

Schlussbericht Mikromonitor

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Chemnitz Zentrum für Mikrotechnologien	Förderkennzeichen: 16ES0054
Titel des Vorhabens: Verbundprojekt: Entwicklung eines mikrotechnisch aufgebauten intelligenten Sensor- und Monitoringsystems zur Fahrgestellüberwachung und Vermeidung von Entgleisung im Schienenverkehr MikroMonitor	
Teilprojekt: MEMS Beschleunigungssensorelement	
Projektleiter: Dr. Danny Reuter	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.12.2016	
Berichtszeitraum: 01.06.2013 bis 31.12.2016	

1 Inhaltsverzeichnis

2	Kurze Darstellung	3
2.1	Aufgabenstellung	3
2.2	Vorraussetzungen zur Durchführung	3
2.3	Planung und Ablauf	3
2.4	Stand der Technik	4
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
3	Eingehende Darstellung	6
3.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	6
3.1.1	Arbeitspaket 2: Grundlagenuntersuchungen	6
3.1.2	Arbeitspaket 3: Gesamtkonzept	10
3.1.3	Arbeitspaket 4: Entwicklung des nichtlinear messenden MEMS-Beschleunigungssensorelements	10
3.1.4	Arbeitspaket 5: Fertigung von Testmustern	15
3.1.5	Arbeitspaket 14: Aufbau MEMS Funktionsmuster	21
3.1.6	Arbeitspaket 16: Re-Design	22
3.1.7	Arbeitspaket 17: Aufbau MEMS Demonstrator.....	22
3.1.8	Arbeitspaket 19: Dokumentation	26

3.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	26
3.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	26
3.4	Voraussichtlicher Nutzen, Ergebnisverwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	27
3.5	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens, bei anderen Stellen.....	27
3.6	Veröffentlichungen (erfolgte und geplante)	27

2 Kurze Darstellung

2.1 Aufgabenstellung

Gesamtziel des MikroMonitor-Verbundprojektes war die Entwicklung eines neuen, mikrotechnisch realisierten, "intelligenten" Beschleunigungssensorsystems mit einem Messbereich von $\geq \pm 70\text{g}$ und einer Messauflösung von $\pm 0,05\text{g}$. Das intelligente mikrotechnisch aufgebaute Beschleunigungssensorsystem soll die mit hoher Frequenz von bis zu 20 kHz anfallenden Messdaten bereits im Sensor in Bezug auf kritische, sicherheitsrelevante Beschleunigungsmuster analysieren und unkritische Signale ausfiltern. Durch die in den "intelligenten" Sensor integrierte Signalauswertung soll die Datenrate zur Überwachung der 8 Radsätze von den ursprünglich notwendigen 2.000 kBit/sec auf $< 16\text{ kBit/sec}$ reduziert werden, so dass die Signalübertragung ohne Einschränkung des übrigen Kommunikationsverkehrs über die bereits heute in Zügen bzw. Waggons verfügbaren Feldbussysteme erfolgen kann.

Ein weiteres Ziel war die Entwicklung des übergeordneten Monitoringsystems zur Detektion von kritischen Zuständen aus den von den "intelligenten" Sensoren zur Verfügung gestellten, als kritisch bewerteten Beschleunigungsmustern und Weiterleitung von Warnmeldungen bei Gefahrensituationen an den Sicherheitsleitreechner und die Leitstelle.

Das Ziel des Teilprojektes des TUC-ZfM war die Entwicklung der primären Sensorik auf Basis von nichtlinearen mikroelektromechanischen Elementen.

Die Entwicklung der primären Sensorik erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner GEMAC. Von TUC-ZfM wurden robuste Sensorelemente entwickelt, die den weiten Dynamikbereich von 0,05g bis 70g überstreichen und Schwingungen bis 20 kHz messen sollten. Dieser Dynamikbereich wird sich nur durch koordinierte Maßnahmen im Design der Sensorelemente und in der Funktionalität der primären Sensorelektronik erreichen lassen. Eine weitere Herausforderung stellt die geringe zur Verfügung stehende Chipfläche bei gleichzeitig hohem Dynamikbereich und geringer mechanischer Empfindlichkeit aufgrund des benötigten Frequenzbereiches bis 20 kHz dar. Sensoren mit diesen geforderten Eigenschaften werden bisher auf dem Markt nicht angeboten.

2.2 Voraussetzungen zur Durchführung

Das Gesamtvorhaben war sowohl von der Auswahl und Kompetenz der beteiligten Partner als auch bezüglich der bereitgestellten Fördermittel angemessen geplant. Das Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz verfügt über Reinraumkomplexe zur Erforschung, Präparation und Komplettierung mikromechanischer Strukturen (Maskenerstellung, Dünnschichtabscheidung, Lithografie, Ätztechnologie, Dotierung) sowie über die zugehörige präparationsbegleitende Messtechnik. Für das hier durchgeführte Vorhaben sind zunächst sämtliche benötigten Waferprozesse zur Sensorpräparation, sowie verschiedenste Packagingverfahren (Wafer-Level) vorhanden. Für den Sensorentwurf stehen Rechentechnik und die notwendige Softwareausstattung (kommerzielle SW, OpenSource, Eigenentwicklungen) zur Verfügung. Weiterhin stehen Anlagen zur Sensorcharakterisierung (Schwingungsmessplatz, Autofokusmesstechnik, AFM, Speckle-Interferometrie usw.), um wesentliche Parameter des Sensorelementes zu bestimmen.

2.3 Planung und Ablauf

Zu Beginn des Projektes erfolgen grundlegende Untersuchungen und Recherchen zur Realisierung eines nicht linear messenden MEMS-Beschleunigungssensorelementes, sowie der Auswertungsverfahren zur zuverlässigen Detektion von kritischen Beschleunigungen bei den unterschiedlichen Anwendungssituationen. Außerdem wurden Voruntersuchungen zu geeigneter AVT-Technologien vorgenommen, um das Sensorsystem im harschen Umfeld der Zugradlager aufzubauen (AP2).

Mit diesen Ergebnissen aus AP2 wurde ein Gesamtkonzept in Zusammenarbeit aller Projektpartner ausgearbeitet. Dies beinhaltete das Aufstellen der Zielparameter, sowie eine detaillierte Spezifikation des Entwurfs- und Technologiefusses des Beschleunigungs- und Monitoringsystem (AP3).

Aufgrund der Tatsache, dass bis Ende des Jahres 2013 kein Mitarbeiter eingestellt werden konnte, wurden nur Teile der Arbeitspunkte 2 und 3 durch den Projektleiter bearbeitet, was eine Verzögerung von ca. 3 Monate mit sich brachte.

Nach der Festlegung der Zielparameter erfolgten der Entwurf und die Umsetzung in ein geeignetes Layout des Beschleunigungssensorelementes. Anschließend wurde durch eine FEM-Simulation das Verhalten des Sensorelementes überprüft und optimiert (AP4). Mit dem Zeitverzug aus AP2/3 konnten nun die Layouts und Ätzmasken für ein optimiertes Sensordesign zur Verfügung gestellt werden und die Fertigung der ersten Beschleunigungssensorelemente wurde angefangen (AP5). Die Fertigstellung der MEMS verzögerte sich durch Fertigungsprobleme, welche in einem mehrmonatigen Anlagenausfall sowie fehlerhaftes Si-Basismaterial bestanden, so dass die MEMS-Sensorelemente erst Mitte 2015 den Projektpartnern zur Verfügung standen.

Nach Absprache mit den Projektpartnern und dem Fördermittelgeber wurden der Aufbau der MEMS-Funktionsmuster (AP14), das Re-Design des MEMS-Sensorelementes (AP16), den Aufbau eines MEMS-Demonstrators (AP17), sowie die Dokumentation (AP19) weitestgehend parallel durchgeführt und durch zusätzliches Personal für das Projekt am ZfM unterstützt. Damit konnte eine weitere Verzögerung vermieden werden, so dass die Demonstratoren im Oktober 2016 aufgebaut und fertiggestellt werden konnten.

2.4 Stand der Technik

Die aktuell existierenden, dem Stand der Technik entsprechenden piezoelektrischen sowie piezokeramischen Beschleunigungssensoren zeichnen sich vor allem durch eine hohe Dynamik über vier Dekaden und einen großen Messbereich von bis zu $\pm 1000g$ aus. Gravierende Nachteile, die den Einsatz von Piezo-Sensorelementen für Anwendungen im Schienenbereich unmöglich machen sind die große Baugröße, die die im FuE-Projekt geplante Integration in das Radlager unmöglich macht. Aufgrund ihrer geringe Lebensdauer von wenigen Monaten, des temperaturabhängigen Messfehlers, der hohen Beschaffungskosten sowie der schwierigen Verarbeitbarkeit der Piezosensoren werden sie vor allem im Labor bzw. in Prüfständen eingesetzt.

Mit Mikro-Elektromechanischen Systemen (sog. MEMS) werden Beschleunigungen durch ein mikrotechnisch realisiertes Feder-Massesystem detektiert. MEMS zeichnen sich durch eine hohe Robustheit und Langzeitstabilität sowie durch die Fertigung mit Mikrotechnologien erzielbare kleine Baugröße von wenigen mm und gleichmäßige Produktqualität bei geringen Herstellungskosten aus. Weiter haben MEMS eine hohe Messsignal-Linearität über einen weiten Temperaturbereich und sehr gute MTTF- (Mean-Time-To-Failure-) Werte. Angesichts dieser Eigenschaften sind MEMS heute sowohl in der EDV- und Kommunikationstechnik (Festplatten, Mobiltelefone, usw.) als auch in sicherheitstechnischen Anwendungen, wie im Automotivbereich (Airbags,

ABS- und ESP-Systeme, usw.) verbreitet. Die aktuellen MEMS-Beschleunigungssensoren, wie z.B. von Bosch Sensortec angebotene BMA220, verfügen über einen Messbereich bis $\pm 16g$, eine Messauflösung von $\pm 0,002g$ (14 bit) und eine Messfrequenz von ca. 2 kSamples/sec bei Gehäuseabmessungen von 2 mm \times 2 mm.

Der Partner Lenord+Bauer produziert MEMS-basierte Sensorsysteme für Frequenzen bis maximal 10 Hz für die Neigungsmessung in Portalkränen und die Erfassung von Turmschwingungen in Windkraftanlagen. Der für das geplante Sensorsystem geforderte Messbereich von mehr als $\pm 70g$ und die Messauflösung von 0,05g bei einer Messfrequenz von bis zu 20 kHz ist nicht mit aktuell verfügbaren Technologien realisierbar. Entsprechend sollen erstmals neue nichtlineare Ansätze für MEMS-Sensoren zur vorbeugenden Überwachung von Schäden an Achslagern und Radsätzen von Zügen und Wagons untersucht und mikrotechnisch realisiert werden.

Weiter wurden von den Firmen KES Bremstechnik und Knorr Bremsen erste, mit konventionellen mechanischen Beschleunigungsaufnehmern ausgestattete Sensoren vorgestellt. Bei dem System der Firma KES werden die Rohdaten in einem Datenlogger gespeichert und zeitversetzt zu einem späteren Zeitpunkt analysiert. Das System der Firma Knorr Bremsen führt auf Basis von mechanisch erfassten Beschleunigungswerten bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes eine Notbremsung durch. Dabei erfolgt keine vorbeugende Analyse, sondern eine reaktive Maßnahme auf Basis eines bereits erfolgten Schadensereignisses.

Die Neuheit des von Lenord+Bauer, GEMAC, dem TUC-ZfM durchgeführten FuE-Projektes besteht in der Entwicklung des weltweit ersten mikrotechnisch aufgebauten Echtzeit Sensor- und Monitoringsystems für die Fahrgestellüberwachung und Vermeidung von Entgleisung im Schienenverkehr. Es existierten weder MEMS-Beschleunigungssensoren mit nichtlinearem Verhalten zur Messung von Beschleunigungen bis $\pm 70g$ mit einer Auflösung von 0,05g, noch sind MEMS-Beschleunigungssensoren mit direkt in den Sensor integrierter miniaturisierter Signalerfassungs- und Signalauswertungselektronik verfügbar. Eine weitere Neuheit ist die Entwicklung von intelligenten, selbstlernenden evolutionären Algorithmen, bzw. statistischen Modellen wie Markow- oder Bayessche Netze zur Ermittlung der im Rauschbereich angesiedelten, für Lager-schäden charakteristischen Sensorsignale.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Teilvorhaben der TU Chemnitz arbeiteten das Zentrum für Mikrotechnologien mit den Partnern GEMAC mbH und Lenord+Bauer sehr intensiv zusammen. Mit beiden Projektpartnern wurden gemeinsame Messungen und enge Absprachen zu den jeweils aktuellen Gegebenheiten und Erfordernissen während der Projektlaufzeit durchgeführt. Als besonders fruchtbar stellten sich die gemeinsamen Projekttreffen dar, bei denen, neben der Präsentation der aktuellen Ergebnisse oft auch Messungen vor Ort durchgeführt werden konnten. Weiter gab es eine sehr enge Zusammenarbeit mit dem Technologiepartner des ZfM, Fraunhofer ENAS zur Charakterisierung der Sensoren, wo die eigenen technischen Möglichkeiten nicht ausreichten.

3 Eingehende Darstellung

3.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Es wurden am Zentrum für Mikrotechnologie der TU Chemnitz die Arbeitspakete 2, 3, 4, 5 14, 16, 17 und 19 bearbeitet.

3.1.1 Arbeitspaket 2: Grundlagenuntersuchungen

Die am Zentrum für Mikrotechnologien zu entwickelnden Beschleunigungssensoren müssen extrem robust gegen Stöße ausgelegt sein, da sie im nicht gefederten Radbereich zum Einsatz kommen.

Beschleunigungen bis 70g sollen hochauflösend gemessen werden, wohingegen Stöße mit wesentlich höheren Beschleunigungsamplituden (bis 1000g) kompensiert werden müssen. Die Anwendung von nichtlinearen Federelementen, deren Federsteifigkeit mit steigender Auslenkung zunimmt, bietet den Vorteil, dass ein Anschlagen der seismischen Masse und somit ein notwendiger *reset* des Sensor verhindert werden kann. Im Nachfolgenden werden die Vorbetrachtungen zur Federauswahl und –dimensionierung dargelegt.

Grundlagen Federverhalten

Federn können in vier allgemeine Kategorien bezüglich ihres Verhaltens eingeteilt werden (siehe Abbildung 1). Ein lineares Kraft-Auslenkungsverhalten resultiert in einer konstanten Federsteifigkeit. Bei einem progressiven Verhalten steigt mit höherer Auslenkung die aufzuwendende Kraft, die Steifigkeit der Struktur nimmt zu. Dieser Effekt kann durch eine Vorspannung oder durch den sogenannten Stress-Stiffening bei großen Auslenkungen auftreten. Eine sequentielle Parallelschaltung von Federn führt zu einem linearen Verhalten mit Knickstellen analog eines progressiven Verhaltens. Die Tendenz zum degressiven Verhalten tritt beispielsweise bei MEMS-Elementen mit kapazitivem Wirkprinzip durch elektrostatische Federerweichung in Erscheinung.

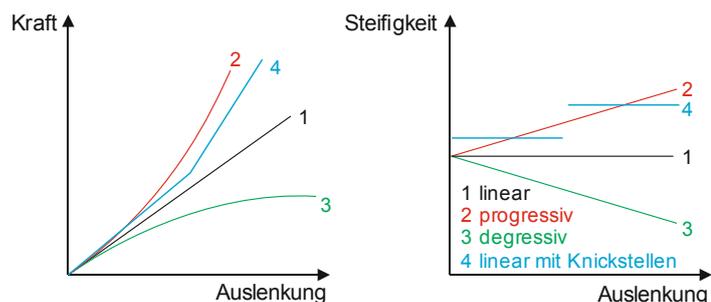


Abbildung 1: Allgemeine Kennlinien für Federkraft und –steifigkeit in Abhängigkeit von der Auslenkung

AIM Technologie und Design-Restriktionen

Der zu entwickelnde Sensor wird unter Verwendung der AIM-Technologie (Air gap Insulated Microstructures) gefertigt. Daraus ergeben sich Restriktionen für das Design der Federn. Somit sind nur Balkenfedern mit rechteckigem Querschnitt herstellbar, deren Breite im Bereich von 1,5 μm bis 3 μm liegt. Die Freistellung der Flächen erfolgt durch Unterätzung nach dem Tiefenätzen von Gräben. Die Breite dieser Gräben und damit der minimal möglichen Abstände beträgt theoretisch mindestens 3 μm . Damit ergibt sich die Bewertung möglicher Lösungsansätze nach Tabelle 1.

Da ein Anschlagen der seismischen Masse bei hohen Beschleunigungen vermieden werden soll und für einen progressiven Anschlag je nach Gesamtauslenkung zugestellt werden müsste, zielen die Lösungsansätze auf eine progressive Feder. Progressive Anschläge werden nicht betrachtet.

Tabelle 1: Lösungsansätze für progressives Federverhalten und AIM

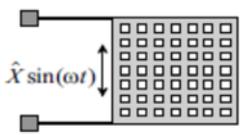
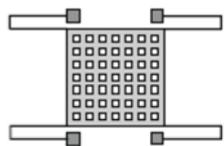
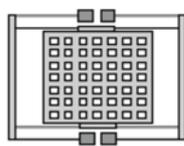
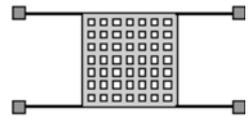
Prinzip	Bewertung für AIM1	
Pre-Stress (vorgespannte Strukturen)	schwierig / sehr aufwändig	
Sequentielle Parallelschaltung mehrerer Federn (Federkaskade)	prinzipiell möglich aber beschränkt durch Minimalabstand	+
Stress stiffening (bei großen Auslenkungen)	gut realisierbar durch Geometrie	
		++

Bauformen ausgewählter Federn

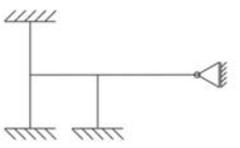
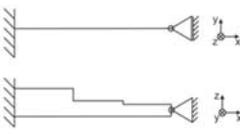
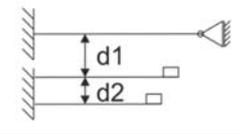
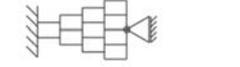
Federn gibt es in zahlreichen Ausführungen, in Tabelle 2 wurde eine begrenzte Auswahl bezüglich ihres Verhaltens, ihrer Eignung für AIM und hinsichtlich Symmetrie gegenübergestellt. Dabei beziehen sich die Führungen auf die Gesamtaufhängungen des Sensors. Die Vierfeder-Führung wird favorisiert, da diese durch ihren prinzipiellen Aufbau bei höheren Auslenkungen ein progressives Verhalten zeigt. Klassische Lösungen wie beispielsweise Blatt- und Kegelfeder lassen sich mit AIM Technologie nicht fertigen.

Auf Grundlage dieser Auswahl werden im folgenden Abschnitt potentielle Federlösungen für den AIM-Sensor in Hinblick auf das Zielverhalten näher untersucht.

Tabelle 2: Vergleich und Bewertung ausgewählter Federlösungen

Federelement	Skizze	Bemerkungen	Verhalten	AIM ¹	Gesamt ¹
Zweifeder-Führung [1]		Querversatz, unempfindlich bei Materialspannungen, große Durchsenkung	linear	+	-
Bügfeder-Führung [1]		kein Querversatz, unempfindlich bei Materialspannungen, große Durchsenkung	linear	+	-
Stegführung [1]		kein Querversatz, unempfindlich bei Materialspannungen, geringe Durchsenkung	linear	+	-
Vierfeder-Führung [1]		kein Querversatz, Materialspannungen ändern Federsteifigkeit (stress stiffening), geringe Durchsenkung	progressiv	+	++

¹ ++ = sehr gut, + = gut, o = ausreichend, - = mangelhaft, - - = unzureichend

Federelement	Skizze	Bemerkungen	Verhalten	AIM ¹	Gesamt ¹
Blattfeder [2]		typisch für Kfz-Technik	progressiv	-	-
Kegelfeder [3]		typisch für Kfz-Technik	progressiv	-	-
Einfacher Biegebalken		symmetrische Kennlinie	progressiv	+	++
Biegebalken mit Quersteg		symmetrische Kennlinie	progressiv	+	++
Biegebalken mit Quersteg und Zwischenlager		unsymmetrische Kennlinie	progressiv	+	-
Gestufferter Biegebalken		symmetrische Kennlinie	progressiv	0	+
Anschlag mit Federkaskade		minimaler Abstand definiert Weg bis zur Versteifung	linear mit Knicken	-	-
Federstufen		hoher Platzbedarf	unbekannt	+	o

Untersuchung potentieller Federlösungen

a) Zielvorgaben

Die Zielvorgaben orientieren sich an den Erfahrungen des Zentrums für Mikrotechnologien bei der Entwicklung von MEMS und den Anforderungen an den zu entwickelnden Sensor. Sie bieten eine Richtlinie für die Bewertung untersuchter Federstrukturen.

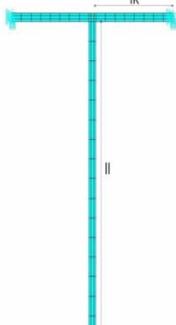
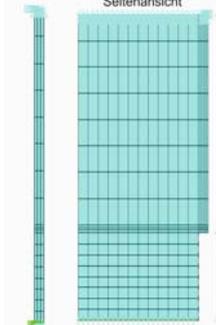
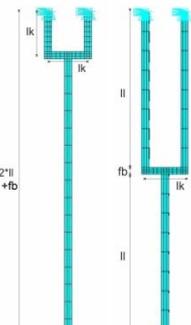
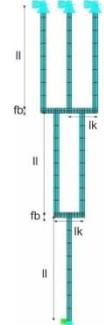
1. Auslenkung von 0 bis 500 nm im Messbereich 0 bis 70g möglichst linear
2. Nichtlineare Versteifung ab einer Auslenkung von 500 nm, so dass kein Anschlag bei einer Beschleunigung von 1000g erfolgt (bei einer maximalen Auslenkung 3 μm und einer angenommenen Masse von 130 μg)
3. Sensor wird mit 4 oder 6 parallelen Federn aufgehängt

b) untersuchte Lösungen

Es wurden fünf potentielle Federdesigns mit der Finiten Elemente Methode (FEM) bezüglich Nichtlinearität untersucht und bewertet (siehe Tabelle 3). Die Federbreiten wurden wie für AIM Technologie typisch mit 1,8 μm definiert. Alle Federn besitzen eine

vergleichbare Federsteifigkeit im linearen Bereich (200 bis 400 N/m), Dimensionsvariationen wurden ebenfalls berücksichtigt. Die Strukturen f0s und f4 zeigen bei der Verhaltenssimulation eine ausgezeichnete Linearität im definierten Messbereich auf, aber nur eine unzureichende Versteifung bei höheren Auslenkungen. Struktur f2 wies in der Simulation eine starke Progressivität auf, benötigt aber weitere Prozess-Schritte in der Herstellung. Auf Grund dieser Tatsachen wurden die Federgeometrien f1 und f3 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, da sie Linearität und Progressivität entsprechend vereinen. Die Federsteifigkeit und Nichtlinearität kann durch Geometrieparameter eingestellt werden (siehe Tabelle 4).

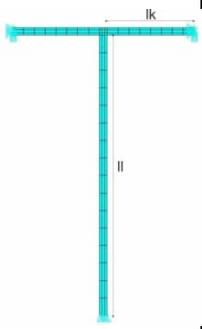
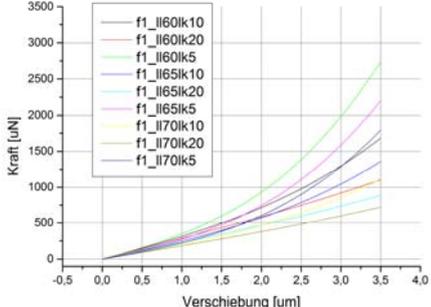
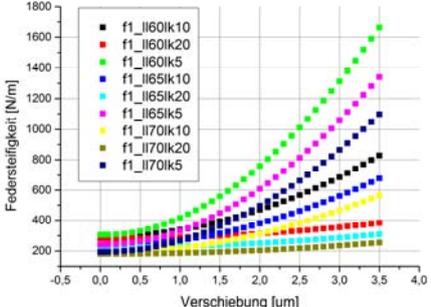
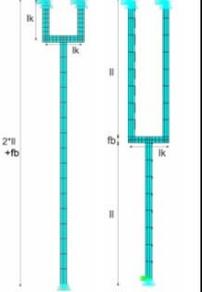
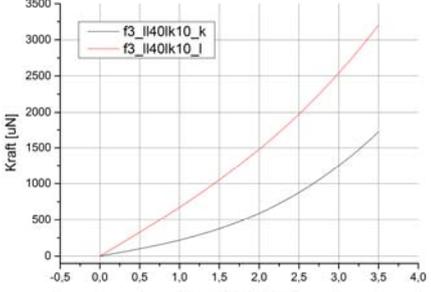
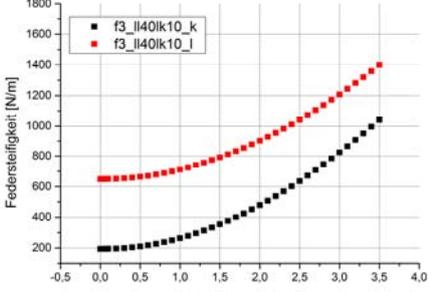
Tabelle 3: Vergleich und Bewertung der untersuchten Federstrukturen

Bezeichnung	f0s	f1	f2	f3	f4
Model					
Linearität im Messbereich²	++	o	--	+	++
Versteifung im Kompensationsbereich^{2,3}	--	+	++	+	--
Fertigung²	++	++	o	++	++
Gesamt	8	12	10	13	8

² ++ = sehr gut (4), + = gut (3), o = ausreichend (2), - = mangelhaft (1), -- = unzureichend (0)

³ Versteifung im Kompensationsbereich geht mit doppelter Wertung ein

Tabelle 4: Finale Federauswahl

	Geometrie	Kraft-Weg-Kennlinie	Federsteifigkeit-Weg-Kennlinie
f1			
f3			

Ergebnisse aus den Grundlagenuntersuchungen

Es wurden verschiedene Federlösungen betrachtet und für den Anwendungsfall bewertet. Daraus ergeben sich zwei idealisierte Federlösungen, die eine lineare Auslenkung im Messbereich und eine nichtlineare Versteifung im Kompensationsbereich realisieren. Diese idealisierten Lösungen müssen im weiteren Projektverlauf unter den Randbedingungen der AIM Technologie, wie perforierte Einspannstellen, weiter untersucht und optimiert werden.

3.1.2 Arbeitspaket 3: Gesamtkonzept

Dieses Arbeitspaket wurde aufgrund des fehlenden Mitarbeiters verzögert gestartet, was einen Zeitverzug für die folgenden Arbeitspakete von ca. 3 Monaten zur Folge hatte. Es fanden dazu Abstimmungen mit den Projektpartnern statt. Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 bilden die Grundlage für das Gesamtkonzept.

Dabei wurden die für AP4 notwendigen Randbedingungen formuliert. Diese sind der Übersicht halber im folgenden Abschnitt AP4 dargestellt.

3.1.3 Arbeitspaket 4: Entwicklung des nichtlinear messenden MEMS-Beschleunigungssensorelements

Die am Zentrum für Mikrotechnologien zu entwickelnden Beschleunigungssensoren müssen extrem robust gegen Stöße ausgelegt sein, da sie im nicht gefederten Radbereich zum Einsatz kommen. Beschleunigungen bis 70g sollen hochauflösend ge-

messen werden, wohingegen Stöße mit wesentlich höheren Beschleunigungsamplituden (bis 1000g) kompensiert werden müssen. Im Nachfolgenden werden die Betrachtungen zu Feder- und Sensordesign in AIM Technologie dargelegt.

Auswahl der Federgrundstruktur

Ausgehend von den dargestellten Voruntersuchungen zu Federformen und -verhalten wurde für den zu entwerfenden nichtlinearen AIM-Sensor eine T-Federform (Abbildung 22) gewählt. Diese Geometrie ist besonders gut für die AIM-Technologie geeignet.

Einfluss der AIM-Struktur auf das Federverhalten

Bei der AIM-Technologie erfolgt die Freilegung der Siliziumflächen durch Unterätzung der Struktur nach dem Tiefenätzen von Gräben. Die Breite dieser Gräben und damit der minimal möglichen Abstände beträgt theoretisch mindestens $3\ \mu\text{m}$. Die gesamte aktive Struktur ist somit perforiert und ihre Steifigkeit ist im Vergleich zu Siliziumblockstruktur geringer.

Dies hat Auswirkungen auf das gesamte Federverhalten, da bei einer Auslenkung der Feder kleine Verschiebungen in der AIM-Gitterstruktur auftreten und keine ideale Einspannung für die Federn angenommen werden kann. Das Ergebnis sind geringere Spannungen und Dehnung in der Einspannstelle der Feder und damit eine Verringerung des Stress-Stiffening-Effekts bzw. der Nichtlinearität. Abbildung 3 zeigt die deutliche Verringerung der Nichtlinearität der Gesamtfeder im Vergleich zur Vollsilizium-Struktur (L99), einfach perforierter Struktur (L90) sowie diversen AIM-Layouts mit unterschiedlichen großen Perforationen. Generell gilt, dass die Nichtlinearität mit kleineren Durchbrüchen auf Grund der Versteifung der Gesamtstruktur zunimmt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Versteifungen im Rahmen einen größeren Einfluss haben als die Versteifungen in der beweglichen Masse.

Für den zu entwickelnden AIM-Sensor sind somit möglichst kleine Perforationen für ein entsprechend nichtlineares Verhalten entscheidend. Die Nichtlinearität ist damit technologischen Begrenzungen unterworfen.

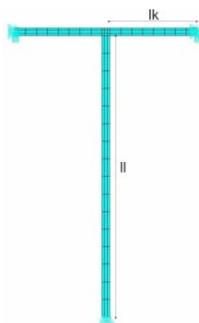


Abbildung 2: Federgrundstruktur

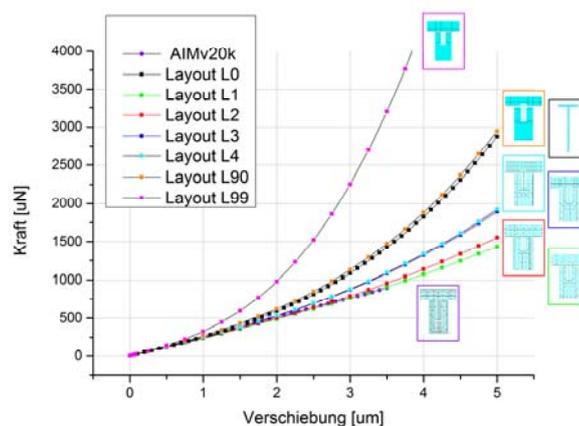


Abbildung 3: Einfluss von Perforationen auf das Kraft-Weg-Verhalten

Entwurfsstrategie für den nichtlinearen AIM-Sensor

Der Entwurfsprozess für den nichtlinearen AIM-Sensor ist in Abbildung 4 dargestellt. Das nichtlineare Federverhalten (Kraft-Weg-Kennlinie) wurde mit der Finiten-Elementen-Methode (FEM) berechnet. Dazu kommt die Software ANSYS zum Einsatz. Aus dieser Kennlinie wurden Fitparameter abgeleitet, welche Eingabeparameter für ein

nichtlineares Netzwerkmodell des Sensors sind. Das nichtlineare Modell des Sensors ist eine Weiterentwicklung im Projekt auf Basis eines linearen Netzwerk-Modells. Weiterhin gehen in dieses Modell die Masse des Sensors ein, welche sich über dessen Layout bestimmt. Die Dämpfung wurde analytisch über die Anzahl der Kammelektroden abgeschätzt. Das Ergebnis der Simulation des nichtlinearen Modells des Sensors ist zum einen eine frequenzabhängige Übertragungskennlinie und zum anderen das zeitabhängige Verhalten bei variabler Anregungsbeschleunigung und –frequenz.

Mit der folgend dargestellten Entwurfsstrategie wurden verschiedene Feder und Sensorvarianten untersucht und die resultierten Erkenntnisse im finalen Entwurf zusammengeführt.

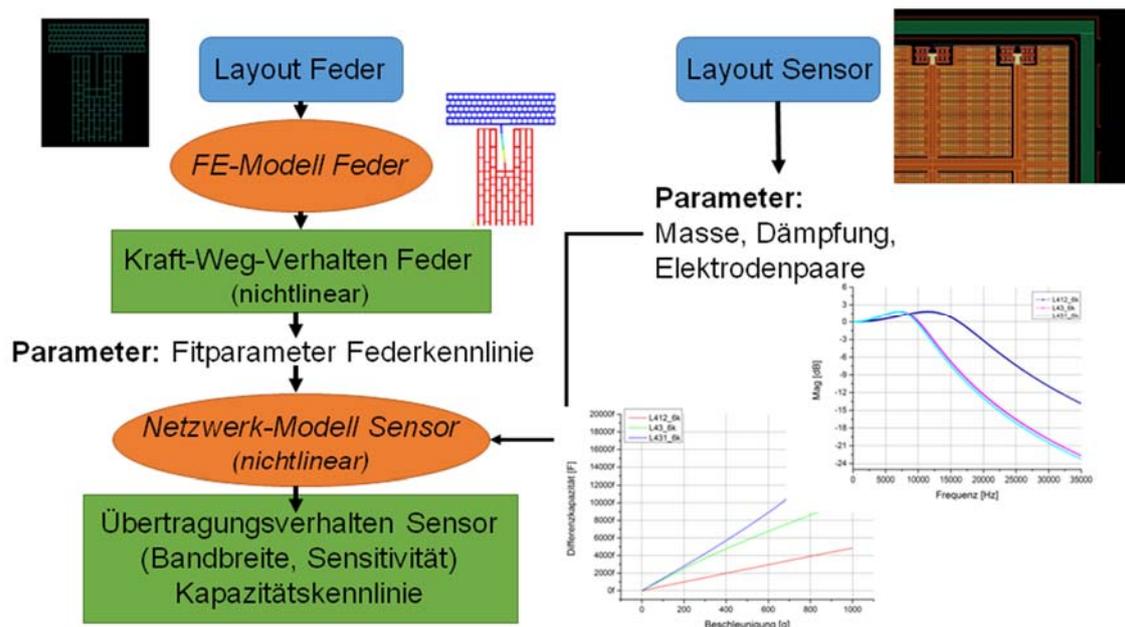


Abbildung 4: Überblick zur Entwurfsstrategie des nichtlinearen Sensors

Korrektur der Anforderung durch Erkenntnisse aus den anderen Arbeitspaketen

Untersuchungen von Lenord & Bauer an einem Schiene-Rad-Teststand und die Messung der auftretenden Beschleunigungen und derer Frequenzspektren zeigten, dass für die signifikanten Signale zur Detektion von Schäden im System, im Bereich bis 15 kHz liegen. Die Zielvorgabe der Bandbreite des Sensors wurde entsprechend korrigiert. Da eine hohe Bandbreite physikalisch bedingt mit einer Verringerung der Sensitivität des Sensors einhergeht, wirkt sich diese Änderung positiv auf die Auswertbarkeit des Sensorsignals aus. Die Anforderung, dass kein Anschlag bei einer Beschleunigung von 1000g erfolgen darf, bleibt bestehen.

Finaler Entwurf (Sensor-Retikel)

Aus den geänderten Anforderungen sowie der Bedingung ein möglichst hohes Sensorsignal bei einer Bandbreite von 15 kHz zu erhalten, wurden vier verschiedene Sensoren auf einem Retikel (Abbildung 5) vorgesehen. Ausgangspunkt für den Entwurf war ein vom Zentrum für Mikrotechnologien entwickelter und gefertigter linearer Sensor, welcher bereits für Messungen und Anbindung an den ASIC an den Projektpartner GEMAC übergeben wurde.

Die Sensorfläche wurde auf $(5 \times 5) \text{ mm}^2$ erhöht und der Abstand der Elektroden verringert. Die damit erhöhte Anzahl an Elektrodenkämmen resultiert in einer höheren kapazitiven Empfindlichkeit.

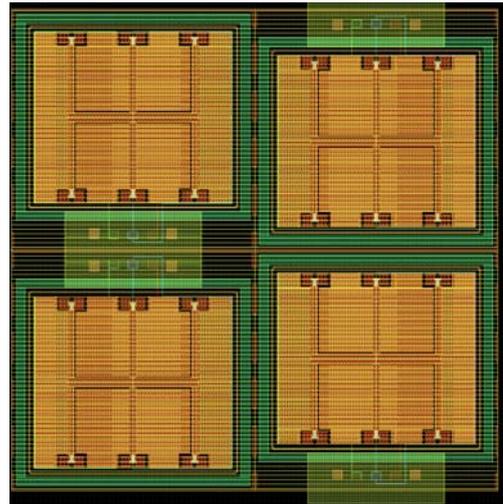
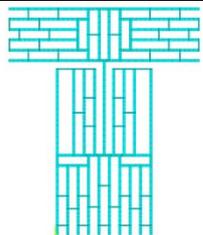
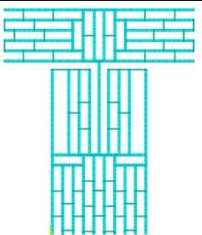
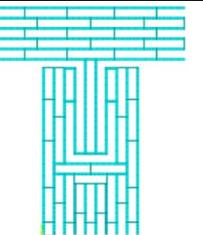


Abbildung 5: Retikel mit vier AIM-Sensoren

Die Sensoren unterscheiden sich nur im Federdesign. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 5 stellt die Entwürfe gegenüber. Es wurden zwei 15 kHz Varianten mit unterschiedlichem Fertigungsrisiko gewählt, eine 20 kHz Variante mit linearem Verhalten sowie eine 10 kHz Variante, welche durch die geringere Federsteifigkeit ein deutlich nichtlineares Verhalten zeigt.

Tabelle 5: AIM-Federlayouts im finalen Entwurf

Federlayout				
Bezeichnung	L72	L81	L91	MM20k
-3dB-Frequenz	15 kHz	15 kHz	10 kHz	20 kHz
Verhalten	nichtlinear	nichtlinear	nichtlinear	linear
Fertigungsrisiko	moderat	hoch	moderat	gering

Sensorverhalten finale Entwürfe

Das nichtlineare Sensorverhalten wurde mit den in Tabelle 5 dargestellten Federstrukturen mit dem beschriebenen Netzwerkmodell des Sensors simuliert. Die seismische Masse ist jeweils mit sechs Federn aufgehängt (Bezeichnung „_6k“). Durch die Erhöhung der Sensorfläche ergibt sich eine seismische Masse von $271 \mu\text{g}$. Der Anschlag der Sensoren wurde bei $3,5 \mu\text{m}$ durch Stopper realisiert.

Wie gefordert schlägt kein Sensor bei 1000g an (Abbildung 6 6), Sensor L91_6k zeigt relativ zu den anderen Sensoren die größte Auslenkung bei gleicher Beschleunigung. Ursache ist hier die geringere Steifigkeit der Federn (Abbildung 77). Dies hat eine höhere Differenzkapazität bei gleicher Anregung zur Folge (Abbildung 78).

Tabelle 6 stellt die Nichtlinearität der Sensoren gegenüber. MM20k_6k besitzt ein sehr lineares Verhalten. L72_6k und L81_6k zeigen gleiches Verhalten, das AIM-Layout hat jedoch ein unterschiedliches Fertigungsrisiko. Die Charakterisierung der gefertigten Sensoren soll den realen Einfluss der AIM-Struktur auf das nichtlineare Sensorverhalten aufzeigen. L91_6k weist eine sehr hohe Nichtlinearität auf. Ursache ist die niedrigere Bandbreite und damit geringere Steifigkeit.

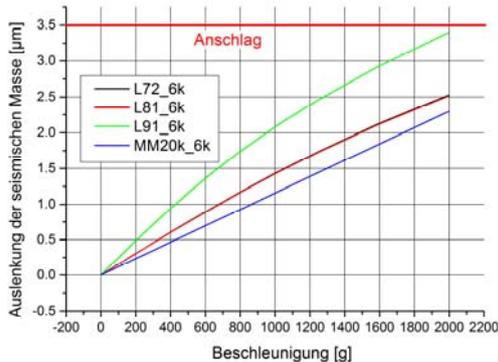


Abbildung 6: Beschleunigungsabhängige Auslenkung der Sensoren

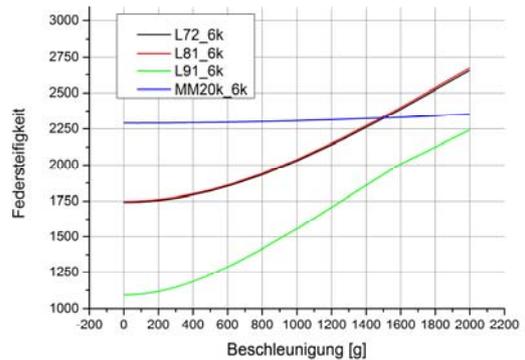


Abbildung 7: Beschleunigungsabhängige Steifigkeit der Sensoren

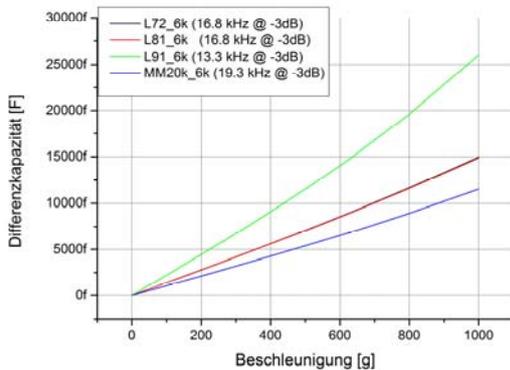


Abbildung 8: Differenzkapazität in Abhängigkeit der Beschleunigung

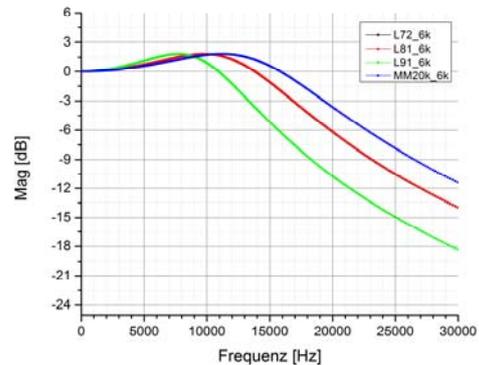


Abbildung 9: Frequenzgänge der Sensoren

Tabelle 6: Relative Abweichung der beschleunigungsabhängigkeit. Auslenkung vom linearen Verhalten

Sensor	@100g	@1000g	@2000g
MM20k_6k	0 %	-0,3 %	-1,1 %
L72_6k	-0,1 %	-6,3 %	-17,2 %
L81_6k	-0,1 %	-6,3 %	-17,2 %
L91_6k	-0,2 %	-14,5 %	-30,1 %

Abbildung 9 zeigt die simulierten Frequenzgänge der hier dargestellten Sensoren. Tabelle 7 stellt die wichtigsten Parameter wie die simulierten -3dB-Frequenzen und kapazitiven Empfindlichkeiten zusammenfassend im Überblick dar. Im Vergleich zur Ausgangsvariante AIMv20k_6k konnte eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit erreicht werden. Weiterhin ist die notwendige Auflösung der Elektronik aufgeführt, die

gegeben sein müsste, um die im Antrag geforderte Gesamtauflösung der Beschleunigung von $\pm 0,05g$ zu erreichen.

Tabelle 7: Sensordaten im Überblick

Sensor	Kapazitive Empfindlichkeit bei 100g	-3dB-Frequenz	Normierte Kapazitive Empfindlichkeit	Auflösung Elektronik für $S=\pm 0,05g$
	fF/g	Hz		fF
AIMv20k_6k	3,76	22776,33	1	0,19
MM20k_6k	10,61	19317,54	2,82	0,53
L81_6k	13,89	16839,99	3,69	0,69
L72_6k	13,94	16839,99	3,71	0,70
L91_6k	22,28	13335,37	5,92	1,11

3.1.4 Arbeitspaket 5: Fertigung von Testmustern

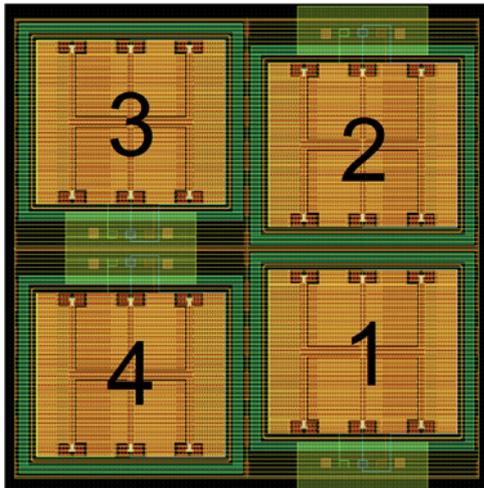


Abbildung 10: Retikel mit den AIM-Sensortypen, 1...L81; 2...L72; 3...MM20; 4...L91,

Auf einem Retikel werden alle vier ausgewählten Sensortypen präpariert (Abb. 10). Wodurch auf alle Sensorstrukturen gleiche Prozessbedingungen wirken. Die Sensoren unterscheiden sich im Federdesign. Tabelle 8 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt die Entwürfe gegenüber und gibt die erzielten Bandbreiten an. Für die nichtlinearen Federvarianten wurden zusätzliche Versteifungen in der Rahmenstruktur ergänzt (um den Stress-Stiffening-Effekt zu verstärken), deren Abmaße die für die AIM-Technologie erprobten Designregeln unter- bzw. überschreiten. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Fertigungsrisiken.

Im Nachfolgenden werden die, zur Bearbeitung notwendigen Schritte der AIM Technologie vorgestellt.

Tabelle 8: AIM-Federlayouts im finalen Entwurf

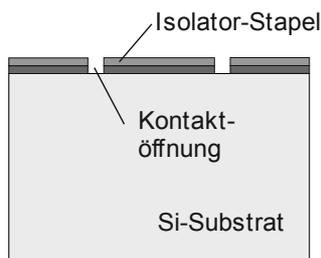
Federlayout				
Bezeichnung	L72	L81	L91	MM20k
-3dB-Frequenz	15 kHz	15 kHz	10 kHz	20 kHz
Verhalten	nichtlinear	nichtlinear	nichtlinear	linear

Fertigungsrisiko	moderat	hoch	moderat	gering
------------------	---------	------	---------	--------

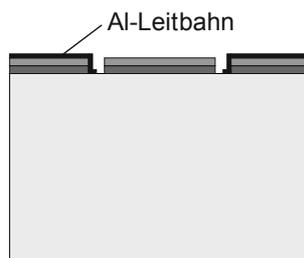
Technologieablauf AIM-Technologie

Abbildung 11 zeigt den wesentlichen technologischen Ablauf des AIM Fertigungsprozesses. Der AIM-Fertigungsprozess beinhaltet vier Lithografie-Schritte zur Strukturierung unterschiedlicher Materialien und Schichtstapel. Eine Besonderheit hierbei ist die Verwendung eines leitfähigen Substratmaterials (hochdotiertes einkristallines Silizium).

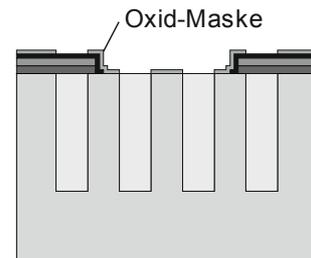
1 Abscheidung und Strukturierung des Isolatorstapels



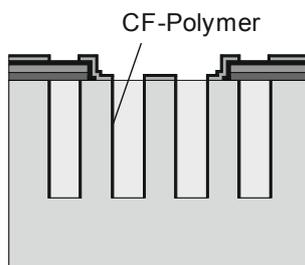
2 Abscheidung und Strukturierung des Metalls



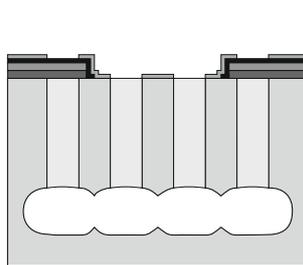
3 Rückätzen des Schichtstapels und tiefes Siliziumätzen



4 Abscheidung des CF-Polymers und Spacer-Ätzen



5 Freilegen der Struktur und Entfernen des Polymers



6 Entfernen der Oxidmaske und des Si unter den Trägern

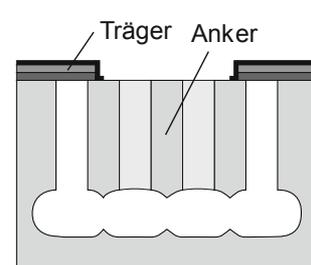


Abbildung 11: AIM Ablauf in sechs Schritten, (1) LE1(Lithografieebene1); (2) LE2; (3) LE3 und LE4 +Tiefätzen; (5) Freilegen; (6) Seitenwandschieben

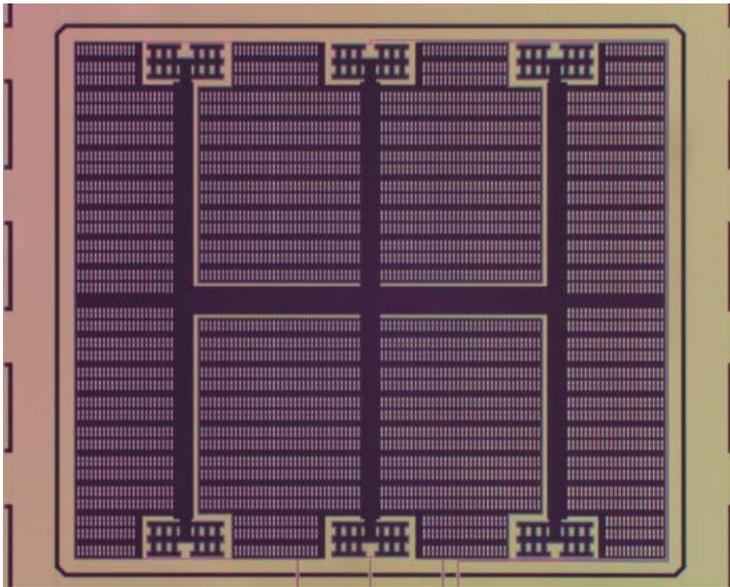


Abbildung 12: Lichtmikroskopische Aufnahme des fertig prozessierten Sensors MM20

Die Fertigung beginnt mit Waferkennzeichnung, RCA-Reinigung und dem Aufbringen einer Isolationschicht (Thermisches-SiO₂/PE-CVD-SiO₂), die mittels der ersten Lithografie-Ebene an den gewünschten Stellen zum Silizium mittels Trockenätzen geöffnet wird. Darüber wird, nach entfernen der Lackmaske, Aluminium abgeschieden und mit einer zweiten Lithografie-Ebene über eine SiO₂-Hartmaske strukturiert. Die hierbei verbleibenden Aluminium-Strukturen bilden zum einen die elektrischen Verbindungen und zum anderen die mechanischen Aufhängungen, an denen die, sonst nur von einem „Luftspalt“ umgebenen, Strukturen befestigt sind. Mit der dritten Strukturierung wird der Isolatorstapel über dem Silizium an Stellen entfernt, an denen die Tiefenätzungen erfolgen sollen, damit in der vierten Litho.-Ebene, die ins Silizium tief zu ätzenden Strukturen mit SiO₂-Hartmaske übertragen werden können. Die, die gewünschten Sensoreigenschaften, wesentlich beeinflussenden Prozesse finden nach der vierten Lithografie-Ebene statt; das tiefe Siliziumätzen und das sog. Seitenwandschieben. Zum tiefen Siliziumätzen wurde DRIE verwendet. Mit dem DRIE-Prozess (Deep Reactive Ion Etching; auch Boschprozess genannt) werden hohe Aspekt-Verhältnisse zwischen Breite und Tiefe einer geätzten Struktur erreicht. Dadurch gelang es im Projekt, zur Realisierung der hohen Sensorempfindlichkeit, 2 µm schmale Elektrodenabstände bei 65 µm tiefen Elektrodenstrukturen in das Silizium zu ätzen (Abbildung 13). Die Seitenwände dieser Gräben sind Prozessbedingt mit einem CF-Polymer bedeckt, was die Seitenwände vor Materialabtrag beim weiteren ätzen schützt. Anschließend wird mit anisotropem Trockenätzen der Grabenboden vom Polymer befreit, um anschließend mit einer Isotropen Ätzung die Struktur am Boden aus dem Substratmaterial heraus abzutrennen und damit freizulegen. Die nun am Boden vom Substrat abgetrennte Struktur ist nur noch über die Seitenwände an den Stellen verbunden, an denen die

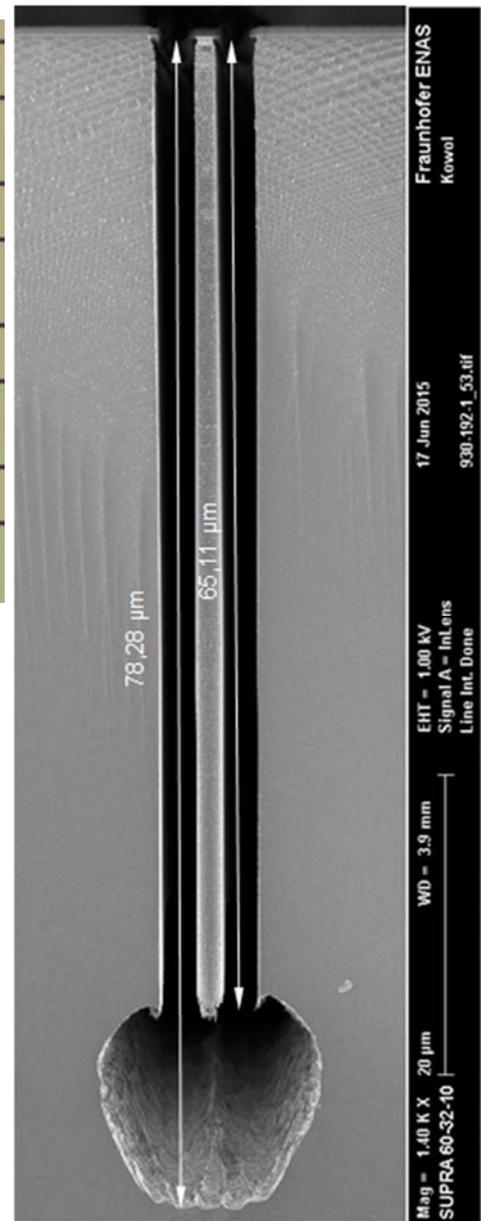


Abbildung 13: REM-Bild; 2 µm breite Gräben legen eine 65 µm tiefe Elektrode frei.

Aluminiumträger das Tiefätzen maskieren. Um diese Verbindungen elektrisch Isolierend zu beseitigen ist ein isotroper Trockenätzschritt nötig, der im weiteren Seitewandschieben genannt wird. Nachdem das passivierende Seitewandpolymer entfernt wurde, werden beim Seitewandschieben alle offenen Siliziumflächen der tiefgeätzten und freigelegten Struktur um etwa $1\ \mu\text{m}$ abgetragen, was alle luftisolierten Strukturen auf ein Maß von $2\ \mu\text{m}$ Breite zurückätzt (z.B. die Federn der beweglichen Elektrode im Sensor). Außerdem wird dabei auch die Masse der aufgehängten Strukturen reduziert. In Abbildung 13 wird am Beispiel des Sensors MM20 eine Lichtmikroskop-Aufnahme der fertig präparierten Sensorstruktur gezeigt.

In vergrößerter Darstellung des Ankerbereichs ist auch die Federstruktur in Abbildung 14 zu erkennen

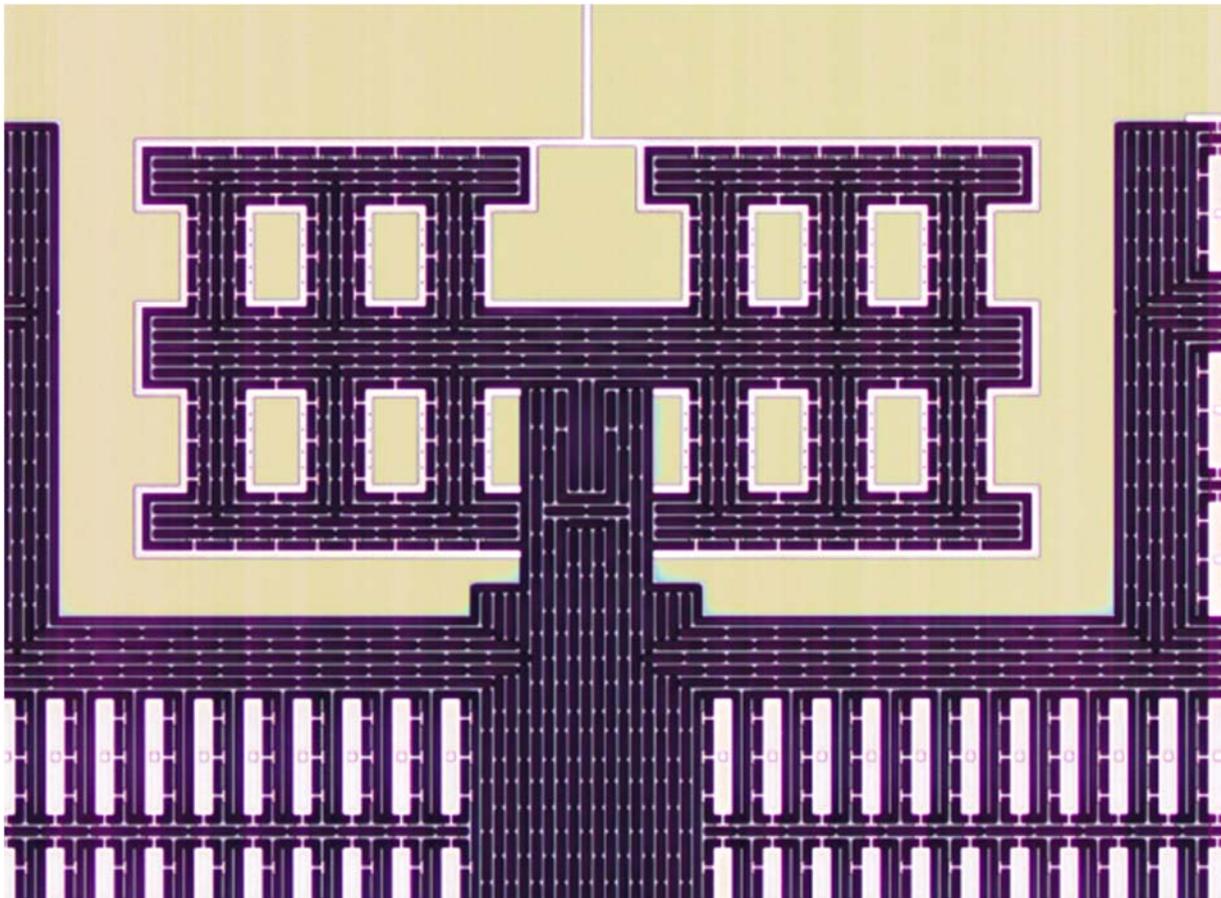


Abbildung 14: Ankerbereich mit Feder des MM20 Sensors, im unteren Bildbereich sind die Elektrodenkämme und Schirmbalken zu sehen.

Parallel zur Fertigung der Sensorwafer wurden Deckelwafer hergestellt, die mittels Glasfrit-Bonden in Stickstoffatmosphäre unter Normaldruck auf den Sensorwafer gebondet wurden und dadurch jeden Sensorchip separat hermetisch versiegeln und damit vor Beschädigung und Verunreinigung schützen. Im Anschluss daran wurden die Waferverbunde mit einer kommerziellen Trennsäge (DISCO DFD 6340) in die Sensorchips vereinzelt.

Messprinzip der elektrischen Charakterisierung

Mit dem Isolationstest wird zunächst geprüft ob alle Elektroden und beweglichen Elemente eines Chips elektrisch voneinander isoliert sind und das generell elektrischer Kontakt der Messspitzen mit dem Kontaktpad des Chips besteht. Dafür wird zunächst

ein sog. Bulktest durchgeführt, dessen erfolgreiches Bestehen darin liegt, einen möglichst niedrigen elektrischen Widerstand zwischen zwei verschiedenen Bulkpads zu messen. Anschließend werden alle Kontakte gegeneinander auf Isolation geprüft, für deren erfolgreiches Bestehen ein möglichst hoher elektrischer Widerstand gemessen werden soll. Im Anschluss wird an allen Chips der sog. Aktivtest durchgeführt, der die Sensorfunktion testen soll.

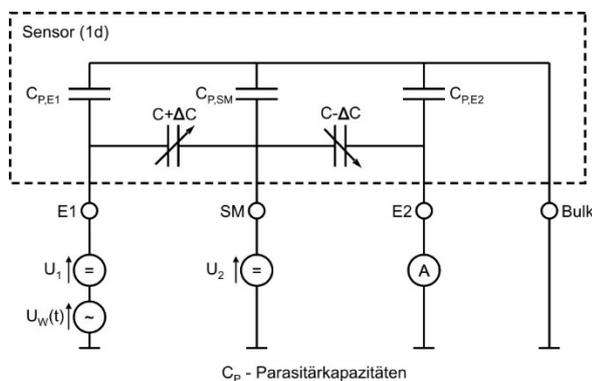


Abbildung 15: Ersatzschaltbild für die dynamische Messung ($U_1 = U_2$, $U_w(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t)$, $A: i(2\omega t) \sim dC/dt$)

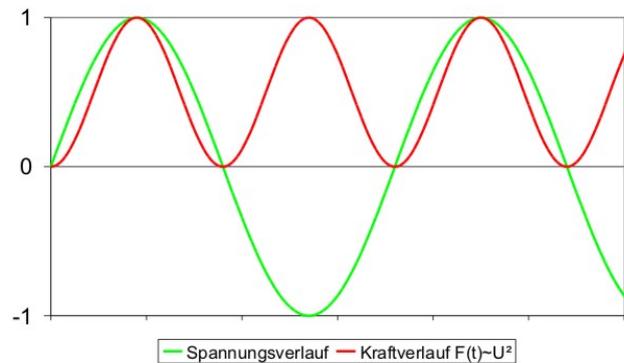


Abbildung 16: Darstellung des Verlaufs der Anregungsspannung und der resultierenden elektrostatischen Kraft (Frequenzverdoppelung)

Für den Aktivtest wird der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellte Aufbau verwendet. Dabei wird die bewegliche Elektrode (SM) über die Festelektrode E1 elektrostatisch zum Schwingen angeregt und die Umladeströme an E2 mittels eines LOCK-IN-Verstärkers gemessen. Zur Anwendung kam dabei die sogenannte „2f (2 ω) Methode“. Bei dieser Methode wird der Effekt genutzt, dass elektrostatische Kräfte immer anziehend sind, unabhängig von der Polarität der Spannung. Dies drückt sich in der Gleichung 1 für die elektrostatische Kraft $F_{el.-st.}$ in der Quadrierung der Spannung U aus und ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** veranschaulicht.

$$F_{el.-st.} = \frac{1}{2} \frac{C \cdot U^2}{d} \quad (1)$$

Dabei ist C die Kapazität und d der Elektrodenabstand. Durch diesen Effekt erfolgt die Auslenkung der beweglichen Elektrode und damit die Änderung der Kapazität mit der doppelten Frequenz des Anregungssignals. Die Umladeströme, die sich proportional zur Kapazitätsänderung verhalten, können damit frequenzselektiv gemessen werden und das Übersprechen des Anregungssignals über die vorhandenen Parasitärkapazitäten wird ausgeblendet.

Die Messungen wurden auf einem kommerziellen Waferprober der Firma SÜSS Micro-Tec AG durchgeführt, so dass neben der Charakterisierung einzelner Elemente auch der zeiteffiziente Test aller Strukturen eines Wafers bei einer festen Frequenz möglich war. In Abbildung 17 (rechts) ist exemplarisch die Messkurve für einen Sensor dargestellt.

Mit dieser Methode wurden alle Chips eines Wafers charakterisiert. Aus den so ermittelten Daten können anschließend Aussagen über die Sensoreigenschaften getroffen werden.

Messergebnisse der elektrischen Charakterisierung (erster Durchlauf)

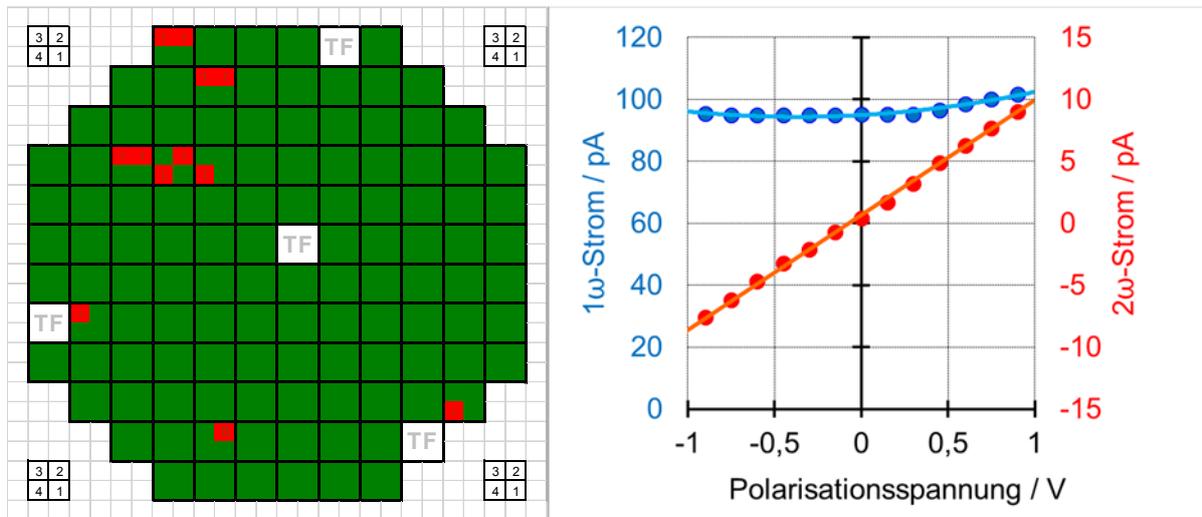


Abbildung 17 (links): Grafische Aufbereitung des Isolationstests am Wafer 930-177-1 (grün... Gut, rot... Fehler); Zahlenquadrate in den Ecken der Darstellung zeigen die Anordnung der Sensoren im Retikel wie in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. (Seite 15); **(rechts):** Darstellung der Abhängigkeiten der Umladeströme von der Polarisationsspannung im dynamischen Messverfahren (Aktivtest) exemplarisch für den gleichen Wafer.

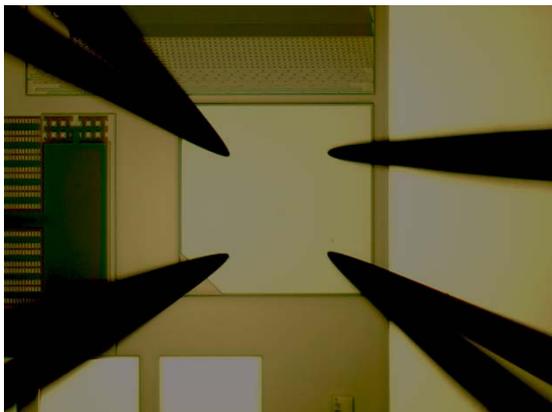


Abbildung 18: Vierpunkt Widerstandsmessung des Substratmaterials der Waferserie 930-177 u. 178

Aufgrund ungewöhnlich hoher Widerstände beim Bulktest wurde wie in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. der spezifische Widerstand des Substratmaterials mit $\rho = 10 \Omega\text{cm}$ bestimmt. Das geordnete Substratmaterial sollte einen spezifischen Widerstand von $\rho < 0,01 \Omega\text{cm}$ haben. Leider fiel dieser Fehler erst bei der Charakterisierung auf. Trotz des zu hohen Substratwiderstands konnten der Isolationstest (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. links) und der Aktivtest durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass die Sensoren sowohl korrekt isolieren als auch mechanisch korrekt arbeiten (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. rechts). Durch den hohen Widerstand werden die Signalströme

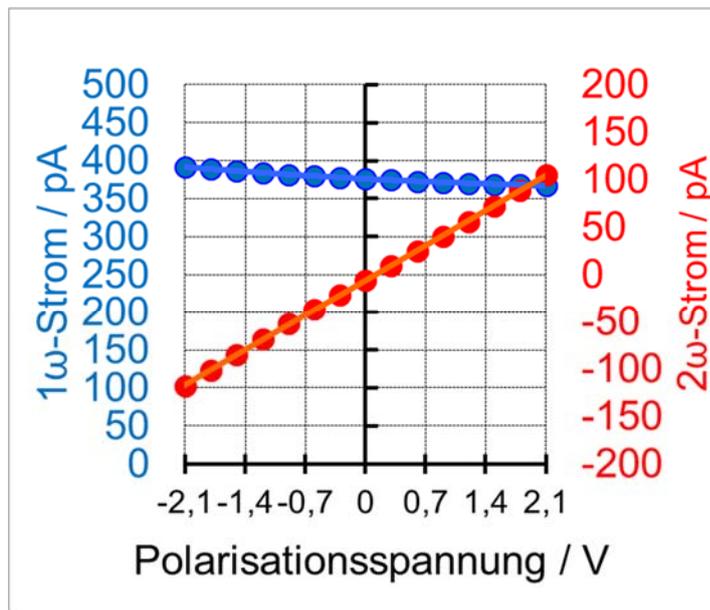
des Sensors aber um mehrere Größenordnungen reduziert, was nicht mehr den, für das Messsystem entworfenen, Signalparametern entspräche.

Die Ursache einer möglichen Waferverwechslung konnte nicht gefunden bzw. nicht nachgewiesen werden. Um einen solchen Fall in Zukunft sicher auszuschließen, wurden zum Messen des Substratwiderstands zusätzliche Testbereiche auf den AIM-Testfeldern der Wafer vorgesehen und präpariert.

Erste mechanisch funktionierende Testmuster mit fehlerhaftem Substratmaterial und damit eingeschränkter elektrischer Funktionalität wurden am 20.07.2015 an den Projektpartner Gemac mbH übergeben. Damit war zu diesem Zeitpunkt **Meilenstein 3** erfüllt.

3.1.5 Arbeitspaket 14: Aufbau MEMS Funktionsmuster

Im Anschluss daran wurde ein zweiter Waferdurchlauf mit leitfähigem Substratmaterial (spezifischen Widerstand des Siliziumsubstrates von $\rho < 0,01 \Omega\text{cm}$) gestartet.



Die proportionale Abhängigkeit des 2ω -Stroms von der Polarisationsspannung Abb. 20 ist ein sicherer Indikator für eine sich korrekt bewegende Elektrodenmasse wenn sich, mit dem Reduzieren der Polarisationsspannung, auch der 2ω -Strom auf null reduziert.

Funktionsfähige Labormuster (vom Wafer 930-202-1, zweiter Durchlauf) konnten am 08.12.2015 an den Projektpartner GEMAC mbH übergeben werden.

Abbildung 20: Darstellung der Umladeströme in Abhängigkeit der Polarisationsspannung

Frequenzverhalten / Bandbreite

Ziel war es, auf einem Wafer alle Sensorvarianten zu fertigen (auch Varianten mit hohem Fertigungsrisiko). Dabei war eine derart große Seitenwandschiebezeit nötig, dass sich sämtliche Strukturen übermäßig verschmälert wurden. Dies führte zur Verringerung der Federsteifigkeit und der Masse der beweglichen Elektrode und damit zur Verkleinerung der Bandbreite und durch die damit verbundene Verkleinerung der Rahmensteifigkeit der AIM-Struktur zur Verringerung der Nichtlinearität.

Exemplarisch für die Bandbreite der Sensoren von Wafern der Serie 930-202 (zweiter Durchlauf, mit elektrisch voll funktionsfähigen und mechanisch beweglichen Sensoren) sind exemplarisch in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 9 die Werte für jeweils ein Retikel angegeben:

Tabelle 9: gemessene -3dB Abknickfrequenzen des Retikels R52 des Wafers 930-202-1

Bezeichnung	L72	L81	L91	MM20
930-202-1	5880	6120	4710	6140
930-202-2	7120	6970	5500	7580
930-202-3	5150	5210	3920	5560
930-202-4vac	-	8970	8160	9360

Durch Variation der Fertigungsparameter wurde folgend versucht die -3dB-Frequenz zu erhöhen. Dazu wurde beispielsweise die Seitenwandschiebezeit optimiert. Bei den oberen drei Wafern wurde lediglich die halbe -3dB-Frequenz erreicht. Am Wafer 4 wurde anschließend mit dem Druck im inneren der Sensoren experimentiert um die Dämpfung zu reduzieren, wodurch 9 kHz Grenzfrequenz erreicht werden konnten.

3.1.6 Arbeitspaket 16: Re-Design

Da der Sensor die hohen Grenzfrequenzen (≥ 15 kHz) fertigungsbedingt nicht erreicht, wurden schließlich Anpassungen an der Siliziumstruktur vorgenommen um die Sensorfeder zu versteifen und dadurch eine höhere Grenzfrequenz zu erreichen. Dazu wurden mit ANSYS Simulationen durchgeführt um die Sensorparameter, unter den während der Prozessierung ermittelten Voraussetzungen, zu optimieren. Mit den Ergebnissen der Simulation konnte dazu am Zentrum für Mikrotechnologien eine zusätzliche Lithografiemaske für die neue Silizium-Ebene hergestellt werden.

Das Design der Feder wurde schließlich soweit versteift, dass die geforderte Grenzfrequenz, trotz der auftretenden Fertigungsbedingungen, erreicht wird (Abb. 21)

3.1.7 Arbeitspaket 17: Aufbau MEMS Demonstrator

Durch die Änderungen in der Siliziumebene konnten schließlich Sensoren für den Demonstrator gefertigt werden. Diese Sensoren wurden für den Aufbau des Demonstrators, zum Verheiraten des MEMS mit dem ASIC, am 18.11.2016 an den Projektpartner Gemac mbH und anschließend zum Einbau in das Gesamtsystem an Lenord+Bauer übergeben.

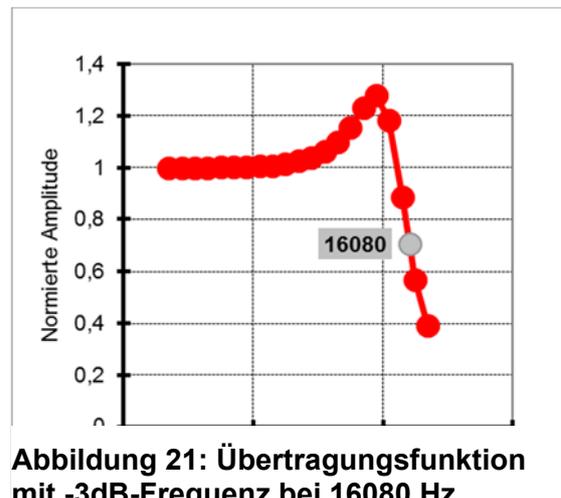


Abbildung 21: Übertragungsfunktion mit -3dB-Frequenz bei 16080 Hz

Charakterisierung des MEMS-Demonstrators

Die Sensoren für den Demonstratoraufbau erreichten deutlich mehr als 15 kHz (Abbildung 21), die Messungen am ZfM wurden mit der bereits vorgestellten 2ω -Methode durchgeführt.

Die Nichtlinearität der Sensoren wurde mit Hilfe von Schock-Untersuchungen an einer Fallmaschine bei Lenord+Bauer durchgeführt (Abb. 22). Dabei wurden Schock-Beschleunigungen bis 1000g auf den MEMS mit aufgebautem ASIC ausgeübt.

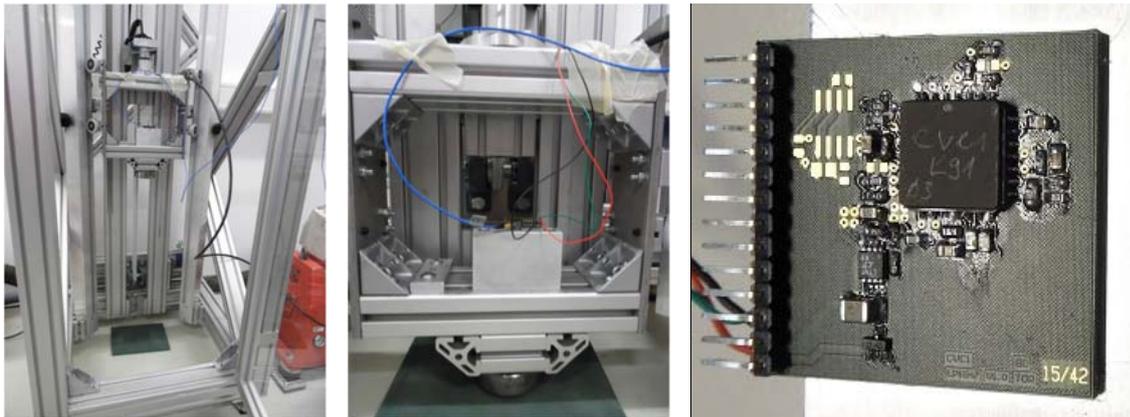


Abbildung 22: Links: Messgestell mit Schienenführung; Mitte: Beschleunigungsrahmen mit Aufnahme für Sensorplatine und Referenzsensor; Rechts: Sensorplatine mit MEMS und ASIC

Der Demonstrator soll im Arbeitsbereich $\pm 70g$ messen. Darauf ist der ASIC auch ausgelegt. Durch maximales Aussteuern des ASICs war es möglich für Testzwecke bis ca. $360g$ zu messen, bevor der Messaufbau in die Begrenzung geht.

Mit einer Samplingrate von $1MHz$ wurde das Signal aufgezeichnet. Der Messaufbau prägte zunächst die Hauptbeschleunigung auf den Sensor und prallte innerhalb der Messzeit von 1 Sekunde noch zweimal auf, wodurch insgesamt 3 Schocks gemessen werden konnten. Dies wurde für verschiedene Maximalbeschleunigungen von 100 bis $1000g$ durchgeführt. Abbildung zeigt die $1000g$ Messung des Referenzsensors als Beispiel für die Schockmessungen.

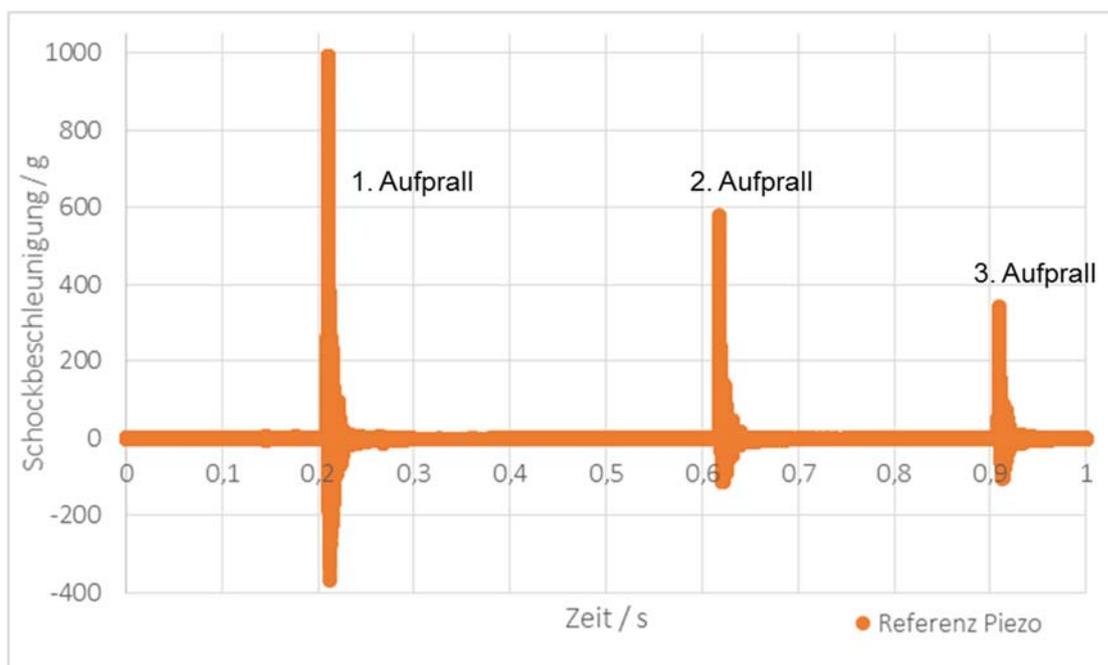


Abbildung 23: Gesamte Messung bei $1000g$ Schockbelastung, $2x$ zurückgeprallt

Der Zeitversatz zwischen MEMS+ASIC und dem Referenzsensor (piezoelektrischer Sensor) von weniger als $100 \mu s$ entsteht in Überlagerung zweier Effekte. Zum einen ist der Referenz-Piezo-Sensor räumlich einige Zentimeter von der MEMS+ASIC Platine entfernt, wodurch das Beschleunigungssignal nicht völlig gleichzeitig bei beiden Sensoren ankommt. Zum anderen benötigt die Auswerte-Elektronik der MEMS+ASIC

Einheit zusammen mit dem Messprinzip am Sensor eine winzige Zeitdauer um das Signal zu verarbeiten und weiterzugeben.

Die geforderte Anschlagsicherheit bis 1000g Schockbelastung wird durch die erhöhten Federsteifigkeiten des Redesigns gewährleistet. Der Sensor schlägt wie gefordert bei 1000g Schockbelastung nicht an und ist im Messsystem nach einer sehr kurzen Ausklingzeit wieder Messbereit. (Abbildungen 23 – 26).

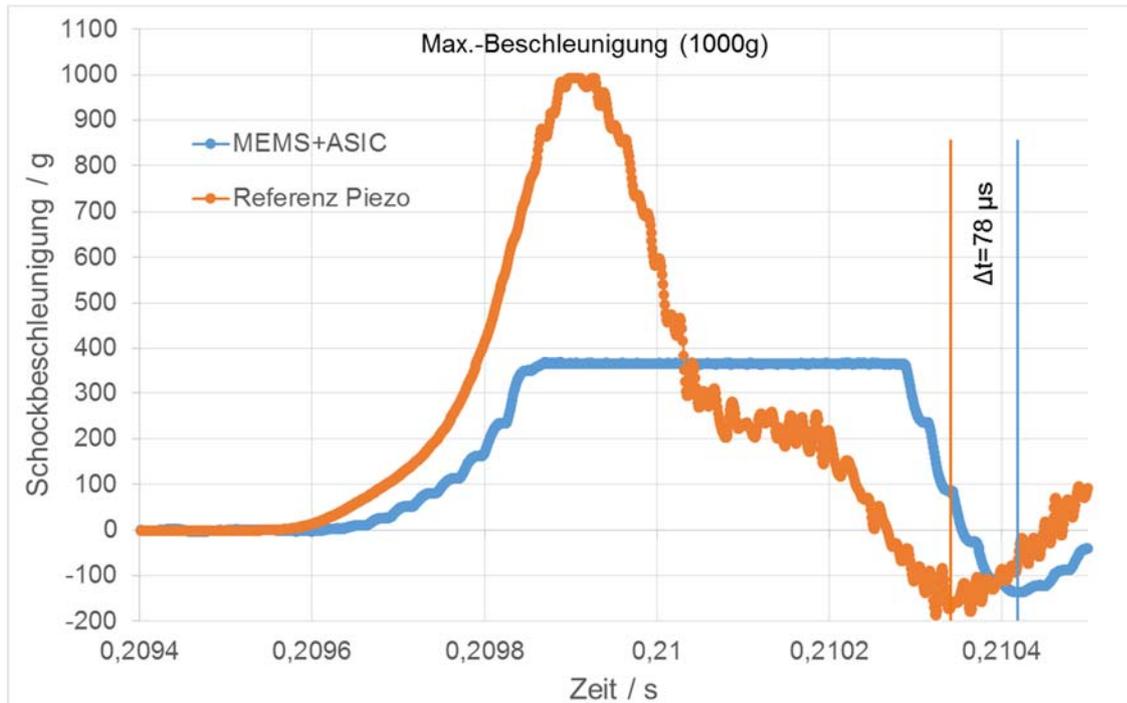


Abbildung 24: Erster Aufprall mit 1000g Maximalbeschleunigung, Zeitlich feiner aufgelöst.

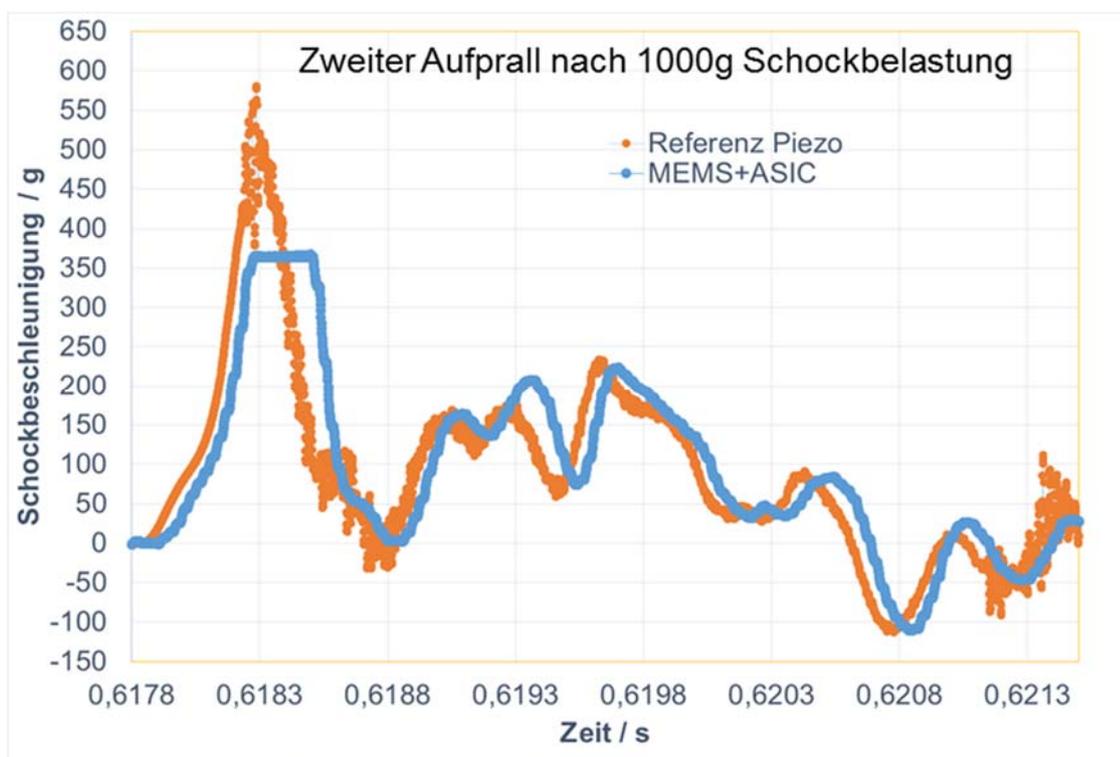


Abbildung 25: Zweiter Aufprall nach 1000g Schock, MEMS+ASIC geht in die Begrenzung bei ca 360g misst aber souverän weiter und bildet, nach wie vor, den Schock präzise ab (vgl. Referenz Piezo)

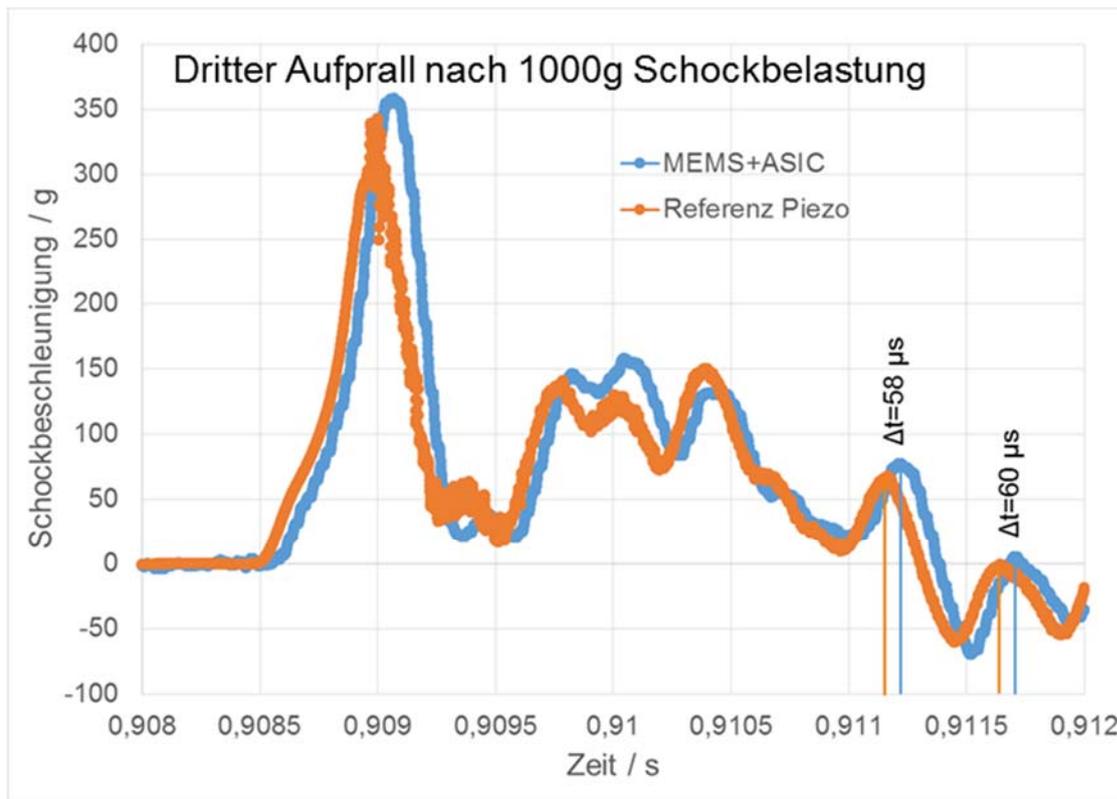


Abbildung 26: Dritter Aufprall nach 1000g Schock, MEMS+ASIC geht gerade noch nicht in Begrenzung.

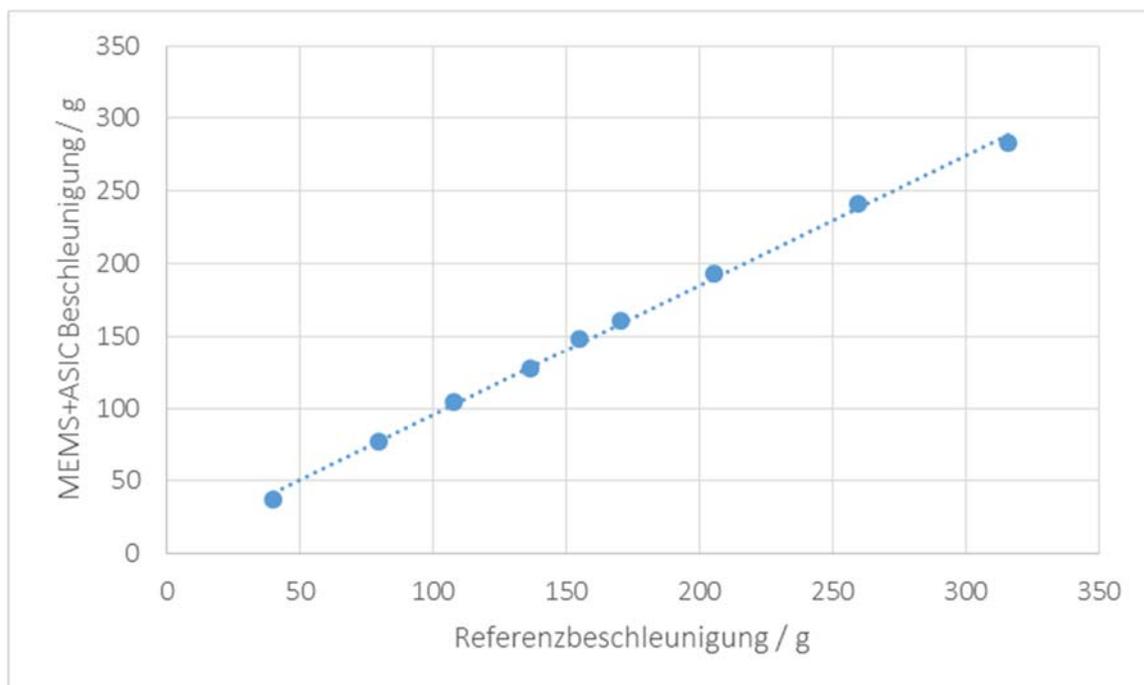


Abbildung 27: Darstellung der Schockbeschleunigungsmaxima im Verhältnis zur Referenzbeschleunigung. Gepunktete Linie ist der lineare Fit.

Die Nichtlinearität war mit den gegebenen Messmitteln nicht nachweisbar. Die Darstellung des Beschleunigungsverhaltens (Abbildung 27) zeigt lineares Verhalten bis zur maximal ermittelbaren Beschleunigung (360g). Die simulativ vorhergesagte Nichtlinearität von ca. 5% bei 360g (Tab. 6, AP4) ist reduziert, was durch die Überätzung, und damit übermäßige Abdünnung der AIM-Strukturen erklärbar ist. Dadurch erhöht sich Nachgiebigkeit der Rahmenstruktur und führt zu einer Verringerung des Stress-Stiffening-Effekts, der maßgeblich für die Nichtlinearität verantwortlich ist. Eine mögliche Abweichung von der Linearität geht leider in der Streuung der Beschleunigungsmaxima unter.

3.1.8 Arbeitspaket 19: Dokumentation

Im Anschluss wurden das Design, die Herstellung und die Charakterisierung in allen Einzelheiten dokumentiert und in dem hier vorliegenden Abschlussbericht dargelegt.

3.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der wesentliche Aufwand im Projekt MikroMonitor bestand an der TU Chemnitz in den geleisteten Arbeitsstunden des wissenschaftlichen Personals. Die wichtigste Position sind demzufolge die Personalkosten. Sachkosten wurden nur in geringem Umfang für Dienstreisen und für Verbrauchsmaterial verausgabt.

3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung des mikrotechnisch aufgebauten "intelligenten" Sensor- und selbstlernenden Monitoringsystems zur Fahrgestellüberwachung und Vermeidung von Entgleisung im Schienenverkehr ist weltweit neu und war mit hohen technischen Risiken verbunden:

Dies betrifft vor allem auch die Entwicklung des weltweit neuen mikrosystemtechnisch aufgebauten MEMS-Sensorelementes für die Detektion von Beschleunigungen mit mindestens ± 70 g, einer Bandbreite von 15 kHz mit einer sehr hohen Auflösung von 0,05 g.

Hinzukommt, dass die Forschungsarbeiten am ZfM der Technischen Universität Chemnitz von den beteiligten industriellen Projektpartnern mitzufinanzieren waren, so dass die für eine Forschungseinrichtung einer Universität erforderliche Förderquote von 100% erreicht werden.

Die im FuE-Projekt durchgeführten Arbeiten können somit aufgrund der mit der Entwicklung des intelligenten Sensor- und Monitoringsystems verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risiken nur anteilig von den KMU-Unternehmen getragen werden. Daher war es notwendig über das Förderprojekt einen Teil der Risiken abzufedern. Eine Finanzierung der Arbeiten über Haushaltsmittel der Universität war nicht möglich.

3.4 Voraussichtlicher Nutzen, Ergebnisverwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Durch die guten Ergebnisse war es möglich noch während der Projektlaufzeit ein Nachfolgeprojekt im Maschinenbau zu akquirieren, in dem die Sensoren weiterentwickelt werden. Aufgrund des geringen Angebotes von vergleichbaren Alternativlösungen anderer Arbeitsgruppen (hohe obere Grenzfrequenz und großer Signal- Rauschabstand), selbst bei linear messenden mechanischen Sensoren, werden einer solchen Weiterentwicklung hohe Chancen eingeräumt. Damit werden nach Abschluss des Vorhabens gute Chancen gesehen Industrieaufträge für Entwicklungsarbeiten zu akquirieren. Des weiteren wurden Studenten in die Projektarbeit eingebunden und die Ergebnisse in der Lehre im Masterstudiengang Mikroelektronik und Mikrosysteme genutzt.

3.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens, bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind keine Fortschritte auf dem Gebiet nichtlinearer Beschleunigungssensoren für die Vibrationsanalyse für Frequenzen bis oberhalb von 15 kHz bekannt geworden.

3.6 Veröffentlichungen (erfolgte und geplante)

veröffentlicht:

- Pleul, M.; Streit, P.; Polster, K.; Schulze, R.; Schuh, A.; Meinecke, Ch.; Reuter, D.: "Robust vibration Sensor for condition monitoring in railway applications." Smart System Integration 2017, Cork, 08.03.-09.03; Proceedings, p 443

geplant:

- Pleul, M.; Streit, P.; Albers, J.; Kürschner, R.; Schubert, E.; Reuter, D.: „Robuster Vibrationssensor zur Zustandsüberwachung an Schienenfahrzeugen.“ Mikrosystemtechnik-Kongress, München, 23. - 25. Oktober 2017; – akzeptiert



Dr. Danny Reuter
Projektleiter

Chemnitz, den 20.06.2017

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung eines mikrotechnisch aufgebauten intelligenten Sensor- und Monitoringsystems zur Fahrgestellüberwachung und Vermeidung von Entgleisung im Schienenverkehr – MikroMonitor	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Pleul, Michael; Reuter Danny	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
	6. Veröffentlichungsdatum gepönt
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) Technische Universität Chemnitz Reichenhainer Str. 70 09126 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16ES0054
	11. Seitenzahl 28
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 9
	15. Abbildungen 27
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Ursachen für Entgleisungen wie z. B. defekte Achslager, Flachstellen an Radsätzen oder Achsrisse und Achsbrüche bei Personenzügen und Güterzügen können durch die Erfassung von Beschleunigungen und Schwingungen im Radlager frühzeitig erkannt werden und rechtzeitig Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Maschinen eingeleitet werden. Eine intelligente Überwachung der Radsätze oder Radlager kann somit auch Katastrophen im Zugverkehr verhindern. Das intelligente mikrotechnisch aufgebaute Beschleunigungssensorsystem soll die mit hoher Frequenz von bis zu 15 kHz anfallenden Messdaten bereits im Sensor in Bezug auf kritische, sicherheitsrelevante Beschleunigungsmuster analysieren und unkritische Signale ausfiltern.</p> <p>Ziel des MikroMonitor-Verbundprojektes war die Entwicklung eines neuen, mikro-technisch realisierten, "intelligenten" Beschleunigungssensorsystems mit einem Messbereich von $\geq \pm 70$ g und einer Messauflösung von $\pm 0,05$ g. Dabei stand die Entwicklung des übergeordneten Monitoringsystems zur Detektion von kritischen Zuständen aus den von den "intelligenten" Sensoren zur Verfügung gestellten, als kritisch bewerteten Beschleunigungsmustern und Weiterleitung von Warnmeldungen bei Gefahrensituationen an den Sicherheitsleitreechner und die Leitstelle. Die Entwicklung der primären Sensorik erfolgt in enger Zusammenarbeit der Projektpartner TU-Chemnitz/ZfM und GEMAC. Von TUC-ZfM wurden robuste Sensorelemente entwickelt, die den weiten Dynamikbereich von 0,05 g bis 70 g überstreichen und Schwingungen bis 15 kHz messen können. Dieser Dynamikbereich wurde durch koordinierte Maßnahmen im Design der Sensorelemente und in der Funktionalität der primären Sensorelektronik erreicht. Die Umsetzung der Sensorelemente auf die minimale Chipabmessung von (5×5) mm² bei gleichzeitig hohem Dynamikbereich und geringer mechanischer Empfindlichkeit sind Eigenschaften, die während dieses Projektes erreicht wurden.</p> <p>Der hier entwickelte robuste Breitbandsensor bildet die Basis für spezialisierte, anwenderspezifische Sensorsysteme. Basierend auf diesen Ergebnissen steht sensorseitig einer Produktentwicklung und einem Einsatz für die oben beschriebenen Anwendungen in Maschinenkomponenten, konkret von Waggon- bzw. Zug-Radlagern, -Rädern und Achsen nichts im Wege.</p>	
19. Schlagwörter MEMS, "intelligenten" Beschleunigungssensorsystems, Echtzeitüberwachung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN intended	2. type of document (e.g. report, publication) Final report of project
3. title Development of a microtechnical intelligent sensor and monitoring system for chassis monitoring and avoiding derailment in rail traffic	
4. author(s) (family name, first name(s)) Pleul, Michael; Reuter Danny	5. end of project 31.12.2016
	6. publication date intended
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) Technische Universität Chemnitz Reichenhainer Str. 70 09126 Chemnitz	9. originator's report no.
	10. reference no. 16ES0054
	11. no. of pages 28
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables 9
	15. no. of figures 27
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Causes of derailments such as, defective axle bearings, flat points on wheel sets or axle cracks and axle breakages in passenger trains and freight trains can be detected early by the detection of accelerations and vibrations in the wheel bearing, and measures for the protection of humans and machines can be initiated in a timely manner. Intelligent monitoring of wheel sets or wheel bearings can also prevent disasters in train traffic. The intelligent micro-electrical-mechanical acceleration sensor system is designed to analyze the measurement data generated at a high frequency of up to 15 kHz in the sensor with regard to critical, safety-relevant acceleration patterns and to filter uncritical signals. The goal of the MicroMonitor joint project was the development of a new, "intelligent" acceleration sensor system with a measuring range of $\geq \pm 70$ g and a measuring resolution of ± 0.05 g. The development of the higher-level monitoring system for the detection of critical states was based on the critically evaluated acceleration patterns provided by the "intelligent" sensors and the forwarding of warning messages in case of danger to the safety computer and the control center. The primary sensors are developed in close collaboration between the project partners TU-Chemnitz / ZfM and GEMAC. TUC-ZfM has developed robust sensor elements that span the wide dynamic range from 0.05 g to 70 g and measure vibrations up to 15 kHz. This dynamic range was achieved by coordinated measures in the design of the sensor elements and in the functionality of the primary sensor electronics. The conversion of the sensor elements to the minimum chip size of (5 × 5) mm ² with simultaneously high dynamic range and low mechanical sensitivity are properties achieved during this project. The robust broadband sensor developed here forms the basis for specialized, user-specific sensor systems. On the basis of these results, there is nothing to prevent a product development and an application for the above-described applications in machine components, specifically of wagon and train wheel bearings, wheels and axles.	
19. keywords MEMS, intelligent sensorsystems, real-time monitoring	
20. publisher	21. price