

Driftfreier optischer Beschleunigungssensor

Jonathan Seybold¹, Volker Kible¹, André Bülau¹, Irina Nikulin² und Stephan Knappmann²

¹Hahn-Schickard, Stuttgart, 70569, Deutschland

²Hahn-Schickard, Villingen-Schwenningen, 78052, Deutschland

Kontakt: Jonathan.Seybold@Hahn-Schickard.de

Einleitung

Beschleunigungssensoren sind weit verbreitet und in vielen Märkten wie dem Mobilitätssektor, der Konsumerelektronik oder der Maschinen- und Bauwerksüberwachung anzutreffen. Die Aufgaben reichen dabei von einfachen Beschleunigungsmessungen, Navigation und Neigungsmessung bis hin zur Erfassung von Schwingungen. In den meisten Fällen kommen hierbei MEMS-Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Diese sind meist kostengünstig, haben aber den Nachteil, dass sie während der Betriebsdauer driften und dadurch fehlerhafte Messergebnisse liefern. Um dem entgegenzuwirken, müssen sie im Betrieb häufig kalibriert werden. Ein neuer, vielversprechender Ansatz für driftfreie Beschleunigungssensoren wird in diesem Beitrag vorgestellt.

Stand der Technik

Meist basieren MEMS-Beschleunigungssensoren auf einem kapazitiven oder piezoelektrischen Messprinzip, bei dem das Sensorelement ein Schichtsystem aus verschiedenen Materialien beinhaltet.

Viele Anwendungsfelder benötigen Beschleunigungssensoren mit extrem geringer Drift, hoher Auflösung und hoher Bandbreite bei niedrigen oder moderaten Kosten der Sensoren. So sind bei der Bauwerksüberwachung wie Brücken derzeit Hochpräzisionsensoren im Einsatz, aufgrund der hohen Kosten allerdings nur temporär und nicht dauerhaft. Diese Sensoren haben oft eine künstlich reduzierte Bandbreite und weisen eine Langzeitdrift auf [1]. In Abbildung 1 ist schematisch ein Driftverhalten über die Zeit dargestellt.

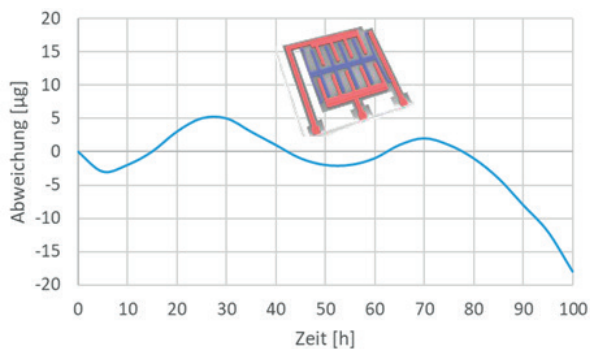


Abb. 1: Drift eines Beschleunigungssensors über die Zeit

Die Drift bei MEMS-Beschleunigungssensoren resultiert aus dem Multimaterialverbund, um die siliziumbasierten Sensoren kapazitiv oder piezoelektrisch auszulesen. Hierdurch werden mechanische Spannungen bei der Herstellung der Sensorelemente induziert, die einerseits durch die Herstellungsverfahren selbst, andererseits durch die Materialien und deren unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten begründet sind. Um die initiale Drift zumindest in Teilen abzubauen, werden die Sensorelemente einem Burn-in unterzogen. Dennoch sorgt der Abbau der mechanischen Spannung über die Zeit dafür, dass das Sensorausgangssignal driftet, ohne dass sich die zu messende Eingangsgröße geändert hat. Dies wiederum hat zur Folge, dass hochgenaue Beschleunigungssensoren, die oftmals auch als Neigungssensoren Anwendung finden, regelmäßig kalibriert und gegebenenfalls sogar justiert werden müssen.

Optischer Beschleunigungssensor

Um diesen Nachteil zu umgehen, wird in diesem Beitrag ein optisches Ausleseverfahren vorgestellt. Die Kernidee ist, auf einer seismischen Masse, die an einem Federsystem aufgehängt ist und als MEMS-Element aus Silizium gefertigt ist, ein reflexives Beugungsgitter anzubringen und dessen Bewegung über einen Laserstrahl und mehrere Fotodioden auszulesen [2, 3, 4]. Silizium als hochreines Material entspricht einer nahezu idealen Feder und wird daher auch als Spiralfeder in Uhren verwendet [5].

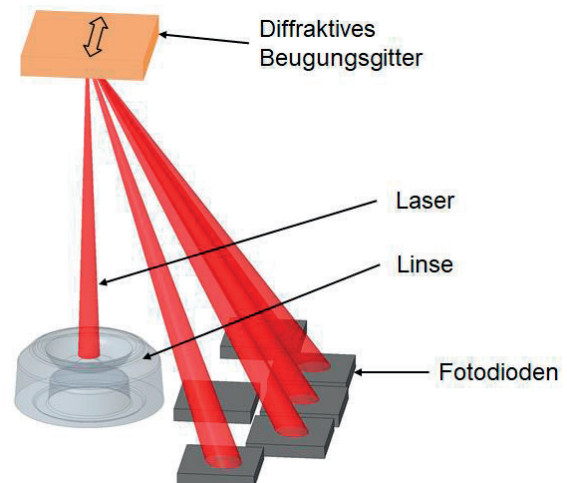


Abb. 2: Optisches Funktionsprinzip

Folglich entsteht ein idealer Beschleunigungssensor aus Silizium dadurch, dass auf zusätzliche Materialien und Prozessschritte weitestgehend verzichtet wird. Der optische Aufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Laserdiode, Linse, Fotodioden sowie die elektronischen Komponenten werden direkt auf einer Leiterplatte angeordnet, sodass ein kompaktes Optikmodul entsteht.

Das Beugungsgitter mit den Mikrostrukturen ist so ausgelegt, dass der Laserstrahl reflektiert und dabei in verschiedene Raumrichtungen gebeugt wird. Abbildung 3 zeigt die Anordnung der Mikrostrukturen auf dem Beugungsgitter. Es befinden sich darauf 4 Hauptfelder mit einer Breite von $8\ \mu\text{m}$ und einem Abstand von $10\ \mu\text{m}$ zueinander und dazwischen sind Felder mit einer Breite von $2\ \mu\text{m}$ angeordnet. Im Abstand von $40\ \mu\text{m}$ wiederholen sich die Felder, was einer Periodenlänge entspricht.

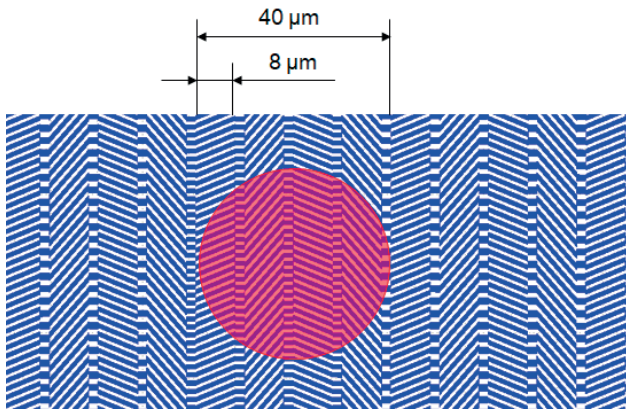


Abb. 3: Mikrostrukturen des Beugungsgitters

Der Laserstrahl hat auf den Mikrostrukturen einen Durchmesser von $40\ \mu\text{m}$ entsprechend der Periodenlänge. Wird nun das Gitter bei einer Beschleunigung ausgelenkt, ergibt sich eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Beugungsgitter, was zu einer Helligkeitsmodulation der gebeugten Laserstrahlen führt und dadurch eine Sinus- bzw. Cosinus-Modulation auf den Fotodioden bewirkt, siehe Abbildung 4. Daraus kann die Auslenkung der seismischen Masse bzw. deren Beschleunigung abgeleitet werden.

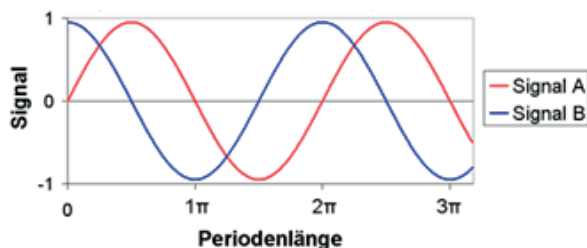


Abb. 4: Sinus- und Cosinusmodulation nach der Offsetkompensation

Dadurch, dass sich jeweils 4 Hauptfelder auf dem Beugungsgitter befinden, ergeben sich ein +Sinus-,

ein -Sinus-, ein +Cosinus- und ein -Cosinus Signal. Durch Subtraktion der entsprechenden Signale wird der Offset im Signal kompensiert, sodass der in Abbildung 4 gezeigte Signalverlauf zu erwarten ist.

Die kleineren Felder zwischen den Hauptfeldern werden zur Erzeugung eines Referenzsignals (Ref) verwendet. Dadurch wird an der Mittelstellung des Beugungsgitters ein Signalpeak erzeugt, um einen absoluten Bezug zu ermöglichen.

Nanoprägelithografie

Das Aufbringen der Mikrostrukturen erfolgt mittels Nanoprägelithografie [6, 7, 8], siehe Abbildung 5. Dabei wird über einen strukturierten Stempel die Mikrostruktur in einen Lack übertragen. Nach der UV-Belichtung des Lacks und der Entfernung des Stempels kann dann die Mikrostruktur ins Silizium geätzt werden. Anschließend wird die Reflexionsschicht aus Gold mittels PVD-Verfahren auf das Siliziumsubstrat aufgebracht.



Abb. 5: Erzeugung der Mikrostrukturen

Damit sich die Mikrostrukturen bei einer Beschleunigung relativ zum Laserspot verschieben, ist es nötig, das Siliziumsubstrat an Federn aufzuhängen, die sich bei einer Beschleunigung verbiegen und somit zu einer Auslenkung der Mikrostrukturen führen, siehe Abbildung 6. Dieses Federmassesystem wird auch als seismische Masse bezeichnet. Über die Steifigkeit der Federn und die Masse des Siliziumsubstrats kann dann die Empfindlichkeit des Beschleunigungssensors eingestellt werden.

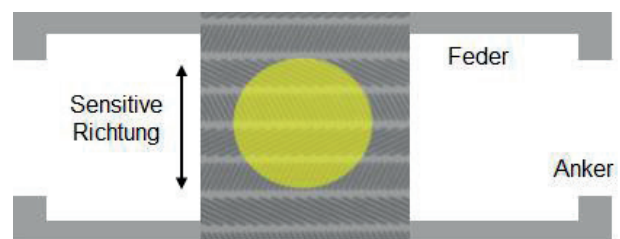


Abb. 6: Strukturiertes Federmassesystem

Aufgrund des homogenen Siliziummaterials im Federmassesystem wird erwartet, dass dieses Messprinzip intrinsisch driftfrei ist. Bei etwaigen inneren Spannungen in der aufbrachten Reflexionsschicht oder im Beugungsgitter selbst wird erwartet, dass sich diese gleichmäßig sowohl auf das Sinus- als auch das Cosinus-Signal auswirken und somit daraus resultierende Effekte aufgrund der differentiellen Messanordnung eliminiert werden. Beispielsweise

würde eine Verringerung der Reflexivität zwar zu einer geringeren Amplitude führen, jedoch für alle Signale im gleichen Maß, was durch die Regelung der Laserdiode kompensiert wird, ebenso wie Alterungseffekte der Laser- und Fotodioden selbst.

Aufbau eines Demonstrators

Zum Nachweis des Funktionsprinzips wurde ein Demonstrator konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Der Demonstrator umfasst die optischen Komponenten wie Laserdiode, Linse und Fotodioden. Weiterhin enthält er ein Gehäuse, in dem sowohl die seismische Masse mit den Mikrostrukturen als auch das Optikmodul selbst befestigt werden.

Optikmodul

Abbildung 7 zeigt das aufgebaute Optikmodul mit den elektronischen und optischen Komponenten. Laser- und Fotodioden werden direkt auf die Leiterplatte bestückt und drahtgebondet (Chip on Board). Insgesamt befinden sich 12 Fotodioden auf dem Optikmodul, da sowohl die +1. als auch die -1. Beugungsordnung ausgelesen werden. Zentrisch angeordnet befindet sich Laserdiode und Linse. Die spritzgegossene Linse aus Kunststoff muss möglichst genau zur Laserdiode positioniert werden. Das wird durch einen Active Alignment Prozess erreicht. Bei der Bestückung der Linse wird die Laserdiode eingeschaltet und der Laserstrahl mit einer Kamera analysiert. Über einen Piezoaktor wird die Position der Linse solange korrigiert, bis die gewünschte Strahlform erreicht ist. Anschließend wird der Klebstoff der Linse mithilfe von UV-Licht ausgehärtet.

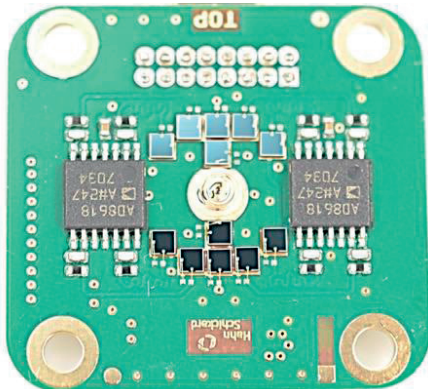


Abb. 7: Optikmodul

Seismische Masse

Die seismische Masse wurde so ausgelegt und berechnet, dass das Masseelement mit den Mikrostrukturen eine Fläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ aufweist und die Außenabmessungen $6 \times 12 \times 0,3 \text{ mm}^3$ betragen.

Das Design der Federn wurde für Beschleunigungen bzw. niederfrequente Schwingungen im Bereich

$< 100 \text{ Hz}$ ausgelegt. Anwendungen ergeben sich somit beispielsweise in der Bauwerksüberwachung. Abbildung 8 zeigt das Layout der seismischen Masse.

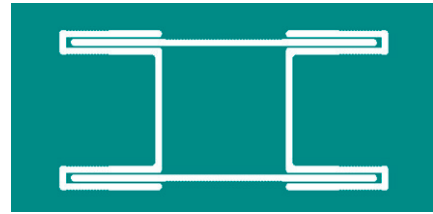


Abb. 8: Layout der seismischen Masse und der Federelemente

Mikrostrukturen

Die Mikrostrukturen wurden mittels Nanoprägelithografie hergestellt. Abbildung 9 zeigt an einem Testelement die mit einem Elektronenmikroskop aufgenommene Mikrostrukturen. Es ist zu erkennen, dass das Verhältnis zwischen der Struktur und den Gräben noch nicht optimal ist. Die Gräben sind zum Teil breiter als die Stege selbst. Ideal wäre hier ein Verhältnis von 1:1.

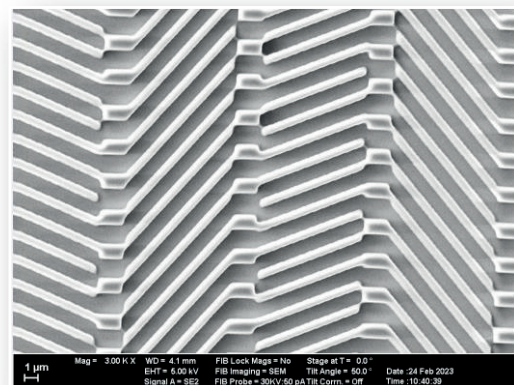


Abb. 9: Mikrostruktur

Elektronik des Optikmoduls

Die Elektronik des Optikmoduls basiert auf 12 Transimpedanzverstärkern, für jede Fotodiode einer, und einer Mittenspannungserzeugung sowie einer analogen Laserdiodenregelung. Diese nutzt, je nach Bestückung, eine Summe mehrerer Fotodiodensignale zusammen mit einem analogen PID-Regler und einer Präzisionsstromquelle zum Treiben des Laserdiodenstroms. Dadurch können Temperatur- und Alterungseffekte der Laserdiode kompensiert werden. Bei Minimalbestückung kann stattdessen ein Strom- oder Spannungssignal von außen als Grundlage für den Laserdiodenstrom dienen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn der Sensor nicht rein analog, sondern mit einem digitalen Interpolator betrieben wird. Dies ist dann der Fall, wenn digitale Ausgangssignale erwünscht sind.

Digitale Interpolation

Zur Erhöhung der Auflösung des Sensors werden die Signale über eine Interpolation ausgewertet [9]. Für die Bestimmung der Auslenkung der seismischen Masse und damit der Maßverkörperung sind minimal 6 der 12 Fotodiodensignale erforderlich (+Sin, -Sin, +Cos, -Cos sowie +Ref und -Ref). Die zusätzlichen 6 Signale der -1. Beugungsordnung können bei Bedarf ebenfalls erfasst und mit den grundlegenden Signalen abgeglichen werden, um eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Störgrößen zu erreichen. Außerdem ergibt sich durch die Auswertung beider Beugungsordnungen durch die doppelte Lichtmenge ein doppelter Signalhub. Der in diesem Projekt entwickelte 24bit-Soft-Interpolator ermöglicht beide Betriebsarten, siehe Abbildung 10.

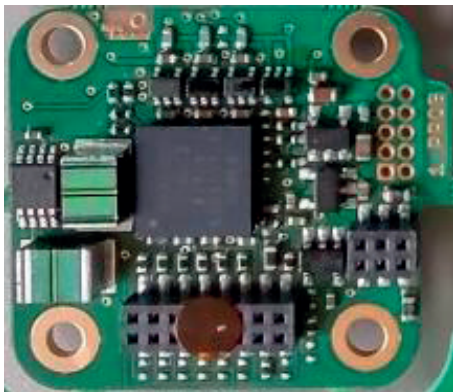


Abb. 10: Soft-Interpolatormodul

Für die grundlegende Interpolation wird ein Interpolatormodul auf das Optikmodul aufgesetzt, wobei die Baugröße passend zum Optikmodul ausgelegt ist. Das Optikmodul ist dazu mit einem senkrechten Steckverbinder versehen anstelle der rechtwinkligen Variante der analogen. Ist die Auswertung aller 12 Signale gewünscht, kann ein weiteres Interpolatormodul darauf aufgesetzt werden.

Die beiden Module tauschen über einen internen Universellen Asynchronen Receiver-Transmitter (UART) Daten miteinander aus. Auch die Datenübertragung nach außen ist über diese Schnittstelle gelöst. Der Interpolator tastet die Fotodiodensignale hochauflösend ab und führt intern eine ATAN2-Interpolation durch. Es ist eine Amplituden-, Offset- und Linearitätskompensation implementiert. Letztere arbeitet mit harmonischen Funktionen.

Weiterhin wurden Interpolatormodule mit iC-TW29 von iC-Haus und AM-IP4k von AMAC aufgebaut, siehe Abbildung 11.

Die Inbetriebnahme und der Test dieser Module dauert aktuell noch an, sie sollen später zum Vergleich mit dem Soft-Interpolator herangezogen werden, um dessen Leistung bewerten zu können. Zudem ist der Einsatz dieser Module für Varianten des Sensors mit

höhere Bandbreiten ($> \text{ca. } 250 \text{ Hz}$) zwingend erforderlich, da mit dem Soft-Interpolator derzeit maximal Wiederholraten von 1 kHz möglich sind.

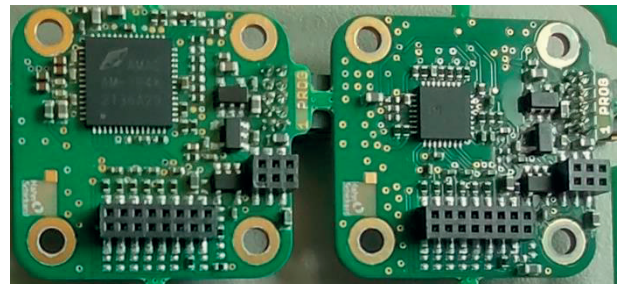


Abb. 11: Interpolatoren basierend auf AM-IP4k (links) und iC-TW29 (rechts)

Demonstrator

Ein erster Demonstrator wurde aufgebaut, allerdings noch ohne die seismische Masse mit den Federelementen, sondern mit einer starren Siliziumstruktur, die die Mikrostrukturen enthält, um daran Messungen mit einer Testvorrichtung durchzuführen und das optische Messprinzip zu untersuchen und zu verifizieren.

Die äußeren Abmessungen des Demonstrators betragen im montierten Zustand $27 \times 29 \times 14 \text{ mm}^3$. Abbildung 12 zeigt das Gehäuse des Sensors sowie den fertig montierten Demonstrator.

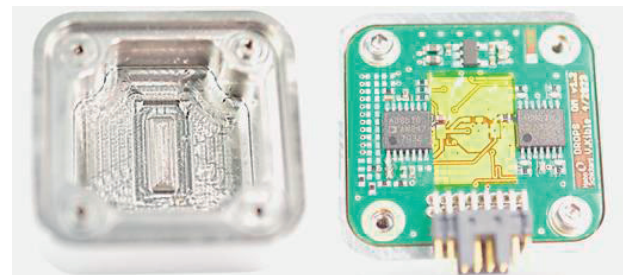


Abb. 12: Innenansicht Gehäuse (links) und montierter Demonstrator (rechts)

Inbetriebnahme und erste Ergebnisse

Zu Beginn der Inbetriebnahme des Demonstrators wurde der Strahlengang des Optikmoduls an einem Messmikroskop mit Infrarotkamera vermessen. Abbildung 13 zeigt den Strahldurchmesser des Lasers in der Strahltaile, was dem Abstand der Mikrostrukturen entspricht, mit einem Durchmesser von $39,4 \mu\text{m}$ und die dazugehörige Intensitätsverteilung in Form einer Gaußverteilung. Somit ist der Strahldurchmesser etwas geringer als die geplanten $40 \mu\text{m}$, funktionieren wird der Demonstrator aber dennoch.

Für erste Messungen wurde ein Teststand mit einer Piezoachse verwendet, an der die Mikrostruktur befestigt wurde. Das Optikmodul wurde an einem Portal über der Mikrostruktur angebracht. Dadurch ist es

möglich, eine präzise Relativbewegung in Schritten von wenigen Nanometern zwischen Optikmodul und Mikrostruktur zu realisieren.

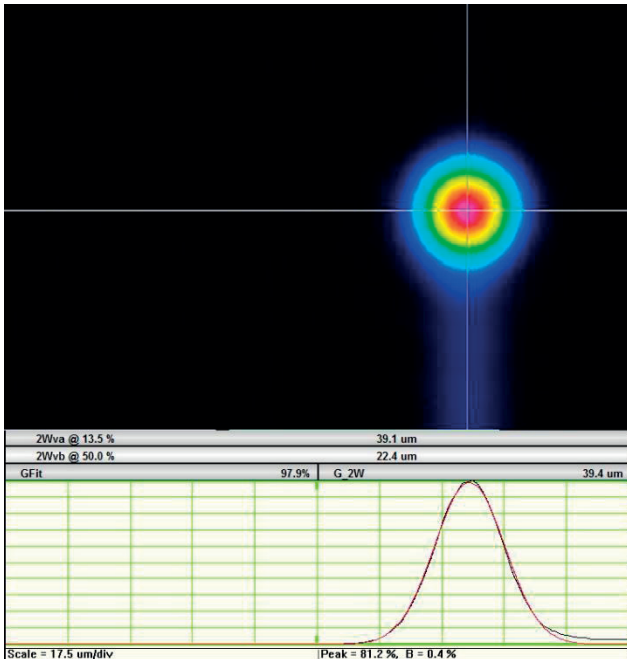


Abb. 13: Spotdurchmesser des Laserstrahls

Die gemessenen Sin- und Cos-Signale sowie das Referenzsignal sind in Abbildung 14 zusammen mit der interpolierten Wegkennlinie dargestellt. Die Schrittweite beträgt bei dieser Messung 50 nm. Kleinere Schrittweiten führen entsprechend zu längeren Messzeiten. Die Amplituden der kompensierten Signale betragen ca. 1 Vpp.

Es zeigt sich, dass der optische Ansatz sehr gut geeignet ist, die Bewegung des reflexiven Beugungsgitters präzise zu erfassen. So konnte bei Bewertung

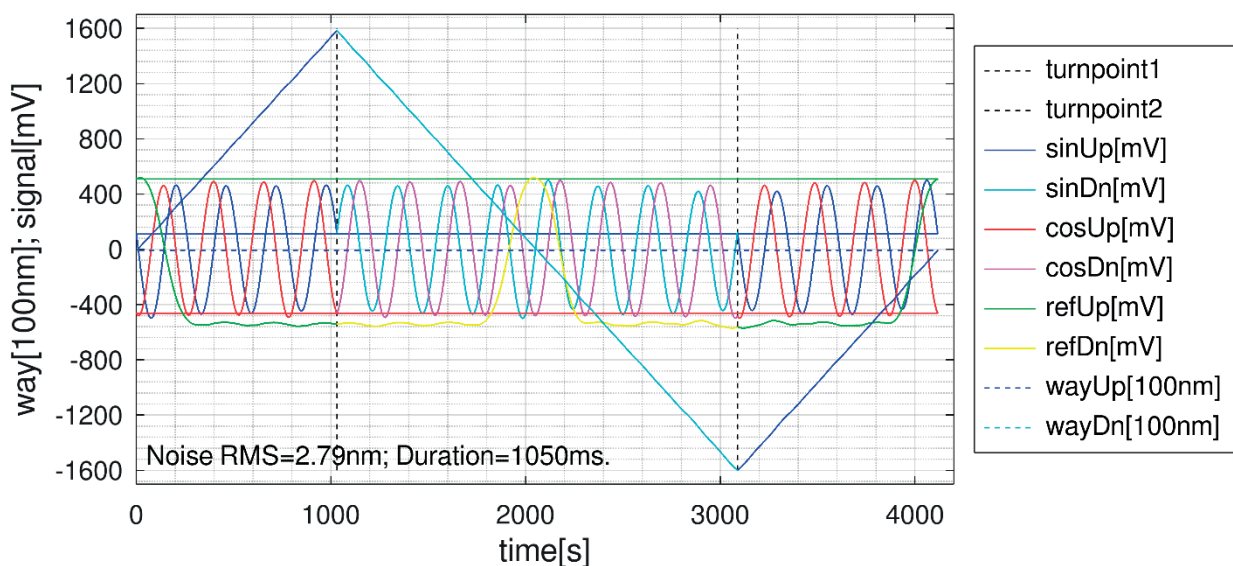


Abb. 14: Signalmodulation über einen Verfahrweg von $\pm 160 \mu\text{m}$

der analogen Signale mit einer 16bit DAQ-Karte eine rauschbegrenzte Wegauflösung von $< 3 \text{ nm RMS}$ erreicht werden. Mittels Optimierung in der Elektronik kann das sogar noch verbessert werden.

Eine etwas andere Darstellung ist das sogenannte Kreisdiagramm, das entsteht, wenn der Sinus über dem Cosinus aufgetragen wird. Abbildung 15 zeigt das Kreisdiagramm, wie es am Demonstrator gemessen wurde.

Pro Periode (= $40 \mu\text{m}$ Relativbewegung) ergibt sich ein Kreis. Im Idealfall liegen diese Kreise alle übereinander. In Realität entstehen jedoch Abweichungen davon, da die Mikrostrukturen nicht alle exakt gleich ausgebildet sind, durch Montageteranzen oder aufgrund von Verschmutzungen.

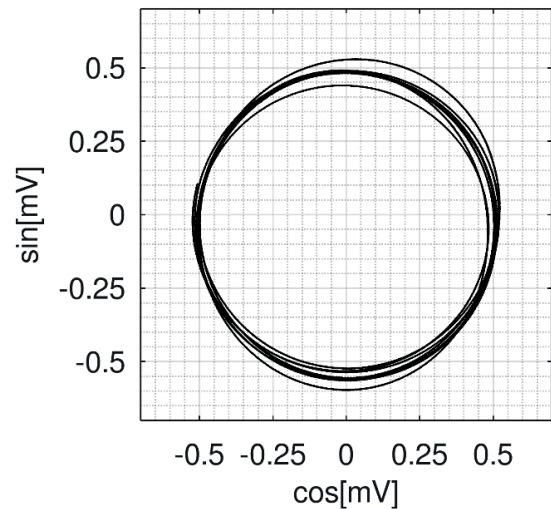


Abb. 15: Kreisdiagramm

Durch diese Nichtidealitäten ergeben sich Fehler bzw. Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Position der Mikrostruktur. Das Diagramm in Abbildung 16 zeigt diese Abweichung.

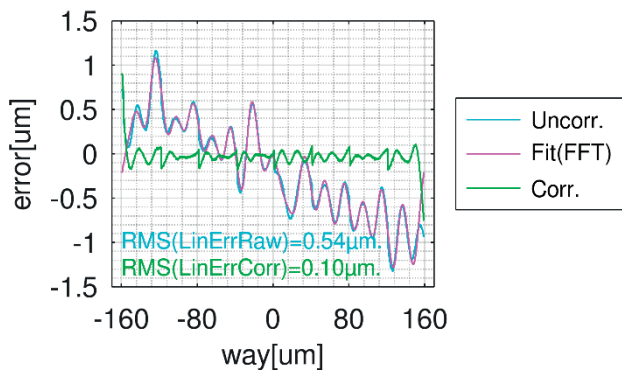


Abb. 16: Fehlerdiagramm

Durch eine Korrektur in der Kalibriervorschrift kann dieser Fehler reduziert werden, was ebenfalls in dem Diagramm (grüne Kurve) dargestellt ist. Insbesondere werden hier der Offset und die Signalamplituden korrigiert.

Derzeit wird das finale Feder-Masse-Element aus Silizium gefertigt, an dem dann auch die Untersuchungen zur Drift durchgeführt werden sollen.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neues Konzept für einen drifffreien optischen Beschleunigungssensor vorgestellt. Die hochauflösende Maßverkörperung erfolgt dabei auf Basis einer diffraktiven Gitterstruktur, welche optisch über einen Laserstrahl ausgelesen wird. Zum Nachweis des Funktionsprinzips wurde ein Demonstrator aufgebaut und erste Messungen daran wurden durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Messungen verifizieren das optische Ausleseprinzip und zeigen das große Potential für diesen Ansatz.

Das finale Feder-Masse-Element aus Silizium wird derzeit gefertigt, an dem dann die Untersuchungen zur Drift und zum Langzeitverhalten durchgeführt werden sollen.

Aufgrund des einfachen Aufbaus, basierend auf einer Leiterplatte als Optikmodul, ist nach einer industriellen Umsetzung mit geringen Herstellkosten zu rechnen, so dass dieses Konzept auch für andere Sensoranwendungen interessant sein könnte, bei denen eine Relativbewegung detektiert werden soll.

Förderhinweis

Das Projekt „Diffraktiv-reflektiver optischer Beschleunigungssensor“ (IGF Vorhaben Nr.: 22282 N) wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] GRINBERG, B.; FEINGOLD, A.; KOENIGSBERG, L.: *Closed-loop MEMS accelerometer: from design to production*. Karlsruhe, Germany, 2016
- [2] MAYER, V.: *Untersuchungen zu optischen Drehgebern mit mikrostrukturierten Maßverkörperungen aus Kunststoff*. Stuttgart, Germany, 2009
- [3] HOPP, D.: *Inkrementale und absolute Kodierung von Positionssignalen diffraktiver optischer Drehgeber*. Stuttgart, Germany, 2012
- [4] PLAVCAN, Z.: *Konzeption eines optischen Beschleunigungssensors*. Masterarbeit, Stuttgart, Germany, 2017
- [5] <https://www.uhrinstinkt.de/magazin/siliziumspirale/> (Zugriffsdatum 04.11.2024)
- [6] MESCHEDER, U.: *Mikrosystemtechnik*. Springer, 2004
- [7] GÜCK, M.: *MEMS in der Mikrosystemtechnik*. Springer 2005
- [8] Tilli, M.: *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, William Andrew Publishing, 2015
- [9] QUASDORF, J.: *Interpolation analoger Sinussignale - Auflösung von Winkelmessungen erhöhen*, Elektronik-Praxis Nr. 18; Vogel Business Media GmbH, 2008