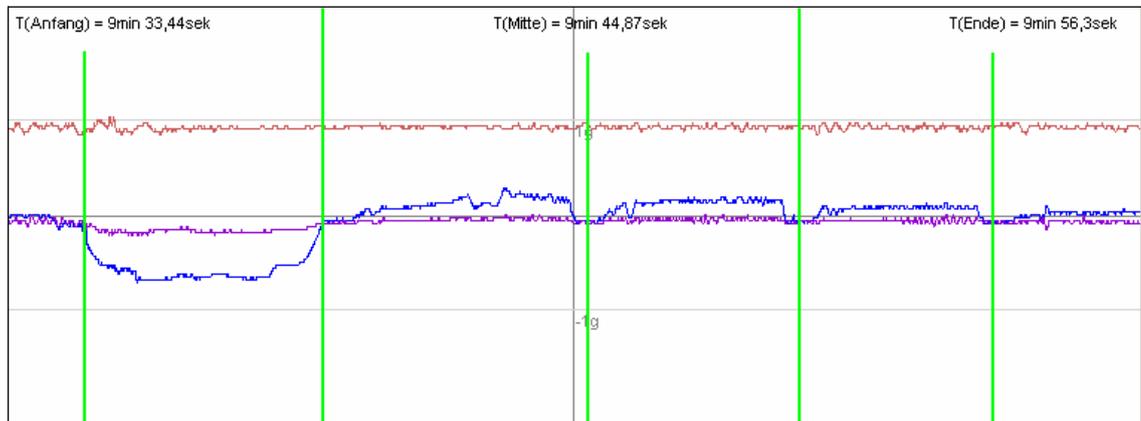
Es können mit der zur Verfügung stehenden Versuchsanordnung keine Drehbewegungen um die Achse, an der sich das Gerät kalibriert, nachvollzogen werden. Dafür sind Neigungen um die X- und Y-Achse messbar. Die Drehwinkel, um die sich die Versuchsanordnung verändert hat, können elementargeometrisch mit den Anweisungen

$$\begin{aligned} \text{Angle\_Pitch} &= \text{Atan}(A_x / \text{Math.Sqrt}(A_y^2 + A_z^2)) \\ \text{Angle\_Roll} &= \text{Atan}(A_x / \text{Math.Sqrt}(A_x^2 + A_z^2)) \end{aligned}$$

ermittelt und in der Grafik dargestellt werden (Beweis siehe Anlage).

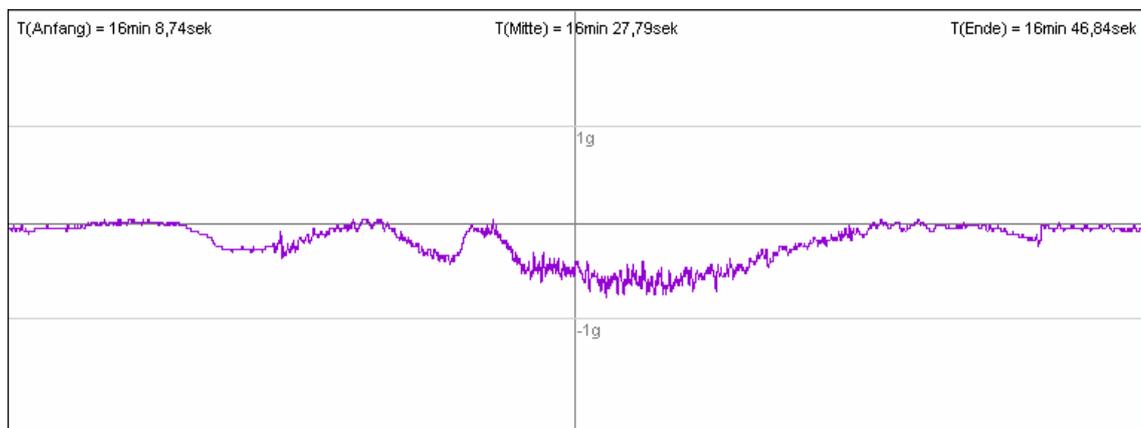
## 5.5 Die Fahrt mit dem Auto

Ziel dieses Versuchs ist es, charakteristische Stellen einer Autofahrt anhand des a-t-Diagramms aus den Messwerten wieder zu erkennen. Einen besonderen Wiedererkennungswert haben dabei zum Beispiel Vollbremsungen, enge, schnell gefahrene Kurven oder auch lästiges Stehen vor roten Ampeln.



**Abbildung 16: Beschleunigungsvorgang (Z rot, X blau, Y lila)**

Man kann 3 „Berge“ der blauen Kennlinie, die für die Beschleunigung in X-Richtung steht, zwischen dem 2. bis 5. grünen Balken erkennen (Abbildung 16). Die Täler sind in diesem Fall nichts anderes als die Beschleunigungslöcher, die auch beim Fahren spürbar sind, wenn von einem Gang in den nächsten geschaltet wird. Für eine klassische Vollbremsung ist charakteristisch, dass es eine starke Beschleunigung in negative X-Richtung gibt. Die anderen Richtungskanäle werden von diesem Vorgang nur wenig beeinflusst. In einer engen, mit starker Beschleunigung gefahrenen Kurve kommt man zu einem Diagramm ähnlich Abbildung 17.



**Abbildung 17: Harte Rechtskurve (Y-Richtung)**



jedem eine intuitive Spielsteuerung ermöglichen. Diese neue Form der Bedienung ermöglicht ganz neue Spielprinzipien. So kann bei dem mit der Konsole standardmäßig mitgelieferten Spiel „Wii Sports“ der Spieler Bewegungen aus bestimmten Sportarten nachahmen, die auf die Spielfigur übertragen werden [12].

Der bekannte Hardwarehersteller „Logitech“ verkündet auf seiner Website, dass der „MX Air“, eine Art Maus, Handbewegungen erkennt und Anweisungen wie Lautstärkeregelung, Musiktitel wechseln daraus ableitet [13].

Mit Hilfe eines 6 DOF-Sensors kann man Wackler bei Fotoapparaten nicht nur erkennen, sondern auch die Handbewegung aufzeichnen und die Daten bereitstellen, die benötigt werden um den Verwackler zu kompensieren. Um diese Funktion zu illustrieren zeigt Abbildung 19 Fotos von verwackelten Bildern von Lichtpunkten und den Bewegungspfad, den ein Sensor aufgezeichnet hat.



**Abbildung 19: Gemessene Zitterbewegung bei Bildwacklern [2]**

Die Anwendungsbereiche sind, wie man erkennen kann, schon jetzt sehr breit gefächert. Durch niedrige Preise sind diese Sensoren jetzt für viele verschiedene Anwendungen erschwinglich und somit weiten sich die Anwendungsmöglichkeiten immer weiter aus. Auch die bisher angesprochenen Gebiete sind, was Möglichkeiten angeht, noch nicht erschöpft. Findige Ingenieure sind dabei ein intelligentes Rücklicht für Motorräder zu entwickeln, das bei einem normalen Bremsmanöver leuchtet und bei einer Vollbremsung blinkt.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors [5].....	5
Abbildung 2: Vereinfachtes Prinzip eines Beschleunigungssensors [7].....	5
Abbildung 3: Basisstruktur eines kapazitiven Sensors [5].....	6
Abbildung 4: Dreiachsen Beschleunigungssensor mit nur einer Prüfmasse [5] ..	6
Abbildung 5: Detailansicht eines Beschleunigungssensors [2] .....	7
Abbildung 6: Ersatzschaltbild .....	8
Abbildung 7: Beschaltung des Beschleunigungssensors[7].....	10
Abbildung 8: Mikrocomputermodul mit AVR32 [9].....	11
Abbildung 9: Das Modul.....	11
Abbildung 10: Das Hauptfenster .....	14
Abbildung 11: Die serielle Schnittstelle ansprechen .....	14
Abbildung 12: Messwerte über ein Terminalprogramm.....	15
Abbildung 13: Der freie Fall (Z rot, X blau, Y lila) .....	16
Abbildung 14: Messdaten im Pedometer-Versuch (a[res]).....	17
Abbildung 15: Kubus im Grundzustand (links) und gedreht (rechts) .....	18
Abbildung 16: Beschleunigungsvorgang (Z rot, X blau, Y lila) .....	19
Abbildung 17: Harte Rechtskurve (Y-Richtung) .....	19
Abbildung 18: künstlicher Horizont eines Flugzeugs [2].....	20
Abbildung 19: Gemessene Zitterbewegung bei Bildwacklern [2] .....	21

## 8 Quellen

- [1] Paul A. Tipler, Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Seite 26-27
- [2] Stefan Tauschek, Monolithische Siliziumkreisel, in: Elektor 12/2007, Seite 70-74
- [3] Stefan Tauschek, Monolithische Gyroskope, in: Technology Transfer, Heft 2 Oktober 2007, Seite 2-4
- [4] <http://de.wikipedia.org/> (Piezoelektrischer Widerstand, [http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoresistiver\\_Effekt](http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoresistiver_Effekt))
- [5] M. Elwenspoek, R. Wiegerink, Mechanical Microsensors, Springer Verlag, Kapitel 7.1
- [6] Texas Instruments, Accelerometers and how they Work
- [7] Freescale Semiconductor, Technical Data Document Number: MMA7260QT DRev 3, 06/2007
- [8] <http://www.atmel.com/> (AVR32 32-bit MCU, <http://www.atmel.com/products/AVR32/>)
- [9] <http://alvidi.de/> (AVR32 Modul, [http://alvidi.de/avr32\\_modul.html](http://alvidi.de/avr32_modul.html))

- [10] <http://www.atmel.com> (EVK1100 Schematics),  
[http://www.atmel.com/dyn/products/tools\\_card.asp?tool\\_id=4114](http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=4114))
- [11] Scantec, Siliziumkreisler, in: Technology Transfer, Heft 1 Februar 2008, Seite 4
- [12] <http://www.nintendo.de/> (Technische Details,  
[http://www.nintendo.de/NOE/de\\_DE/systems/technische\\_details\\_1072.html](http://www.nintendo.de/NOE/de_DE/systems/technische_details_1072.html))
- [13] <http://www.logitech.com> (MX Air™ Rechargeable Cordless Air Mouse,  
[http://www.logitech.com/index.cfm/mice\\_pointers/mice/devices/3443&cl=de,de](http://www.logitech.com/index.cfm/mice_pointers/mice/devices/3443&cl=de,de))

## 9 Anhang (CD)

### Quellcode

- PC-Anwendung AccAnalyser (mit Quellcode)

### Beweise

- Ermittlung der Lage des Sensors

### Referenzen

- M. Elwenspoek, R. Wiegerink, Mechanical Microsensors, Springer Verlag, Kapitel 7.1
- Stefan Tauschek, Monolithische Siliziumkreisler, in: Elektor 12/2007, Seite 70-74
- Technical Data Document Number: MMA7260QT DRev 3, Freescale Semiconductor, 06/2007

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den .....

Ort

Datum

.....

Unterschrift des/der Kollegiaten/Kollegiatin