

Abschlussbericht zum Projekt 9D-Sense (FKZ: 16N11843) - Verlängerungszeitraum 01.11.2014-30.04.2015 -

1. Energieautarke Fußgängernavigation

1.1. Projektziel

Gemäß Abschlussbericht zum Projekt 9D-Sense wurde im Projektzeitraum 01.11.2011-30.10.2014 ein „Smart Shoe“ für die energieautarke Positionsbestimmung von Fußgängern mit Hilfe von MEMS-Beschleunigungssensoren und Magnetfeldsensoren entwickelt. Während die Qualität der Positionsbestimmung bereits Ende 2014 als positiv bewertet wurde, konnte seinerzeit noch keine vollständige Systemautarkie erreicht werden.

Ziel der Projektverlängerung war es deshalb, die Energiebilanz des Gesamtsystems aus Sensorik, Sensorfusion und Energy-Harvester im Detail zu analysieren und Lösungskonzepte für einen vollständig autarken Systembetrieb zu entwickeln.

1.2. Vorgehensweise

Im ersten Schritt wurde die Energiebilanz des Gesamtsystems (Sensorik, Sensorfusion, interne Datenkommunikation, drahtlose Datenübertragung der aktuellen Position an die Visualisierungshardware /Tablet) einer vertieften Analyse unterzogen und Maßnahmen für kurzfristig umsetzbare Systemverbesserungen abgeleitet. Ausgehend davon wurden für die Entwicklungsarbeiten vier zentrale Zielrichtungen definiert:

1. Reduzierung des Energieverbrauchs der Funkkommunikation mit der Visualisierungshardware durch den Umstieg von Bluetooth auf Bluetooth LE.
2. Reduzierung des Energieverbrauchs des Gesamtsystems mit Hilfe eines intelligenten Betriebskonzepts, bei dem die einzelnen Systemkomponenten überwiegend im Standby-Modus betrieben werden und nur bei Bedarf und teilweise nur für wenige Millisekunden zugeschaltete werden.
3. Verwendung eines Energie-Harvesters mit verbesserter Leistungsfähigkeit.
4. Absenkung der Betriebsspannung von 3.3V auf 2V.

1.3. Systemkonzept

Der im Projekt entwickelte energieautarke „Smart Shoe“ zur Positionsbestimmung von Fußgängern besteht aus drei funktionalen Blöcken (Abb. 1 a). Die Sensorische Basis des Systems (gelb) bilden ein kommerzieller 3D-MEMS-Beschleunigungssensor (LIS3DH), sowie ein kommerzieller 3D-Magnetfeldsensor (MMA331), die über einen SPI-BUS mit einem

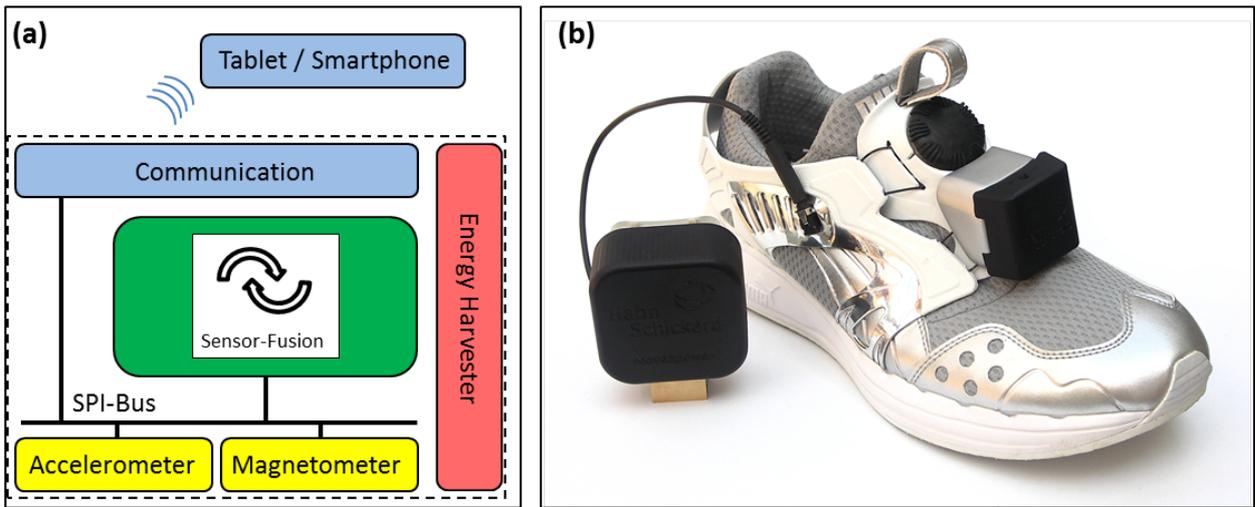


Abb. 1: (a) Systemkonzept des energieautarken “Smart Shoes” zur Positionsbestimmung von Fußgängern (gestrichelter Kasten). Das modulare Konzept basiert auf einem 3D-Beschleunigungssensor und einem 3D-Magnetfeldsensor (gelb), einem Microcontroller für die Sensordatenfusion (grün), einem Bluetooth LE Interface (blau) und einem Energie-Harvester zur Ernte von Energie aus der menschlichen Gehbewegung (rot). (b) Foto des Gesamtsystems. Die Sensoren, der Microcontroller und das Kommunikationsmodul sind am Spann montiert, der Harvester wird über ein Kabel angeschlossen und wird am Knöchel getragen.

Mikrokontroller (ARM Cortex M4F) verbunden sind, auf dem die Sensordaten auf der Basis eines Pedometer-Ansatzes zur Positionsbestimmung fusioniert werden (grün). Die berechneten Positionsdaten werden schließlich mit Hilfe eines Bluetooth LE Moduls (BLI112-A) drahtlos zur Anzeigehardware übertragen (blau). Die Energieversorgung erfolgt vollständig über einen Energie-Harvester (rot), der auf die Energieernte aus der menschlichen Gehbewegung hin optimiert wurde. Als konstruktive Plattform für den „Smart Shoe“ wurde ein handelsüblicher Sportschuh ausgewählt. Zur Befestigung der inertialen Navigationseinheit und zum Anschließen des Harvesters wurde der Schuh entsprechend modifiziert (Abb. 1 b).

1.4. Betriebszustände

Für den Energie-optimierten Systembetrieb wurden vier Betriebszustände definiert und technisch realisiert:

1. **Charging Mode:** Bevor die Bluetooth-Kommunikation mit dem Anzeigerät aufgebaut wird und der Nutzer die Möglichkeit bekommt das System zu starten, muss zunächst sichergestellt werden, dass auch bei kurzzeitiger Unterbrechung der Energieversorgung durch den Harvester ein sicherer Systembetrieb erfolgt. Die vom Harvester gelieferte Energie wird dem System deshalb nicht unmittelbar zur Verfügung gestellt, sondern zunächst in einer Puffer-Kapazität gespeichert. Im *Charging Mode* reduziert sich die Systemfunktionalität auf den Ladevorgang. Es erfolgt keine Funkkommunikation. Benutzereingaben sind nicht möglich.

2. **Standby Mode:** Da das System im Normalfall nicht dauerhaft benötigt wird und nur phasenweise zum Einsatz kommt, z.B. bei Nicht-Verfügbarkeit von GPS, kann das System in der Regel zunächst im Standby-Modus betrieben werden und vom Benutzer erst bei Bedarf in den *Operating Mode* geschaltet werden. Während des Standby-Betriebs wird der Puffer-Kondensator weiter geladen. Im Unterschied zum *Charging Mode* wird die Bluetooth-Verbindung zur Anzeigehardware aufrechterhalten. Benutzereingaben sind damit möglich.
3. **Operating Mode:** Das System detektiert die Position des Nutzers und sendet die aktuellen Koordinaten zur Anzeigehardware. Die hierfür erforderliche Energie wird aus der Gehbewegung gewonnen. Während des Gehens überschreitet die geerntete Energie die für den Betrieb erforderliche Energie. Die Höhe des Überschusses hängt dabei im Wesentlichen vom Körpergewicht des Nutzers und der Gehgeschwindigkeit ab. Das System kann so nachhaltig autark betrieben werden. Die überschüssige Energie wird im Puffer-Kondensator zwischengespeichert. Unterbricht der Nutzer seine Bewegung geht das System zunächst davon aus, dass die Bewegung in Kürze fortgesetzt wird. Es versucht fortlaufend weitere Schritte des Nutzers zu erkennen. Das System benötigt hierfür weiterhin Energie, wobei der Harvester ohne Bewegung des Nutzers keine weitere Energie ernten kann. Die benötigte Energie wird aus dem Puffer-Kondensator bezogen. Sobald der Ladezustand des Pufferkondensators unter einen kritischen Wert fällt, schaltet das System in den *Charging Mode*.

Der Energiebedarf der einzelnen Systemkomponenten, die vom Harvester bereitgestellte Energie und der Ladezustand der Pufferkapazität sind in Abb. 2 für ein typisches Betriebsszenario exemplarisch dargestellt.

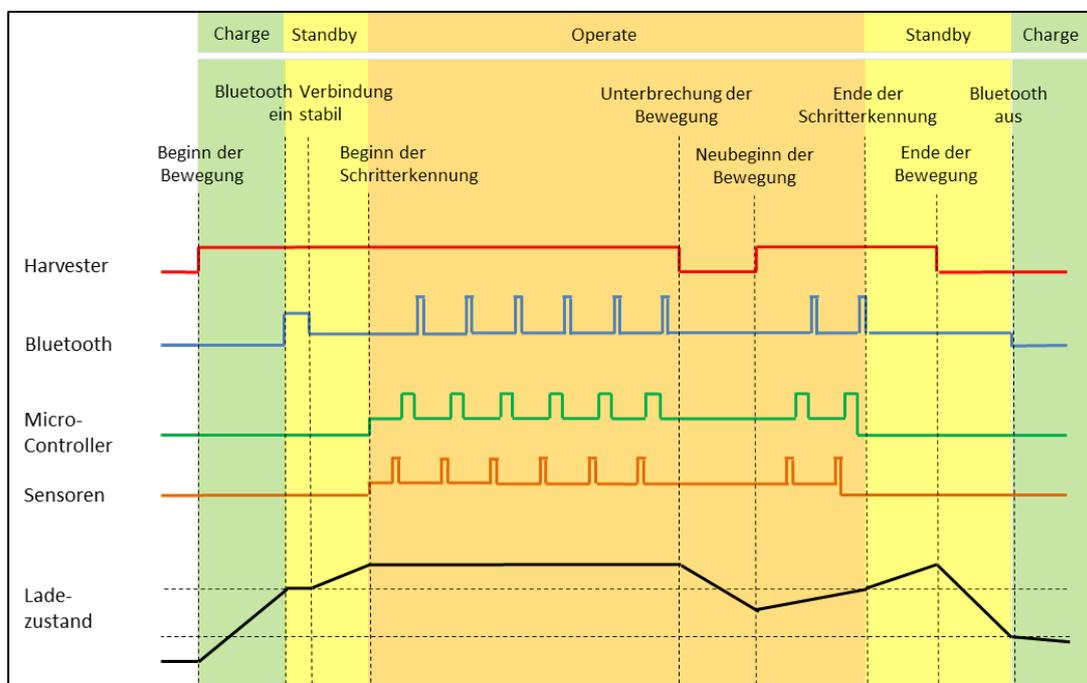


Abb. 2: Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Energieverbrauchs der Systemkomponenten (Bluetooth, Microcontroller, Sensoren), der vom Harvester bereitgestellten Energie und des Ladezustands der Puffer-Kapazität während eines typischen Betriebsszenarios in den verschiedenen Betriebsmodi.

Sobald die Testperson beginnt sich zu bewegen beginnt der Harvester Energie zu liefern, die zunächst im *Charging Mode* in der Pufferkapazität zwischengespeichert wird. Der Ladezustand der Pufferkapazität nimmt zu. Sobald der Ladezustand einen oberen Schwellwert erreicht, wird das Bluetooth LE Modul eingeschaltet um eine stabile Funkverbindung mit dem Anzeigegerät aufzubauen. Die Energieaufnahme des Bluetooth-Moduls steigt dabei an und fällt wieder ab, sobald eine stabile Verbindung besteht. Der Puffer-Kondensator wird weiter geladen. Auf Befehl des Nutzers wird schließlich die Lokalisation gestartet. Der Beschleunigungssensor misst die Beschleunigung und ein auf dem Microcontroller laufender Algorithmus detektiert aus den gemessenen Beschleunigungswerten die Schritte des Nutzers. Dabei benötigt sowohl der Beschleunigungssensor, als auch der Microcontroller Energie. Sobald ein Schritt erkannt wurde, wird zusätzlich zur Beschleunigung auch das Erdmagnetfeld gemessen. Die für die Sensorik benötigte Energie (gelbe Kurve) steigt an, da nun auch der Magnetfeldsensor betrieben werden muss. Ausgehend von den Sensormessdaten wird ein weiterer Algorithmus gestartet, der die Schrittlänge schätzt und auf Basis der Magnetfelddaten die Bewegungsrichtung bestimmt. Die Stromaufnahme des Microcontrollers steigt kurzfristig an. Nach Abschluss der Berechnungen wird die neue Position an das Bluetooth-Modul übertragen und von dort zum Anzeigegerät weitergeschickt. Die Energieaufnahme des Bluetooth-Moduls steigt deshalb etwas zeitversetzt zum Microcontroller ebenfalls kurzfristig an.

Bei Unterbrechung der Bewegung liefert der Harvester keine weitere Energie. Die Schritterkennung wird jedoch zunächst fortgesetzt. Allerdings werden bis zur Wiederaufnahme der Bewegung keine Schritte detektiert, da keine Schritte gemacht werden. Entsprechend werden keine Magnetfelddaten gelesen, der Mikrocontroller wird zur Schätzung der Schrittlänge und der Bewegungsrichtung nicht benötigt und es müssen keine neuen Positionsdaten übertragen werden. Der Energiebedarf des Bluetooth-Moduls, des Microcontrollers und der Sensorik nimmt deshalb bis zur Wiederaufnahme der Bewegung ab.

Wird die Bewegung für längere Zeit unterbrochen, ohne die Positionserkennung aktiv auszuschalten, fällt der Ladezustand der Puffer-Kapazität immer weiter ab. Bei Unterschreiten eines unteren Schwellwerts wird der Nutzer informiert und die Bluetooth-Kommunikation mit der Visualisierungshardware automatisch unterbrochen. Das System wird ab diesem Moment im *Charging Mode* betrieben.

1.5. Energiebilanz

Die Energiebilanz des Gesamtsystems konnte während des Verlängerungszeitraums des Projekts deutlich verbessert werden, so dass jetzt ein sicherer, autarker Systembetrieb gewährleistet ist. Die Energieaufnahme des Systems im *Operating-Mode* wurde von 10 mW auf 3 mW reduziert. Die vom Harvester gelieferte Energie wurde von 2 mW auf etwa 4 mW erhöht, wobei der genaue Wert der gelieferten Energie vom Körpergewicht des Nutzers und der Gehgeschwindigkeit abhängt.

Abbildung 3 zeigt eine Übersicht über verschiedene Harvesting-Konzepte die für verschiedene Phasen der menschlichen Gehbewegung (a) optimiert wurden. Der Entwicklungsfokus im Projekt 9D-Sense lag dabei auf linear schwingenden Harvester-Konzepten zur Nutzung der Erschütterung beim Auftreten (b) und Konzepten auf der Grundlage magnetischer Schalter zur Ausnutzung des Gewichtwechsels von einem Bein zum anderen (c). Entsprechende Demonstratoren wurden bereits

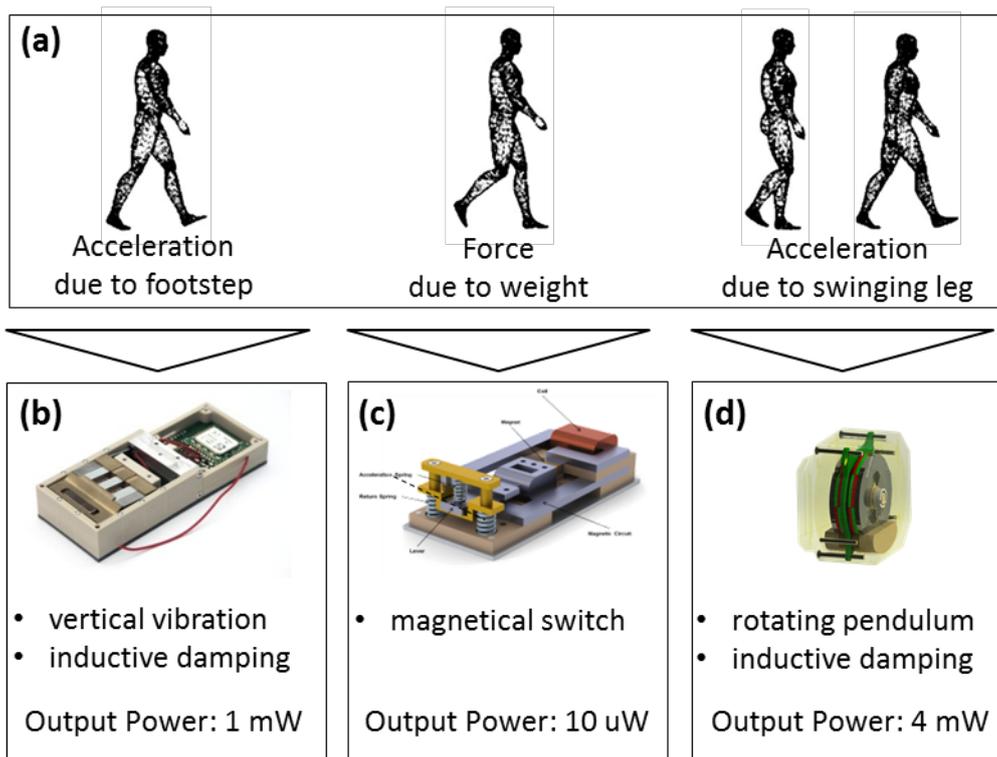


Fig 3: (a) Visualisierung der Phasen des menschlichen Gangs (b) Harvester zur Nutzung des mechanischen Schocks beim Auftreten. (c) Harvester zur Nutzung des Gewichtswechsels von einem Bein auf das andere. (d) Harvester zur Nutzung der Schwungbewegung des Beins während des Gehens.

Ende 2014 im Abschlussbericht für das Gesamtprojekt dargestellt. Zur Nutzung der Bewegungsenergie des Beines in der Schwungphase wurde bei Hahn Schickard im Rahmen eines weiteren Projekts (Move2Power, KF2146332LT4) ein alternativer Lösungsansatz verfolgt, der anstelle einer linearen Schwingung auf einem rotatorischen Ansatz aufbaut (d). Das Projekt konnte aufgrund der bestehenden Arbeiten und Ergebnisse zu den linear schwingenden Harvester-Konzepten im Projekt 9D-Sense akquiriert werden. Alle Projekte wurden so aufeinander abgestimmt, dass der Betrieb des „Smart-Shoes“ auch mit dem Harvester (d) von Anfang an sichergestellt war.

Die oben genannten Zahlenwerte zur Energiebilanz beziehen sich auf das während des Verlängerungszeitraums optimierte Lokalisierungs-System und dessen Betrieb mit dem rotatorischen Harvester aus (d).

1.6. Systemperformance

Abb. 4 zeigt exemplarisch den mit dem neu entwickelten System gemessenen Laufweg einer Testperson. Bei der Berechnung der Trajektorie wurden – im Unterschied zu kommerziell verfügbaren GPS-Navigationssystemen – keinerlei Karteninformationen verrechnet. Der dargestellte Laufweg basiert ausschließlich auf der lokalen Messung von Beschleunigungs- und Magnetfelddaten. Das Konzept funktioniert damit auch für Laufwege abseits vorgegebener Straßen und Wege.



Abb. 4: Gemessene Trajektorie aus einer vollständig Energie-autarken Testmessung. Bei weiteren Messungen wurden je nach Testperson und Umgebungstemperatur Schwankungen der Lokalisierungsgenauigkeit um einige Meter pro 100 Meter Laufweg beobachtet. Die Reduzierung der Sensitivität gegenüber den genannten Einflüssen stellt jedoch kein grundsätzliches Problem dar und kann durch eine verbesserte Temperatur-Kalibrierung und algorithmische Anpassungen weiter minimiert werden.

Im Vergleich zum im Abschlussbericht des Gesamtprojekts diskutierten und deutlich Energiehungrigeren ZUPT/ZARU-Algorithmus, der zusätzlich die Daten eines MEMS-Gyroskops verwendet, zeigt Abb. 4 eine leichte Verschlechterung der Lokalisierungsgenauigkeit. Insgesamt kann die Lokalisierungsperformance jedoch weiterhin als gut bezeichnet werden.

Unter anderem durch den Verzicht auf Gyroskopdaten und komplexe Fusionsalgorithmen konnte andererseits eine deutliche Reduzierung der Energieaufnahme des Systems erreicht werden, so dass eine vollständig autarke Energieversorgung aus der Gehbewegung des Menschen erreicht werden konnte.

Die Gesamt-Systemperformance (Lokalisierung + Leistungsversorgung) wurde somit deutlich verbessert und das Projektziel eines autarken Lokalisierungssystems für Fußgänger erreicht.

1.7. Zusammenfassung und Ausblick

Während des Verlängerungszeitraums konnte eine deutliche Verbesserung der Systemperformance erreicht werden. Der „Smart Shoe“ für die Fußgängerlokalisierung kann nun vollständig autark durch Energie-Harvesting aus der Gehbewegung betrieben werden.

Kritisch anzumerken sind an dieser Stelle drei Aspekte, die im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten adressiert werden sollten:

1. Die Schätzung der Bewegungsrichtung allein aufgrund der Magnetfeldmessung ist stark temperaturabhängig. Als schnell umsetzbare Lösung wurde eine Temperatur-Kalibrierung des Magnetfeldsensors vorgenommen. Aufgrund magnetischer Störfelder im Labor konnte die Kalibrierung nur im Freien umgesetzt werden. Die erforderlichen Messungen bei verschiedenen Temperaturen konnten nur unter erschwerten Bedingungen und in Abhängigkeit der natürlichen tageszeitlichen Temperaturschwankungen durchgeführt werden. Die Kalibrierung ist deshalb nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich gültig und basiert auf nur vier verschiedenen Temperaturwerten. Langfristig wünschenswert wäre hier der Einsatz von Magnetfeldsensoren mit verbesserter Temperaturstabilität.
2. Der Algorithmus basiert derzeit auf der Annahme, dass die Orientierung des Fußes beim Gehen mit der Gehrichtung übereinstimmt. Die Messung der Laufrichtung ist insofern noch vom individuellen Gang der Testperson abhängig, da verschiedene Personen den Fuß beim Gehen verschieden stark gegenüber der Gehrichtung nach außen (und seltener nach innen) verdrehen. Ein vergleichbarer Effekt besteht beim Übergang von ebenem zu hügeligem Terrain, da der Fuß beim „Bergauflaufen“ tendenziell etwas mehr nach außen gedreht wird als beim Gehen in der Ebene.
3. Die Messung der Gehrichtung basiert auf der Messung der Richtung des Erdmagnetfelds und einem einfachen Fusionsalgorithmus, da beim Einsatz eines kommerziellen MEMS-Gyroskops und komplexerer Algorithmen das Entwicklungsziel der Autarkie nicht erreichbar gewesen wäre. Die Lokalisierungsgenauigkeit – insbesondere im Inneren von Gebäuden - ist im Vergleich zu Gyroskop-basierten Systemen mit komplexer Fusions-Algorithmik reduziert. Zusammen mit der im Projekt erzielten deutlich verbesserten Energieaufnahme des MEMS-Gyroskops (Arbeitspaket 3) und weiter zu erwartenden kontinuierlichen Verbesserungen im Bereich Energie-Harvesting rückt jedoch auch der Einsatz von MEMS-Gyroskopen und komplexeren Fusionsalgorithmen - und damit die Entwicklung vollständig autarker kombinierter Indoor-Outdoor Systeme - schon in naher Zukunft in greifbare Nähe.

Die Entwicklungsarbeiten zur Fußgängerlokalisierung waren – insbesondere auch während des Verlängerungszeitraumes - sehr erfolgreich. Das System ist voll funktionsfähig, zeigt eine gute Lokalisierungs-Performance und kann durch Energy-Harvesting vollständig autark aus der menschlichen Gehbewegung mit Energie versorgt werden.

Ausgehend vom Projektergebnis bestehen verschiedene Ansatzpunkte für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten – insbesondere hinsichtlich der energieeffizienten Integration eines Gyroskops zur Verbesserung der Stabilität und Alltagstauglichkeit und hinsichtlich der Nutzung der erreichten Systemautarkie für weitere Anwendungsgebiete wie der medizinischen Diagnostik und Rehabilitation.

2. Ausleseelektronik für MEMS-Beschleunigungssensoren

2.1. Projektziel

Ziel der Projektverlängerung im Projekt 9D-Sense war die Entwicklung, Simulation und Verifikation einer zeitkontinuierlichen closed-loop Ausleseelektronik für MEMS-Beschleunigungssensoren. Das betrachtete Systemkonzept basiert auf dem Delta-Sigma Ansatz zur Analog-Digital Wandlung.

Zeitdiskrete Schaltungskonzepte sind empfindlich gegenüber Rauschfaltung, erfordern hohe Bandbreiten der verwendeten Systemkomponenten und führen so zu einer vergleichsweise hohen Leistungsaufnahme. Bei closed-loop Konfigurationen wird die schwingende Masse des MEMS-Sensors in der Nulllage elektronisch stabilisiert, wodurch sich die Linearität, die Bandbreite und der dynamische Bereich verbessern während sich die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen reduziert. Desweiteren wird durch die Implementierung des Sensors in einem elektro-mechanischen Delta-Sigma Modulator eine inhärente Analog-Digital-Wandlung erreicht.

Mit fortschreitender Miniaturisierung reduziert sich nicht nur die Größe elektronischer Schaltungen, sondern auch die Größe der mikromechanischen Systemkomponenten. Auf der MEMS-Seite erfordert dies eine Minimierung der Anzahl elektronischer Kontakte, was wiederum auf der Seite der Auslese- und Regelungs-Elektronik dazu führt, dass die Messung der Position der Detektionsmasse des Sensors und deren Stabilisierung über entsprechende Rückstellkräfte über die gleichen Elektroden erfolgen müssen.

2.2. Vorgehensweise

Der Entwicklungsprozess wurde gemäß Tab. 1 in vier Phasen unterteilt:

Date	Design Step
01 / 2015	Literatur-Recherche
01 / 2015	Systemdesign
02 / 2015	Modellierung des Sensors in Matlab Simulink
02-03 / 2015	Systemdesign und -simulation in Matlab Simulink
03-04 / 2015	Systemdesign und -simulation in Cadence / VerilogA

Tab. 1: Vorgehensweise und zeitlicher Entwicklungsprozess

Ausgehend von einer Literaturrecherche zu zeitdiskreten open-loop Konzepten wurden in einem ersten Schritt Ideen für ein zeitkontinuierliches Auslesekonzept gesammelt. Darauf aufbauend wurde ein Systemdesign erstellt und mit Matlab-Simulink und CADENCE simuliert. Für jede elektronische Komponente wurde ein Verilog A Modell erstellt.

2.3. Sensor-Modell (Simulink)

Als Basis für das Systemdesign wurde zunächst ein Modell des Beschleunigungssensors entwickelt (Abb. 5a). Durch Anlegen der Spannung V_{com} an die Mittelelektrode wird die Detektionsmasse polarisiert. Die beiden anderen Elektroden haben eine Doppelfunktion. Zum einen wird hier das voll-differenzielle Ausgangssignal für die Position der Detektionsmasse bereitgestellt. Zum anderen dienen die Elektroden dem Anlegen der externen Rückstellkraft F_{fb} als Teil der Regelschleife. Alle Elektroden sowie das physikalische Verhalten der Detektionsmasse wurden im Rahmen des Simulink Modells abgebildet (Abb. 5b).

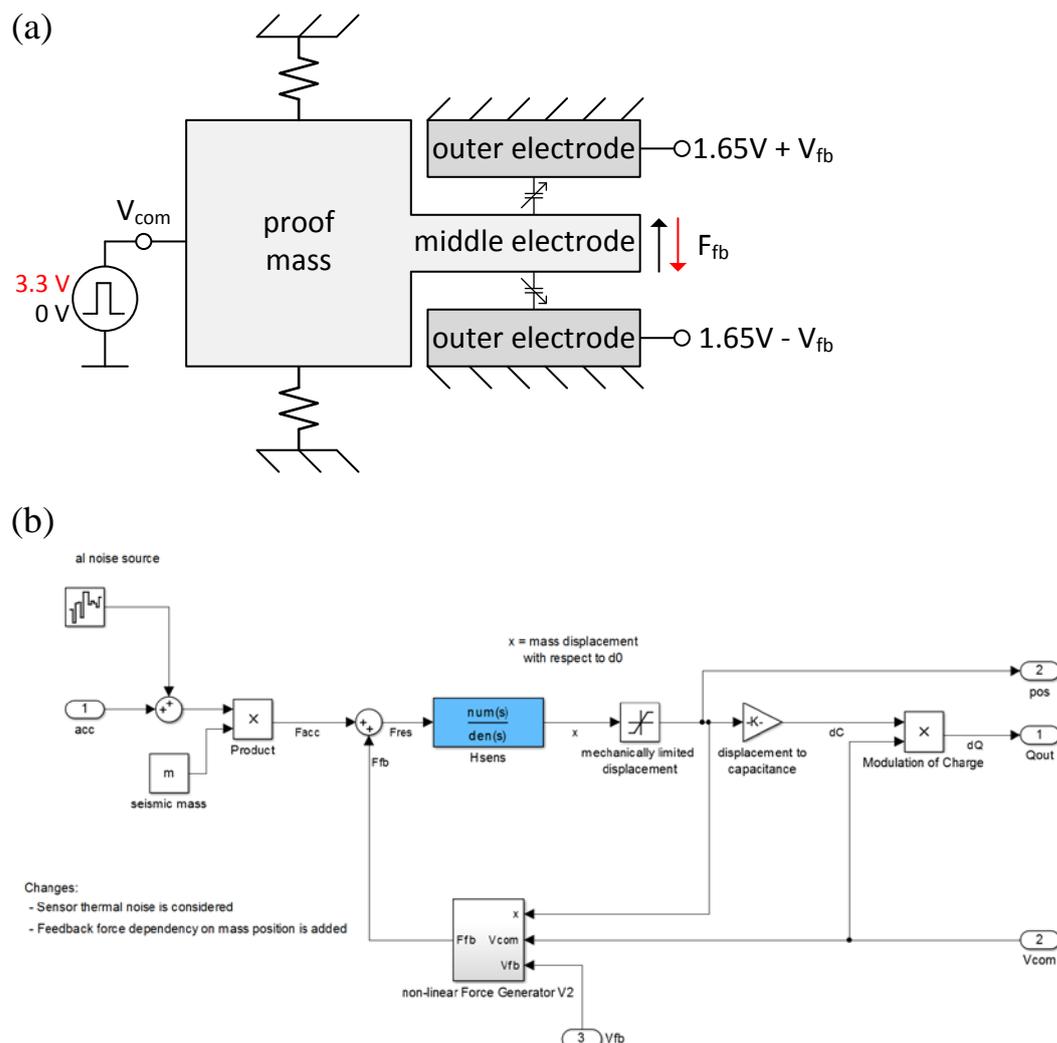


Abb. 5: (a) Schemazeichnung des Beschleunigungssensors bestehend aus Detektionsmasse und kapazitivem Interface für die Messung Auslenkung der Detektionsmasse. (b) Physikalisches Simulink-Modell des Beschleunigungssensors.

Das thermische Sensorrauschen wurde durch eine äquivalente Beschleunigung modelliert und im Rahmen des Modells zur Beschleunigung addiert. Die Nichtlinearität der Federkräfte wurde ebenfalls im Modell berücksichtigt (Abb. 6).

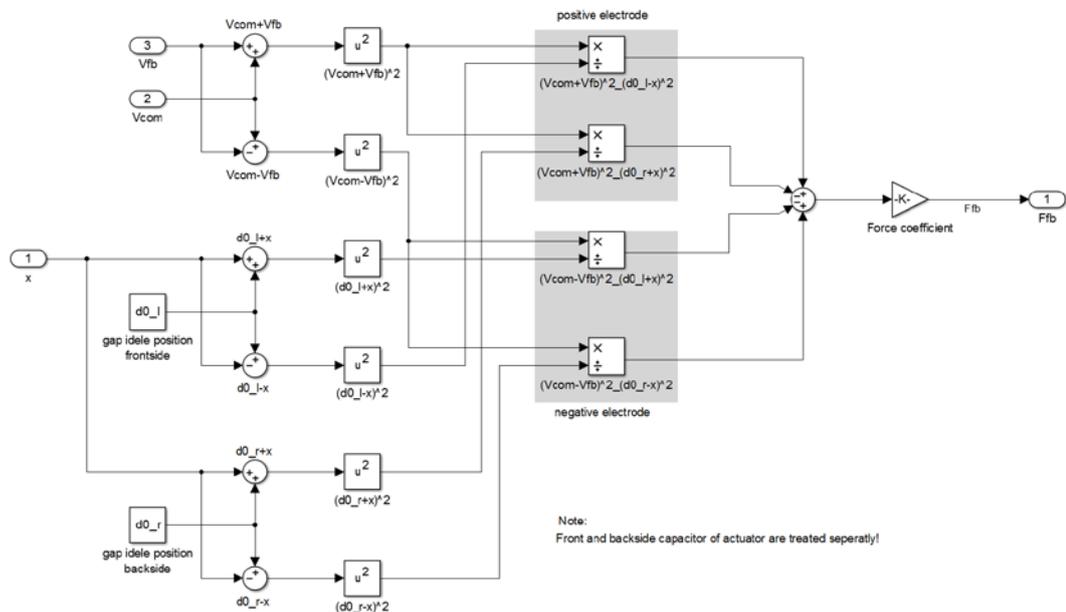


Abb. 6: Blockdiagramm zur Konvertierung der angelegten Feedback-Spannung in eine entsprechende Feedback-Kraft als Funktion der Auslenkung der Detektionsmasse.

2.4. Systemdesign

Das Auslese-Interface wurde in Simulink gemäß Abb. 7 modelliert. Kernbestandteil ist ein elektro-mechanischer Delta-Sigma-Modulator zur Stabilisierung der Detektionsmasse in der Nulllage. Zur Messung der Kapazitätsänderung aufgrund der Bewegung der Detektionsmasse wird ein Ladungsintegrierer verwendet. Die erzielte räumliche Auflösung liegt bei einem Nanometer.

Aufgrund der Hochpass-Charakteristik des Ladungsintegrierers können nur Ladungsänderungen detektiert werden. Um auch Beschleunigungssignale niedriger Frequenz messen zu können, wird das Messsignal mit einer Trägerfrequenz f_m moduliert. Die Trägerfrequenz liegt dabei oberhalb der Grenzfrequenz des Ladungsintegrierers und ist als Rechteckspannung realisiert.

Hinter dem Ladungsintegrierer wird das Positionssignal demoduliert und an den Tiefpass-Schleifenfilter des Delta-Sigma-Modulators übergeben. Ein Ein-Bit-Quantisierer diskretisiert das Ausgangssignal und liefert ein digital überabgetastetes Ausgangssignal (Bitstream). Der Bitstream wird innerhalb der Feedback-Generierungsstufe erzeugt. An die Außenelektroden des Beschleunigungssensors wird dabei eine Spannung angelegt, die zu Rückstellkräften auf die Detektionsmasse führt. Zur Unterdrückung der Richtungsabhängigkeit der Rückstellkräfte von V_{com} erfolgt beim Erzeugen der Feedback-Spannungen eine zusätzliche Modulation, die die korrekte Polarisierung sicherstellt.

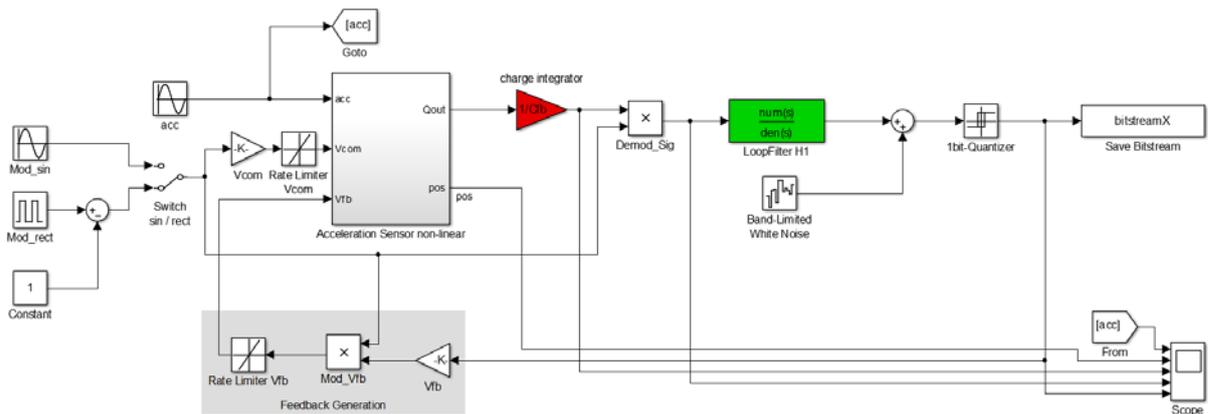


Abb. 7: Konzept des elektro-mechanischen closed-loop Delta-Sigma-Modulators. Modellierung in Matlab-Simulink

Der Tiefpass-Filter innerhalb des elektro-mechanischen Delta-Sigma-Modulators wurde mit Hilfe der Matlab-DISCO-Toolbox realisiert, die zeitdiskrete Simulationen zeitkontinuierlicher Sigma-Delta-Modulatoren unterstützt. Die Abtastfrequenz f_s des Modulators wurde so angepasst, dass die Frequenz der Feedback-Pulse oberhalb der Eckfrequenz des mechanischen Systems liegt, das wie ein Tiefpassfilter wirkt. Ohne diese Maßnahme würde die Detektionsmasse den Feedback-Pulsen direkt folgen ohne in der Nulllage stabilisiert zu werden.

Anstiegs- und Abfallzeiten der Feedback-Spannung V_{fb} sowie die modulierte Spannung V_{com} haben einen großen Einfluss auf das Rauschniveau der Schaltung und führen zu Nichtlinearitäten bei den Rückstellkräften. Die Anhängigkeit wird durch ein „Return-to-Zero-Feedback“ aufgelöst.

Abb. 8 a). zeigt die spektrale Leistungsdichte (PSD) des Bitstreams bei 25Hz und einer Beschleunigung von 0.1g. Die PSD zeigt ohne Beschleuniger-Signal ein Rauschen von $49 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ über eine Bandbreite von 50 Hz, welches sich bei Ausdehnung der Bandbreite auf 1 kHz auf $96 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ vergrößert. Mit Beschleunigersignal erhöht sich das Grundrauschen bei einer Bandbreite von 50Hz auf $486 \mu\text{g}$ (b).

Die Nichtlinearität nach einer Zweipunkt-Kalibrierung ist in Abb. 8c) dargestellt. Bei Annäherung an die durch das Design vorgegebene Maximalbeschleunigung (FS) von 5g steigt die Nichtlinearität an und zeigt ein Maximum von 0.6% FS aus. Im Messbereich von $\pm 4\text{g}$ liegt die Nichtlinearität unterhalb von 0.1% FS.

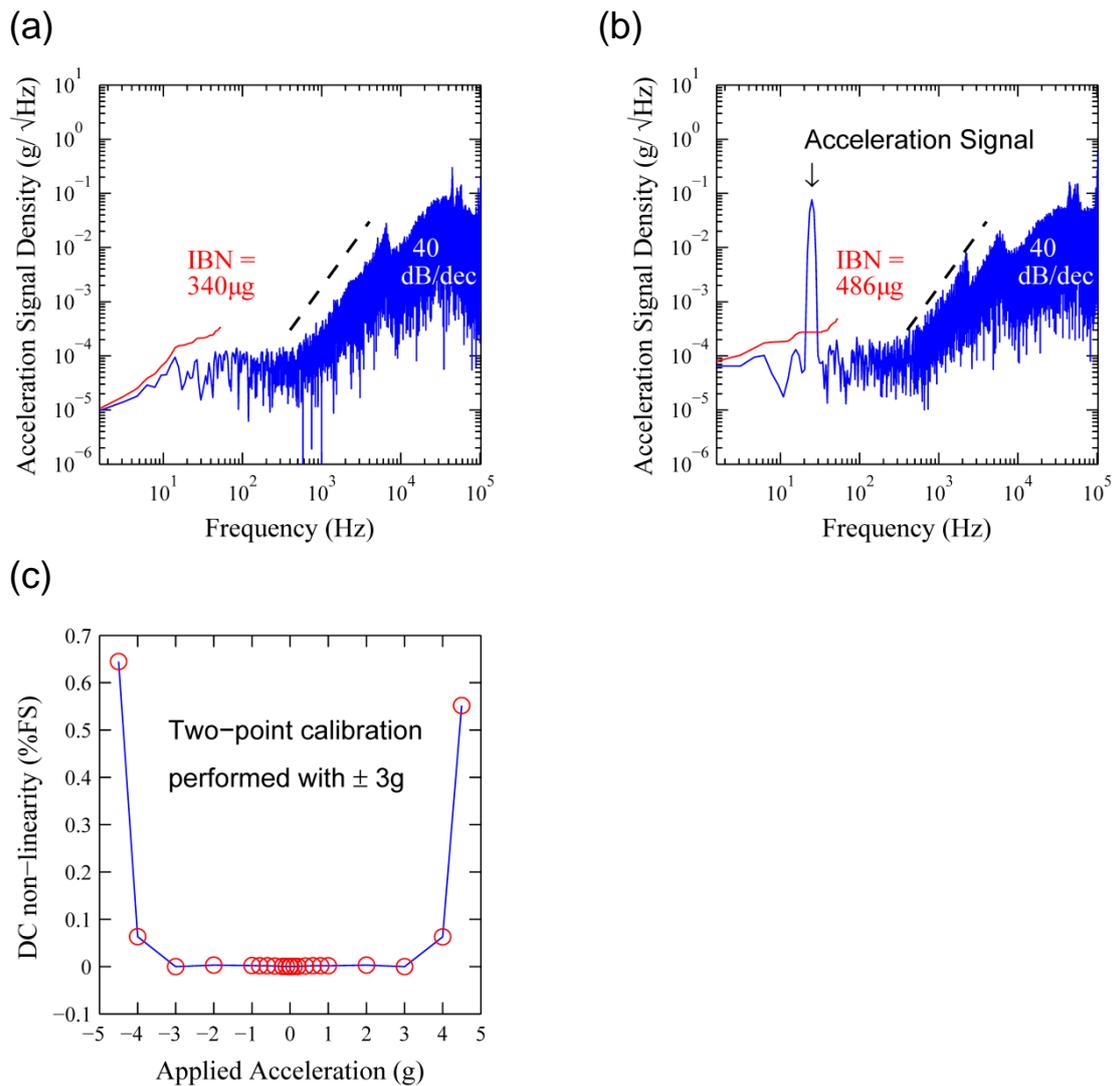


Abb. 8: (a+b) Simulationsergebnisse für die in Matlab-Simulink modellierte closed-loop Ausleseschaltung. (a) Spektrale Leistungsdichte des Bitstreams ohne Beschleunigersignal. (b) Spektrale Leistungsdichte des Bitstreams mit Beschleunigersignal (100 mg bei 25 Hz). (c) Nicht-Linearität der gemessenen Beschleunigung nach Zwei-Punkt-Kalibrierung. Die Nicht-Linearität nimmt für Beschleunigungen am Rand des Messbereichs des Delta-Sigma-Modulators zu.

2.5. Schaltungssimulation (CADENCE)

Ausgehend vom entwickelten Matlab-Simulink Modell wurde das System in CADENCE implementiert, Basis hierfür ist die Umsetzung aller Systemkomponenten als VerilogA-Modell. Die Vorgehensweise erlaubt die simulationsgestützte Evaluation des Systemdesigns und unterstützt die Festlegung der Bauteilspezifikationen zur Implementierung auf Transistorebene. Das Blockschaltbild ist in Abb. 9 dargestellt.

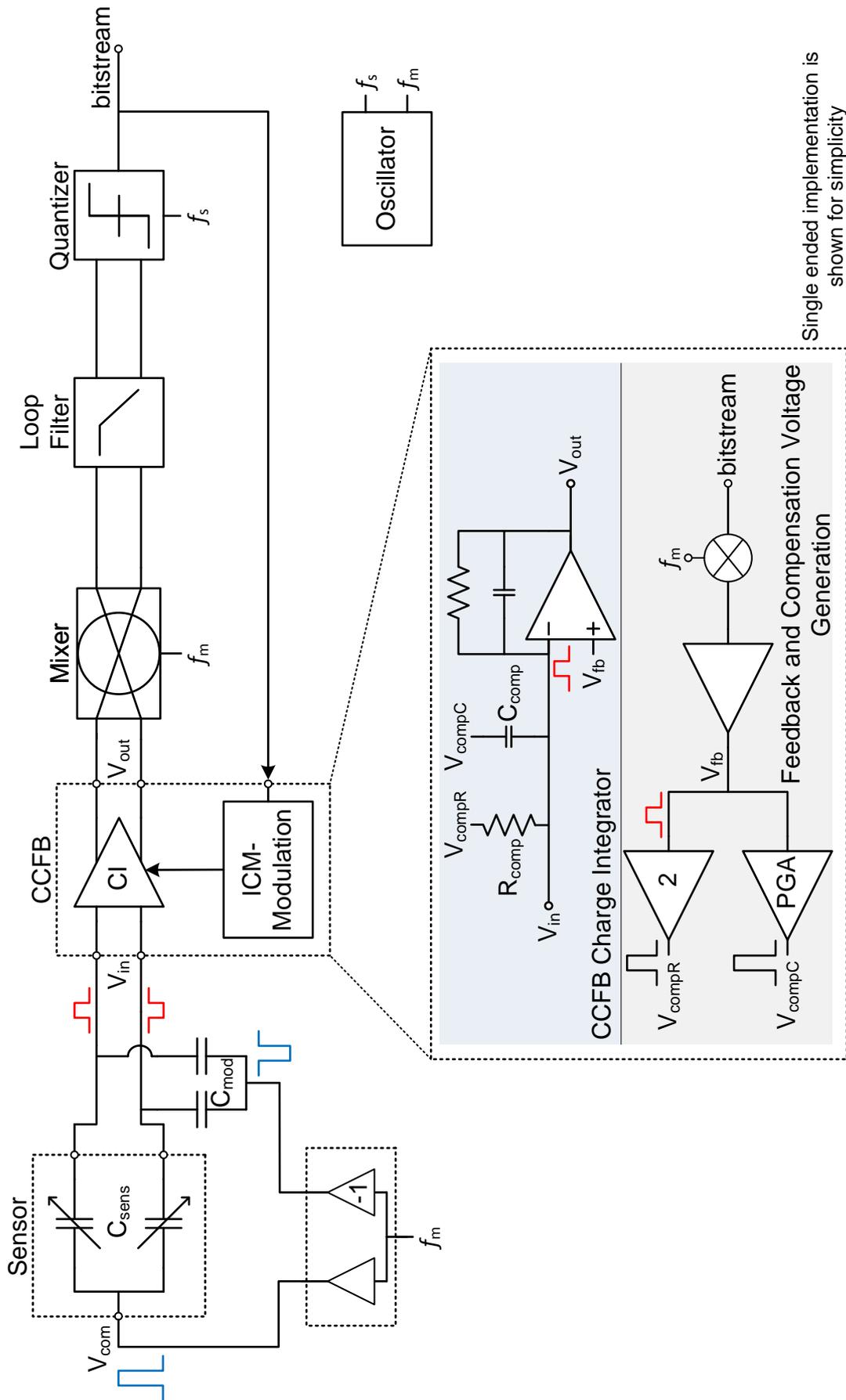


Abb. 9: CADENCE-Implementierung des elektrischen Schaltkreises unter Verwendung von VerilogA.

Abb. 10 a) zeigt die auf CADENCE-Basis simulierte spektrale Leistungsdichte (PSD) des Bitstreams bei einer Frequenz von 25Hz, einer Beschleunigung von 0.1g, und ohne thermisches Rauschen. Das Rauschen im Signalbereich liegt bei $13 \mu\text{g}$ bei einer Bandbreite von 50Hz. Abb. 10 b) zeigt die PSD für die gleichen Simulationsparameter jedoch unter Einbeziehung des thermischen Rauschens von Sensor und Elektronik. Das durchschnittliche Rauschen in der Signalbandbreite liegt bei $72 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Aufgrund des Tiefpass-Schleifenfilters zweiter Ordnung ergibt sich eine Rauschumformung von 40 dB/dec. Bei Vergrößerung der Beschleunigung an die Grenze des Messbereichs (5g) beobachtet man höhere Harmonische des Eingangssignals aufgrund zu hoher Auslenkung der Detektionsmasse, welche eine Nichtlinearität in der Rückstellkraft verursacht (Abb. 10 c).

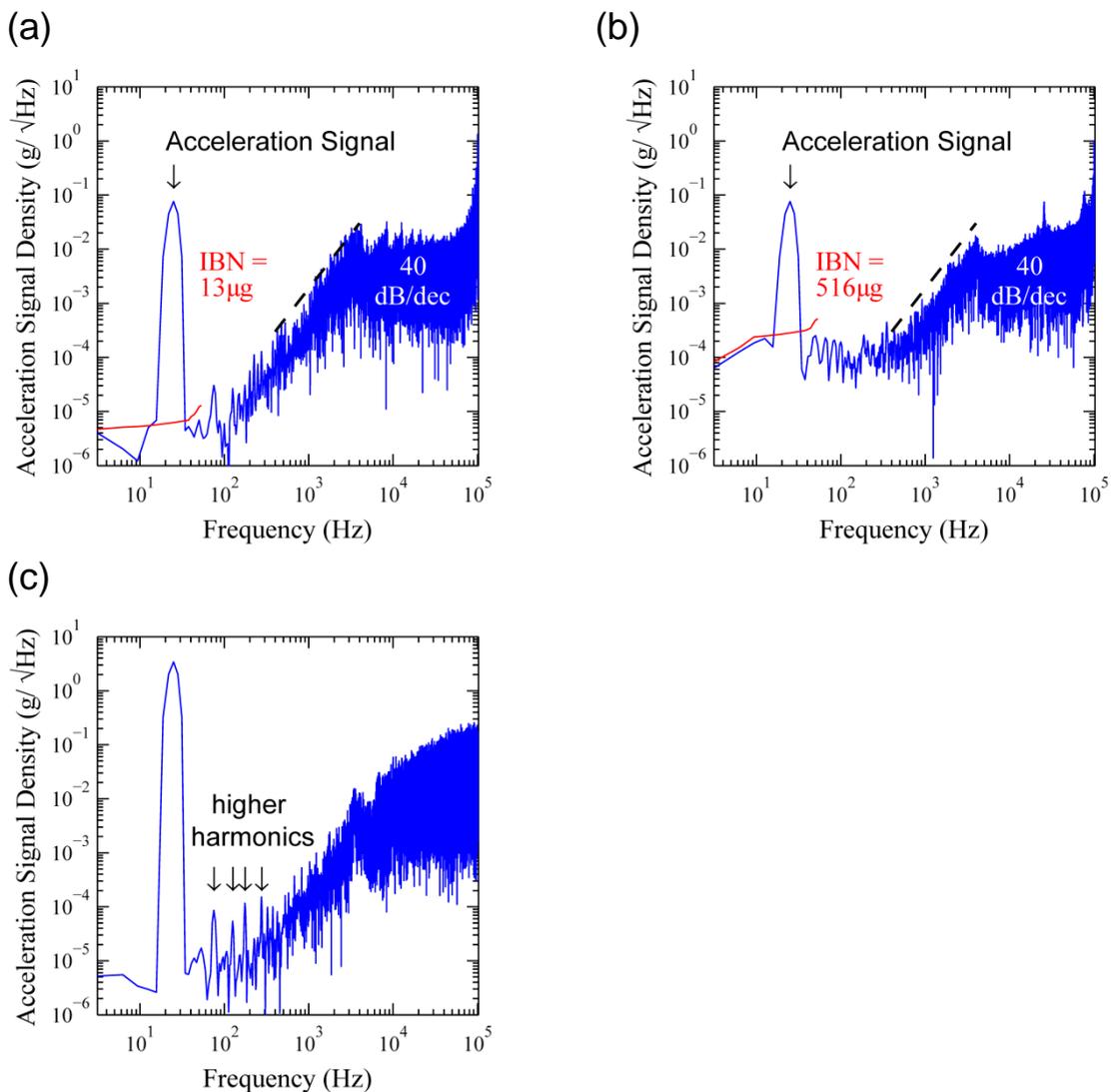


Abb. 10: Simulationsergebnisse für die in CADENCE modellierte closed-loop Ausleseschaltung. (a) Spektrale Leistungsdichte des Bitstreams mit Beschleunigersignal (100 mg bei 25 Hz) ohne thermisches Rauschen. (b) Spektrale Leistungsdichte des Bitstreams mit Beschleunigersignal (100 mg bei 25 Hz) mit thermischem Rauschen. In (c) wurde die Beschleunigung auf 4.5 g erhöht (Maximale Aussteuergrenze: 5 g).

2.6. Systemperformance / Wettbewerbsvergleich

Tab. 2. zeigt einen Vergleich der Simulationsergebnisse für die neu entwickelte closed-loop Steuerelektronik mit am Markt verfügbaren Produkten der Branchenführer Bosch, InvenSense und Freescale.

Das neue zeitkontinuierliche elektro-mechanische Delta-Sigma Auslesekonzept zeigt ein sehr gutes Rauschverhalten und einen Dynamikbereich, der mindestens 13db über den Werten der am Markt verfügbaren Produkte liegt.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde der Messbereich (full scale) auf 5g festgesetzt. Der Messbereich kann jedoch durch eine Vergrößerung der Rückstellkräfte problemlos erweitert werden. Ein Umschalten zwischen verschiedenen Messbereichen kann auf der Basis schaltbarer Feedback-Spannungsniveaus problemlos realisiert werden.

Die Signalbandbreite wurde zunächst auf 50Hz festgesetzt. Das Auslesekonzept erlaubt jedoch konzeptbedingt auch deutlich höhere Bandbreiten. Open-loop Auslesekonzepte sind durch die Resonanzfrequenz des mechanischen Sensorelements limitiert (üblicherweise sollte der Wert der Resonanzfrequenz mindestens das Dreifache des Wertes der Signalbandbreite betragen). Der closed-loop Ansatz überwindet diese Beschränkung und ermöglicht sogar Bandbreiten oberhalb der Bandbreite des mechanischen Sensorelements.

Parameter	IMTEK CT- $\Delta\Sigma$ Readout	Bosch BMA280	InvenSense MPU-6500	Freescale MMA8451Q
Bandbreite	50 Hz	8-500 Hz	5-260 Hz	1-400 Hz
Full scale	5 g	2-16 g	2-16 g	2-8 g
Grundrauschen	72 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	120 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (lowest FS)	300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (lowest FS)	126 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (lowest FS)
Dynamikbereich (50 Hz Band)	80 dB	67 dB	59 dB	67 dB
DC Nicht-Linearität	< 0.1%FS max 0.6 %FS close to FS	-	0.5 %FS	-

Tab. 2: Vergleich der Neuentwicklung mit am Markt kommerziell verfügbaren Systemen.

Zu Demonstrationszwecken wurde der elektromechanische Delta-Sigma Modulator für eine Signalbandbreite von 20kHz modifiziert (ca. 2.5 x Bandbreite des mechanischen Elements), die Abtastfrequenz und die Loop-Filter-Parameter wurden entsprechend angepasst. Die spektrale Leistungsdichte für Simulationen mit thermischem Rauschen und einer Beschleunigung von 100mg bei 10kHz ist in Abb. 11) dargestellt. Das Rauschniveau (spot noise) liegt bei 30 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei einer Signal Bandbreite von 20 kHz. Aufgrund der Tatsache, dass die Signal-Bandbreite oberhalb der Bandbreite des mechanischen Sensorelements liegt, verbessert die Rauschformung in der Nähe der mechanischen Resonanzfrequenz das Rauschniveau um 40 dB/dec. Das entwickelte Auslesekonzept ist deshalb grundsätzlich auf industrielle Anwendungen mit strengen Anforderungen an Rauschniveau und Bandbreite adaptierbar, beispielsweise für die Überwachung und die Fehlerfrüherkennung bei Maschinen.

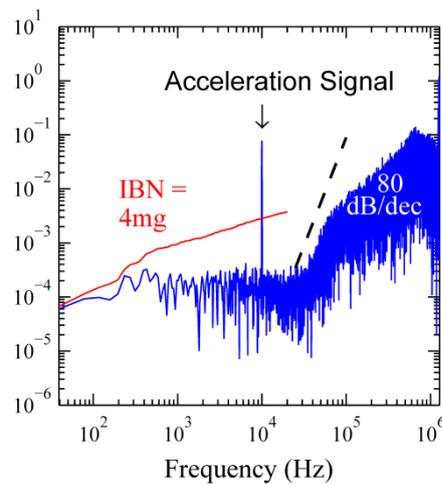


Abb. 11: Simulationsergebnisse für die in Matlab-Simulink modellierte closed-loop Ausleseschaltung. Im Vergleich zu Abb. 8 wurde die Schaltung modifiziert, um eine Bandbreite von 20 kHz zu ermöglichen. Die Bandbreite liegt damit über der Bandbreite des mechanischen Sensorelements.

2.7. Veröffentlichungen

S. Nessler, M. Marx, M. Maurer, S. Rombach, Y. Manoli, *A Continuous-Time Collocated Force-Feedback and Readout Front-End for MEM Gyroscopes*, European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Graz, Austria, 14-18 Sept. 2015.

S. Nessler, M. Marx, M. Maurer, S. Rombach, Y. Manoli, *A Continuous-Time Collocated Force-Feedback and Readout Front-End for MEM Gyroscopes*, IEEE Journal of Solid State Circuits Manuscript (ESSCIRC), Special Issue, invited, submitted.

3. Dämpfungselement mit Energy-Harvesting Funktionalität

3.1. Projektziel

Mechanische Dämpfungselemente spielen in unserem Alltag eine wichtige Rolle – von der Dämpfung selbstschließender Türen über die Dämpfung von Werkzeugmaschinen und Fahrzeugen bis hin zur Dämpfung ganzer Gebäude in erdbebengefährdeten Regionen.

Im Projekt 9D-Sense wurde das Thema Dämpfung im Zusammenhang mit dem Use-Case „Prothese“ adressiert. Ziel war es, ein Dämpfungselement zu entwickeln, das die Dämpfungsenergie beim Auftreten statt in Wärme in elektrische Energie wandelt, die für Steuerungs- und Monitoring-Aufgaben genutzt werden kann. Die technische Herausforderung besteht dabei darin, dass aus ergonomischen Gründen große Kräfte auf kurzen Strecken absorbiert werden müssen, was sich auf die Effizienz vieler Energiewandlungsmechanismen negativ auswirkt.

Aus Zeitgründen wurde der Entwicklungsfokus im Projekt zunächst auf Harvesterkonzepte für „Smart Shoes“ (autarke Fußgängerlokalisierung, s.o.) gelegt. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Dämpfungssysteme in unserem Lebensalltag und der großen wirtschaftlichen Bedeutung eines Harvesterkonzepts für Stoßdämpfer - bei Beinprothesen aber auch weit darüber hinaus – wurden die ursprünglich geplanten Entwicklungsarbeiten zu diesem Thema während des Verlängerungszeitraums nachgeholt.

Auf dem heutigen Stand der Technik wird in mechanischen Dämpfungselementen in der Regel Öl durch hydraulische Strukturen (Blenden, Ventile) gepresst. Die technologische Herausforderung besteht dabei in der effizienten Absorption der kinetischen Energie und deren Umwandlung in Wärme. In den Dämpfungselementen einer Fahrzeugdämpfung werden dabei je nach Fahrzeugart (Fahrrad, PKW, LKW) Verlustenergien bis in den zweistelligen Wattbereich umgesetzt.

3.2. Vorgehensweise

Für die Erreichung des Projektziels ist die Nutzung verschiedener physikalischer Wirkprinzipien denkbar:

1 Piezoelektrische Energiewandlung:

Eine Möglichkeit stellt die Nutzung von piezoelektrischen Materialien dar, die bei Verformung aufgrund ihres speziellen Kristallgitters eine elektrische Spannung erzeugen. Die Piezoelemente können im Dämpfer so angeordnet werden, dass der Dämpferkolben mehrere Piezo-Scheiben gleichzeitig verformt. Da ein großer piezoelektrischer Effekt hauptsächlich in Keramiken zu beobachten ist, ergeben sich aufgrund der Sprödigkeit der Keramiken und deren eingeschränkter Robustheit gegenüber externen Schocks technische Limitierungen für das Design und die Konstruktion eines Dämpfungselements mit Harvester-Funktionalität.

2. Elektromagnetische Energiewandlung:

Eine weitere Möglichkeit der Energiegewinnung im Dämpfer besteht in der Umwandlung der translatorischen in eine rotatorische Bewegung, die dann in einem klassischen elektromagnetischen Generator in elektrische Energie gewandelt wird. Die mechanische Umsetzung kann dabei entweder über eine Getriebeanordnung oder mittels Ölverschiebung durch eine Turbine realisiert werden. Aufgrund des mechanischen Konzepts ergeben sich darüber hinaus Nachteile bezüglich Platzbedarf, Effizienz der Dämpfung und Energiewandlung sowie der Lebensdauer.

3.3. Systemdesign und Wirkmechanismus

Die im Folgenden dargestellten Arbeiten basieren auf dem elektromagnetischen Wandlungsprinzip (3.2.2). Im Unterschied zum oben genannten Konzept wird jedoch auf die Wandlung der translatorischen in eine rotatorische Bewegung verzichtet, wodurch sich der mechanische Verschleiß minimieren lässt und die Dämpfung in den Bereich klassischer Öldämpfer hinein optimiert werden kann.

Idealerweise soll bei einem Dämpfer mit elektromagnetischem Energie-Harvesting die Dämpfung vollständig aufgrund der Energiewandlung im Harvester erfolgen und möglichst an die spezifischen Bedingungen des Anwendungsszenarios angepasst werden können.

Zur Abschätzung der Dämpfung wurde deshalb zunächst eine idealisierte Anordnung eines Elektromagneten im Inneren einer langgestreckten elektrischen Spule mit Querschnittsfläche A betrachtet. Bei Bewegung des Magnets mit Flussdichte B um die Strecke x entlang der Spule ändert sich der magnetische Fluss Φ im Spuleninneren wodurch zwischen den offenen Enden der Spule eine Spannung U_{ind} induziert wird (Gleichung 1).

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\left(\frac{dA}{dt} \cdot B + \frac{dB}{dt} \cdot A\right)_{|A=const.} = -A \cdot \frac{dB}{dt} = -A \cdot \frac{dB}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = k \cdot \dot{x} \quad (1)$$

Dabei wird k als Kopplungsfaktor bezeichnet, der von der Spulengeometrie abhängt und den Bezug zwischen der Geschwindigkeit des Magnets und der induzierten Spannung herstellt.

Bei miteinander verbundenen Spulenenden fließt im betrachteten System aufgrund der induzierten Spannung ein Induktionsstrom, der seinerseits ein Magnetfeld induziert welches gemäß Gleichung 2 eine Kraft F_{el} auf den Magnet ausübt, die die Bewegung des Magnets im Spuleninneren bremst (Lenz'sche Regel).

$$F_{el} = I_{ind} \cdot k = \frac{U_{ind}}{R} \cdot k = \frac{\dot{x}}{R} \cdot k^2 \quad (2)$$

Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Dämpfung vom Kopplungskoeffizient k können über das elektromagnetischen Wirkprinzip große Dämpfungen erzeugt werden

Abb. 12 a) zeigt die FEM-Simulation des Magnetfelds einer Magnetanordnung mit 10 axial gepolten Ringmagneten die jeweils gegengepolt angeordnet sind. Für die Spulen ist der Platz im Inneren der Ringmagneten vorgesehen. Spacer aus Stahl zwischen den Magneten führen das magnetische Feld und leiten es in die Spulen. Anstelle eines einzelnen Magnets kommt zur Vergrößerung der Dämpfung ein Stapel bestehend aus mehreren Magneten zum Einsatz. Die Spule erfährt beim Bewegen des Magnetstapels mehrere Feldwechsel (Nord->Süd, Süd->Nord), so dass der Wert des Kopplungskoeffizients entsprechend oszilliert (Abb. 12 b). In der Spule wird eine Wechselspannung induziert.

Die Geometrieparameter, inkl. der Spulen, sind in Tab. 3 angegeben. Sie orientieren sich an den Spezifikationen der Neodym-Eisen-Bor Hochleistungsmagnete, die für den Aufbau des ersten experimentellen Systemdemonstrators eingesetzt werden.

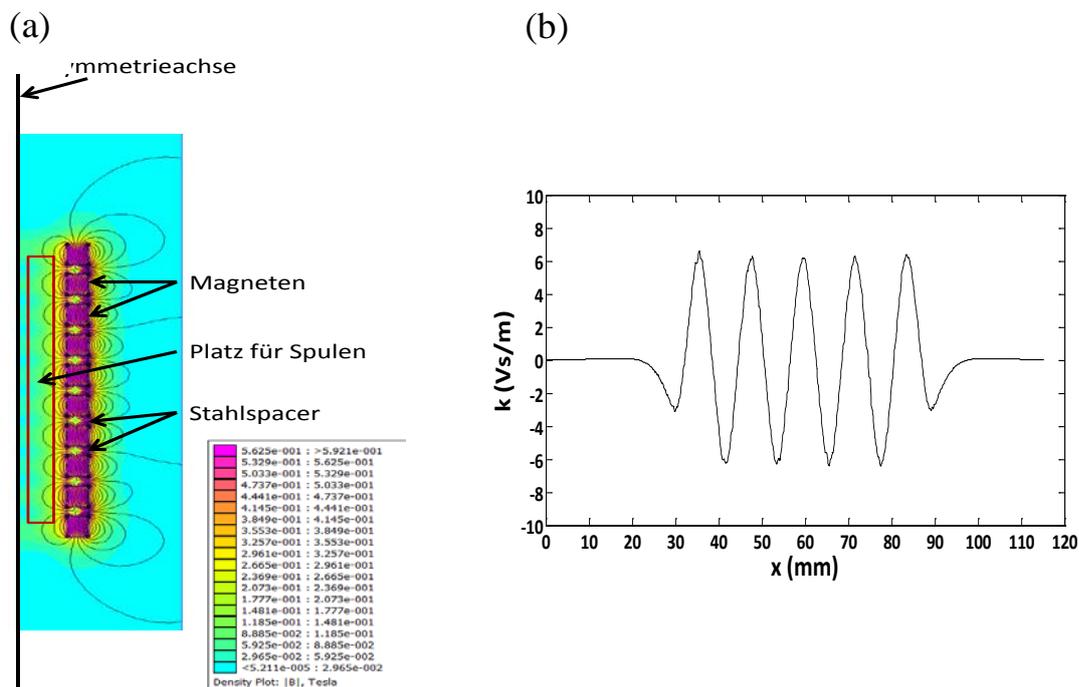


Abb. 12: (a) FEM-Simulation der Flussdichte der verwendeten Magnetanordnung. Die Spulen befinden sich im markierten Raum. (b) Kopplungskurve der Magnetanordnung bezogen auf eine Spule aus Tabelle . Die Kopplung / Dämpfung, hängt von der Position der Magneten relativ zur Spule ab.

Parameter	Wert
Magnethöhe	4 mm
Magnetdurchmesser innen	15 mm
Magnetdurchmesser außen	21.5 mm
Anzahl Magneten	10
Spacerhöhe	2 mm
Spulenhöhe	4 mm
Spulendurchmesser innen	3 mm
Spulendurchmesser außen	13 mm

Tabelle 3: Geometrieparameter der Systemkomponenten für Simulation und experimentellen Aufbau

3.4. Konstruktion und technische Umsetzung

Zur Demonstration der Wirksamkeit des oben dargestellten Konzepts wurde das System für den Einsatz in der Federgabel eines Mountainbikes adaptiert.

Zunächst wurden die kommerziellen Öldämpfer der Federgabel (Rock Shox, Abb. 13) ersetzt. Die Federgabel ist in zwei funktionelle Einheiten unterteilt. Der linke Gabelteil enthält das Federsystem – bei der vorliegenden Federgabel eine einfache Stahlfeder. Der rechte Gabelteil enthält bei allen Federgabeln den Öldämpfer, der zunächst entfernt wurde. Auf dem Dämpfer-Unterbein wurde stattdessen gemäß Abb. 13.a) eine Fassung für die Ringmagneten des Harvesters angebracht. Dieses Stück bewegt sich innerhalb des Dämpferrohrs während der Fahrt auf und ab (Im fertigen Aufbau befindet sich um die Unterbeine die Außengabel, an der das Rad und die Bremsen befestigt werden). Im Dämpferrohr werden gemäß Abb. 13 b) die Spulen samt ihrer Halterung von oben direkt an der Stelle festgeschraubt, an der gewöhnlich die Öldämpfervorrichtung sitzt. Wenn das Dämpferrohr in das Außenrohr einsinkt, sinken damit auch die Spulen kontaktlos in die Magneten ein und in ihnen wird eine elektrische Spannung induziert. Gleichzeitig wird die Bewegung gedämpft.

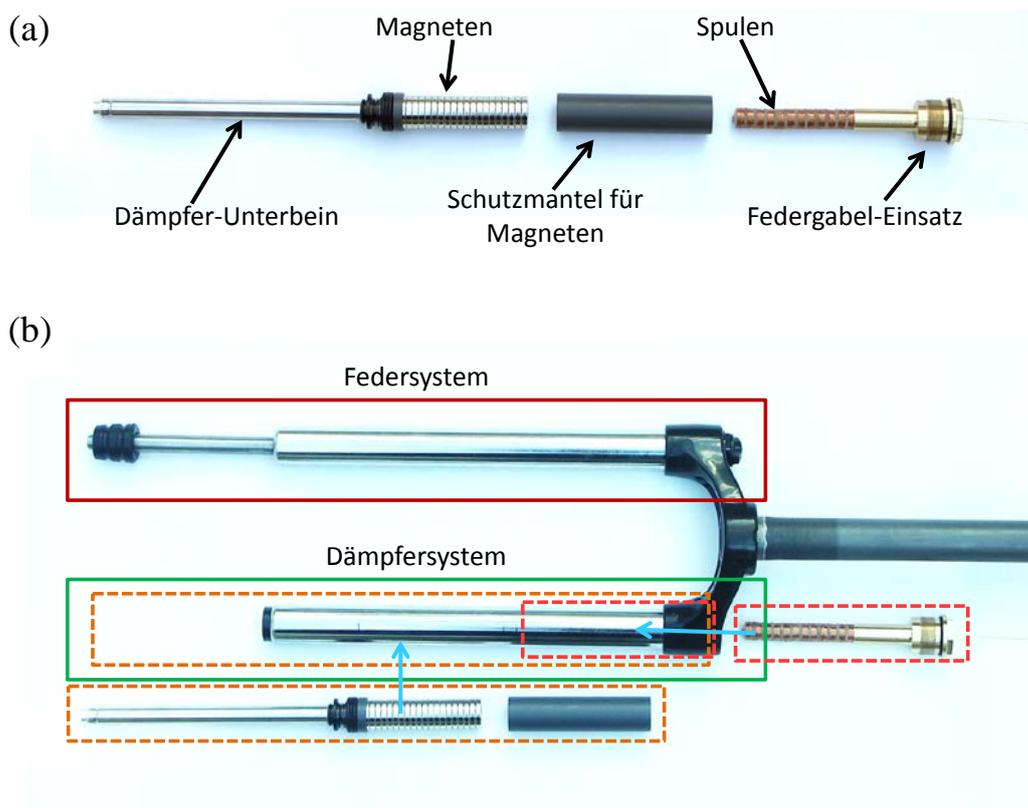


Abb. 13: (a) Einzelne Komponenten des Dämpfer-Harvesters und (b) deren Anordnung innerhalb der Federgabel.

3.5. Verwertung

Ausgehend vom beschriebenen Dämpfer-Konzept wird derzeit ein Patentantrag ausgearbeitet. Der Antrag bezieht sich auf die Spulen- und Magnetgeometrie, die einerseits eine signifikante Dämpfung erlaubt und andererseits die Einstellung der Dämpfungscharakteristik während des Betriebs und bei nur minimaler Reduzierung der Energiewandlungseffizienz ermöglicht.

Am Markt verfügbare Federdämpfer sind derzeit in der Regel passiv ausgelegt und wandeln die zu dämpfende Bewegungsenergie in Wärme. Für Dämpfer mit integrierter Harvester-Funktionalität besteht aufgrund der Vielzahl von Dämpfern in unserem Lebensalltag ein breites Anwendungsspektrum:

Im Rahmen des Use-Cases „Prothese“ im Projekt 9D-Sense ist es denkbar, die aus der Dämpfung gewonnene Energie zu nutzen, um den Systemzustand der Prothese fortlaufend sensorisch zu überwachen und die Steuerung und Aktorik der Prothese mit Energie zu versorgen.

Darüber hinaus könnte in Zukunft eine Vielzahl von Sensoren bis hin zu komplexen „Cyber-Physikalischen-Systemen über Dämpfungsharvester mit Energie versorgt und in das Internet der Dinge eingebunden werden.

Für einige Anwendungsszenarien (z.B. bei Fahrwerken von Fahrzeugen) kommen bereits heute Dämpfungssysteme mit aktiver Anpassung der Dämpfungscharakteristik zum Einsatz, die im Betrieb jedoch zusätzliche Energie erfordern. Mit dem dargestellten System einstellbarer Dämpfung und je nach Einsatzszenario neutraler oder positiver Energiebilanz könnten neue Anwendungsbereiche für aktive Dämpfungssysteme erschlossen werden, die bisher aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen noch nicht zugänglich waren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Ergänzung zum Schlussbericht (Verlängerungszeitraum 01.11.2014 -30.04.2015)
3. Titel Verbundprojekt: Autonomous Nine Degrees of Freedom Sensor Module (9D-Sense) – Teilvorhaben Elektronik zur Auswertung von Inertial- und Magnetfeldsensoren, Signalverarbeitung und –übertragung, System-Simulation, Kinetischer Harvester	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] [Meckler, Stefan], [Goridko Vadim], [Schwaab Manuel], [Bourouah, Mohamed], [Trächtler, Martin],[Folkmer, Bernd], [Hoffmann, Daniel], [Ylli, Klevis], [Hehn, Thorsten], [Willmann, Alexander], [Ehrbrecht, Bernd], [Rathfelder, Christoph], [Neßler, Sebastian], [Marx, Maximilian], [Manoli, Yiannos]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hahn-Schickard-Gesellschaft für Angewandte Forschung e.V. Institut für Mikro- und Informationstechnik Wilhelm Schickard-Str. 10 78052 Villingen-Schwenningen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16N11843
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI/VDE-IT Steinplatz 1 10623 Berlin	

18. Kurzfassung

Elektronikentwicklung:

- Im Rahmen der Projektverlängerung vom 16.01.2015 wurde bis zum Projektende am 30.04.2015 ein ASIC zum Ansteuern und Auslesen von MEMS-Beschleunigungssensoren entwickelt. Das ASIC wurde auf der Basis umfangreicher Schaltungs-Simulationen verifiziert. Insbesondere bezüglich Energieverbrauch, Rauschverhalten, Linearität und dynamischem Bereich wurde eine sehr gute Performance erreicht.

Energy-Harvesting:

- Im Rahmen der Projektverlängerung vom 16.01.2015 wurden alternative Harvesting-Konzepte auf der Basis linearer Dämpfung evaluiert und einander mit Hilfe quantitativer Simulationsrechnungen gegenübergestellt. Eines der Konzepte wurde weiterverfolgt, im Detail simuliert und konstruktiv für den Einbau in der Federgabel eines Mountainbikes umgesetzt.

Sensorfusion

- Im Rahmen der Projektverlängerung vom 16.01.2015 wurde für das Use-Case Szenario „Fußgängernavigation“ der im Projekt entwickelte Pedometer-Ansatz zur Fußgängerlokalisierung weiterentwickelt und insbesondere um eine Temperatur-Kalibrierung erweitert.

Systementwicklung:

- Im Rahmen der Projektverlängerung vom 16.01.2015 wurde die Energieaufnahme des Sensorsystems zur Fußgängernavigation von 10mW auf 3 mW reduziert. Das System kann somit energieautark betrieben werden. Die Energie wird dabei vollständig aus der menschlichen Gehbewegung gewonnen. Der Entwicklungsschwerpunkt lag auf der Optimierung der Systemsteuerung, dem Umstieg von Bluetooth auf Bluetooth LE als Funkstandard für die drahtlose Datenübertragung und der Verbesserung der Harvesterleistung.

19. Schlagwörter

Energieautarke Fußgängerlokalisierung, Energie Harvesting, Smart Shoe, MEMS-Beschleunigungssensor, ASIC, Delta-Sigma

20. Verlag

21. Preis