

MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie

Franziska Wild-Pfeiffer und Bernhardt Schäfer

Zusammenfassung

Die Erfassung von Bewegungszuständen erfolgt heutzutage über eine Kombination verschiedenster Sensoren, in der Regel Beschleunigungs- und Drehratensensoren und zusätzlichen GPS-Messungen. Tendenziell werden die konventionellen Sensoren durch miniaturisierte, kostengünstige Sensoren ersetzt, sogenannte Mikro Elektro Mechanische Systeme (MEMS).

MEMS findet man u. a. in Airbag- und Reifendrucksystemen, in Digitalkameras, Handys, Druckköpfen von Tintenstrahldruckern, Herzschrittmachern und Biochips zur DNA-Analyse. Es sind Systeme, die Sensoren, Aktoren und Elektronik vereinen und die mittels der aus der Mikroelektronik übernommenen Werkstoffe und Fertigungsverfahren in Mikrogröße – von 1 mm bis 1 μ m – erstellt werden.

Schwerpunkte dieses Beitrags sind die Begriffsdefinition MEMS, die Anwendungsfelder von MEMS, der Aspekt der Miniaturisierung, die Erläuterung der physikalischen Prinzipien der in der Geodäsie zunehmend eingesetzten Beschleunigungs- und Drehratensensoren und die Anwendung der Erfassung von Bewegungszuständen mittels Beschleunigungssensoren.

Summary

The detection of states of motion is carried out by a combination of various sensors, usually accelerometers, gyroscopes and additional GPS measurements. The conventional sensors tend to be replaced by miniaturized, low-cost sensors so-called Micro Electro Mechanical Systems (MEMS).

MEMS can be found in airbags and tyre systems, digital cameras, mobile phones, print heads of inkjet printers, cardiac pacemakers and biochips for DNA analysis. These systems include sensors, actuators and electronics, and are produced in micro size – from 1 mm to 1 μ m – using the material and manufacturing processes of microelectronics.

This paper focuses on the definition of MEMS, the application fields of MEMS, the aspect of miniaturization, the explanation of the physical principles, the acceleration and rotation rate sensors increasingly used in geodesy and the application of the detection of movement states using accelerometers.

Schlagworte: MEMS, Beschleunigungssensor, Drehratensensor, Bewegungszustand

1 Einleitung

Ein Inertiales Navigationssystem (INS) bzw. Trägheitsnavigationssystem bestimmt kontinuierlich die Positionen, Geschwindigkeiten und Orientierungen im Raum mittels Integration der erfassten Beschleunigungen und Drehraten über die Zeit. Bei diesem Verfahren handelt es

sich um ein Koppelnavigationsverfahren, das sog. »Dead Reckoning«, das ergänzend zu GPS-Systemen in Bereichen mit schlechtem oder keinem GPS-Empfang, wie z. B. Häuserschluchten, eingesetzt wird und zusätzlich Lageinformationen liefert. Man spricht bei der Kombination von inertialer Navigation und Satellitennavigation von sogenannten integrierten Navigationssystemen (Wendel 2007).

Die gängigsten Drehratensensoren sind neben mechanischen Kreiseln optische Kreisel wie Ringlaserkreisel (RLG, Ring Laser Gyroskop) und Faserkreisel (FOG, Faser Optisches Gyroskop) (vgl. Jekeli 2000). Seit Mitte der 90er-Jahre wurden die konventionellen Sensoren durch miniaturisierte, kostengünstige Sensoren ersetzt. Man spricht hier von sogenannten Mikrosystemen, die im englischsprachigen Raum als Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) bekannt sind. MEMS-Drehratensensoren basieren auf dem physikalischen Prinzip der Corioliskraft; man spricht hier von Vibrationskreisel. Bei den Beschleunigungssensoren lässt sich das gängige Verfahren der Erfassung der Auslenkung einer Probemasse auch auf MEMS-Basis realisieren.

Mikrosysteme sind Systeme, die Sensoren, Aktoren und Elektronik in Miniaturgröße vereinen und steuern. Diese Systeme sind häufig nicht größer als ein Fingernagel (Abb. 1) und finden daher in vielen Geräten verschiedenster Branchen Anwendung.

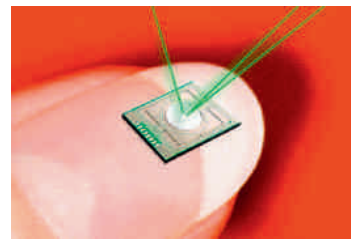


Abb. 1:
Mikrosysteme in
Fingernagelgröße
(Quelle: www.zeiss.de)

Die Entwicklung der Mikrosysteme beinhaltet seit den 60er-Jahren elektrische, mechanische, magnetische, optische, thermische und auch chemische Funktionen. Richard Feynman gab 1959 mit seiner Rede »There's Plenty of Room at the Bottom« am California Institute of Technology eine Vision zur Miniaturisierung vor (Feynman 1959). Durch verschiedenste Beispiele aus der Chemie, Biologie, Medizintechnik und dem Computerbereich angeregt, entwickelte er Ideen und schaffte Parallelen in der Umsetzung winzig kleiner elektronischer Geräte. In den 70er- und 80er-Jahren trat in der Elektronik ein großer Wandel durch die Mikroelektronik ein (Gerlach und Dötzel 2006, S. 14). Die einzelnen Bauteile wurden mittels des Verfahrens der Fotolithographie auf eine Siliziumscheibe, auch Wafer genannt, optisch übertragen, vervielfältigt und nicht mehr mechanisch hergestellt.

Kurt Petersen schaffte mit seinem Beitrag »Silicon as a mechanical material« im Jahr 1982 (Petersen 1982) eine Referenz für die Materialeigenschaften und Ätztechniken von Silizium. Hauptanwendungsgebiet waren bis Mitte der 90er-Jahre die IT-Branche und die Automobiltechnik. Seit Beginn dieses Jahrtausends findet eine zweite Welle der Anwendungen statt; MEMS werden verstärkt in der Unterhaltungselektronik eingesetzt, beispielsweise in Handys, Digitalkameras und Spielekonsolen (Salomon 2006). Sie bieten auch bei der Erfassung von Bewegungszuständen eines Menschen hohes Potenzial, was ein Schwerpunkt dieses Beitrags ist.

2 Was sind MEMS?

Unter MEMS wird die Integration von mechanischen, elektrischen und ggf. weiteren z.B. optischen und chemischen Komponenten wie Sensoren und Aktoren in Miniaturgröße mit Auswirkungen in Makrogröße verstanden. Im Gegensatz zu dem in den USA gebräuchlichen Begriff der Micro Electro Mechanical Systems wird in Deutschland der Begriff der Mikrosystemtechnik (MST) und in Japan der Begriff des Micromachining verwendet.

Bei all diesen Bezeichnungen muss allerdings auf den grundsätzlichen Unterschied zwischen dem fast ausschließlich verwendeten Begriff der Mikrosystemtechnik und der Mikrostrukturtechnik hingewiesen werden. Nach Menz u. a. (2005) ist die Mikrostrukturtechnik eine aus der Mikroelektronik abgeleitete Technologie bzw. ein Werkzeug, mit dem die im Mikrometerbereich liegenden geometrischen Elemente bzw. Strukturen erzeugt werden. Die Zusammenfassung der einzelnen Mikrokomponenten zu einem System wird folglich als Mikrosystemtechnik bezeichnet. Menz u. a. (2005) bezeichnen die Mikrosystemtechnik auch als konsequente Weiterentwicklung der Mikroelektronik auf nichtelektronische Gebiete. Ein Vergleich der typischen Eigenschaften von Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik ist in Gerlach und Dötzel (2006, S. 21) zu finden.

Kennzeichnend für die Mikrosysteme sind die im Folgenden aufgelisteten Eigenschaften:

- Abmessungen so klein, dass diese mit klassischer Feinmechanik nicht mehr herstellbar sind
- Kompakte Bauweise
- Geringes Gewicht
- Hohe Ausfallsicherheit
- Geringer Leistungsbedarf bzw. niedriger Energieverbrauch (wenig Abwärme)
- Kostengünstige Produktion basierend auf der Halbleitertechnologie und mikrotechnologischen Fertigungsverfahren
- Parallele Fertigungstechnik vieler Mikrokomponenten auf einem Substrat (»batch-fabricated«).

Die Produktion hoher Stückzahlen mittels der genannten Fertigungsverfahren führt zu sinkenden Kosten. Die Standardisierung der Herstellung zur Reduktion der Kosten erfolgt nach der Gesetzmäßigkeit »One product, one process« (vgl. Eloy 2004). Mit sinkenden Kosten ergeben sich neue Nutzungsmöglichkeiten (Kapitel 2.1). Nach Dötzel (2006) gibt es neben den sinkenden Kosten zwei weitere Gründe, die Mikrosystemen Vorteile gegenüber konventionellen Systemen verschaffen. Die Komponenten eines Mikrosystems verbessern durch die oben genannten Eigenschaften wie die Erhöhung der Zuverlässigkeit das Gesamtsystem und sie bieten – zusammengesetzt als System – z.B. im Bereich der Medizintechnik die einzige Möglichkeit, die gewünschte Funktion umzusetzen.

Neben dem Begriff der MEMS haben sich je nach Integration entsprechender Komponenten spezielle Begriffe etabliert:

- Unter MOEMS wird Micro Opto Electro Mechanical System verstanden bzw. die Ergänzung von MEMS um optische Elemente. Ein Beispiel für MOEMS sind Mikrospiegelarrays, die der Laserstrahlableitung dienen und neue Generationen von 3D-Laserscannern ermöglichen (Quelle: www.ipm.fraunhofer.de/fhg/ipm/). Eine weitere Anwendung der Mikrospiegel stellen Projektoren dar.
- RF MEMS steht für Radio Frequency MEMS. Dies sind mikromechanische Systeme zur Schaltung von Hochfrequenzsignalen. Anwendung finden RF MEMS u. a. in der Mobilfunktechnik und in Radarsystemen bzw. in der Medizintechnik zur Diathermie, einer elektrotherapeutischen Methode zur Erzeugung von Wärme im Körpergewebe.
- BioMEMS sind Biological MEMS, d. h. Mikrosysteme, die mit biologischen Komponenten wie Enzymen, Antikörpern oder lebenden Zellen ergänzt werden. Anwendungen findet man in der Medizintechnik in Form von z.B. miniaturisierten Kapillarsystemen, Lab-on-a-Chip-Systemen (LOC) und in den »Life-Sciences« in Form von z.B. Biochips.
- NEMS: Die Abkürzung steht für Nano Electro Mechanical System. Dieses System besteht analog zu MEMS aus mechanischen und elektrischen Elementen sowie Sensoren und Aktoren. NEMS stellen eine Weiterentwicklung der MEMS auf Nanometerebene dar, wobei sie sich in der Technologie der Herstellung unterscheiden, im Aufbau und der Anwendung aber ähnlich sind. Vor allem in der Medizintechnik und Biotechnologie finden sie Anwendung.

Die Mikrosystemtechnik und ihre zahlreichen Anwendungen haben sich etabliert, es bleiben aber Herausforderungen an Test und Kalibrierung der Systeme, an die Aufbau- und Verbindungstechnik (anwendungsspezifische Gehäuse, Störungsempfindlichkeit, Konflikt zwischen Schutz und Kopplung) und letztlich an die Genauigkeit und den Preis.

2.1 Anwendungsfelder von MEMS

Die Mikrosystemtechnik spielt in verschiedensten Branchen eine Rolle. Damit kann sie als Querschnittstechnologie bezeichnet werden.

In Abb. 2 sind die nach dem russischen Wirtschaftswissenschaftler Nikolai Kondratieff benannten Kondratieff-Zyklen dargestellt. Grundlage der zyklischen Wirt-

seine Gesundheit spielen eine zentrale Rolle. Die Technik in Form der Umwelttechnik, Medizintechnik, Biotechnologie und der optischen Technologie hat dabei eine unterstützende Funktion. Mikrosystemlösungen bis in den Nanometerbereich wie z.B. intrakorporale biomedizinische Sensoren in Form eines Katheters zur Herzdruckmessung stehen hierbei im Fokus des 6. Kondratieff-Zyklus. Das in Kapitel 5 vorgestellte Anwendungsbeispiel zeigt den

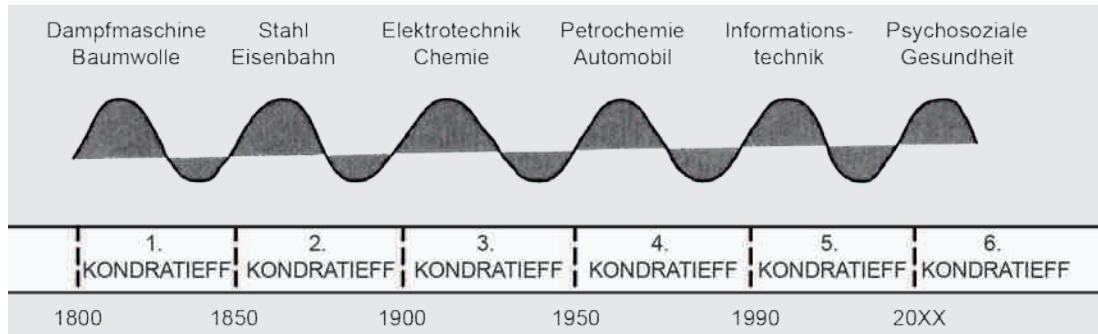


Abb. 2:
Kondratieff-
Zyklen – Theorie
der langen
Wellen (Nefio-
dow 2006)

schaftsentwicklung ist das Vorhandensein von kurzen und mittleren Konjunkturschwankungen sowie langen Phasen mit einer Dauer von 45 bis 60 Jahren. Man bezeichnet daher die Zyklen auch als lange Wellen, deren Auslöser technisch-wirtschaftliche Innovationen, sog. Basisinnovationen sind (vgl. Nefiodow 2006).

Nach dem 4. Kondratieff-Zyklus (ca. 1940 – 1990), in dem die individuelle Mobilität durch Automobil und Flugzeug und die Mineralölwirtschaft eine zentrale Rolle spielte, dominierte ab 1990 im 5. Kondratieff-Zyklus die Informations- und Kommunikationstechnologie, was sich in den Anwendungen der Mikrotechnik widerspiegelt. Nach Nefiodow (2006) wird der kommende 6. Kondratieff-Zyklus von der Basisinnovation »Erschließung der psychosozialen Potenziale« geprägt, d.h. der Mensch und

Übergang zwischen Informationstechnik und psychosozialen Anwendungen.

Die Anwendungsfelder der MEMS lassen sich, ausgehend von Abb. 4, in folgende Teilgebiete – veranschaulicht durch Beispiele – aufteilen:

- IT-Branche: Laptop, Tintenstrahldrucker
- Automobiltechnik: Kfz-Sicherheitstechnik (Airbagsysteme, ESP-Steuergeräte), Fahrerassistenzsysteme (Navigation)
- Konsumelektronik: Handy (z.B. Apple iPhone 3G, Abb. 3), Digitalkameras, Spielekonsolen (z.B. Nintendo Wii), Motiontracking-Systeme für Virtual Reality-Anwendungen

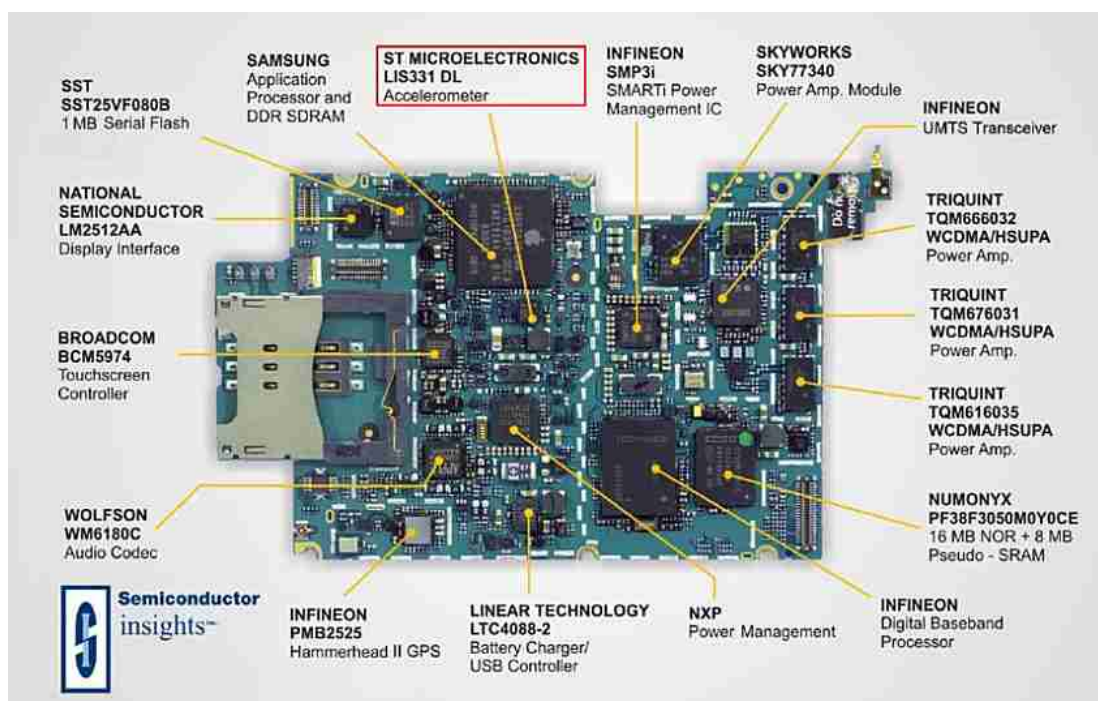


Abb. 3:
Apple iPhone 3G
Komponenten
(Quelle:
[www.sikod.com/
blog/2008/07/
15/iphone-3g-
teardown/](http://www.sikod.com/blog/2008/07/15/iphone-3g-teardown/))

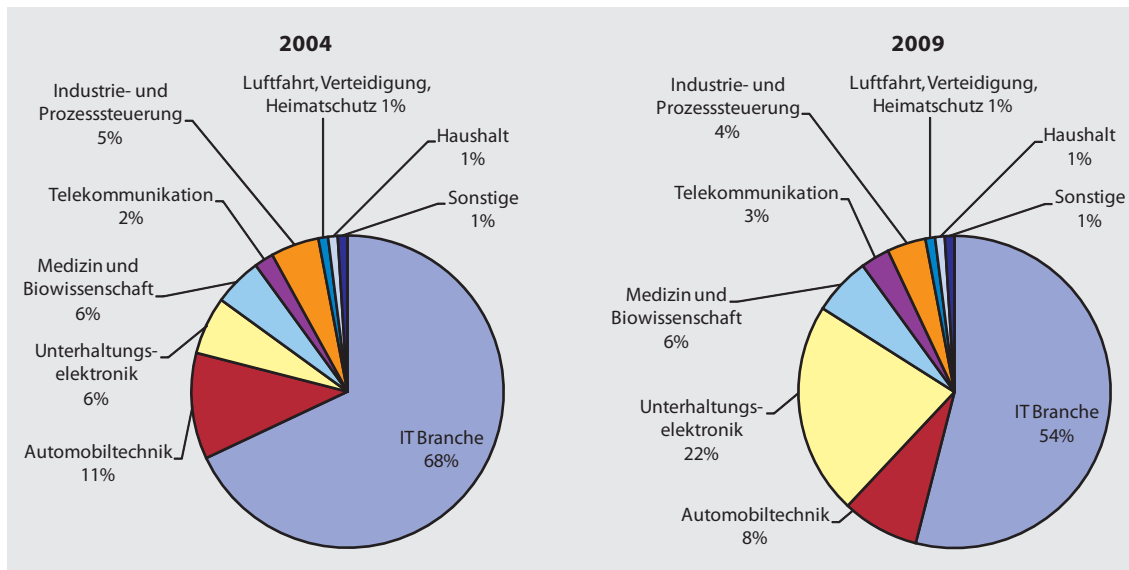


Abb. 4: Anwendungen MEMS 2004 und 2009 (nach Salomon 2006)

- Medizintechnik und Biomedizin: Instrumente z.B. in Form von Blutdrucküberwachungssystemen, »Lab-on-a-Chip« Implantate
- Telekommunikation: Oszillatoren, Schalter
- Industrie: Systemüberwachung von Maschinen
- u. a.

Der im Apple iPhone 3G (Abb. 3) integrierte dreiaxiale Beschleunigungsmesser LIS331DL von STMicroelectronics (www.st.com/stonline/products/families/sensors/sensors.htm) wird bei der automatischen Umstellung des Displays bei horizontalem und vertikalem Halten des Geräts sowie bei diversen Spielen (z.B. MotionX Dice) angewandt. Bei El-Sheimy und Niu (2007) werden außerdem die Menüsteuerung sowie Schrittzähler als Anwendung von Beschleunigungssensoren genannt.

Abb. 4 zeigt, dass sich durch die angesprochenen Eigenschaften von MEMS wie beispielsweise die kompakte Bauweise, das geringe Gewicht und der niedrige Energieverbrauch neue Nutzungsmöglichkeiten bzw. große Absatzmärkte ergeben. Trotz weltweiter Wirtschaftskrise blieben die Produktionszahlen der MEMS in den Jahren 2007–2009 auf stabilem Niveau. Die Verluste im Automobilsektor (Bouchaud 2008, 2009) konnten durch den Zuwachs im Bereich der Konsumelektronik kompensiert werden.

2009 wurden nach Yole DÉVELOPPEMENT, einem französischem Marktforschungsinstitut, 6900 Mill. US\$ Umsatz mit MEMS gemacht, 2010 werden 8000 Mill. US\$ prognostiziert (vgl. auch Abb. 5). Das entspricht einem zu erwartenden Wachstum des Marktvolumens von 16 % pro Jahr. Das starke Wachstum findet vor allem im Bereich

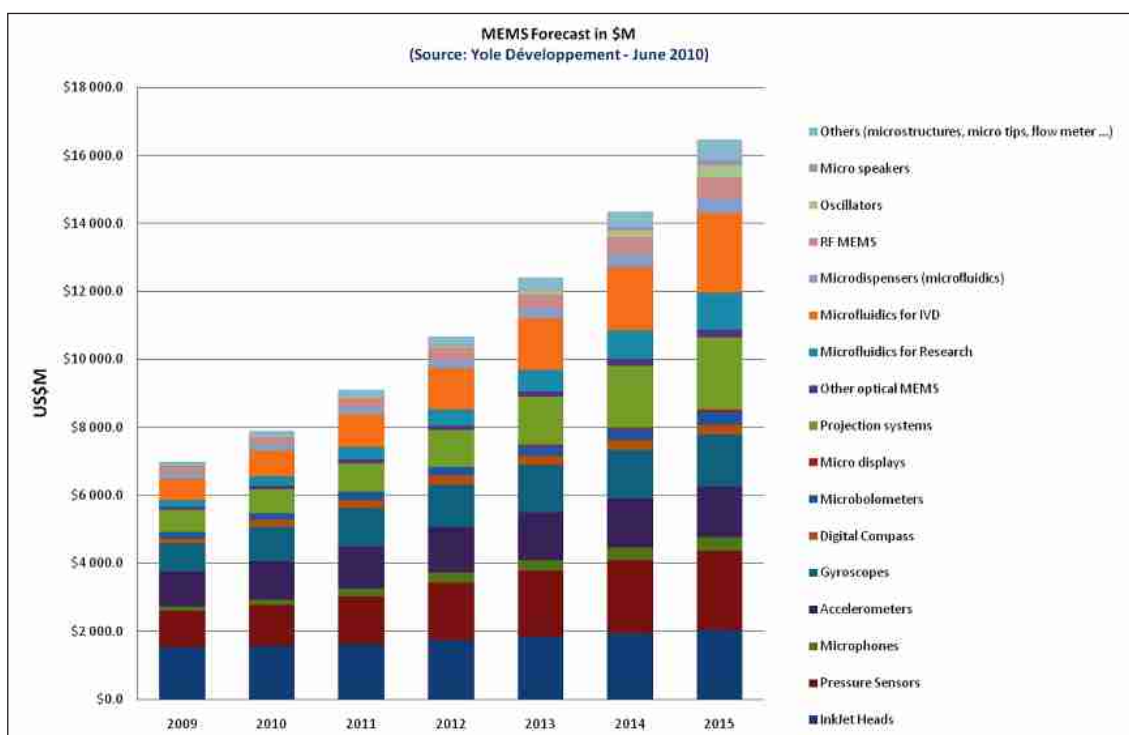


Abb. 5: Prognose MEMS Markt 2009–2010 in US\$ Millionen (Yole DÉVELOPPEMENT 2010)

der Kosumelektronik, der Medizintechnik, in Telekommunikationsanwendungen und in industriellen Anwendungen statt.

Neben der Anwendung von MEMS-Beschleunigungs- und Drehratensensoren als Ergänzung der GPS-Systeme zur Steigerung der Genauigkeit der Navigationslösung, werden Beschleunigungssensoren auch bei der Erfassung von Bauwerksschwingungen eingesetzt (Neitzel u. a. 2007). Ein weiteres Anwendungsbeispiel in der Geodäsie ist die Bildstabilisierung. Über die Erfassung und Kompensation von hochfrequenten Bewegungen mithilfe eines Beschleunigungssensors können Kameras stabilisiert, der Automatisierungsgrad erhöht und die Genauigkeit gesteigert werden. Im Bereich der Sportwissenschaften und der Medizin werden Beschleunigungssensoren zur Erfassung von Bewegungszuständen eingesetzt (Hagströmer u. a. 2007, Ward u. a. 2005).

3 Miniaturisierung

In der Mikrosystemtechnik werden – entsprechend der Bedeutung des Begriffs – miniaturisierte Systeme erstellt, deren Komponenten im Submillimeterbereich liegen (Abb. 6). Es wird aber nicht nur der Maßstab verändert, sondern auch die Technologie der Herstellung variiert. Durch die kleineren Dimensionen und die Integration von Mechanik und Elektronik auf einem Halbleiter-substrat kann preiswerter und in größeren Stückzahlen produziert werden. Im Zuge der Miniaturisierung verlieren oder gewinnen physikalische Wirkungen an Bedeutung.

Sowohl in der Makrowelt als auch in der Mikrowelt gelten die gleichen physikalischen Gesetze; die Verhältnisse der physikalischen Effekte untereinander können sich aber ändern. Ein Beispiel hierfür ist der Oberflächen-/Volumeneffekt. Für einen Quader bewirkt eine Skalierung um den Faktor 10 eine Verringerung der Fläche um den Faktor 100, das Volumen wird auf 1/1000 reduziert. Dies hat zur Folge, dass die Gewichtskraft um das 1000-fache geringer wird. Die Reibungskraft, die durch eine elastische Kraft (z.B. den Druck einer Feder) erzeugt wird, nimmt auf 1/100 ab.

Die Übertragung physikalischer Wirkungen von der Makro- in die Mikrowelt erfolgt nach der Ähnlichkeitstheorie, wobei zwischen geometrischer und physikalischer Ähnlichkeit unterschieden wird. Analog der Übertragung eines physikalischen Vorgangs (Original) in ein Modell sind zwei Systeme unterschiedlicher Dimension

ähnlich, wenn die Kennzahlen, die die Systeme beschreiben, ähnlich sind. Beispiele für solche Kennzahlen sind in der Mechanik

- Ca: Cauchy-Zahl (Verhältnis von Trägheitskräften zu elastischen Kräften)
- Fr: Froude-Zahl (Verhältnis von Trägheitskräften zu Druckkräften)
- Re: Reynolds-Zahl (Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften).

Die Kennzahlen oder auch Komplexe beschreiben Verhältnisse unterschiedlicher physikalischer Größen. Invarianten der Ähnlichkeit, die gleiche Größen beschreiben, werden Simplexe genannt (Pagel 2001).

Der Vorgang der Transformation zwischen Makro- und Mikrowelt wird als Skalierung bzw. »scaling down« bezeichnet. Aus den physikalischen Gesetzen bzw. Bewegungsgleichungen lassen sich Skalierungsbedingungen ableiten. Diese Bedingungen bzw. die daraus resultierenden Effekte der Änderung der Intensität physikalischer Wirkungen haben Auswirkung auf die Anwendung von

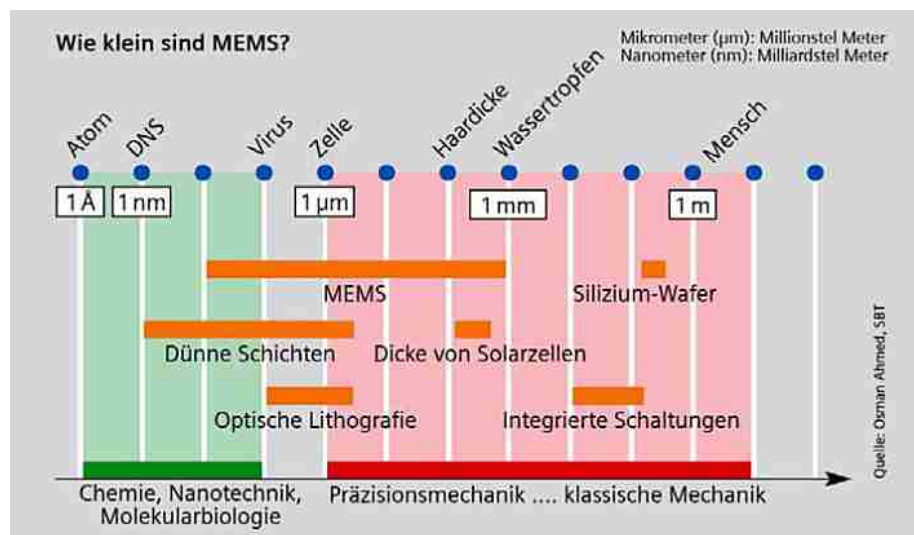


Abb. 6: Größe der MEMS (Schröder 2004)

Funktionsprinzipien bzw. auf die Konstruktion von Komponenten. Es können folglich nach Baglio u. a. (2007) Designparameter festgelegt werden, um herauszufinden, welche Methode für eine bestimmte Anwendung die beste ist.

In (Gerlach und Dötzel 2006) wird am Beispiel kapazitiver Sensoren gezeigt, dass sich die Sensitivität bei Drucksensoren im Fall einer Skalierung nicht ändert; bei Beschleunigungs- und Drehratensensoren verschlechtert sie sich. Ursache hierfür ist die Abhängigkeit der Sensitivität der Sensoren von der Masse. Volumeneffekte wie Schwere und Trägheit verlieren an Bedeutung. Oberflächeneffekte wie elektrostatische Kräfte, Reibungskräfte, Oberflächenspannungen, Aufheiz- und Abkühleffekte haben gegenüber Volumeneffekten (z.B. Gravitationskräfte, Trägheitskräfte) größere Bedeutung.

4 MEMS-Sensoren

MEMS sind Systeme, die aus Sensoren, Aktoren und Elektronik bestehen. Unter einem Sensor wird eine Komponente verstanden, die Messgrößen mechanischer, elektrischer, magnetischer, thermischer und chemischer Art in eine elektrische Messgröße umwandelt. Gängige Sensoren sind beispielsweise Beschleunigungssensoren (Beschleunigung),

Bei einem Beschleunigungssensor wird die Auslenkung einer Probemasse im Sensor erfasst, woraufhin die Regelung den Piezoaktor veranlasst, diese wieder auszugleichen. Die Spannung, die am Piezoaktor angelegt wird, dient hier als Messgröße für den Beschleunigungssensor.

In den Anwendungsgebieten der Geodäsie spielen neben Magnetfeldsensoren als elektronischer Kompass vor allem Beschleunigungs- und Drehratensensoren eine

große Rolle. Es wird im Folgenden daher auf die Grundprinzipien der Beschleunigungs- und Drehratensensoren eingegangen. Dabei unterscheidet man je nach Grad der Integration ein-, zwei- und dreiaxige Sensoren. In Kapitel 5 wird eine Anwendung mit dreiaxigen Beschleunigungssensoren vorgestellt.

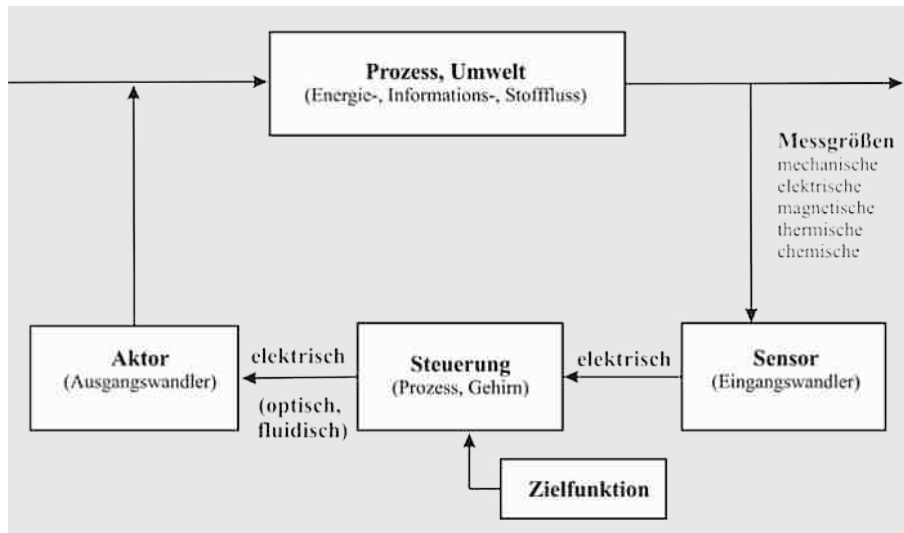


Abb. 7: Sensoren und Aktoren (nach Gerlach und Dötzel 2006, S. 250)

nigung), Drehratensensoren (Rotationsgeschwindigkeit), Magnetfeldsensoren (magnetische Flussdichte), Temperatursensoren (Temperatur), Drucksensoren (Druck), Gassensoren (gasförmige Substanz – Reaktivität, Oxidierbarkeit, ...) etc. Aktoren dagegen stellen das Gegenstück zu Sensoren dar. Es wird eine meist elektrische Stellgröße in eine nicht-elektrische Stellgröße, oftmals mechanische Stellgröße umgesetzt (vgl. Abb. 7). Ein Beispiel stellt ein Piezoaktor dar, der bei angelegter Spannung mit einer Deformation des piezoelektrischen Materials reagiert. Druckköpfe von Tintenstrahldruckern funktionieren z.B. nach diesem piezoelektrischen Wandlerprinzip, sodass eine gleichmäßige Ausgabe der Tinte in einzelne Tröpfchen erreicht wird.

eines inertialen Koordinatensystems misst. Ein Beispiel für das Prinzip der Funktionsweise eines Beschleunigungsmessers ist in Abb. 8 dargestellt. Die an zwei Federn in einem Gehäuse elastisch aufgehängte Masse wird durch eine Beschleunigung a des Gehäuses aus ihrer Nullposition (vgl. Abb. 8a) gelenkt, die Auslenkung Δl ist dabei proportional zur Beschleunigung (vgl. Abb. 8b). Nach dem 2. Newton'schen Gesetz gilt für die Trägheitskraft

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

bzw. für die Federkraft

$$F = k \cdot \Delta l. \quad (2)$$

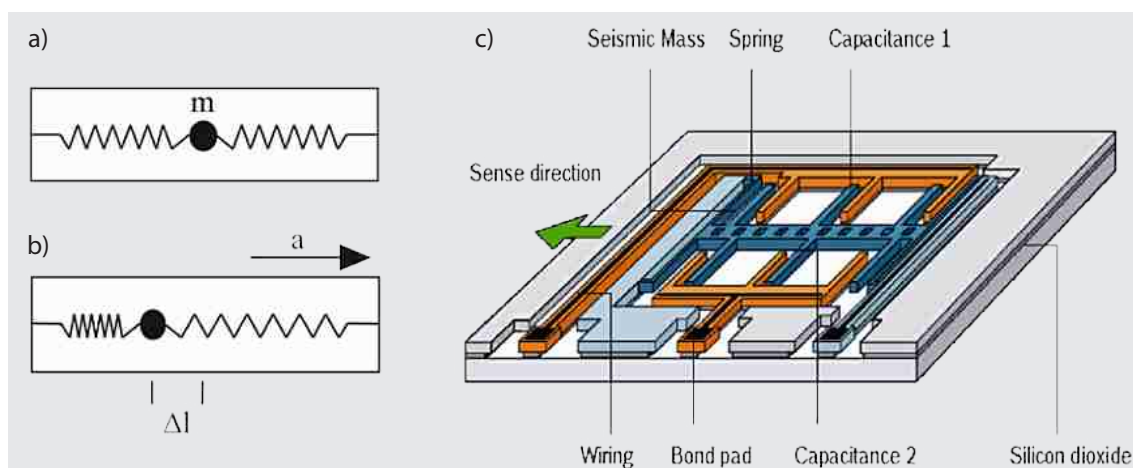


Abb. 8: Grundprinzip eines Beschleunigungsmessers (a, b), Realisierung auf MEMS-Basis (c) (Quelle: www.semiconductors.bosch.de/en/10/index.asp)

k ist die Federkonstante. Für die Beschleunigung a bezüglich eines inertialen Koordinatensystems folgt durch Gleichsetzen beider Kräfte

$$a = \frac{k}{m} \cdot \Delta l. \quad (3)$$

Zu beachten ist, dass der Beschleunigungsmesser nicht zwischen der kinematischen Beschleunigung und der durch die Schwerkraft hervorgerufenen Beschleunigung g der Prüfmasse unterscheidet. Folglich gilt für die tatsächlich erfasste Beschleunigung bzw. spezifische Kraft:

$$\bar{a} = a - g. \quad (4)$$

Es lassen sich die nachfolgenden, in MEMS realisierten Typen von Beschleunigungsmessern unterscheiden (siehe Abb. 8c):

- Kapazitiv: Messung der Änderung der Kapazität bzw. der Spannung zweier Kondensatoren infolge der Auslenkung der Probemasse
- Vibrations-: Messung der Frequenzdifferenz (Schwingungsfrequenz) zweier schwingenden Quarze infolge der Beschleunigung einer Probemasse
- Piezoelektrisch: Messung der durch Krafteinwirkung verursachten Deformation an der Oberfläche eines piezoelektrischen Materials (z.B. Kristalle wie Quarz, Keramiken wie Blei-Zirkonat-Titanate, Zinkoxid zur Dünnschichtherstellung) in Form einer Ladungstrennung bzw. elektrischen Spannung
- Piezoresistiv: Messung der durch mechanische Belastung auftretenden Änderung des spezifischen Widerstands eines Materials. Bei Halbleitermaterialien wie Silizium (siehe Frühauf 2005, Madou 2002) ist der Effekt verglichen mit anderen Werkstoffen am deutlichsten.

Weiterführende Informationen sind u.a. in (Hsu 2008, Titterton und Weston 2004) zu finden.

4.2 Drehratensensoren

Ein Drehratensensor misst die Rotationsgeschwindigkeit einer Masse bezüglich eines inertial ausgerichteten Koordinatensystems. Es lassen sich generell drei Typen von Drehratensensoren unterscheiden: mechanische Kreisel, optische Kreisel basierend auf dem Sagnac-Effekt (Faserkreisel (FOG), Ringlaserkreisel (RLG)) und Vibrationskreisel basierend auf dem Coriolis-Effekt. Im MEMS-Bereich wird die Technik der Vibrationskreisel realisiert, was kostengünstig ist, aber zu einer deutlich geringeren Genauigkeit führt (Barbour 2009, Wendel 2007). Im Folgenden wird die Funktionsweise der MEMS-Kreisel beschrieben.

Eine Prüfmasse wird in x-Richtung (siehe Abb. 9) kontrolliert in Schwingung mit einer bestimmten Schwingungsfrequenz versetzt, d.h. die Geschwindigkeit v der

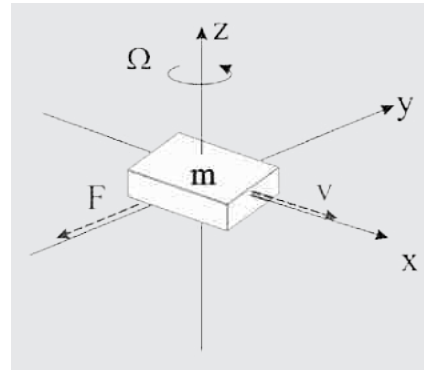


Abb. 9:
Coriolis-Effekt

Prüfmasse variiert periodisch. Bei einer senkrecht zur Schwingungsrichtung wirkenden Winkelgeschwindigkeit Ω wird eine Beschleunigung in y-Richtung mit der gleichen Frequenz erzeugt:

$$a = 2v \cdot \Omega \quad \text{bzw. in vektorieller Schreibweise} \\ \bar{a} = 2(\vec{v} \times \vec{\Omega}). \quad (5)$$

Für die Trägheitskraft bzw. Coriolis-Kraft folgt nach Gleichung (1)

$$F = 2mv \cdot \Omega \quad \text{bzw.} \quad \vec{F} = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega}). \quad (6)$$

Die Prüfmasse führt folglich periodische Schwingungen in y-Richtung mit der gleichen Frequenz aus. Die Amplitude der periodischen Schwingungen in y-Richtung stellt ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit Ω dar.

Basierend auf diesem physikalischen Grundprinzip lassen sich verschiedene Realisierungen in Form von prisma-tischen Biegebalken (»Foucault pendulum gyroscope«), Stimmgabel-Strukturen (»tuning fork gyroscope«), rotationssymmetrischen Resonanzkörpern (»wine glass resonator« oder »Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)«) und einzeln oder paarweise angeordnete Feder-Masse-Systemen (»vibrating wheel gyroscope«) unterscheiden (Barbour 2009, Billep 1999).

5 Anwendungsbeispiel – Erfassung von Bewegungszuständen

Eine Machbarkeitsuntersuchung am Institut für Navigation der Universität Stuttgart zeigt, dass es möglich ist, mittels MEMS-Sensoren Bewegungszustände eines Menschen zu erfassen. Körperliche Aktivität wird für Medizin und Sportwissenschaften bislang auf Basis von Fragebögen oder Telefoninterviews erfasst (Huy und Schneider 2008), alternativ ist dies auch mit Beschleunigungssensoren möglich. Die bisher verfügbaren Methoden der Erfassung körperlicher Aktivität mit Beschleunigungssensoren liefern allerdings nur einen Überblick über die Summe der Aktivitäten bezogen auf einen bestimmten Zeitraum. Von den Anwendern und der Wissenschaft werden die proprietären Ergebnisse dieser Methoden nicht vollstän-

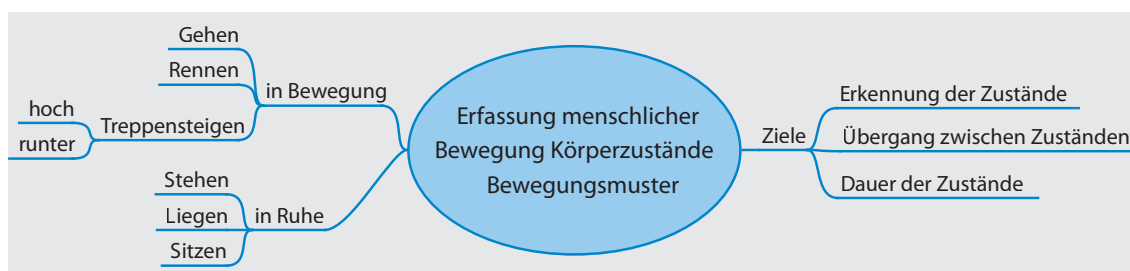


Abb. 10: Mindmap der Bewegungszustände und Ziele der Bewegungserkennung

dig akzeptiert, da sie nur bedingt mit den Ergebnissen der Fragebögen oder Ergebnissen anderer Geräte vergleichbar sind (Ward u. a. 2005). Daher besteht ein Bedarf an kostengünstigen Alternativen der Erfassung körperlicher Aktivität mit Beschleunigungssensoren, um Vergleichsmöglichkeiten mit den Befragungen zu realisieren.

Grundlage der Untersuchung ist ein Katalog von Bewegungszuständen, die erfasst werden (vgl. Abb. 10). Es wird unterschieden, ob sich der menschliche Körper in einer Ruhesituation oder in Bewegung befindet (statischer oder kinematischer Zustand). Die Ruhezustände beinhalten Stehen, Liegen und Sitzen; die Arten der Bewegung sind Gehen, Rennen und Treppensteigen. Die Auswertung soll die Zustände zuverlässig erkennen und die Reihenfolge der Aktivitäten mit ihrer jeweiligen Dauer korrekt darstellen.

Die drei Bewegungsarten haben gemeinsam, dass sich der Mensch durch Schritte fortbewegt, die in den Messwerten der Beschleunigungssensoren erkannt und automatisch anhand der Charakteristik der Schritte den verschiedenen Bewegungsarten zugeordnet werden.

Grundlage der Auswertung der Ruhezustände ist die zweifache Flexion des Körpers beim Sitzen, am Knie und an der Hüfte. Der Zustand Sitzen kann durch Abfrage des Beugungszustandes festgestellt werden. Die Ruhezustände Stehen und Liegen können über die Ausrichtung der Sensoren bezüglich des Erdschwerefeldes bestimmt werden. Um beide Zustände voneinander trennen zu können, muss die Ausrichtung der longitudinalen Körperachse in Bezug zum Schwerfeld bestimmt werden.

Für die Erfassung der Bewegung werden in dieser Untersuchung dreiaxige digitale Beschleunigungssensoren des Typs MMA7456L von Freescale verwendet. Die Sensoren basieren auf dem Prinzip der kapazitiven Beschleunigungssensoren (Kapitel 4.1) und werden durch die Fertigungstechnik Oberflächenmikromechanik (Gerlach und Dötzel 2006, Hsu 2008, Maluf und Williams 2004, Nguyen 2004, Völklein und Zetterer 2000) hergestellt. Ihre Eigenschaften sind geringer Stromverbrauch, kleine Abmaße und niedrige Herstellungskosten, weshalb sie üblicherweise in der Konsumelektronik eingesetzt werden (Freescale 2009). Die Beschleunigungssensoren sind auf Evaluationsplatinen platziert, die jeweils mit Batterie, Mikroprozessor, Funkeinheit und Antenne ausgestattet sind (vgl. Abb. 11). Mit einem USB-Dongle lassen sich von einem Computer mit Steuerungssoftware mehrere Beschleunigungssensoren gleichzeitig über Funk betreiben (Freescale 2008). Folglich können Beschleunigungssen-

soren an unterschiedlichen Positionen des Körpers eines Probanden befestigt werden, ohne die natürlichen Bewegungen durch Kabel zu beeinflussen (siehe Abb. 12):

- Knöchel: Der Sensor wird knapp oberhalb des Sprunggelenks am rechten Bein des Probanden an seiner rechten Außenseite befestigt.
- Knie: Der Sensor wird am rechten Oberschenkel knapp oberhalb des Knies an der Außenseite angebracht.
- Gürtel: Der Sensor wird am Gürtel des Probanden an der rechten Außenseite fixiert.

Die Funkübertragung und das geringe Gewicht (20 Gramm incl. Befestigung) lassen ein komfortables Tragen der Sensoren auch in Alltagssituationen zu, was für die Datenqualität wichtig ist. Die Bewegungen sollen so natürlich wie möglich ausgeführt werden, um robuste Erkennungsalgorithmen entwickeln zu können.



Abb. 11: Sensorplatine und USB-Dongle

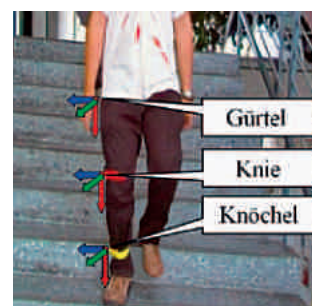


Abb. 12: Sensorpositionen

Tab. 1: Beschreibung der sechs Bewegungsmuster, die aus kinematischen und statischen Bewegungszuständen zusammengesetzt sind

Gehen	5 s Stehen, 10 Schritte Gehen, 5 s Stehen, ... (3 Wiederholungen Gehen)
Rennen	5 s Stehen, Rennen, 5 s Stehen
Treppe hoch	5 s Stehen, Treppe hoch (22 Stufen, ein Stockwerk), 5 s Stehen
Treppe runter	5 s Stehen, Treppe runter (22 Stufen, ein Stockwerk), 5 s Stehen
Sitzen	5 s Sitzen, 5 s Stehen, 5 s Sitzen, ... (5 Wiederholungen Stehen)
Liegen	5 s Stehen, 5 s Liegen, 5 s Stehen, ... (5 Wiederholungen Liegen)

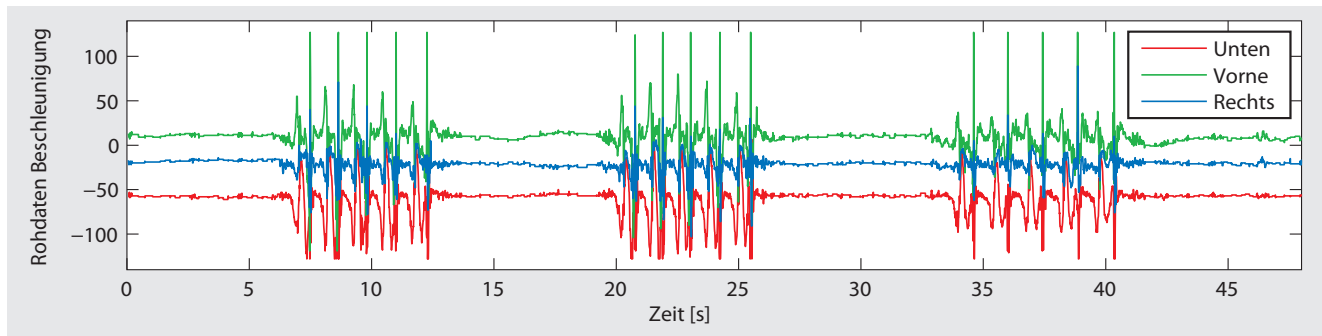


Abb. 13: Gemessene Beschleunigungen in Rohdaten, Sensorposition Knöchel für Bewegungsmuster Gehen

Die Ausrichtung der Sensoren erfolgt einheitlich, indem die Sensorachsen den Achsen eines Körperkoordinatensystems (Unten, Vorne und Seite) zugeordnet wurden (siehe Abb. 12). Da es sich um ein rechtshändiges Koordinatensystem handelt, zeigt die dritte Koordinatenachse vom Probanden aus nach rechts.

Für die Untersuchungen liefern die Sensoren im Messbereich $\pm 2g$ Daten mit einer Rate von 120Hz. Die Auswertung der Daten findet mit der Software Matlab statt (The MathWorks 2009). Für eines der Bewegungsmuster, die in Tab. 1 aufgeführt sind, wird die Auswertung exemplarisch beschrieben.

In Abb. 13 sind die Beschleunigungen von drei sensiti-ven Achsen des Sensors am Knöchel für das Bewegungsmuster Gehen dargestellt. Die Beschleunigungen werden in einem Rohdatenformat erfasst, welches für Beschleunigungen im Bereich von $\pm 2g$ die Werte -127 bis 128 annimmt.

In einem ersten Auswerteschritt wird unterschieden, ob sich der Körper in Ruhe oder in Bewegung befindet; für das Beispiel in Abb. 13 ergeben sich sechs Zeitpunkte, welche die Messreihe in sieben Abschnitte aufteilt (Abb. 14).

Jedes kinematische Zustandsintervall, in Abb. 14 markiert mit [K], wird in einer zweiten Auswertestufe weiter untersucht. Mit einer Fourier-Transformation wird die Schrittfrequenz bestimmt, wodurch sich die Zustände Gehen, Rennen oder Treppensteigen zuordnen lassen. Beim Treppensteigen muss zusätzlich aus der vertikalen Beschleunigung die Information abgeleitet werden, ob der Proband die Treppe nach oben oder nach unten läuft.

Die in Abb. 14 mit [S] markierten statischen Intervalle werden anhand des Beugungszustandes des Knies und der Ausrichtung der longitudinalen Körperachse ausgewertet und den Klassen Stehen, Sitzen oder Liegen zugeordnet.

Die Bewegungszustände werden in Form einer Liste der detektierten Zustände mit ihren Anfangs- und Endzeiten ausgegeben. Da die Probanden bei den Messungen gefilmt werden, kann die Güte der Erkennungsrate bestimmt werden, welche je nach Bewegungsmuster zwischen 74% und 98% liegt.

In Kombination mit Magnetfeldsensoren oder Drehratensensoren – ebenfalls auf MEMS-Basis – lässt sich folglich eine einfache Koppelnavigation realisieren. Eine Variante stellt die Verwendung der Zero Velocity Updates (ZUPT) bei jedem erkannten Schritt zur Verbesserung der aus Drehraten und Beschleunigungen berechneten Geschwindigkeiten und Positionen dar (Foxlin 2005, Godha und Lachapelle 2008).

6 Fazit

Es wurden grundlegende Aspekte zu MEMS besprochen, von der Begriffserläuterung über Skalierungseffekte bei der Miniaturisierung bis hin zu den Grundprinzipien von

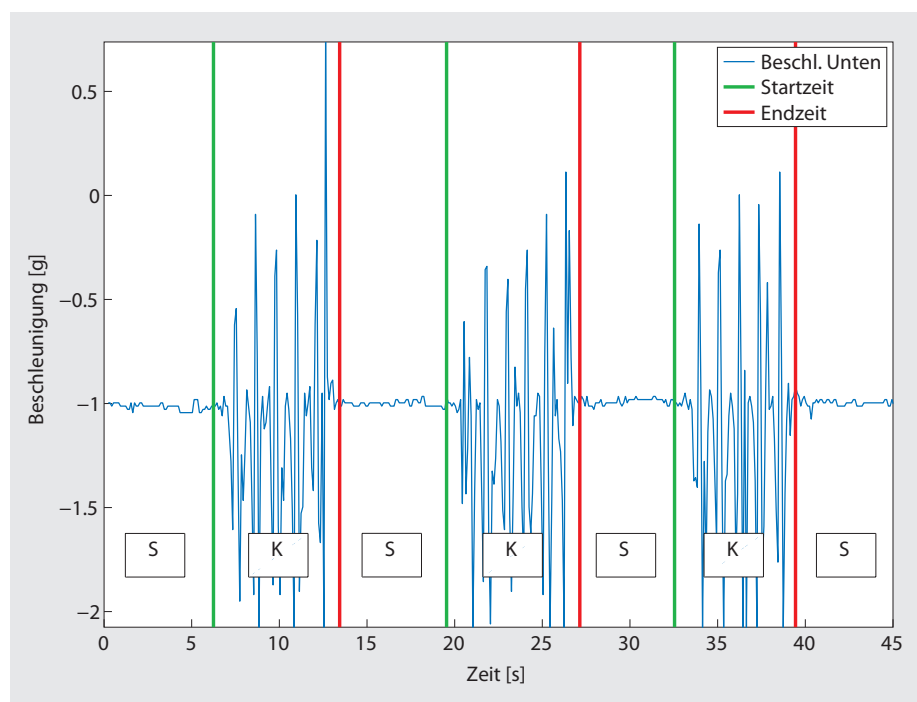


Abb. 14: Kinematische [K] und statische [S] Intervalle für Bewegungsmuster Gehen

häufig in der Geodäsie eingesetzten Beschleunigungs- und Drehratensensoren. MEMS stellen durch ihre kompakte Bauweise, ihr geringes Gewicht, den niedrigen Energieverbrauch und die Produktion in großen Stückzahlen zuverlässige Systeme dar, die in verschiedenen Bereichen bisher Anwendung finden und zukünftig vermehrt finden werden. Es konnte gezeigt werden, dass MEMS zur Erfassung von Bewegungszuständen eingesetzt werden können.

Generell müssen die MEMS-Sensoren für die Verwendung als Low-Cost-Lösung zur Navigation, ergänzend zur Nutzung von Satellitennavigationssystemen, ausreichend getestet und kalibriert werden und die Genauigkeit, speziell bei Drehratensensoren, gesteigert werden.

Dank

Herzlicher Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Matthias Schnaithmann vom Lehrstuhl Mikrosystemtechnik des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart für die sehr freundliche konstruktive Unterstützung. Ein großer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Kleusberg für die zahlreichen Anregungen während der Erstellung des Beitrags.

Literatur

- Baglio, S.; Castorina, S.; Savalli, N.: *Scaling Issues and Design of MEMS*. John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 2007.
- Barbour, N.M.: *Inertial Navigation Sensors*. RTO Lecture Series: Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, RTO-ENSET-116, 2009.
- Billep, D.: *Modellierung und Simulation eines mikromechanischen Drehratensensors*. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 1999.
- Bouchaud, J.: *MEMS Market Brief – MEMS in motion*. December 2008.
- Bouchaud, J.: *MEMS Market Brief – 2008: What a Year!*. January 2009.
- Dötzel, W.: *Mikrosystemtechnik – Wachstum ins Kleine*. Sitzungsberichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Band 2, Heft 1, Verlag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Leipzig, 2006.
- Eloy, J.C.: *Status of MEMS industry*, YOLE développement, 2004.
- El-Sheimy, N.; Niu, X.: *The Promise of MEMS to the Navigation Community*. InsideGNSS, Vol. 2, Number 2, 2007, S. 46–56.
- Feynman, R.: *There is plenty of room at the bottom*. *Journal of Microelectromechanical Systems* 1, S. 60–66, 1992.
- Foxlin, E.: *Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors*. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, Number 6, 2005, S. 38–46.
- FREESCALE Semiconductor Inc.: *DRM103 Designer Reference Manual*, Document Number: DRM103 Rev. 1, 08/2008.
- FREESCALE Semiconductor Inc.: *Technical Data, MMA7456L: XYZ-Axis Accelerometer*, Document Number: MMA7456L, Rev 4, 04/2009.
- Frühau, J.: *Werkstoffe der Mikrotechnik, Lehrbuch für Ingenieure*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2005.
- Gerlach, G.; Dötzel, W.: *Einführung in die Mikrosystemtechnik, Ein Kursbuch für Studierende*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2006.
- Godha, S.; Lachapelle, G.: *Foot mounted inertial system for pedestrian navigation*. *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 2008, 075202.
- Hagströmer, M.; Oja, P.; Sjöström, M.: *Physical Activity and Inactivity in an Adult Population Assessed by Accelerometry*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol. 39, Nr. 9, 2007, S. 1502–1508.
- Hsu, T.-R.: *MEMS and Microsystems – Design, Manufacture and Nano-scale Engineering*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 2008.
- Huy, C.; Schneider, S.: *Instrument für die Erfassung der physischen Aktivität bei Personen im mittleren und höheren Erwachsenenalter*. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, Vol. 41, Nr. 3, Juni 2008, S. 208–216.
- Jekeli, C.: *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. De Gruyter, Berlin, 2000.
- Madou, M.: *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. 2nd edition. CRC Press, 2002.
- Maluf, N.; Williams, K.: *An introduction to micromechanical systems engineering*. 2nd edition. Artech House, Boston, 2004.
- Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. 3. Auflage, Wiley Verlag, Weinheim, 2005.
- Neitzel, F.; Schwanebeck, T.; Schwarz, W.: *Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren*. AVN 06-2007, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.
- Nefiodow, L.A.: *Der sechste Kondratieff. Wege zur Produktivität und Vollbeschäftigten im Zeitalter der Information*. 6. Auflage, Rhein-Sieg Verlag, Sankt Augustin, 2006.
- Nguyen, N.-T.: *Mikrofluidik: Entwurf, Herstellung und Charakterisierung*. Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004.
- Pagel, L.: *Mikrosysteme: Physikalische Effekte bei der Verkleinerung technischer Systeme*. Schlenbach Verlag, Wilburgstetten, 2001.
- Petersen, K.: *Silicon as a mechanical material*. *Proceedings of the IEEE* 70, S. 420–457, 1982.
- Salomon, P.: *Micro sensors – world wide markets and economic impact*. Keynote at Eurosensors, enablingMNT www.enablingmnt.com, 2006.
- Schröder, T.: *MEMS in der Gebäudetechnik: Das Haus fühlt – und handelt*. In: *Pictures of the Future – Die Zeitschrift für Forschung und Innovation*, Siemens AG, Ausgabe Herbst 2004, 2004.
- The MathWorks Inc.: *MATLAB® 7 Getting Started Guide* 2009, 2009.
- Titterton, D.H.; Weston, J.L.: *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd edition. The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- Völklein, F.; Zetterer, T.: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen – Technologien – Anwendungen*. 2. Auflage, Vieweg Verlag, 2000.
- Ward, D.S.; Evenson, K.R.; Vaughn, A.; Rodgers, A.B.; Troiano, R.P.: *Accelerometer Use in Physical Activity: Best Practices and Research Recommendations*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol. 37, Nr. 11, 2005, S. S582–S588.
- Wendel, J.: *Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*. Oldenbourg Verlag, München, 2007.
- Yole DÉVELOPPEMENT: *Status of the MEMS Industry* 2010, 2010.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Franziska Wild-Pfeiffer
Dipl.-Ing. Bernhardt Schäfer
Institut für Navigation, Universität Stuttgart
Breitscheidstraße 2, 70174 Stuttgart
Fax: +49 711 68582755
wild-pfeiffer@nav.uni-stuttgart.de
schaefer@nav.uni-stuttgart.de