

Abschlussbericht Teilvorhaben MODAVT

Zuwendungsempfänger:
IMTEK – EMP/AVT

Förderkennzeichen:
16SV5478K

Berichtsverfasser: Dipl.-Ing. J. Hempel (EMP/SENSeOR), M.Sc. J.-M. Bocard (EMP),
Prof. Dr.-Ing. J. Wilde (AVT), Dr.-Ing. M. Berndt (AVT)

Vorhabenbezeichnung:

SSI-TorqueSENS - Radarbasierte Drehmomentmessung mit OFW-Resonatoren

- Teilvorhaben MODAVT - Modellierung der AVT von drahtlosen Drehmomentensensoren zur Minimierung der Querempfindlichkeiten
- Teilvorhaben ASROT - Optimierte Antennen und Signalverarbeitungsalgorithmen für resonante Oberflächenwellensensoren zur Erfassung von Torsion

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2010 – 31.03.2013

Berichtszeitraum:

01.10.2013 – 31.03.2013

Aufgabenstellung des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben AVT ist die wesentliche Aufgabe die Konzeption, Modellierung und Optimierung der Montagetechnik von OFW-Dehnungssensoren in standardisierten Drehmomentmesszellen. Die Sensormontage soll dabei eine hohe Empfindlichkeit, eine geringe Messunsicherheit für das Nutzsignal Drehmoment und zugleich minimale Querempfindlichkeiten gegenüber parasitären Momenten oder thermischen Dehnungen ermöglichen. Wesentliches Teilziel ist dabei die Modellierung der konstruktiven Gestaltung, Materialauswahl und Fertigungsprozess. Der experimentelle Nachweis dieser Eigenschaften und die Verifikation der modellbasierten Optimierung ist hierbei eine wesentliche Aufgabe. Wichtige Teilziele sind daher auch die Bereitstellung geeigneter Materialeigenschaften für die Simulation und die Mitwirkung beim Aufbau von nachträglich applizierbaren Messzellen zur Drehmomenterfassung.

Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde:

Die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens haben sich im Laufe des Projektes nicht geändert.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens erfolgte nach dem im Antrag dargelegten Zeitplan der jeweiligen Arbeitspakete. Für ausstehende Feldtest und eine finale Verifikation des Funktionsmusters wurde die Bearbeitungszeit für die Arbeitspakete des IMTEK kostenneutral um 3 Monate verlängert. Siehe AP 5.9 in nachfolgendem Zeitplan.

- [LIVE] „Materialmodifikation für geometrisch und stofflich limitierte Verbindungsstrukturen hochintegrierter Elektronikbaugruppen – LIVE“, Projekt, Förderkennzeichen: 03X4500A-I
- [Fischer05] S. Fischer, H. Beyer, R. Janke, S. Hartwig and J. Wilde, „The Influence of Package-Induced Stresses on Moulded Hall Sensors“, *Microsystem Technologies*, Vol. 12, No. 1-2, 2005, pp. 69-74
- [Fischer08] S. Fischer and J. Wilde, “Modeling Package-Induced Effects on Molded Hall Sensors” *IEEE Trans. Advanced Packaging*, vol. 13, no. 3, 2008, pp. 594 - 603E.
- [Deier09] E. Deier and J. Wilde, “Materials-Based Modelling of Packaging Effects on the Accuracy of Micro-Sensors, *Proceedings SENSOR 2009 14th International Conference*, vol. 2, Nuremberg, Germany, 2009, pp. 283 – 288,
- [Fischer06] S. Fischer, H. Beyer, R. Janke, S. Hartwig and J. Wilde, „Comparison of Analysis Methods for Package-Induced Stresses on Moulded Hall Sensors“, *Microsystem Technologies*, Vol. 12, No. -10-11, 2006, pp. 1005-1009
- [Pustan06] D. Pustan, M. Lapisa, M. Rieber, E. Zukowski and J. Wilde, „Combination of Modern Test Methods for Thermo-Mechanical Deformation Analysis“, 1st ESTC, Dresden, 2006, pp. 1003-1007
- [Pustan07] D. Pustan, S. Fischer and J. Wilde, „Analysis of Field Loads in Automotive ECUs and MEMS Sensors“, 57th Electronic Components & Technology Conference, Reno, 2007, pp. 1697-1700
- [Pustan09] D. Pustan, E. Rastiagaev and J. Wilde, “In Situ Analysis of the Stress Development during Fabrication Processes of Micro-Assemblies”, 59th Electronic Components & Technology Conference, San Diego, California, USA, 26 May - 29 May 2009, pp. 117 - 124
- [Wilde08] J. Wilde and E. Zukowski, “Predictive Models for μ BGA and QFN Reliability Estimation” *Proc. of the 9th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2008*, Freiburg i. Br., Germany, 21 - 23 April 2008, pp. 31 – 39
- [Fischer04] S. Fischer, J. Wilde, E. Deier and E. Zukowski, „Influence of materials data on the performance modelling in the design of MEMS packages“, 9th International Symposium On Advanced Packaging Materials, Atlanta, USA, 2004, pp. 57-62
- [Schubach08] H. Schubach, “Thermo-Mechanical Characterisation of SiP Using Full Field Optical Measurement Techniques”, Presentation on full control European Workshop, Halle, Germany, September
- [Pustan092] D. Pustan and J. Wilde, „Analyse von Stressfaktoren in Baugruppen der Mechatronik“, *Produktion von Leiterplatten und Systemen, PLUS*, vol. 11, August 2009, pp. 1831 – 1843

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde ohne signifikantes Zuarbeiten anderer Stellen durchgeführt, da die Projektpartner zusammen die zur erfolgreichen Bearbeitung notwendige Kompetenz aufwiesen.

Ergebnisse Teilvorhaben MODAVT (AVT)

- AP 1 Grundlagen des Sensordesigns (Gesamtsensor) [10.2010 - 10.2011]
- AP 1.1 Versuche zur Entkopplung des Sensors von Biegung und Zug
- AP 1.3 Montagekonzept (Befestigungstechnik, Klammern, Schrauben etc.)
- AP 1.4 Konzepte Temperaturkompensation
- Status AP 1: abgeschlossen

In diesem Arbeitspaket wurde zunächst ein Überblick möglicher Montagetechniken zur Anbindung von OFW-Sensoren an metallische Substrate erarbeitet, mit den Projektpartnern diskutiert und bewertet. Aus der Sicht der Forschungsstellen und der Projektpartner stellt die langzeitstabile und kriecharme Anbindung eines OFW-Sensors an ein metallisches Substrat die größte Herausforderung dar, besonders im Hinblick auf eine möglichst verlustarme Übertragung der Dehnungen vom Messobjekt in den OFW-Sensor. Kriecheffekte in der Verbundschicht sollen dabei möglichst schon in der Konzeptphase minimal sein.

Tabelle 1 vergleicht mögliche Montagetechniken bezüglich des Projektes sowie bestehende Vor- und Nachteile. Das Kleben stellt nach wie vor, auch aufgrund der Einfachheit dieses Verfahrens, die am weitesten verbreitete Verbindungstechnik dar. Kleben ist vor allem mit nahezu beliebigen Oberflächen möglich und benötigt keine hohen Prozesstemperaturen. Die Prozesstemperaturen dürfen bei den verwendeten OFW-Sensoren ca. 450 °C kurzzeitig nicht übersteigen, da oberhalb dieser Temperatur bereits Phasenumwandlungen im Quarzsubstrat beginnen und zudem die Elektrodenstrukturen degradieren. Erschwerend kommt hinzu, dass der OFW-Sensor mit Hilfe einer Silikondichtung gedeckelt wird. Das Silikon zersetzt sich dabei schon bei Temperaturen oberhalb von 250 °C. Diese Randbedingungen reduzieren die Anzahl möglicher Verbindungstechniken und führen unter Umständen zu noch nicht absehbaren Prozesseinschränkungen.

Mit den Projektpartnern wurde daher zunächst die höchste Priorität der zu untersuchenden Verbindungstechniken für das Kleben und das Weichlöten festgelegt. Sobald das Sensorsystem mit diesen Verbindungstechniken evaluiert und erprobt wurde, sollte eine Optimierung mittels Glasloten erprobt werden. Zeitgleich wurde diskutiert, den Sensor nur durch mechanisches Klemmen zu fixieren. Genauer soll der Sensor dabei in eine Nut mit definiertem Untermaß eingebracht werden. Um den Sensor in der Nut platzieren zu können, wird das Substrat, auf welchem sich die Nut befindet, thermisch und/oder mechanisch kurzzeitig auf die Größe des Sensors geweitet. Für diese Technik sind somit keine bzw. deutlich reduzierte Prozesstemperaturen beim Fügen nötig. Außerdem wird ein sehr temperaturproportionales und kriechfreies Ausgangssignal erwartet. Zu klären gilt hier noch, ob das Substrat und die Sensoren für dieses Verfahren mit ausreichend hohen Fertigungstoleranzen hergestellt werden können.

Tabelle 1 Recherche von Montagetechniken für OFW-Sensoren inkl. Prozessbedingungen beim Fügen sowie Vor- und Nachteile

	Vorteile	Nachteile	Prozessparameter
Kleben (+)	<ul style="list-style-type: none"> - einfach - gut beherrschbar - beliebige Oberflächen - sehr niedrige thermische Belastung beim Fügen 	<ul style="list-style-type: none"> - hoch temperaturabhängig - deutliches Kriechverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - $T_{\text{Prozess}} \geq \text{RT}$ - Sekunden bis Stunden
Weichlöten (+)	<ul style="list-style-type: none"> - einfach - gut beherrschbar - temperaturstabil - moderate thermische Belastung beim Fügen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kriechverhalten - Oberflächen müssen lötbar metallisiert sein 	<ul style="list-style-type: none"> - $T_{\text{Prozess}} \geq 220 \text{ °C}$ - wenige Sekunden
Glaslöten (+)	<ul style="list-style-type: none"> - sehr temperaturstabil - kein Kriechverhalten - beliebige Oberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe thermische Belastung beim Fügen 	<ul style="list-style-type: none"> - $T_{\text{Prozess}} \geq 300 \text{ °C}$ - wenige Sekunden
Reaktionslöten	<ul style="list-style-type: none"> - reduzierter thermischer Eintrag 	<ul style="list-style-type: none"> - höhere innere Spannungen - mit Lot beschichtete Oberflächen nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - T_{Prozess}: unbekannt - wenige Sekunden
Hartlöten	<ul style="list-style-type: none"> - sehr temperaturstabil - nahezu kein Kriechen im Anwendungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> - stabile Oberflächenmetallisierung nötig - sehr hohe thermische Belastung beim Fügen - Haftung zu Quarz nicht bekannt 	<ul style="list-style-type: none"> - $T_{\text{Prozess}} \geq 700 \text{ °C}$ - Sekunden

Kraftschlüssig Verbinden durch Aufschumpfen	- kein bzw. reduzierter thermischer Eintrag - temperaturproportionaler Stress	- sehr hohe Anforderung an Fertigungstoleranzen	- $T_{\text{Prozess}} \geq \text{RT}$ - wenige Sekunden
Drucksintern NTV (+)	- reduzierter thermischer Eintrag	- Nur wenige funktionierende Nanopulver verfügbar	- $T_{\text{Prozess}} \geq 230 \text{ °C}$ - Druck $\geq 30 \text{ MPa}$ - Minuten

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Auswahl einer geeigneten Montagetechnik ist eine möglichst verlustarme Kraft- und Dehnungsübertragung. Es ist bekannt, dass Verbundmaterialien abhängig von den E-Moduln die Übertragung der Kräfte und der Dehnungen beeinflussen. Somit gilt zu klären, wie stark die zur Auswahl stehenden Verbindungstechniken Einfluss auf den Koppelfaktor nehmen. Der Koppelfaktor wird hier definiert als der Quotient der maximalen Scherdehnung auf der Oberseite des OFW-Sensors und der maximalen Scherdehnung direkt auf der Mantelfläche des Messobjektes. In diesem Fall ist das Messobjekt eine Welle aus Stahl mit 30 mm Durchmesser. Der Koppelfaktor ist somit ein Maß dafür, wie viel von der in der Welle herrschenden Dehnung am Sensorelement genutzt werden kann (siehe auch AP 3.4).

Definitionsgemäß sollte im Rahmen dieses Vorhabens der Sensor nicht direkt auf der Welle platziert werden. Aufgrund dessen wurde zusammen mit den Projektpartnern ein Konzept zur Anbindung der Sensoren über eine speziell hierfür zu entwickelnde Messklammer erarbeitet. Die Messklammer wird so entworfen, dass sie einfach und präzise mit Hilfe einer Montagehalterung an das Messobjekt angebracht werden kann. An der Messklammer befinden sich alle notwendigen Sensoren sowie Antennen, die für das Messprinzip benötigt werden. Außerdem muss für das Konzept sichergestellt werden, dass die Anbringung der Klammer nahezu frei von Spannungen durchgeführt werden kann, da diese das Nullpunkt-Signal des Sensors beeinflussen können. Auch hat hier der Einsatz einer Messklammer zur Übertragung der Dehnungen in die Sensorstruktur Einfluss auf den Koppelfaktor.

Zur Bewertung des Einflusses der jeweiligen Verbindungstechnik sowie der Messklammer auf den Koppelfaktor wurde ein FE-Modell entwickelt. Mit diesem Modell lassen sich grundlegende Geometrie- und Materialabhängigkeiten als wichtige Designregel für die Messklammer ableiten.

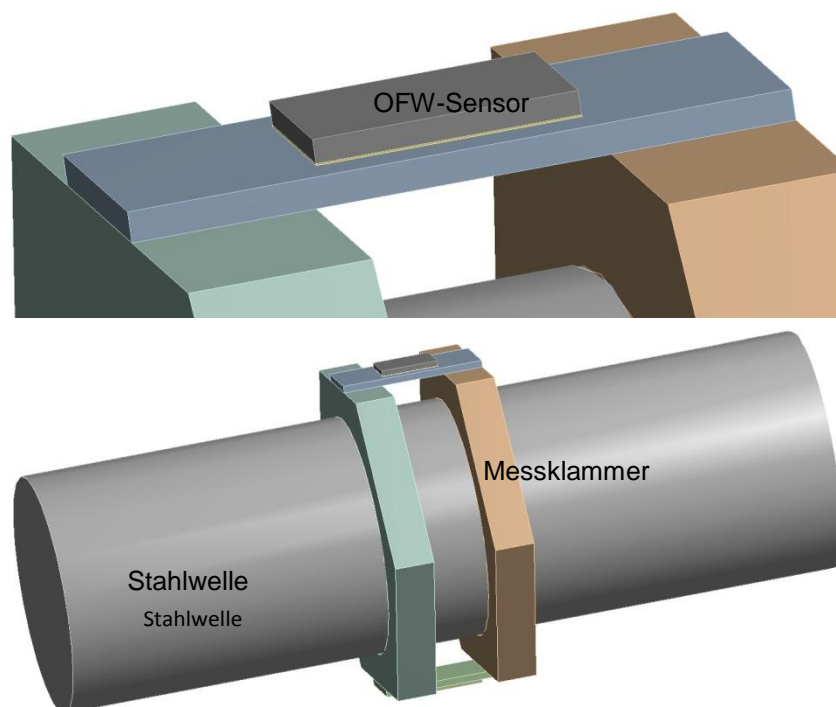


Abb. 1 FE-Modell der Welle, der Messklammer und der OFW-Sensoren (unten) sowie vergrößerte Darstellung des Sensors (oben)

Abb. 1 zeigt das FE-Modell der Messklammer-Konzeptes. An der Messklammer sind die OFW-Sensoren auf einem dünnen Stahlplättchen befestigt. Zwischen dieser Brücke und dem OFW-Sensor wurde eine 50 μm dicke Verbundschicht modelliert. Diese Verbundschicht kann je nach gewählter Verbindungstechnik in den Eigenschaften variiert werden.

In einer ersten Simulation wurde der Koppelfaktor KF für die verwendete Messklammer, sowie die Verbindungstechniken Kleben, Weichlöten, Hartlöten, Glaslöten und Nanotechnologie-Sintern bestimmt. In Abb. 2 ist der Koppelfaktor für das gewählte Konzept mit Messklammer und für die jeweilige Verbindungstechnik dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Verbindungstechnik. Die Kurve konvergiert für sehr hohe E-Moduln gegen einen Koppelfaktor von 0,93. Dies ist auf den Einfluss durch die Messklammer zurückzuführen. Die Messklammer reduziert somit die Kopplung bei gegebener Geometrie um lediglich 7%. Das Konzept mit einer Messklammer ist daher zur möglichst verlustarmen Übertragung der Dehnungen sehr gut geeignet.

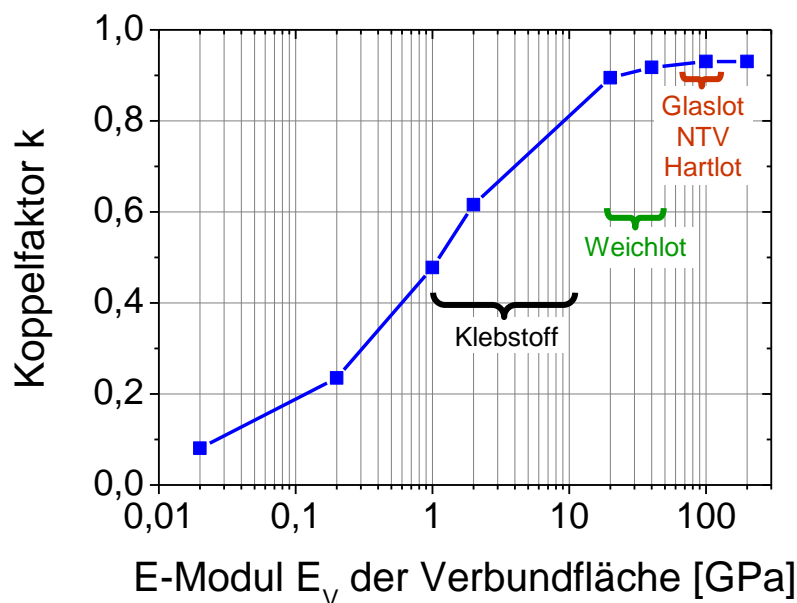


Abb. 2 Simulationsergebnis, Einfluss der Messklammer und der jeweiligen Montagetechnik auf den Koppelfaktor k

AP 1.3 Montagekonzept

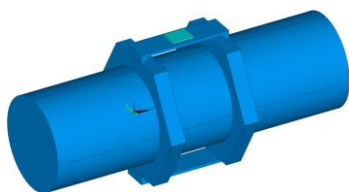


Abb. 3 Brücke gerade, 0°

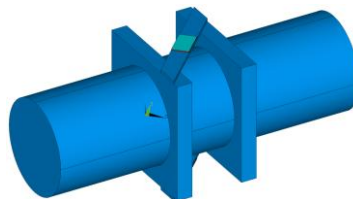


Abb. 4 Brücke gerade, 45°

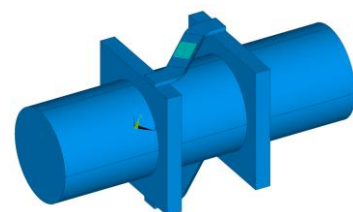


Abb. 5 Brücke S-Form, 45°

Die Modellierung der Messzelle (Gesamtsensor) ermöglichte eine konstruktive Reduktion von Quereffekten im sensitiven Bereich. Die Drehung um 45° und die Wahl einer S-Form für die Brücke als Träger des Sensorelements führen zu einer verlustarmen mechanischen Übersetzung von Momenten in gerichtete Kräfte (Abb. 3-5).

Das in Abb. 6 dargestellte Montagekonzept gestattet eine mechanisch reproduzierbare Befestigung der Brücke. Ein genereller Vorteil der Konstruktion mit Klammersystem ist, dass es keine Modifikationen an der Antriebswelle erfordert. Eine äußere Stützkonstruktion gewährleistet dabei eine präzise Montage der in Abb. 5 dargestellten Manschette auf eine Antriebswelle. Der auf der Brücke vormontierte SAW-Sensor soll während der Montage aktiv zur Anzeige und Korrektur von Einbaufehlern genutzt werden. In einer Messzelle kommen zwei unterschiedliche SAW-Strukturen zum Einsatz. Der eine Typ ist unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen. Über diesen Ansatz kann der Temperatureinfluss kompensiert werden.

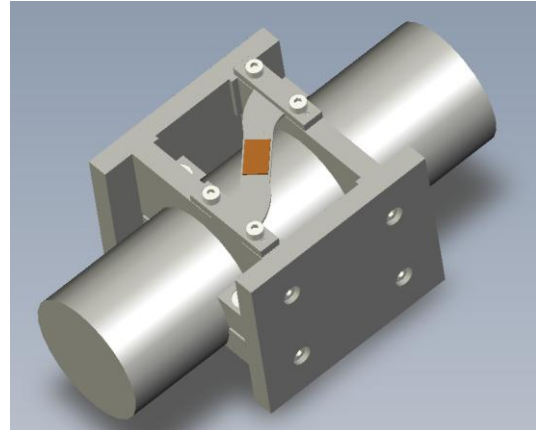


Abb. 6 Montagekonzept

AP 3 Grundlagen der Aufbau und Verbindungstechnik (Sensorebene) [03.2011 - 03.2012]

AP 3.1 Chip-Level-Packaging

AP 3.2 Chipgehäusemontage auf Klammer (Kleben, Klemmen, Schweißen etc.)

AP 3.4 Maximierung der Sensitivität / maximale Kraftübertragung auf das Sensorelement

AP 3.5 Schutzkonzepte/Verkapselung Klammer

AP 3.6 Mechanische Schnittstellen und Systemintegration

AP 3.7 Drift Nullpunkt und Empfindlichkeit AVT

Status AP 3: abgeschlossen

Verwendete Zuwendungen AP3, wichtigste Positionen und zahlenmäßiger Nachweis

0835 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.1, 4, Operator-/Maschinenstunden, Zugangszeiten zum Reinraum am Imtek zur Prozessierung von Quarzproben, die in AP 3.2 und nachfolgenden Arbeitspaketen zur Evaluierung der Fügung verwendet wurden.

0835 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.3, 7, Maschinenstunden der mechanischen Werkstatt zur Fertigung des Stahlprüfkörpers aus AP 3.4 (Abb. 22). Hierbei war ein Re-Design der Stahlprüfkörpers erforderlich. Mit dem Stahlprüfkörper wurde eine Qualifizierung der Sensorfügung durchgeführt AP 3.4 (Abb. 23).

0843 Sonst. Allg. Verw.-Ausg., Beleg Nr.14, 46, Zollrechnung und Einfuhrabgabe für Bestellung aus USA. Musterbestellung eines Glaslotes, welches sich potentiell eignete zur Sensor-Substrat Fügung auf Stahl (AP 1, Abb. 2). Erste Fügeversuche verliefen erfolgreich, jedoch versagte die Fügung bei den weiteren Evaluierungsversuchen, siehe AP 3.2, Abb. 12.

0843 Sonst. Allg. Verw.-Ausg., Beleg Nr.13, Messspitze zur präzisen und reproduzierbaren Kontaktierung der aufgebauten Sensoren zur Bestimmung de Drift/Nullpunkt und der Empfindlichkeit der OFW-Sensoren (AP 3.7,Abb. 29).

Chipgehäusemontage auf Klammer (AP3.2)

Eine umfassende Übersicht (Zwischenbericht 2010) möglicher Verbindungstechniken zur Befestigung von SAW-Sensoren an metallische Substrate bildet die Grundlage zur Auswahl passender Technologien. Diese sind im Einzelnen das Kleben mit einem physikalisch geeigneten Klebstoff sowie das Glaslöten, basierend auf verschiedenen bleihaltigen und bleifreien niedrig schmelzenden Glasloten. Als drittes Fügeverfahren kam zudem das Niedertemperatur-Drucksintern in die engere Auswahl. Es erwies sich jedoch aufgrund der benötigten Prozessparameter und Prozesskomplexität als nicht realisierbar.

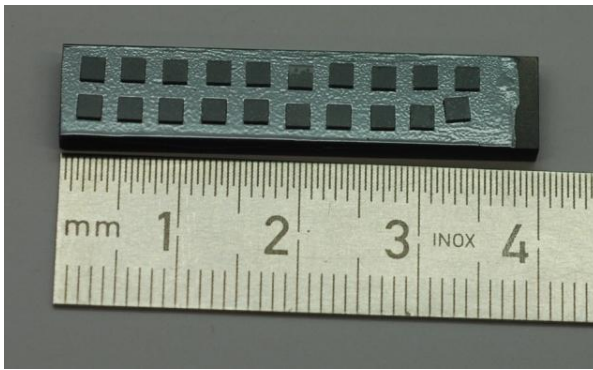


Abb. 7 Scherproben

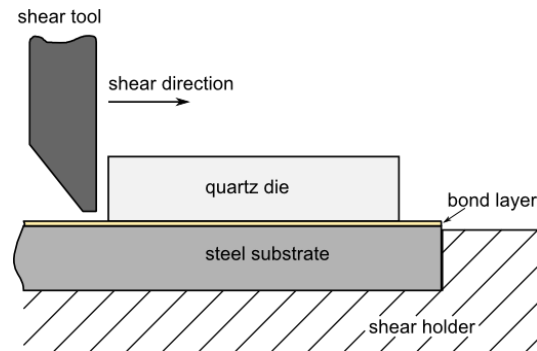


Abb. 8 Prüfanordnung bei Scherversuchen

Um die gewählten Fügeverfahren zu evaluieren, wurde zunächst eine Material- und Prozessstudie durchgeführt, um die Kompatibilität der gewählten Materialien qualitativ zu bestimmen. Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnten Materialanpassungen insbesondere auf Seiten des Trägermaterials durchgeführt werden. Somit stehen für den nächsten Schritt, die quantitative Evaluierung der Fügeverfahren, geeignete Materialkombinationen zur Verfügung. Die so definierten Materialdaten fließen in die Optimierung der Kraftübertragung auf das Sensorelement (AP 3.4) ein.

Die erste quantitative Evaluierung der Fügeverfahren mit ihren Materialkombinationen erfolgte mit Schertests. Hierfür wurden die Fügeprozesse der jeweiligen Fügeverfahren adaptiert und optimiert. Anschließend wurden aus dem Sensorsubstratmaterial entsprechend dimensionierte Scherproben auf Trägersubstrate aufgebaut (Abb. 7). Die Trägersubstratproben wurden im Anschluss in einer Prüfmaschine geschert (Abb. 8). Für die Evaluierung der Haftfestigkeit zwischen Sensormaterial, Füge Mittel und Stahlträger wurde neben den Ausfallmechanismen auch die Geometrie der Fügung in Betracht gezogen. Hierbei beeinflussen besonders die effektive Fügefläche und die Fugeschichtdicke die Ergebnisse.

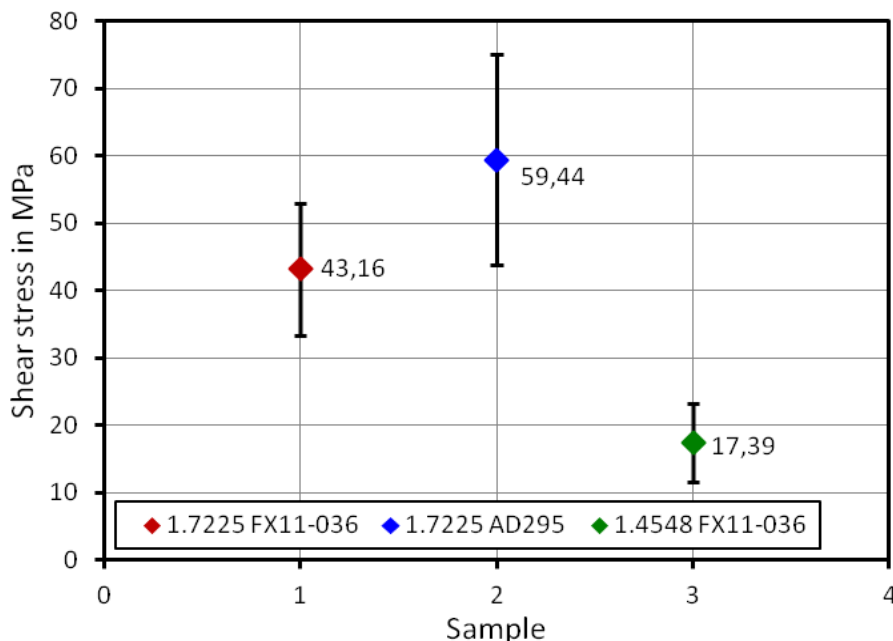


Abb. 9 Vergleich von Scherversuchen (Fügeverfahren und Materialien)

Die Ergebnisse der Scherversuche sind in Abb. 9 zusammenfassend dargestellt. Um die Aussagekraft der Messungen zu verifizieren, wurde aus mindestens 20 Schermessungen das arithmetische Mittel mit der zugehörigen Standardabweichung gebildet. Mit dieser ersten quantitativen Evaluierung der Fügeverfahren bzw. Materialkombinationen konnten zwei besonders geeignete Verfahren und Materialkombinationen (1.7225 AD295, 1.7225 FX11-036) identifiziert werden. Es handelt sich dabei um den Kleber AD295 und das Glaslot FX11-036 jeweils auf dem Stahl 42CrMo4

(1.7225). Die Materialkombination Glaslot (FX11-036) und rostfreier Stahl (1.4548) schied aus, da Scherfestigkeiten mit $\sim 17,4$ MPa zu gering sind. Bei genauerer Untersuchung stellte sich heraus, dass die Oberfläche des Stahlträgers (1.4548) bei der Prozessierung (Prozesstemperatur $\sim 450^\circ\text{C}$) des Glaslotes oxidierte. Siehe Abb. 10, Trägeroberfläche vor der Prozessierung und Abb. 11, Trägeroberfläche nach der Prozessierung. Diese Oxidation der Oberfläche beeinträchtigte die Haftfestigkeit des Glaslotes erheblich, wie mit den Scherversuchen nachgewiesen werden konnte.

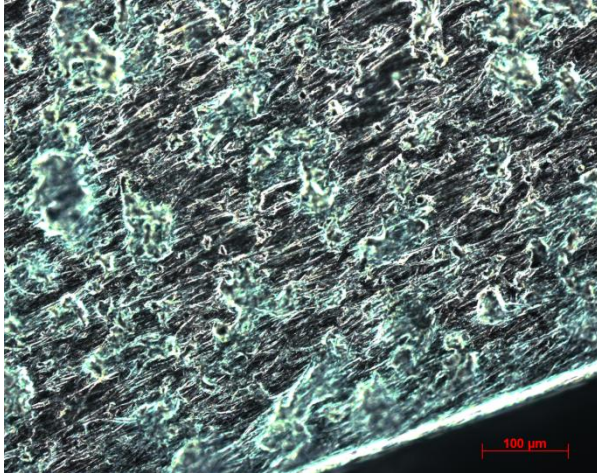


Abb. 10 Oberfläche des Stahl-Trägers (1.4548) vor der Prozessierung

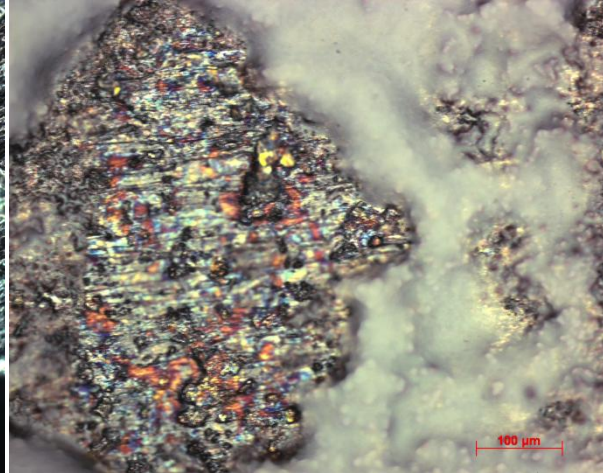


Abb. 11 Oberfläche des Stahlträgers (1.4548) nach der Prozessierung

In einer zweiten quantitativen Evaluierungsphase wurden thermische Lastzyklen-Tests, eine thermische Alterung und den Einfluss der Oberflächenpräparation des Stahl-Trägers untersucht. Für die thermischen Lastzyklen-Tests wurden gefügte Sensorsubstrat Chips ($2 \times 2 \text{ mm}^2$) einer Schockwechselbelastung von -20°C bis 85°C mit einer jeweiligen Haltezeit von 10 min mit 100 Wiederholungen beaufschlagt. Für die thermische Alterung wurden gefügte Sensorsubstrat Chips für 100 Stunden bei 150°C getempert. Den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit des Stahl-Trägers wurde mittels zwei Oberflächenpräparationen untersucht. Variante eins bestand hierbei aus der erodier-rauben Oberfläche mit anschließender chemischen Reinigung zur Entfernung organischer Bestandteile von der Oberfläche. Bei Variante zwei wurde die Oberfläche des Stahl-Trägers nass mit SiC-Papier (Körnung 800) geschliffen und anschließend chemisch gereinigt. In Abb. 12 sind die Scherfestigkeiten jeweils vor und nach den thermischen Lastzyklen-Tests für die Fügmaterialien AD295 und FX11-036 dargestellt. Der Klebstoff AD295 zeigt keine Abnahme der Haftfestigkeit nach dem thermischen Lastzyklen-Test. Das Glaslot FX11-036 hingegen zeigt eine signifikante Reduktion der Haftfestigkeit nach den Lastzyklen. Ferner ist in Abb. 12 eine Zeitverzögerung in der Evaluierung der Haftfestigkeit beim Glaslot dargestellt. Bereits nach einer achtwöchigen Lagerung der Proben unter Normalbedingungen reduziert sich die Scherfestigkeit von $\sim 45 \text{ MPa}$ auf $\sim 22 \text{ MPa}$. Dies verdeutlicht, dass das Glasloten mit dem Glaslot FX11-036 keine Fügmöglichkeit für eine langfristig stabile und zuverlässige Fügung ist.

In Abb. 13 sind die Scherfestigkeiten in Abhängigkeit von der Oberflächenpräparation dargestellt. Hierbei steht die „normal“ Präparation für eine erodier- raue Oberfläche mit anschließender chemischer Reinigung und „polished“ für eine Präparation mit einem nassen Schleifprozess (800 Körnung) und anschließender chemischer Reinigung. Der Klebstoff AD295 zeigt hier wiederum keine signifikante Reduktion der Haftfestigkeit. Hingegen weisen mit Glaslot auf Sensorsubstrate gefügte Chips, lediglich noch eine Haftfestigkeit von $< 10 \text{ MPa}$ auf.

Durch das Feinschleifen der Oberfläche ist eine mechanische Verzahnung zwischen Függeschicht und Trägermaterial nicht mehr möglich, wodurch die Fügung bereits bei sehr kleinen Scherkräften versagt. Diese Versuche haben aufgezeigt, dass eine Oberflächenrauheit von einigen Mikrometern die Haftfestigkeit deutlich erhöht. In dem Schlibfbild (Abb. 14) ist neben der Spannungsrisssbildung die Oberflächenrauigkeit ($\sim 10 \mu\text{m}$) des erodier-rauben Trägermaterials abgebildet.

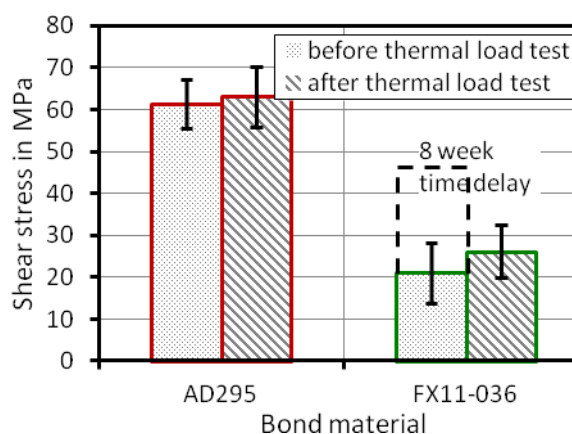


Abb. 12 Scherfestigkeit vor und nach dem thermischen Lastzyklentest (-20°C bis 85°C, 100Zyklen)

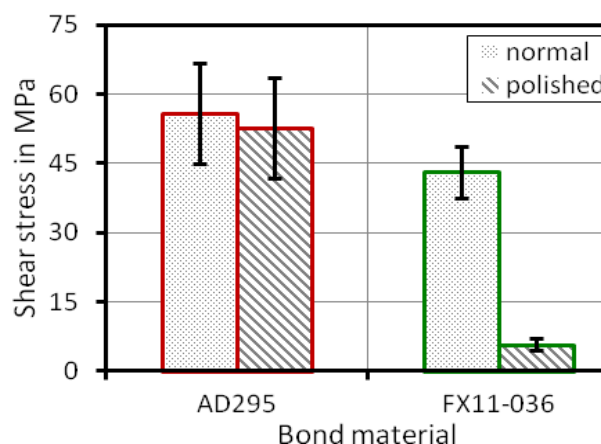


Abb. 13 Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenpräparation („normal“=erodiert, „polished“ = fein geschliffene, 800 Örnung)

Bei einer näheren Untersuchung der Ausfallmechanismen, der mit Glaslot gefügten Chips konnte festgestellt werden, dass bereits nach dem Fügeprozess Spannungsrisse in der Fügung zu finden sind, siehe Abb. 14 und Abb. 15. Diese Spannungsrisse in der Fügung sind auf die Abweichungen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien Stahlträger und Sensorsubstrat zurückzuführen. Durch eine zeitliche Lagerung bei Normalbedingungen breiten sich die Spannungsrisse in der Fügung weiter aus und schwächen diese, wodurch wiederum die Scherfestigkeit der Fügung gemindert wird.

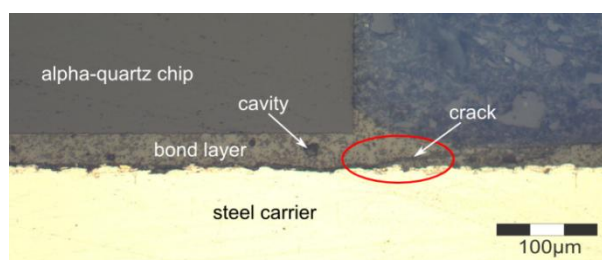


Abb. 14 Spannungsrisse in der Fügung, sowie Oberflächenrauheit des Trägermaterials, Materialkombination 1.7225/FX11-036

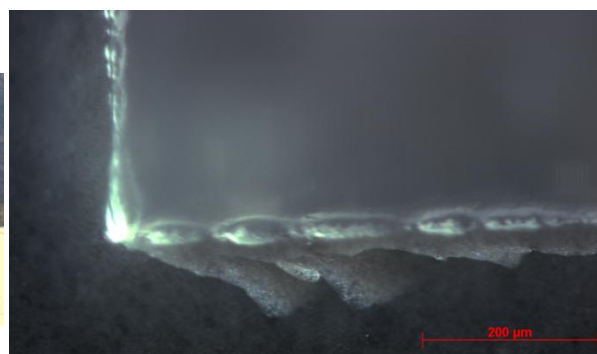


Abb. 15 Spannungsrisse in der Fügung, Materialkombination 1.7225/FX11-036

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde für die thermische Alterung lediglich der Klebstoff AD295 getestet. Dieser zeigte nach einer Alterung von 100 Stunden bei 150°C keine Abnahme der Haftfestigkeit. Somit wurde in Absprache mit den Projektpartnern der Klebstoff AD295 für die OFW-Sensormontage für weitere Projektarbeit gewählt.

Maximierung der Sensitivität (AP 3.4)

Die Definition von geeigneten Kriterien (Koppelfaktor, Homogenitätsfaktor und das Verhältnis Längs- und Scherdehnung) bildet ein wesentliches Resultat dieses Arbeitspaketes. Diese Kriterien ermöglichen eine zielgerichtete geometrische Auslegung und Optimierung des Sensorsystems.

Zur Ermittlung der optimalen Geometrie wurde ein probabilistisches und voll parametrisiertes FE-Modell entwickelt (Abb. 16). Dabei enthält die Simulation zufallsverteilt alle zu untersuchenden Eingangsparameter. Ein wesentlicher Aspekt zur realisierbaren Anwendung ist, die Kenntnis aller Einflüsse einschließlich des verwendeten Fügmittels auf die nachfolgend definierten Qualitätsmerkmale. So entspricht HF der Homogenität der Dehnung und ist definiert als das Verhältnis von minimaler zu maximaler Längsdehnung im sensitiven Bereich. Der sensitive Bereich ist hierbei die

Position auf dem Sensorträger, an welcher der OFW-Sensor montiert werden soll. KF steht für Koppelfaktor und ist definiert als das Verhältnis von mittlerer Längsdehnung im Sensor zu maximal vorhandener Dehnung in der Antriebswelle. Der Koppelfaktor KF ist somit ein Maß dafür, wie viel von der zu messenden Dehnung der Welle im sensitiven Bereich ankommt. Mit dem Verhältnis Längs- und Scherdehnung (LSV_{max}) wird der Einfluss von Quereffekten charakterisiert.

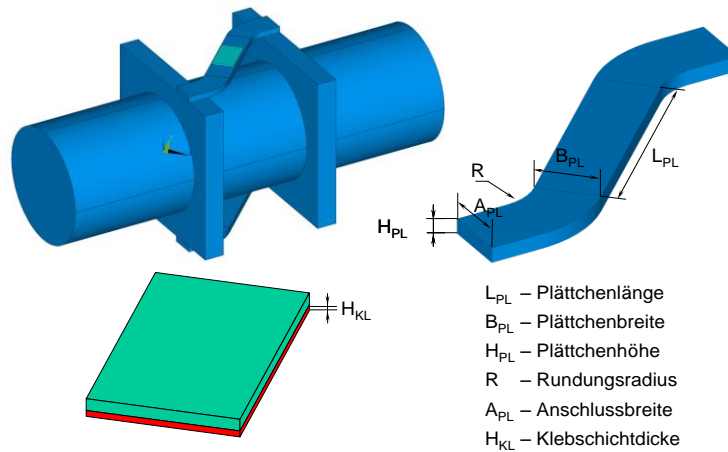
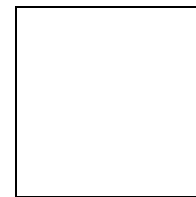


Abb. 16 probabilistisches und voll parametrisiertes FE-Modell

HF: Homogenität der eingekoppelten Dehnungen



KF: Verhältnis zwischen vorhandener und eingekoppelter Dehnung $KF = \bar{\epsilon}_X^{Sensor} / \epsilon_X^{Welle}$

LSV_{MAX}: Verhältnis zwischen Längs- und Scherdehnungen $LSV_{MAX} = \bar{\epsilon}_X / (|\bar{\gamma}_{XY}| + |\bar{\gamma}_{YZ}| + |\bar{\gamma}_{XZ}|)$

Q: Qualitätsfaktor, Produkt aus gewichteten Qualitätsmerkmalen $Q = KF^2 \cdot HF^2 \cdot LSV_{MAX}$

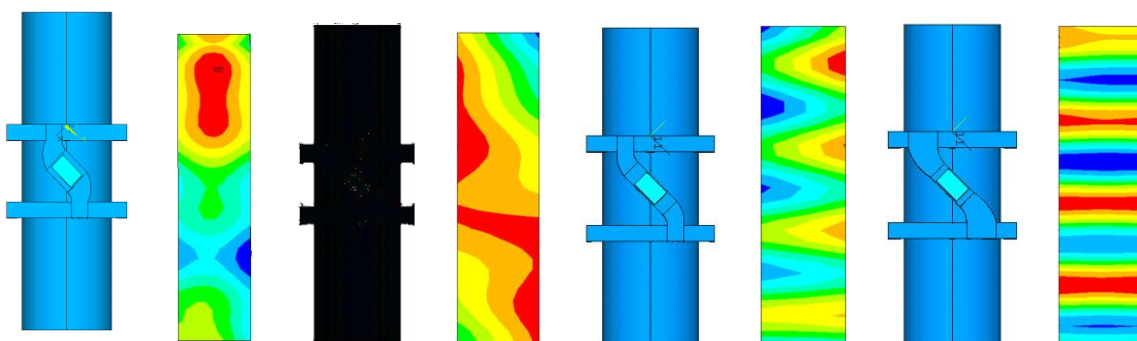


Abb. 17 Verlauf der Optimierung nach steigenden Werten für die Qualitätskriterien →

Nach Vereinbarung mit den Projektpartnern, dass diese Qualitätskriterien als Richtgröße dienen, erfolgten umfangreiche Simulationen. Die nach den Simulationen vorliegenden konstruktiven Parameter entsprechen den bestmöglichen Werten der Qualitätskriterien (Abb. 17). Anhand der vorliegenden Berechnungen konnten zusätzliche Anforderungen formuliert werden:

- E-Modul für das Fügemitel im Bereich zwischen 2 bis 100 GPa
- Stärke der Fügemitelschicht so dünn wie möglich (z.B.: 10 µm)
- Dicke des SAW-Chips von gegenwärtigen 400 µm deutlich reduzieren

Diesen Aussagen wird das evaluierte Material AD295 gerecht. Der Klebstoff AD295 hat einen E-Modul von 5 GPa, und er erlaubt Fügenschichtdicken im Bereich von 70 µm. Er hat eine Glasübergangstemperatur bei 134°C, wodurch ein Einsatz bis zu den spezifizierten 85°C möglich sein sollte.

In Abb. 18 ist die optimierte Sensorträger-Geometrie abgebildet. Mit dieser sind der Kopplungsfaktor K_F (Abb. 19), Homogenitätsfaktor H_F (Abb. 21), Längs- zu Scherdehnung LSV optimiert und der Qualitätsfaktor Q (Abb. 20) ist maximiert. Im Einzelnen sind $K_F = 0,63$, $H_F = 0,95$, $LSV_{MAX} = 1,56$ und $Q = 0,56$ nach Optimierung der gewählten Einfluss-Parameter aus Abb. 16. Aus Abb. 19 bis Abb. 21 wird ersichtlich, dass mit zunehmendem E-Modul der Fügenschicht und abnehmender Fügenschichtdicke, das jeweilige Qualitätskriterium einen breiten optimalen Bereich erreicht.

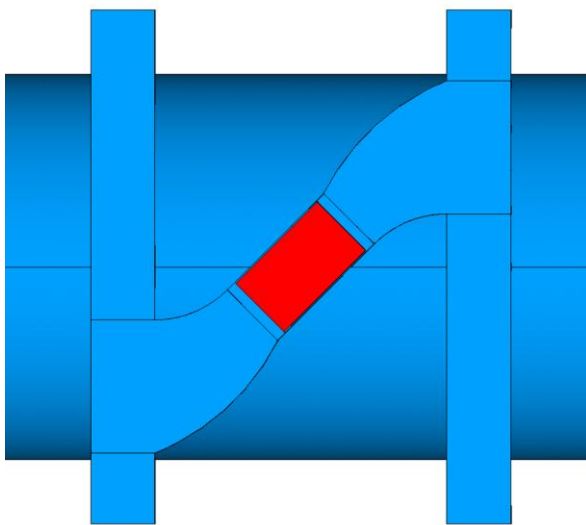


Abb. 18 Draufsicht auf optimierte Sensor-Träger Geometrie, FE-Modell

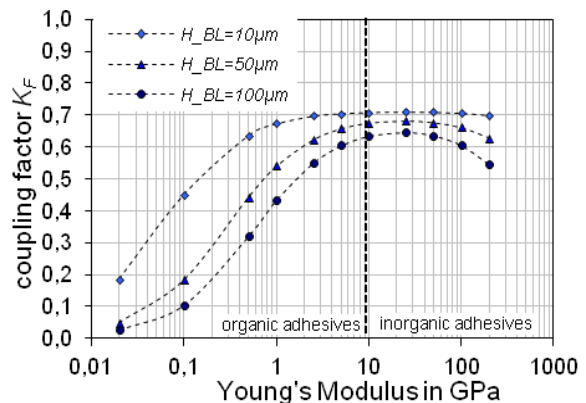


Abb. 19 Kopplungsfaktor K_F als Funktion der Fügenschichtdicke und dem E-Modul des Fügemitel

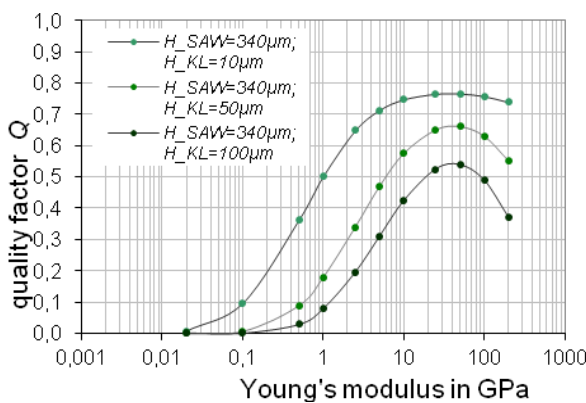


Abb. 20 Qualitätsfaktor Q als Funktion der der Fügenschichtdicke und dem E-Modul des Fügemitel

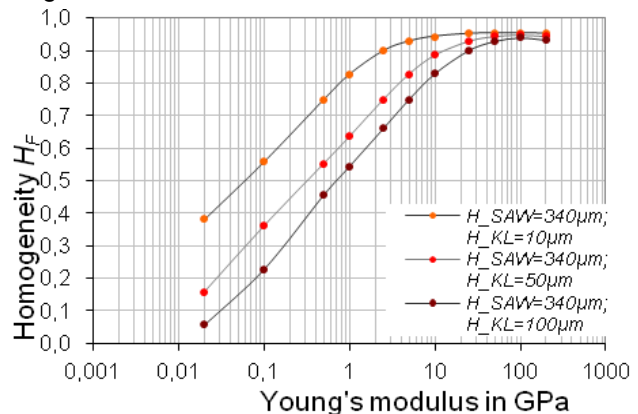


Abb. 21 Homogenitätsfaktor H_F als Funktion der der Fügenschichtdicke und dem E-Modul des Fügemitel

Der für die Fügung der QFW-Sensoren gewählte Klebstoff AD295 erfüllt die geforderten Kriterien. Mit einem E-Modul von 5 GPa und einer Fügenschichtdicke im Bereich von 70 µm liegt der Klebstoff in den Optimums-Plateaus der Graphen Abb. 19 bis Abb. 21.

In einer zweiten quantitativen Evaluierungsphase des Teilarbeitspakets von AP 3.2/3.4 wurde das gewählte Fügemitel AD295 mittels Lastzyklenversuchen qualifiziert (ebenfalls Teilbereich von AP 3.7). Hierfür wurde ein OFW-Sensor mit dem Klebstoff AD295 auf dem Stahlprüfkörper montiert.

Abb. 22 zeigt das Model des Stahlprüfkörpers (1.7225) für die Lastzyklenversuche. Rückseitig auf dem Stahlprüfkörper wurde ein konventioneller Dehnungsmesstreifen als Halbbrücke vom Projektpartner Sandner GmbH als Referenz-Dehnungssensor appliziert (Abb. 23).

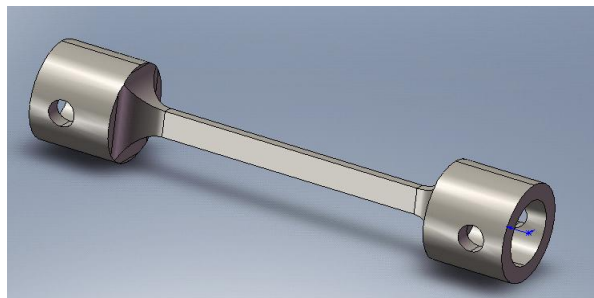


Abb. 22 Model des Stahlprüfkörpers für die Lastzyklenversuche

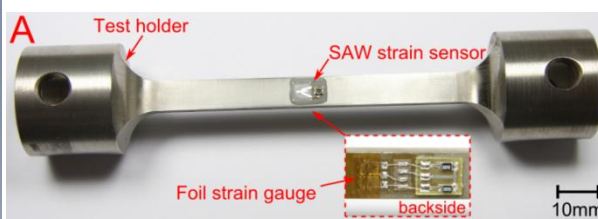


Abb. 23 Stahlprüfkörper (1.7225) mit aufgebaitem OFW-Sensor und DMS-Referenzsensor (backside)

Der Stahlprüfkörper wurde so konzipiert, dass er mittels Standardaufnahme in die ZWICK Zugprüfmaschine¹ des Lehrstuhles AVT integriert werden konnte. Hierdurch war es möglich den aufgebauten OFW-Sensor axial homogen auf Zug zu belasten. Der prinzipielle Aufbau für diese Experimente ist in Abb. 24 abgebildet. Kernstück für die Lastzyklen-Untersuchungen war die Zugprüfmaschine, mit der der Zugprüfkörper zyklisch belastet wurde. Der aufgebaute OFW-Sensor², bereitgestellt vom Projektpartner SENSEOR GmbH, wurde über einen Mikro-SMA-Verbinder kontaktiert und mit einem Netzwerk-Analysator³ von Agilent³ abgefragt und ausgewertet. Der Referenz-Dehnungssensor (DMS) auf der Rückseite des Zugprüfkörpers wurde extern zur Vollbrücke erweitert und mittels Vierdraht-Technik versorgt und ausgelesen. Für die Stromspeisung wurde eine hoch präzise Stromquelle von KEITHLEY⁴ verwendet. Ausgelesen wurde die Widerstandsänderung der Vollbrücke des Referenzsensors mit einem Agilent Digital Multi-Meter⁵ (DMM). Mit diesem Messaufbau war es möglich, den Zugprüfkörper definiert zu belasten und in Echtzeit die reelle Dehnung des Prüfkörpers und somit die des applizierten OFW-Sensors zu messen. Eine Temperaturkammer an der Zugprüfmaschine ermöglichte es, die Versuche bei definierten Temperaturen durchzuführen.

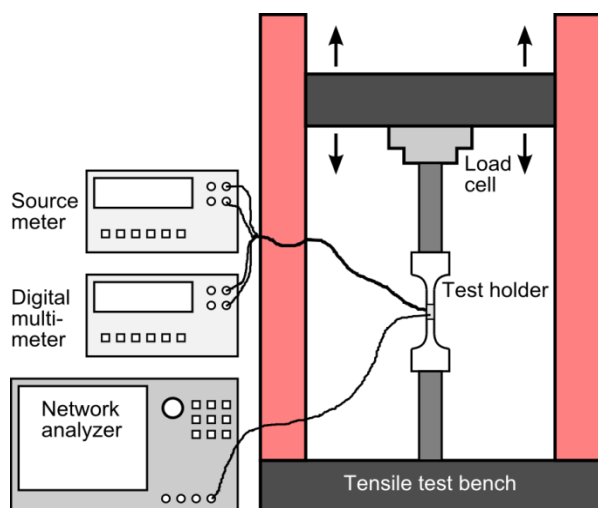


Abb. 24 Schema des experimentellen Aufbaus für die Lastzyklenversuche



Abb. 25 Experimenteller Aufbau für die Lastzyklenversuche

¹ <http://www.zwick.de/en.html>, 03.01.2013

² http://www.senseor.com/images/stories/download/Brochures/SENSeOR_SSEE015.pdf, 03.01.2013

³ <http://www.home.agilent.com/en/pd-1000004587%3Aepsq%3Apro/ena-rf-network-analyzer>, 03.01.2013

⁴ <http://www.keithley.de/products/dcac/voltagesource/broadpurpose/?mn=2400>, 03.01.2013

⁵ <http://www.home.agilent.com/en/pd-1000001295%3Aepsq%3Apro-pn-34401A/digital-multimeter-6-digit?nid=-33228.536880933.00&cc=DE&lc=ger>, 03.01.2013

Mit dem beschriebenen Messaufbau wurde der aufgebaute OFW-Sensor bis 500 ppm (stufenweise mit 50 ppm) zyklisch gedehnt, um die Fügung des Sensors mit dem Klebstoff AD295 zu evaluieren.

Die Zugprüfungen wurden bei Raumtemperatur von 22°C sowie bei 45°C, 65°C und 85°C durchgeführt. Bei Raumtemperatur wurden ebenfalls Lastzyklenversuche bis 1000 Lastwechseln aufgebracht, um eine Ermüdung der Fügungsschicht zu untersuchen.

Die Temperaturabhängigkeit des Sensorverhaltens ist in Abb. 26 dargestellt. Das Sensor-Verhalten bleibt auch bei erhöhten Temperaturen (85°C) linear. Lediglich die Streuung der Messwerte bei 85°C nimmt geringfügig zu, was sehr wahrscheinlich durch Temperaturschwankungen in der Messkammer verursacht wurde. Diese Streuung der Messwerte bei 85°C ist jedoch $\leq 0,7\%$. Bei genauerer Untersuchung des Sensor-Verhaltens konnte festgestellt werden, dass die Sensitivität des aufgebauten OFW-Sensors mit steigender Temperatur abnimmt (Abb. 27). Das in den Abbildungen dargestellte „Strain Transfer Ratio (STR)“ entspricht dem Koppelfaktor KF aus den Simulationen.

$$STR \approx \frac{s_l}{s_{l,ref}}$$

Es steht in direktem Zusammenhang mit der Sensitivität durch s_l der longitudinalen Sensitivität und $s_{l,ref}$ der Referenzsensitivität des Sensors in longitudinale Richtung, angegeben im Datenblatt des Herstellers.

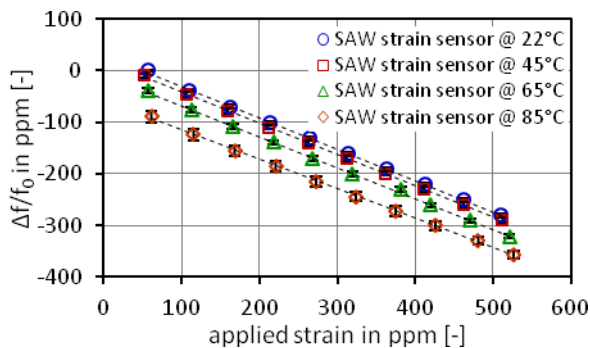


Abb. 26 Temperaturabhängigkeit des aufgebauten OFW-Sensors von 22°C bis 85°C

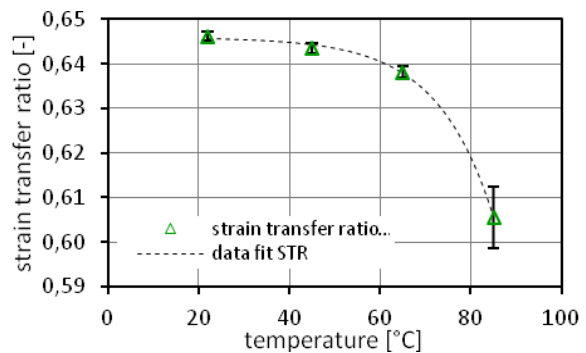


Abb. 27 Temperaturabhängigkeit der Sensitivität des aufgebauten OFW-Sensors von 22°C bis 85°C

Dieses Verhalten ist auf eine Änderung der Materialeigenschaften des Klebstoffes AD295 bei erhöhten Temperaturen zurückzuführen. Aus diesen Experimenten konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Klebstoff AD295 sich bis zu einer Einsatztemperatur von ca. 65°C zur Dehnungsmessung eignet. Oberhalb 65°C beginnt der Klebstoff seine Materialeigenschaften zu ändern, sodass er nicht mehr zur Fixierung von OFW-Sensoren zur Dehnungsmessung eingesetzt werden sollte.

Für die Untersuchung der Lastzyklen-Abhängigkeit wurde der Stahlprüfkörper bis ~500 ppm zyklischen Schwelldehnungen unterworfen. Jeweils nach 50, 100, 300 und 1000 Belastungszyklen wurden mindestens drei Messzyklen durchgeführt, um das Sensorverhalten zu evaluieren.

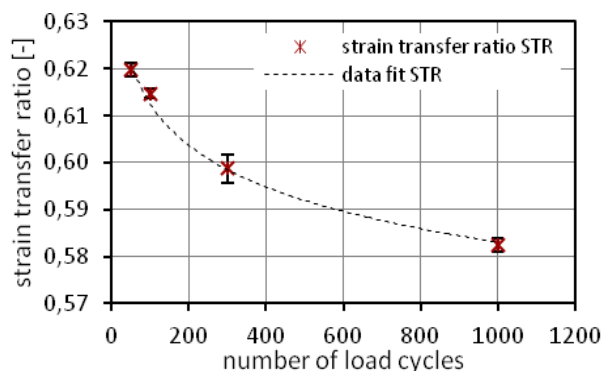


Abb. 28 Lastzyklen-Abhängigkeit der OFW-Sensor Sensitivität

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 28 zusammengefasst. Mit zunehmender Zyklenzahl nimmt die OFW-Sensorsensitivität ab. Ein möglicher Grund hierfür ist eine Veränderung der Fügungsschicht, da es sich bei dem Klebstoff AD295 um ein hoch gefülltes Epoxid handelt. Für eine Produktentwicklung wäre die Langzeitstabilität der Fügung zu untersuchen, z.B. mit einer Umlaufbiege-Prüfmaschine, mit der Lastzyklen weit über 1000 Zyklen realisiert. Alternativ könnte ein definierter Voralterungsprozess entwickelt werden, wenn sich die OFW-Sensorsensitivität asymptotisch einem konstanten Wert annähert.

Das ebenfalls untersuchte Kriech- und Hystereseverhalten des Klebstoffes AD295 konnte bei den Lastzyklenversuchen positiv bewertet werden. Untersuchungen bei 50% Last (~250 ppm) für eine Zeitspanne von 5 min in der Entlastungskurve eines Lastzyklus zeigten keine Signaldrift des OFW-Sensors. Hieraus schließen wir ein signifikantes Kriechen in der Fügung aus.

Die gewonnen Erkenntnisse aus den Lastzyklenversuchen wurden den Projektpartnern präsentiert und es wurde einvernehmlich entschieden, weitere Versuche im Rahmen des Projektes mit dem Klebstoff AD295 durchzuführen.

Schutzkonzept/Verkapselung Klammer (AP 3.5)

Beim Schutz der Messzelle vor äußeren Einflüssen müssen sowohl chemisch-klimatische als auch thermisch-mechanische Aspekte berücksichtigt werden. Als Lösungsansatz für das Vorhaben wurde ein Schutzlack (z.B.: Plastik 70 von CRC Industries Deutschland GmbH) gewählt. Schutzlackbeschichtungen haben sich auch bei in der Bauart vergleichbaren Dehnungs-Bügelmessaufnehmern der Firma Sandner Messtechnik GmbH industriell bewährt.

Mechanische Schnittstellen und Systemintegration (AP 3.6)

Drift Nullpunkt und Empfindlichkeit AVT (AP3.7)

Als mechanische Schnittstelle und Systemintegration zu einem Messsystem wurde das Montagekonzept aus Abb. 6 im Laufe des Projektes weiter verfolgt. Dieses Montagekonzept wurde von der Sandner Messtechnik GmbH konstruktiv angepasst und feinwerktechnisch gefertigt (AP 5.1/ 5.2). Anhand des gefertigten Messsystems (Erprobungsmuster, AP5.71) konnten ebenfalls die Nullpunktdrift und die Empfindlichkeit der AVT (AP3.7) evaluiert werden. Die Nullpunktdrift, bzw. der Offset des Sensorsignales durch den Fügeprozess mit dem Klebstoff AD295 ist in Abb. 29 abgebildet. Die Nullpunktdrift sowie die Sensorempfindlichkeit wurde an OFW-Sensoren auf dem Stahlprüfkörper (Abb. 23) untersucht. Hierfür wurde vorab ebenfalls der Temperaturgang der Sensoren im Arbeitsbereich (bis 85°C, bzw. 125°C) aufgenommen. Nach der Sensormontage beträgt der relative Offset bei Raumtemperatur 94.5 ± 17.7 ppm für mit AD295 fixierte Sensoren. Nach der Sensormontage mit den Fügemitteln AD295 konnte keine Nullpunktdrift festgestellt werden. Die Empfindlichkeit wurde mittels Zugversuchen (Abb. 24) bis zu einer Dehnung von ~500 ppm bestimmt. Die mit AD295 fixierten Sensoren weisen eine Dehnungsempfindlichkeit von ~400 Hz/ppm auf.

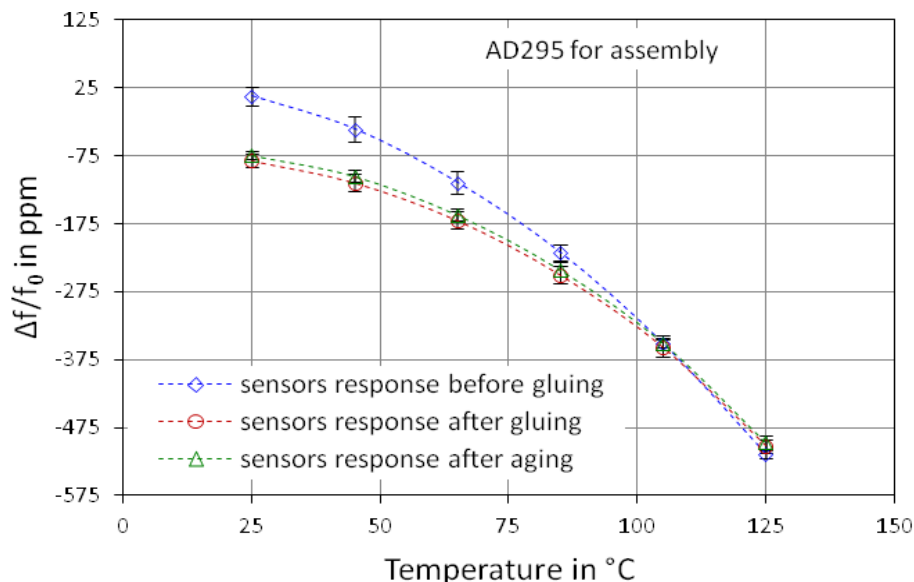


Abb. 29 Temperaturabhängige Nullpunktdrift/ Offset des OFW-Sensorsignals durch den Fügeprozess und Alterung, Klebstoff AD295

AP 5 Integration Funktionsblöcke / Finale Systementwicklung**[07.2011 - 03.2013]**

AP 5.2 Finale Gehäuseentwicklung / Mechanik

AP 5.7 Design Demonstrator / Layout, Musterfertigung Sensor

AP 5.9 Feldtests / Parameterstudie / Systemgrenzen

Status: abgeschlossen

Verwendete Zuwendungen AP5, wichtigste Positionen und zahlenmäßiger Nachweis

0846 Dienststreifen, Beleg Nr.15, 18, 19, 26-28, 30-33, 38-42, Dienststreifen zu den Projektpartner, um die Systemintegration von AP 5 sowie Feldtests, Parameterstudien durchzuführen und die Systemgrenzen AP 5.9 zu bestimmen.

Basierend auf den Erkenntnissen von AP 3.4 zur Sensitivitätsoptimierung wurden in AP 5 die Gesamtintegration der einzelnen Funktionsblöcke und die finale Systementwicklung durchgeführt. Die Funktionsblöcke bzw. Einzelkomponenten bestehen aus dem mechanischen Klemmsystem (Klammerschenkel), dem S-förmigen Sensor-Träger (S-Träger) und dem OFW-Sensor (inkl. Primär-Package und elektrischer Kontaktierung). Hierfür wurden die OFW-Sensoren auf die vom Projektpartner Sandner Messtechnik GmbH gefertigten S-Träger mit den verifizierten Fügeverfahren und Fügemiteln aufgebracht, siehe Abb. 30.



Abb. 30 OFW-Sensor fixiert mit dem Klebstoff AD295 auf S-Träger

Die in Abb. 30 gezeigten S-Träger wurden mittels Klemmfügung in AP 5.9 in den Drehmomentmessstand bei Sandner Messtechnik GmbH integriert und es wurden Tests durchgeführt (Abb. 31 und Abb. 32). Als Testbedingungen wurde eine statische Drehmomentbelastung von $\pm 1,5$ kNm in 0,5 kNm Intervallen definiert (Abb. 33). In einer zweiten Versuchsreihe wurde das System dynamisch mit 0,1 Hz von $\pm 1,5$ kNm belastet. Als Referenz für das eingeleitete Drehmoment in die Messwelle dient eine drahtgebundene Drehmomentmessdose (Abb. 32).

Bei allen Versuchen, die auf dem Torsionsmessstand durchgeführt wurden, wurde vorab die Torsionswelle von organischen Bestandteilen gereinigt. Die Schraubverbindungen des Klemmsystems wurden ebenfalls bei allen Versuchen mit 1,00 Nm angezogen. Des Weiteren wurde das Klemmsystem immer mit einem Spaltmaß von 40 mm zur rechten Wellenhalterung positioniert.

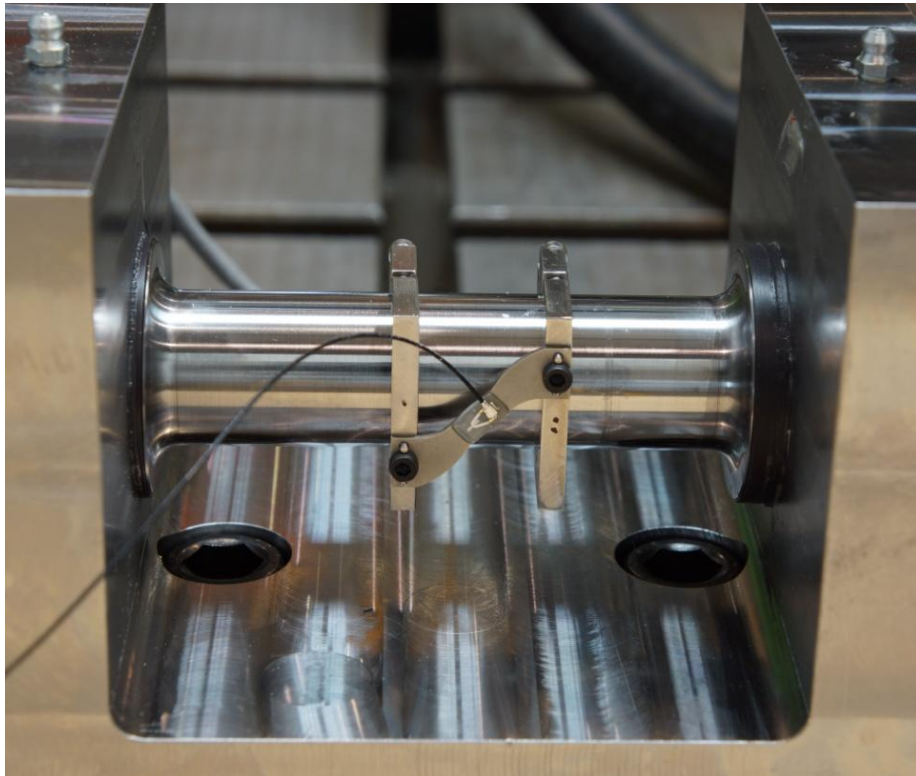


Abb. 31 Integrierter OFW-Sensor auf S-Träger im Torsionsmessstand

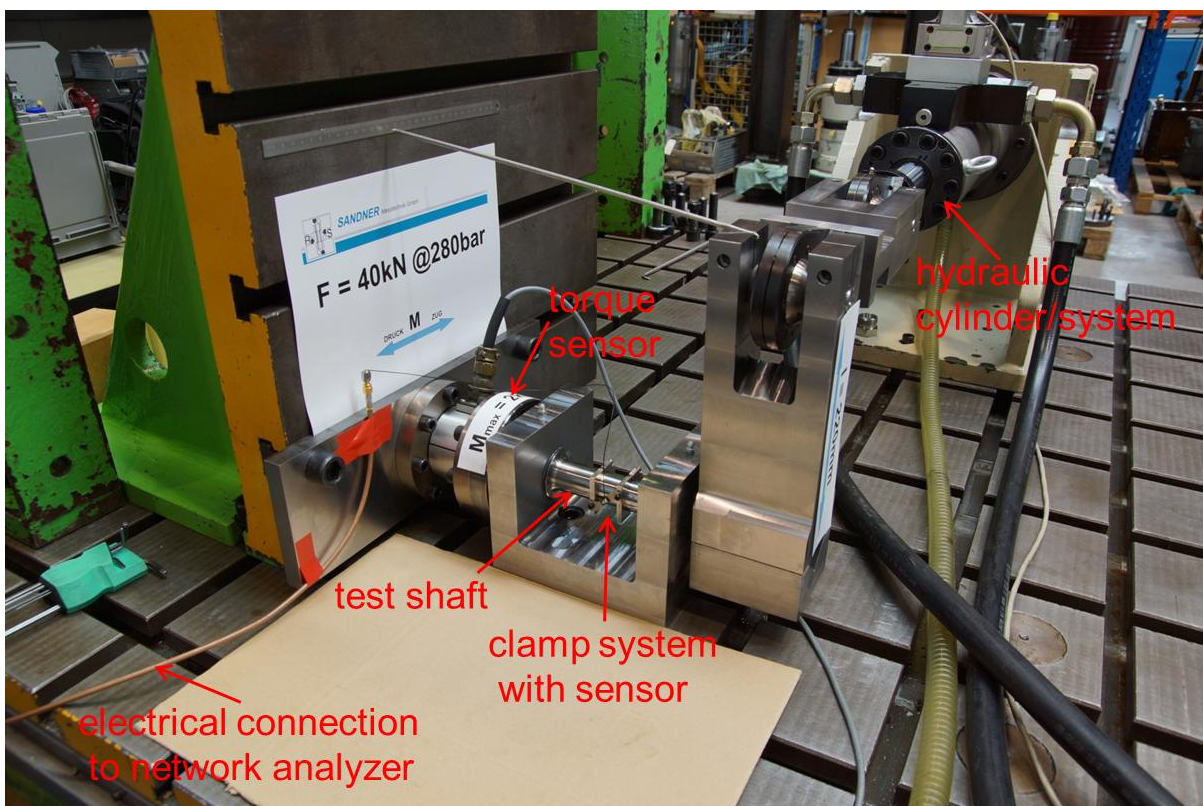


Abb. 32 Torsionsmesstand mit aufgebauten Erprobungsmuster

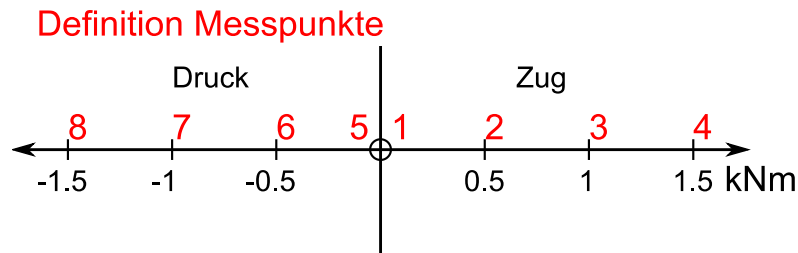


Abb. 33 Definition der Belastungsstufen für zyklische Belastung

Bei der ersten statischen Belastung wurde das System mit einem Moment von 1,5 kNm beaufschlagt, das zu Zugbelastung im OFW-Sensor führt. Hieraus resultierte eine Verschiebung der Resonanzfrequenz von -81,75 kHz (Abb. 34). Die Last wurde über einen Zeitspanne von 15 min konstant gehalten, wobei keine Signaldrift des Sensors zu erkennen war. Beim anschließenden Lastwechsel auf eine Druckbelastung des OFW-Sensors von -1,5 kNm betrug die Verschiebung der Resonanzfrequenz +80,25 kHz. Wie bei der Zugbelastung konnte keine Sensorsignaldrift während der Druckbelastung beobachtet werden. Nach der Entlastung der Systems sinkt die Resonanzfrequenz des OFW-Sensors um -22,5 kHz. Somit ist der Dehnungszustand des Sensors nach dem Versuchsablauf verschieden zum Anfangsdehnungszustand nach dem Sensoreinbau. Gleiches Verhalten ist bei einer zyklischen Belastung des Systems nach in Abb. 33 definierten Belastungszuständen zu beobachten. Um die Wiederholpräzision zu bestimmen, wurden jeweils drei Belastungszyklen durchlaufen (Abb. 35).

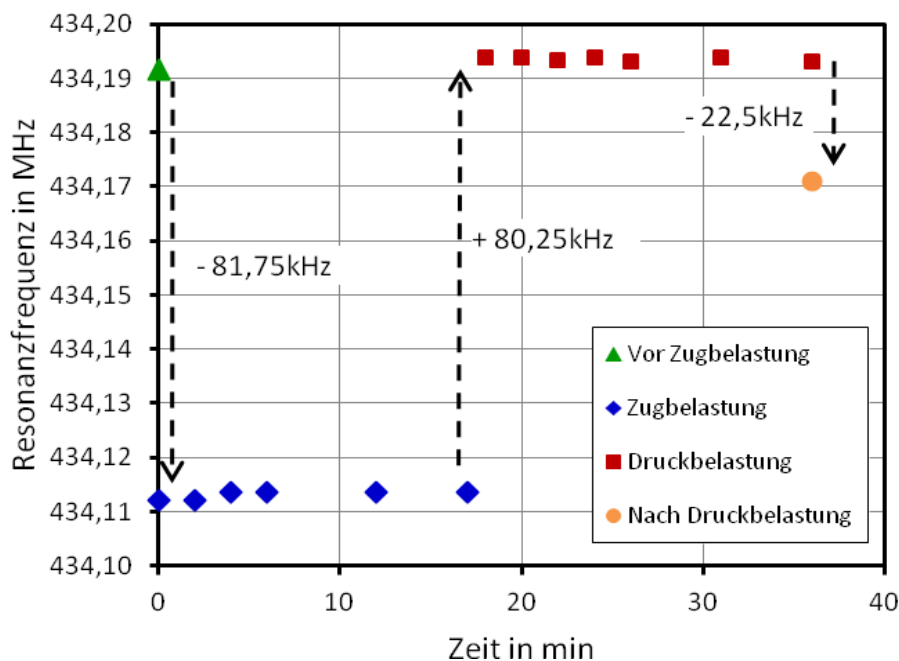
Abb. 34 Statische Drehmomentbelastung $\pm 1,5$ kNm

Abb. 35 zeigt die Resonanzfrequenz des OFW-Sensors in Abhängigkeit des angelegten Drehmoments, aufgenommen für drei Messzyklen. Das Sensorsignal zeigt ein nichtlineares Verhalten bei Lasten bis $\pm 1,5$ kNm. Beim Lastwechsel von positiv zu negativ im Entlastungszustand (0 kNm) ist eine Resonanzfrequenzverschiebung von ~ 60 kHz zu beobachten. Die Resonanzfrequenz zu Beginn der Messung und nach Ende der Messung weisen ebenfalls eine Frequenzverschiebung auf.

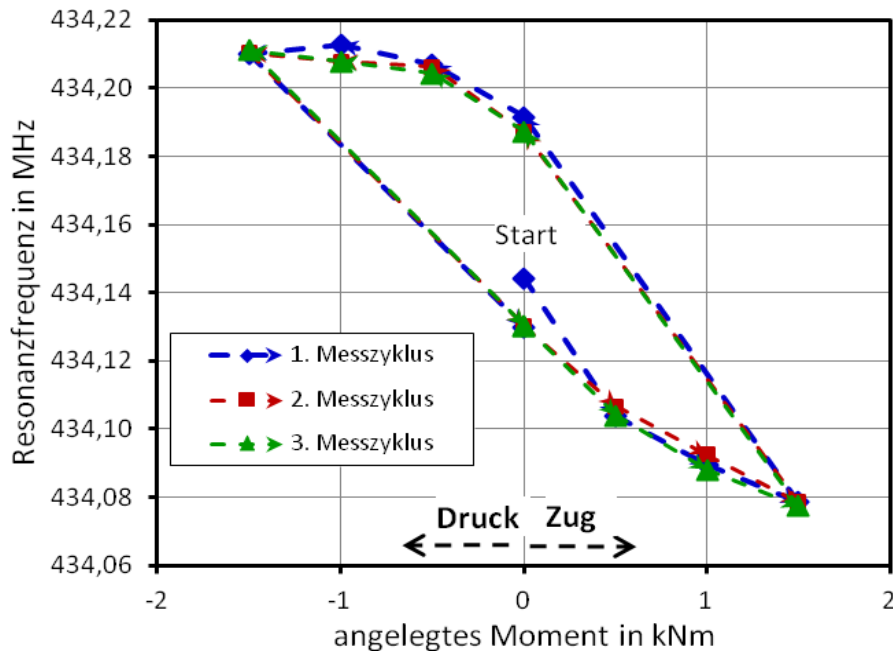


Abb. 35 OFW-Sensorsignal bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm

Abb. 36 stellt den zeitlichen Verlauf des OFW-Sensorsignales bei einer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit 0,1 Hz dar. Nach 40 min beträgt die Signaldrift der Resonanzfrequenz in den Lastspitzen ~ 34 kHz. Die Abweichung zwischen der Resonanzfrequenz bei Beginn der Messungen (Start) und nach Beendigung des Versuchsablaufes (Ende) beträgt etwa -47 kHz.

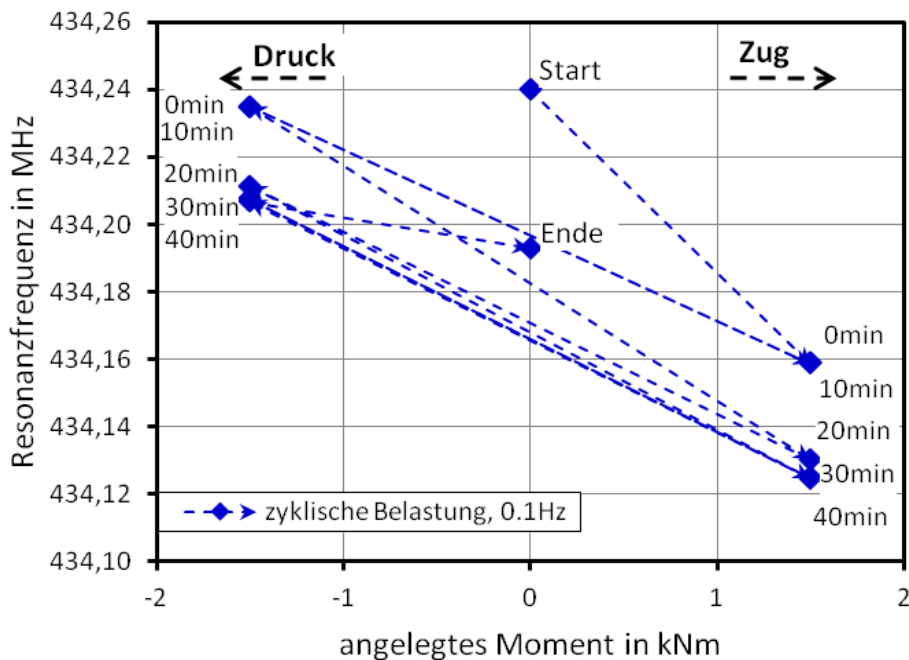


Abb. 36 SAW-Sensorsignal bei dynamischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit 0,1 Hz

Um die Ursache für die unerwünschten Frequenzverschiebungen zu finden, wurde das OFW-Sensor-signal vor dem Einbau (Messpunkt 1, Abb. 37) des Messsystems in den Prüfstand, nach dem Einbau (Messpunkt 2, Abb. 37) und nach den Messungen im ausgebauten Zustand aufgenommen (Messpunkt 3, Abb. 37). Damit kann geprüft werden, ob ein Kriechen in der in der Sensorfü-gung während der Belastungsphasen stattgefunden hat. Wie in Abb. 37 dargestellt, kann dies jedoch ausgeschlossen werden, da die Resonanzfrequenzen des OFW-Sensors vor dem Einbau und nach dem Ausbau identisch sind.

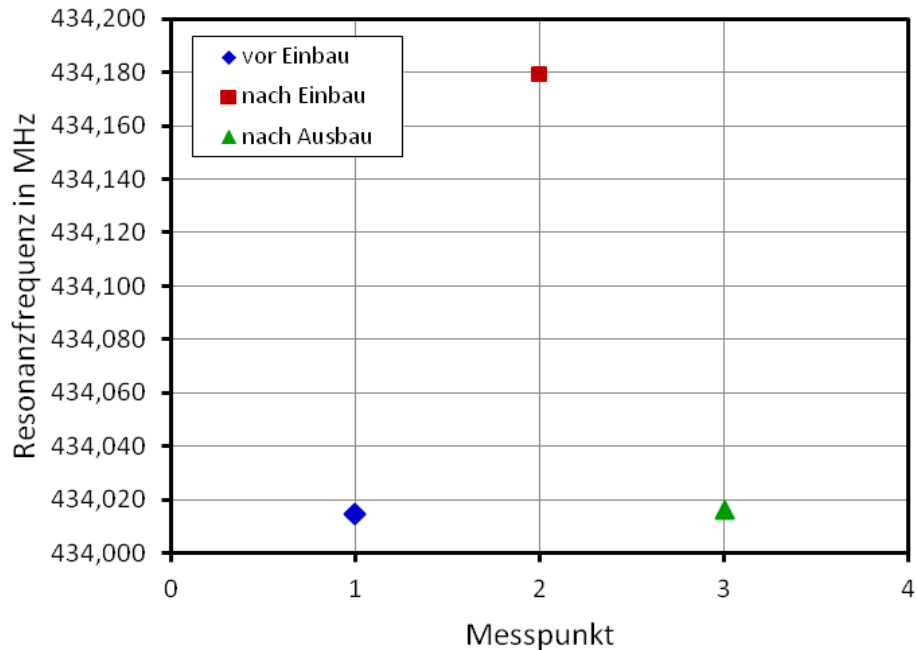


Abb. 37 OFW-Sensorsignal vor und nach Einbau, sowie nach Ausbau des Sensorsystemes

Als mögliche Quellen für die Sensorsignaldrift wurden die Steck- und Schraubverbindung des Sensorträgers (S-Träger, Abb. 30 und Abb. 31), sowie die Klemmfügung an die Prüfwellen (Abb. 31) identifiziert. Um die aufgestellte Hypothese zu verifizieren, wurde bei weiteren Messungen der Sensorträger auf die Klemmbügel geklebt (Abb. 38). Hierfür wurde ein schlagzäher Sofortklebstoff mit einer hohen Zugscherfestigkeit von Loctite® verwendet.



Abb. 38 Sensorträger geklebt auf Klemmbügel

In Abb. 39 ist der resultierende Sensorsignalverlauf bei einer zyklischen Belastung von $\pm 1,5$ kNm abgebildet. Die Nichtlinearität des Sensorsignalverlaufes konnte reduziert werden, ebenso das Hystereseverhalten im lastfreien Dehnungszustand des OFW-Sensors bei 0 kNm (vergl. Abb. 35). Beim Lastwechsel von positiv zu negativ im Entlastungszustand (0 kNm) ist eine Resonanzfrequenzverschiebung von ~ 34 kHz zu beobachten, was nahezu einer Halbierung des Hystereseverhaltens beim lastfreien Dehnungszustand entspricht. Die Momenten-Sensitivität des Systems über dem gesamten Messbereich liegt bei ~ 40 kHz/kNm.

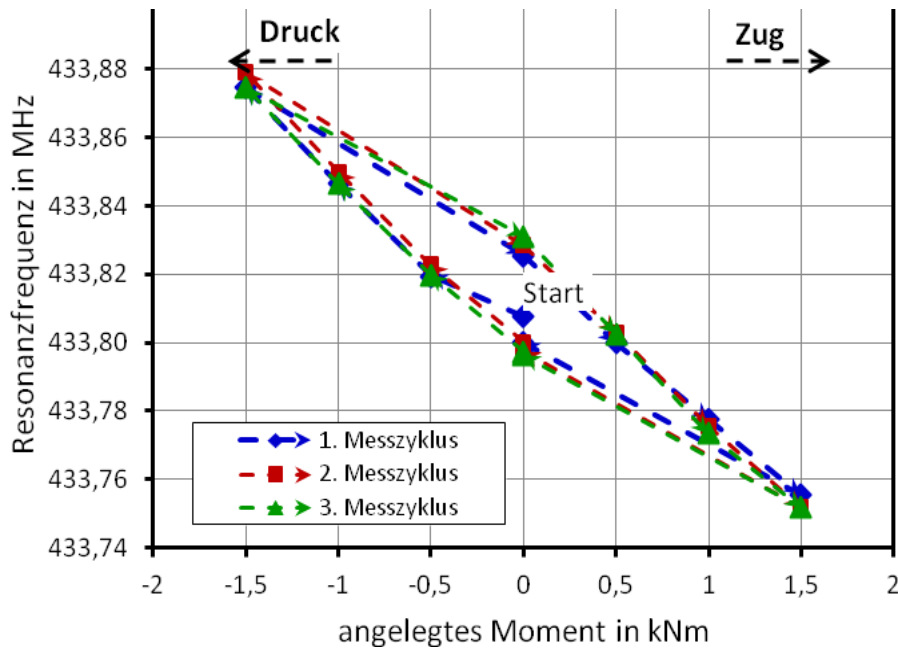


Abb. 39 OFW-Sensorsignal bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit zusätzlicher Klebefixierung des Sensorträgers auf dem Klemmbügel

Die zeitliche Signaldrift des OFW-Sensors konnte mittels zusätzlicher Klebefixierung des Sensorträgers auf den Klemmbügeln ebenfalls auf ~ 8 kHz reduziert werden (Abb. 40). Die Signalverschiebung zwischen dem Beginn (Start) und Ende (Ende) der Messung (Abb. 40) beträgt ~ 24 kHz. Dies entspricht annähernd einer Halbierung der Signalverschiebung ohne zusätzliche Sensorträgerfixierung (~ 47 kHz) auf den Klemmbügeln.

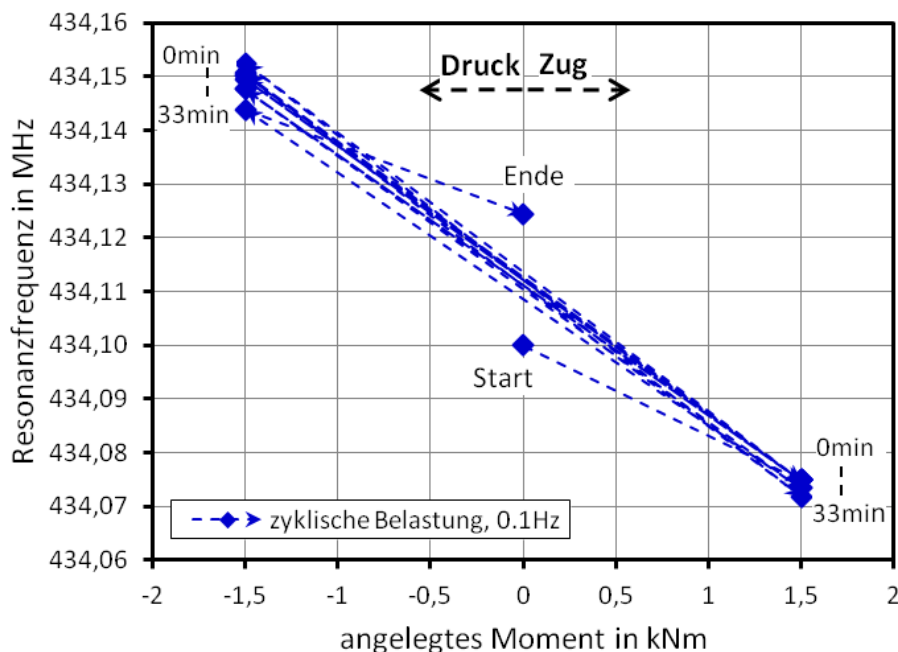


Abb. 40 OFW-Sensorsignal bei dynamischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit 0,1 Hz und zusätzlicher Klebefixierung des Sensorträgers auf dem Klemmbügel

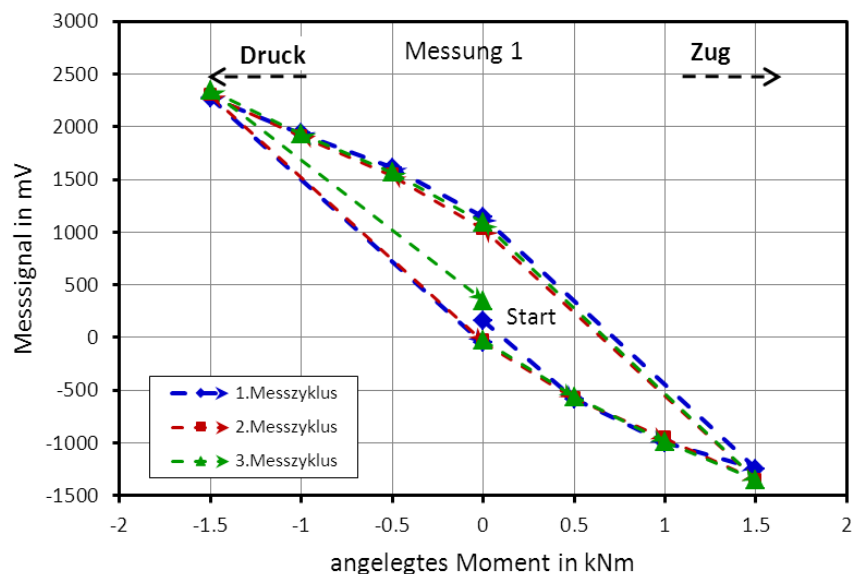
Aus den durchgeführten Messungen und den daraus gewonnen Erkenntnissen geht hervor, dass die Signaldrift sowohl über der Zeit, als auch über den Belastungszuständen auf Gleiten der Klemmverbindung und Toleranzen in der Steck-/Schraubverbindung des Sensorträgers auf den Klemmbügeln zurückgeführt werden kann.

Diese Erkenntnisse wurden zusätzlich mit Referenzmessungen mittels Messuhr und Dehnungsmessstreifen (DMS 1+2) anstelle der OFW-Sensoren nachgewiesen. Hierfür wurde anstelle der OFW-Sensoren Standard-DMS auf den S-Träger appliziert. Dieser Applikationsprozess wurde vom Projektpartner Sandner Messtechnik GmbH mit einem industriell qualifizierten Fügeprozess durchgeführt. Abb. 41 zeigt den DMS 1 aufgebaut im Torsionsprüfstand zur weiteren Untersuchung der Toleranz- und Gleiteffekte des realisierten Klemmkonzeptes. Der als Halbbrücke aufgebaute DMS wurde über einen Trägerfrequenz-Messverstärker ausgewertet. Die Klammerposition, Klammer-Fixierung und Systembelastung wurden identisch ausgeführt wie bei den Versuchen mit den OFW-Sensoren, um das Systemverhalten direkt vergleichen zu können.

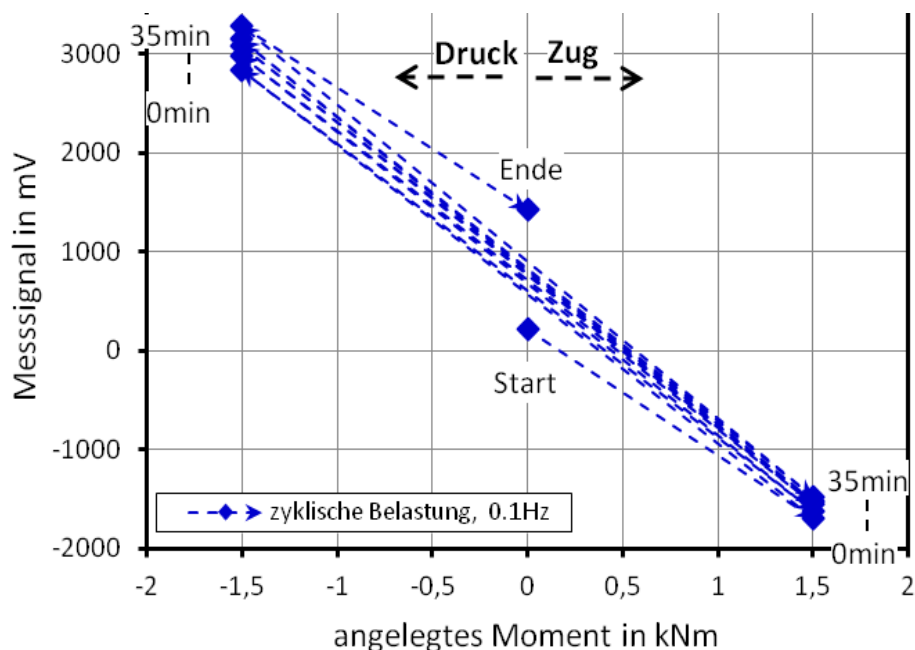


Abb. 41 DMS 1 aufgebaut auf S-Träger, montiert mit der Klammer II auf der Torsionswelle zur weiteren Untersuchung der Toleranz- und Gleiteffekte

Das Sensorverhalten DMS 1 bei einer zyklischen Torsionsbelastung von maximal $\pm 1,5$ kNm ist in Abb. 42 dargestellt und entspricht qualitativ demselben Verhalten, wie bei den durchgeführten OFW-Sensor Messungen. Zwischen den Dehnungsmessstreifen DMS 1 und DMS 2 gab es keine qualitativen Unterschiede im Signalverhalten, wodurch hier nur jeweils eine Messkurve (DMS 1 oder 2) abgebildet wird. Beim Nulldurchgang, d.h. unbelasteter Zustand, geht die Sensordehnung nicht in den ursprünglichen Zustand zurück (~ 1000 mV). Auch sind die Start- und Enddehnungszustände verschieden, d.h. ein undefinierter Dehnungszustand nach den Belastungszyklen bleibt erhalten. Dieser Dehnungszustand ist steuerungsabhängig, d.h. zu welchem Zeitpunkt und wie schnell der Versuchsaufbau gesteuert wird.

Abb. 42 DMS-Sensorsignal bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm

Das DMS Sensorverhalten bei dynamischer Belastung ($\pm 1,5$ kNm mit 0,1 Hz) des Systems (Abb. 43) verhält sich qualitativ ähnlich wie bei der OFW-Sensor Messung (Abb. 36 und Abb. 40). Das Sensor-Signal driftet über die Zeit bei einer dynamischen Belastung des Aufbaus. Ebenfalls sind die Start- und Enddehnungszustände verschieben (~ 1200 mV).

Abb. 43 DMS-Sensorsignal bei dynamischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit 0,1 Hz

Um die Hypothese der Toleranz- und Gleiteffekte final zu bestätigen, wurden an die Klammerschenkel analoge Messuhren montiert. Hierdurch kann die Klammerschenkelverschiebung visualisiert und gemessen werden, wenn der Aufbau mit einer Torsionsbelastung beaufschlagt wird. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 44 abgebildet. Die Messuhren wurden auf dem Trägergestell des Gesamt-Versuchsaufbaues fixiert, wodurch eine vollständige Entkopplung von Wellenhalterung bzw. Versuchsaufbau gewährleistet werden konnte. Somit basiert der Zeiger-Ausschlag der Messuhren ausschließlich auf Verschiebung der Kontaktpunkte mit den Klammerschenkeln. Das System wurde wiederum mit einer zyklischen Torsionsbelastung von maximal $\pm 1,5$ kNm in 0,5 kNm Lastschritten beaufschlagt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 45 dargestellt.



Abb. 44 Versuchsaufbau mit DMS 2 und zeitgleicher Messung der Klammerschenkel-Verschiebung senkrecht zur Torsionsachse mit analogen Messuhren.

Wie in Abb. 45 zu erkennen ist, erfährt der rechte Klammerschenkel eine größere Klammerschenkelverschiebung senkrecht zur Torsionsachse als der linke Klammerschenkel. Die Verschiebung beträgt für den rechten Klammerschenkel $\sim \pm 330 \mu\text{m}$ und für den linken Klammerschenkel $\sim \pm 250 \mu\text{m}$ bei maximaler Torsionsbelastung ($\pm 1,5 \text{ kNm}$), da die Torsion rechts in die Welle eingeleitet wird (Abb. 32). Qualitativ zeigt sich das gleiche Signalverhalten wie bei den DMS und OFW Messungen. Nach der Torsionsbelastung des Systems ist im entlasteten Zustand des Systems die Klammerposition verschieden zur Ausgangsposition.

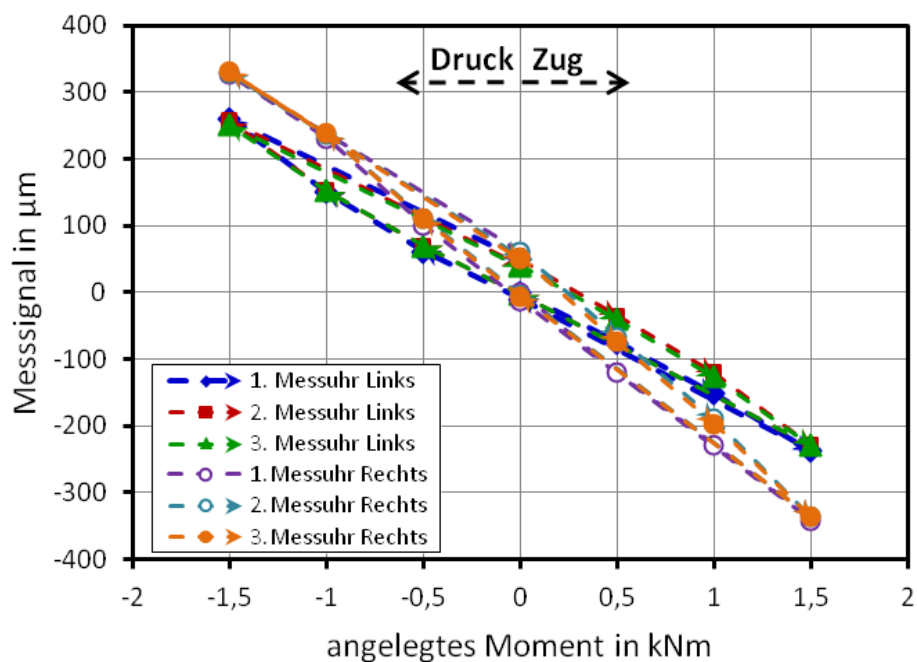


Abb. 45 Klammerschenkel-Verschiebung senkrecht zur Torsionsachse, zeitgleich gemessen mit Messuhren zum DMS Messsignal

Nach den Messungen wurde die Klammer demontiert. Auf der Welle sind an der Position der Klammer deutliche Riefen in der Welle (Abb. 46) zu erkennen, was die Hypothese über ein Gleiten des Systems auf der Welle stützt.

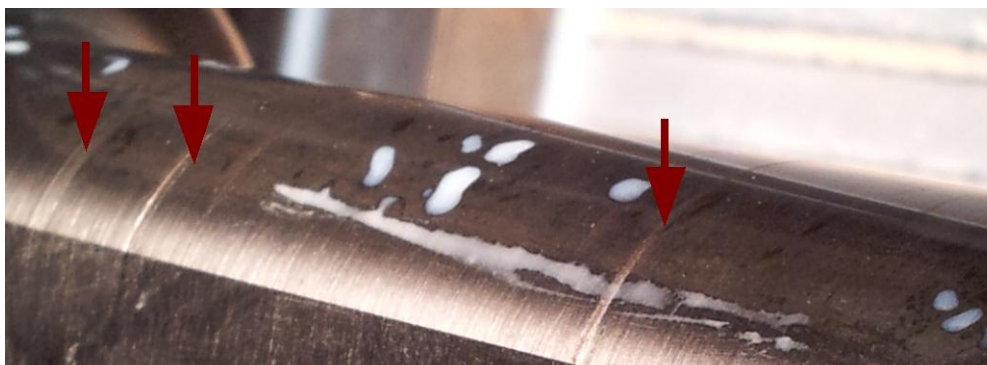


Abb. 46 Riefen in der Torsionswelle an der ehemaligen Klammer-Position
(Bildquelle: Sandner Messtechnik GmbH)

Mit den durchgeführten Messungen mit drei unabhängigen Messprinzipien konnte nachgewiesen werden, dass das Klemmsystem auf der Torsionswelle bei einer Torsionsbelastung auf der Welle gleitet. Als weiterführendes Ziel im Rahmen des Projektes (AP 5.9) wurde daher die Minimierung der beschriebenen Gleit- und Toleranzeffekte definiert, um die Nichtlinearitäten und das Hystereseverhalten des Klemm-Systems zu minimieren.

In einem ersten Ansatz zur Untersuchung der Toleranz- und Gleiteffekte wurde versucht die Klammerschenkel zusätzlich mit Klebstoff zu fixieren. Hierfür kam wiederum der schlagzähe Sofortklebstoff mit einer hohen Zugscherfestigkeit von Loctite® zum Einsatz. Der Klebstoff wurde entlang der Klammerschenkel aufgebracht, um diese zusätzlich auf der Torsionswelle zu fixieren (Abb. 47).



Abb. 47 Integrierter OFW-Sensor im Torsionsmessstand mit zusätzlicher Fixierung des S-Trägers und der Klemmbügel auf der Trosionswelle

Durch die zusätzliche Fixierung der Klammerschenkel auf der Torsionswelle hat sich das System weiter versteift, wodurch sich das Systemverhalten wesentlich änderte. Das Systemverhalten ist in Abb. 48 dargestellt. Wird der OFW-Sensor mit einer Druckbelastung beaufschlagt, ist das Sensorverhalten äquivalent zu einer reinen Zugbelastung des Sensor selbst. Entsprechend ist das Sensorverhalten bei einer Zugbelastung des Systems. Durch die zusätzliche Fixierung der Klammerschenkel ändern sich die Belastungszustände im System dahingehend, dass der OFW-Sensor sich gegensätzlich zum angelegten Belastungszustand verhält.

Das Hystereseverhalten des Systems (~ 32 kHz) ist vergleichbar mit einem, bei dem der S-Träger auf Klemmschenkel zusätzlich mit Klebstoff fixiert wurde (~ 34 kHz). Daraus ist zu schlussfolgern, dass das noch bestehende Hystereseverhalten des Systems auf das Gleiten der Klammer auf der Torsionswelle zurückzuführen ist. Die Sensitivität des Systems über dem gesamten Messbereich liegt ebenfalls bei ~ 40 kHz/kNm.

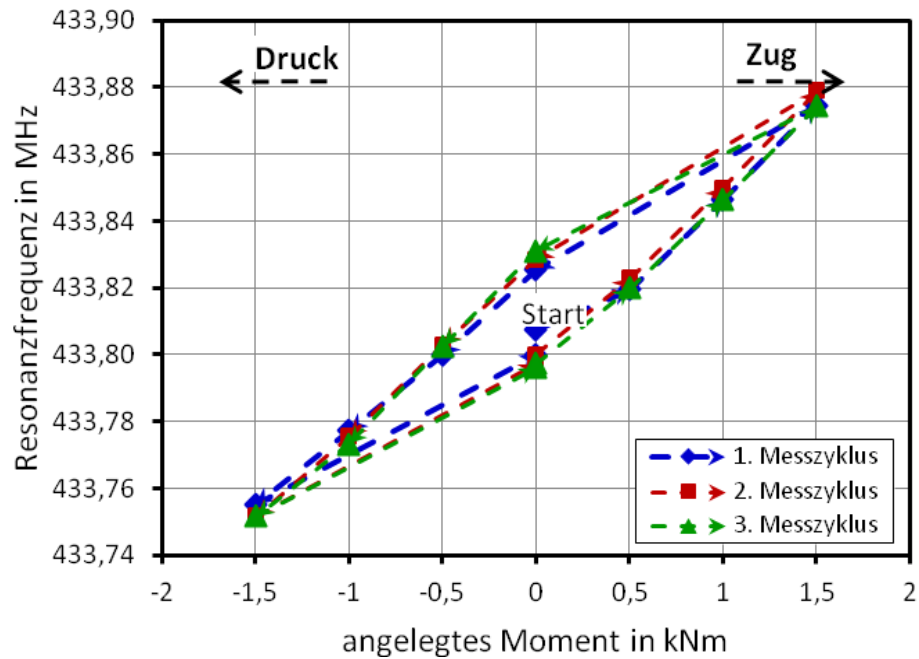


Abb. 48 OFW-Sensorsignal bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit zusätzlicher Klebefixierung des Sensorträgers und der Klammerschenkel

Um den Zusammenhang zwischen Hystereseverhalten und dem Gleiten der Klammer auf der Torsionswelle zu verifizieren, wurden nach eingehender Diskussion mit den Projektpartnern weitere konstruktive Modifikationen an den Klammerschenkeln und der Torsionswelle durchgeführt. In die Klammer wurde hierfür eine Nut gefräst, in die bei der späteren Systemmontage ein Klemmkeil eingelegt werden kann (Abb. 49). Mit eingebautem Klemmkeil soll das Hystereseverhalten des Systems auf ein Minimum reduziert werden.



Abb. 49 Modifizierte Klammerschenkel
(Bildquelle: Sandner Messtechnik GmbH)

Um ein solches Klemmkeil-System verwenden zu können, musste die Torsionswelle ebenfalls modifiziert werden (Abb. 50). Diese wurde vom Projektpartner Sandner Messtechnik GmbH

durchgeführt. Hierfür wurde die Torsionswelle aus dem Messstand ausgebaut und feinwerktechnisch modifiziert.



Abb. 50 Modifizierte Torsionswelle (Bildquelle: Sandner Messtechnik GmbH)

Mit den modifizierten Klammerschenkeln und Torsionswelle wurden erneut Versuche zur Torsionsmessung mit den DMS und OFW-Sensoren durchgeführt. Die Fixierung und Positionierung des Systems erfolgte identisch zu den vorangehenden Versuchen. Die Fixierungsschrauben wurden jeweils mit 1,00 Nm angezogen und das Spalt-Maß zwischen Klemmsystem und rechter Wellenhalterung betrug 40 mm. Die Torsionslast wurde ebenfalls gleich gehalten ($\pm 1,5$ kNm in 0,5 kNm Intervallen), um die Messungen mit vorangehenden vergleichen zu können. Der Aufbau des modifizierten Systems mit dem DMS 1 ist in Abb. 51 abgebildet.



Abb. 51 DMS 1 aufgebaut auf S-Träger, montiert mit der Klammer III auf der modifizierten Torsionswelle zur Untersuchung der Gleiteffekte auf das Systemverhalten

Das Systemverhalten mit DMS 1 als Sensorelement ist in Abb. 52 abgebildet. Die Hysterese mit abgeflachter Torsionswelle beträgt lediglich noch ~ 160 mV, im Vergleich zur Messung ohne abgeflachte Torsionswelle betrug die Hysterese ~ 1000 mV. Die erzielte Reproduzierbarkeit in den Messung-Zyklen ist sehr gut (Abb. 52). Des Weiteren sind die Start- und End-Dehnungszustände annähernd gleich nach den durchgeführten Messzyklen. Hier zeigt sich ebenfalls eine deutliche Verbesserung dieses Effektes nach der Abflachung der Torsionswelle.

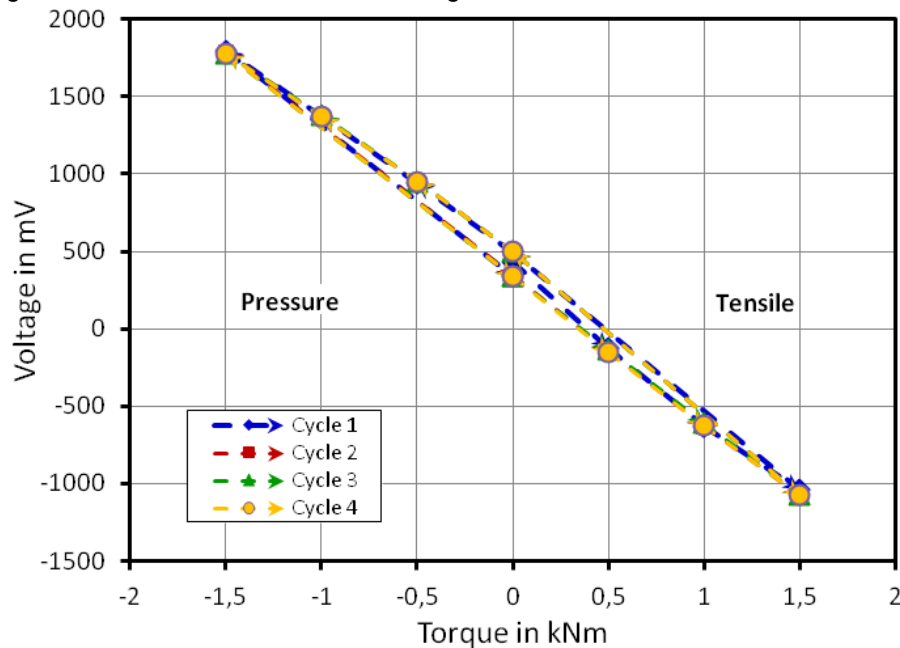


Abb. 52 DMS-Sensorsignal bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm mit modifizierter Torsionswelle

Abb. 53 zeigt das Messsystem mit dem OFW-Sensor, integriert im Torsionsmessstand mit abgeflachter Torsionswelle. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Abb. 54 dargestellt.



Abb. 53 OFW-Sensor auf S-Träger im Drehmomentmessstand mit abgeflachter Torsionswelle

Mit abgeflachter Torsionswelle konnte auch das Hystereseverhalten bei den Messungen mit den OFW-Sensoren reduziert werden. Nach der Modifikation der Welle beträgt die Hysterese lediglich noch $\sim 4,25$ kHz. Ohne Wellenmodifikation betrug diese ~ 60 kHz. Die Sensitivität des Systems für den gesamten Messbereich liegt nach Abflachung der Torsionswelle bei ~ 41 kHz/kNm. Die Linearität des Sensorverhaltens ist weiterhin gewährleistet, jedoch hat sich das umgekehrte Sensorverhalten

bestätigt. Eine nähere Untersuchung dieses Phänomens war im Rahmen des Projektes nicht möglich, da hierfür umfangreiche und komplexe Untersuchungen erforderlich wären.

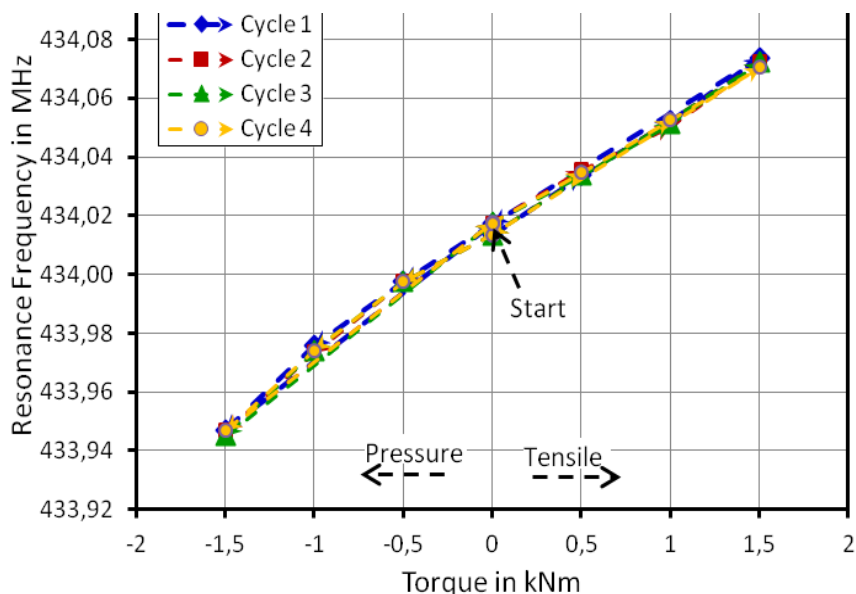


Abb. 54 OFW-Sensorverhalten bei zyklischer Belastung von $\pm 1,5$ kNm und abgeflachter Torsionswelle

Aus den durchgeführten Messungen mit der abgeflachten Torsionswelle und der modifizierten Klammer III konnte eine signifikante Reduktion der Gleit- und Toleranz-Effekte durch die Minimierung des Hystereseverhaltens des Systems nachgewiesen werden. Ein direkter Zusammenhang wurde ebenfalls mit den Referenzmessungen mittels Messuhr und Dehnungsmessstreifen (DMS) anstelle der SAW-Sensoren nachgewiesen. Eine weitere konstruktive Verbesserung der Drehmoment-Manschette wird daher als möglich erachtet.

Mit dem entwickelten und aufgebauten Funktionsmuster zur Torsionsmessung konnte die Realisierbarkeit einer extern montierbaren Drehmoment-Sensorik nachgewiesen werden. Torsionsmessungen im Feldtest bestätigen die Funktionalität. Jedoch zeigen das Hystereseverhalten und die Linearität des Systems Optimierungspotential in der konstruktiven Anbindung an die Torsionswelle.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Erfahrungen und Ergebnisse

Die gesammelten Ergebnisse und Erfahrungen werden von den Projektpartnern direkt genutzt, um interne Prozesse zu optimieren und stetig weiter zu entwickeln. Die Simulationen wurden auf weitere Anwendungen transferiert und leisten einen signifikanten Beitrag in der Forschung und Entwicklung mechanischer Sensoren. Fügeprozesse aus dem Vorhaben wurden ebenfalls in weitere Anwendungen überführt. Ein wesentlicher Nutzen des Vorhabens liegt vermutlich bei der Expertise, welche sich die Projektpartner durch das Projekt aneignen konnten.

Bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet

Während der Laufzeit des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger im Bereich der AVT keine für das Vorhaben relevanten Fortschritte Dritter in diesem Bereich bekannt geworden.

Publikationsliste mit Bezug auf das Teilvorhaben

J. Hempel, E. Zukowski, M. Berndt, S. Anees, J. Wilde, L. M. Reindl, "STRAIN TRANSFER ANALYSIS OF INTEGRATED SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSORS", 2013, ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2013, San Francisco, CA

J. Hempel, J. Wilde, L. M. Reindl, "Effects of Residual Stress on Assembled SAW Strain Sensors", 2013, Proceedings of 33rd PIERS, Progress In Electromagnetics Research Symposium, Taipei, Taiwan, 2013, S. 286 - 290

J. Hempel, E. Zukowski, M. Berndt, J. Wilde, und L. M. Reindl, „Assembly of α -Quartz for Surface Acoustic Wave (SAW) Strain Gauges Application“, gehalten auf der Electronic Systems-Integration Technologies Conference, (ESTC), IEEE/CPMT, Amsterdam, Netherland, 2012.

E. Zukowski, T. Fellner, J. Wilde, und M. Berndt, „Parameter optimization of torque wireless sensors based on surface acoustic waves (SAW)“, in *2012 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, 2012, S. 1/6 –6/6

J. Wilde, T. Fellner, E. Zukowski, und M. Berndt, „Assembling Mechanical Sensors into Engineering Structures“, Smart Systems Integration, International Conference and Exhibition, Zurich, Switzerland, 2012.

Ergebnisse Teilvorhaben ASROT (EMP)

Aufgabenstellung des Teilvorhabens

The project tasks of EMP chair were focused on the interrogation of SAW resonators on a 3 cm diameter rotating steel shaft for torque and temperature measurements (cross sensitivity compensation). The interrogation had to be done in the 434 MHz Industrial, Scientific and Medical (ISM) band and covering all rotation angles. The distances of interrogation and surrounding environment were initially not specified. In most industrial applications, rotating machineries are located in harsh and metallic environment. Therefore, a near-field coupling solution is usually chosen, especially if a metal box protects the sensing system. The detailed goals were the following:

- Design, simulation and construction of antennas optimized for the SAW sensors
- Analysis of the RF signal path between the SAW-sensor and the antenna
- Optimization of the sensitivity of the SAW sensor elements
- Characterization and analysis of the measuring signals of the SAW sensor elements
- Development of optimized signal processing and filtering algorithms

The following table shows the initial work packages in collaboration with the other partners.

Nr.	Arbeitspaket	Summe AP	2010			2011												2012									
			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2	Grundlagen des Antennendesigns (Fernbereich)																										
2.1	Konzeptentwicklung und -evaluation Fernfeldantenne	1.50					✓																				
2.2	Simulation, Aufbau und Charakterisierung von Funktionsmustern	1.00							✓																		
2.3	HF-Signalfadanalyse Chip-/Packaging-Level	1.50																									✓
3	Grundlagen der Aufbau- und Verbindungstechnik / Sensorebene																										
3.4	Maximierung der Sensitivität / maximale Kraftübertragung auf das Sensorelement	3.50								✓																	
4	Abfrage- und Auswerteeinheit, Elektronik																										
4.2	Signalcharakterisierung auf drehenden / rotierenden Wellen und statischen Verbindungswellen	3.00									✓														✓	✓	
4.3	Signalverarbeitung und Filteralgorithmen	2.00	✓																								✓
5	Integration Funktionsblöcke / Finale Systementwicklung																										
5.1	Systemspezifikationen und Schnittstellenabstimmung	1.50					✓																				
5.3	Umsetzung Optimierungsansätze HW / SW	2.00																									✓
5.8	Design Demonstrator / Layout, Musterfertigung Auswerteeinheit	0.50																									✓
5.9	Feldtests / Parameterstudie/Systemgrenzen	1.50																									✓
	Summe PM	18.00																									

AP 2 Grundlagen des Antennendesigns (Fernbereich)

[01.2011 – 09.2012]

AP 2.1 Konzeptentwicklung und -evaluation Fernfeldantenne

AP 2.2 Simulation, Aufbau und Charakterisierung von Funktionsmustern

AP 2.3 HF-Signalfadanalyse Chip-/Packaging-Level

Status AP 2: abgeschlossen

Verwendete Zuwendungen AP2, wichtigste Positionen und zahlenmäßiger Nachweis

0835 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.2 Maschinenstunden: cutting of FR-4 epoxy material for printed antenna manufacturing (as shown in Abb. 56a and Abb. 59a)

0843 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.1-10, 12 , Elektronische Bauteile: purchase of antennas (ceramic, flexible and monopoles antennas), RF cables and antenna testing materials

0846 Dienstreisen, Beleg Nr. 4 : project meeting with Sensor members in Besancon (France) to setup the interrogation unit and discuss the project goals (S. Ballandras and J.-M. Friedt)

The integration of SAW devices working at 434 MHz on a few centimeter diameter rotating shaft is compromised by the size and the sensitivity of the antennas, especially for far-field communications when 360° angular coverage is required. In fact, the corresponding wavelength at 434 MHz is about 70 cm. Hence, a circular near-field coupler is more suitable, where the signal is transferred by inductive or capacitive coupling (i.e. reactive region). Rotary RF couplers⁶⁻⁷ (shown in Abb.55a) and circular microstrip couplers⁸ have been used and several designs patented. These devices are tuned to the frequency and impedance of the sensor to provide a sufficient coupling. On the other hand, the

resonator sensor frequency is shifting due to the coupling and receiver coupler impedance variations which are a function of the rotation angle⁹. As shown in Abb. 55b, typical single resonator frequency pulling is over 2 kHz without adding a de-coupling resistor or capacitor⁶, increasing the signal to noise ratio.

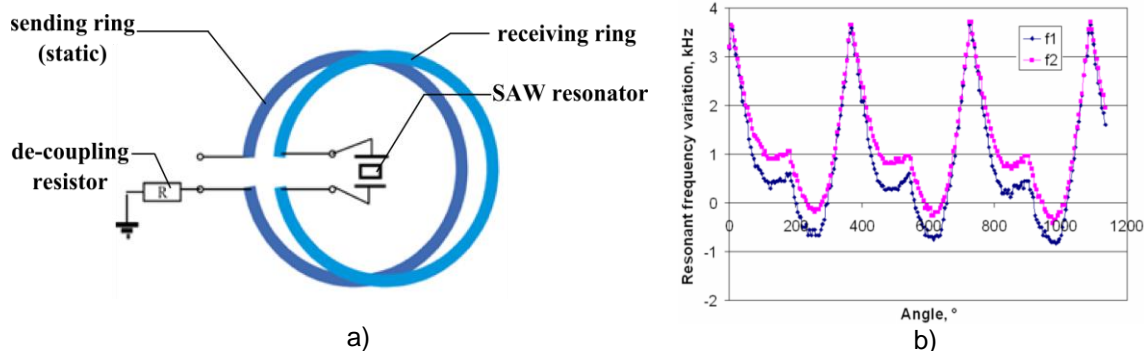


Abb. 55 a) Rotary signal coupler schematic and b) results of resonator frequency pulling⁶.

Two new coupling systems have been developed and tested. The first one is based on the coupling between a ceramic antenna and a loop antenna. It allows to reduce the size of the receiving antenna. The second one is based on open coplanar strip transmission lines, which are capacitively coupled. It allows a low angular transmission amplitude and receiver electrical parameters variation. Therefore, a low frequency pulling has been observed. This coupler has been chosen for the final solution and the detailed results are given.

1) Ceramic antennas as receiving element:

Thanks to the high permittivity package, ceramic antennas exhibit reduced dimensions in relation to the wavelength of the electromagnetic wave in free space at the operating frequency. They are commonly made by low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology and contain interconnected metallic meanders. In our case the use of ceramic antennas is interesting because they fit to the shaft and clamp size. However, the presence of the metallic parts reduces drastically the device radiation performances of the receiving and the transceiving antenna(s). Therefore, as shown in Abb. 56a, 56b and 56c, an approach is to place a static loop antenna around the shaft connected to the interrogation unit. In this configuration the antennas are in the same polarization, allowing a high coupling.

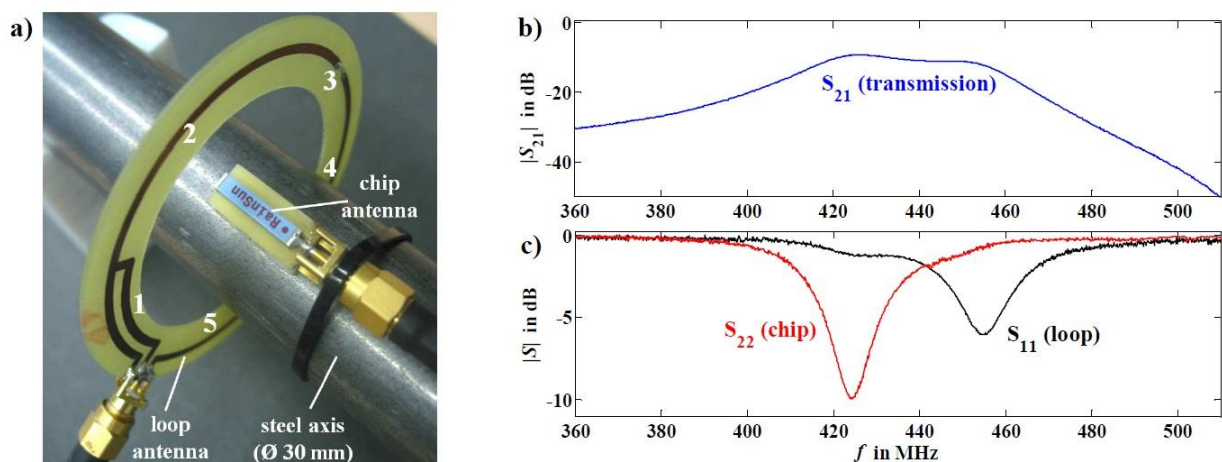


Abb. 56 a) Measurement configuration between the chip antenna on PTFE substrate and a printed loop antenna, b) transmission and c) return loss measurement results at position 2.

As shown in Abb. 57a and 57b, ceramic antennas have also been fixed on steel clamps (provided by Sandner Messtechnik GmbH). However, transmission variations of more than 10 dB have been observed for these two near-field interrogation approaches. This problem is due to the non uniform distribution of the current around the loop. Moreover, ceramic antennas present a high Q and a resonance frequency near 434 MHz which is a potential source of resonator frequency pulling⁹. Therefore this concept has not been further investigated.

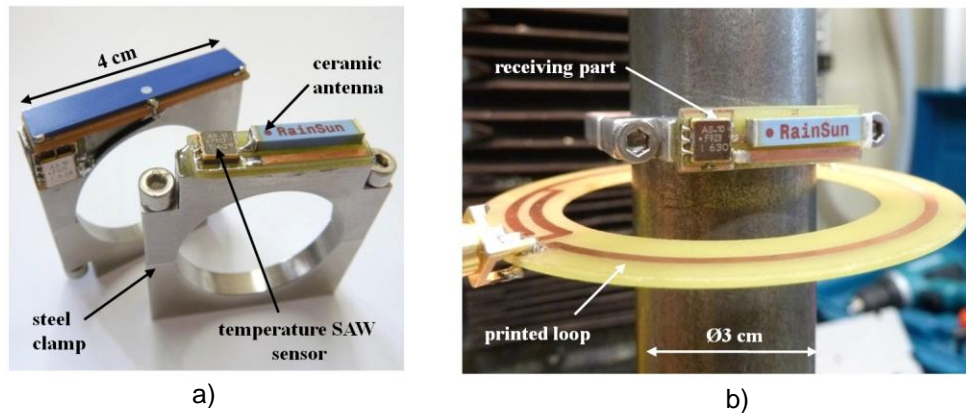


Abb. 57 a) Ceramic antennas connected to dual resonance temperature SAW sensor and fixed on steel clamps and b) interrogation using a printed loop antenna placed on a steel shaft.

2) Capacitive coupler based on open coplanar strip lines:

Abb. 58a shows a capacitive coupler concept comprising one static and one rotating element. The rotating element is mounted on the shaft using a new steel clamp and is connected to a strain resonator using a WFL Hirose coaxial cable. The static part is connected to the reader unit and is a 120°-section of the first element but could also be a complete circular element. RF signals and grounds are respectively connected to coplanar transmission lines, also called strip lines¹⁰. Both coupler elements have a capacitive behavior at low frequencies. Abb. 58b shows a Finite Element Method simulation (HFSS, Ansys) of the generated electrical (E) field on a plane at 3 mm from the receiver element surface. The distribution is uniform except for a small drop at the feeding point.

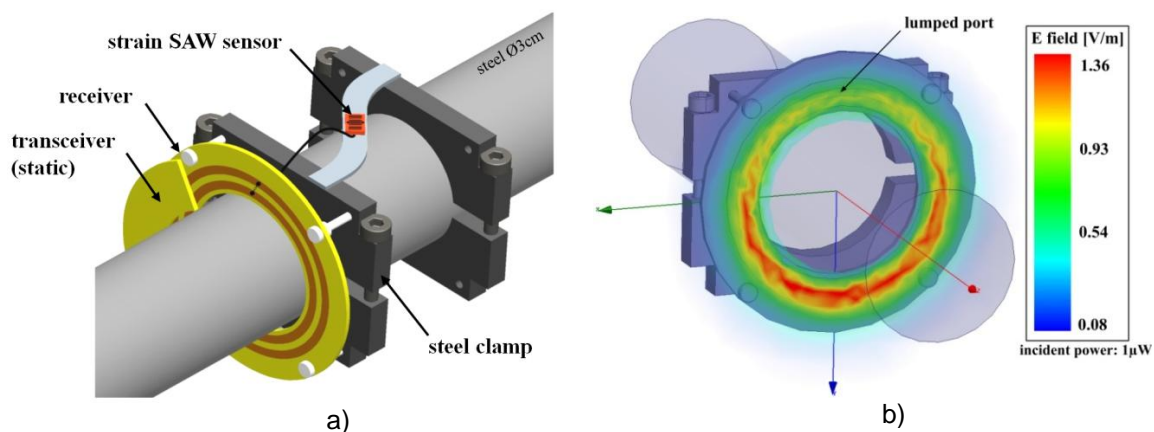


Abb. 58 a) Schematic of the capacitive coupler connected to a strain SAW resonator fixed on the clamp bridge and b) simulation of the electrical field distribution at 3 mm from the surface.

Abb. 59a shows the manufactured coupler elements. The conductors are 2 mm wide, separated by 1.5 mm and printed on a single layer of 1 mm thick FR-4 epoxy. The receiver outer ring has a length of 140 mm, corresponding to an electrical length of 70 mm due to the symmetry. In our case the receiver element is resonating at 840 MHz and the reader element at 1.6 GHz. Both coupler disks are ideally not tuned to 434 MHz in order to achieve low parasitic frequency pulling on the resonators⁹. Polyamide screws have been used to fix the circular coupler element to a steel clamp in order to avoid disturbances of the generated electrical field. Fig 59b shows the coupler measurement setup. Several 50 Ohm connectors have been used. The coaxial cable linking the receiver element to a rotating connector has been set as an extension port using the network analyzer.

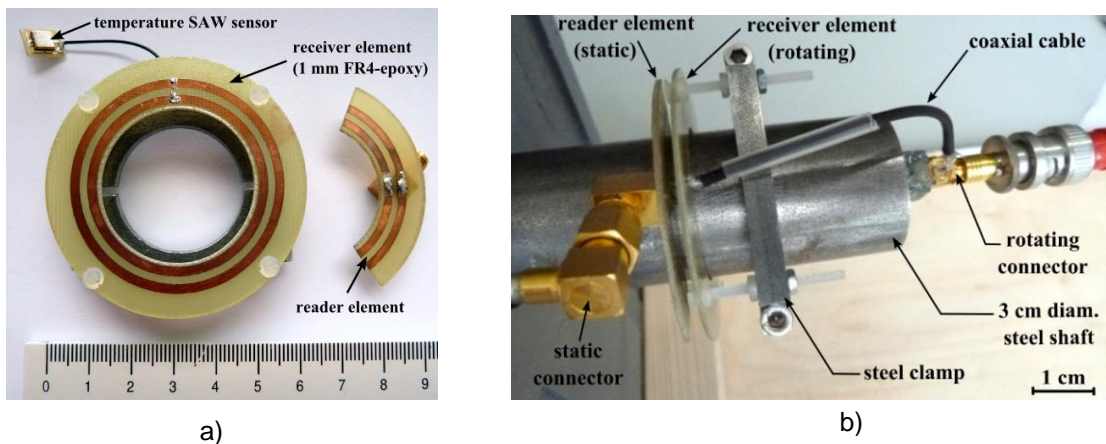


Abb.59: a) Manufactured coupler elements on 1 mm thick FR-4 epoxy substrates and
b) coupler measurement setup using calibrated connectors and cables.

Abb. 60 presents the transmission amplitude variations obtained at different angular positions and gaps between the coupler elements and at 434 MHz. Due to the non frequency tuning and impedance matching of the coupler elements, the amplitudes are low compared to traditional couplers. A variation of 3 ± 0.6 dB is observed, which is much lower than the results previously obtained between the ceramic and the loop antenna. The lowest but acceptable transmission amplitude occurs when the two feeding points are in front of each other. This position is defined as the zero rotation angle.

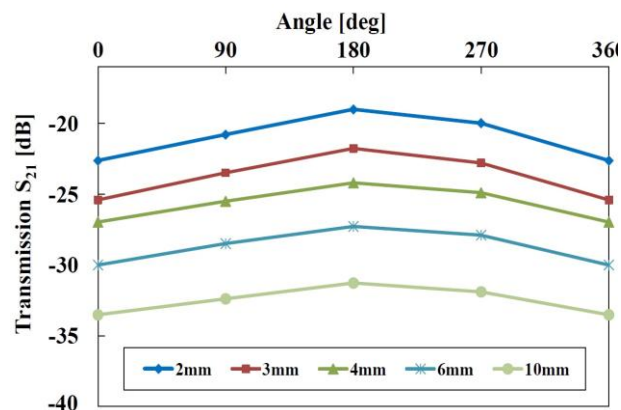


Abb. 60 Measured angular variation of transmission amplitude S_{21} at different gaps.

The following measurements have been realized with a gap of 3 mm. Abb. 61a shows that the transmission susceptance $\text{Im}(Y_{21})$ slightly shifts (variation of 55%) during a rotation at 434 MHz. The values are negative at this frequency range, proving that the coupling is capacitive. The resistance changes by $3.4 \pm 0.2 \Omega$ but we mainly focus on the imaginary parts since the quality factors of the elements are low. The observed variations peaks are due to the receiver and transceiver resonances.

Abb. 61b shows that the susceptance of the receiver element $\text{Im}(Y_{22})$ is slightly shifting (variation of 1.42%). In conclusion, if the coupler elements would have been intentionally tuned to 434 MHz, the transmission amplitude S_{21} would have been much higher. However the transmission susceptance Y_{21} and receiver element Y_{22} variations would have been drastically higher, which is source of measurement errors.

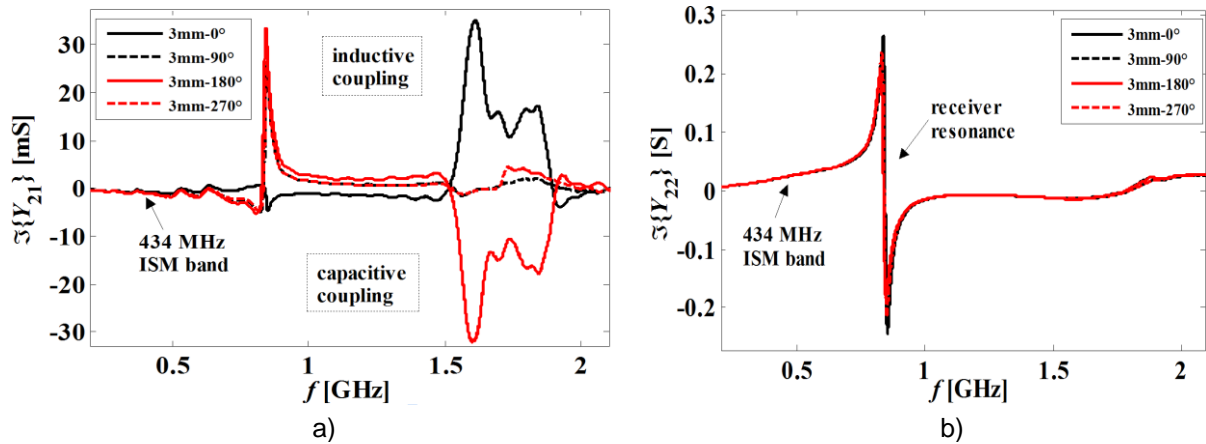


Abb. 61: a) Angular variation of transmission susceptance $\text{Im}(Y_{21})$ and b) angular variation of receiver susceptance $\text{Im}(Y_{22})$ over a large frequency range.

The linearized equivalent circuit model of the coupler connected to a SAW resonator in the 434 MHz range is shown in Abb. 62a. This schematic is used to estimate the angular parasitic effect on a connected resonator due to the coupler capacitors variation. The coupler schematic is represented by the three capacitors C_1 , C_2 and C_3 , corresponding respectively to the reader, coupling and receiving (sensor port) element. The sensor is modeled according to Butterworth-van Dyke with the static capacitor C_4 (4 pF), the motional capacitance C_5 (0.68 fF), the motional inductor L_1 (197.3 μH) and the dissipation resistor R_1 (38 Ω) which is neglected in the calculation. Values were taken from the TSEAS10 sensor datasheet¹¹. In order to reduce the parasitic frequency pulling, the coupler values C_2 and C_3 have to remain as constant as possible. Abb. 62b is showing the angular variations of calculated coupler capacitors C_2 and C_3 for different gaps. The capacitors decrease and reach a minimum value at larger gap due to lower coupling. As expected, the coupling capacitors are smaller than the receiver's ones.

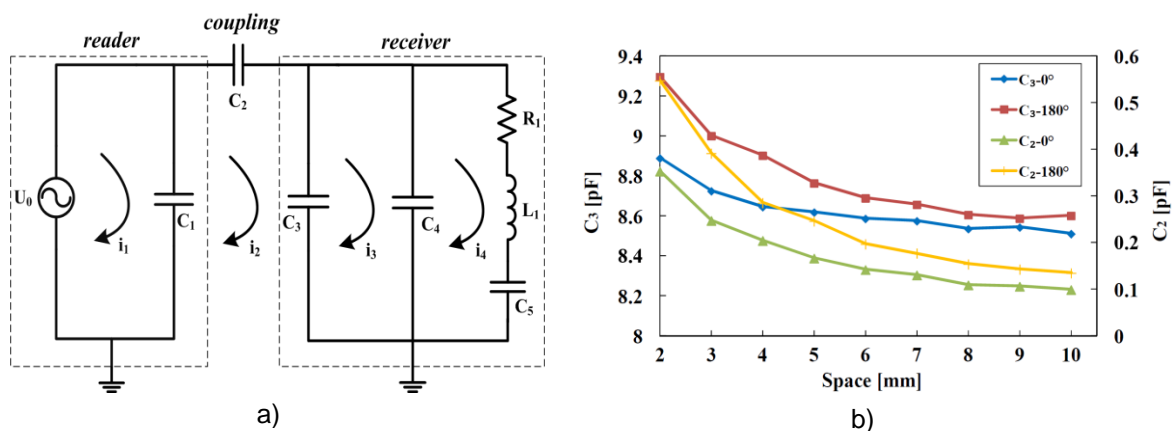


Abb. 62: a) Simplified equivalent circuit model of the capacitive coupler connected to a single SAW resonator and b) coupler capacitance C_2 and C_3 calculated from measurements.

AP 4 Abfrage- und Auswerteeinheit, Elektronik

[10.2010 – 09.2012]

AP 4.2 Signalcharakterisierung auf drehenden / rotierenden Wellen und statischen Verbindungswellen

AP 4.3 Signalverarbeitung und Filteralgorithmen

Status AP 4: abgeschlossen**Verwendete Zuwendungen AP4, wichtigste Positionen und zahlenmäßiger Nachweis**

0835 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.5,6,8,9, Maschinenstunden: manufacturing of steel clamps (shown in Abb. 5) and measurement bench (shown in Abb. 64)

0843 Vergabe von Aufträgen, Beleg Nr.17-19, 22-26, 29-32, 34, 37-43 Elektronische Bauteile: purchase of additional RF components, electronics and mechanical parts (stepper motor, brushless motor, microcontroller based control electronics) for the measurement bench

0846 Dienstreisen, Beleg N. 14, 20 : project meeting with Sensor members in Besancon (France) to setup the interrogation unit and improve the obtained results

The schematic presented in Abb. 63 summarizes the used wireless interrogation principle¹². The 434 MHz centered ISM band is swept in 7.5 ms. The maximum transmitted power is 10 dBm and an isolation of 80 dB was measured experimentally. Moreover, a 1 to 32 dB programmable attenuator located before the power duplexer on the emission stage is used to increase the dynamic range in order to avoid saturation of the received signal. However, it is not necessarily usable for rotating applications due to the time needed for the automatic control. The received power must be as much stable as possible with a maximum variation of 4 dB. In this setup the asynchronous (RS-232) serial communication is the limiting factor to the measurement bandwidth to 10 values per second, but nevertheless provides the highest resolution with respect to a digital to analog voltage output which provides an update rate of up to 2400 Hz.

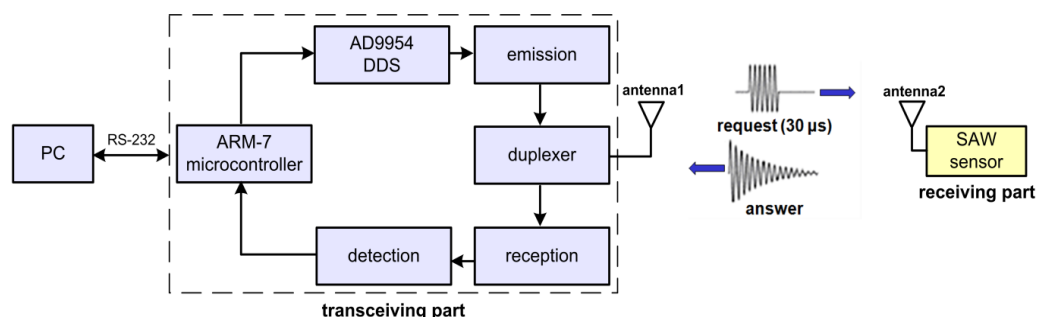


Abb. 63 RADAR-based interrogation principle.

Abb. 64 shows the manufactured measurement bench for frequency pulling measurements at different gaps and humidity effect analysis in a climatic chamber (Weiss WK 340). A microcontroller board is linked to a stepper motor in order to achieve low angular rotation. A brushless motor has also been used for high speed measurements up to 2000 RPM on the same bench.

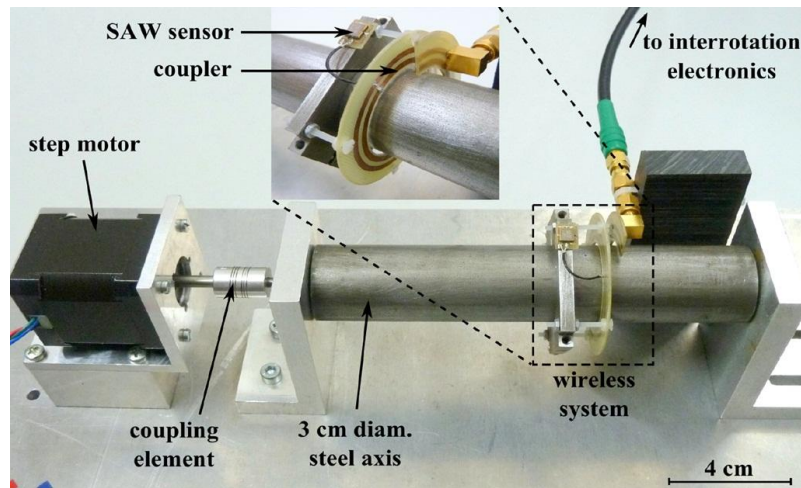


Abb. 64 Measurement bench with a step motor and the wireless measurement system fixed on a 3 cm diameter steel shaft.

Abb. 65a shows the frequency pulling of a dual resonance temperature sensor (TSEAS10 sensor) in which two Rayleigh-mode SAW resonators patterned on a common quartz substrate are connected in parallel. One resonator is orientated at 20° with respect to the X propagation direction and is therefore temperature dependent (f_1 at 433.5 MHz); the other one is used as a reference (f_2 at 434.2 MHz) with a turnover temperature close to room temperature. The sensor differential temperature sensitivity is 2.5 kHz/K (6 ppm/K) when operating between -20°C and $+160^\circ\text{C}$. In this case the gap between the coupler elements is 3 mm. Four revolutions have been realized using the stepper motor (3.6° steps at 1 Hz rate) in the climatic chamber. The temperature was set to 25°C and the relative humidity to 55 %. The automatic gain control controlling the radio-frequency emission power so that the returned power is at mid-scale of the analog to digital converter was activated. The frequencies values are averaged by a factor of 16. Digital post-processing using a median filter reduced the resulting standard deviation from ~ 550 Hz to ~ 10 Hz. The observed pulling effect due to the angular rotation on both resonators is below 160 Hz (0.37 ppm). Abb. 65b shows that a differential measurement ($f_2 - f_1$) can further reduce the frequency difference pulling effect to below 100 Hz (0.20 ppm).

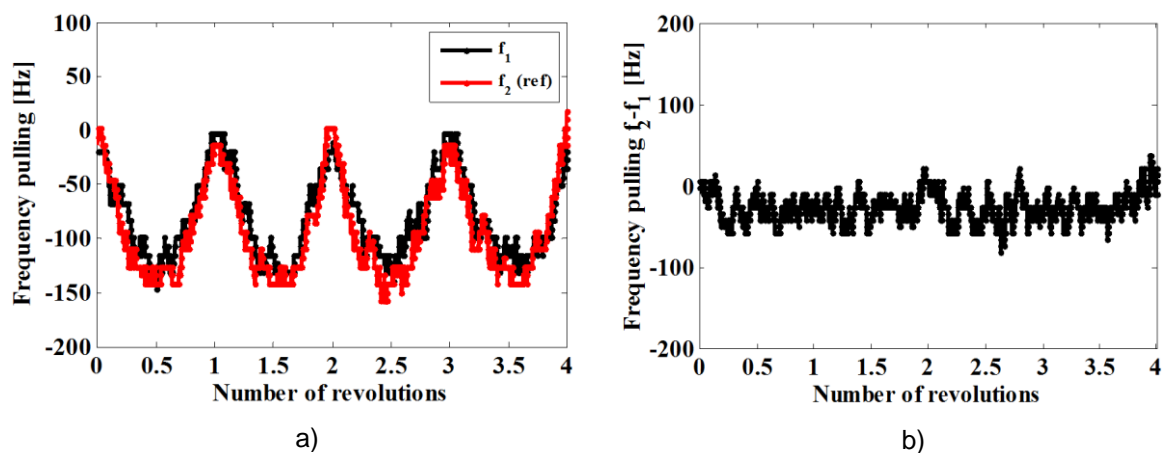


Abb. 65: a) Measured angular frequency pulling obtained from a dual resonator temperature SAW sensor (gap: 3 mm, 25°C) and b) frequency difference ($f_2 - f_1$).

Abb. 66a shows that the expected and measured frequency pulling is lower when the gap increases due to the fact that the coupler capacitances decrease (i.e. de-coupling effect). The two curves are different for two main reasons. Firstly the linearized equivalent circuit model shown in Abb. 62a is an approximation of the complete circuit. Secondly, several coaxial cables and connectors have been used during the pulling measurements, the sensor was soldered on a substrate and frequency pulling measurements have been realized in a metallic cavity ($\sim 0.8 \text{ m}^3$). Therefore several de-coupling elements were not included during the coupler characterization shown on Abb. 59b. As shown in Abb. 66b, the humidity level linearly modifies the resonator response. A single resonator frequency offset lower than 120 Hz (0.27 ppm) is observed from a humidity level of 55 % to 98 % and with a gap of 3 mm. If the coupler elements would have been tuned to the sensor frequency, the humidity would have changed the substrates' permittivity and therefore their electrical parameters and a high frequency offset would have been observed.

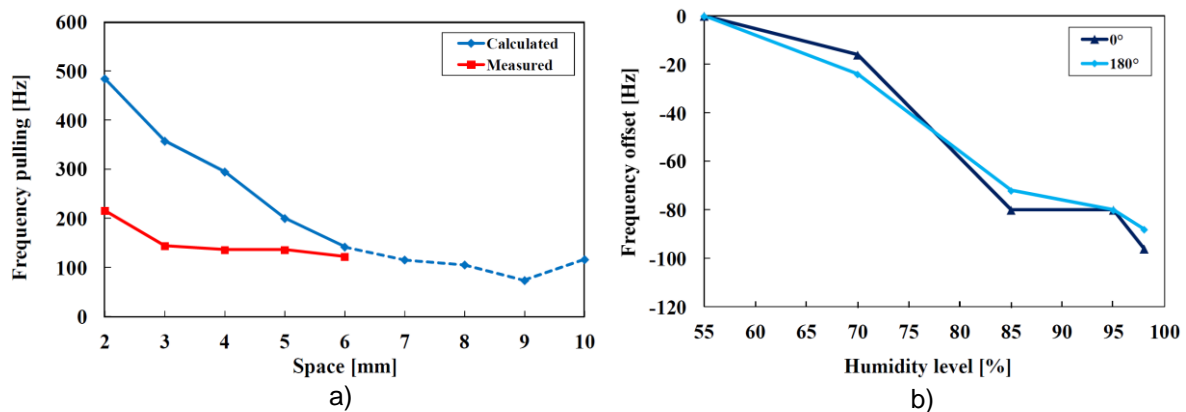


Abb. 66: a) Calculated and measured frequency pulling on the first resonator at different gap spaces and b) measured frequency offset on the resonator at different humidity levels

AP 5 Integration Funktionsblöcke / Finale Systementwicklung [12.2010 – 09.2012]

AP 5.1 Systemspezifikationen und Schnittstellenabstimmung

AP 5.3 Umsetzung Optimierungsansätze HW / SW

AP 5.8 Design Demonstrator / Layout, Musterfertigung Auswerteeinheit

AP 5.9 Feldtests / Parameterstudie/Systemgrenzen

Status AP 5: abgeschlossen

Verwendete Zuwendungen AP5, wichtigste Positionen und zahlenmäßiger Nachweis

0846 Dienstreisen, Beleg Nr. 24, 29 : project meeting with Sensor in Besancon (France) to setup the electronic unit for the interrogation of several sensors and discuss the results with other project partners

Static wired torque measurements have been carried out by the other project partners. Wireless torque measurements can be achieved using the previously presented capacitive coupler, the interrogation unit and the graphic user interface UI-MTS 4 from the partner Sensor.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Erfahrungen und Ergebnisse

All the research goals have been reached for the sub-project ASROT. Two approaches have been proposed for the wireless interrogation part. The use of ceramic antennas reduces the size of the receiver coupler element. However, full interrogation coverage of a sensor is difficult to reach using loop or monopole antennas. Moreover, the high Q and the self resonance of the antenna can be a source of frequency pulling. Therefore a capacitive coupler has been proposed, which is based on open and coplanar coupled transmission lines providing a low angular variation of transmission due to the uniform electric field distribution around the receiving disk. The low-power detection capability of the RADAR-based interrogation unit eliminates the need to work at the sensor frequency. It reduces significantly the parasitic pulling effect as well as humidity effect on the sensor due to the low angular variation in transmission and electrical coupler parameters. Therefore we have found a coupler solution, which is the basis for further near-field data transmission inside the housing of a rotating machine. Possible improvements during the utilization of the results will refer to the mechanical setup of the capacitive coupler, wireless torque measurements on static and rotating machinery and eventually filtering of the data. Also, our experiences can lead to improved far-field solutions based on receiving antenna made of ceramic materials and on a thicker substrate. A further important experience was that the definition of the surrounding environment is indispensable from the very beginning of a design in order to choose the type of the transceiving antennas and to place them correctly.

Referenzen

⁶ V. Kalinin, "RF Rotary Couplers for Contactless Torque Sensors Based on SAW Resonators", EFTF (2008).

⁷ A. Lonsdale and B. Lonsdale, "Rotary signal coupler", US Patent No. 6864759, Date of filing: Sep. 3, 2001.

⁸ Beckley, J.; Kalinin, V.; Lee, M.; Voliansky, K., "Non-contact torque sensors based on SAW resonators," Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002. IEEE International, vol., no., pp.202,213.

⁹ S. Tourette, "Etude de l'association éléments rayonnants - capteurs SAW" PhD Thesis from the University of Sophia Antipolis, Nice, France (2010).

¹⁰ DiPaolo, F.: Coplanar Strips, Networks and Devices Using Planar Transmission Lines, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

¹¹ <http://www.senseor.com/saw-temperature-sensor-chips.html>

¹² J.M Friedt, C. Droit, G. Martin, S. Ballandras, "A wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement", Rev. Sci. Instrum. vol. 81, 014701, 2010.

Bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet

Während der Laufzeit des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger im Bereich der EMP keine für das Vorhaben relevanten Fortschritte Dritter in diesem Bereich bekannt geworden.

Publikationsliste mit Bezug auf das Teilvorhaben (EMP)

J.-M. Boccard, P. Katus, R. Renevier, L.M. Reindl, J.-M. Friedt "Near-Field Interrogation of SAW Resonators on Rotating Machinery", JSSS Journal 2013 (under review).

J.-M. Boccard, L.M. Reindl, "Printed loop and ceramic antenna for wireless interrogation of SAW resonators on a clamp system", 2012 IEEE International Conference SSD, Chemnitz, Germany, March 2012.

J.-M. Boccard, L.M. Reindl, "Ceramic and magnetic loop antennas for wireless interrogation of SAW resonators on rotating machinery", IEEE International Workshop iWAT, Tucson AZ (USA), March 2012.

J.-M. Boccard, L.M. Reindl "SSI TorqueSENS: Ceramic Antennas for Wireless Interrogation of SAW Resonators" 2012 Proc. of MicroTEC Südwest - Cluster Conference, Stuttgart, Germany.

J.-M. Boccard, L.M. Reindl "SSI TorqueSENS: Wireless interrogation concept for industrial torque measurements with SAW resonators" 2011 Proc. of MicroTEC Südwest - Cluster Conference, Karlsruhe, Germany.

J.-M. Boccard, L.M. Reindl, „Printed loop and ceramic antenna for wireless interrogation of SAW resonators ", Workshop RadioTecC, Berlin, Germany, 2011.

J.-M. Boccard, L.M. Reindl, "360° wireless interrogation concept for industrial torque measurements with SAW resonators", Workshop EEefcom, Ulm, Germany, May 2011.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (<u>Schlussbericht</u> oder <u>Veröffentlichung</u>)
3. Titel MODAVT SSI-TorqueSENS - Radarbasierte Drehmomentmessung mit OFW-Resonatoren	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.-Ing. J. Hempel M.Sc. J.-M. Boccard Prof. Dr.-Ing. J. Wilde	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2013
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Institut für Mikrosystemtechnik Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik Georges-Köhler-Allee 103-01-107 79110 Freiburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen ^{*)} 16SV5478K
	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/VE Innovation + Technik GmbH , Berlin, 16.08.2013	
18. Kurzfassung Im Vorhaben ist es gelungen, wesentliche Beiträge zu den technisch-wissenschaftlichen Schlüsselfragen wie der Sensormontage, und der Datenübertragung zum und vom Sensor zu leisten. Dabei wurde insgesamt ein Konzept für ein an existierende Maschinen ohne Modifikationen nachträglich anzubringendes Messsystem verifiziert. Alle Arbeitspakete: <ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen des Sensordesigns (Gesamtsensor) • Grundlagen der Aufbau und Verbindungstechnik (Sensorebene) • Integration Funktionsblöcke / Finale Systementwicklung • Grundlagen des Antennendesigns (Fernbereich) • Abfrage- und Auswerteeinheit, Elektronik • Integration Funktionsblöcke / Finale Systementwicklung wurden erfolgreich abgeschlossen. Im Teilvorhaben MODAVT wurden die Konzeption, Modellierung und Optimierung der Montagetechnik von OFW-Dehnungssensoren als Drehmomentmesszellen durchgeführt. Die realisierte Sensormontage ermöglicht dabei eine hohe Auflösung mit einer minimalen Querempfindlichkeit (z. B. thermischen Dehnungen). Der experimentelle Nachweis und die Verifikation der modellbasierten Optimierung wurden geführt. Auch wichtige Teilziele, wie die Bereitstellung geeigneter Materialeigenschaften für die Simulation und den Aufbau von nachträglich montierbaren Messzellen zur Drehmomenterfassung, wurden erreicht. Eine Patentanmeldung (ZEE20120726, "Kapazitiver Drehkoppler zur kabellosen Abfrage von resonanten Sensoren") ist geplant.	
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.