

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Empirische Evaluierung der Güte von Smartphonesensoren

Andreas Gabel, Lennart Lorenz

Studienprojekt – 31. Januar 2014.
Lehrstuhl für Kryptologie und IT-Sicherheit.

Gutachter: Dr. Christopher Wolf
Betreuer: Dipl. Inf. Sebastian Uellenbeck

Zusammenfassung

Über die Genauigkeit von Smartphone Sensoren ist derzeit nicht viel bekannt, dabei ist sie von großer Bedeutung für die Entwicklung qualitativ hochwertiger sensorbezogener Anwendungsszenarien. Diese Arbeit thematisiert daher die Ermittlung der Genauigkeit von Sensoren in Android und BlackBerry Smartphones und Tablet-PCs. Hierzu wurde die Sensorbenchmark Applikation *SensMark* weiterentwickelt und eine entsprechende Internetplattform eingerichtet, die die Daten der Applikation für Analysen aufbereitet. Die gewonnen Ergebnisse werden schließlich in einer umfassenden Evaluation ausgewertet. Dabei hat sich u. a. herausgestellt, dass Geräte in höheren Preisklassen mehr und bessere Sensoren besitzen als günstigere Modelle. In durchgeführten Versuchsreihen wurde festgestellt, dass es unter den Sensoren starke Unterschiede bezüglich der Korrektheit der gemessenen Sensordaten gibt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
2	Weiterentwicklung der SensMark Applikation	9
2.1	Serverkommunikation und Anpassung der Datenbank	9
2.2	Verbesserungen des Benchmarks	10
2.3	Veröffentlichung	12
3	Aufbau der SensMark Webseite	15
3.1	Gliederung der Webseite	15
3.2	Sensor Benchmarks	17
3.2.1	Sortierung nach Sensortyp	17
3.2.2	Sortierung nach Gerät	18
3.2.3	Sortierung nach SensMark ID	19
3.2.4	Benchmark Detailseite	20
3.3	Statistiken	22
4	Evaluation	27
4.1	Datenbasis	27
4.2	Fake	32
4.3	Sensortypen	34
4.3.1	Accelerometer	39
4.3.2	Gyroskop	45
4.3.3	Magnetic Field Sensor	48
4.4	Sensorhersteller	54
4.5	Geräte	57
4.6	Sonstiges/Auffälligkeiten	58
5	Versuche	61
5.1	Getestete Geräte	61
5.2	Accelerometer und Linear Acceleration	62
5.2.1	Aufbau und Durchführung	62
5.2.2	Ergebnis	68
5.3	Magnetic Field	79
5.3.1	Aufbau und Durchführung	79
5.3.2	Ergebnis	80

5.4	Light	90
5.4.1	Aufbau und Durchführung	90
5.4.2	Ergebnis	90
5.5	Pressure	93
5.5.1	Aufbau und Durchführung	93
5.5.2	Ergebnis	95
6	Fazit	97
6.1	SensMark Evaluation	97
6.2	Versuche	98
6.3	Zusammenhang	99
6.4	Zukünftige Weiterentwicklungen	101
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	105
	Literaturverzeichnis	107

1 Einführung

Aktuelle Smartphones und Tablet Computer besitzen eine Vielzahl an MEMS (micro-electro-mechanical system) Sensoren, die von verschiedensten Anwendungen und Services für die unterschiedlichsten Zwecke eingesetzt werden. So wird in [10] beschrieben wie mobile Sensoren künftig viele Bereiche unserer Wirtschaft revolutionieren werden, wie z. B. in Unternehmen, im Gesundheitswesen, in sozialen Netzwerken, in der Umweltüberwachung sowie im Verkehrswesen. Während heutzutage Smartphonesensoren noch hauptsächlich dazu genutzt werden kleinere Funktionen in unseren Geräten zu übernehmen, um uns somit den Alltag und die Bedienung des Geräts zu erleichtern, setzen sich Forscher mit weit größeren Anwendungsszenarien für den Einsatz der Sensoren auseinander. In [4] wurde gezeigt, dass der Beschleunigungssensor des Apple iPhones sehr gut in der Lage ist Erdbeben zu messen und auch im Vergleich zu standardisierten Force-Balance Accelerometern aus der Seismologie mithalten kann. Generell ist jedoch wenig über die Genauigkeit von Smartphonesensoren bekannt und durch die Fragmentierung der verschiedensten Geräte auf dem Markt, durch alle Preisklassen hinweg, lässt sich nur schwer abschätzen wie präzise Sensoren messen und wie verbreitet einzelne Sensorarten überhaupt sind. In [6] wurde eine Sensorbenchmark Applikation namens *SensMark* für Android Geräte entwickelt, die genau dieser Fragestellung nachgeht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde *SensMark* weiterentwickelt und eine zugehörige Internetplattform eingerichtet, die nach Veröffentlichung im Februar 2013 die Daten aller per *SensMark* durchgeführten Benchmarks aufbereitet und die Ergebnisse jedermann zur Verfügung stellt. Die dort gesammelten Informationen wurden auch schon in anderen Arbeiten verwendet, u. a. in [11] zur Bestimmung der Ausrichtung von Smartphones im Bereich der Geoinformatik zur Augmented Reality Visualisierung mittels GPS-Koordinaten platzierter Objekte. Des Weiteren werden hier die gesammelten Daten evaluiert und für bestimmte Sensoren zusätzliche Versuche durchgeführt, in denen die günstigen Sensoren in Smartphones mit teuren standardisierten Sensoren verglichen werden. Ziel unserer Arbeit ist es einen Überblick über die Genauigkeit der mobilen Sensoren zu bieten und mittels der entwickelten Plattform auch in Zukunft Aufschluss über die Messgenauigkeit neuer und stets weiterentwickelter Sensoren zu liefern. Dafür haben wir über die *SensMark* Applikation Informationen zu den jeweils verbauten Sensoren eines Geräts ausgelesen, um u. a. Sensoren mit der besten Messgenauigkeit zu bestimmen und einen Überblick über die Vielzahl an Sensorherstellern zu erlangen. Darüber hinaus stellt sich auch die Frage ob teure Geräte auch gleichzeitig bessere Sensoren beinhalten als günstigere Geräte und wie viele bzw. welche Sensoren im Durchschnitt in einem Smartphone oder Tablet stecken.

Im Folgenden wird dementsprechend zunächst auf die Weiterentwicklung der *Sens-Mark* Applikation eingegangen, wobei die Schwerpunkte auf die Client/Server Kommunikation sowie die Verbesserungen des Benchmarks gelegt werden. Im Anschluss wird die Internetplattform beschrieben, auf der die Ergebnisse der App einzusehen sind, besonderer Fokus wird hier auf die Betrachtung der Ergebnisse sowie die Fragmentierungsstatistiken gesetzt.

Sodann wird die Evaluation, der über die Plattform erfahrenen Informationen, thematisiert. Hier werden die gesammelten Ergebnisse von verschiedenen Smartphones dargestellt und Auffälligkeiten angeführt. Im Mittelpunkt steht die Auswertung der Sensortypen Accelerometer, Gyroskop und Magnetic Field.

Im darauffolgenden Kapitel wird auf die Vergleiche eingegangen, die wir mit standardisierten Sensoren vorgenommen haben, dabei werden Accelerometer, Magnetfeld-, Licht- und Luftdrucksensoren von verschiedenen Geräten in Bezug auf die Zuverlässigkeit der jeweils gemessenen Werte getestet.

Abschließend werden in einem Fazit die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend wiedergegeben sowie ein Ausblick auf denkbare Weiterentwicklungen gegeben.

2 Weiterentwicklung der SensMark Applikation

Dieses Kapitel thematisiert die Erweiterungen und Optimierungen, die im Rahmen dieses Projekts an der SensMark Applikation vorgenommen wurden. Besondere Berücksichtigung galt hierbei der Überarbeitung der Datenbank zum Hochladen der gemessenen Sensordaten und der jeweiligen Geräteinformationen.

2.1 Serverkommunikation und Anpassung der Datenbank

Zur Durchführung einer Studie über Smartphone Sensoren benötigt die SensMark App eine Funktion zur Datenübertragung an einen zentralen Server, dies wird durch eine bestehende Internetverbindung per WLAN oder mobilem Datennetz per POST-Methode realisiert. Um das Hochladen der Daten vernünftig umzusetzen und um möglichst alle wichtigen Informationen des Benchmarks per Upload zu erhalten, war es notwendig das Datenbankschema der Applikation neu aufzubauen. In der neuen Version werden nun alle gemessenen Events pro Sensorachse in chronologischer Reihenfolge gespeichert, diese Werte sind eindeutig einer bestimmten Initialisierung oder eines bestimmten Benchmarks eines jeweiligen Sensors zuzuordnen. Im Vergleich zur alten Version wurden vorher lediglich alle jeweils gemessenen Werte einmal gespeichert. Die neue Struktur erlaubt es nach dem Upload auch serverseitig den Verlauf der gemessenen Werte nachzuvollziehen und Besonderheiten oder Messfehler besser analysieren zu können. Des Weiteren werden pro Initialisierung und Benchmark für jede Achse das gemessene Minima, Maxima, die niedrigste Auflösung, die minimale zeitliche Differenz zweier aufeinanderfolgender Messwerte, die durchschnittliche zeitliche Differenz, die Standardabweichung der zeitlichen Differenz, die entsprechende Punktzahl für das zeitliche Interval in dem Events gemessen werden, sowie die Anzahl der Events und der entsprechende Zeitstempel gespeichert. Beim Benchmark wird zusätzlich pro Achse das arithmetische Mittel und die Standardabweichung der gemessenen Werte innerhalb der zehn Sekunden andauernden Bewertungsphase, sowie die berechneten Punktzahlen der einzelnen Bewertungskriterien gespeichert. Außerdem wird noch das absolute Minimum und Maximum, zeitliche Verzögerung und niedrigste Auflösung pro Sensor aus allen durchgeführten Prozessen gespeichert, dies dient allerdings nur als Information und Vergleichswert und fließt nicht mit in die Bewertung ein, um einen fairen Vergleich zwischen einzelnen Geräten zu gewährleisten, soll ein Sensor nicht besser abschneiden dürfen, nur weil er häufiger getestet

wurde als andere.

Alle weiteren Informationen, welche mit an den Server geschickt werden, sind geräte-spezifische Daten, die direkt aus dem Gerät auszulesen sind, wie Brand, Manufacturer, Product, Model, Device, Hardware, Display, Tags, Type und Host. Die installierte Android Version wird über die Variablen Release, SDK und SDKINT ermittelt, auch wird die installierte Version der Applikation übertragen und der Ladestand des Akkus, sowie ob er zu dem Zeitpunkt des Tests geladen wurde. Die Geräteidentifizierung geschieht anhand der WLAN MAC-Adresse, welche mittels eines angehängten Salt und anschließend durch die SHA-512 Hashfunktion umgewandelt als eindeutige ID dient, die auch bei jedem Hochladen mit übertragen wird. Um Zugriff auf die WLAN MAC-Adresse zu bekommen, musste die entsprechende Berechtigung gesetzt werden. Das Identifizieren der Geräte dient dazu verschiedene Benchmarks einem Gerät zuweisen zu können, auch nach Betriebssystem Updates, hierdurch lassen sich Messergebnisse vor allem von virtuellen Sensoren in Abhängigkeit der Android Version vergleichen. Das Hochladen der geräte- und sensorspezifischen Daten, die einfach aus dem Gerät auszulesen sind, wird schon direkt beim Start der Applikation ausgeführt, dies erlaubt der Studie eine bessere Statistik über die Fragmentierung von Android und die Verbreitung der Geräte sowie der jeweiligen Sensoren, auch ohne die Durchführung einer Initialisierung oder eines Benchmarks.

Jede Initialisierung und jeder Benchmark muss separat hochgeladen werden, da durch die teilweise große Anzahl gemessener Werte pro Sensor, der reservierte Arbeitsspeicher der Applikation für die generierte JSON Zeichenkette nicht auf jedem Gerät ausreicht. Daher und aus dem Grund das Intervall zwischen Initialisierung und Benchmark besser vergleichen zu können, wurde die Dauer einer Initialisierung von 20 Sekunden auf 10 Sekunden, wie auch beim Benchmark, gesenkt. Nach jedem erfolgreichen Hochladen, wird dies bei der jeweiligen Initialisierung beziehungsweise des jeweiligen Benchmarks in der Datenbank gespeichert, um ein erneutes Hochladen der Daten zu vermeiden.

Jedes Mal wenn das Gerät Daten an den Server sendet, sei es beim Appstart oder nach einem Benchmark, schickt der Server eine Antwort über den Status der Daten zurück, z. B. ob alle Daten erfolgreich in der Server-Datenbank gespeichert wurden. Gleichzeitig wird auch eine vom Server erzeugte Geräteidentifikationsnummer und die Durchschnittspunktzahlen der fünf besten Geräte pro Sensor mit übertragen. Die Punktzahlen der Sensoren bilden die Basis für das generierte Balkendiagramm in der Ergebnisübersicht und dienen somit dem Vergleich der Benchmarkergebnisse zwischen den verschiedenen Geräten, sodass man die Qualität eines Sensors auf Grundlage stets aktueller Daten besser einordnen kann.

2.2 Verbesserungen des Benchmarks

Damit der Studie möglichst viele Daten zu Grunde liegen wurde ein allgemeiner Benchmark eingeführt, der alle Sensoren, außer Licht- und Annäherungssensor gleich-

zeitig getestet. Die beiden zuletztgenannten Sensoren werden nicht in den allgemeinen Benchmark miteinbezogen, da ihr individueller Durchführungsprozess sich von dem Benchmarkprozess anderer Sensoren unterscheidet.

Es hat sich herausgestellt, dass man virtuelle Sensoren nicht zur gleichen Zeit aktivieren sollte, wie die physikalischen Sensoren, auf dessen Messdaten virtuelle Sensoren beruhen, da in diesen Fällen nur einer von beiden Sensoren Daten ausgibt. Aus diesem Grund werden bei Initialisierung und Benchmark in den ersten 10 Sekunden die physikalischen und in den anschließenden 10 Sekunden die virtuellen Sensoren aktiviert und analysiert.

Die Berechnung der Standardabweichung für aufeinanderfolgende Messwerte σ wurde durch eine Rekursionsformel dahingehend verändert, dass der Wert unter der Wurzel niemals negativ werden kann.

$$M_1 = x_1, \quad M_k = M_{k-1} \oplus (x_k \ominus M_{k-1}) \odot k, \quad (2.1)$$

$$S_1 = 0, \quad S_k = S_{k-1} \oplus (x_k \ominus M_{k-1}) \otimes (x_k \ominus M_k), \quad (2.2)$$

$$\text{für } 2 \leq k \leq n, \text{ mit } \sigma = \sqrt{S_n / (n - 1)}. \quad (2.3)$$

(Rekursionsformel, Knuth, Donald E. [9])

Um die Qualität der gelieferten Benchmarkergebnisse zu verbessern, haben wir eine Überprüfung zur Erkennung einer Beeinflussung des Sensors durch äußere Kräfte während des Benchmarks implementiert. Als beste Erkennung solcher *Fakes* erwies sich nach verschiedenen Tests, bei denen das Gerät unterschiedlich stark und oft bewegt wurde, obwohl es während des Prozesses still auf einer ebenen Fläche liegen soll, der Algorithmus 2.2.1.

Dieser Algorithmus ist abhängig von der jeweiligen Standardabweichung und gibt nur dann Aufschluß ob es ein korrekt durchgeführter Benchmark ist, wenn die Standardabweichung kleiner eins ist. Bei einer hohen Standardabweichung lässt sich nur sehr schwer beurteilen, ob es ein Fake oder ein sehr ungenauer Sensor ist. In späteren Analysen hat sich herausgestellt, dass dies vorallem beim Orientierungssensor der Fall ist, da dieser oft über mehrere Grad schwankt und sich auch stark durch die Umgebung beeinflussen lässt. Auf die Auswertung von nicht ordnungsgemäß durchgeführten Benchmarks wird in Kapitel 4.2 genauer eingegangen.

Ist die lokale Abweichung eines Messwerts, innerhalb des Algorithmus, größer als die doppelte Standardabweichung wird ein prozentualer Wert berechnet, der die Wahrscheinlichkeit eines Fakes beurteilt. Aus allen gewonnenen Wahrscheinlichkeiten wird pro Sensorachse ein Mittelwert berechnet. Als Fakewert wird schließlich nur die höchste Wahrscheinlichkeit gespeichert die jeweils auf einer Achse berechnet wurde, sofern der Sensor mehrere Achsen besitzt.

$$f = \max\{f_x, f_y, f_z\} \quad (2.4)$$

Bei der Bewertung des Orientierungssensors werden Berechnungsfehler der Standardabweichung nun dadurch vorgebeugt, indem vor dem Benchmark die Orientierung

Algorithm 2.2.1: FAKE BENCHMARK ERKENNUNG**Data:** Array der Messwerte $A[1 \dots n]$, Standardabweichung σ , $f_x \leftarrow 0$, $z_x \leftarrow 0$ **Result:** f_x gemittelte prozentuale Wahrscheinlichkeit eines Fakes auf der X-Achse

```

1 begin
2   for  $i \leftarrow 0$  to length[A] do
3     /* Lokale Abweichung */
4      $a \leftarrow \left| A[i] - \frac{1}{n} \sum_{1 \leq k \leq n} A[k] \right|$ ;
5     if  $a > 2\sigma$  then
6        $p \leftarrow 1 - \frac{1}{a\sigma}$ ;
7       if  $p > 0$  then
8          $f_x \leftarrow f_x + p$ ;
9          $z_x \leftarrow z_x + 1$ ;
10    if  $z_x = 0$  then
11       $z_x \leftarrow 1$ ;
12   $f_x \leftarrow \frac{f_x}{z_x}$ ;

```

des Geräts dahingehend überprüft wird, ob sie sich innerhalb eines Schwellwerts von $\pm 30^\circ$ Richtung Norden befindet. Ist dies der Fall, so würde eine schlechte Standardabweichung berechnet werden, sobald der Sensor Werte zwischen 0° und 359° ($0^\circ = \text{Nord}$) misst, da die Standardabweichung über das komplette Spektrum gebildet wird, obwohl es tatsächlich nur 1° abweichen würde. Um dies zu verhindern, wird der Nutzer nach einer kurzen Überprüfung aufgefordert das Gerät um ca. 180° zu drehen, sofern es ungefähr in nördliche Richtung liegt.

Letztlich war auch die Punktevergabe verbesserungswürdig, da es oft zu große Unterschiede zwischen den Punkten unterschiedlicher Geräte und Sensoren gab, auch waren manche Punktzahlen besonders bei virtuellen Sensoren teilweise so hoch, dass es aufgrund der hohen Ziffernfolge schwierig fiel die Zahl zu bestimmen. Um dies im Rahmen eines geeigneten Spektrums zu halten, werden alle Punktzahlen, ausgenommen derer, die sich auf die Anzahl gemessener Werte beziehen, schließlich mit Hilfe des dekadischen Logarithmus berechnet und liegen nun im fünfstelligen Bereich und sind somit auch für den Nutzer einfach zu lesen.

2.3 Veröffentlichung

Die Applikation wurde im Google Play Store und zusätzlich für neue BlackBerry Geräte portiert und in BlackBerry World veröffentlicht. Die Applikation ist wie gehabt ab Android Version 2.1 lauffähig und läuft somit auch unter BlackBerry 10

und PlayBook OS 2.0. Diese Betriebssysteme von BlackBerry beinhalten einen Android Emulator mit der Version 2.3.3, mit dem portierte Android Applikationen auf BlackBerry Geräten laufen. Durch die Portierung konnten somit auch die Benchmarkergebnisse des BlackBerry PlayBook, Z10, Z30, Q5 und Q10 gewonnen werden.

3 Aufbau der SensMark Webseite

In diesem Kapitel wird die Webseite beschrieben, welche zur Auswertung und Betrachtung der gewonnenen Daten und Ergebnisse entwickelt wurde. Insbesondere wird im Folgenden auf Inhalt und Aufbau der Seite eingegangen.

Über die URL `http://sensmark.info` gelangt man zur Internetpräsenz der Applikation, welche auf der Open-Source Weblog Software WordPress basiert und ein einfach zu konfigurierendes und erweiterbares Content Management System bietet. Darauf aufbauend wurden eigene PHP Seiten implementiert, die an entsprechender Stelle die über die App gewonnenen Daten anzeigen. Die Inhalte sind wie auch in der Applikation in Englischer Sprache verfasst.

3.1 Gliederung der Webseite

Die Webseite beinhaltet neben der Startseite acht weitere Bereiche, die über die Navigationsleiste aufrufbar sind. Diese Bereiche sind wie folgt gegliedert:

Home Auf der Homepage der Projektseite befindet sich ein kurzer Informationstext und eine entsprechende Infografik zur SensMark Applikation, außerdem werden Downloadlinks zur App angezeigt, welche den Besucher unter anderem direkt in Googles *Play Store* oder in *BlackBerry World* führen (Abbildung 3.1).

News Die WordPress Blogfunktion wird hier genutzt um Besucher über Applikations Updates und sonstige Ankündigungen bezüglich des Projekts zu informieren.

SensMark App Auf dieser Seite wird die Funktion und der Zweck der SensMark Applikation kurz beschrieben. Die App steht zum Download als *apk* Datei zur Verfügung und wird zusätzlich in die entsprechenden App Stores von Google und BlackBerry verlinkt, alternativ kann der Download auch per Scannen eines QR Codes gestartet werden. In einer Bildergalerie werden fünf Screenshots der App für Android Smartphones und Tablets gezeigt.

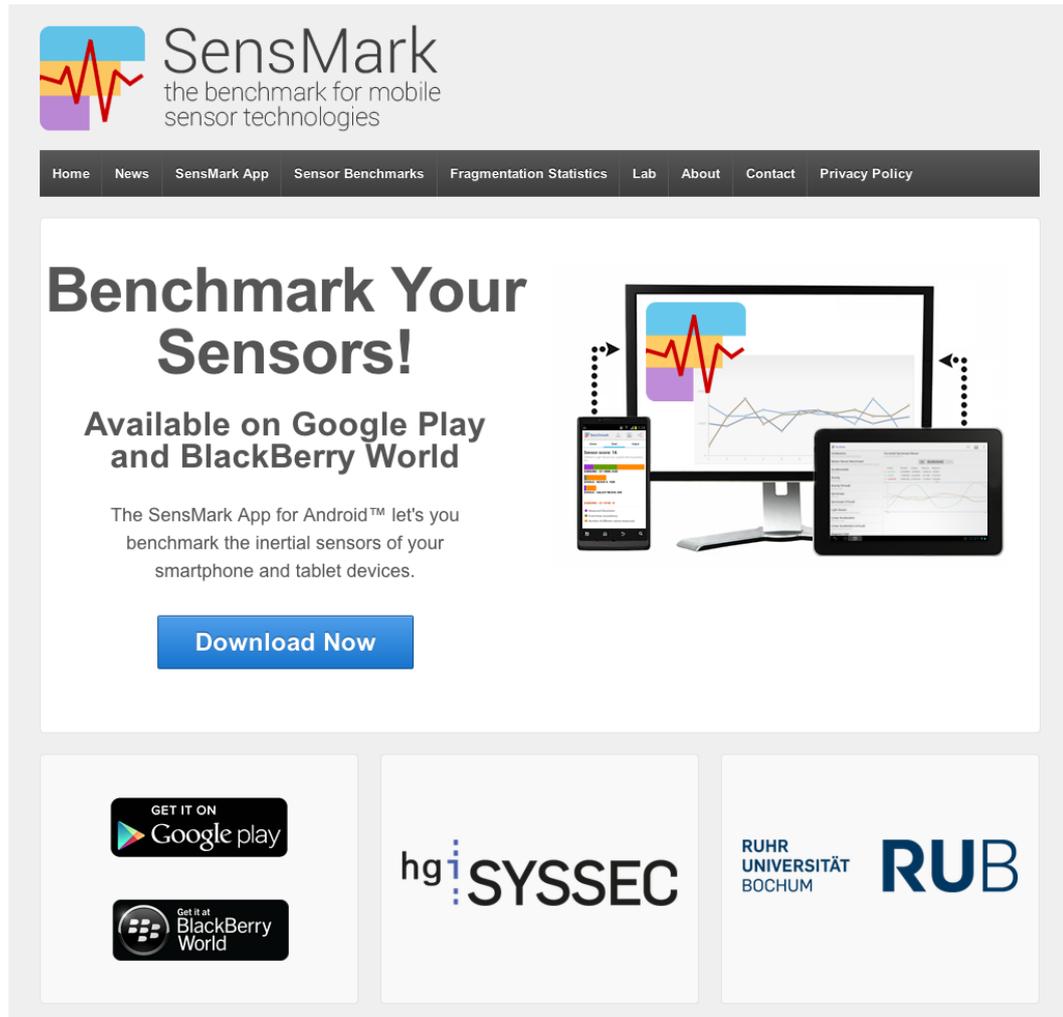


Abbildung 3.1: Startseite der SensMark Webseite.

Sensor Benchmarks In diesem Abschnitt lassen sich alle gewonnenen Ergebnisse der Applikation aller Geräte einsehen, weitere Informationen zum Aufbau hierzu werden in Kapitel 3.2 behandelt.

Fragmentation Statistics Hier befinden sich die erhobenen Statistiken bezüglich der Fragmentierung und Verbreitung von Android Geräten. Dem Besucher stehen folgende Statistiken zur Auswahl: Android Fragmentierung, Hersteller Fragmentierung, Marken Fragmentierung, Gerätemodell und Sensor Hersteller Fragmentierung sowie Sensor Modell Fragmentierung pro Sensortyp. In Kapitel 3.3 werden die einzelnen Diagramme genauer beschrieben.

Lab In diesem Bereich der Webseite befinden sich Fotos und ein anderthalb minütiges YouTube Video von unseren Versuchsreihen auf dessen Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln genauer eingegangen wird.

About Diese Seite informiert über das Projekt und verlinkt u. a. die Bachelor Arbeit in der die SensMark Applikation entwickelt wurde.

Contact Unter dieser Rubrik befinden sich unsere Email Adressen, das Impressum und ein Haftungsausschluss.

Privacy Policy Diese Seite beinhaltet eine kurze Datenschutzerklärung und ist im *Play Store* an entsprechender Stelle als solche verlinkt, sie beschreibt welche Daten die SensMark Applikation sammelt und an den Web Server zur Auswertung gesendet werden.

3.2 Sensor Benchmarks

Die Einsicht der Benchmarkergebnisse ist der Hauptbestandteil der Webseite und kann auf drei verschiedenen Wegen geschehen, wie Abbildung 3.2 zeigt, lassen sich die jeweiligen Benchmarks nach Sensortyp, Gerät oder nach der vom SensMark Server vergebenen Geräte ID einsehen.

3.2.1 Sortierung nach Sensortyp

Wählt der Besucher der Seite einen Sensortyp, wie z. B. Accelerometer oder Gyroskop, so erhält er zu Beginn der neuen Seite ein Balkendiagramm mit den besten zehn Benchmarkergebnissen eines Geräts. Um mehrfaches Auftreten eines Geräts zu vermeiden, wurde hierbei das arithmetische Mittel der jeweiligen Ergebnisse pro Gerät gebildet und somit Geräte bzw. Sensoren des selben Typs zusammengefasst. Es wird jeweils die Gesamtpunktzahl und auch die Punktzahl der zu Grunde liegenden Bewertungskategorien angezeigt, um genau vergleichen zu können, welches Gerät in welcher Kategorie im Durchschnitt am besten abschneidet. Führt man den Mauszeiger über einen Balken des Diagramms wird die entsprechende Punktzahl in einem Tooltip angezeigt.

Unter dem Diagramm befindet sich eine Tabelle wie in Abbildung 3.3 mit allen Sensoren des gewählten Sensortyps, wie auch im darüberliegenden Balkendiagramm, nach Geräten zusammengefasst mit den Bewertungspunkten als arithmetisches Mittel. Die Tabelle besitzt die Spalten Sensor Name, Gerätemodell, Gesamtpunktzahl (\emptyset) und alle Teilpunkte (\emptyset). Die Einträge lassen sich je nach belieben pro Spalte auf- oder absteigend sortieren.

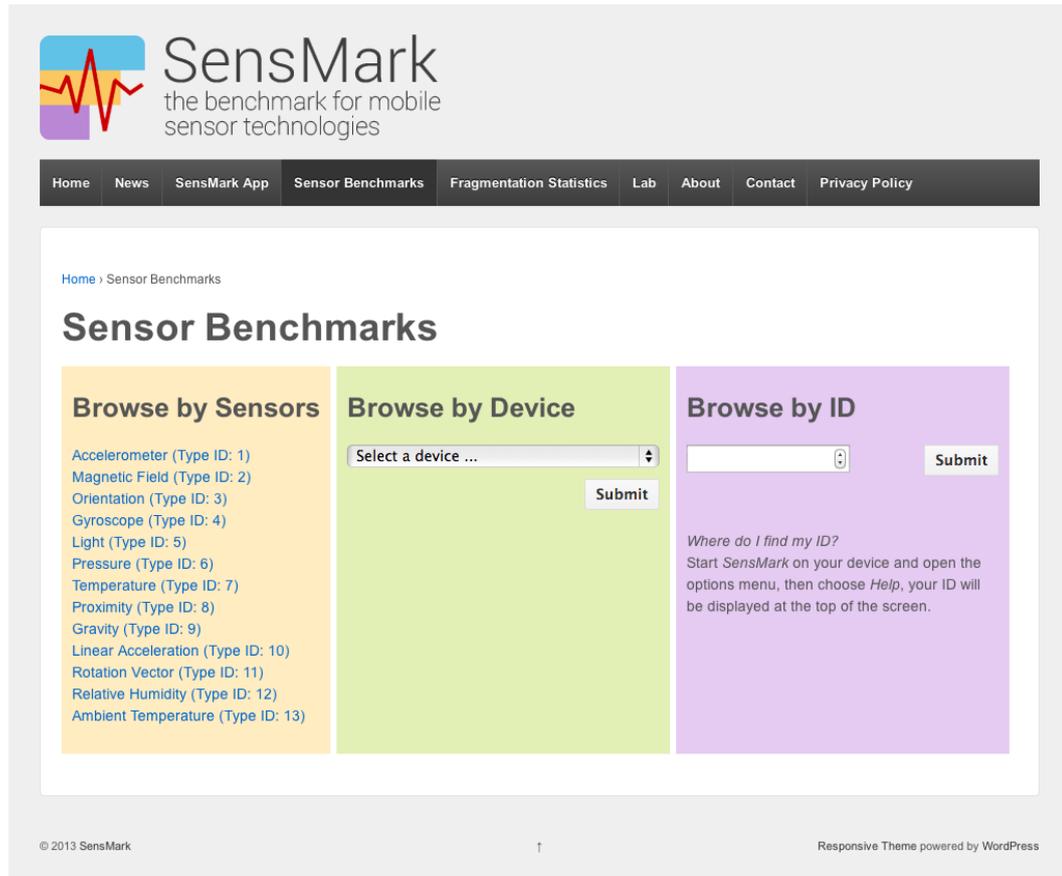


Abbildung 3.2: Aufteilung der Benchmark Ergebnisse.

Anschließend wird eine weitere Tabelle dargestellt, im Gegensatz zur oberen Tabelle werden nun alle Einträge einzeln, also nicht nach Gerätemodell zusammengefasst, und mit den jeweils exakten Werten angezeigt. Statt des Gerätemodells wird nun der Hersteller des Sensors in einer Spalte angezeigt und in einer weiteren die jeweilige Android Version unter welcher der Benchmark durchgeführt wurde. Wählt man einen Eintrag aus, so landet man auf der Detailseite des Benchmarks, mit allen relevanten Informationen, näheres dazu in Kapitel 3.2.4.

3.2.2 Sortierung nach Gerät

Möchte man die Benchmarkergebnisse eines bestimmten Gerätes betrachten, so lässt es sich aus einer Dropdown Liste, sortiert nach Marke und Modell, auswählen. Anschließend erhält man pro verbauten Sensor alle Benchmarks in einer separaten Tabelle, die mit dem gewählten Gerätetyp ermittelt wurden. Die Tabelle enthält folgende Spalten: Benchmark ID, Geräte ID, Gesamt- und Teilpunktzahl, Modellname,

Sensor Name	Device Model	Points Total (Mean)	Points Deviation Timestep (Mean)	Points Deviation Values (Mean)	Points Resolution (Mean)	Points Events (Mean)	Points Gr...
Accelerometer	BLACKBERRY BlackBerry Runtime for Android Apps	19176	3046	3216	6109	3356	3448
ST Accelerometer	SAMSUNG GT-I8160P	17490	2996	2552	7585	943	3414
Accelerometer	BLACKBERRY Q10	16952	3797	3084	6449	500	3122
LGE Accelerometer Sensor	GOOGLE Nexus 4	16889	3710	3332	4442	1921	3483
MPL Accelerometer	BLACKBERRY BlackBerry Runtime for Android Apps	16664	3594	3304	4447	1979	3341
MPL Accelerometer	SAMSUNG Galaxy Nexus	16538	3850	2916	5274	1015	3483
Accelerometer	BLACKBERRY Z10	16430	3472	2922	6170	462	3403
MPL accel	LGE LG-P940	16429	3535	3555	5264	502	3573
MPL Accelerometer	GOOGLE Nexus 10	16281	3203	3345	4520	1960	3253
K330 3-axis Accelerometer	SAMSUNG GT-I9505	16227	3358	3577	4741	1002	3549
MPL accel (BMA250)	HTC_EUROPE HTC One X+	16118	2685	3256	5344	1290	3543
BMA222 3-axis Accelerometer	SAMSUNG GT-I9070	16116	3016	3199	5344	979	3578
MPL Accelerometer	TOSHIBA AT10-A	15950	3436	3489	4440	1008	3577
MPL Accelerometer	RRCM	15896	3086	2886	5343	993	3588

Abbildung 3.3: Tabelle der besten Accelerometer Benchmarks im Durchschnitt absteigend nach Gesamtpunktzahl sortiert.

Produktname, Android Version, Sensor Name und Hersteller sowie weitere technische Spezifikationen. Da es sich in [6] herausgestellt hat, dass die technischen Spezifikationen nicht immer der Wahrheit entsprechen, teilweise auch gar nicht angegeben werden wie beim Lenovo Ideapad A1 07, lässt sich nicht erkennen, ob in den verschiedenen Baureihen eines Geräts unterschiedliche Sensoren verbaut werden. Klickt der Besucher der Seite eine Tabellenzeile an, so gelangt er auch hier auf die Detailseite des zugehörigen Benchmarks.

3.2.3 Sortierung nach SensMark ID

Über die SensMark ID, die vom Server pro Gerät vergeben wird, lassen sich alle Benchmarks betrachten, die mit einem bestimmten Gerät durchgeführt wurden. Die ID erhält man automatisch, sobald man die Applikation startet und eine Internetverbindung besteht, oder eine Verbindung zum Server erfolgreich aufgebaut wurde. Sie ist abhängig von der WLAN MAC-Adresse und somit nahezu eindeutig zuweisbar. Sie lässt sich in der App über das Optionsmenü unter *Help* und *About* nachlesen. Wie auch bei der Sortierung nach Gerätemodell wird pro Sensor eine Tabelle mit den durchgeführten Benchmarks auf diesem bestimmten Gerät aufgeführt. Die Tabellen sind chronologisch nach Durchführungszeitpunkt sortiert und beinhalten neben der verwendeten Android Version nur noch die Gesamt- und Teilpunktzahlen. Eine Auswahl eines Tabelleneintrags führt auch hier wieder zur Detailansicht des Benchmarks.

3.2.4 Benchmark Detailseite

Wird ein Benchmark ausgewählt, öffnet sich eine Seite, mit allen Informationen und Werten des Benchmarks und der darauf basierenden Initialisierung. Zuerst wird, wie anhand des Beispiels in Abbildung 3.4 zu sehen, in einem Balkendiagramm das exakte Ergebnis des zuvor gewählten Benchmarks zusammen mit den Durchschnittsergebnissen der fünf besten Sensoren anderer Geräte präsentiert, dies hilft das Ergebnis im Vergleich mit anderen Sensoren besser einordnen zu können, darunter werden die einzelnen Punkte gelistet. Anschließend lässt sich in einem Liniendiagramm der exakte

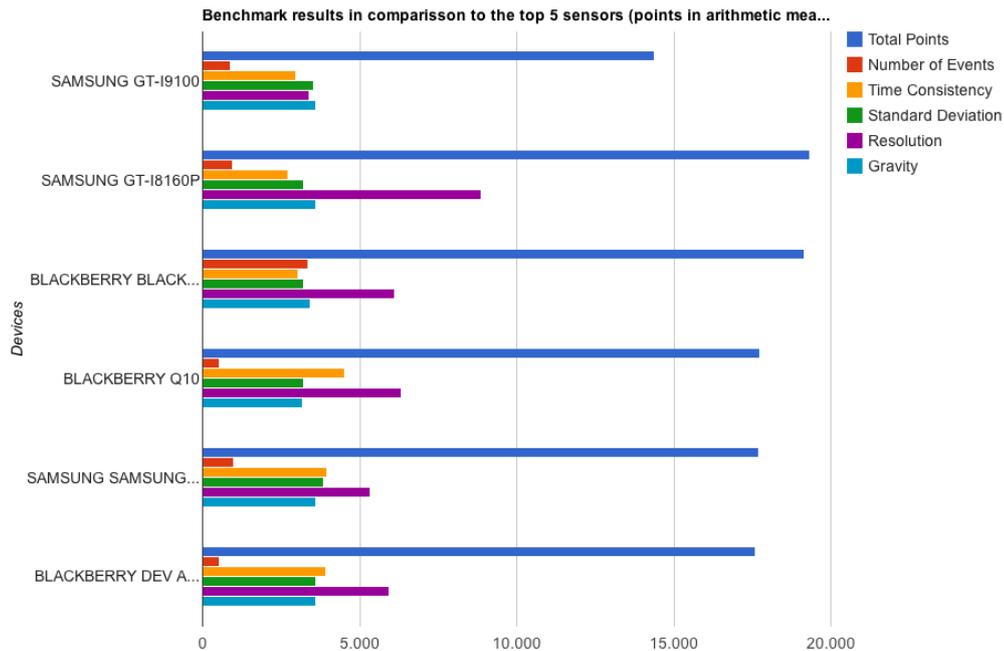


Abbildung 3.4: Benchmark Balkendiagramm; Gewähltes Benchmarkergebnis (oben) im Vergleich zu den besten fünf Durchschnittsergebnissen.

Verlauf der gemessenen Werte während des Benchmarks pro Sensorachse betrachten, wobei die X-Achse die Reihenfolge der gemessenen Werte angibt und die Y-Achse den gemessenen Wert einer Sensorachse. Sollte die Ansicht zu unübersichtlich sein, da besonders viele Werte gemessen wurden, ist es möglich auf der darunterliegenden Skala in das Diagramm rein- und rauszuzoomen, um kritische Abschnitte genauer analysieren zu können. Bewegt man den Mauszeiger innerhalb des Graphen so zeigt ein Tooltip die entsprechenden X- und Y-Werte an. Es besteht hier auch die Möglichkeit diese Werte als JSON Array herunterzuladen, um sie für eigene Berechnungen zu nutzen. Des Weiteren werden darunter zusätzliche Informationen wie Minima und Maxima, Auflösung des Sensors, Standard Abweichung, Android und App Version sowie Akkuinformationen aufgelistet. Zum Vergleich befinden sich im Weiteren, in Bezug auf Minima und Maxima sowie der Zeitspanne zwischen zwei

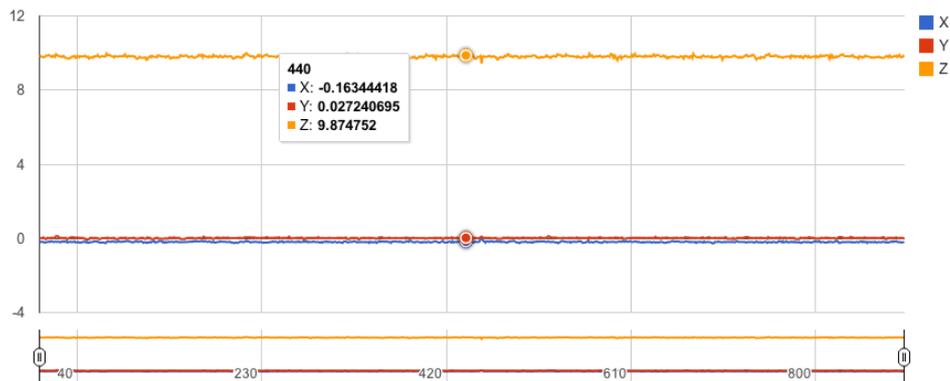


Abbildung 3.5: Benchmark Liniendiagramm bei einem Accelerometer mit den Messwerten der drei Sensorachsen X, Y und Z.

aufeinanderfolgenden Werten, die Werte, welche über mehrere Benchmarks und Initialisierungen hinweg gemessen wurden, dies lässt eher auf das gesamte Spektrum des Sensors schließen, fließt aber nicht in die Bewertung ein. Somit wird gewährleistet, dass jeder Benchmark die selbe Ausgangslage besitzt und mehrfach getestete Sensoren keinen Vorteil gegenüber Sensoren erhalten, die den Benchmark lediglich nur einmal durchliefen. In Abbildung 3.6 wird ein Liniendiagramm beruhend auf den Initialisierungswerten angezeigt. Auch hier werden wieder entsprechende Ergebnis-

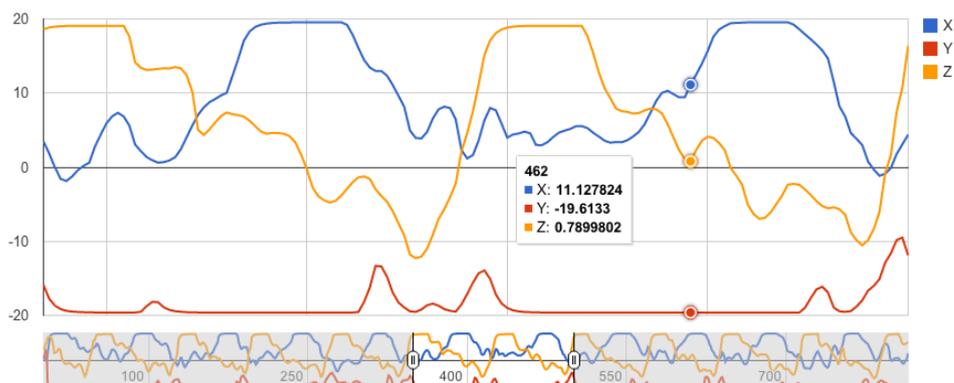


Abbildung 3.6: Liniendiagramm der Initialisierung eines Accelerometers mit den Messwerten von 350 bis 500.

se untereinander hervorgehoben und die einzelnen Messwerte als JSON Array zum Download zur Verfügung gestellt.

Am Ende der Seite befinden sich die technischen Spezifikationen eines Sensors, welche im Gerät gespeichert sind, ein Hinweis deutet darauf hin, dass diese Werte nicht unbedingt der Wahrheit entsprechen, wie es die SensMark Messungen beweisen. Schließlich werden noch Informationen über das jeweilige Gerät, wie Hersteller, Marke, Model und Hardwarebezeichnung angegeben.

3.3 Statistiken

Aus den Daten, die zur Anzeige und Evaluation der Benchmarkergebnisse gesammelt wurden, lassen sich auch Statistiken über die Verbreitung von Sensoren, Geräten, Marken, der jeweiligen Hersteller und natürlich auch über die verschiedenen Android Versionen auswerten. Diese werden auf der Webseite stets auf Basis des aktuellen Datenbestandes erhoben und in entsprechenden Diagrammen veranschaulicht, die Anzahl der zu Grunde liegenden Geräte auf die sich die Auswertung bezieht wird dabei stets angegeben. Es gilt zu beachten, dass die Statistiken lediglich auf Grundlage jener Geräte basieren auf denen SensMark installiert und ausgeführt wurde, auf eine allgemeingültige Aussage gegenüber der Verbreitung von Geräten und Sensoren der im Nachfolgenden gezeigten Diagramme ist daher nicht zwangsweise zu schließen, dennoch lassen sich Tendenzen erkennen. Besonders auffällig ist der überdurchschnittlich große Anteil des Herstellers RIM (Research In Motion), der in der folgenden Auswertung ein Drittel aller Geräte ausmacht dies liegt zum einen daran, dass die SensMark App nicht soweit verbreitet ist und zum anderen vermutlich an der Tatsache, dass die Applikation, bei einer Suche nach dem Wort *Benchmark* im entsprechenden App Shop von BlackBerry, in den Topergebnissen erscheint, während man in Googles Play Store die Suche präzisieren muss. Laut Gartner¹ betrug der weltweite Marktanteil von allen BlackBerry Betriebssystemen im November 2013 jedoch nur 1,8% im Gegensatz zu Android, welches mit 81,9% sehr weit verbreitet ist.

Neben den Fragmentierungsstatistiken von Geräten und Herstellern stehen dem Nutzer weitere Statistiken zur Auswahl, wie die Fragmentierung von Android, Geräte- marken, Sensorzulieferern und einzelner Sensortypen, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

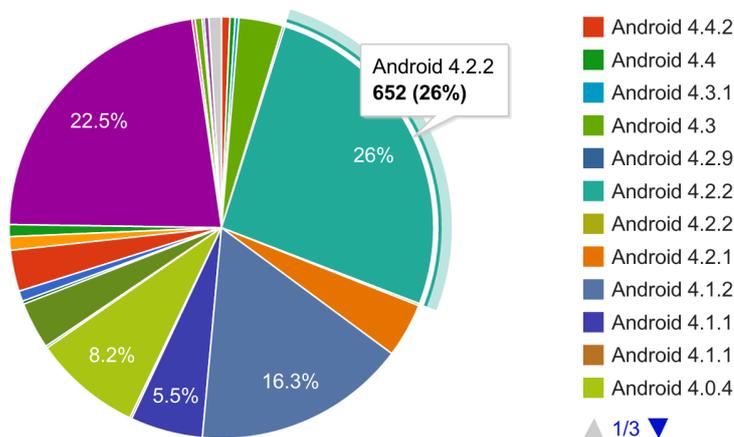


Abbildung 3.7: Android Fragmentierung.

¹<http://www.gartner.com/newsroom/id/2623415>

Die Android Fragmentierung wird, wie in Abbildung 3.7 zu sehen, in einem Kuchen-
diagramm dargestellt, klickt man auf einen Teilausschnitt oder einen Eintrag in der
Legende so erscheint ein Tooltip an entsprechender Stelle im Diagramm mit dem
exakten Häufigkeitswert sowie in Prozentangabe für die jeweils gewählte Android
Version.

Alle weiteren Statistiken werden als sogenannte *TreeMap* Diagramme dargestellt, wo-
bei jeder Knoten als Rechteck dargestellt wird und beliebig viele Kinder haben kann.
Die Größe eines Rechtecks ist abhängig von der Größe zu Grunde liegender Daten
und relativ zu allen anderen Rechtecken des Diagramms. Abbildung 3.8 zeigt ein sol-
ches Diagramm bezüglich der Verbreitung von Geräteherstellern. Klickt man auf ein
Rechteck mit der linken Maustaste, wird die ermittelte Verbreitung der Geräte eines
Herstellers angezeigt, die die Basis für die Verbreitung des Herstellers bildet. In Ab-
bildung 3.9 wird dies am Beispiel des Herstellers Samsung veranschaulicht. Bewegt
man den Mauszeiger über die einzelnen Rechtecke so wird der Wert des jeweiligen
Felds unter dem Diagramm angezeigt. Ein Rechtsklick führt zurück zur oberen Ebe-
ne.

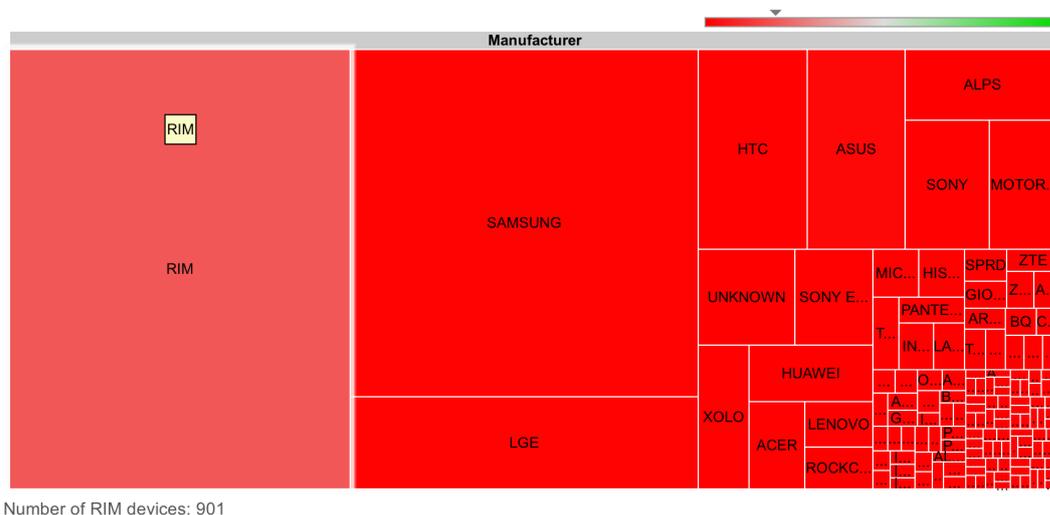
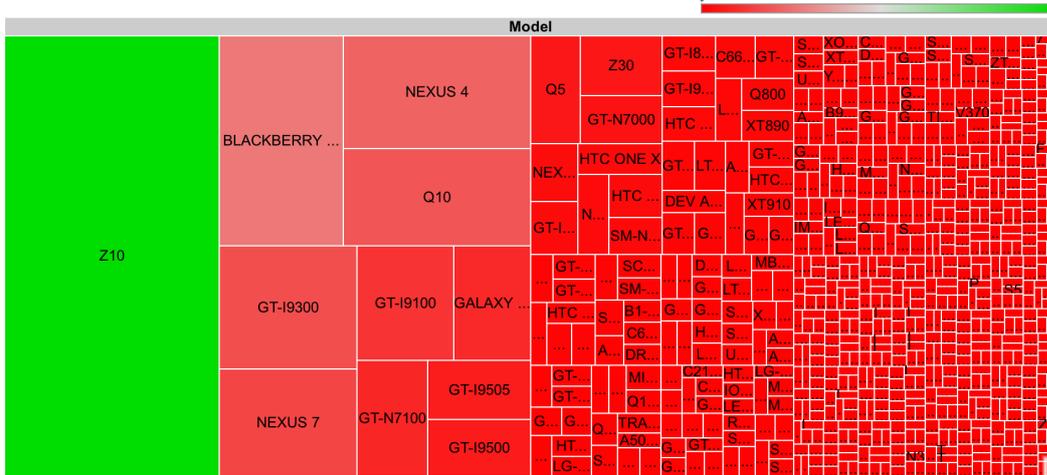


Abbildung 3.8: Gerätehersteller Fragmentierung.

Eine ähnliche Verteilung, wie die der Gerätehersteller, zeigt die Statistik über die
Verbreitung der Gerätemarken (Abbildung 3.10). Hier laufen Geräte wie das Google
Nexus 4 unter dem Namen Google statt dem des Herstellerkürzels LGE, aber auch
Namen von Providern wie Verizon tauchen in der Statistik auf, die nach Kooperation
mit Geräteherstellern eigenst angepasste Geräteversionen vertreiben.

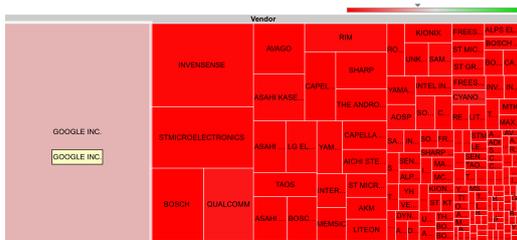
Das Diagramm 3.11 zeigt auf einen Blick die Verbreitung der SensMark Applikation
auf den verschiedenen Gerätemodellen herstellerübergreifend.

Ein weiteres Diagramm stellt die Verbreitung der Sensorhersteller bzw. Zulieferer
dar. Abbildung 3.12 zeigt wie häufig die entsprechenden Hersteller vertreten sind,
diese Daten beruhen auf den technischen Spezifikationen bzw. Herstellerangaben,



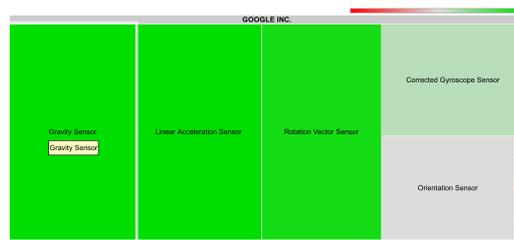
Number of 小宇宙 ×1 devices: 1

Abbildung 3.11: Verteilung der Geräte auf denen SensMark installiert wurde, darunter auch unbekannte Geräte mit chinesischer Bezeichnung.



Number of GOOGLE INC. devices: 515

(a) Verbreitung der Sensor Hersteller



Number of Gravity Sensor devices: 126

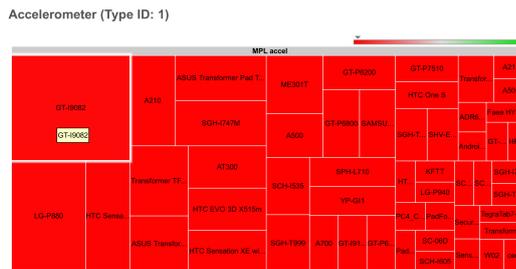
(b) Verbreitung der Sensoren mit der Herstellerangabe Google Inc.

Abbildung 3.12: Beide Ebenen der Sensorhersteller-Statistik.



Number of MPL accel devices: 136

(a) Verbreitung von verbauten Accelerometern



Number of GT-I9002 devices: 15

(b) Verbreitung des 'MPL accel' Accelerometer

Abbildung 3.13: Sensor Statistik am Beispiel von Accelerometern.

Auf die beschriebenen Ergebnisse und Statistiken, die über die Webseite gewonnen wurden, wird in der Evaluation im folgenden Kapitel näher eingegangen.

4 Evaluation

Die Evaluation der durch die SensMark Applikation gesammelten und auf die SensMark Website hochgeladenen Ergebnisse ist Thema dieses Kapitels. Es erfolgt eine Auswertung der Benchmark-Ergebnisse nach verschiedenen Kriterien. Eine Beschreibung der vorhandenen Datenbasis in 4.1 bildet die Grundlage der Evaluation. Im Folgenden wird die Notwendigkeit einer Fake-Erkennung beschrieben. Da einige der hochgeladenen Benchmarks durch eine gewollt oder ungewollt mangelhafte Ausführung durch den Benutzer unbrauchbar für die Beurteilung der Genauigkeit von Smartphone-Sensoren sind, sollten diese bei der Evaluation nicht berücksichtigt werden. Abschnitt 4.2 liefert hierzu weitere Informationen. Die weiteren Abschnitte stellen die eigentliche Evaluation der gesammelten Daten dar. Wie bereits erwähnt findet eine Analyse und Bewertung der Daten hinsichtlich unterschiedlicher Kategorien statt. Eine Unterteilung der Sensoren nach dem jeweiligen Typ bildet den Anfang; ein besonderer Fokus liegt auf den Typen Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung der vorliegenden Sensor-Daten und Benchmarks bezüglich des Herstellers des jeweiligen Sensors, um so mögliche herstellerepezifische Besonderheiten oder ähnliches aufzudecken. Gerätespezifische Ergebnisse sind Teil des Abschnitts 4.5. Weitere Besonderheiten oder Auffälligkeiten, die sich nicht direkt einer der bereits genannten Kategorien zuordnen lassen können, bilden den Abschluss der Evaluation.

4.1 Datenbasis

Um die Genauigkeit von Smartphone-Sensoren bzw. die Unterschiede der Genauigkeit der einzelnen Sensoren in verschiedenen Geräten beurteilen zu können, ist eine große Datenbasis von Vorteil, da sich so zum einen mangelhaft durchgeführte Benchmarks leichter aussortieren lassen und zum anderen bei einer Vielzahl an gleichen Geräten mögliche Besonderheiten besser erkannt werden können. Zum Zeitpunkt der Auswertung¹ befinden sich 1057 Geräte in der Datenbank, davon 842 mit dem Betriebssystem *Android* und 215 Geräte des Herstellers *BlackBerry*. Wurde während des Zeitraums der Datenerfassung ein Update des Betriebssystems vorgenommen, ein anderes Custom-Rom aufgespielt oder fanden sonstige Änderungen auf Betriebssystemebene statt, so wurde diesen Geräten eine neue Nutzer-ID zugeordnet, um so

¹Stand: 01.06.2013

z. B. Unterschiede zwischen den Betriebssystemversionen bezüglich der Sensorengenauigkeit aufzudecken. Durch die mögliche Zuordnung mehrerer Nutzer-IDs zu einem Gerät ergibt sich eine Gesamtzahl an 1119 Nutzern. Der Begriff *Gerät* bezieht sich somit folglich nur auf die Hardware, während *Nutzer* zusätzlich zwischen den jeweiligen Softwareversionen eines Geräts unterscheidet. Die nachfolgende Abbildung 4.1 zeigt die Verteilung der Android-Versionen auf den Geräten basierend auf der jeweils zuletzt installierten Version.

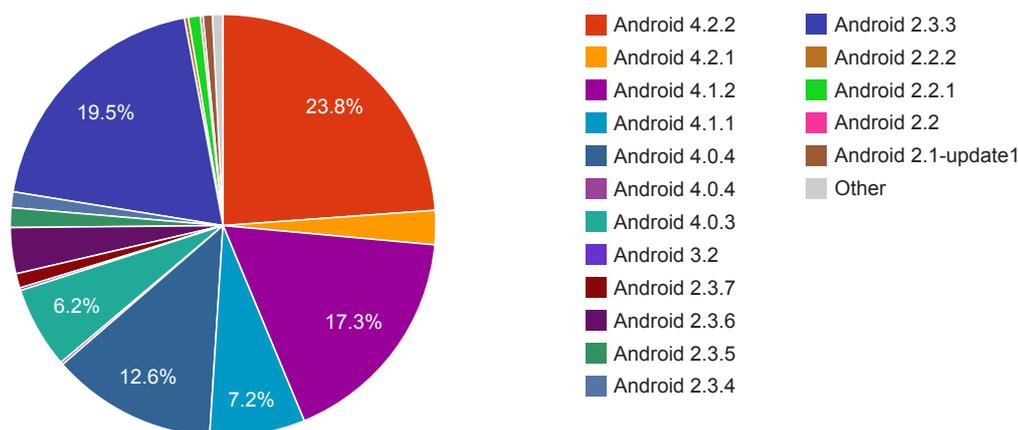


Abbildung 4.1: Android Fragmentierung.

Auffällig sind hierbei mehrere Dinge. Zum einen verwenden beinahe ein Viertel aller Benutzer der SensMark Applikation die zum Zeitpunkt der Auswertung aktuelle Android-Version 4.2.2, während zum gleichen Zeitpunkt im Allgemeinen weniger als 5% diese Android-Version benutzen. Generell ist erkennbar, dass die Benutzer der SensMark Applikation im Vergleich zum Durchschnitt aller Android-Nutzer mit aktuelleren Versionen ausgestattet sind. Auf den ersten Blick bemerkenswert ist außerdem der hohe Anteil an Nutzern mit der Version 2.3.3. Eine einfache Erklärung liefert die Tatsache, dass sämtliche Geräte der Marke BlackBerry zum Zeitpunkt der Auswertung die Version 2.3.3 als Android-Version angeben. Berücksichtigt man diesen Umstand, so wird der Unterschied der Aktualität der Android Versionen zwischen den Anwendern von SensMark und der Gesamtheit aller Benutzer eines Android-Gerätes zugunsten der SensMark Nutzer noch deutlicher. Inwiefern die Android-Version möglicherweise Auswirkungen auf die Sensoren, insbesondere die virtuellen Sensoren, hat wird in Abschnitt 4.6 thematisiert.

Auch bei der Verteilung der Hersteller und der Modelle entsteht ein interessantes Bild. Die Abbildung 4.2 zeigt die Verteilung der Hersteller bzw. der Marken. Die Größe der Rechtecke ist dabei proportional zur Anzahl der Geräte des jeweiligen Herstellers bzw. der Marke. Die Unterscheidung zwischen Hersteller und Marke ergibt sich aus den Parametern *manufacturer* und *brand*, die die SensMark Applikation ausliest. Während z. B. das Nexus 4 vom Hersteller LG produziert wird findet der Verkauf



Abbildung 4.2: Manufacturer und Brand Fragmentierung.

unter der Marke Google statt. Wie bereits anhand der Daten bezüglich der Android Version zu erwarten war stellen die Geräte der Marke Google einen relativ großen Anteil aller Geräte dar. Zum einen ist die Android-Version 4.2.2 im Erfassungszeitraum beinahe nur für Google-Geräte verfügbar, zum anderen wird von den meisten Nutzern von Google-Geräten stets die aktuelle Android-Version verwendet, sobald sie verfügbar ist. Insgesamt betrachtet sind die meisten Nutzer der SensMark Applikation Besitzer eines Gerätes von Samsung, was auch der allgemeinen Verteilung von Smartphones mit Android entspricht.

Betrachtet man die Verteilung der Modelle, so fällt auf, dass das bereits erwähnte Nexus 4 bei den Geräten mit Android eindeutig am stärksten vertreten ist. Aber auch das relativ neue BlackBerry Z10 ist auffällig oft vorhanden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass im Zeitraum der Evaluation eine Suche nach *Benchmark* in der BlackBerry World die SensMark App unter den Top Treffern aufführte. Insgesamt betrachtet werden mehr als die Hälfte aller Geräte durch nur 10 verschiedene

Modelle abgedeckt, hierzu siehe auch Tabelle 4.1. Dabei handelt es sich beinahe ausschließlich um relativ teure Geräte mit gehobenen technischen Spezifikationen. Alles in allem umfasst die Datenbasis 398 verschiedene Modelle bei Berücksichtigung von Unterschieden im Bereich *model*, *hardware* oder *board* namensgleicher Modelle. Fasst man diese jeweils zu einem Modell zusammen ergibt sich eine Gesamtzahl von 290 Modellen. Inwieweit sich die Modelle bezüglich der Anzahl und Genauigkeit ihrer Sensoren unterscheiden und ob es signifikante Unterschiede zwischen den Sensoren von Smartphones verschiedener Preisklassen gibt wird in Abschnitt 4.5 untersucht.

Tabelle 4.1: Modell-Verteilung bei SensMark.

Anzahl der Geräte	Marke	Modell
134	BlackBerry	Z10
102	Google	Nexus 4
71	BlackBerry	PlayBook
62	Samsung	GT-I9300
54	Google	Nexus 7
45	Samsung	GT-I9100
45	Google	Galaxy Nexus
28	Samsung	GT-N7100
14	Samsung	GT-N7000
12	Google	Nexus S

Insgesamt wurden mit Hilfe der Sensmark Applikation auf den bereits genannten 1057 Geräten (bzw. 1119 bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebssystemversionen auf jeweils einem Gerät) 11313 Benchmarks durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle 4.2 zeigt die Verteilung der Benchmarks nach Sensortyp sowie die Anzahl der Nutzer die einen oder mehrere Benchmarks des jeweiligen Sensortyps durchgeführt haben.

Es fällt auf, dass die Sensortypen, die durch den *General Benchmark* getestet werden (Orientation, Gyroscope, Accelerometer, Linear Acceleration, Gravity, Rotation Vector, Magnetic Field) insgesamt sehr hohe Zahlen erreichen, es aber trotzdem Unterschiede zwischen den einzelnen Sensortypen gibt. Im Schnitt wurden die im General Benchmark enthaltenen Sensoren von jedem Nutzer ungefähr zweimal getestet, wobei die Nutzer ohne Benchmark nicht berücksichtigt werden. Inwiefern die in der Tabelle dargestellte Verteilung der Benchmarks auch der Verteilung der Sensoren in den Geräten entspricht wird in Abschnitt 4.3 behandelt. Tabelle 4.3 zeigt, wie sich die Anzahl der Benchmarks auf die jeweiligen Nutzer verteilt.

Tabelle 4.2: Benchmarks pro Sensortyp.

Sensortyp	Anzahl Benchmarks	Nutzer
Orientation	1700	786
Gyroscope	1672	630
Accelerometer	1635	875
Linear Acceleration	1528	699
Gravity	1526	707
Rotation Vector	1504	691
Magnetic Field	1322	788
Light	198	132
Proximity	176	112
Pressure	45	40
Temperature	5	1
Ambient Temperature	1	1
Unknown	1	1
Relative Humidity	0	0
Total	11313	

Man sieht, dass ein Großteil der Benutzer zwischen sechs bis fünfzehn Benchmarks durchgeführt hat. Aber auch weniger als sechs bzw. bis zu fünfundzwanzig Benchmarks sind nicht außergewöhnlich. Auffällig ist die hohe Anzahl an Nutzern, die keinen Benchmark durchgeführt hat. Ein Teil davon ließe sich durch die Verwendung mehrerer Nutzer-IDs pro Gerät erklären, dies beträfe jedoch maximal ein Viertel jener 208 Nutzer.

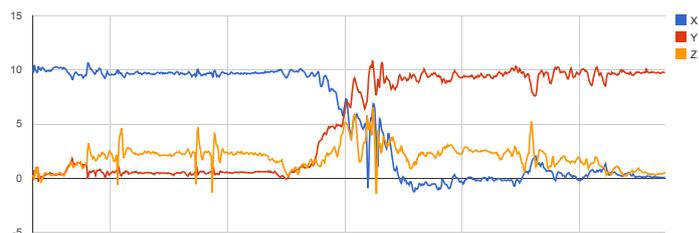
Tabelle 4.3: Verteilung Benchmarks pro Nutzer.

Benchmarks pro Nutzer	Nutzer	Benchmarks gesamt
0	208	0
1	41	41
2-5	143	472
6-10	260	2014
11-15	253	3227
16-20	68	1176
21-25	81	1902
26-40	51	1597
>40	14	884
Total	1119	11313

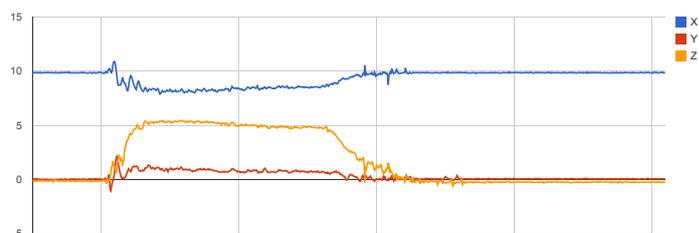
4.2 Fake

Um eine möglichst hohe Relevanz und Exaktheit der Ergebnisse hinsichtlich der Beurteilung der Genauigkeit von Smartphone-Sensoren zu erzielen müssen Benchmarks, welche das Ergebnis verfälschen, erkannt werden und bei der Bewertung unberücksichtigt bleiben. So führen ungewollte oder auch absichtlich durchgeführte Bedienungsfehler der SensMark Applikation während des Benchmarks der Sensoren zu inkorrekten, d. h. in der Regel zu niedrigen Bewertungsergebnissen. Je weniger korrekt durchgeführte Benchmarks es zu einem bestimmten Sensor eines Gerätes gibt, desto größer ist der negative Einfluss eines fehlerhaften Benchmarks und desto ungenauer bzw. fehlerhafter werden ebenso die daraus gewonnenen Erkenntnisse. Der Unterschied zwischen unterschiedlich korrekt ausgeführten Benchmarks mit einem Gerät ist dabei durchaus signifikant; die folgende Abbildung 4.3 symbolisiert dies beispielhaft.

Die Grafik zeigt unterschiedliche Benchmarks des Accelerometers verschiedener Samsung GT-I9300. Unter dem jeweiligen Benchmark ist der Fake-Wert angegeben. Dieser befindet sich im Bereich zwischen null und eins, wobei im Allgemeinen gilt: Je höher der Wert, desto fehlerhafter ist der Benchmark und desto unbrauchbarer ist er. Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben ist die Festlegung der Funktion zur Berechnung des Fake-Wertes keine triviale Angelegenheit. Das Problem ist es zwischen durch den Nutzer verursachten Schwankungen und den Ungenauigkeiten, die sich durch mangelhafte Sensoren ergeben, zu unterscheiden. Vom Nutzer herbeigeführte Fehler sollen unberücksichtigt bleiben, während Fehler, die durch die Sensoren an sich entstehen, aufzudecken sind, um so ihre Genauigkeit präzise beurteilen zu können. Es



(a) Fake = 0.6699



(b) Fake = 0.0363



(c) Fake = 0

Abbildung 4.3: Accelerometer-Benchmarks mit verschiedenen Fake-Werten.

kann nicht davon ausgegangen werden, dass ab einem bestimmten Schwellwert automatisch ein unbrauchbarer, weil fehlerhafter, Benchmark vorliegt. Der Fake-Wert ist vielmehr ein Indikator für einen möglichen inkorrekten Test der Sensorgenauigkeit. Weiterhin muss der Fake-Wert je nach Sensortyp anders interpretiert werden. Während beim Accelerometer bereits jegliche Fake-Werte größer null für einen mangelhaft durchgeführten Sensortest sprechen, liegt die Grenze bei anderen Sensoren deutlich höher. Aufgrund dessen wird in Abschnitt 4.3 separat für jeden Sensortyp auf den jeweiligen Fake-Grenzwert eingegangen. Gleichwohl erscheint die Festlegung eines solchen Fake-Grenzwertes angesichts der geschilderten Problematik einigermaßen willkürlich, es wäre jedoch eine ungleich kompliziertere Berechnungsfunktion, angepasst auf den jeweiligen Sensortyp und basierend auf einer breiten Datenbasis, notwendig, um hier eine Verbesserung zu erzielen. Um dennoch einen Überblick über die Verteilung der Fake-Werte bezüglich der Benchmarks zu bekommen, eignet sich Abbildung 4.4.

Auf der X-Achse ist die Anzahl an Benchmarks aufgetragen, während die Y-Achse

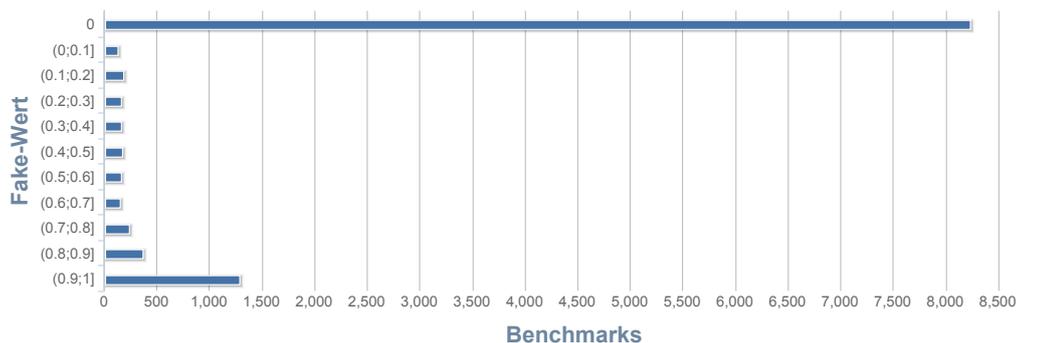


Abbildung 4.4: Verteilung der Fake-Werte bezüglich Benchmarks.

die Verteilung der Fake-Werte als Intervalle angibt. Dies ist so zu verstehen, dass z. B. 1291 Benchmarks einen Fake-Wert von mehr als 0.9 und maximal 1 haben, während 369 einen Wert größer 0.8 mit einem Maximum von 0.9 besitzen. 8236 Benchmarks wurden als fehlerlos erkannt, d. h. der Fake-Wert liegt hier bei 0. Insgesamt ist die Verteilung relativ gleichmäßig mit einer deutlichen Häufung der Benchmarks mit einer hohen Bewertung. Ungefähr drei Viertel aller Benchmarks sind damit auf jeden Fall als Basis für die Auswertung geeignet, je nach Sensortyp können zudem Benchmarks mit niedrigen Fake-Werten ebenfalls verwendbar sein.

4.3 Sensortypen

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Datenbasis, d. h. insbesondere der Umfang der Daten zur Bewertung der Genauigkeit von Smartphone Sensoren, beschrieben und auf die Berücksichtigung des Fake-Wertes zur Verbesserung der Auswertungsergebnisse eingegangen wurde folgt nun die eigentliche Evaluation der gesammelten Benchmark-Daten beginnend mit einer Unterteilung nach Sensortyp. Bevor eine Evaluation der Genauigkeit einzelner Sensortypen vorgenommen wird, wird zunächst auf die Verbreitung von Sensoren in Smartphones eingegangen. Interessant ist hierbei vor allem, wie viele Sensoren im Schnitt in Smartphones enthalten sind und um welche Sensoren es sich dabei handelt. Dabei treten jedoch Schwierigkeiten auf, die es zu berücksichtigen gilt. Eine gleiche Modellbezeichnung garantiert nicht, dass auch die gleiche Anzahl an Sensoren vorhanden ist bzw. ausgelesen wird. So hat beispielsweise das Samsung Galaxy S2 alias GT-I9100 bei manchen Benutzern nur 10, bei anderen Benutzern 11 Sensoren. Dabei unterscheiden sich teilweise auch die Bezeichnungen der Sensoren. Weiterhin werden bei manchen Geräten Sensoren angezeigt, die sich nicht den in Tabelle 4.4 aufgeführten 13 Sensortypen Androids zuordnen lassen [2].

Tabelle 4.4: Sensortypen unter Android.

Sensor	Typ
Accelerometer	Hardware
Ambient Temperature	Hardware
Gravity	Software or Hardware
Gyroscope	Hardware
Light	Hardware
Linear Acceleration	Software or Hardware
Magnetic Field	Hardware
Orientation	Software
Pressure	Hardware
Proximity	Hardware
Relative Humidity	Hardware
Rotation Vector	Software or Hardware
Temperature	Hardware

Werden diese Faktoren berücksichtigt, d. h. die Unterscheidung gleichnamiger Modelle mit unterschiedlicher Sensoranzahl sowie die Vernachlässigung von nicht in Tabelle 4.4 enthaltenen Sensortypen, so ergibt sich eine Anzahl von 306 verschiedenen Modellen mit mindestens einem Sensor. Abbildung 4.5 zeigt die Verbreitung der Sensoren in den Modellen.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass ungefähr die Hälfte aller 306 untersuchten Gerätemodelle mindestens 8 Sensoren besitzt. Dies scheint relativ viel und ist umso verwunderlicher als bei dieser Verbreitung der Sensoren keine Rücksicht auf die Nutzeranzahl des jeweiligen Geräts genommen wurde. Ausgehend von der Hypothese, dass teurere bzw. höherklassige Smartphones im Allgemeinen mit mehr Sensoren ausgestattet sind als Einstiegsgeräte würde eine Berücksichtigung der Nutzerzahl, d. h. eine Verwendung der 1057 Geräte der Nutzer anstelle der 306 unterschiedlichen Geräte-Modelle, zu einer weiteren Verschiebung zugunsten einer noch höheren Sensoranzahl pro Gerät führen. So hat z. B. das Google Nexus 4, welches 102 der 1057 Geräte darstellt, 15 verschiedene Sensoren. Basierend auf den 1057 Geräten der Nutzer ergibt sich folgende Verteilung (siehe Abbildung 4.6).

Man sieht, dass sich die Anzahl an Geräten mit mehr als 8 Sensoren von ungefähr der Hälfte aller Modelle auf beinahe dreiviertel aller Nutzergeräte von SensMark erhöht hat. Dies zeigt, dass die Nutzer von SensMark im Allgemeinen ein Smartphone

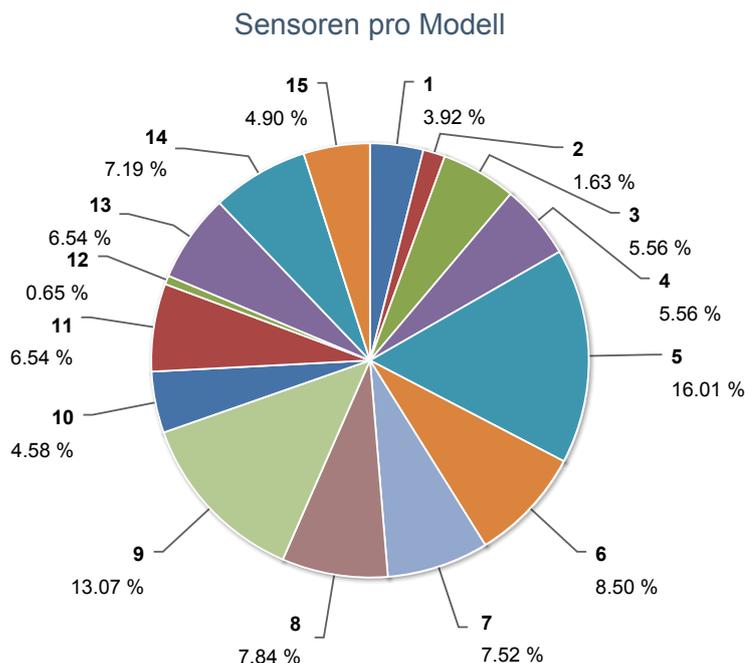


Abbildung 4.5: Verbreitung von Sensoren in unterschiedlichen Geräte-Modellen.

mit mehr Sensoren besitzen, als der Durchschnitt aller getesteten Modelle vermuten lässt. Durch die Berücksichtigung der jeweiligen Anzahl an Geräten ändert sich die Verteilung zugunsten von einer größeren Anzahl an Sensoren pro Gerät. Leider handelt es sich bei den Nutzern von SensMark nicht um eine repräsentative Auswahl aus der Menge der Nutzer von Smartphones mit Android bzw. BlackBerry OS. Insofern kann diese Aussage nicht problemlos verallgemeinert werden, die Tendenz ist jedoch deutlich.

Überraschend ist auch die relativ hohe Anzahl an Geräten mit 15 Sensoren. Auf Basis von Tabelle 4.4 mit 13 verschiedenen Sensoren, davon 3 sowohl in Soft- und Hardware verfügbar ließe sich ein Maximum von 16 Sensoren insgesamt vermuten, da normalerweise zumindest nicht von mehreren Hardware-basierten Sensoren des selben Typs, d. h. z. B. mehreren Beschleunigungssensoren auszugehen ist. Allerdings verfügen diverse Geräte z. B. über je zwei Orientierungssensoren oder Gyroskope. Dies steht nicht im Widerspruch zu den in Tabelle 4.4 aufgeführten möglichen Typen des jeweiligen Sensors, da Geräte mit Android durchaus mehrere Sensoren gleichen Typs besitzen bzw. implementieren können. Dadurch lässt sich kein Maximum an Sensoren pro Gerät festlegen und die mögliche Hypothese, dass viele Geräte beinahe alle verfügbaren Sensortypen besitzen kann somit zunächst weder bestätigt noch widerlegt werden.

Wie bereits erwähnt gibt es zahlreiche Sensoren, die sich nicht den 13 Sensoren unter

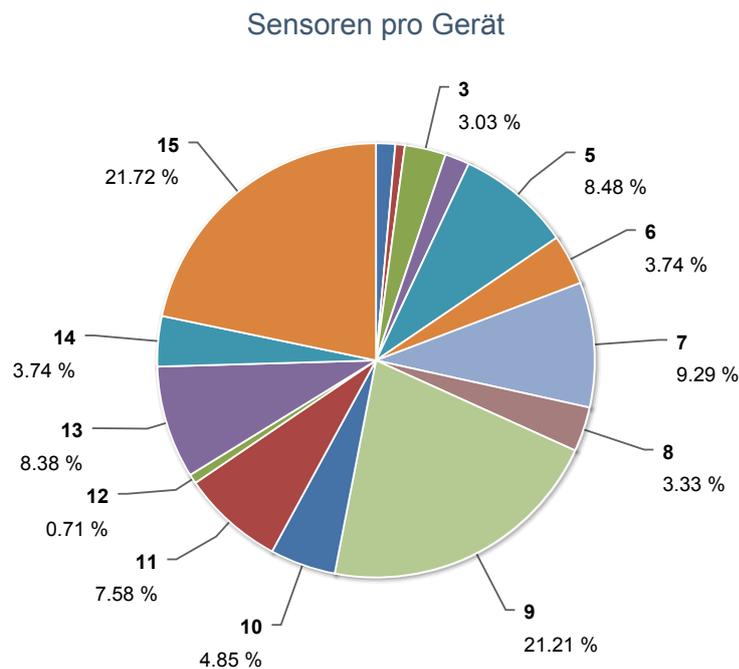


Abbildung 4.6: Verbreitung von Sensoren in Smartphones.

Android, unabhängig ob real oder virtuell, zuordnen lassen und welche in den obigen Statistiken nicht berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden im Beobachtungszeitraum Daten zu 1059 unterschiedlichen Sensoren gesammelt, 55 davon entsprechen nicht den in Tabelle 4.4 genannten Sensoren. Eine Unterscheidung der Sensoren erfolgte auf Basis des Herstellers, Namens, Typs, den angegebenen technischen Spezifikationen sowie der Version, wobei ebenfalls zwischen Groß- und Kleinschreibung unterschieden wurde. Bei den 55 Sensoren, die nicht dem Standard entsprechen handelt es sich größtenteils um Sensoren mit Namen *placeholder* oder verschiedenen Varianten von *Gesture Sensor* (Tilt Gesture Sensor, Gesture Tap Sensor, Facing Gesture Sensor, usw.). Diese sind nur in wenigen Modellen vorhanden und besitzen für die weitere Auswertung keine Relevanz.

Nachdem die generelle Verbreitung von Sensoren bzw. die durchschnittliche Sensorzahl pro Gerät untersucht wurde stellt sich die Frage, welche Sensortypen am häufigsten in Smartphones vorhanden sind. Auch hier wird wieder zwischen Modellen und Nutzergeräten unterschieden. Es werden nur Nutzergeräte berücksichtigt auf denen zumindest eine Initialisierung der Sensoren durchgeführt wurde. Tabelle 4.5 zeigt die Verteilung der Sensortypen auf Grundlage der gesammelten Daten.

Man sieht, dass beinahe alle Modelle einen Beschleunigungssensor besitzen. 5 Modelle besitzen keinen Sensor, es handelt sich dabei um ein Touchdisplay mit Android

Tabelle 4.5: Sensortyp Fragmentierung bei Smartphones.

Sensoren	Anzahl	Modelle	Modelle %	Geräte	Geräte %
		398	100	990	100
Accelerometer	1	393	98.74	988	99.80
Ambient Temperature	1	5	1.26	9	0.91
Gravity	1	177	44.47	483	48.79
	2	88	22.11	333	33.64
Gyroscope	1	58	14.57	287	28.99
	2	145	36.43	458	46.26
	3	1	0.25	11	1.11
Light	1	306	76.88	821	82.93
Linear Acceleration	1	176	44.22	483	48.79
	2	88	22.11	330	33.33
Magnetic Field	1	344	86.43	930	93.94
Orientation	1	248	62.31	557	56.26
	2	100	25.13	375	37.88
Pressure	1	62	15.58	296	29.90
Proximity	1	315	79.15	775	78.28
Relative Humidity	1	4	1.01	7	0.71
Rotation Vector	1	185	46.48	494	49.90
	2	88	22.11	335	33.84
Temperature	1	17	4.27	14	1.41

sowie virtuelle Maschinen mit Android. Insofern ist davon auszugehen, dass faktisch alle Smartphones mit Android Betriebssystem einen Beschleunigungssensor besitzen. Aber auch die Anzahl an Modellen mit Magnetic Field Sensor ist mit über 86% sehr hoch. Im Vergleich dazu sind nur ungefähr die Hälfte aller Modelle mit einem Gyroskop ausgestattet. Wie zu erwarten war ist die Anzahl an Modellen mit Sensoren des Typs Gravity, Linear Acceleration und Rotation Vector beinahe gleich. Diese ergeben sich durch Sensorfusion aus den Sensortypen Accelerometer und Magnetic Field und, falls vorhanden, zusätzlich durch das Gyroskop. Gleiches gilt für den Orientierungssensor, wobei hier die Anzahl an Modellen mit diesem Sensortyp höher ist. Inwiefern das Vorhandensein eines Gyroskops die Genauigkeit anderer Sensoren verbessert ist Teil von Abschnitt 4.3.2. Die Verteilung der anderen Sensortypen entspricht den Erwartungen. Sensoren vom Typ Light bzw. Proximity befinden sich in 77% bzw. 79% aller Modelle, während Sensoren vom Typ Temperature oder Relative

Humidity nur in sehr wenigen Modellen zu finden sind. Knapp 16% aller Modelle enthalten einen Sensor vom Typ Pressure, eine weitere Zunahme an Geräten mit diesem Typ in Zukunft ist wahrscheinlich.

4.3.1 Accelerometer

Wie bereits erwähnt befindet sich in allen Smartphones, auf denen die SensMark Applikation genutzt wurde, ein Beschleunigungssensor. Eine Untersuchung der Unterschiede der Genauigkeit zwischen verschiedenen Modellen und Sensoren dieses Typs ist somit von hohem Interesse. Insgesamt verwenden die 393 Modelle, welche ein Accelerometer besitzen, 130 verschiedene Accelerometer, wenn man die in Tabelle 4.6 dargestellten technischen Parameter berücksichtigt. Fasst man Sensoren gleichen Herstellers und Namens und ungeachtet möglicher Unterschiede bezüglich ihrer technischen Spezifikationen zusammen, so reduziert sich die Zahl unterschiedlicher Accelerometer auf 95. Problematisch hierbei ist die teilweise inkonsistente Bezeichnung der Sensoren ohne die sich die Zahl weiter reduzieren würde. So wird das BMA250 Accelerometer von Bosch Sensortec u.a. als BMA250, BMA250 Accelerometer, BMA250 3-axis Accelerometer oder Bosch BMA250 3-axis Accelerometer bezeichnet. Ähnliches gilt für die *vendor*-Angabe. Hier wird z. B. Bosch, Bosch Sensortec, Bosch Sensortec GmbH oder sogar Bosh angegeben. Eine weitere Schwierigkeit stellen, wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben, fehlerhafte Benchmarks dar. Diese verfälschen die Testergebnisse, so dass in der folgenden Auswertung bezüglich des Accelerometers nur Benchmarks mit einem Fake-Wert von 0 als Bewertungsgrundlage dienen. Aufgrund der beschriebenen Schwierigkeit der Unterscheidung zwischen ungenau arbeitenden Sensoren und Benutzerfehlern bei der Benchmarkdurchführung ist davon auszugehen, dass trotz der Beschränkung auf eine Teilmenge der gesamten Accelerometer-Benchmarks diese immer noch inkorrekt durchgeführte Benchmarks enthalten. Insgesamt wurden 1635 Accelerometer-Benchmarks durchgeführt, diese Zahl reduziert sich jedoch noch um die Benchmarks mit Fake-Wert ungleich 0. Weiterhin dürfen die Benchmarks aus den Versuchsreihen in Kapitel 5 zur Ermittlung der Genauigkeit mit Hilfe eines Schütteltisches bzw. Schwingtisches nicht als Bewertungsgrundlage dienen. Es ergibt sich somit eine Gesamtzahl an 1280 Benchmarks. Der Fokus der Auswertung liegt dabei insbesondere auf dem Abschneiden der besonders verbreiteten Sensoren, sowie den Sensoren mit den höchsten Punktzahlen. Ebenfalls von Interesse ist die Frage, ob die Sensoren desselben Herstellers und Typs bzw. Modells mit gleichen Spezifikationen in unterschiedlichen Smartphone-Modellen verschieden gut abschneiden oder sehr ähnliche Benchmarkergebnisse erzielen. Als Grundlage zur Evaluation der Genauigkeit besonders verbreiteter Sensoren dienen im Folgenden die Sensoren, mit denen besonders viele Benchmarks durchgeführt wurden. Dabei gilt die Annahme, je mehr Nutzer eines Gerätes mit einem spezifischen Sensor vorhanden sind, desto mehr Benchmarks gibt es zu diesem Sensor. Zum anderen ist eine möglichst hohe Anzahl an Benchmarks aufgrund der größeren

Datenbasis vorteilhaft. Die nachfolgenden Tabellen 4.6 und 4.7 zeigen die Spezifikationen und Benchmark-Ergebnisse der zehn am weitesten verbreiteten Accelerometer.

Weiterhin von Interesse sind die Accelerometer, die die höchsten Benchmarkergebnisse erzielt haben. Nur mit ihnen lassen sich die Ergebnisse der am weitesten verbreiteten Accelerometer vollständig einordnen und vergleichen. Nachfolgend führen die Tabellen 4.8 und 4.9 die Verbreitung, die technischen Spezifikationen sowie die Benchmarkergebnisse der zehn besten Beschleunigungssensoren auf. Die Sortierung erfolgt absteigend nach dem arithmetischen Mittel der Gesamtpunktzahlen ihrer jeweiligen Benchmarks.

Auffällig ist, dass sich unter den am stärksten verbreiteten Sensoren und unter den am besten bewerteten Sensoren 6 gleiche Sensoren (RIM, InvenSense) befinden. Ebenfalls in beiden Tabellen vorhanden sind Sensoren des Herstellers STMicroelectronics. Es handelt sich dabei jedoch um verschiedene Modelle. Der Mittelwert der Gesamtpunktzahl aller 1280 Accelerometer Benchmarks liegt bei 15200 Punkten. Nur 3 von 10 der Sensoren mit den meisten Benchmarks liegen unter diesem Mittelwert, der Rest liegt teilweise relativ deutlich darüber. Bezüglich der Accelerometer und auf Grundlage der vorliegenden Daten lässt sich also davon ausgehen, dass es sich bei den weit verbreiteten Sensoren im Allgemeinen um Sensoren handelt, die besser als der Durchschnitt sind. Man sieht jedoch, dass anhand der technischen Spezifikationen keine Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Sensoren möglich ist. Nicht in den Tabellen enthalten sind Sensoren mit niedrigen Punktzahlen. Der schlechteste Sensor der Marke MEMSIC hat mit einem Mittelwert von 5618 Punkten einen deutlichen Abstand zu den besseren Sensoren. Alle anderen Sensoren haben jedoch mindestens 9515 Punkte und sind somit dem Durchschnitt schon etwas näher. Bemerkenswert ist außerdem, dass Sensoren der Hersteller Bosch Sensortec, Kionix, freescale generell eher niedrige Gesamtpunktzahlen erzielt haben, obwohl diese ebenfalls relativ weit verbreitet sind. Eine generelle Betrachtung der Verbreitung und Bewertung von Sensoren verschiedener Hersteller wird in Abschnitt 4.4 vorgenommen.

Tabelle 4.6: Technische Spezifikationen weit verbreiteter Accelerometer.

Sensoren	Verbreitung		Technische Spezifikationen ^a			
	Hersteller Name	Benchmarks	Nutzer	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung
InvenSense LGE Accelerometer Sensor	151	87	39.226593	0.0011901855	5000	0.5
RIM Accelerometer	98	68	20	0	2500	-1
STMicroelectronics LSM330DLC 3-axis Accelerometer	82	57	19.6133	0.009576807	10000	0.23
Invensense MPL accel	65	38	10240	1	20000	0.5
RIM Accelerometer	62	36	20	0	1000	-1
Invensense MPL Accelerometer	58	40	19.6133	0.039226603	5000	0
STMicroelectronics K3DH Acceleration Sensor	57	36	19.6133	0.0047884034	5000	0.25
Invensense MPL Accelerometer	55	39	19.6133	0.038344003	10000	0.139
STMicroelectronics LSM330DLC Acceleration Sensor	51	30	19.6133	0.009576807	10000	0.25
RIM Accelerometer	31	19	39.2266	0.0011971008	2500	-1

^aMax. Spektrum, Auflösung: SI-Einheit der Werte in m/s²; Min. Verzögerung in μ s; Strom in mA

Tabelle 4.7: Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Accelerometer.

Sensoren	Punkte gesamt ^a				Punkte Einzelkategorien ^b				
	MED	AVG	STD	MAX	E	Z	S	M	G
InvenSense LGE Accelerometer Sensor	17088	16988	894	18632	1921	3706	3434	4442	3485
RIM Accelerometer	17017.5	17000	879	19117	464	3480	3310	6242	3504
STMicroelectronics LSM330DLC 3-axis Accelerometer	14649.5	14301	1120	15646	884	3174	3450	3537	3256
Invensense MPL accel	15491	15369	1263	17011	648	2858	3386	5293	3184
RIM Accelerometer	19496	19365	924	20907	3377	3054	3377	6090	3467
Invensense MPL Accelerometer	16745.5	16897	1087	19049	1986	3507	3515	4449	3440
STMicroelectronics K3DH Acceleration Sensor	14296	14207	529	15091	873	2980	3447	3384	3523
Invensense MPL Accelerometer	16543	16525	848	17822	996	3818	2968	5283	3460
STMicroelectronics LSM330DLC Acceleration Sensor	15216	15167	435	16232	997	3574	3474	3537	3585
RIM Accelerometer	17481	17658	1180	20087	492	3703	3472	6498	3493

^aMedian (MED), Mittelwert (AVG), Standardabweichung (STD) und Maximum (MAX) der Gesamtpunktzahlen aller Benchmarks eines Sensors; zur Anzahl der Benchmarks des jeweiligen Sensors siehe Tabelle 4.6

^bMittelwerte aller Benchmarkergebnisse eines Sensors bezüglich folgender Kategorien:
E: Eventanzahl, Z: Zeitkontinuität, S: Standardabweichung, M: Minimale Schrittweite, G: Gravitationsgenauigkeit

Tabelle 4.8: Technische Spezifikationen der Top Ten Accelerometer.

Sensoren	Verbreitung		Technische Spezifikationen ^a			
Hersteller Name	Benchmarks	Nutzer	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung	Strom
RIM Accelerometer	62	36	20	0	1000	-1
ST Microelectronics ST Accelerometer	3	2	39.2	0.038307227	10000	0.7
RIM Accelerometer	31	19	39.2266	0.0011971008	2500	-1
RIM Accelerometer	98	68	20	0	2500	-1
InvenSense LGE Accelerometer Sensor	151	87	39.226593	0.0011901855	5000	0.5
Invensense MPL Accelerometer	58	40	19.6133	0.039226603	5000	0
STMicroelectronics K330 3-axis Accelerometer	4	3	19.6133	0.0005985504	10000	0.25
STMicroelectronics K330 Acceleration Sensor	2	1	19.6133	0.0005985504	10000	0.25
Invensense MPL Accelerometer	55	39	19.6133	0.038344003	10000	0.139
Invensense MPL accel	1	1	9.8	0.01	20000	0.785

^aMax. Spektrum, Auflösung: SI-Einheit der Werte in m/s²; Min. Verzögerung in μ s; Strom in mA

Tabelle 4.9: Benchmarkergebnisse der Top Ten Accelerometer.

Sensoren	Punkte gesamt ^a				Punkte Einzelkategorien ^b				
Hersteller Name	MED	AVG	STD	MAX	E	Z	S	M	G
RIM Accelerometer	19496	19365	924	20907	3377	3054	3377	6090	3467
ST Microelectronics ST Accelerometer	19245	19241	83	19340	939	2852	3052	8872	3526
RIM Accelerometer	17481	17658	1180	20087	492	3703	3472	6498	3493
RIM Accelerometer	17017.5	17000	879	19117	464	3480	3310	6242	3504
InvenSense LGE Accelerometer Sensor	17088	16988	894	18632	1921	3706	3434	4442	3485
Invensense MPL Accelerometer	16745.5	16897	1087	19049	1986	3507	3515	4449	3440
STMicroelectronics K330 3-axis Accelerometer	16800	16788	119	16909	1007	3432	4054	4741	3554
STMicroelectronics K330 Acceleration Sensor	16719	16719	20	16739	1001	3395	4000	4741	3582
Invensense MPL Accelerometer	16543	16525	848	17822	996	3818	2968	5283	3460
Invensense MPL accel	16429	16429	0	16429	502	3535	3555	5264	3573

^aMedian (MED), Mittelwert (AVG), Standardabweichung (STD) und Maximum (MAX) der Gesamtpunktzahlen aller Benchmarks eines Sensors; zur Anzahl der Benchmarks des jeweiligen Sensors siehe Tabelle 4.8

^bMittelwerte aller Benchmarkergebnisse eines Sensors bezüglich folgender Kategorien: E: Eventanzahl, Z: Zeitkontinuität, S: Standardabweichung, M: Minimale Schrittweite, G: Gravitationsgenauigkeit

4.3.2 Gyroskop

Wie bereits in Tabelle 4.5 dargestellt enthalten knapp die Hälfte aller Modelle ein Gyroskop. 630 Nutzer haben insgesamt 1672 Benchmarks durchgeführt, wovon jedoch nicht alle berücksichtigt werden dürfen. Eine Festlegung des Fake-Wertes auf weniger als 0.5 reduziert die Anzahl der Benchmarks auf 1576, sorgt jedoch dafür, dass die Benchmarks mit den größten Bedienungsfehlern durch den Benutzer aussortiert werden. Insgesamt enthält die SensMark Datenbank 95 verschiedene Gyroskope. Diese Zahl reduziert sich auf 34, wenn Unterschiede bei den technischen Spezifikationen nicht betrachtet werden und eine Gruppierung nur nach Hersteller und Sensorname erfolgt. Dies liegt daran, dass sich im Gegensatz zum Accelerometer die verschiedenen Gyroskope auf deutlich weniger Hersteller verteilen. Es handelt sich um InvenSense, RIM, STMicroelectronics, Google und The Panasonic Android Open Source Project, wobei davon auszugehen ist, dass die beiden Letzteren virtuelle Sensoren sind. Wie auch beim Beschleunigungssensor ist zum einen interessant, welche Gyroskope am weitesten verbreitet sind und zum anderen, welche Gyroskope die höchsten Punktzahlen in den Benchmarks erzielt haben. Die Tabellen 4.10 und 4.11 zeigen die 10 Sensoren mit den meisten Benchmarks, ihre technischen Spezifikationen und erzielte Punktzahlen. Im Unterschied zum Accelerometer ist eine Darstellung der Top Ten Gyroskope mit den höchsten Punktzahlen nicht sinnvoll, es handelt sich hierbei ausschließlich um den Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor mit variierenden technischen Spezifikationen. Auch hier lassen die technischen Daten eines Sensors keinen Rückschluss auf seine Genauigkeit zu. Bereits anhand der Tabelle 4.11 zeigt sich die generelle Tendenz der Benchmarkergebnisse der verschiedenen Hersteller. Der Mittelwert der Gesamtpunktzahlen aller Gyroskop-Benchmarks liegt bei 17434. Beinahe sämtliche Sensoren von Google Inc liegen meist deutlich über diesem Wert, der beste Sensor von Google erreicht über 28000 Punkte. Der schlechteste Sensor von InvenSense erreicht 9776 Punkte. Im Allgemeinen ist das Ergebnis von Sensoren des Herstellers InvenSense schlechter als der Durchschnitt. Sensoren des Herstellers STMicroelectronics erzielen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Es ist feststellbar, dass die Bandbreite der Benchmarkergebnisse größer als bei den Beschleunigungssensoren ist, obwohl weniger Hersteller Sensoren vom Typ Gyroskop bereitstellen.

Tabelle 4.10: Technische Spezifikationen weit verbreiteter Gyroskope.

Sensoren	Verbreitung		Technische Spezifikationen ^a			
	Hersteller Name	Benchmarks	Nutzer	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung
InvenSense LGE Gyroscope Sensor	140	93	17.453293	0.0010681152	5000	3.6
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	136	91	17.453293	0.0010681152	5000	9.1
Invensense MPL Gyro	83	49	10240	1	20000	0.5
STMicroelectronics LSM330DLC Gyroscope sensor	80	58	8.726646	0.00030543262	5000	6.1
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	77	56	8.726646	0.00030543262	5000	13.13
RIM Gyroscope	73	48	2000	0	1315	-1
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	63	39	8.726646	0.00030543262	10000	12.35
Invensense MPL Gyroscope	60	41	34.90656	0.57246757	10000	6.1
STMicroelectronics K3G Gyroscope Sensor	60	38	8.726646	0.00030543262	5000	6.1
Invensense MPL Gyroscope	58	43	34.90656	0.0010652636	5000	5.5

^aMax. Spektrum, Auflösung in rad/s; Min. Verzögerung in μ s; Strom in mA

Weiterhin interessant ist die Frage inwiefern das Vorhandensein eines Gyroskops die Ergebnisse anderer Sensoren positiv beeinflusst. Dies betrifft insbesondere die virtuellen Sensoren, die von den zusätzlichen Daten des Gyroskops profitieren könnten. Die nachfolgende Tabelle 4.12 zeigt die durchschnittlichen Gesamtpunktzahlen der Benchmarks von Modellen mit bzw. ohne Gyroskop pro Sensortyp.

Tabelle 4.11: Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Gyroskope.

Sensoren	Punkte gesamt ^a				Punkte Einzelkategorien ^b			
Hersteller Name	MED	AVG	STD	MAX	E	Z	S	M
InvenSense LGE Gyroscope Sensor	15136	15029	860	16870	1914	3595	4724	4796
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	24351	24016	1364	26373	3736	3841	4688	11751
Invensense MPL Gyro	12967	12893	2326	17121	682	2885	3725	5601
STMicroelectronics LSM330DLC Gyroscope sensor	14307	14271	647	15604	1943	3760	3535	5033
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	20907	20750	1230	22703	3757	3971	3098	9924
RIM Gyroscope	18104	17742	891	18962	543	2859	3765	10575
Google Inc. Corrected Gyroscope Sensor	19236	19123	1197	21192	1911	2976	3906	10330
Invensense MPL Gyroscope	13839	13725	738	15448	994	3850	4391	4490
STMicroelectronics K3G Gyroscope Sensor	13768	13921	845	16470	1847	2938	4103	5033
Invensense MPL Gyroscope	15356	15337	1675	19445	1972	3580	4334	5451

^aMedian (MED), Mittelwert (AVG), Standardabweichung (STD) und Maximum (MAX) der Gesamtpunktzahlen aller Benchmarks eines Sensors; zur Anzahl der Benchmarks des jeweiligen Sensors siehe Tabelle 4.10

^bMittelwerte aller Benchmarkergebnisse eines Sensors bezüglich folgender Kategorien:
E: Eventanzahl, Z: Zeitkontinuität, S: Standardabweichung, M: Minimale Schrittweite

Tabelle 4.12: Durchschnittliche Benchmarkergebnisse von Modellen mit bzw. ohne Gyroskop.

Sensortyp	mit Gyroskop		ohne Gyroskop	
	Modelle	AVG Punkte gesamt	Modelle	AVG Punkte gesamt
Accelerometer	176	15527	153	12654
Gravity	166	19635	47	18871
Light Sensor	46	2567	37	2036
Linear Acceleration	167	14450	46	14907
Magnetic Field	162	9701	98	7855
Orientation	163	14225	100	8007
Pressure Sensor	17	9570	2	8040
Proximity Sensor	33	1291	48	838
Rotation Vector	165	18784	46	15590

Betrachtet man die vorliegenden Daten, so fällt auf, dass Modelle mit Gyroskop bei beinahe jedem Sensortyp im Mittel besser abschneiden als Modelle ohne Gyroskop. Dies betrifft auch Sensoren vom Typ Pressure, Light oder Proximity, bei denen das mögliche Vorhandensein oder Fehlen eines Gyroskops keinerlei Unterschied ausmachen sollte. Daraus lässt sich die Hypothese ableiten, dass Modelle mit Gyroskop im Allgemeinen höherwertige Sensoren besitzen als Modelle ohne Gyroskop. Interessant ist jedoch, dass Modelle mit Gyroskop im Bereich der virtuellen Sensoren, d. h. insbesondere bei Sensoren des Typs Gravity und Linear Acceleration ähnliche Ergebnisse erzielen wie Modelle ohne Gyroskop. Hier wäre im Voraus ein besonders großer Unterschied zu erwarten gewesen, da sich die Daten der virtuellen Sensoren aus der Sensorfusion der Hardware Sensoren ergeben. Inwieweit hier auch die Betriebssystemversion von Android eine Rolle spielt wird in Abschnitt 4.6 behandelt. Die virtuellen Sensoren vom Typ Orientation² und Rotation Vector wiederum profitieren deutlich vom Vorhandensein eines Gyroskops.

4.3.3 Magnetic Field Sensor

Bei dem Magnetic Field Sensor handelt es sich um einen weit verbreiteten Sensor. Beinahe 9 von 10 Gerätemodelle besitzen einen Sensor dieses Typs (siehe Tabelle 4.5). Auch hier hilft die Festlegung eines Fake-Grenzwertes tendenziell unbrauchbare Benchmarks herauszufiltern. Sensoren vom Typ Magnetic Field liefern jedoch je nach Umgebung relativ stark schwankende bzw. verrauschte Werte. Insofern muss

²seit Android 2.2 (API Level 8) deprecated

der Grenzwert höher angesetzt werden, ein Wert von 0.8 scheint geeignet zu sein. Werden also nur Benchmarks mit einem Fake-Wert von weniger als 0.8 berücksichtigt, so reduziert sich die ursprüngliche Zahl von 1322 absolvierten Benchmarks auf 910. Diese Benchmarks wurden von 610 verschiedenen Nutzern durchgeführt. Auch hier liefern die nachfolgenden Tabellen 4.13 bis 4.16 die technischen Spezifikationen sowie die in den Benchmarks erzielten Ergebnisse sowohl für die am häufigsten vertretenen Sensoren als auch für die Sensoren mit den höchsten Punktzahlen. In der SensMark-Datenbank befinden sich insgesamt 81 verschiedene Magnetic Field Sensoren bei Berücksichtigung aller technischen Angaben. Fasst man Sensoren nach Hersteller und Sensorbezeichnung zusammen, so bleiben noch 54 verschiedene Sensoren übrig. Der Hersteller mit den bei SensMark Nutzern am stärksten verbreiteten Magnetic Field Sensoren ist AKM (Asahi Kasei Microdevices). Weitere Hersteller sind Invensense, RIM, Yamaha, STMicroelectronics, Bosch Sensortec, Aichi Steel und Alps. Zusätzlich gibt es noch einige weitere, diese sind aber teilweise nur bei einem einzigen Nutzer vorhanden. Vergleicht man die Tabelle der häufigsten Sensoren mit der der besten Sensoren, so fällt auf, dass AKM/Asahi Kasei Microdevices zwar mit Abstand bei den meisten Nutzern vertreten ist, jedoch nicht unter den zehn besten Sensoren aufgeführt ist. Alle Sensoren von AKM bleiben dabei dabei unter 10000 Punkten. Der Mittelwert aller Magnetic Field Sensor Benchmarks mit Fake-Wert unter 0.8 liegt bei 9671. Deutlich darüber liegen die Punktzahlen des besten Sensors, welcher 13770 Punkte erzielt und von Invensense stammt. Die besten 4 Magnetic Field Sensoren sind alle Sensoren des Herstellers Invensense. Aber auch die Sensoren von RIM erzielen wie schon bei den Accelerometer Benchmarks (siehe Kapitel 4.3.1 relativ gute Ergebnisse und sind unter den Top Ten Sensoren vertreten. Das Schlusslicht bildet der Yamaha Corporation MS-3C Magnetic Sensor mit 5966 Punkten im Durchschnitt, der jedoch aufgrund unterschiedlicher technischer Werte mehrfach vorhanden ist und auch bessere Ergebnisse erzielt hat. Besonders interessant ist aber, dass Invensense im Bereich der MEMS (micro-electrical-mechanical systems) eher auf Accelerometer und Gyroskope spezialisiert ist und gar keinen Magnetic Field Sensor für Smartphones oder Tablets vertreibt. Einzig die Kombination von Gyroskop, Accelerometer und Magnetic Field Sensor in einem Chipgehäuse als MPU-9150 enthält einen entsprechenden Sensor. Der in dieser Kombination eingesetzte Sensor stammt jedoch ursprünglich von AKM; es handelt sich dabei um den Sensor AK8975 der mit deutlich schlechteren Werten auch in Tabelle 4.14 aufgeführt ist [7]. Insofern ist davon auszugehen, dass sämtliche Magnetic Field Sensoren von Invensense auf dem AK8975 von AKM beruhen. Auffällig ist allerdings der große Unterschied in der Bewertung zwischen den eigentlich anscheinend vergleichbaren Sensoren. Invensense scheint hier die Genauigkeit erhöht zu haben. Inwiefern dies auf die Kombination in einem gemeinsamen *package* mit Verarbeitung der Rohdaten und Sensorfusion direkt im Chip zurückzuführen ist bleibt spekulativ; die Integration und Kombination zu einem System mit 6 oder 9 Freiheitsgraden (Accelerometer+Gyroskop und ggf. Magnetic Field Sensor, jeweils 3 pro Sensortyp) entspricht aber dem allgemeinen Trend [5].

Tabelle 4.13: Technische Spezifikationen weit verbreiteter Magnetic Field Sensoren.

Sensoren	Verbreitung		Technische Spezifikationen ^a			
	Hersteller Name	Benchmarks	Nutzer	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung
AKM LGE Magnetometer Sensor	143	90	4911.9995	0.14953613	20000	5
Asahi Kasei Microdevices AK8975C 3-axis Magnetic field sensor	75	55	2000	0.06	10000	6.8
RIM Magnetometer	71	54	1200	0	50000	-1
Invensense MPL Magnetic Field	58	40	8001	0.012	10000	4
Invensense MPL Magnetic Field	47	35	5461	0.9	10000	0.15
Asahi Kasei Microdevices AK8963C Magnetic field Sensor	46	30	2000	0.06	10000	6
Invensense MPL magnetic field	46	30	10240	1	20000	0.5
RIM Magnetometer	37	23	800	0	13333	-1
Asahi Kasei Microdevices AK8975 Magnetic field Sensor	34	26	2000	0.06	5000	6
Asahi Kasei AK8973 3-axis Magnetic field sensor	32	23	2000	0.0625	0	6.8

^aMax. Spektrum, Auflösung in μT ; Min. Verzögerung in μs ; Strom in mA

Tabelle 4.14: Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Magnetic Field Sensoren.

Sensoren	Punkte gesamt ^a				Punkte Einzelkategorien ^b			
	MED	AVG	STD	MAX	E	Z	S	M
AKM LGE Magnetometer Sensor	9403	9314	506	10273	482	3572	2516	2744
Asahi Kasei Microdevices AK8975C 3-axis Magnetic field sensor	9151	9160	333	9875	898	3128	2394	2740
RIM Magnetometer	11292	11266	570	12891	202	3334	2420	5310
Invensense MPL Magnetic Field	13193.5	12419	1756	14880	998	3816	2588	5017
Invensense MPL Magnetic Field	12864	13006	429	14098	974	3141	2600	6291
Asahi Kasei Microdevices AK8963C Magnetic field Sensor	9832.5	9805	241	10592	975	3568	2522	2740
Invensense MPL magnetic field	11994	10725	2914	14271	703	2786	2582	4654
RIM Magnetometer	7845	7872	176	8391	715	2966	2330	1861
Asahi Kasei Microdevices AK8975 Magnetic field Sensor	8828.5	8691	480	9162	840	2847	2264	2740
Asahi Kasei AK8973 3-axis Magnetic field sensor	9099.5	8736	809	9609	702	3191	2275	2568

^aMedian (MED), Mittelwert (AVG), Standardabweichung (STD) und Maximum (MAX) der Gesamtpunktzahlen aller Benchmarks eines Sensors; zur Anzahl der Benchmarks des jeweiligen Sensors siehe Tabelle 4.13

^bMittelwerte aller Benchmarkergebnisse eines Sensors bezüglich folgender Kategorien:
E: Eventanzahl, Z: Zeitkontinuität, S: Standardabweichung, M: Minimale Schrittweite

Tabelle 4.15: Technische Spezifikationen der Top Ten Magnetic Field Sensoren.

Sensoren Hersteller Name	Verbreitung		Technische Spezifikationen ^a			
	Benchmarks	Nutzer	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung	Strom
Invensense MPL magnetic field	1	1	360	0.03	200	0.15
Invensense MPL Magnetic Field	13	10	9830	0.15	10000	10
Invensense MPL Magnetic Field	47	35	5461	0.9	10000	0.15
Invensense MPL Magnetic Field	58	40	8001	0.012	10000	4
alps electric co., ltd. ALPS 3-axis Magnetic field sensor	17	7	4800	0.14992504	10000	0.2
Aichi Steel LGE Magnetometer Sensor	1	1	6.248474	0.018310547	20000	0.15
Invensense MPL Magnetic Field	1	1	10240	1	20000	0.5
RIM Magnetometer	27	17	1200	0.16666667	50000	-1
alps electric co., ltd HSCDTD006A	2	2	2200	0.29411766	10000	0.2
RIM Magnetometer	71	54	1200	0	50000	-1

^aMax. Spektrum, Auflösung in μT ; Min. Verzögerung in μs ; Strom in mA

Tabelle 4.16: Benchmarkergebnisse der Top Ten Magnetic Field Sensoren.

Sensoren	Punkte gesamt ^a				Punkte Einzelkategorien ^b			
	Hersteller Name	MED	AVG	STD	MAX	E	Z	S
Invensense MPL magnetic field	13770	13770	0	13770	1007	2912	2869	6982
Invensense MPL Magnetic Field	12493	13190	1456	15961	975	4108	2321	5786
Invensense MPL Magnetic Field	12864	13006	429	14098	974	3141	2600	6291
Invensense MPL Magnetic Field	13193.5	12419	1756	14880	998	3816	2588	5017
alps electric co., ltd. ALPS 3-axis Magnetic field sensor	11932	11894	1429	13598	980	3106	2523	5285
Aichi Steel LGE Magnetometer Sensor	11752	11752	0	11752	501	4581	2336	4334
Invensense MPL Magnetic Field	11688	11688	0	11688	374	2658	2322	6334
RIM Magnetometer	11353	11336	610	12526	202	3219	2533	5382
alps electric co., ltd HSCDTD006A	11286	11287	2599	13885	633	3376	2270	5008
RIM Magnetometer	11292	11266	570	12891	202	3334	2420	5310

^aMedian (MED), Mittelwert (AVG), Standardabweichung (STD) und Maximum (MAX) der Gesamtpunktzahlen aller Benchmarks eines Sensors; zur Anzahl der Benchmarks des jeweiligen Sensors siehe Tabelle 4.15

^bMittelwerte aller Benchmarkergebnisse eines Sensors bezüglich folgender Kategorien:
E: Eventanzahl, Z: Zeitkontinuität, S: Standardabweichung, M: Minimale Schrittweite

4.4 Sensorhersteller

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten skizziert gibt es mehrere große Hersteller von Sensoren für mobile Geräte, also insbesondere Smartphones und Tablets. Diese haben teilweise viele unterschiedliche Sensortypen im Angebot, teilweise sind sie jedoch auch auf einzelne Sensortypen spezialisiert. Dabei kommt es wie bereits in Abschnitt 4.3.3 beschrieben auch zu Kooperationen verschiedener Unternehmen, um mehrere Sensortypen in einem System-in-Package, d. h. in einem Gehäuse mit weiteren möglichen Modulen zur Sensorfusion zu vereinen. Im folgenden werden zuerst die Hersteller mit den meisten Sensoren in den Geräten der SensMark Nutzer aufgeführt. Die nachfolgende Tabelle 4.17 liefert zu jedem Sensortyp die drei Hersteller mit den meisten Sensoren. Sensoren mit der *vendor* Angabe RIM sind dabei nicht berücksichtigt, da es sich hierbei eigentlich um Sensoren anderer Hersteller wie z. B. STMicroelectronics oder Invensense handelt [3]. Es werden ebenfalls nur Sensoren berücksichtigt, die mindestens einmal initialisiert wurden.

Wie zu erwarten sind hier insbesondere die großen Hersteller wie Invensense und STMicroelectronics bei den Beschleunigungssensoren und Gyroskopen und Asahi Kasei bei Sensoren des Typs Magnetic Field vertreten. Bosch Sensortec stellt bei der Verbreitung der Beschleunigungssensoren den drittgrößten und bei den Luftdrucksensoren den größten Hersteller dar. Bei den virtuellen Sensoren sind außer Google Invensense und Qualcomm die am stärksten verbreiteten Hersteller. Dies zeigt den Trend mehrere Sensoren direkt auf Hardwareebene zur Sensorfusion zu nutzen. Neben der Verbreitung der einzelnen Hersteller pro Sensortyp ist der Durchschnitt der in allen Benchmarks eines Herstellers und Sensortyps erzielten Gesamtpunktzahlen interessant. Die nachfolgende Tabelle 4.18 führt die drei Hersteller mit der größten durchschnittlichen Gesamtpunktzahl je Sensortyp auf. Verschiedene Sensoren eines Herstellers und Typs werden dabei zusammengefasst. Sensoren mit dem *vendor* Angabe RIM werden nicht aufgeführt, da es sich hierbei um Sensoren anderer Hersteller handelt, ohne dass diese Hersteller exakt festgestellt werden könnten. Keinen Einfluss auf die Berücksichtigung der Benchmarks hat in diesem Fall der Fake Wert, d. h. alle durchgeführten Benchmarks fließen in die Berechnung der durchschnittlichen Punktzahl ein.

Betrachtet man die Tabelle 4.18 so fällt auf, dass die am weitesten verbreiteten Hersteller in den Benchmarks nicht immer vorne liegen. Teilweise ist nur die Reihenfolge vertauscht, teilweise sind die Hersteller jedoch auch unterschiedlich. Bemerkenswert ist hier insbesondere, dass Asahi Kasei als größter Hersteller von Magnetic Field Sensoren nicht in den Top 3 der Benchmarkergebnisse vertreten ist. Gleiches gilt für Capella Microsystems im Bereich der Licht- und Annäherungssensoren. Ebenfalls beachtenswert ist das gute Abschneiden von virtuellen Sensoren des Herstellers Qualcomm, die hier in 3 von 4 Fällen vor Google Inc. liegen.

Tabelle 4.17: Top 3 Sensorhersteller nach Verbreitung.

Sensoren	Top 3		
	Hersteller	Hersteller	Hersteller
	Anzahl	Anzahl	Anzahl
Accelerometer	Invensense 296	STMicroelectronics 249	Bosch Sensortec 139
Ambient Temperature	Sensirion 7	Asahi Kasei 2	
Gravity	Google Inc. 549	Invensense 201	Qualcomm 107
Gyroscope	Google Inc. 473	Invensense 331	STMicroelectronics 214
Light	Capella Microsystems 275	Avago 113	Sharp 107
Linear Acceleration	Google Inc. 546	Invensense 201	Qualcomm 106
Magnetic Field	Asahi Kasei 408	Invensense 171	Yamaha 36
Orientation	Google Inc. 352	Invensense 171	Asahi Kasei 137
Pressure	Bosch Sensortec 233	STMicroelectronics 62	
Proximity	Capella Microsystems 210	Avago 127	Sharp 124
Relative Humidity	Sensirion 7		
Rotation Vector	Google Inc. 548	Invensense 202	Qualcomm 106
Temperature	Asahi Kasei 11	On Semiconductor 4	

Tabelle 4.18: Top 3 Sensorhersteller nach Benchmarkergebnissen.

Sensoren	Top 3		
	Hersteller	Hersteller	Hersteller
	AVG(Punkte)	AVG(Punkte)	AVG(Punkte)
Accelerometer	Invensense 16303	STMicroelectronics 13945	Bosch Sensortec 12898
Ambient Temperature	Sensirion 10347		
Gravity	Qualcomm 22200	Google Inc. 21027	STMicroelectronics 19221
Gyroscope	Google Inc. 21340	STMicroelectronics 14256	Invensense 13950
Light	Maxim 4036	TAOS 3893	Sharp 3038
Linear Acceleration	Google Inc. 16017	Qualcomm 15677	STMicroelectronics 15670
Magnetic Field	Invensense 11336	Alps Electric 11310	Honeywell 8948
Orientation	Qualcomm 16238	Google Inc. 16162	Invensense 14518
Pressure	STMicroelectronics 12171	Bosch Sensortec 9013	
Proximity	Sony Ericsson 859	Sharp 734	Avago 647
Relative Humidity			
Rotation Vector	Qualcomm 20394	Google Inc. 19140	Invensense 18260
Temperature	Asahi Kasei 544		

4.5 Geräte

Wie viele und welche Sensoren in einem Smartphone vorhanden sind und inwiefern diese die Voraussetzungen besitzen exakte Daten zu liefern hängt von mehreren Faktoren ab. Grundsätzlich gilt, dass neuere und teurere bzw. höherwertige Modelle mehr Sensoren besitzen als ältere und günstigere Modelle. Dies lässt sich exemplarisch an den Geräten des Herstellers Samsung ablesen. Bei den Geräten der Galaxy S Reihe handelt es sich um weit verbreitete Geräte. Die nachfolgende Tabelle 4.19 zeigt das Modell GT-I9000 mit seinen jeweiligen direkten Nachfolgern GT-I9100, GT-I9300 und GT-I9500 sowie zusätzlich das ebenfalls weit verbreitete Nexus 4 von Google als Vergleich. Die neueren Modelle enthalten oftmals mehrere virtuelle Sensoren. Neben den softwarebasierten Sensoren von Google gibt es eigene Implementierungen der Sensorhersteller. Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt besteht der gegenwärtige Trend darin Accelerometer, Gyroskop und den Magnetic Field Sensor in einem *chip* oder *package* zu einer IMU (*inertial measurement unit*) zu kombinieren [8]. Zusätzlich ist ein Mikrocontroller integriert, so dass Sensor Fusion durchgeführt werden kann und dadurch virtuelle Sensoren des Herstellers verfügbar sind.

Tabelle 4.19: Sensoren verschiedener Modelle.

Sensortyp	Google Nexus 4	Samsung GT-I9500	Samsung GT-I9300	Samsung GT-I9100	Samsung GT-I9000
Accelerometer	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Ambient Temperature	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
Gravity	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Gyroscope	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Light	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Linear Acceleration	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Magnetic Field	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Orientation	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Pressure	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Proximity	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Relative Humidity	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
Rotation Vector	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein

Eine Vergleichbarkeit der einzelnen Sensoren wird dadurch erschwert, dass pro Modell teilweise mehrere Hardwareversionen mit unterschiedlichen Sensoren existieren. Dabei sind zwar stets die gleichen Sensortypen vorhanden, es kann jedoch sein,

dass die Sensoren von verschiedenen Herstellern stammen. Betrachtet man die Tabelle, so erkennt man, dass die Anzahl der Sensoren immer weiter zugenommen hat. Das Samsung GT-I9500 verfügt über alle von Android unterstützten Sensortypen.

4.6 Sonstiges/Auffälligkeiten

Neben der verbauten Hardware, d. h. den eigentlichen Sensoren, kann es weitere Faktoren geben, die über die Genauigkeit der vom Sensor gelieferten Daten entscheiden. Offensichtlich ist dies bei den virtuellen Sensoren, diese basieren auf den Daten vorhandener Hardware Sensoren und errechnen daraus die Daten, die der virtuelle Sensor schließlich zurückliefert. Dabei kommen verschiedene Filter und Algorithmen zum Einsatz, um mögliche Sensorungenauigkeiten oder Störeinflüsse durch die Umgebung so weit wie möglich zu neutralisieren. Das Android Open Source Project verfügt über drei softwarebasierte Bewegungssensoren (Gravity, Linear Acceleration und Rotation Vector), welche mit Android 4.0 ein Update erfahren haben und zur Verbesserung der Ergebnisse nun zusätzlich auf das Gyroskop zurückgreifen [1]. Auch hier dient wieder das GT-I9100 von Samsung als Untersuchungsobjekt. Zum einen sind aufgrund der großen Verbreitung des Geräts relativ viele Benchmarks vorhanden, zum anderen ist das Gerät mit vielen verschiedenen Android Versionen in der Datenbank vertreten. Tabelle 4.20 zeigt die Benchmarkergebnisse des GT-I9100 aufgeteilt nach Sensortyp und Android Version. Sind mehrere Hersteller pro Typ vorhanden so werden diese gesondert aufgeführt.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass zumindest im Falle des GT-I9100 und auf Basis der gesammelten Daten, kaum signifikante Unterschiede bezüglich der Benchmarkergebnisse der Sensoren unter verschiedenen Android Versionen existieren. Nur beim Gyroskop bzw. Linear Acceleration Sensor sind relativ große Abweichungen festzustellen. Interessant ist, dass das Ergebnis des Linear Acceleration Sensors unter Android 2.3.3 besser ist als unter Android 4.x. Hier hätte man aufgrund der verbesserten Implementierung dieses virtuellen Sensors ab Android 4.x. gegenteiliges erwartet. Allgemeingültige Aussagen bezüglich zu erwartender Unterschiede in der Genauigkeit von insbesondere virtuellen Sensoren auf Basis der Android Version zu treffen ist jedoch äußerst schwierig. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor könnte die Verwendung eines Custom-ROM, d. h. einer Variante von Android die nicht vom Hersteller des Smartphone stammt, sein. Hier sind bei den Sensoren teilweise eigene Implementierungen zu finden. Von relativ großer Bekanntheit ist die Firmware CyanogenMod. Die Datenbasis ist auch hier beim Samsung GT-I9100 am größten. 13 von 50 Nutzern dieses Modells verwenden CyanogenMod. Die Ergebnisse sind jedoch auch hier sehr ähnlich zu denen von Nutzern mit einer Firmware von Samsung, ein erkennbarer Einfluss von CyanogenMod auf die Sensorgenauigkeit ist nicht nachweisbar. Eigene Implementierungen von virtuellen Sensoren durch CyanogenMod sind kaum vorhanden. Somit sind keine zuverlässigen Aussagen diesbezüglich

Tabelle 4.20: Maximale Benchmark-Gesamtpunktzahl des Samsung GT-I9100 bezüglich verschiedener Android Versionen.

Sensortyp	Android Version			
	2.3.x	4.0.x	4.1.x	4.2.x
Accelerometer	14688	15122	15091	15024
Gravity	22651	22334	22162	21865
Gyroscope ^a	12951	16581	14692	16913
Gyroscope ^b		24734	22905	24505
Light		2029	2029	
Linear Acceleration	18171	16614	16442	16499
Magnetic Field	9305	9262	9203	9183
Orientation ^c	10362	10248	10006	
Orientation ^b		16102	13754	15359
Proximity		1323	1323	
Rotation Vector	18535	19655	19068	19750

^aSTMicroelectronics^bGoogle Inc.^cAsahi Kasei Microdevices

möglich. Ebenfalls untersucht wurde inwieweit die Ladung des Akkus Auswirkungen auf die Sensoren hat. Bei jedem Benchmark wurde die Ladung des Akkus in Prozent sowie mögliche Aufladung des Akkus während der Messung festgehalten. Eine stichprobenartige Auswertung der Daten mit verschiedenen Modellen, bei der die Status der Akkuladungen in 10% Schritten kategorisiert wurden lässt jedoch keine Auswirkungen auf die Messungen erkennen. Die Ergebnisse zeigen nur die üblichen Schwankungen durch die Messungen aber keine Unterschiede aufgrund des Ladezustands.

5 Versuche

Dieses Kapitel thematisiert die Versuche die Genauigkeit der Sensoren in Smartphones mit Hilfe von höherwertigen Messinstrumenten zu analysieren und zu bewerten. Wie bereits beschrieben eignet sich SensMark hauptsächlich dazu zu bewerten, inwieweit ein Sensor theoretisch in der Lage ist exakte Messdaten zu liefern. Je mehr Werte ein Beschleunigungssensor z. B. pro Sekunde liefert und je weniger diese sich unterscheiden, wenn das Gerät in Ruhe ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch Bewegungen exakt erfasst werden können. Da sich die Umgebungsbedingungen und die Durchführung der Benchmarks bei den SensMark Nutzern jedoch unterscheiden können sind diese Daten nicht immer zuverlässig. Zusätzlich handelt es sich bei den Benchmarkergebnissen von SensMark zwar um Indikatoren für die Genauigkeit von Smartphonesensoren, wie exakt diese Sensoren wirklich sind kann so jedoch nicht abschließend beantwortet werden. Aufgrund dessen wurde die Genauigkeit einer Reihe von Sensoren verschiedener Smartphone Modelle unter kontrollierten Umgebungsbedingungen getestet und mit den Ergebnissen hochwertiger Messinstrumente verglichen. Es handelt sich hierbei um die Sensoren folgenden Typs: *Accelerometer*, *Magnetic Field*, *Light* und *Pressure*. Neben diesen hardwarebasierten Sensoren wurde zusätzlich als softwarebasierter Sensortyp der *Linear Acceleration* Sensor untersucht. Die grundlegenden Bedingungen werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. Anschließend folgen die jeweiligen Versuche zu den einzelnen Sensoren einschließlich des jeweiligen Versuchsaufbaus, seiner Durchführung und einer abschließenden Bewertung der gewonnenen Beobachtungen.

5.1 Getestete Geräte

Für die Versuche zur Ermittlung der Genauigkeit der einzelnen Sensoren stehen insgesamt zwölf verschiedene Geräte zur Verfügung, davon neun Smartphones und drei Tablets. Zwei der Geräte stammen vom Hersteller BlackBerry, bei den restlichen Geräten handelt es sich um Modelle mit dem Betriebssystem Android. Das P700 von LG ist dreimal vorhanden, wodurch eine zusätzliche Vergleichsmöglichkeit der in den drei gleichen Gerätemodellen enthaltenen Sensoren gegeben ist. Tabelle 5.1 zeigt alle Geräte inklusive der getesteten Sensoren.

Tabelle 5.1: Sensoren verschiedener Modelle.

Modell	Sensortyp				
	Accelerometer	Linear Acceleration	Magnetic Field	Light	Pressure
BlackBerry PlayBook			Ja		
BlackBerry Z10	Ja	Ja	Ja	Ja	
Google Galaxy Nexus	Ja		Ja	Ja	Ja
Google Nexus S	Ja	Ja	Ja	Ja	
Google Nexus 4	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Google Nexus 7	Ja		Ja	Ja	
Lenovo A1_07	Ja			Ja	
LGE LG-P700 ^a	Ja		Ja		
Motorola MB525	Ja	Ja	Ja	Ja	
Samsung GT-I9100	Ja	Ja	Ja	Ja	

^adreifach vorhanden

5.2 Accelerometer und Linear Acceleration

Neben dem Accelerometer als hardwarebasiertem Sensor umfasst dieses Kapitel ebenfalls die Versuche und Ergebnisse zum Linear Acceleration Sensor. Bei diesem Sensor handelt es sich um einen virtuellen Sensor. Beide Sensoren messen die Beschleunigung a des jeweiligen Sensors und damit des Geräts in der SI-Einheit $\frac{m}{s^2}$. Sie unterscheiden sich dadurch, dass beim Accelerometer stets die Erdbeschleunigung mitgemessen wird, während diese beim Linear Acceleration Sensor nicht gemessen wird. Befindet sich das Gerät in Ruhelage, so wird das Accelerometer in entsprechender Position (z. B. liegend, Wert für x- und y-Achse = 0) für die z-Achse einen Wert von $1g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$ registrieren, während der Linear Acceleration Sensor in selber Position im Idealfall für alle drei Achsen den Wert 0 anzeigen würde. Der in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Versuchsaufbau sowie die Durchführung sind für beide Sensoren größtenteils identisch. Etwaige Unterschiede werden an den entsprechenden Stellen beschrieben.

5.2.1 Aufbau und Durchführung

Zur Messung und Bewertung der Genauigkeit der Beschleunigungssensoren wird ein Rütteltisch bzw. Schwingtisch benutzt. Dieser erzeugt senkrecht zur Tischfläche ge-

richtete Bewegungen. Es handelt sich dabei um eine ungedämpfte und harmonische Schwingung, der zeitliche Verlauf der Schwingung lässt sich dementsprechend durch eine Sinusfunktion beschreiben. Es gelten daher die folgenden bekannten Bewegungsgesetze (vereinfacht):

$$y(t) = \hat{y} \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

$$v(t) = \hat{v} \cos(\omega t) \quad \text{mit} \quad \hat{v} = \hat{y} \omega \quad (5.2)$$

$$a(t) = \hat{a} \sin(\omega t) \quad \text{mit} \quad \hat{a} = -\hat{y} \omega^2 \quad (5.3)$$

t : Zeit, $y(t)$: zeitliche Auslenkung, \hat{y} : maximale Auslenkung/Amplitude

f : Frequenz, $\omega = 2\pi f$: Kreisfrequenz, v : Geschwindigkeit

\hat{v} : maximale Geschwindigkeit, a : Beschleunigung

\hat{a} : maximale Beschleunigung

Die durch die Sensoren in den Smartphones und Tablets erfasste maximale Beschleunigung ist wie in Gleichung 5.3 zu sehen einzig von der Amplitude der Schwingung des Rütteltisches bzw. seiner Tischplatte \hat{y} , sowie der Schwingfrequenz f abhängig. Der Zusammenhang zwischen Amplitude und maximaler Beschleunigung ist linear, während die maximale Beschleunigung proportional dem Quadrat der Schwingfrequenz ist. Die Höhe der Amplitude wird durch die an den Rütteltisch angelegte Spannung festgelegt. Dabei gilt:

$$\hat{y} = U_{Tisch} \cdot 10 \quad U \text{ in } V, \hat{y} \text{ in } \mu m \quad (5.4)$$

Eine Multiplikation der Spannung U mit dem konstanten Faktor 10 ergibt folglich die maximale Auslenkung des Tisches. Zu beachten ist, dass die Beschreibung der sinusförmigen Spannung wie in Abbildung 5.1 zu sehen als Spitze-Spitze-Wert erfolgt. Er entspricht der Differenz aus dem maximalen und minimalen Wert der periodischen Spannung.

Aufgrund dessen ergibt sich \hat{y} ebenfalls als Spitze-Spitze-Wert, d. h. als das Doppelte der Amplitude. Daraus folgt eine Verdoppelung der mit Hilfe der Formel 5.3 errechneten maximalen Beschleunigung. Diese wird im Folgenden mit Δa (in $\frac{m}{s^2}$) bezeichnet. Auf die Auswertung der durch die Sensoren gesammelten Daten bezogen bedeutet dies, dass auch hier die Differenz aus dem Wert für die maximale Beschleunigung und dem Wert der minimalen Beschleunigung gebildet werden muss. Dieses Vorgehen ist notwendig, da das Accelerometer wie bereits beschrieben stets auch die Erdbeschleunigung mitmisst. Die Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung ergibt sich im Idealfall einer harmonischen Schwingung als Doppeltes des Beschleunigungsmaximums in positiver Bewegungsrichtung einer Achse. Dies entspricht ebenso dem Betrag des doppelten Beschleunigungsminimums in negativer Bewegungsrichtung derselben Achse, da die Schwingung sinusförmig und der Betrag von maximaler und minimaler Beschleunigung identisch ist. Durch die Verwendung dieser Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung wird die

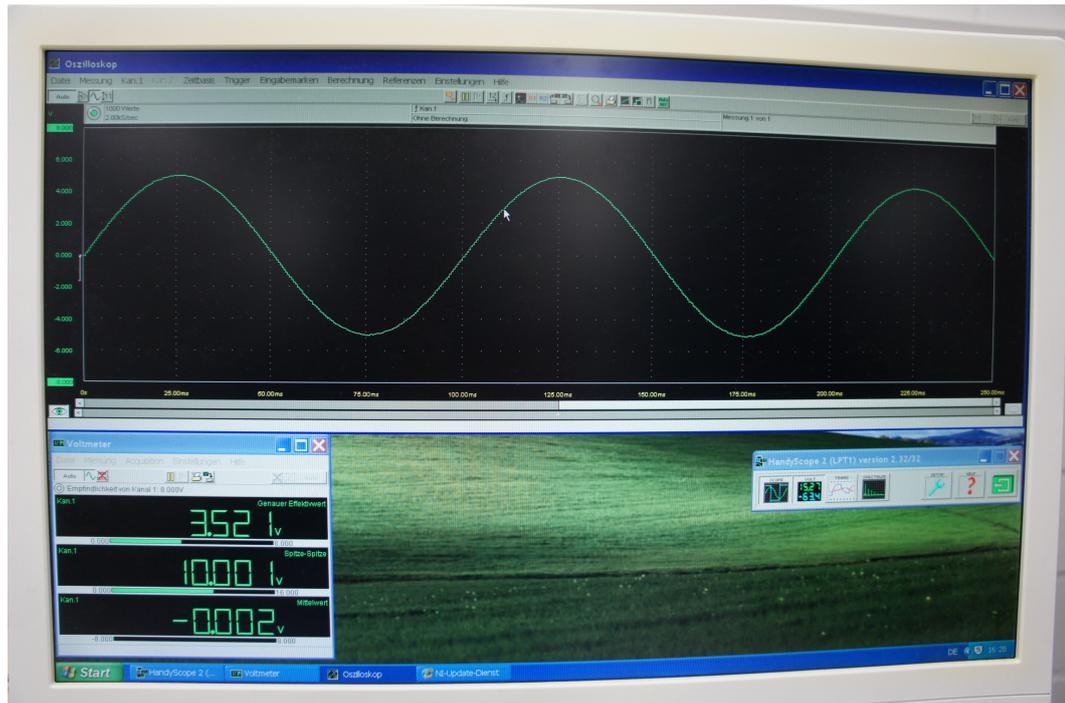


Abbildung 5.1: Oszilloskop bei $U = 10V$ Spitze-Spitze und $f = 10Hz$.

genaue Kenntnis der Erdbeschleunigung oder eine Verwendung eines errechneten Mittelwertes unnötig. Zudem wird eine genaue Auswertung durch die Bildung der Differenz der Beschleunigungswerte pro Schwingung ermöglicht. Zur Verdeutlichung des Vorgehens siehe Abbildung 5.2, die einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigungswerte des Accelerometers des Nexus 7 bei $U = 10V$ und $f = 10Hz$ zeigt.

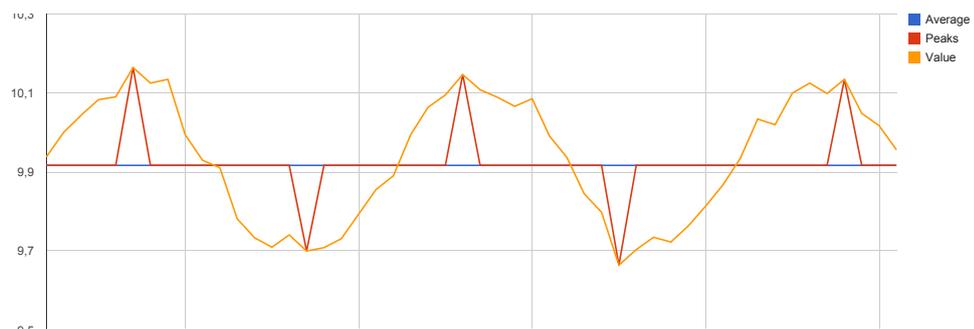


Abbildung 5.2: Beispiel: Berechnung maximaler und minimaler Beschleunigungswerte, Nexus 7.

Die durch den Sensor gemessenen Werte werden durch die orangene Linie darge-

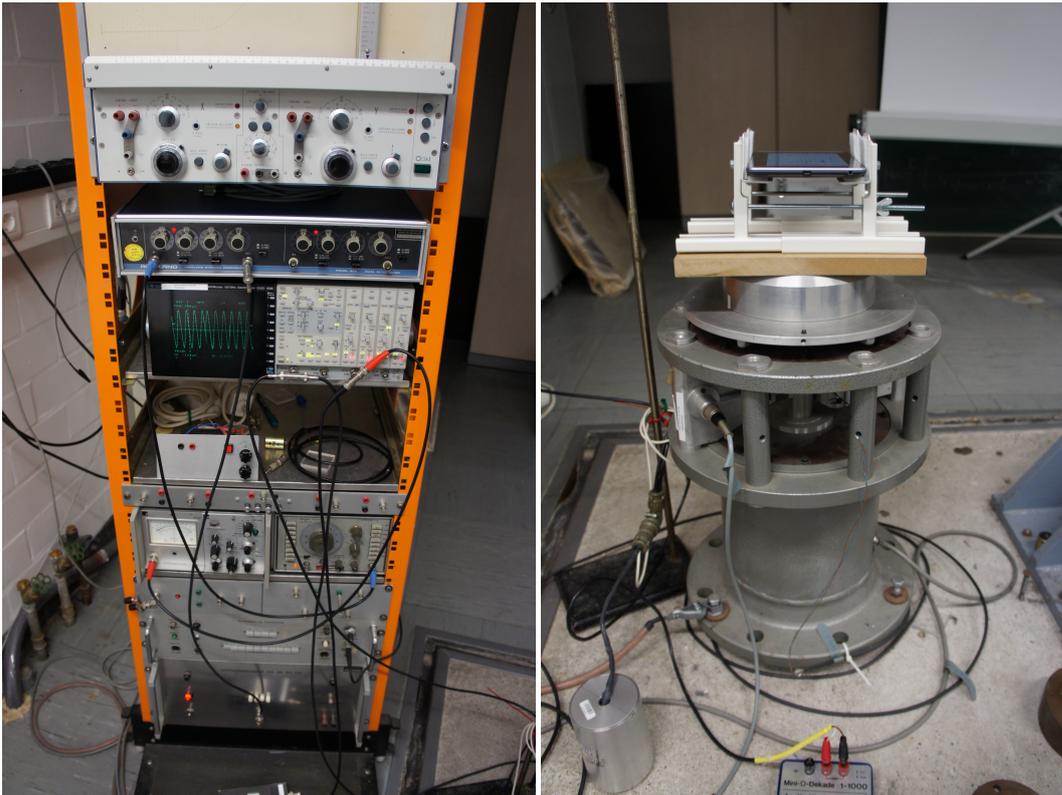


Abbildung 5.3: Steuerungsvorrichtungen für Frequenz und Spannung inklusive Oszilloskop sowie Rütteltisch.

stellt. Auf Basis dieser Werte werden für jede Schwingung zwei Spitzen (*Peaks*, rote Linie) festgelegt. Diese kennzeichnen die pro Schwingung gemessene maximale und minimale Beschleunigung. Durch die Bildung des Spitze-Spitze-Wertes ergibt sich auch hier das Doppelte der maximalen Beschleunigung je einer Bewegungsrichtung. Abschließend kann beispielsweise der Mittelwert aller durch den Sensor gemessenen Spitze-Spitze-Werte der Beschleunigung berechnet und mit dem bereits bekannten Idealwert verglichen werden.

Die Versuche zu Accelerometer und Linear Acceleration Sensor umfassen insgesamt fünf Messreihen. Gemessen wurde die Beschleunigung bei $U = 10V$, $f = 5Hz, 10Hz, 20Hz, 40Hz$, sowie bei $U = 20V$, $f = 5Hz$. Die folgenden Abbildungen 5.3 und 5.4 zeigen den generellen Versuchsaufbau.

Die in Abbildung 5.4 gezeigte und für diesen Versuch konstruierte Spannvorrichtung dient der Fixierung der Geräte auf dem Rütteltisch. Diese sind dabei so ausgerichtet, dass die durch den Tisch erzeugte Bewegung nur zu der Änderung von Werten einer Achse des Geräts führt, die anderen beiden Achsen bleiben im Idealfall unbeeinflusst durch die Schwingung. Die Versuche beschränken sich auf je eine Achse pro

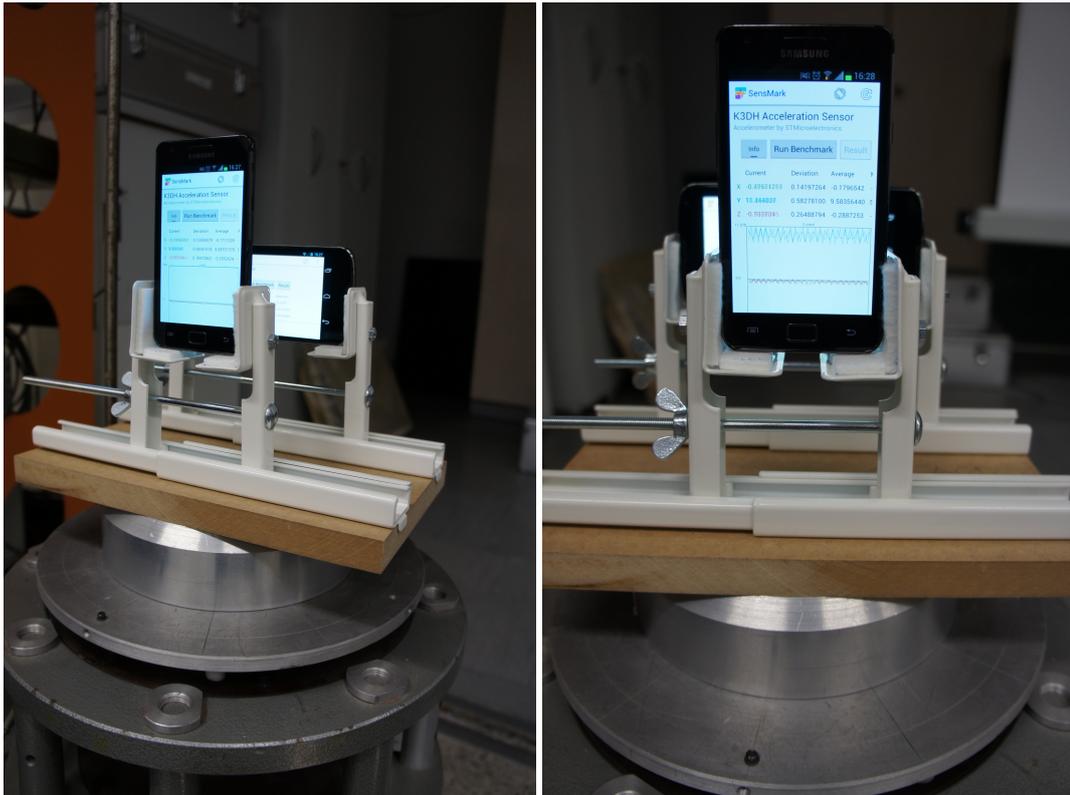


Abbildung 5.4: Spannvorrichtung auf Rütteltisch zur Fixierung der Geräte.

Gerät.

Zur Versuchsdurchführung werden je zwei Geräte, falls es sich dabei um Smartphones handelt, bzw. ein Gerät bei Tablets in die Vorrichtung eingespannt. Nach Auswahl der entsprechenden Spannung und Frequenz sowie Kontrolle des entsprechenden Signals am Oszilloskops wird der SensMark Benchmark für den Beschleunigungssensor gestartet. Dieser sammelt über die Zeitdauer von $t = 10s$ Daten. Anschließend erfolgt eine Auswertung der Daten hinsichtlich des gemittelten Spitze-Spitze-Beschleunigungswertes im Vergleich zum Idealwert sowie eine qualitative Analyse des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigungswerte des Sensors. Tabelle 5.2 zeigt die technischen Spezifikationen der getesteten Accelerometer

Tabelle 5.2: Technische Spezifikationen untersuchter Accelerometer^a.

Modell	Sensor	Technische Spezifikationen ^b			
	Hersteller Name	Max. Spektrum	Auflösung	Min. Verzögerung	Strom
BlackBerry Z10	RIM Accelerometer	20	0	2500	-1
Google Galaxy Nexus	Invensense MPL Accelerometer	19.6133	0.038344003	10000	0.139
Google Nexus S	STMicroelectronics KR3DM 3-axis Accelerometer	19.6133	0.019153614	20000	0.23
Google Nexus 4	InvenSense LGE Accelerometer Sensor	39.226593	0.0011901855	5000	0.5
Google Nexus 7	Invensense MPL Accelerometer	19.6133	0.039226603	5000	0
Lenovo A1_07	Analog Devices, Inc ADXL345 Accelerometer Sensor	0	0	0	0
LGE LG-P700 ^c	Bosch Sensortec BMA250 Accelerometer	39.22	0.038300782	0	0.03
Motorola MB525	Kionix KXTF9 3-axis Accelerometer	78.48	0.00980665	0	0.57
Samsung GT-I9100	STMicroelectronics K3DH Acceleration Sensor	19.6133	0.0047884034	5000	0.25

^aWerte von 0 entsprechen im Allgemeinen fehlenden technischen Spezifikationen bzw. bedeuteten, dass diese nicht durch SensMark ausgelesen werden konnten

^bMax. Spektrum, Auflösung: SI-Einheit der Werte in m/s²; Min. Verzögerung in μ s; Strom in mA

^cdreifach vorhanden

5.2.2 Ergebnis

Die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind bezüglich der fünf Messreihen nach maximaler Beschleunigung aufsteigend aufgeteilt. Die einzelnen Messreihen stellen dabei unterschiedliche Anforderungen an die Beschleunigungssensoren der Geräte. Schwingungen mit niedrigen Frequenzen sollten durchaus auch von schwächeren Sensoren, die vergleichsweise wenig Werte pro Sekunde erfassen können, zuverlässig erkannt werden. Das Problem dabei ist jedoch, dass eine niedrige Frequenz dazu führt, dass die maximalen Beschleunigungswerte ebenfalls sehr niedrig sind (siehe 5.3). Hier könnte gerade bei schwächeren Sensoren das eigene Rauschen o. ä. zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Die Schwingungen der Messreihen mit einer höheren Schwingfrequenz haben dagegen deutlich höhere Beschleunigungswerte, die kurze Schwingungsdauer erfordert jedoch vom Sensor vergleichsweise viele Messwerte pro Sekunde. Dem bekannten Abtasttheorem von Nyquist und Shannon zufolge wird bei einem Signal mit der maximalen Frequenz f_{max} eine Abtastfrequenz von mindestens $2 \cdot f_{max}$ benötigt, um das ursprüngliche Signal rekonstruieren zu können. Die Versuchsauswertung verzichtet auf eine mögliche Interpolation des ursprünglichen Signals mit Hilfe eines Polynoms oder ähnlichem und beschränkt sich auf den real gemessenen Verlauf der Beschleunigung. Aufgrund der zu erwartenden starken Abweichungen der schwächeren Sensoren bei hohen Frequenzen wird bei der Messreihe mit der höchsten Frequenz zusätzlich die Differenz aus der globalen maximalen und minimalen Beschleunigung über die gesamte Messdauer angegeben.

Messreihe 1: $U = 10V, f = 5Hz$

Aufgrund der festgelegten Werte von $U = 10V$ und $f = 5Hz$ ergibt sich eine zu erwartende maximale Beschleunigungsdifferenz von $\Delta a \approx 0,098696 \frac{m}{s^2}$. Diese ist damit z. B. um den Faktor 3 höher als die vom Hersteller des Beschleunigungssensors im Nexus 7 von Google angegebene Auflösung des Sensors. Die maximale Beschleunigung in eine Richtung ergibt sich jedoch durch $\frac{\Delta a}{2}$, d. h. die zu erwartende Beschleunigung ist maximal 1,5 mal so groß wie die Auflösung des Sensors. Da es sich um eine sinusförmige Schwingung handelt müssten durch den Sensor allerdings auch Beschleunigungswerte erfasst werden, die mit der angegebenen Auflösung nicht erfasst werden können. Die Ergebnisse der Benchmarks der einzelnen Sensoren fallen relativ unterschiedlich aus. So registriert z. B. das MB525 für beinahe die Hälfte der Zeit nur einen einzigen Messwert und auch danach werden teilweise deutlich zu starke Beschleunigungen gemessen. Der sinusförmige Verlauf der Beschleunigung ist im Diagramm kaum erkennbar. Zudem hat der Sensor im Durchschnitt nur 9,21 Werte pro Sekunde gemessen. Abbildung 5.5 zeigt den vom MB525 gemessenen zeitlichen Verlauf der Beschleunigung. Eine Wiederholung der Messung führte zu ähnlichen Ergebnissen.

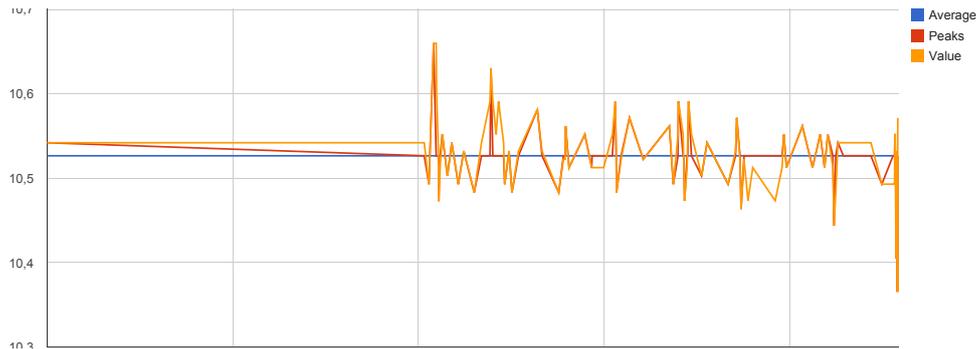


Abbildung 5.5: Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des MB525 bei $U = 10V$, $f = 5Hz$.

Die Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung während des gesamten Messzeitraums beträgt $\approx 0,2942 \frac{m}{s^2}$, die relative Abweichung liegt bei 198,09%. Es ist jedoch im zeitlichen Verlauf erkennbar, dass die pro Schwinung gemessenen Beschleunigungswerte im Allgemeinen deutlich geringer sind. Die Bildung des Mittelwertes der jeweiligen Differenzen aus lokalem Beschleunigungsmaximum und dem darauffolgenden Minimum ergibt einen Wert von $\approx 0,0809 \frac{m}{s^2}$ sowie eine relative Abweichung zum Idealwert von $-18,03\%$. Die anderen Geräte zeigen teils bessere zeitliche Verläufe der gemessenen Beschleunigung. Die Geräte Nexus 4 sowie Nexus 7 erfassen jeweils knapp 200 Messwerte pro Sekunde. Beide Sensoren registrieren jedoch sehr schwankende Messwerte, d. h. obwohl der sinusförmige Verlauf erkennbar ist existieren zu große Abweichungen bei aufeinander folgenden Messwerten. Abbildung 5.6 illustriert dies am Beispiel des Nexus 4.

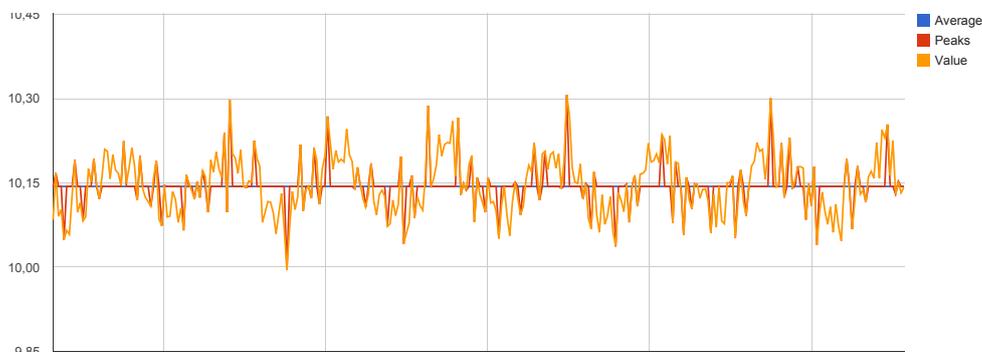


Abbildung 5.6: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung des Nexus 4 bei $U = 10V$, $f = 5Hz$.

Auch hier ist die Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung deutlich zu groß. Auch eine Bildung des Mittelwertes der jeweiligen lokalen Differenz verbessert das Ergebnis nur mäßig. Die besten Ergebnisse dieser Messreihe liefert das Z10 trotz der im Vergleich zu Nexus 4 bzw. Nexus 7 geringeren Abtastfrequenz des

Sensoren von durchschnittlich 45Hz , d. h. 45 Messwerten pro Sekunde. So ergeben sich auch hier Unterschiede in der pro Schwingung registrierten maximalen und minimalen Beschleunigung, der sinusförmige Verlauf der Beschleunigung ist jedoch klar erkennbar. Zudem treten deutlich weniger Schwankungen bei aufeinander folgenden Messwerten auf (siehe Abbildung 5.7). Der hier errechnete Mittelwert der lokalen Beschleunigungsdifferenzen beträgt $\approx 0,12005 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, die relative Abweichung liegt bei 21,6%.

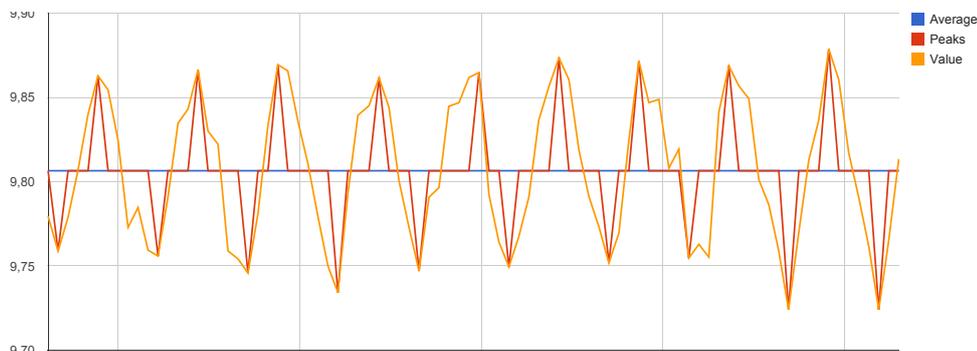


Abbildung 5.7: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung des Z10 bei $U = 10\text{V}$, $f = 5\text{Hz}$.

Insgesamt sind die Ergebnisse der einzelnen Sensoren bei den gegebenen Parametern von $U = 10\text{V}$, $f = 5\text{Hz}$ nicht zufriedenstellend. Durch die geringe Beschleunigung haben die Sensoren Probleme diese überhaupt zu erfassen oder liefern sehr schwankende Messwerte. Die relative Abweichung der ermittelten durchschnittlichen Spitze-Spitze-Beschleunigung einer Schwingung ist zu groß. Theoretisch sollte insbesondere der Sensor des Nexus 4 bei dessen angegebener Auflösung und min. Verzögerung in der Lage sein die während der Schwingungen auftretenden Beschleunigungen exakt zu erfassen. Leider fehlt der direkte Vergleich mit einem hochwertigen Beschleunigungssensor bei den entsprechenden Rütteltisch-Versuchsreihen, so dass Fehler in der Versuchsdurchführung bzw. im Aufbau nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Um die Aussagen bezüglich der Genauigkeit der Sensoren bei niedrigen Schwingfrequenzen und daraus folgenden niedrigen Beschleunigungen zu verifizieren wäre eine erneute Messung mit geeichten Beschleunigungssensoren zum direkten Vergleich vorteilhaft.

Bezüglich der Linear Acceleration Sensoren zeigen sich teilweise auch erstaunliche Ergebnisse. So sammelt der Linear Acceleration Sensor beim MB525 im Vergleich zum Accelerometer in etwa 2,5 mal so viele Werte. Der zeitliche Beschleunigungsverlauf entspricht qualitativ dem des Accelerometers, die Messwerte sind jedoch noch schlechter. So beträgt der Unterschied zwischen maximaler und minimaler Beschleunigung $4,1818 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ anstatt der zu erwartenden $0,098696 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Das Nexus S hingegen registriert bei beiden Sensortypen im Mittel ca. 47 Messwerte pro Sekunde. Der zeitliche Beschleunigungsverlauf ist unterschiedlich, wobei der Linear Acceleration Sensor mit

einem gemittelten $\Delta a \approx 0,1776 \frac{m}{s^2}$ gegenüber $\approx 0,2085 \frac{m}{s^2}$ beim Accelerometer besser abschneidet. Auch das Galaxy Nexus erzielt beim Linear Acceleration Sensor deutlich bessere Ergebnisse, da im Gegensatz zum Accelerometer am Ende der Messung keine Ausreißer vorhanden sind. Der Linear Acceleration Sensor des Z10 hingegen erfasst für den Großteil des Messzeitraums keine Änderungen an den Messwerten und liefert insofern ein unbrauchbares Ergebnis.

Messreihe 2: $U = 20V, f = 5Hz$

Bei dieser Versuchsreihe wurde die Spitze-Spitze-Spannung im Vergleich zur vorherigen Messreihe verdoppelt. Die zu erwartende Spitze-Spitze-Beschleunigung verdoppelt sich damit ebenfalls und liegt bei $\Delta a \approx 0,19739 \frac{m}{s^2}$. Die Ergebnisse sind zu großen Teilen identisch zu denen aus Versuchsreihe 1. Das MB525 sowie A1_07 erzielen die schlechtesten Ergebnisse. Nexus 4 sowie Nexus 7 registrieren die meisten Messwerte pro Sekunde, die Abweichungen sind jedoch zu groß (vergleichbar mit dem in Abbildung 5.6 gezeigten Verlauf). Der vom Accelerometer des GT-I9100 erfasste Verlauf der Beschleunigung entspricht dem von Nexus 4 und Nexus 7, wobei das S2 in etwa halb so viele Messwerte pro Sekunde erfasst. Das Z10 liefert auch hier wieder das beste Ergebnis. Die Beschleunigungsdifferenz beim Z10 beträgt im Mittel $\approx 0,2134 \frac{m}{s^2}$, die relative Abweichung liegt bei 8,1%. Die relative Abweichung hat sich damit im Vergleich zur vorherigen Messreihe mehr als halbiert. Dies ist auf die erhöhten Beschleunigungswerte zurückzuführen.

Bei den Sensoren vom Typ Linear Acceleration sind die Ergebnisse unterschiedlich. Das MB525 hat bei Accelerometer und Linear Acceleration Sensor unterschiedliche Messwerte gesammelt, die errechnete Beschleunigung ist jedoch in etwa gleich. Ähnliches gilt auch für das Nexus S sowie Nexus 4. Beim GT-I9100 erzielt der Linear Acceleration Sensor trotz starker Schwankungen der Messwerte das bessere Gesamtergebnis. Das Ergebnis beim Z10 ähnelt stark dem aus der ersten Messreihe. Auch hier registriert der Sensor beinahe während der gesamten Messung keine Beschleunigung.

Messreihe 3: $U = 10V, f = 10Hz$

Die Spitze-Spitze-Spannung beträgt in dieser Reihe nun wieder 10V während die Frequenz auf 10Hz erhöht wurde. Daraus folgt: $\Delta a \approx 0,39478 \frac{m}{s^2}$. Die durch die Schwingung erzeugten Beschleunigungen sind hoch genug, um von den meisten Sensoren relativ exakt erkannt zu werden. Abbildung 5.8 zeigt die gemittelte Differenz der lokalen Spitze-Spitze-Beschleunigungen, d. h. der Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung pro Schwingung im Vergleich zum zu erwartenden Idealwert des Rütteltisches von $\Delta a \approx 0,39478 \frac{m}{s^2}$.

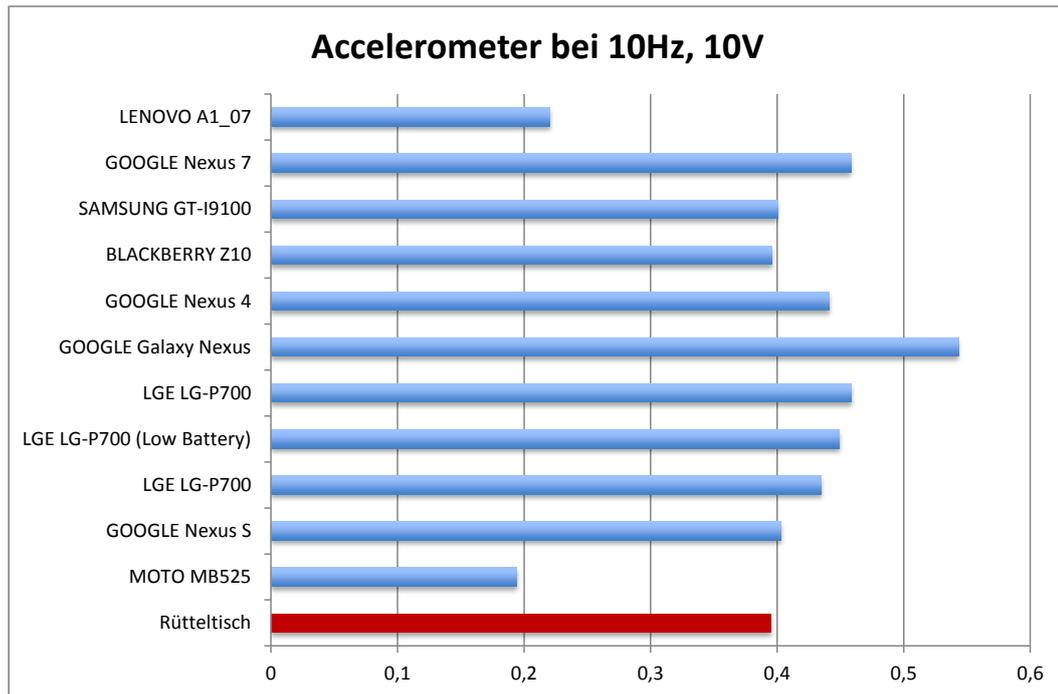
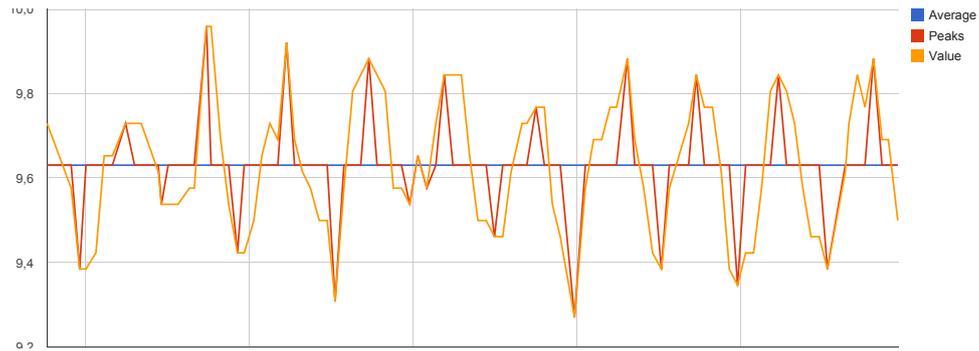


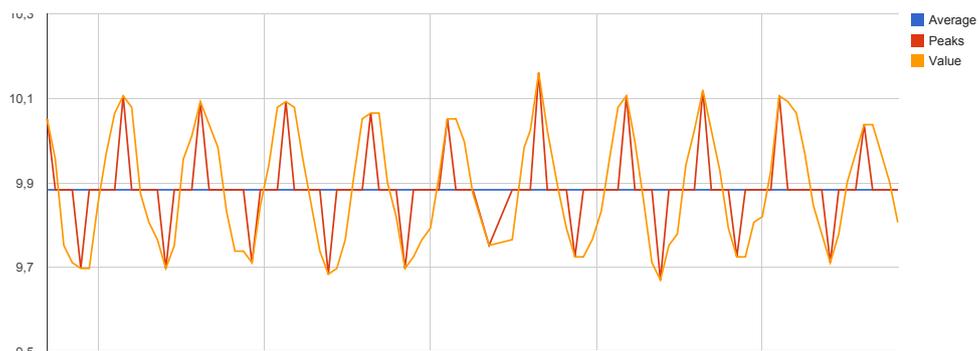
Abbildung 5.8: Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V$, $f = 10Hz$.

Man sieht, dass auch hier das MB525 sowie das A1_07 am schlechtesten abschneiden. Das insgesamt dreifach vorhandene LG-P700 erzielt mit allen drei Geräten ähnliche Ergebnisse. Bei zwei Geräten wurde der Benchmark mit einer Akkuladung von mehr als 85% durchgeführt, während der Akkustand bei dritten Gerät kleiner 10% war. Dies hat anscheinend keinen Einfluss auf die Messungen, da der ermittelte Beschleunigungswert genau zwischen denen der beiden stärker geladenen Geräten liegt. Das Nexus S sowie das Z10 messen beide ähnlich viele Werte pro Sekunde (Nexus S: 47,7; Z10: 45,5), das Z10 registriert jedoch bis auf einen Ausreißer am Ende deutlich gleichmäßigere Beschleunigungen, während die Differenz von maximalen und minimalen Beschleunigungswerten pro Schwingung beim Nexus S im Bereich zwischen 0,1 und $0,6 \frac{m}{s^2}$ variiert. Nexus 4 sowie Nexus 7 erzielen wiederum ähnliche Ergebnisse, der zeitliche Verlaufe der gemessenen Werte ist beim Nexus 7 minimal besser als beim Nexus 4. Abbildung 5.9 zeigt einen Vergleich der gemessenen Beschleunigungswerte verschiedener Geräte über 10 Schwingungen, d. h. bei einer Schwingfrequenz von $f = 10Hz$ in einem Zeitraum von $1s$.

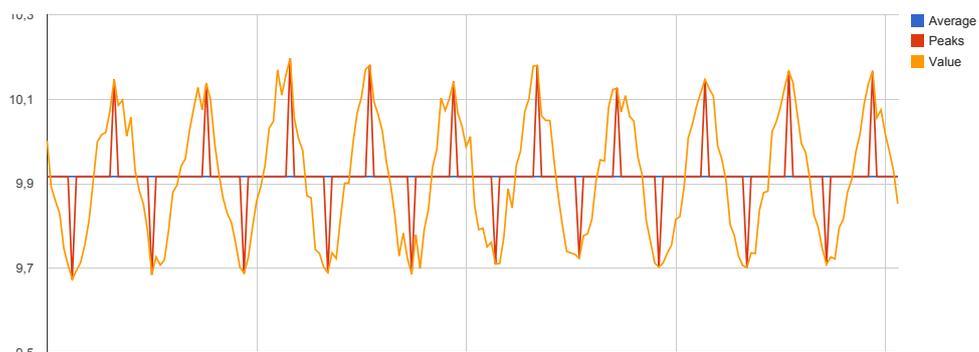
Bezüglich der jeweiligen Linear Acceleration Sensoren gibt es wiederum unterschiedliche Ergebnisse. Beim MB525 werden am Ende der Messung Beschleunigungen von über $1 \frac{m}{s^2}$ gemessen. Bei Nexus S, Nexus 4 und GT-I9100 sind die Unterschiede



(a) LG-P700: 95,4 Messwerte pro Sekunde



(b) GT-I9100: 96,7 Messwerte pro Sekunde



(c) Nexus 7: 200,2 Messwerte pro Sekunde

Abbildung 5.9: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung verschiedener Geräte bei $U = 10V$ und $f = 10Hz$ zwischen $t_0 = 4s$ und $t_1 = 5s$.

de zwischen den beiden Sensortypen gering. Der Linear Acceleration Sensor des Galaxy Nexus korrigiert die beim Accelerometer am Ende der Messung auftretenden Schwankungen und erzielt somit ein deutlich besseres Ergebnis. Das Z10 registriert abermals nur am Beginn der Messung korrekte Änderungen der Beschleunigung.

Messreihe 4: $U = 10V, f = 20Hz$

Eine weitere Erhöhung der Frequenz auf $f = 20Hz$ (bei konstant gebliebener Spannung $U = 10V$ Spitze-Spitze) führt zu einer deutlichen Vergrößerung von $\Delta a \approx 1,57914 \frac{m}{s^2}$. Δa beträgt nun teilweise mehr als das Tausendfache der jeweiligen Sensorauflösung, die Schwingungen sollten nun insbesondere von Nexus 4 und Nexus 7 mit 200 Messwerten pro Sekunde exakt erkannt werden. Abbildung 5.10 zeigt die jeweils errechneten Werte für Δa pro Gerät.

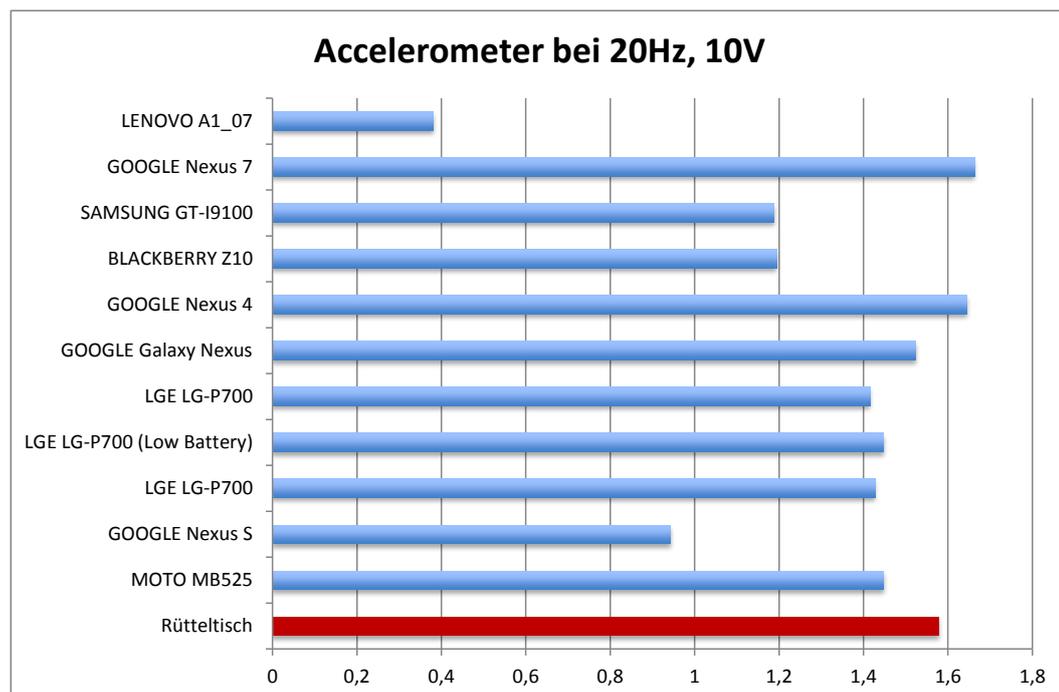


Abbildung 5.10: Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V, f = 20Hz$.

Die Abweichungen zum errechneten Idealwert liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei der Messreihe zuvor. Der bisher relativ genau messende Sensor des Z10 hat allerdings aufgrund der vergleichsweise hohen Verzögerung zwischen der Erfassung zweier Messwerte das Problem, dass jede Schwingung nur noch durch durchschnittlich ca. 2,5 Messwerte charakterisiert werden kann (Schwingungsfrequenz $20Hz$, Abtastfrequenz $45,3Hz$). Abbildung 5.11 zeigt einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigungswerte beim Z10 bei $f = 10Hz$ und $f = 20Hz$.

Der mit dem Nexus S ermittelte zeitliche Verlauf der Beschleunigung gleicht dem des Z10. Das Z10 zeigt jedoch eine höhere Gleichmäßigkeit und bessere Messwerte. Das A1_07 misst weiterhin nur ca. 13 Werte pro Sekunde und ist damit nicht in

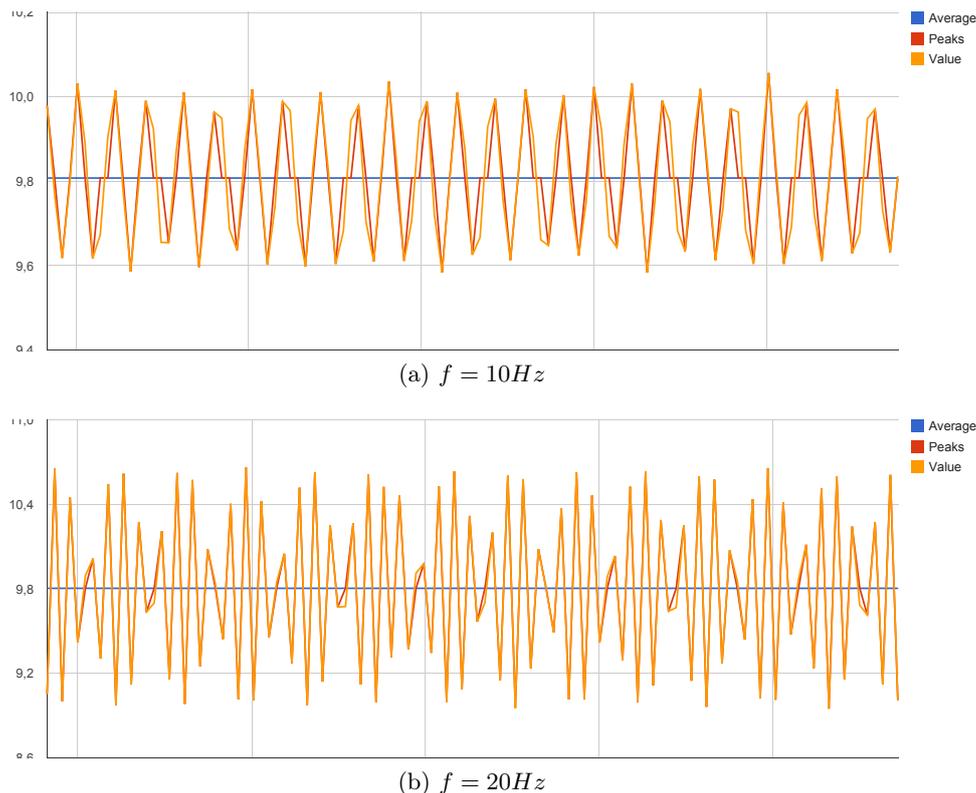


Abbildung 5.11: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung beim Z10 bei $U = 10V$ und $f = 10Hz$ bzw. $f = 20Hz$ zwischen $t_0 = 2,5s$ und $t_1 = 5s$.

der Lage die Beschleunigungen exakt zu erfassen. Auch die Differenz aus dem Maximum und Minimum der gesamten Messung beträgt nur $0,803 \frac{m}{s^2}$ und damit etwas mehr als die Hälfte von Δa_{Tisch} . Das MB525 registriert nun ca. 109 Messwerte pro Sekunde und zeigt einen relativ ordentlichen Verlauf der Beschleunigung. Es werden allerdings am Anfang der Messung keine Werte registriert, während am Ende starke Ausreißer mit Beschleunigungen von über $2 \frac{m}{s^2}$ gemessen werden. Die drei LG-P700 zeigen abermals sehr ähnliche Ergebnisse, die Differenz aus dem gesamten Maximum und Minimum der Messung ist mit ca. $2 \frac{m}{s^2}$ allerdings deutlich zu hoch. Das Galaxy Nexus erzielt vergleichsweise ordentliche Resultate. Es erreicht jedoch nicht die Genauigkeit der Sensoren in Nexus 4 und Nexus 7. Abbildung 5.12 zeigt den gemessenen Verlauf der Beschleunigung beim Nexus 7 über einen Zeitraum von 2,5s.

Die durch die Linear Acceleration Sensor ermittelten Beschleunigungswerte sind relativ ähnlich zu den durch das jeweilige Accelerometer ermittelten Werten. Abbildung 5.13 zeigt die Beschleunigungswerte der Linear Acceleration Sensoren (vergleiche hierzu auch Abbildung 5.10: Beschleunigungswerte der Accelerometer).

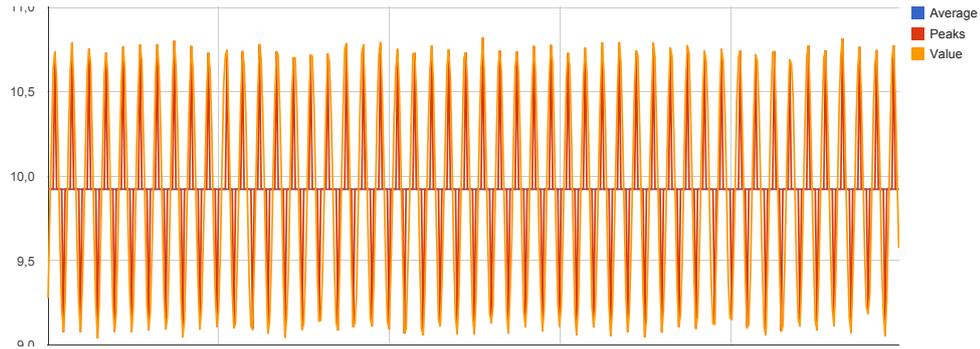


Abbildung 5.12: Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des Nexus 7 bei $U = 10V$ und $f = 20Hz$ zwischen $t_0 = 2,5s$ und $t_1 = 5s$.

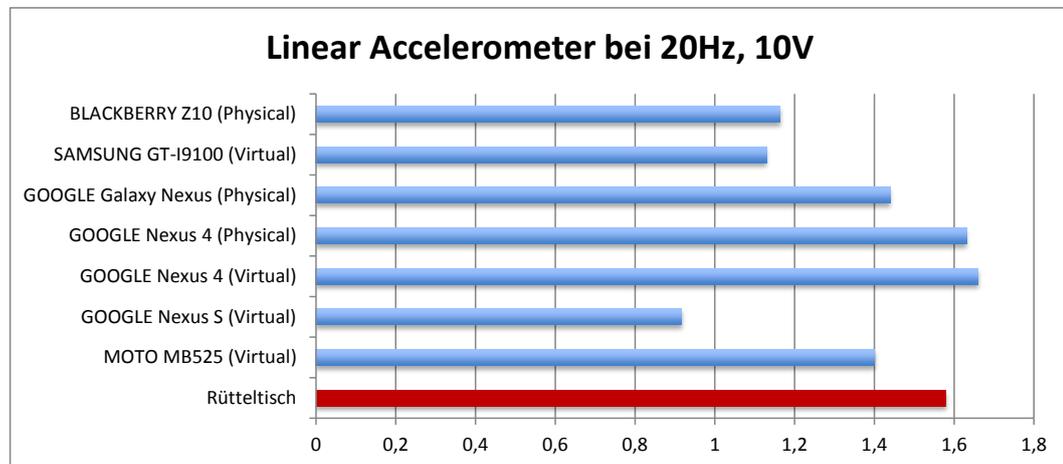


Abbildung 5.13: Linear Acceleration Sensor: Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V$, $f = 20Hz$.

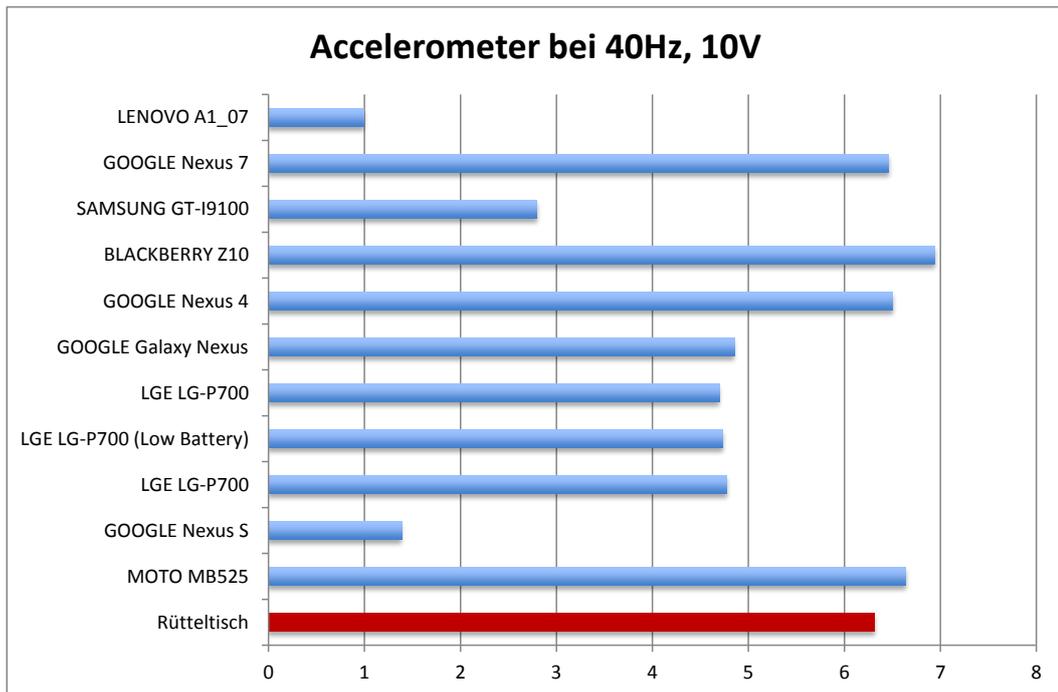
Messreihe 5: $U = 10V$, $f = 40Hz$

Die letzte Messreihe hat eine im Vergleich zur vorherigen Reihe verdoppelte Frequenz und damit die mit Abstand größte maximale Beschleunigung aller Messreihen. Die Differenz aus maximaler und minimaler Beschleunigung Δa beträgt $\approx 6,3165 \frac{m}{s^2}$. Die Beschleunigungswerte sollten somit hoch genug sein, um von allen Sensoren einwandfrei erkannt zu werden. Problematisch ist jedoch die hohe Frequenz von $f = 40Hz$, da einige Sensoren nur in etwa ähnlich viele Messwerte pro Sekunde registrieren

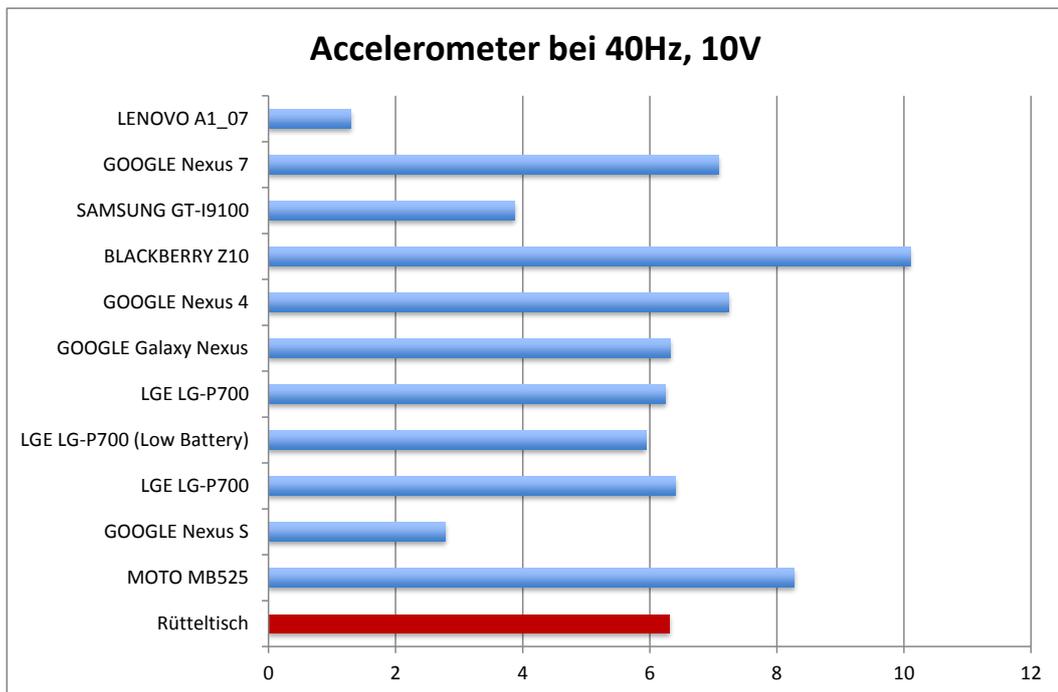
können. Bildet man die jeweiligen lokalen Differenzen aus Beschleunigungsmaximum und -minimum pro Schwingung, so ist mit einer deutlich zu geringen, gemittelten Differenz zu rechnen. Dies liegt daran, dass, wenn z. B. nur ein bis zwei Messwerte pro Schwingung erfasst werden, es sich hierbei nicht notwendigerweise um die lokalen Maxima bzw. Minima handeln muss. Aufgrund dessen zeigt Abbildung 5.14 zusätzlich die jeweilige Differenz aus absolutem Maximum und Minimum der gesamten Messung im Vergleich zum zu erwartenden Wert Δa , sowie den Mittelwert der Beschleunigungsdifferenzen der einzelnen Schwingungen im Vergleich zum Idealwert.

Problematisch an der Verwendung des globalen Maximums bzw. Minimums ist, dass eventuelle Ausreißer das Ergebnis extrem verfälschen können. So suggeriert die Differenz aus globalem Maximum und Minimum eine vergleichsweise genaue Messung bei den LG-P700 während das Z10 mit einer Differenz von über $10 \frac{m}{s^2}$ scheinbar äußerst schlecht abschneidet. Das Z10 zeigt jedoch den exakteren Verlauf, wobei ein direkter Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Abtastfrequenzen der Sensoren hier schwierig ist. Auch die beiden Sensoren mit der höchsten Abtastfrequenz von ca. $200Hz$ (Nexus 4, Nexus 7) haben Probleme die sinusförmige Beschleunigung exakt wiederzugeben. Sie erzielen hinsichtlich des Verlaufs jedoch die besten Ergebnisse.

Bezüglich der Linear Acceleration Sensoren sind auch hier keine allgemeingültigen Aussagen möglich. Teilweise erzielen diese Sensoren Verbesserungen gegenüber dem jeweiligen Accelerometer, teilweise verschlechtert sich jedoch das Ergebnis. Meistens bewegen sich die Unterschiede zwischen Accelerometer und Linear Acceleration Sensor in einem relativ engen Rahmen. Die zeitlichen Verläufe sind oftmals stark voneinander abweichend. Errechnet man aber z. B. den Mittelwert aller lokalen Beschleunigungsdifferenzen so unterscheidet sich dieser für beide Sensortypen oftmals nur um wenige Prozent ohne das pauschal ein Sensortyp dem anderen überlegen wäre.



(a) Mittelwert der Differenzen aus lokaler maximaler und minimaler Beschleunigung



(b) Differenz aus globaler maximaler und minimaler Beschleunigung

Abbildung 5.14: Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V$, $f = 40Hz$.

5.3 Magnetic Field

Magnetic Field Sensoren messen die magnetische Flussdichte in Tesla. Wie der Tabelle 4.13 auf Seite 50 zu entnehmen ist beträgt das maximale Spektrum verbreiteter Magnetic Field Sensoren im Allgemeinen mehrere Tausend μT , während die Auflösung meist im Bereich einiger Zehntel μT liegt. Die Auflösung ist ausreichend, um das Erdmagnetfeld präzise zu erfassen. In Mitteleuropa treten ca. $20\mu\text{T}$ in horizontaler, sowie ca. $44\mu\text{T}$ in vertikaler Richtung auf. Mit dem Erdmagnetfeld als Bezugssystem lässt sich so die Lage des Geräts im Raum erkennen. Problematisch sind Störeinflüsse durch die Umwelt. So führt ein Verschieben des Geräts auf einem Tisch um einige Zentimeter je nach Umgebung bereits zur Änderung der gemessenen Flussdichte um mehrere μT . Dieser Problematik wird durch den in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Aufbau sowie die dazugehörige Durchführung Rechnung getragen. Abschnitt 5.3.2 führt die gewonnenen Erkenntnisse auf.

5.3.1 Aufbau und Durchführung

Zur Ermittlung der Genauigkeit der Magnetic Field Sensoren reicht die Messung ohne Bewegung des Geräts an einer bestimmten Position nicht aus. Zum einen erschweren Störeinflüsse die Messung, zum anderen ist insbesondere das Messverhalten des Sensors bei Änderung der Lage des Geräts im Raum z. B. durch Drehungen von Interesse. Als Referenzmessgerät dient das in Abbildung 5.15 gezeigte FM 205 Teslameter der Projekt Elektronik GmbH Berlin mit angeschlossener GEO-X Axialsonde UAP im Messbereich von $\pm 200\mu\text{T}$. Das Teslameter ist mit einem CASSY Interface (524 010) der Firma Leybold Didactic GmbH verbunden, welches wiederum die Daten an einen angeschlossenen Laptop liefert. Die darauf befindliche Software CASSY Lab ermöglicht die Einstellung verschiedener Parameter wie Messbereich oder Messfrequenz, sowie den Export der empfangenen Daten z. B. als Excel-Tabelle.

Die durchgeführten Versuche sowie die Beschreibungen der Ergebnisse sind eher qualitativer Natur. Um die Genauigkeit der Magnetic Field Sensoren bei Lageänderungen des Geräts im Raum zu beurteilen, werden das Gerät sowie die Sonde des Referenzmessgeräts für einen Zeitraum von 10 Sekunden eine Reihe von zufälligen Drehungen und Bewegungen im Raum ausgesetzt. Dazu werden das zu beurteilende Gerät sowie die Sonde auf den gegenüberliegenden Seiten eines hohlen, nicht leitfähigen Quaders mit einer Dicke von ca 2cm fixiert. Der durch den Quader garantierte gleichbleibende Abstand minimiert den Einfluss von Störgrößen auf die Sonde durch das Smartphone. Es erfolgt eine Beschränkung auf den Vergleich der gemessenen Werte einer Achse zwischen Smartphone bzw. Tablet und dem Referenzgerät. Während von den jeweiligen Magnetic Field Sensoren so viele Messwerte wie möglich gesammelt werden, bewegt sich der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Messwerte durch die Geo-Axialsonde im Bereich von 0,03 s bis 0,05 s.



Abbildung 5.15: Teslameter mit Geo-Axialsonde zur Bestimmung des Erdmagnetfelds.

Der Start der Messung durch das Smartphone bzw. Tablet sowie durch das Teslameter erfolgt möglichst zeitgleich von Hand. Abweichungen im Bereich von einigen Millisekunden können somit nicht vollständig ausgeschlossen werden. Anschließend erfolgt der Vergleich der Messkurven des Smartphones bzw. Tablets sowie des Teslameters auf Basis des relativen Zeitstempels des jeweiligen Messwerts. Ein direkter Vergleich zwischen den Sensoren zweier Smartphones ist aufgrund der zufälligen Charakteristik der Bewegung während der Messung nicht möglich, die Vergleichswerte des Referenzmessgeräts erlauben jedoch eine qualitative Beschreibung der jeweiligen Sensorgenauigkeit.

5.3.2 Ergebnis

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche aufgeführt. Die Ergebnisse werden aufgrund des beschriebenen Aufbaus und der Durchführung gesondert für jedes Gerät dargestellt. Die Reihenfolge der nachfolgenden Geräte ist alphabetisch sortiert und unabhängig vom Abschneiden der einzelnen Sensoren. Die jeweiligen Abbildungen zeigen die gemessene magnetische Flussdichte in μT . Der Verlauf der Kurven sollte dabei möglichst identisch sein. Je kleiner der Abstand zwischen den Kurven desto besser. Unter Vernachlässigung möglicher Störeinflüsse durch die Umwelt sollte der

gemessene Wert für die magnetische Flussdichte aufgrund des Erdmagnetfelds stets im Bereich von maximal ca $\pm 44\mu\text{T}$ liegen.

BlackBerry PlayBook: BlackBerry Runtime for Android Apps Magnetometer von RIM

Das BlackBerry PlayBook liefert über den gesamten Messzeitraum Werte für die magnetische Flussdichte, die in einem theoretisch denkbaren Bereich liegen. Auch der aufgezeichnete Verlauf entspricht in etwa dem Verlauf, der durch die Geo-Axialsonde aufgezeichnet wurde. Allerdings registriert das PlayBook beinahe über die gesamte Messung zu geringe Werte für die magnetische Flussdichte. Des Weiteren erfasst der Sensor des PlayBooks deutlich stärkere Schwankungen der magnetischen Flussdichte bei aufeinanderfolgenden Messwerten als die Geo-Axialsonde. Mit durchschnittlich knapp 72 Messwerten pro Sekunde sammelt der Sensor des PlayBook vergleichsweise viele Daten.

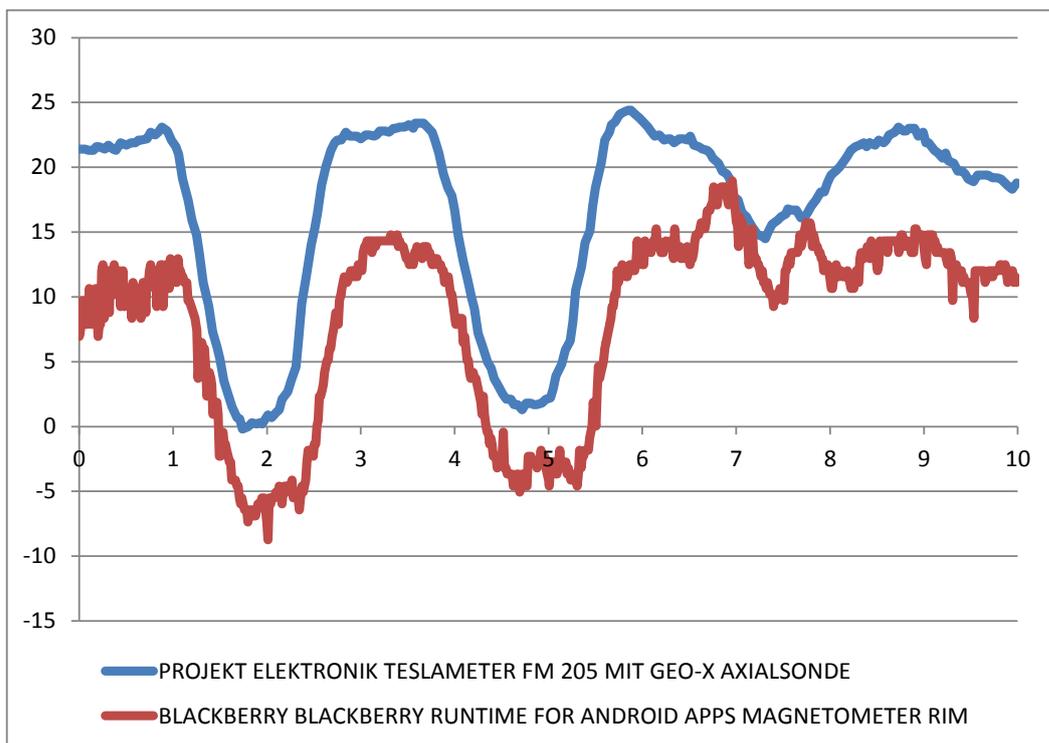


Abbildung 5.16: Magnetic Field Sensor des BlackBerry PlayBook.

BlackBerry Z10: Magnetometer von RIM

Der Magnetic Field Sensor BlackBerry Z10 zeigt insgesamt ein eher schlechtes Ergebnis. Der Verlauf der beiden Messkurven ist ähnlich, der Abstand zwischen zeitgleich registrierten Messwerten ist jedoch stark schwankend und insgesamt deutlich zu groß. Der gemessene Maximalwert von ca. $60\mu\text{T}$ beim Z10 ist zu hoch. Die Differenz aus Maximum und Minimum von ca. $54\mu\text{T}$ beim Sensor des Z10 liegt zwar im Bereich des möglichen, die Geo-Axialsonde registriert jedoch nur eine Differenz von maximal knapp $30\mu\text{T}$. Weiterhin fällt auf, dass der Verlauf der Kurve größtenteils relativ unruhig erscheint, d. h. dass aufeinanderfolgende Messwerte beim Z10 relativ stark voneinander abweichen. Die Messfrequenz des Z10 ist mit ca. 20 Werten pro Sekunde vergleichsweise gering.

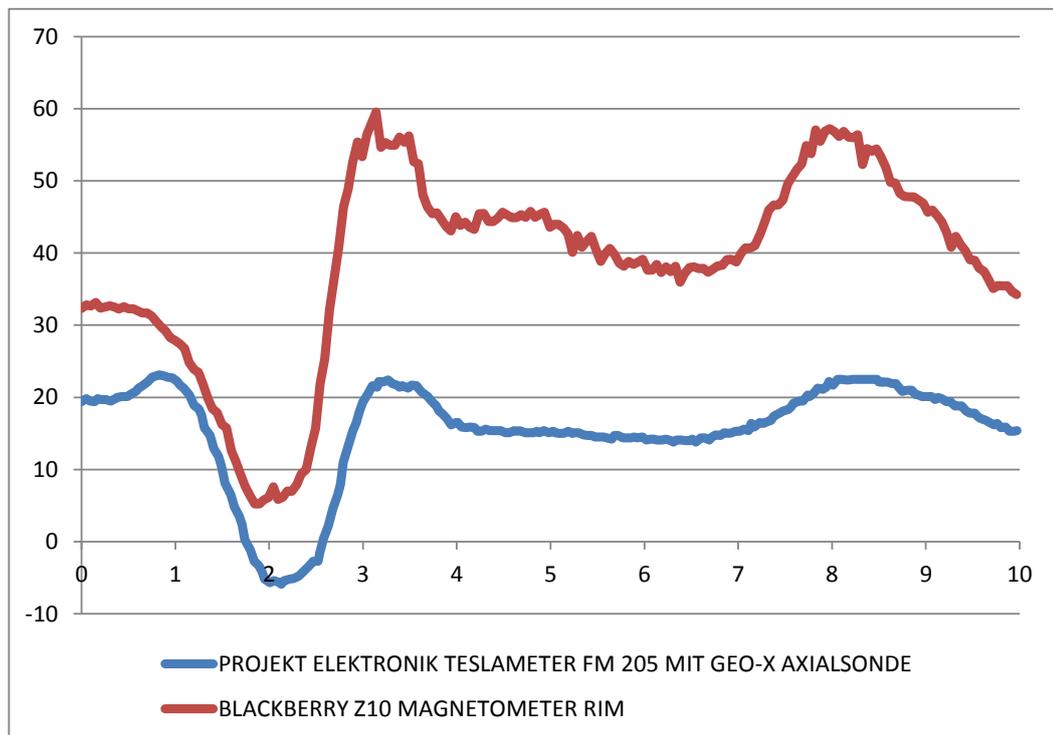


Abbildung 5.17: Magnetic Field Sensor des BlackBerry Z10.

Google Galaxy Nexus: MPL Magnetic Field von Invensense

Auch das Google Galaxy Nexus bzw. der darin enthaltene Magnetic Field Sensor liefert ein eher mäßiges Ergebnis. Vergleichbar mit dem Z10 ist auch hier der Verlauf beider Kurven ähnlich. Das Galaxy Nexus liefert jedoch insofern bessere Ergebnisse, dass die Differenz aus Maximum und Minimum beim Sensor des Galaxy Nexus und

der Geo-Axialsonde beinahe identisch ist. Auch der Abstand beider Kurven differiert nicht annähernd so stark wie beim Z10 sondern bleibt über die gesamte Zeitdauer relativ konstant. Stark negativ ins Gewicht fällt jedoch die viel zu hohe Flussdichte, die durch den Sensor des Galaxy Nexus registriert wird. Das Maximum liegt bei ca. $130\mu\text{T}$, ein solch hoher Wert sollte nicht annähernd erreicht werden. Die hohen Absolutwerte verschlechtern das Ergebnis extrem, die relativen Änderungen der Werte sind wie beschrieben vergleichsweise exakt. Mit ca. 120 Messwerten pro Sekunde sammelt der Sensor des Galaxy Nexus viele Daten. Der zeitliche Verlauf der durch den Sensor gesammelten Werte ist sehr gleichmäßig.

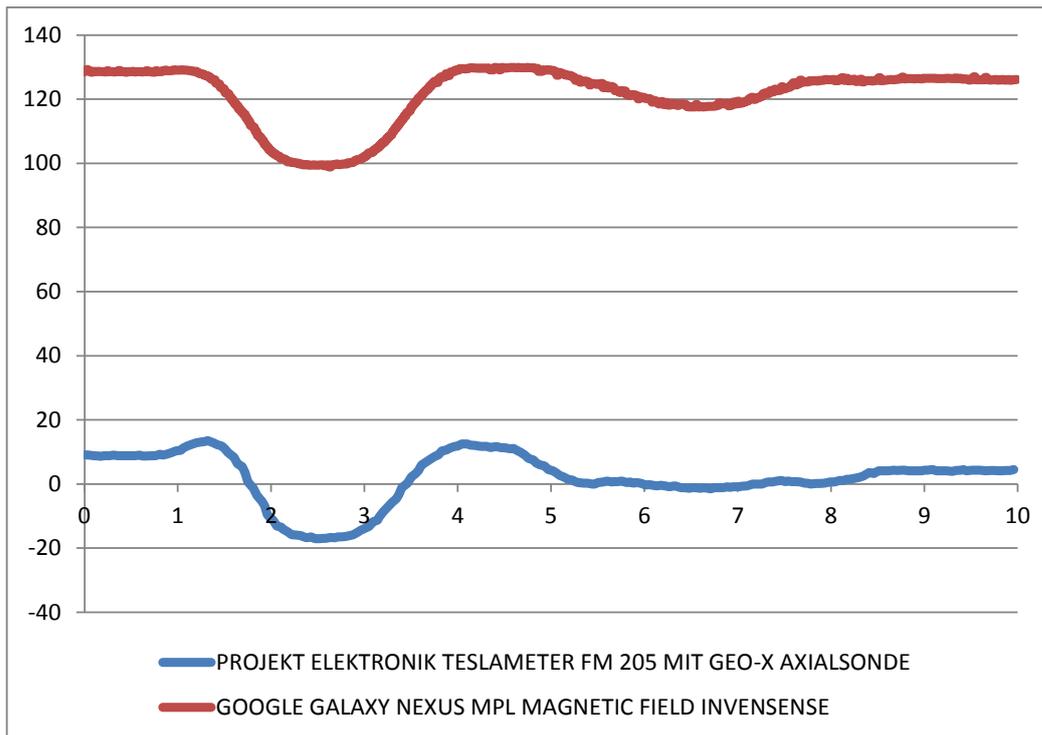


Abbildung 5.18: Magnetic Field Sensor des Google Galaxy Nexus.

Google Nexus S: AK8973 3-Axis Magnetic Field Sensor von Asahi Kasei Microdevices

Der Sensor des Google Nexus S liefert ähnliche Ergebnisse wie das Z10 von BlackBerry. Ein in der Tendenz vergleichbarer Kurvenverlauf zwischen Magnetic Field Sensor und der Geo-Axialsonde mit schwankendem Abstand beider Kurven sowie zu starken Ausschlägen beim Sensor sind auch hier anzutreffen. Insgesamt ist der Abstand jedoch geringer. Ebenfalls positiv ist die Tatsache, dass sich die durch den Sensor registrierten Messwerte über den gesamten Zeitraum zwischen $25\mu\text{T}$ und $-9\mu\text{T}$ bewegen. Generell werden aber auch hier durchgängig zu hohe Flussdichten durch den

Sensor gemessen. Die Messfrequenz des Galaxy Nexus liegt mit knapp 50 Werten pro Sekunde im Mittelfeld.

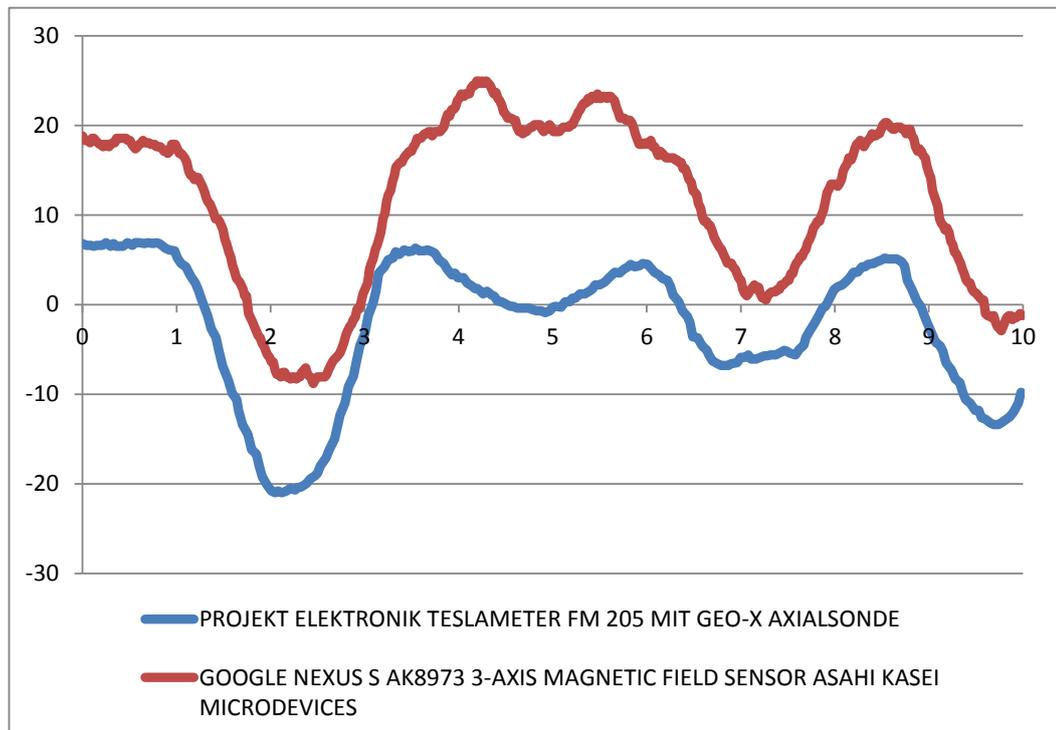


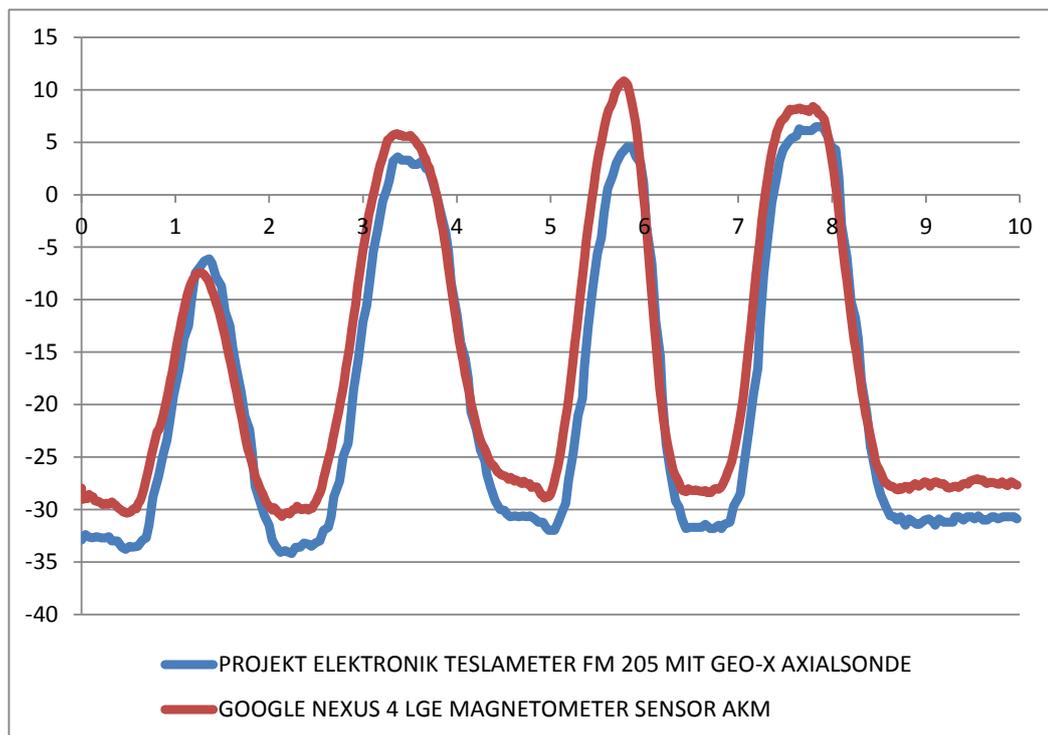
Abbildung 5.19: Magnetic Field Sensor des Google Nexus S.

Google Nexus 4: LGE Magnetometer Sensor von AKM

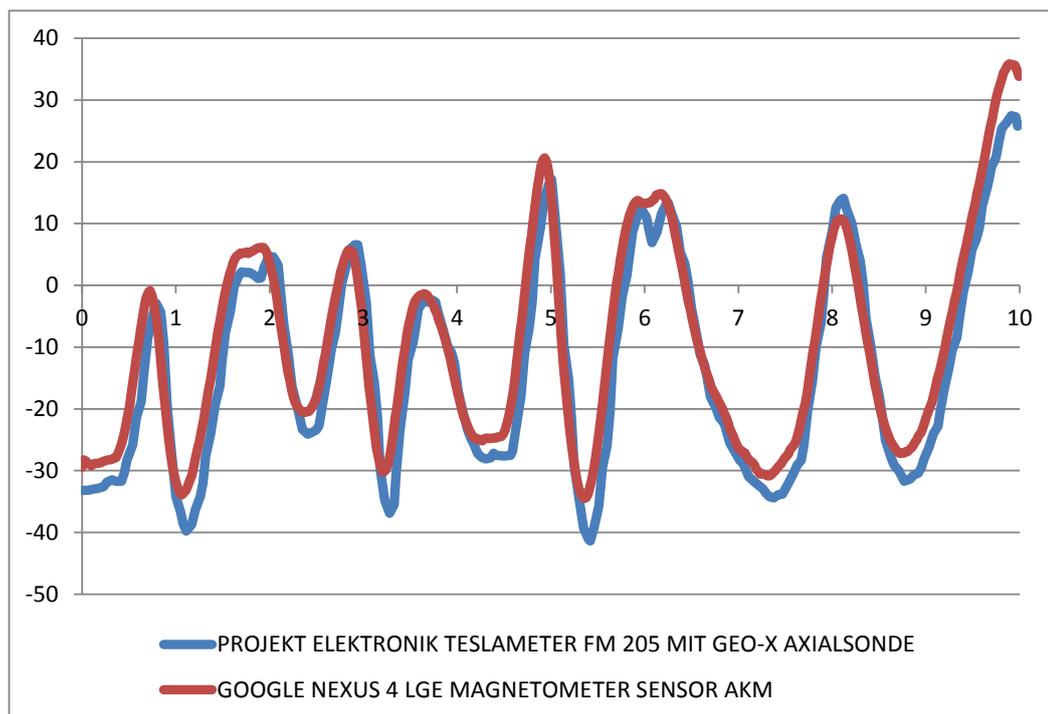
Das Google Nexus 4 erzielt die mit Abstand besten Ergebnisse von allen getesteten Geräten. Es wurden zwei Messungen mit zufälligen Bewegungen durchgeführt (siehe Abbildung 5.20). Zu beachten ist die unterschiedliche Skaleneinteilung der y-Achse in der Abbildung. Die zweite Messung enthält im Vergleich zu den Messungen der anderen Geräte relativ viele stärkere Bewegungen. Das Nexus 4 liefert jedoch in beiden Messungen hervorragende Ergebnisse. Der Unterschied zwischen zum selben Zeitpunkt registrierten Messwerten des Sensors und der Sonde beträgt maximal gut $5\mu\text{T}$. Der Kurvenlauf ist bei beiden Messungen beinahe identisch. Auch kleinere Änderungen der magnetischen Flussdichte sind hier noch erkennbar. Insgesamt liefert das Nexus 4 minimal zu hohe Werte für die magnetische Flussdichte. Diese bewegt sich jedoch stets in einem realistischen Bereich zwischen $\pm 40\mu\text{T}$. Es wurden durchschnittlich knapp 50 Messwerte pro Sekunde durch den Sensor gesammelt.

Google Nexus 7: MPL Magnetic Field von Invensense

Bezüglich des Google Nexus 7 lassen sich leider keine Ergebnisse feststellen. Die durchgeführte Messung enthält einen Ausreißer beim Sensor des Nexus 7, welcher bei ca. 6,5s einen Messwert von $-18500\mu\text{T}$ registriert. Zusätzlich wurde die Orientierung der Achsen vertauscht, so dass keine zuverlässigen Aussagen über die Genauigkeit des verbauten Sensors möglich sind.



(a) Erste Messung



(b) Zweite Messung

Abbildung 5.20: Magnetic Field Sensor des Google Nexus 4.

LGE LG-P700: BMM050 Magnetic von Bosch Sensortec

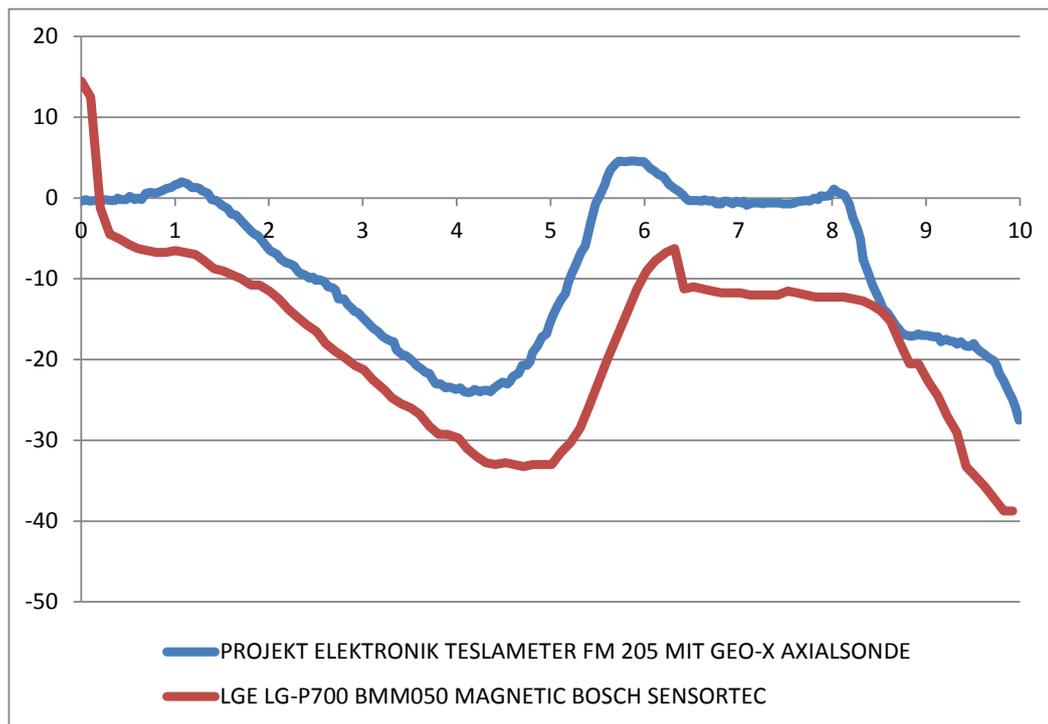
Beim LGE LG-P700 wurde jeweils eine Messung mit zwei verschiedenen Geräten durchgeführt. Die Ergebnisse sind dabei durchaus unterschiedlich. Beiden Messungen gemein ist, dass sich die Messwerte des Sensors im Bereich von $\pm 40\mu\text{T}$ bewegen. Beide Sensoren sammeln im Mittel ca. 10 Messwerte pro Sekunde. Der Verlauf der Kurven bei beiden Geräten ist ähnlich zu der Referenzkurve der Sonde. Das erste Gerät zeigt am Anfang der Messung eine starke Änderung der magnetischen Flussdichte, die von der Sonde nicht erfasst wird, ist dafür im weiteren Verlauf der Messung jedoch deutlich näher an der Referenzkurve als beim zweiten Gerät. Bei beiden Geräten ist eine leichte zeitliche Verzögerung in der Registrierung der Änderung der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Sonde zu erkennen.

MOTO MB 525: AK8973 3-Axis Magnetic Field Sensor von Asahi Kasei

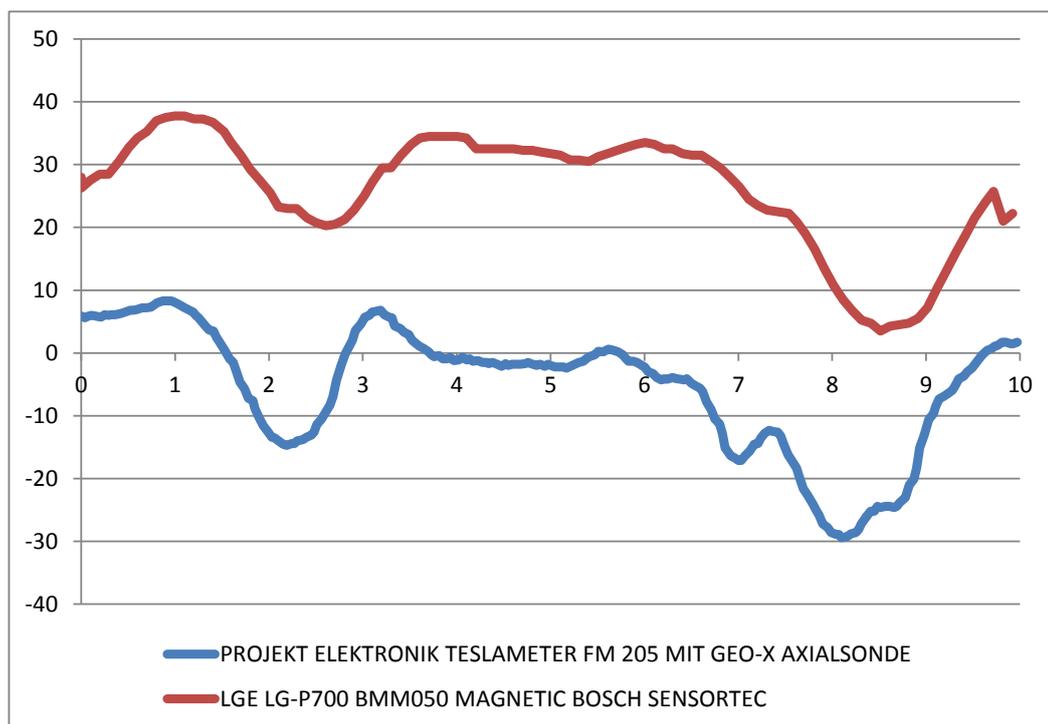
Der Kurvenverlauf beim Motorola MB525 ist relativ ähnlich zu dem der Geo-Axialsonde. Negativ ist der zwar konstante aber dafür viel zu große Abstand von knapp $40\mu\text{T}$ zwischen den Kurven während der gesamten Messung. Die gemessenen Maximalwerte des Sensors des MB525 bewegen sich anders als z. B. beim Galaxy Nexus in einem realistischen Bereich. Es wurden durchschnittlich ca. 10 Messwerte pro Sekunde durch den Sensor registriert.

Samsung GT-I9100: AK8975 Magnetic Field Sensor von Asahi Kasei Microdevices

Das Samsung GT-I9100 zeigt ähnliche, jedoch insgesamt schlechtere Ergebnisse als das MB525. Vergleichbar ist der im Bezug zur Sonde ähnliche Kurvenverlauf mit relativ konstantem Abstand. Es existieren im Verlauf dennoch einige Abweichungen von der Referenzmesskurve. Zusätzlich ist der Abstand beider Kurven deutlich zu hoch. Die durch das GT-I9100 ermittelten magnetischen Flussdichten mit bis zu ca. $92\mu\text{T}$ bewegen sich in einem Bereich der nicht durch das Erdmagnetfeld abgedeckt wird. Der Grund für diese hohen Messwerte liegt also entweder in einer mangelhaften Versuchsdurchführung mit störenden Umwelteinflüssen durch weitere, ungewollte Magnetfelder oder einer starken Ungenauigkeit des Sensors. Aufgrund der Ergebnisse aus den anderen Versuchen muss, zumindest zu großen Teilen, von einer Sensorungenauigkeit ausgegangen werden. Der Sensor des GT-I9100 hat während der Messung im Mittel ca. 80 Messwerte pro Sekunde aufgezeichnet.



(a) Erstes Gerät



(b) Zweite Gerät

Abbildung 5.21: Magnetic Field Sensor des LGE LG-P700.

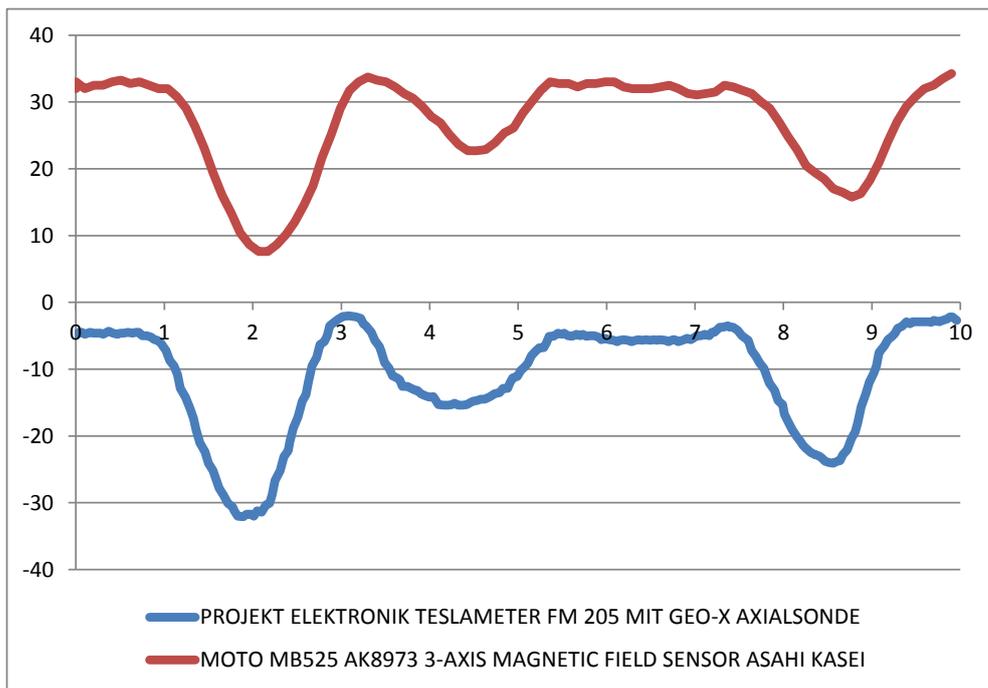


Abbildung 5.22: Magnetic Field Sensor des Moto MB525.

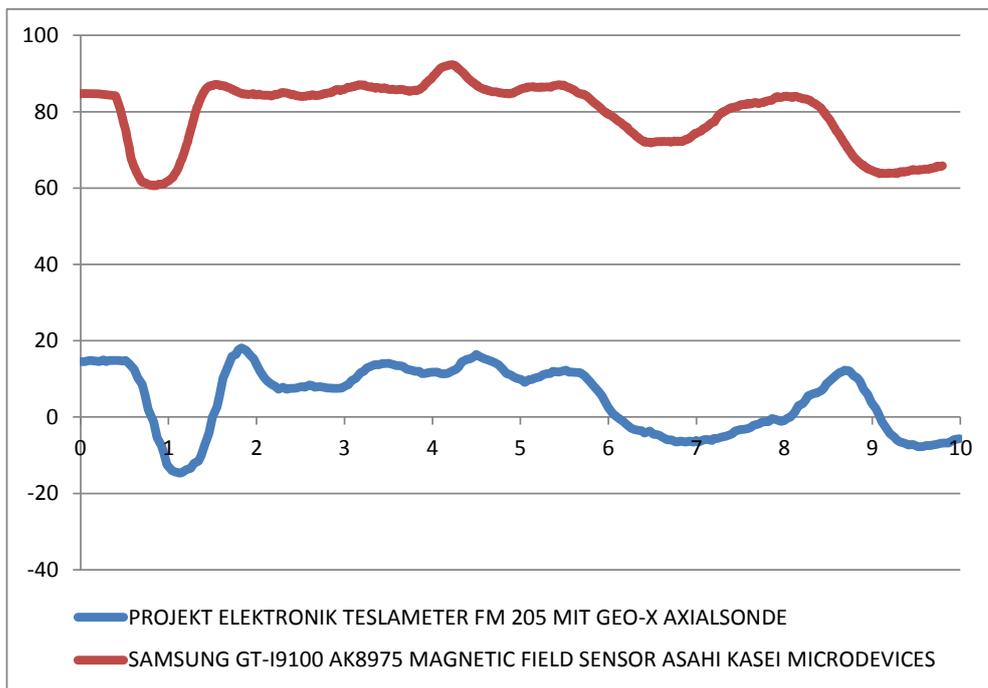


Abbildung 5.23: Magnetic Field Sensor des Samsung GT-I9100.

5.4 Light

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Genauigkeit der mittlerweile in den meisten Geräten verbauten Lichtsensoren zur Messung der Umgebungshelligkeit. Anders als die Versuche zur Genauigkeit der Bewegungs- und Positionssensoren sind die Versuche zum Lichtsensor statischer Natur. Die Beschreibung hierzu findet sich im folgenden Abschnitt 5.4.1. Anschließend erfolgt die Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse. Wie in Tabelle 5.1 auf Seite 62 zu sehen ist sind dabei das mehrfach vorhandene LGE LP-P700 sowie das BlackBerry PlayBook ausgeschlossen, da diese keinen Lichtsensor besitzen.

5.4.1 Aufbau und Durchführung

Die Geräte bzw. die in den Geräten enthaltenen Lichtsensoren werden einer Lichtquelle sowohl im Abstand von 20cm als auch im Abstand von 50cm ausgesetzt. Bei der Lichtquelle handelt es sich um eine 12 V/50 W Halogenglühlampe. Möglichst nah am Lichtsensor des Geräts wird auf gleicher Höhe als Referenzmessgerät ein Lux-Sensor (666 243) mit angeschlossener Klima-Box (524 057) und entsprechendem CASSY Interface (524 010) der Firma Leybold Didactic GmbH zur Messdatenaufnahme befestigt. Der mit dem CASSY Interface verbundene Laptop mit der Software CASSY Lab empfängt die entsprechenden Daten des Lux-Sensors mit Zeitstempel und stellt diese zur Auswertung zur Verfügung. Der Messbereich der Beleuchtungsstärken des Lux-Sensors beträgt 0 bis 200 klx, der Durchmesser der Lichtauffangfläche 10,5 mm. Abbildung 5.24 zeigt den Versuchsaufbau. Der Lux-Sensor sammelt pro Sekunde einen Wert, während der jeweilige Lichtsensor des Geräts so viele Werte wie möglich sammelt. Der Start der Messung erfolgt möglichst zeitgleich von Hand, die Synchronisation des gemessenen Verlaufs der Beleuchtungsstärke durch das Smartphone bzw. Tablet und durch den Lux-Sensor wird mit Hilfe des Zeitstempels des jeweiligen Messwerts in Relation zum Start der Messung durchgeführt.

5.4.2 Ergebnis

Die Abbildungen 5.25 sowie 5.26 zeigen den zeitlichen Verlauf der gemessenen Beleuchtungsstärke in klx für Abstände von 20cm und 50cm sowohl für den Sensor der einzelnen Geräte als auch das Referenzmessgerät über einen Zeitraum von 10s. Die Messungen wurden dabei einzeln pro Gerät durchgeführt, der Lux-Sensor wurde stets zur Kontrolle benutzt. Die Abbildung zeigt exemplarisch den Verlauf der Beleuchtungsstärke des Lux-Sensors aus einer Messung. Obwohl der Verlauf auch für den Lux-Sensor nicht über alle Messungen identisch ist, sind die Abweichungen nur gering.

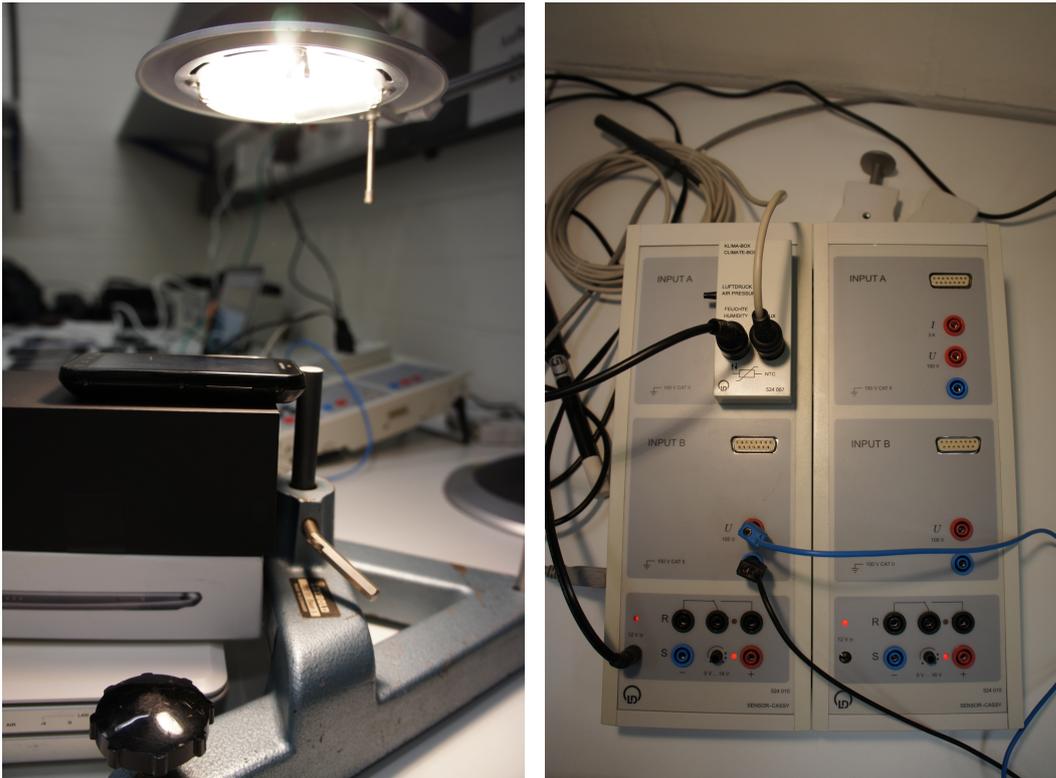


Abbildung 5.24: Versuchsaufbau Lichtsensor: Motorola Defy und Lux-Sensor sowie CASSY Interface mit Klima-Box.

Betrachtet man Abbildung 5.25 so fallen direkt die extremen Abweichungen vom der Referenzmesswertkurve auf, die sich zwischen 13 und 14klx bewegt. Die durch die Sensoren in den Smartphones und Tablets gemessenen Beleuchtungsstärken liegen zwischen ca. 0,5 und 19klx. Das Nexus 4, sammelt während der gesamten Messung nur einen einzigen Wert zum Zeitpunkt $t = 0$ s. Das beste Ergebnis erzielt das BlackBerry Z10, doch auch hier liegt die durchschnittliche Abweichung, zum vom Lux-Sensor registrierten Wert, größer 1klx. Erstaunlich ist jedoch, dass verschiedene Gerätesensoren Werte von deutlich weniger als 2klx messen. Es liegt die Vermutung nahe, dass solch hohe Beleuchtungsstärken für die Sensoren in den Geräten uninteressant sind, da diese im Alltag kaum auftreten. Der Haupteinsatzzweck der Lichtsensoren liegt darin die Displayhelligkeit automatisch zu regeln, wobei schon ab einer vergleichsweise geringen Beleuchtungsstärke die maximale Displayhelligkeit benutzt wird. Insofern ist das sehr schwache Abschneiden zwar nachzuvollziehen, die Abweichungen vom erwarteten Wert sind allerdings zu extrem. Weiterhin ist erkennbar, dass manche Sensoren verschiedene Werte erfassen, während andere einen konstanten Wert registrieren. Aufgrund der durch den hochwertigeren Lux-Sensor ermittelten Beleuchtungsstärken ist davon auszugehen, dass Sensoren, welche leicht schwankende Werte liefern, im Allgemeinen exakter arbeiten. Das Samsung GT-I9100

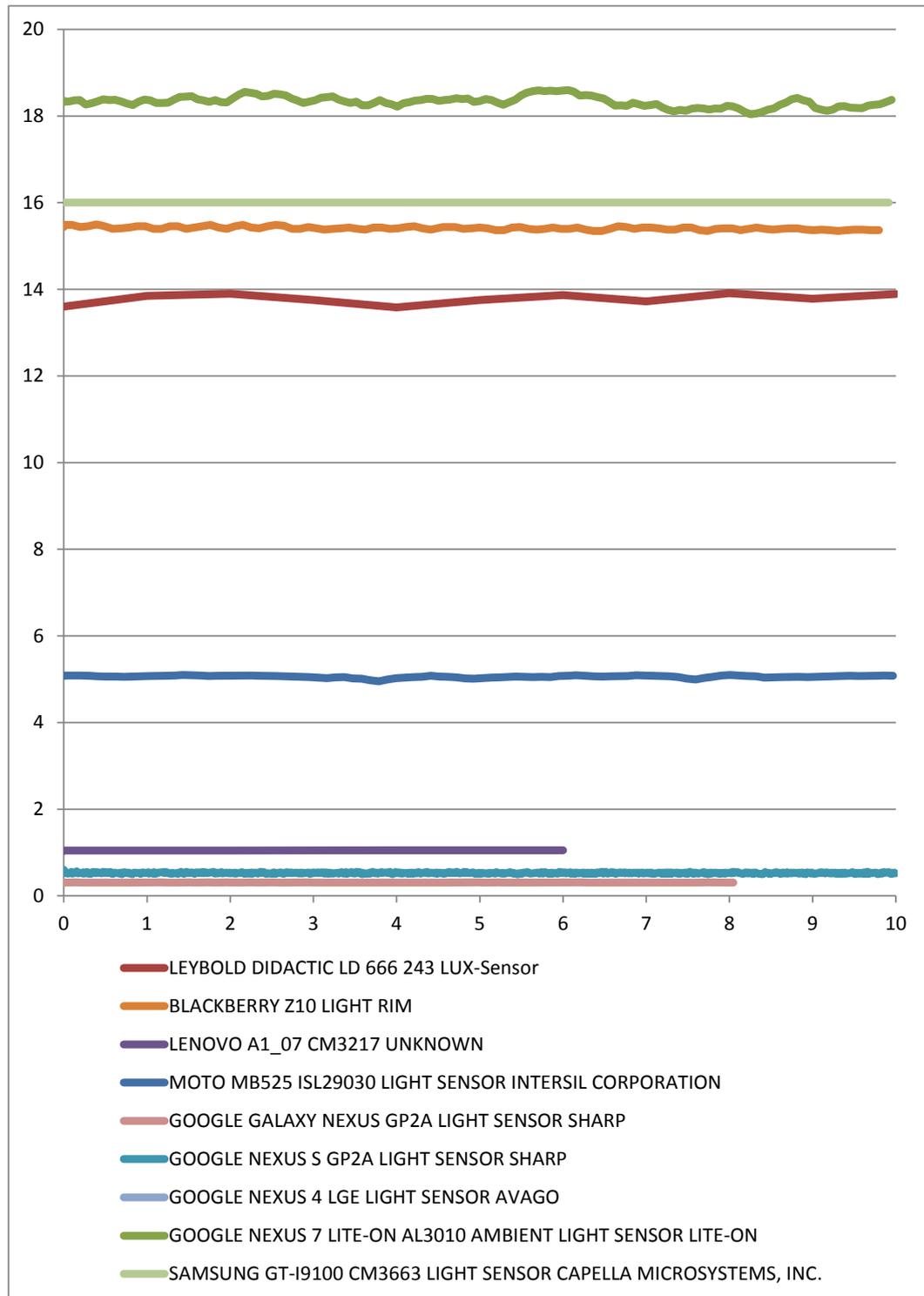


Abbildung 5.25: Gemessene Beleuchtungsstärken der Lichtsensoren verschiedener Geräte, Abstand 20cm.

beispielweise unterscheidet nur zwischen wenigen Stufen bezüglich der angegebenen Beleuchtungsstärke. Das vergleichsweise gute Abschneiden des Geräts scheint hier also eher Zufall zu sein.

Von etwas größerem Interesse sind die Ergebnisse bezüglich des Versuchs mit einem Abstand von 50cm. Hier sind die Beleuchtungsstärken nicht so hoch wie beim vorherigen Versuch. Abbildung 5.26 zeigt den Verlauf der gemessenen Beleuchtungsstärken über einen Zeitraum von 10s im Vergleich zum Lux-Sensor als Referenz. Es ist erkennbar, dass die Abweichungen hier nicht so hoch sind wie bei einem Abstand von 20cm. Bezüglich des Samsung GT-I9100 lässt sich feststellen, dass abermals nur ein Wert gemessen wurde. Allerdings handelt es sich in diesem Versuch um den Wert mit der größten Abweichung zum Referenzwert. Das in der Abbildung nicht zu erkennende Google Nexus S liefert Werte in einem ähnlichen Bereich wie das Google Galaxy Nexus. Die vom Nexus S registrierten Werte schwanken jedoch über den gesamten Zeitraum etwas. Wie auch beim vorherigen Versuch lässt sich beobachten, dass nicht alle Geräte über den vollen Messzeitraum Werte sammeln. Das Z10 schneidet abermals am besten ab, wobei in diesem Fall die Differenz zum Referenzwert kleiner 1klx ist. Die vom Z10 gemessenen Werte sind bei beiden Versuchen zu hoch. Interessant ist außerdem, dass die Tendenz in beiden Messungen insofern identisch ist, dass das jeweilige Gerät entweder in beiden Versuchen zu hohe oder zu geringe Beleuchtungsstärken misst. Weiterhin liefern alle Sensoren für den zweiten Versuch mit größerem Abstand geringere Beleuchtungsstärken als für den ersten Versuch.

5.5 Pressure

Nur wenige Geräte enthalten einen Sensor vom Typ Pressure, wobei die Tendenz klar auf eine Zunahme dieser Sensoren in Smartphones und Tablets in der Zukunft hindeutet. Von den zur Verfügung stehenden Testgeräten verfügen nur das bereits etwas ältere Galaxy Nexus sowie das vergleichsweise neue Nexus 4 über einen solchen Sensor.

5.5.1 Aufbau und Durchführung

Zur Messung der Genauigkeit des Pressure Sensors im Galaxy Nexus sowie im Nexus 4 erfolgt die Messung des Referenzwertes mit dem bereits in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Messwerkzeugen bestehend aus Klimabox sowie CASSY Interface und CASSY Lab Software. Abbildung 5.27 zeigt eine Nahaufnahme der Klimabox. Der Luftdrucksensor ist auf der linken Seite des Geräts integriert. Die Einheit des zu messenden Luftdrucks ist hPa. Wie auch bei den anderen Versuchen wird die Messung über einen Zeitraum von 10s durchgeführt, wobei die Klimabox jede Sekunde einen

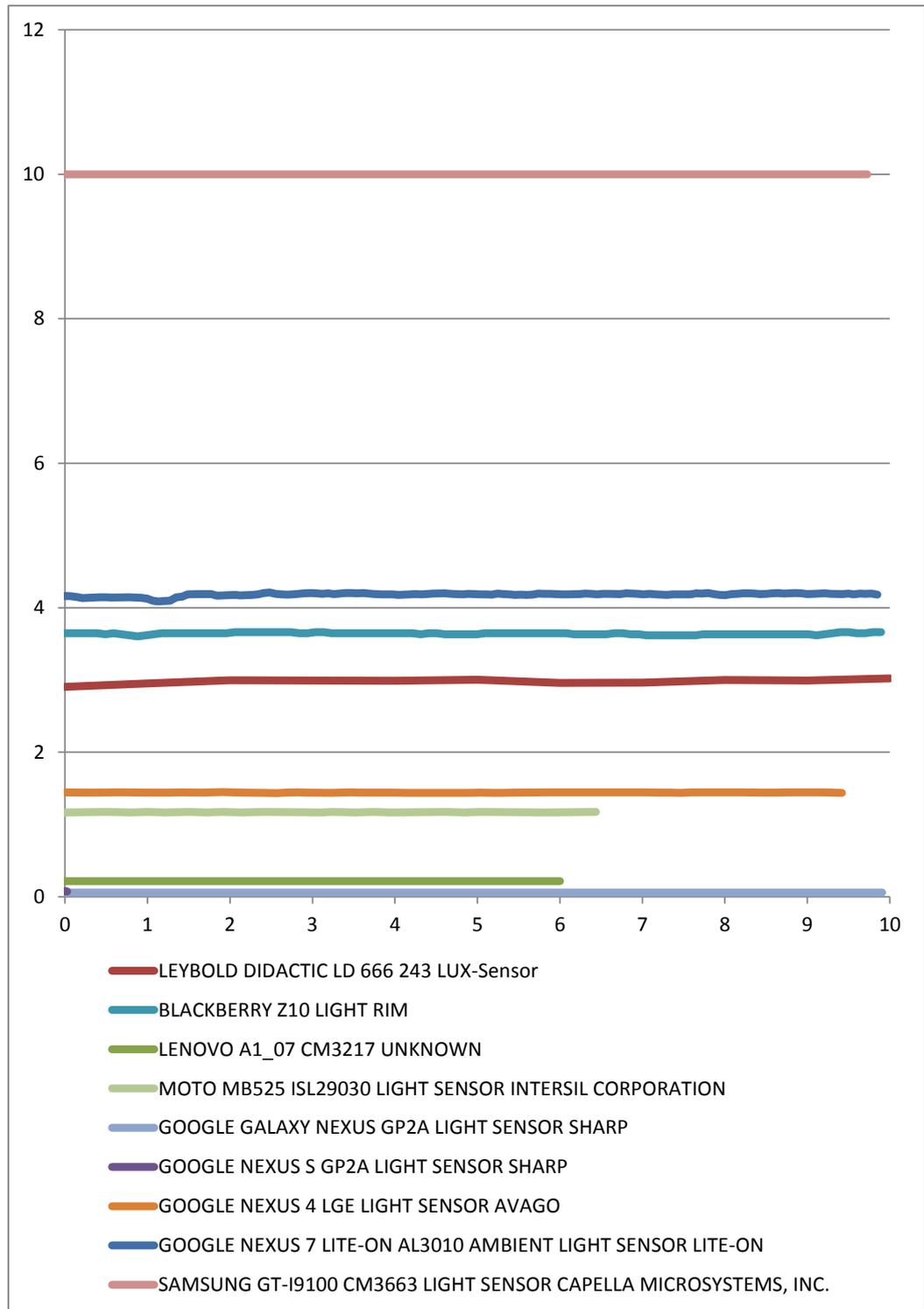


Abbildung 5.26: Gemessene Beleuchtungsstärken der Lichtsensoren verschiedener Geräte, Abstand 50cm.

Wert sammelt. Die Geräte befinden sich bei der Messung auf derselben Höhe wie die Klimabox, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

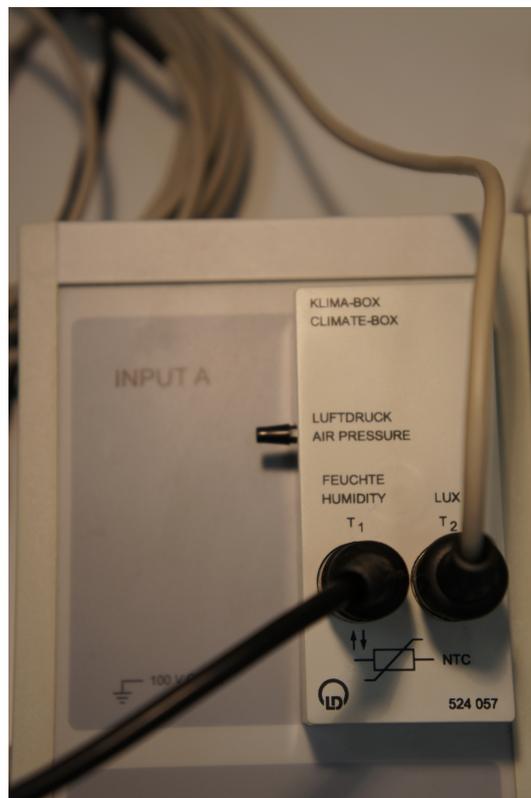


Abbildung 5.27: Klimabox zur Messung des Luftdrucks.

5.5.2 Ergebnis

Abbildung 5.28 zeigt die während der Messung aufgezeichneten zeitlichen Verläufe des Luftdrucks für das Galaxy Nexus sowie Nexus 4 und die Klimabox. Man sieht, dass keines der Geräte einen konstanten Luftdruck registriert, sondern bei allen leichte Schwankungen vorliegen. Die Kurven für das Galaxy Nexus sowie Nexus 4 liegen sehr dicht beieinander, während die Klimabox im Mittel ca. 9 hPa weniger misst. Aufgrund der geographischen Lage Bochums sowie dem daraus resultierenden, zu erwartendem Luftdruck scheinen die durch die Luftdrucksensoren der Smartphones gemessenen Werte auf den ersten Blick realistischer als der durch die Klimabox ermittelte Wert zu sein. So liefert z. B. die Rudolf-Geiger-Station in Campusnähe ebenfalls Luftdruckdaten, die scheinbar eher für die Werte der Smartphonesensoren sprechen. Allerdings handelt es sich hierbei um den auf Meereshöhe reduzierten Luftdruck, d. h. dieser ist größer als der tatsächlich vor Ort gemessene Luftdruck. Insgesamt

lässt sich deshalb keine Aussage zur absoluten Genauigkeit der Sensoren treffen. Weitere denkbare Versuche für die Zukunft umfassen die Beobachtung der Veränderung des Luftdrucks, z. B. durch das Betreten verschiedener Stockwerke in Gebäuden. Mittels barometrischer Höhenformel o. ä. sowie der idealerweise bekannten zurückgelegten Höhendifferenz lässt sich so die Genauigkeit der Sensoren ohne weitere Messausrüstung in alltagsrelevanten Situationen (z. B. bei Indoor-Navigation) zumindest annäherungsweise bestimmen.

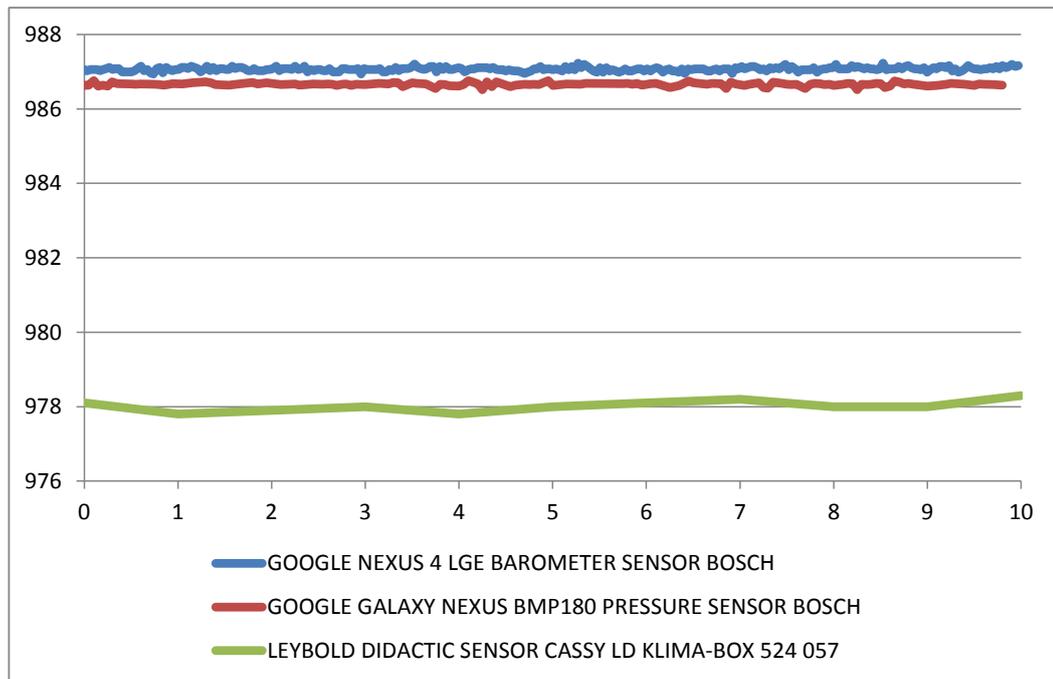


Abbildung 5.28: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks.

6 Fazit

Die im Rahmen der Studie zur Bestimmung der Genauigkeit von Smartphonesensoren gewonnenen Daten lassen sich in zwei Kategorien einteilen. So wurden verschiedene physikalische Experimente durchgeführt, um die Genauigkeit verschiedener Sensortypen zu ermitteln. Es handelt sich dabei um Sensoren vom Typ *Accelerometer*, *Linear Acceleration*, *Magnetic Field*, *Light* und *Pressure*. Es standen dabei insgesamt zwölf verschiedene Geräte zur Verfügung, wovon drei baugleiche Modelle waren. Zum anderen wurde an der bereits vorhandenen SensMark Applikation eine Reihe von Verbesserungen und Erweiterungen vorgenommen. Die Applikation wurde im Google PlayStore veröffentlicht, um die Daten möglichst vieler Nutzer zu sammeln. Eine zentrale Datenbank speichert die hochgeladenen Sensorinformationen und Benchmarkergebnisse während die SensMark Webseite die entsprechenden Daten graphisch aufbereitet und kategorisiert darstellt. Durch die Webseite ist eine Auswertung der Daten durch den jeweiligen Nutzer von SensMark weiterhin problemlos möglich.

6.1 SensMark Evaluation

Es wurden insgesamt die durch SensMark hochgeladenen Sensorinformationen und Benchmarkergebnisse 1057 verschiedener Nutzer analysiert und bewertet. Dabei verteilten sich diese Nutzer auf 398 Modelle mit denen 11313 Benchmarks durchgeführt wurden. Ein Algorithmus zur Erkennung von gewollt oder ungewollt mangelhaft ausgeführten Benchmarks wurde vorgestellt und eingesetzt, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der gesammelten Daten verschiedener Sensoren zu gewährleisten. Die vorliegenden Daten wurden hinsichtlich diverser Kriterien ausgewertet. So wurde festgestellt, dass alle in der Datenbank vorhandenen Geräte über einen Accelerometer verfügen, während nur ca. die Hälfte aller Geräte ein Gyroskop besitzen. Interessant ist, dass Geräte mit Gyroskop im Allgemeinen deutlich bessere Benchmarkergebnisse aufweisen als Geräte ohne Gyroskop. Weiterhin verfügen teure Geräte meist über mehr und bessere Sensoren als vergleichsweise günstige Geräte. Ähnliches gilt für aktuelle Modelle im Vergleich zu älteren Modellen, wobei ältere hochwertige Modelle ebenfalls gute Benchmarkergebnisse erzielen. Auffällig ist auch die insgesamt hohe Anzahl an Sensoren pro Gerät. So verfügen mehr als die Hälfte aller Modelle über mindestens acht Sensoren, wobei dies auch virtuelle Sensoren einschließt. Insgesamt

ist der Trend erkennbar immer mehr Sensoren in den Geräten zu vereinen. *Accelerometer*, *Gyroskop* und *Magnetic Field Sensor* werden von verschiedenen Herstellern zu IMUs (*inertial measurement unit*) kombiniert, wobei teilweise Sensoren eines anderen Herstellers integriert werden. Algorithmen zur Sensorfusion werden eingesetzt, so dass nicht nur virtuelle Sensoren von Google Inc. sondern auch vom jeweiligen Hersteller verfügbar sind. Bei den in den Geräten von RIM¹ enthaltenen Sensoren handelt es sich zumindest teilweise um umgelabelte Sensoren großer Sensorhersteller. Bezüglich der Android Version konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der Genauigkeit der Sensoren auf Basis unterschiedlicher Versionen festgestellt werden. Gleiches gilt für die Akkuladung, es konnte kein Zusammenhang zwischen Akkuladestatus und der Genauigkeit der Sensoren nachgewiesen werden.

6.2 Versuche

Die in den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zur Genauigkeit von Smartphone Sensoren sind vielfältig. Am aufwendigsten gestaltete sich der Versuch bezüglich der Sensoren vom Typ *Accelerometer* und *Linear Acceleration*. Mittels eines Rütteltisches wurden die Geräte verschiedenen sinusförmigen Schwingungen ausgesetzt und die durch die Sensoren aufgezeichneten Beschleunigungswerte analysiert. Die Genauigkeit der Bewegungssensoren ist stark vom jeweiligen Sensormodell abhängig. Eine pauschale Aussage lässt sich nicht treffen. Schwächere Sensoren haben sowohl bei nur geringen Beschleunigungen als auch bei Schwingungen mit hoher Frequenz Probleme. Enorme Abweichungen, Ausreißer o. ä. sind das Resultat. Bessere Sensoren zeichnen den Beschleunigungsverlauf meist zuverlässig auf. Die Abweichungen betragen hier nur wenige Prozent, wobei das Ergebnis bei höheren Frequenzen und damit höheren Beschleunigungen tendenziell besser wird. Sehr niedrige Beschleunigungen können auch durch vergleichsweise gute Sensoren nur unzureichend erfasst werden. Die Akkuladung scheint keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Bewegungssensoren zu haben. Der *Linear Acceleration* Sensor als virtueller Sensor, welcher u. a. auf den Werten des *Accelerometers* basiert liefert teilweise bessere, teilweise schlechtere Ergebnisse.

Bezüglich des *Magnetic Field* Sensors lässt sich feststellen, dass bis auf den Sensor des Google Nexus 4 alle anderen Sensoren starke Abweichungen von der durch das Referenzmessgerät erfassten magnetischen Flussdichte liefern. Es werden teilweise Werte erfasst, die weit von denen, durch das Erdmagnetfeld zu erwartenden Werten, abweichen. Die meisten Sensoren liefern in Hinsicht auf die absoluten Werte ein sehr schwaches Ergebnis. Interessant ist jedoch, dass beinahe alle Sensoren die Änderungen der magnetischen Flussdichte während des Messzeitraums relativ exakt wiedergeben. Der Kurvenverlauf entspricht meist dem durch das Referenzmessgerät

¹im Januar 2013 Umbenennung in BlackBerry

aufgezeichnetem Verlauf. Das Nexus 4 hingegen liefert auch für die absoluten Werte ein sehr gutes Ergebnis.

In den Versuchen zum Lichtsensor wurde gezeigt, dass zumindest bei den beiden getesteten und vergleichsweise hohen Beleuchtungsstärken keine genaue Messung durch Smartphonesensoren gewährleistet ist. Selbst die besten Sensoren zeigen starke Abweichungen, die schlechteren sind für eine genaue Messung komplett unbrauchbar. Immerhin messen alle Sensoren beim zweiten Versuch mit größerem Abstand geringere Beleuchtungsstärken als im Versuch mit geringerem Abstand. Auffällig dabei ist, dass manche Sensoren stets leichte Schwankungen über den gesamten Messzeitraum feststellen, während andere Sensoren eine konstante Beleuchtungsstärke anzeigen. Einen Sensor vom Typ *Pressure* enthalten nur zwei der zwölf zur Verfügung stehenden Geräte. Diese liefern sehr ähnliche Ergebnisse für den gemessenen Luftdruck. Der durch das Referenzmessgerät festgestellte Luftdruck liegt um ca. 9 hPa unter dem der beiden Geräte. Dennoch zeigen die beiden Sensoren ein relativ gutes Ergebnis.

6.3 Zusammenhang

Bezüglich eines Zusammenhangs zwischen den Benchmarkergebnissen von SensMark und den real gemessenen und evaluierten Daten aus den Versuchen fällt das Fazit hinsichtlich des *Accelerometers* positiv aus. Die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen zur Güte der Sensoren stimmen mit den durch die SensMark Benchmarks ermittelten Voraussetzungen für eine genaue Messung größtenteils überein. So entsprechen die durch die SensMark Applikation in den Benchmarks ermittelten Punktzahlen den in den Versuchen zu Sensoren des Typs *Accelerometer* gewonnenen Erkenntnissen insofern, dass die besten Geräte aus den Versuchen auch bei den SensMark Benchmarkergebnissen zu den besten Geräten gehören. Die beiden schlechtesten Geräte der *Accelerometer* Versuche, das Motorola MB 525 sowie das Lenovo A1_07 gehören auch in den Benchmarks aller SensMark Nutzer zu den schlechteren Geräten und erreichen mit durchschnittlich ca. 11050 bzw. 12100 Punkten vergleichsweise wenig Punkte. Interessant ist zudem, dass das MB 525 bezogen auf alle Benchmarks einen Maximalwert von über 13000 Punkten erreicht, während der des A1_07 in etwa dem Durchschnittswert von 12100 entspricht. Dies deckt sich mit der in den Messreihen entdeckten erhöhten Messfrequenz des Motorolas in Abhängigkeit von der Frequenz der Schwingung und der damit einhergehenden Verbesserung der Beschleunigungsmessung. Auch die Ergebnisse der anderen getesteten Geräte stimmen mit den durchschnittlichen Punktzahlen aus den Benchmarks aller Nutzer überein. Das Z10 erreicht mit ca. 17100 Punkten am meisten Punkte der zehn getesteten Geräte aus den Versuchen. Die Geräte Nexus 4 sowie Nexus 7 haben durchschnittlich ca. 16900 Punkte und liegen somit knapp hinter dem Z10. Dies entspricht ziemlich exakt den Versuchsergebnissen. Hier wird allerdings auch die eingeschränkte Aussagekraft der SensMark Benchmarks deutlich. So liefert z. B. das Z10 bei eher niedrigen Schwingfrequenzen

sehr gute Ergebnisse, während Nexus 4 und Nexus 7 bei höherfrequenten Schwingungen Vorteile besitzen. Die Versuche zum *Accelerometer* bilden jedoch nur einen Teil der Anforderungen an einen Accelerometer im Alltag ab, es wären also weitere, unterschiedlich gestaltete Versuche notwendig, um die Güte der Sensoren abschließend korrekt beurteilen zu können. Weiterhin liefert der SensMark Benchmark nur eine Punktzahl und kann somit trotz der verschiedenen Bewertungskriterien nicht die verschiedenen Stärken und Schwächen eines Sensors vollständig charakterisieren. Auch zur Feststellung der absoluten Messgenauigkeit von Sensoren ist SensMark kaum geeignet. Dies liegt jedoch in der Natur der Sache, ohne die Kenntniss der realen Werte ist kein Vergleich möglich. Dennoch bieten die von SensMark bewerteten Voraussetzungen für eine genaue Messung starke Indikatoren für die Güte eines Sensors. Der Zusammenhang zwischen den SensMark Benchmarkergebnissen und der Genauigkeit der *Accelerometer* in den Versuchen ist signifikant.

Vergleicht man die Ergebnisse der Versuche zu den Sensoren des Typs *Magnetic Field* mit den Punktzahlen dieser Geräte aus den Benchmarks aller Nutzer so muss festgestellt werden, dass hier nur teilweise ein klarer Zusammenhang herstellbar ist. So liegt das mit Abstand beste Gerät aus den Versuchen, das Google Nexus 4, im Vergleich der Punktzahlen nur im oberen Mittelfeld. Auch die Reihenfolge der anderen Geräte entspricht nicht immer der in den Versuchen ermittelten Genauigkeit der *Magnetic Field* Sensoren. Eine mögliche Erklärung liefert die große Empfindlichkeit und Umgebungsabhängigkeit des Sensors, was aussagekräftige Benchmarks erschwert. Allerdings könnten auch hier weitere Versuche zur Güte der Sensoren größere Klarheit bezüglich der Aussagekraft des SensMark Benchmarks eines Sensors dieses Typs schaffen. Ähnliches gilt für den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus den Versuchen zu den Lichtsensoren und den Benchmarks der entsprechenden Geräte bei SensMark. Versuche mit einer dynamischen Veränderung der Beleuchtungsstärke, insbesondere bei niedriger Intensität, würden eine verbesserte Beurteilung der Sensorgüte und den Vergleich mit den Benchmarks ermöglichen. Die durchgeführten Versuche und die daraus gezogenen Schlüsse entsprechen nicht in allen Teilen den von SensMark gesammelten Daten aus den Nutzerbenchmarks. Auch bezüglich der Drucksensoren wären weitere dynamische Versuche, wie in Abschnitt 5.5.2 bereits skizziert, wünschenswert, um allgemein gültige Aussagen treffen zu können. Insgesamt liefert SensMark insbesondere in Bezug auf Beschleunigungssensoren jedoch wertvolle Informationen bezüglich der Sensorgüte. Eine Verbesserung von SensMark ist aufgrund der Unkontrollierbarkeit der Durchführung und Umweltbedingungen bei Benchmarks durch den Nutzer schwierig. Durch die Einfachheit und den statischen Charakter der meisten Benchmarks von SensMark wird eine gewisse Vergleichbarkeit garantiert. Benchmarks mit höherer Aussagekraft scheitern an der mangelnden Reproduzierbarkeit durch den Nutzer.

6.4 Zukünftige Weiterentwicklungen

Aufbauend auf den bestehenden Komponenten und den bereits gewonnenen Erkenntnissen wären weitere Untersuchungen wie bereits beschrieben denkenswert. Auf Basis weiterer Daten und einer größeren Verbreitung der SensMark Applikation wären noch zuverlässigere Aussagen bezüglich der Verbreitung von Sensoren möglich. Bereits jetzt bieten die Daten einen guten Überblick über die in Smartphones eingesetzten Sensoren. Die SensMark Webseite ermöglicht weiterhin eine Auswertung der aktuellen Daten. In weiteren physikalischen Versuchen mit veränderten Versuchsbedingungen wären noch exaktere Aussagen zur Sensorgenauigkeit und Güte von Smartphonesensoren möglich. Die durchgeführten Versuche bilden bereits eine gute Grundlage, der Hauptfokus zukünftiger Arbeiten sollte auf einer Erweiterung dieser Versuche liegen.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Startseite der SensMark Webseite.	16
3.2	Aufteilung der Benchmark Ergebnisse.	18
3.3	Tabelle der besten Accelerometer Benchmarks im Durchschnitt absteigend nach Gesamtpunktzahl sortiert.	19
3.4	Benchmark Balkendiagramm; Gewähltes Benchmarkergebnis (oben) im Vergleich zu den besten fünf Durchschnittsergebnissen.	20
3.5	Benchmark Liniendiagramm bei einem Accelerometer mit den Messwerten der drei Sensorachsen X, Y und Z.	21
3.6	Liniendiagramm der Initialisierung eines Accelerometers mit den Messwerten von 350 bis 500.	21
3.7	Android Fragmentierung.	22
3.8	Gerätehersteller Fragmentierung.	23
3.9	Fragmentierung der verschiedenen Geräte des Herstellers Samsung.	24
3.10	Fragmentierung der verschiedenen Gerätemarken.	24
3.11	Verteilung der Geräte auf denen SensMark installiert wurde, darunter auch unbekannte Geräte mit chinesischer Bezeichnung.	25
3.12	Beide Ebenen der Sensorhersteller-Statistik.	25
3.13	Sensor Statistik am Beispiel von Accelerometern.	25
4.1	Android Fragmentierung.	28
4.2	Manufacturer und Brand Fragmentierung.	29
4.3	Accelerometer-Benchmarks mit verschiedenen Fake-Werten.	33
4.4	Verteilung der Fake-Werte bezüglich Benchmarks.	34
4.5	Verbreitung von Sensoren in unterschiedlichen Geräte-Modellen.	36
4.6	Verbreitung von Sensoren in Smartphones.	37
5.1	Oszilloskop bei $U = 10V$ Spitze-Spitze und $f = 10Hz$	64
5.2	Beispiel: Berechnung maximaler und minimaler Beschleunigungswerte, Nexus 7.	64
5.3	Steuerungsvorrichtungen für Frequenz und Spannung inklusive Oszilloskop sowie Rütteltisch.	65
5.4	Spannvorrichtung auf Rütteltisch zur Fixierung der Geräte.	66
5.5	Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des MB525 bei $U = 10V, f = 5Hz$	69
5.6	Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung des Nexus 4 bei $U = 10V, f = 5Hz$	69

5.7	Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung des Z10 bei $U = 10V, f = 5Hz$	70
5.8	Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V, f = 10Hz$	72
5.9	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung verschiedener Geräte bei $U = 10V$ und $f = 10Hz$ zwischen $t_0 = 4s$ und $t_1 = 5s$	73
5.10	Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V, f = 20Hz$	74
5.11	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung beim Z10 bei $U = 10V$ und $f = 10Hz$ bzw. $f = 20Hz$ zwischen $t_0 = 2,5s$ und $t_1 = 5s$	75
5.12	Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des Nexus 7 bei $U = 10V$ und $f = 20Hz$ zwischen $t_0 = 2,5s$ und $t_1 = 5s$	76
5.13	Linear Acceleration Sensor: Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V, f = 20Hz$	76
5.14	Vergleich der Beschleunigungen verschiedener Geräte bei $U = 10V, f = 40Hz$	78
5.15	Versuche: Teslameter mit Geo-Axialsonde zur Bestimmung des Erdmagnetfelds.	80
5.16	Versuche: Magnetic Field Sensor des BlackBerry PlayBook	81
5.17	Versuche: Magnetic Field Sensor des BlackBerry Z10	82
5.18	Versuche: Magnetic Field Sensor des Google Galaxy Nexus	83
5.19	Versuche: Magnetic Field Sensor des Google Nexus S	84
5.20	Versuche: Magnetic Field Sensor des Google Nexus 4	86
5.21	Versuche: Magnetic Field Sensor des LGE LG-P700	88
5.22	Versuche: Magnetic Field Sensor des Moto MB525	89
5.23	Versuche: Magnetic Field Sensor des Samsung GT-I9100	89
5.24	Versuchsaufbau Lichtsensor: Motorola Defy und Lux-Sensor sowie CAS-SY Interface mit Klima-Box.	91
5.25	Versuche: Gemessene Beleuchtungsstärken der Lichtsensoren verschiedener Geräte, Abstand 20cm.	92
5.26	Versuche: Gemessene Beleuchtungsstärken der Lichtsensoren verschiedener Geräte, Abstand 50cm.	94
5.27	Versuche: Klimabox zur Messung des Luftdrucks.	95
5.28	Versuche: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks	96

Tabellenverzeichnis

4.1	Modell-Verteilung bei Sensmark.	30
4.2	Benchmarks pro Sensortyp	31
4.3	Verteilung Benchmarks pro Nutzer	32
4.4	Sensortypen unter Android	35
4.5	Sensortyp Fragmentierung bei Smartphones.	38
4.6	SensMark: Accelerometer Spezifikationen weit verbreiteter Sensoren.	41
4.7	SensMark: Accelerometer Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Sensoren.	42
4.8	SensMark: Accelerometer Spezifikationen Top Ten Sensoren.	43
4.9	SensMark: Accelerometer Benchmarkergebnisse Top Ten Sensoren.	44
4.10	SensMark: Gyroskop Spezifikationen weit verbreiteter Sensoren.	46
4.11	SensMark: Gyroskop Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Sensoren.	47
4.12	SensMark: Durchschnittliche Benchmarkergebnisse von Modellen mit bzw. ohne Gyroskop.	48
4.13	SensMark: Magnetic Field Spezifikationen weit verbreiteter Sensoren.	50
4.14	SensMark: Magnetic Field Benchmarkergebnisse weit verbreiteter Sensoren.	51
4.15	SensMark: Magnetic Field Spezifikationen Top Ten Sensoren.	52
4.16	SensMark: Magnetic Field Benchmarkergebnisse Top Ten Sensoren.	53
4.17	Top 3 Sensorhersteller nach Verbreitung.	55
4.18	Top 3 Sensorhersteller nach Benchmarkergebnissen.	56
4.19	SensMark: Sensoren verschiedener Modelle.	57
4.20	SensMark: Benchmarkergebnisse des Samsung GT-I9100 verschiedener Android Versionen.	59
5.1	SensMark: Sensoren verschiedener Modelle	62
5.2	SensMark: Accelerometer Spezifikationen untersuchter Sensoren.	67

Literaturverzeichnis

- [1] ANDROID OPEN SOURCE PROJECT: *Motion Sensors*. – URL http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html
- [2] ANDROID OPEN SOURCE PROJECT: *Sensors Overview*. – URL http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html
- [3] CHIPWORKS INC.: *Inside the BlackBerry Z10*. – URL <http://www.chipworks.com/en/technical-competitive-analysis/resources/blog/inside-the-blackberry-z10/>
- [4] D’ALESSANDRO, ANTONINO UND D’ANNA, GIUSEPPE : *Suitability of Low-Cost Three-Axis MEMS Accelerometers in Strong-Motion Seismology: Tests on the LIS331DLH (iPhone) Accelerometer*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 5, pp. 2906–2913. Oktober 2013
- [5] DIXON-WARREN, ST. J.: *STMicroelectronics’ Integrated Inertial Sensor MEMS Device Technology*. – URL <http://www.chipworks.com/en/technical-competitive-analysis/resources/blog/stmicroelectronics-integrated-inertial-sensor-mems-device-technology/>
- [6] GABEL, ANDREAS: *Android Applikation zur Bestimmung der Genauigkeit von Smartphone Sensoren*. B.Sc.-Arbeit Ruhr-Universität Bochum. August 2012
- [7] INVENSENSE INC.: *InvenSense Introduces World’s First Integrated 9 - Axis Motion Tracking Device Using AKM’s 3-Axis Compass*. – URL http://ir.invensense.com/phoenix.zhtml?c=237953&p=irol-newsArticle_pf&id=1645987
- [8] KIONIX INC.: *6-axis and 9-axis IMUs: The Next Generation of MEMS Inertial Sensors*. – URL <http://www.kionix.com/imu-feature>
- [9] KNUTH, DONALD E.: 2. Bd. 2: *The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley Publishing Company, 1981
- [10] LANE, NICHOLAS D., MILUZZO, EMILIANO, LU, HONG, PEEBLES, DANIEL, CHOUDHURY, TANZEEM UND CAMPBELL, ANDREW T.: *A Survey of Mobile Phone Sensing*. IEEE Communications Magazine. September 2010

- [11] ULRICH, CHRISTOPH: *Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von mobilen Geoinformationsanwendungen in Verbindung mit Augmented Reality unter der Verwendung frei verfügbarer Software-Bibliotheken und Schnittstellen*. M. Eng.-Arbeit, Hochschule Anhalt. September 2013