AQUILA Abschlussbericht

ZE:	Förderkennzeichen:
Sensitec GmbH	16ES0186K

Vorhabenbezeichnung:

Konzepterarbeitung und Evaluierung einer neuen hochauflösenden und hochkompakten energieautarken MR Positionssensorik für smarte Produktionsanlagen und Geräte (AQUILA)

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2015 – 31.05. 2018

Berichtszeitraum:

01.01.2015 – 31.05. 2018

Inhalt

Kurzdarstellung des AQUILA Projektes....3
Projektergebnisse....5
Maßstabskonzept (AP2.1) 5
Herstellung der Maßstäbe (AP4.1) 5
Konzept TMR Sensor (AP2.2).... 6
Integration TMR Sensor mit TSV (AP3.2) und Herstellung TMR Sensor (AP4.2) 7
Konzept und Charakterisierung der Reibschicht (AP3.1) 9
Auswerteelektronik (AP4.3) und Funkmodul (AP2.4 und AP4.5) 10
Integration Maßverkörperung und Sensor (AP5.1).... 12
Aufbau Beispielsystem (AP5.3).... 13
Demonstrator Ausbohrwerkzeug (AP6.1 und AP6.6).... 14
Demonstrator z-Achse Mikroskoptisch (AP6.1 und AP6.6) 14
Fortschritt an anderen Stellen.... 15
Zusammenfassung.... 16
Literatur.... 19

Kurzdarstellung des AQUILA Projektes

Im Rahmen des AQUILA Projektes wurden hochauflösende magnetische Längenmesssysteme entwickelt und in Demonstratoren getestet. Als Ziel wurde eine Absolutgenauigkeit < 1µm gesteckt. Dieses Ziel sollte erreicht werden durch die Erforschung und Entwicklung neuer Komponenten (siehe auch Abbildung 1):

1) Maßstäbe, die die Präzision von Dünnfilmtechnologien insbesondere der Photolithographie besitzen. Dazu wurden galvanisch abscheidbare Schichten für weich- und hartmagnetische Maßstäbe mit sehr kleinen Polperioden erforscht.

2) TMR basierter Sensor (TMR = tunnel magneto resistive) maßgeschneidert zur Maßverkörperung. Dieser Sensor wurde insbesondere mit through silicon vias (TSV) ausgestattet, damit der Arbeitsabstand variabler eingestellt werden kann.

3) Energy Harvesting Konzepte, die ausreichend Energie für das Messsystem und eine Funkschnittstelle zur Verfügung stellen, damit das Messsystem kabellos betrieben werden kann.

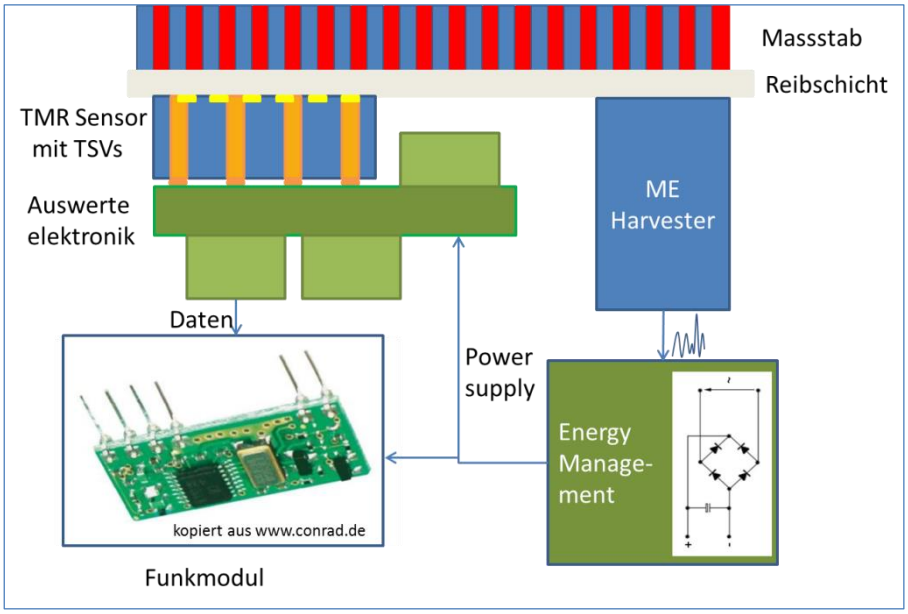

Abbildung 1: Zusammenspiel der Komponenten des AQUILA-Projektes

Zur Umsetzung der Projektideen ist ein Konsortium aus 7 Projektpartnern gebildet worden, in dem die unterschiedlichen technologischen Kompetenzen vertreten sind.
Tabelle 1 listet die Projektpartner auf und benennt deren Hauptaufgabe im Projekt.

Komponente	Verantwortlicher Projektpartner	Aufgaben
Maßstab	Hochschule Kaiserslautern	Erforschung neuer galvanischer Verfahren für Hartmagnete
	Sensitec GmbH	Erforschung weichmagnetischer Maßstäbe
TMR Sensor mit TSVs	Sensitec GmbH	Design und Fertigung TMR Längensensor
	Fraunhofer IZM, Berlin	Integration von TSVs in TMR Längensensor
Auswerteelektronik	Sensitec GmbH	Entwicklung von Hard- und Software. Aufbau und Test
Reibschichten	Hochschule Kaiserslautern	Charakterisierung von Reibschichten
Funkmodul	Sensitec GmbH	Auswahl und Integration in Elektronikmodul
Energieversorgung	Fraunhofer ISIT und Christian Albrecht Universität zu Kiel	Erforschung von Harvestern und des Energie-Managementsystem
Integration und Test	Sensitec GmbH	Charakterisierung des Messsystems
Demonstrator 1	Sandvik Tooling Supply, Schmalkalden	Integration des Messsystems in ein Werkzeug
Demonstrator 2	Märzhäuser Wetzlar GmbH	Integration des Messsystems in einen Mikroskoptisch

Tabelle 1: Übersicht über Arbeitspakete und verantwortliche Projektpartner im AQUILA Projekt

Die Gesamtprojektkoordination lag bei der Sensitec GmbH. Das Projekt startete am 1. Januar 2015 und endete am 31. Mai 2018. Das Projekt wurde gefördert vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 16ES0186K.

Projektergebnisse

Nachfolgend sind die wesentlichen Projektergebnisse der Sensitec GmbH dargestellt. Diese sind gemäß den im Antrag vorgeschlagenen Arbeitspaketen geordnet.

Maßstabskonzept (AP2.1)

Durch FEM-Simulation wurde ermittelt, welche Magnetfelder durch verschiedene Maßstabsgeometrien erzeugt werden. Dabei wurde ein System herangezogen, bei dem eine magnetische Periode aus einem magnetischen Pol (weichmagnetisch oder hartmagnetisch) und einer Lücke besteht. Bei der Simulation wurden geometrische Eigenschaften untersucht, wie z.B. das Verhältnis von Pol zu Pollücke und die materialabhängigen Parameter (Permeabilität, Hc, und Sättigungsmagnetisierung). Bei der Auswertung der Simulationen wurde entschieden, dass Polperioden von 100µm im Projekt verwendet werden sollen. Mit diesen Perioden werden noch gut messbare Felder bei einem nicht zu kleinen Arbeitsabstand erreicht. Außerdem ist diese Periode signifikant kleiner als die Polperioden von klassisch geschriebenen Maßverkörperungen (typ. >= 500µm). Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer Simulation.

Die Länge des Maßstabs wurde in Abstimmung mit den Anwendungen der Projektpartner auf 25mm festgelegt, was bedeutet, dass sich 250 Pole auf dem Maßstab befinden.

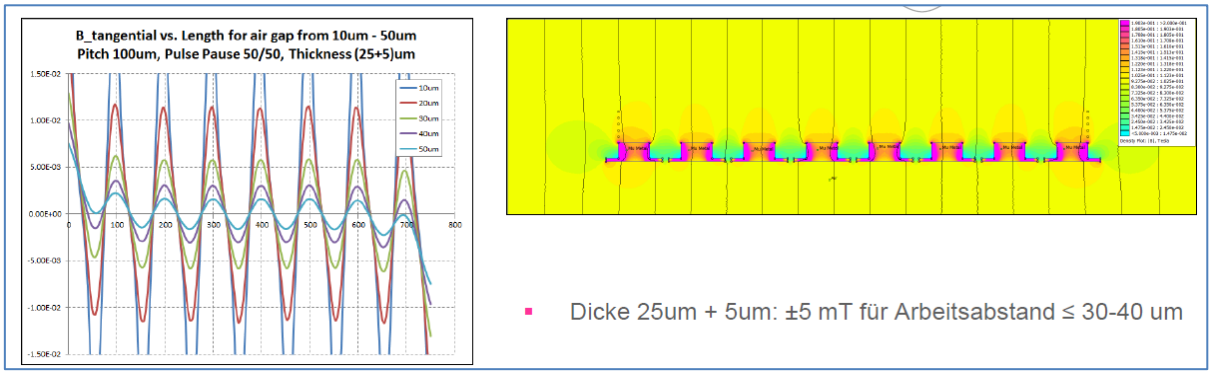

Abbildung 2: Simulation eines weichmagnetischen Maßstabs aus NiFe. Links: Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand zur Oberkante des Maßstabs. Je größer der Abstand zum Maßstab, desto kleiner sind die Feldstärken. Rechts: Darstellung der Feldverläufe.

Um während der Messung eine Absolutpositionsinformation zu erhalten, wurde der Maßstab mit zwei Spuren ausgelegt. Durch das Auslesen der ersten Spur, der sogenannten Inkrementalspur, wird die Position innerhalb eines Inkrementes ermittelt (ein Inkrement = eine Polperiode). Durch das Auslesen der zweiten Spur wird ermittelt, auf welchem der 250 Pole sich der Sensor aktuell befindet. Inkrementalinformation und Absolutinformation zusammen ermöglichen es, über die gesamte Messlänge eine exakte Position mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Die beiden Spuren werden auf einem Substrat zusammen hergestellt und später verarbeitet. Somit ist eine maximale Ausrichtung der beiden Spuren zueinander gewährleistet, ohne dass eine komplizierte Justage erfolgen muss.

Herstellung der Maßstäbe (AP4.1)

Um frühzeitig im Projekt Maßstäbe für Versuche (Weiterverarbeitung von Mikromaßstäben, Auswahl der Reibschichten, Reibversuche, AVT-Aufbauten) zur Verfügung zu haben, wurden einfache Mikromaßstäbe (Generation 1) mit Weicheisenmagnetpolen auf Silizium Wafern und Aluminium-Titan-Carbid Wafern hergestellt. Die Höhe der galvanisierten NiFe Pole liegt im Bereich 23-33 µm. Auf einem Wafer wurden jeweils 5 verschieden Maßstäbe in 5 mm Breite und 25 mm Länge mit

Polperioden von 40 µm bis 1000µm gefertigt. Polperioden von 1000µm konnten mit bereits vorhandenen Längenmesssensoren und Stützmagneten zur Aktivierung der Weicheisen-Pole frühzeitig erfolgreich getestet werden.

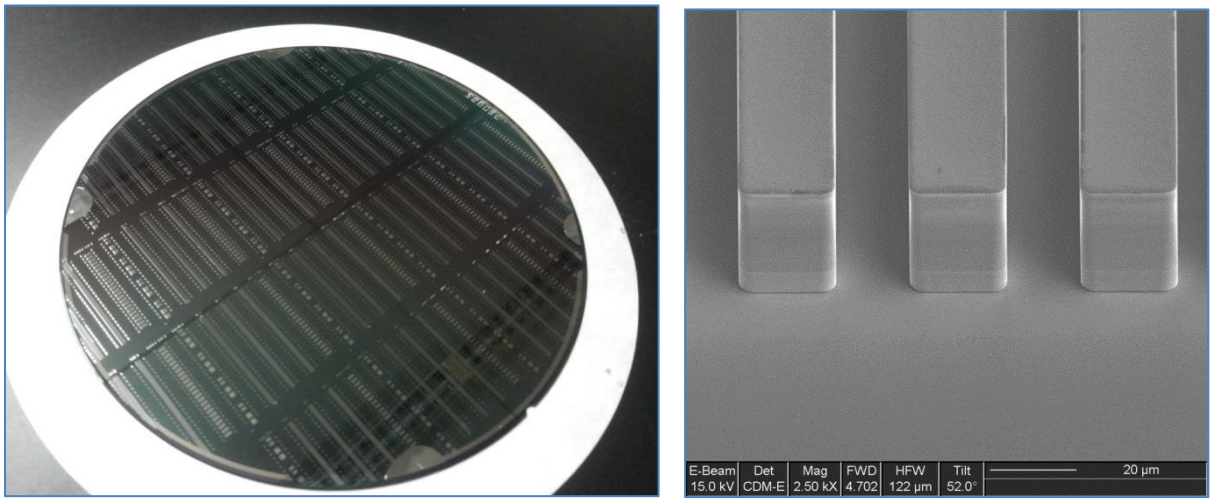

Abbildung 3: Wafer mit Maßstäben der Generation 1 sowie REM Bild von galvanisierten NiFe Polen, Polperiode 40 µm

Mit der Maßstabsgeneration 2 wurde das Design exakt auf den geplanten AQUILA TMR Sensor angepasst. Es wurden 2 Spuren, Inkremental- und Absolutspur, auf dem Maßstab von 3 mm Breite und 25 mm Länge verwirklicht. Gefertigt wurden damit Maßverkörperungen mit weichmagnetischen NiFe Polen bei Sensitec GmbH.

Die Hochschule Kaiserslautern entwickelte mit demselben Design hartmagnetische Maßstäbe aus CoP mit einer speziell dafür beschafften Galvanikzelle. Nach Abschluss des Projekts wurde die Galvanikzelle im 2. Quartal 2018 zu Sensitec GmbH zur weiteren Verwendung transferiert.

Konzept TMR Sensor (AP2.2)

Aufgabe des Sensors ist es, die Streufelder der Maßverkörperung sowohl der Inkrementalspur als auch der Absolutspur zu detektieren und die Signale der Auswerteelektronik zur Verfügung zu stellen. Es wurde als vorteilhaft angesehen, den Sensor als Längensensor auszulegen, so dass vier Signale innerhalb einer magnetischen Periode erzeugt werden: SIN+, SIN-, COS+ und COS-. Mit diesen vier Spannungssignalen kann in der Auswerteeinheit über eine Arkustangens-Berechnung eine Position ermittelt werden. Mit diesem Ansatz können die Inkrementalspur und die Absolutspur ausgelesen werden. Da eine Polperiode nur 100µm beträgt, ist es beinahe unmöglich einen Sensor mit vier Signalausgängen mittels AMR Technologie herzustellen. Viel geeigneter ist hierfür die TMR Technologie. Für beide Technologien werden Widerstandselemente mit der Eigenschaft verwendet, dass die Widerstände mit der Stärke bzw. der Richtung des Magnetfeldes variieren. Im Falle des AQUILA Projektes wird eine Technologie eingesetzt, die eine lineare Änderung des Widerstandes mit der Feldstärke liefert (siehe Abbildung 4). Üblicherweise werden bei magnetoresistiven Sensoren zwei Wheatstonebrücken eingesetzt, eine liefert die SIN- und SIN+ Signale, die andere die COS- und COS+ Signale.

Inkrementalsensor und Absolutsensor werden auf einem Chip nebeneinander platziert. Der Abstand der beiden Sensoren entspricht genau dem Abstand der beiden Spuren auf der Maßverkörperung. Dadurch fällt eine aufwändige Justage der beiden Sensoren zueinander komplett weg. Abbildung 5 veranschaulicht den Ansatz und zeigt die Grundgeometrie der Messanordnung.

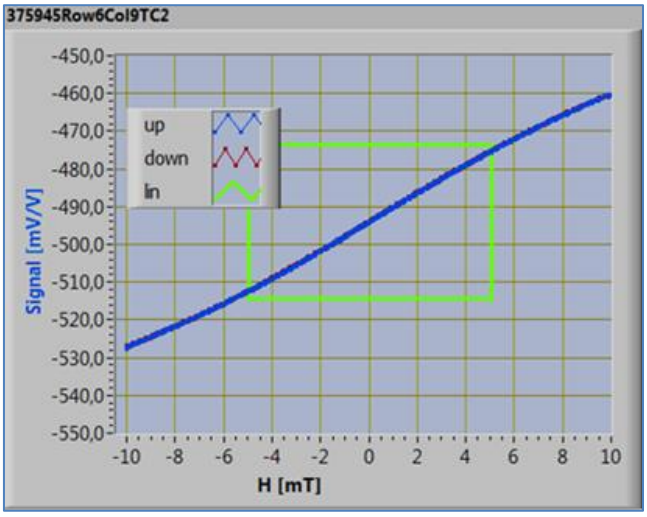

Abbildung 4: Lineare Kennlinie eines AQUILA TMR Sensors. Hysterese sehr klein, d.h. nicht sichtbar in dieser Darstellung.

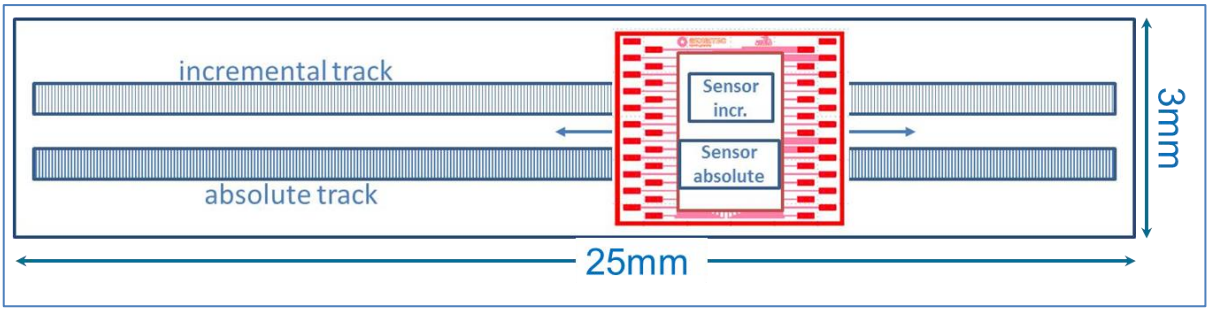

Abbildung 5: Zusammenspiel von AQUILA-Maßverkörperung und AQUILA-Sensor. Gemessen wird die Position des Sensors zur Maßverkörperung. Absolutspur und Inkrementalspur sind auf einem Substrat hergestellt, ebenso der Absolutsensor und der Inkrementalsensor. Durch diesen Ansatz werden Justageschwierigkeiten vermindert.

Integration TMR Sensor mit TSV (AP3.2) und Herstellung TMR Sensor (AP4.2)

Das AQUILA Mikromaßstab/TMR-Sensor Konzept erfordert einen sehr geringen Abstand der beiden Komponenten, wodurch kein Raum für das Drahtbonden (Standard) zur Kontaktierung auf der Vorderseite des Chips verfügbar ist. Die Kontakte vom Sensor zur nächsten Verdrahtungsebene müssen somit zur Rückseite des Chips geführt werden. Eine ideale Lösung dazu sind TSV (**T**hrough **S**ilicon **V**ias). Das Fraunhofer IZM Berlin fertigt TSV auf Silizium Wafer mit 200mm Durchmesser. Die für 125 mm Wafer ausgelegte Dünnfilm-Technologie Produktionslinie in Sensitec machte es erforderlich, zunächst Vorversuche mit 125 mm Wafern durchzuführen, die vom IZM aus 200mm Wafern gesägt und mit Notch und Justagemarken versehen wurden. Diese Vorversuche wurden in 2016 abgeschlossen. Nach den erfolgreichen Vorversuchen lieferte das Fraunhofer IZM Berlin 9 Wafer (Durchmesser 125mm) mit TSV‘s und den erforderlichen Justagemarken zum Aufbau des AQUILA TMR Sensorchips an Sensitec.

Zur Herstellung der AQUILA TMR Sensoren mit TSV waren vier wesentliche Prozessabschnitte erforderlich (siehe Abbildung 6). Zunächst wurde ein, auf das Sensor Design angepasstes Layout der TSV (Through Silicon Via) mit den für die Weiterverarbeitung erforderlichen Justage Strukturen erstellt und dem Projektpartner Fraunhofer IZM Berlin zur Verfügung gestellt. Mit diesem Layout fertigte das Fraunhofer IZM im 1. Prozessabschnitt die 100µm tiefen TSV auf 200 mm Silicon Wafern und reduzierte den Waferdurchmesser von 200mm auf 125mm.

Im 2. Prozessabschnitt wurde bei Sensitec der TMR Sensor auf der Vorderseite hergestellt und mit den vorgefertigten TSV verbunden. Die weiteren Prozessabschnitte, 3 mit dem Dünnen der Wafer auf 100µm zum Freilegen der TSV und Prozessabschnitt 4 mit der Verdrahtung der TSV auf der Rückseite der Wafer, wurden wieder beim Fraunhofer IZM durchgeführt. Wegen der unterschiedlichen Waferformate in den beiden beteiligten Waferlinien und den daraus resultierenden Prozessanpassungen waren diese Prozessabschnitte besonders kompliziert und aufwändig.

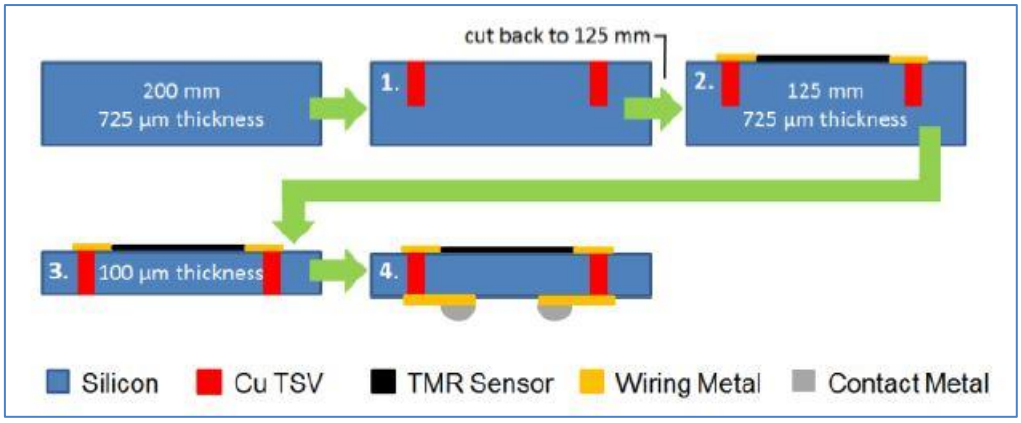

Abbildung 6: Schematische Darstellung der vier Prozessabschnitte zur Integration des TMR Sensors mit TSV, inklusive der Reduzierung des Waferdurchmessers von 200mm auf 125mm.

Parallel zu den Vorarbeiten der TMR-TSV-Chips erfolgte die Fertigung eines AQUILA-Testchips bei Sensitec. Der wesentliche Unterschied des AQUILA-Testchips zur TSV Variante ist die Größe des Chips, da die Bond Pads weit nach außen gelegt wurden. Somit stellen die Bond Loops kein Hindernis dar, wenn der Sensor in 20-30µm Abstand zum Maßstab gebracht wird. Ziel war es, mit dieser frühzeitig zur Verfügung stehenden AQUILA-Testchip-Variante mit dem System Maßstab/Sensor sowie der Elektronik erste Aufbauten zu realisieren und Erfahrung zu sammeln.

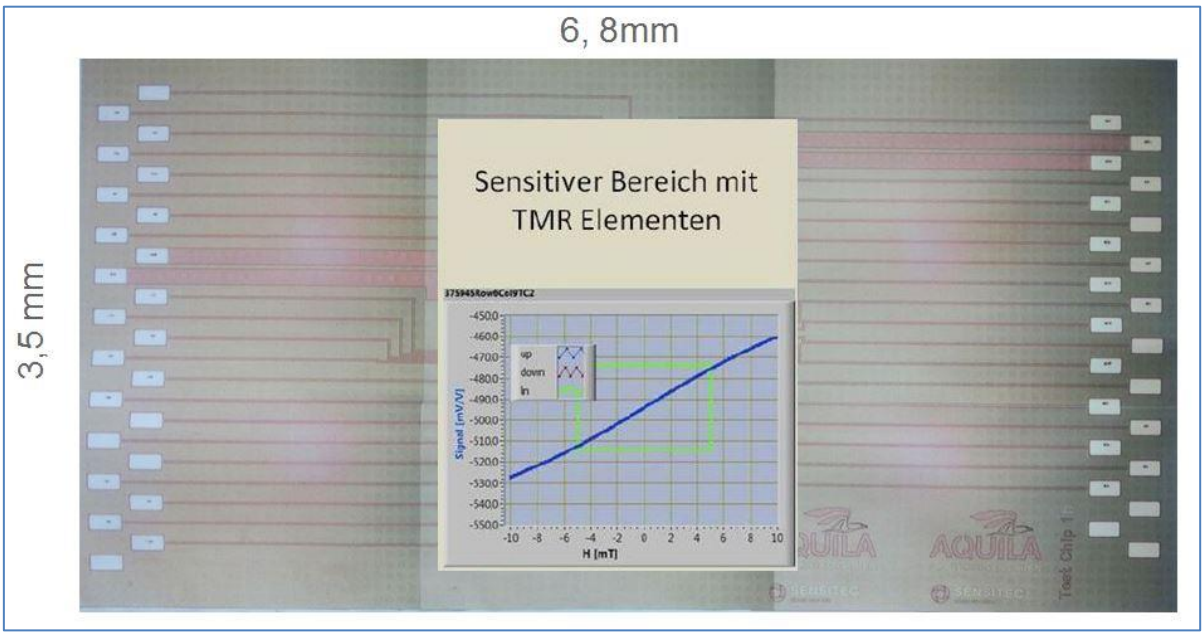

Abbildung 7: AQUILA TMR-Testchip mit weit nach außen geführten Kontakten für geringen Sensor-Maßstab Abstand

Aus dem vorhandenen TSV Waferbestand wurden sequentiell 2 Lose a 3 Wafer mit einem Multi Project Wafer Design gefertigt. Dies beinhaltete 2 unterschiedliche Sensor-Chipgrößen sowie 3 verschiedene Sensorvarianten auf einem Wafer. Dabei wurde die kleine Chipgröße (22% kleiner) gewählt, um hier die Vorteile der TSV Technologie (minimale Padgröße, weil auf die Bondung auf der Vorderseite verzichtet werden kann) zu demonstrieren. Es wurden aus Redundanzgründen 2 TSV pro Kontakt gewählt.

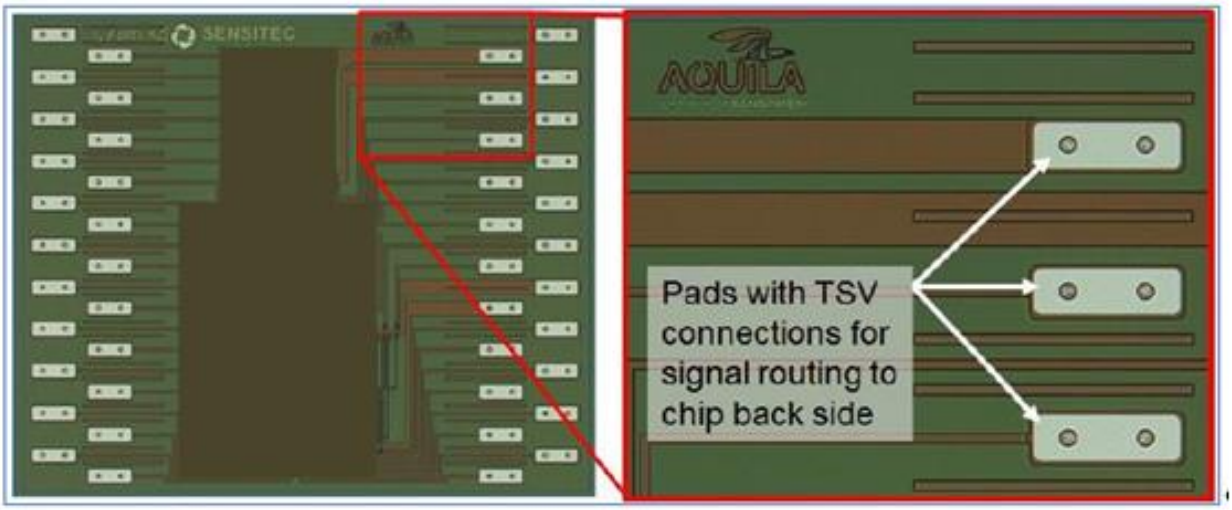

Abbildung 8: Kleiner AQUILA TMR Sensor Chip, kleine Pads mit TSV

Jeder Chip besitzt den Inkrementalsensor und den Absolutsensor und ist exakt auf die Inkremental- und die Absolutspur des Maßstabs angepasst. Die Größe des Chips wird im Wesentlichen durch die Größe des Mikromaßstabs, die Anzahl der erforderlichen Sensor-Messstellen und die daraus resultierende Anzahl der Kontakte bestimmt.

Konzept und Charakterisierung der Reibschicht (AP3.1)

Um die erforderliche hohe Genauigkeit des Messsystems zu erreichen, ist auf Grund der dafür notwendigen geringen Polbreiten (z.B. 50µm = 100µm Periode) auch ein sehr geringer Arbeitsabstand von 20 bis 40µm zwischen Sensor und Maßstab über die gesamte Messlänge vorteilhaft. Da die Umsetzung dieser Abstandsanforderung als sehr schwierig bewertet wurde, war ein Lösungsansatz, den definierten Abstand zwischen Sensor und Maßstab im direkten Kontakt auszuführen. Für diesen „Kontakt-Mode“- Ansatz sind für eine hohe System-Zuverlässigkeit sehr geringe Reibkräfte sowie das Vermeiden von „Slip-Stick“-Effekten erforderlich, was nur durch das Aufbringen einer geeigneten, zuverlässigen Reibschicht auf mindestens einen der Reibpartner (Sensorkopf bzw. Maßstab) gelöst werden kann ([1] bis [3]).

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Hochschule Kaiserslautern wurde dafür ein Reibtestprüfstand (siehe Abbildung 9) konzipiert und aufgebaut, welcher neben grundlegenden Untersuchungen zur Materialpaarung auch Messungen an galvanischen Maßstäben ermöglicht.

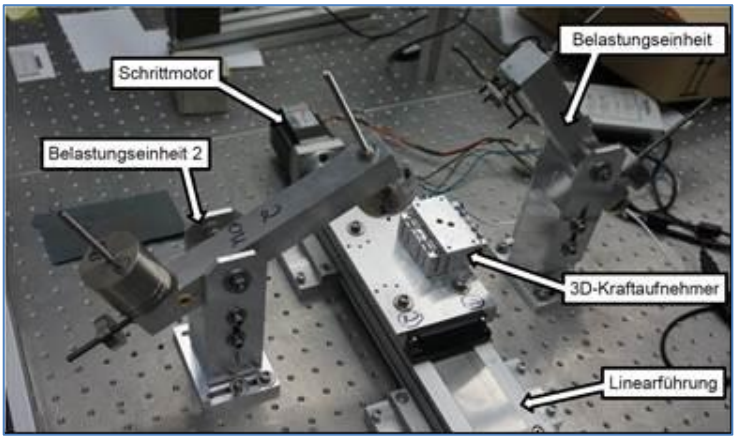

Abbildung 9: Übersicht Reibteststand [4]

Die durchgeführten Versuche an unbeschichteten und mit Parylene F bzw. DLC beschichteten Maßstäben zeigten jedoch eine signifikante Schädigung der Oberflächen schon nach wenigen Reibzyklen. Die Beschichtungen verbesserten das Ergebnis nur geringfügig.

Ausgehend von diesem Ergebnis wurde das Konzept des Kontaktes zwischen Sensor-Abstandshalter und Maßstabsoberfläche dahingehend angepasst, dass nun die Abstandshalter nicht mehr direkt über den Maßstab reiben, sondern nur noch auf „Laufflächen“ außerhalb des Maßstabes (siehe Abbildung 10). Dieses Konzept wurde für den Interposer-Aufbau und für einen Demonstrator aufgenommen und bearbeitet. Bei der Montage des Sensorkopfes im Demonstrator zeigte es sich jedoch, dass die Positionierung und Ausrichtung der Reibflächen auf dem Schieber nicht hinreichend genau möglich war und keine messbaren Signale erzeugt werden konnten. Aus diesem Grunde wurde im Demonstrator ein Messkopf ohne Abstandshalter erfolgreich getestet.

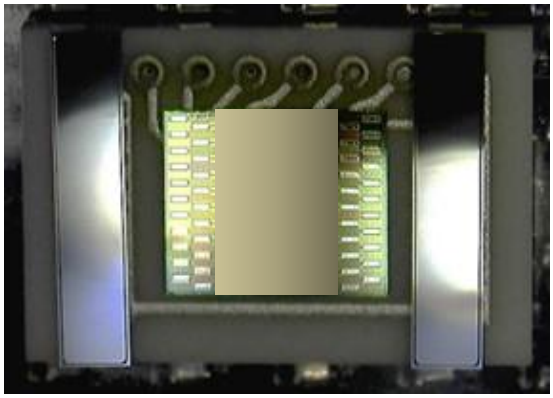
Abbildung 10: Interposer mit 6 Durchkontaktierungen bestückt
mit TMR Sensor (Mitte) und Abstandshaltern (links und rechts)

Fazit: Der „Kontakt-Mode“ zwischen xMR- Sensor und galvanischem Maßstab ist zwar prinzipiell umsetzbar, erscheint aber durch die vielen technischen Randbedingungen in der Anwendung nicht sinnvoll.

Auswerteelektronik (AP4.3) und Funkmodul (AP2.4 und AP4.5)

Die Elektronik zum Auswerten der Messsignale INK- und ABS-Spur wurde auf Grund der hohen Anforderungen (z.B. viele Signale für INK+ABS-Auswertung, kleinste Bauweise, Low Power) und Wechselwirkungen (Abbildung 11) in mehreren Stufen entwickelt und in Hardware umgesetzt. Bei der Bauteilauswahl sowie dem Software-Konzept wurden auch Low-Power-Aspekte berücksichtigt und

umgesetzt. Im Vergleich des Betriebs bei maximaler Leistung (d. h. keine Low Power Settings, 60kHz Messrate, mit Oversampling) werden von der Elektronik 136mAs benötigt. Durch Optimierung des Betriebsmodus (nutzen der Low Power Settings, Messrate 100Hz, kein Oversampling, Sleep Mode<100µA) kann der Verbrauch sehr deutlich auf 7,9mAs reduziert werden, d.h. es ist eine Verbrauchsreduzierung um 95% möglich.

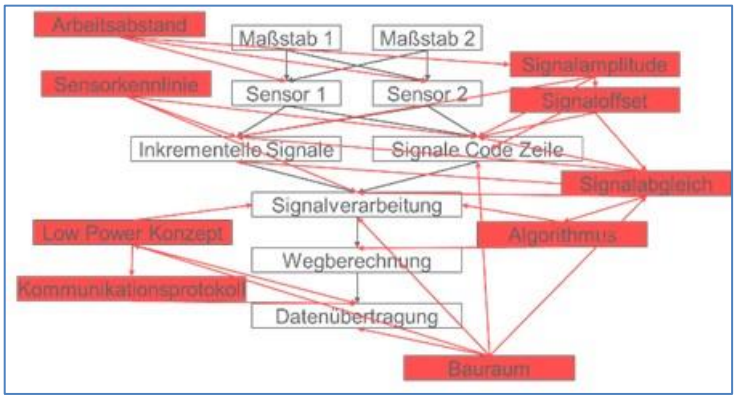

Abbildung 11: Einflussparameter und Wechselwirkung für Elektronik

Entwicklungsstufen der Elektronik:

1. Breakout PCB: „Ausbrechen“ aller Signale der TMR Chips oder des verbauten Hauptsystems für den Funktionstest über Messdatenerfassungskarte am Linear-Mess-Platz (LMP), siehe Abbildung 12.
2. System PCB: Umsetzung von INK- und ABS-Signalauswertung mit analogen Frontend und µC sowie Bluetooth u-blox Funkmodul, siehe Abbildung 13.
3. Miniaturisierung: Integration von Elektronik und Sensorplatine in eine PCB, siehe Abbildung 14.

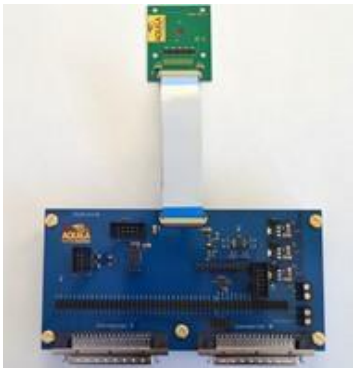

Abbildung 12: Sensorplatine (grün, Größe: 40x50mm²)mit Breakout-PCB (blau)

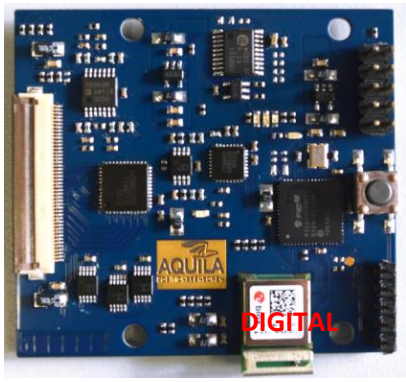

Abbildung 13: System PCB (Größe: 55x50mm²), Sensorplatine wie bei Breakout-PCB

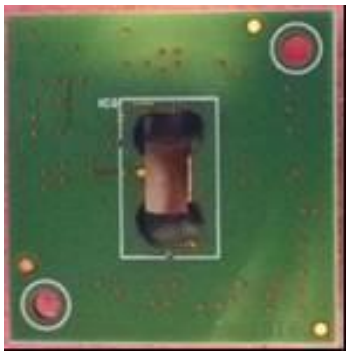

Abbildung 14: Sensorseite der miniaturisierten PCB (Größe: 27,5x27,5mm²)

Entsprechend des Projektantrages wurden Recherchen zu am Markt verfügbaren Wireless Modulen unter Berücksichtigung der AQUILA Bauraumanforderungen und Low-Power Aspekten durchgeführt. Von den verfügbaren Systemen wurde dann das u-blox „NINA-B112 Stand-alone Bluetooth low energy module“ ausgewählt, in die Elektronik (System PCB) integriert und die Funktion getestet.

Fazit: Es wurde eine funktionierende Elektronik für INK- und ABS-Messung sowie ein Low-Power Miniaturisierungskonzept erfolgreich erarbeitet. Die drahtlose Datenübertragung erfordert bei Verwendung von am Markt verfügbaren Systemen (z.B. Bluetooth) Kompromisse in Bezug auf Bauraum und Energieverbrauch.

Integration Maßverkörperung und Sensor (AP5.1)

Zur Realisierung des Messsystems wurden auch die Aspekte der Integration von Maßstab und Sensor in der Anwendung untersucht.

a) Integration der Maßverkörperung

Die Maßverkörperungen (Maßstäbe) lagen auf Grund der galvanischen Prozesse zur Herstellung als Siliziumsubstrate (Größe: 3x30mm²) vor. Die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss von Maßstabshalterung und Montage zeigten, dass das Konzept der Maßstabmontage entsprechend der Anwendung ausgewählt und optimiert werden sollte. Mit dem Montagekonzept der „versenkten Maßstäbe“ besteht die Möglichkeit, Verkippungen und Höhentoleranzen zu minimieren.

b) Integration Sensor

Für die Integration der Sensoren wurden zwei Technologien in Anwendung gebracht. Der TMR-Testsensor in seinen unterschiedlichen Konfigurationen wurde mittels klassischer Chip-on-Board (CoB) Technologien auf die Sensorplatine integriert. D. h. der Sensor wurde mit einem Leitkleber auf der PCB fixiert und dann mittels low-loop-Al Drahtbonden elektrisch kontaktiert. Zum mechanischen Schutz der Drahtbondkontakte wurde dieser Bereich partiell vergossen (siehe Abbildungen 14 und 15). Mit dieser Integrationsvariante wurde die Sensor- / Maßstabsperformance am Beispielsystem (AP 5.3) und an einem Demonstrator untersucht.

Für die Integration des TMR-TSV Sensors wurde ein neues Integrationskonzept erarbeitet. Um die Unterschiede der Ausdehnungskoeffizienten von Chip und Substrat (z.B. PCB) auszugleichen und den nur 100µm dicken TMR-TSV Chip in der Applikation zu stabilisieren, wurde der Sensorchip auf einem Keramikinterposer appliziert. Dies wurde beim Projektpartner FhG IZM mittels Transienten-Liquid-Phase-Bonden (TLPB) durchgeführt. Die elektrische Kontaktierung des Interposers mit Sensor auf dem Flexband erfolgte durch druckloses Leitkleben auf ein Flexband (Abbildung 16). Unerwartet stellte sich die Herstellung des Interposers mit der Realisierung der Umverdrahtung der großen Zahl der Sensorsignale (für INK- und ABS-Messung) von der Vorderseite zur Rückseite als nicht realisierbar heraus (erforderliche Line-Space Abstände waren nicht verfügbar). Die erfolgreiche Darstellung der Funktion des TMR-TSV Chips wurde deshalb mit einem Interposer nur für den INK-Sensor durchgeführt und in einer Feldspule unter definierten Bedingungen gemessen (Abbildung 17).

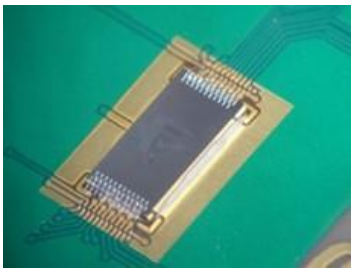

Abbildung 15: TMR Testsensor auf Sensorplatine, Technologie: Drahtbonden

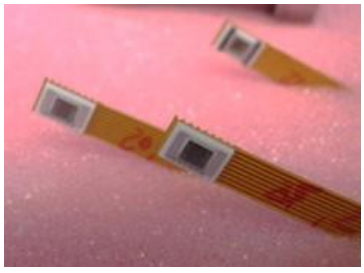

Abbildung 16: TMR-TSV Sensor auf Keramik-Interposer und Flexband, Technologie: TLPB- Löten und Leitkleben

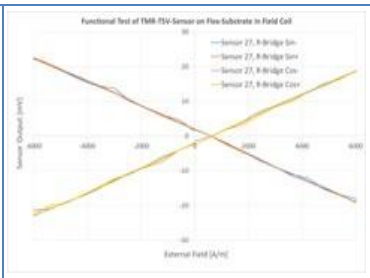

Abbildung 17: TMR-TSV Sensor Funktionstest in Feldspule, kein Unterschied zwischen Sin- und Cos-Brücke

Fazit: Die Integration von Maßverkörperung und Sensor konnte für unterschiedliche Konfigurationen erfolgreich umgesetzt werden. Für konkrete Anwendungen müssen immer deren spezifische Randbedingungen berücksichtigt werden. Um den TMR-TSV Sensor für INK- und ABS-Messsysteme verwenden zu können, sind für die Interposer-Umverdrahtung andere Technologien erforderlich.

Aufbau Beispielsystem (AP5.3)

Die Bewertung der Funktionalität des Messsystems und der Einfluss unterschiedlicher Parameter (z.B. Abstand Sensor / Maßstab, passive und aktive Maßstäbe) wurde am Linearmessplatz (LMP) bei Sensitec mit der Breakout-PCB (siehe AP4.3) durchgeführt. Die Konfiguration des Messaufbaus ist in der Abbildung 18 beschrieben. Mit dieser Versuchsanordnung waren durch das vorhandene Laser-Interferometer hochgenaue Messungen über die gesamte Maßstabslänge von 25mm möglich.

Diese Messungen an unterschiedlichen Maßstäben haben eindeutig nachgewiesen, dass der Messfehler sehr stark von der Homogenität des Maßstabes abhängig ist. Bezüglich der Genauigkeit sind die besten hartmagnetischen Maßstäbe die vom Projektpartner Hochschule Kaiserslautern galvanisch hergestellten aktiven CoP-Maßstäbe. Im Vergleich zeigen alternative, nicht galvanische Maßstäbe einen deutlich größeren Fehler und einen weniger homogenen Verlauf (vergleiche Abbildung 19 vs. Abbildung 21). Dieses Ergebnis bestätigt den im AQUILA Projekt gewählten Ansatz, dass durch Nutzung von Dünnfilmprozessen, insbesondere der Photolithographie und der galvanischen Abscheidung Maßstäbe höchster Güte realisiert werden können.

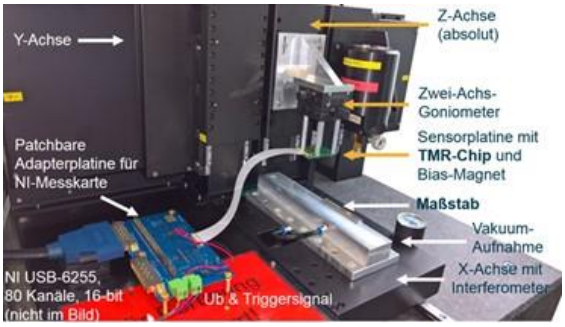

Abbildung 18: Linearmessplatz (LMP)

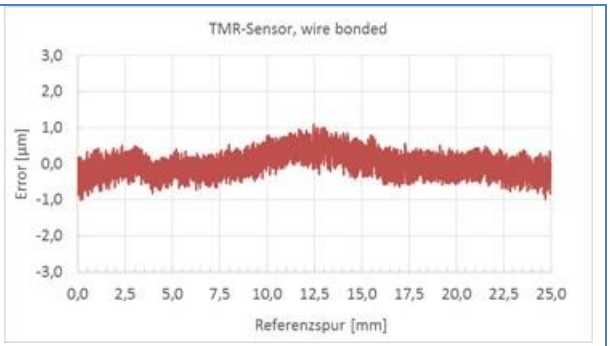

Abbildung 19: CoP-Maßstab von HS-KL, max. Fehler 1µm

An den alternativen hartmagnetischen Maßstäben mit ihrem durch Maßstabsinhomogenitäten verursachten „Fingerabdruck“ wurde eindeutig gezeigt, dass sich die Sensoren in Abhängigkeit der Integrationstechnologie (Drahtgebondet auf PCB oder mit TSV auf Flexsubstrat) nur in vernachlässigbarer Weise unterscheiden (Abbildung 20 vs. Abbildung 21).

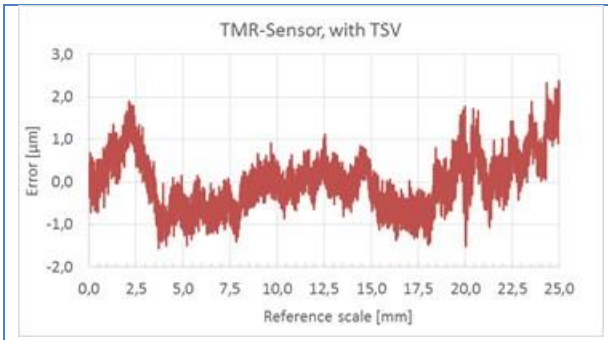

Abbildung 20: TMR-TSV-Sensor (INK), Fehlerverlauf von Alternativmaßstab 1

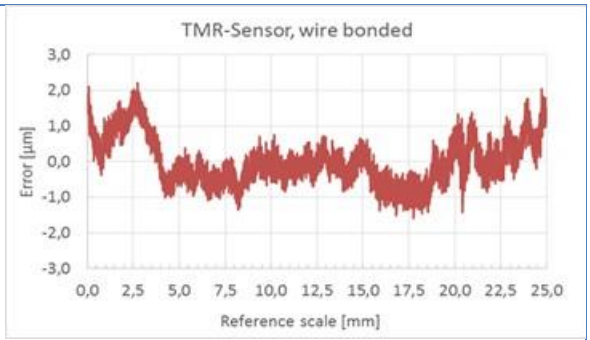

Abbildung 21: TMR-Testsensor (INK), Fehlerverlauf von Alternativmaßstab 1

Fazit: Mit dem LMP wurde die hohe Auflösung und der geringe Fehler (< 1µm) des AQUILA-Messsystems eindeutig nachgewiesen.

Demonstrator Ausbohrwerkzeug (AP6.1 und AP6.6)

Für den Demonstrator „Ausbohrwerkzeug“ bestanden seitens des Projektpartners Sandvik sehr hohe Anforderungen an den Bauraum (max. Größe: 6x12x10mm³). In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist das Konzept und die praktische Umsetzung des Messkopfes dargestellt. Dazu wurde der Sensorkopf mit dem TMR-TSV Sensor in den an die Anwendung adaptierten Messkopf eingebracht (Abbildung 22) und im Demonstrator direkt über der Maßverkörperung (Maßstab) montiert. Der Maßstab wurde dazu versenkt in der Maßstabshalterung positioniert. Im Funktionstest wurde der Verfahrweg des Demonstrators mit dem INK-Sensor nachgewiesen (vergleiche Abbildung 24).

Da in der aktuellen Anwendung des Demonstrators die Messsignale direkt an einem Messplatz verarbeitet werden, wurden die Messsignale des TMR-TSV-Sensors ohne weitere Verarbeitung an einer definierten Schnittstelle bereitgestellt und mit einem beim Projektpartner vorhandenen System ausgewertet. Für zukünftige vergleichbare Anwendungen ist die Integration von Teilen der Auswerteelektronik direkt in dem Demonstrator denkbar.

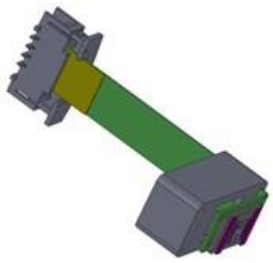

Abbildung 22: Messkopf-Konzept mit TMR-TSV Sensor und Flexband

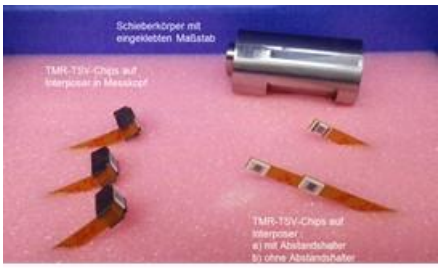

Abbildung 23: Maßverkörperung und Messköpfe

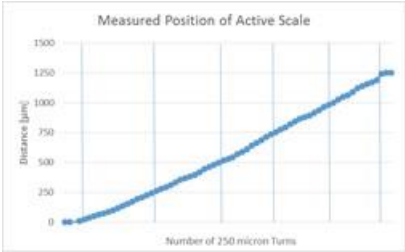

Abbildung 24: Verfahrweg über Umdrehung

Fazit: Prinzipiell kann das Messsystem auch in sehr kleinen Bauräumen eingesetzt werden, wobei das Integrationskonzept der Elektronik unbedingt mitberücksichtigt werden muss.

Demonstrator z-Achse Mikroskoptisch (AP6.1 und AP6.6)

Mit dem Demonstrator „z-Achse“ (Abbildung 25) wurde die hochgenaue Funktion des Messsystems (INK- und ABS-Sensor) dargestellt. Es wurde für den Demonstrator die Anordnung der vertikalen Achse mit ausreichender Steifigkeit ausgewählt, um Einflüsse wie z.B. Schwingungen oder Verformung der Bauteile zu minimieren.

Die Basis des Demonstrators stellte die Tango-Steuerung vom Projektpartner Märzhäuser dar. Mit einer von Sensitec erstellten Firmware wurden die Messdaten (inkl. Offsetkorrektur für INK- und ABS-Sensor) zur weiteren Verarbeitung an die Tango- Steuerung übergeben. Die Messung der z-Positionen im Demonstrator erfolgte berührungslos. Dazu musste Sensor und Maßstab über die gesamte Messlänge in einem definierten Abstand gehalten werden, was durch eine Justierung mittels Feingewindeschrauben erreicht wurde.

Messungen an aktiven und passiven Maßstäben mit dem Demonstrator lieferten vergleichbare Ergebnisse zum Beispielsystem (AP5.3). So wurde mit dem Demonstrator eine absolute Genauigkeit von ±700nm über eine Messlänge von 25mm ermittelt. Die Sensitivität des Messsystems wurde darin bestätigt, dass selbst die Spindelsteigung des Demonstrators mit gemessen wurde (siehe Abbildung 26)

Abbildung 25: Demonstrator z-Achse

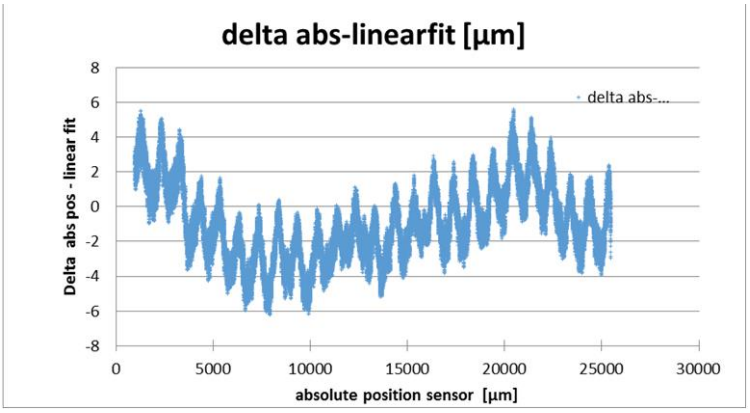

Abbildung 26: An der Spindel wurde ein 1mm-periodischer Fehler gemessen. Dieser Fehler hat seinen Ursprung in der Verspannung der Spindel und bildet genau die Toleranzen der Spindelbewegung ab.

Fazit: Mit dem Demonstrator „z-Achse“ konnten die am Beispielsystem LMP gemessenen, sehr guten Ergebnisse zu Genauigkeit und Fehler verifiziert werden. Für eine reprozierbare und einfache Ausrichtung von Sensor und Maßstab müssen entsprechende Justiermöglichkeiten bereits bei der Messsystemkonzeption vorgesehen werden.

Fortschritt an anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurden Arbeiten an magnetischen Längenmesssystemen und magnetischen Längensensoren recherchiert, die außerhalb der Sensitec untersucht und weiterentwickelt worden sind. Bei den durchgeführten Patentrecherchen wurden keine Ergebnisse gefunden, die einer Verwertung entgegenstehen. An hochgenauen Magnetsensoren wurde außer in AQUILA auch im tuMaPos Projekt (EU-Projekt) gearbeitet. Die Partner hatten sich zum Ziel gesetzt, mit hochgenau geschriebenen Maßstäben und TMR Sensoren bei großen Arbeitsabständen hochgenau messen zu können. Bei solch einem Konzept ist von einer hohen Störanfälligkeit durch externe, insbesondere inhomogene Magnetfelder auszugehen. Zum Zeitpunkt der Recherche wurde durch die Projektpartner intensives Marketing betrieben. Allerdings gibt es noch keine Datenblätter und auf Rückfrage wurde bestätigt, dass sich das Produkt noch in der Entwicklung befindet.

Zusammenfassung

Innerhalb des AQUILA Projektes hat die Sensitec viele innovative neue Komponenten erforscht bzw. an der Entwicklung dieser mitgearbeitet. Durch die Applikationstests bei Sensitec und durch die Demonstratoren bei den Anwendern wurden die Genauigkeitsziele des Projektes erreicht. Über den ursprünglichen Projektantrag hinausgehend wurde auch eine Absolutmessung erforscht und entwickelt sowie deren Funktionsweise nachgewiesen. Im Folgenden sind die interessantesten Projektergebnisse nochmal in Abbildungen zusammengefasst.

Abbildung 27 zeigt eine Genauigkeitsmessung mit einem Laserinterferrometer als Referenz. Es ist eindeutig festzustellen, dass der Maximalfehler über die gesamte Messlänge des AQUILA Maßstabs deutlich unter 1µm liegt. Damit ist eine signifikante Annäherung an optische Maßstäbe gelungen.

Abbildung 28 zeigt den Nachweis einer absoluten Positionsmessung. Hier wurde an jeder Position die Absolutposition True power on ermittelt, d.h. ohne auf gespeicherte Informationen zurückzugreifen und ohne Referenzfahrt. Die Absolutposition kann damit direkt nach dem Einschalten fehlerfrei an jeder Position auf dem Maßstab bestimmt werden. Damit steht ein Messsystem zur Verfügung, dass auf 25mm Länge eine Genauigkeit von 700 nm erlaubt, True power on, ohne Referenzfahrt.

Diese Erfolge wurden möglich durch die Verwendung neuer Komponenten, darunter photolithographisch strukturierte Maßstäbe (Abbildung 29) mit einer Polperiode von nur 100µm, ein TMR Längensensor mit TSV-Durchkontaktierung (Abbildung 30) sowie eines neuen Verfahrens zur Bestimmung der Absolutposition (Abbildung 31), welches als Patent angemeldet wurde. Die Auswertealgorithmen und die Software wurden eigens für dieses Absolutbestimmungsverfahren entwickelt und getestet. Danach wurde die Software auf einen µC transferiert und die Elektronik miniaturisiert (Abbildung 32). Diese Elektronik wurde dem Endanwender zur Verfügung gestellt und in verschiedene Demonstratoren integriert.

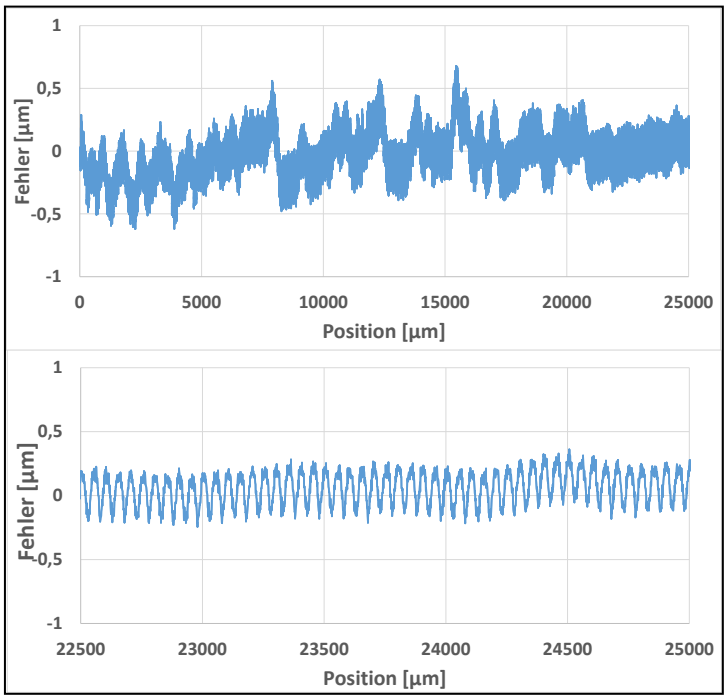

Abbildung 27: Fehler des AQUILA Messsystems bei einer Fahrt über den kompletten Messbereich (25mm). Der Fehler ist die Abweichung der Position, die vom AQUILA Messsystem ermittelt ist, von der Referenzposition, die mit einem Laserinterferometer bestimmt wurde. Man erkennt an dem oberen Graphen, dass der Maximalfehler 700nm nicht überschreitet. Das untere Bild zeigt die letzten 2,5mm in vergrößerter Darstellung. Der resultierende Fehler stammt im Wesentlichen aus einer 2-periodischen Oberwelle und ist typischerweise +/- 200nm.

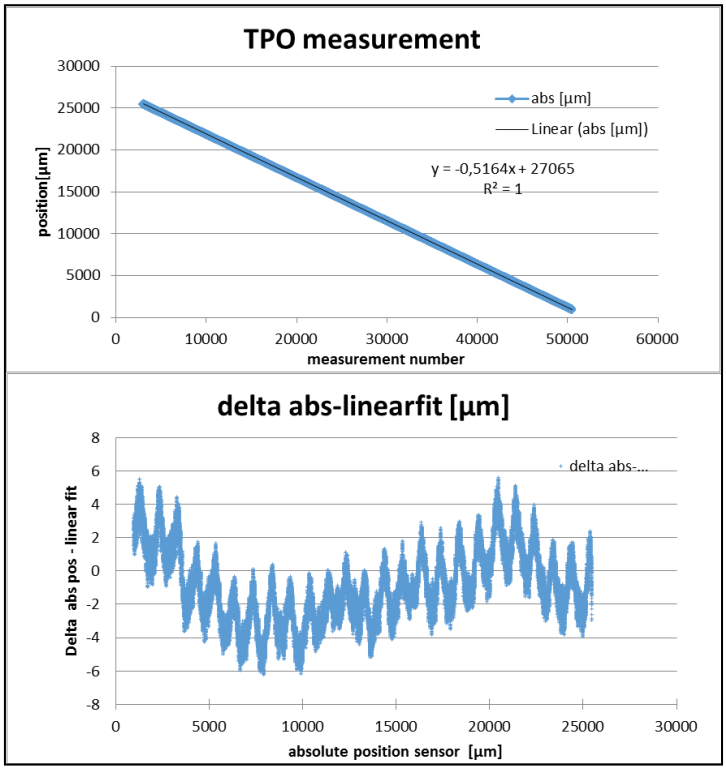

Abbildung 28: Nachweis eines True power on Absolutsystems. In der oberen Abbildung wurde der Sensorkopf mit konstanter Geschwindigkeit gefahren und dabei fast 50000 Absolutpositionen ermittelt. Dabei zeigt sich ein linearer Verlauf ohne Ausreißer, d.h. in allen Fällen wurde die Position plausibel ermittelt. Unten die Abbildung zeigt die Differenz der gemessenen Absolutposition von einer gefitteten Geraden (schwarze Linie oben). Es zeigt sich ein 1mm periodischer Fehler mit einer Amplitude von ca. +/-3µm. Dieser Fehler kommt von der Spindel, die den Sensor bewegt. Diese Spindel hat eine Gewindesteigung von 1mm und eine Toleranz von +/- 4µm. Die Messung bestätigt diese Eigenschaften.

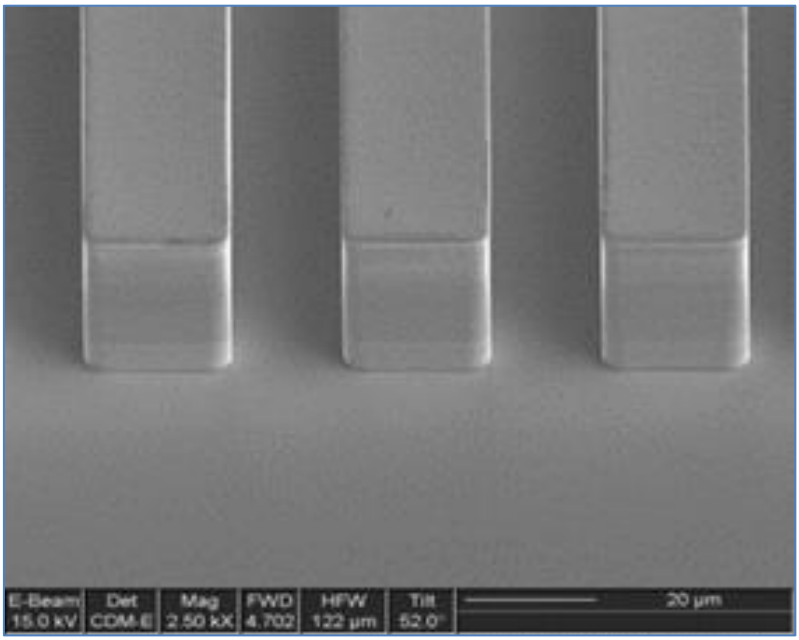

Abbildung 29: Hochgenauer magnetischer Maßstab aus NiFe mit einer Polperiode von nur 40µm. Die Pole und die Zwischenräume sind jeweils 20µm lang. Für die Demonstratoren wurden Polperioden von 100µm verwendet.

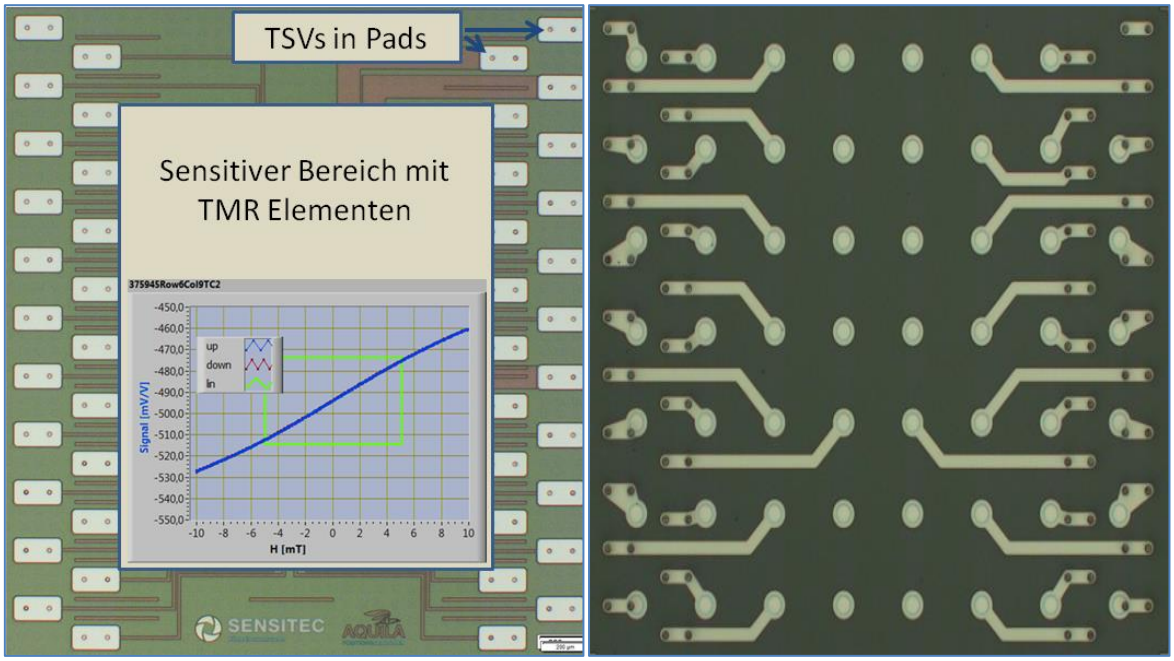

Abbildung 30: Links, Oberseite eines AQUILA TMR Sensor mit TSVs und linearer Kennlinie, die quasi hysteresefrei ist. Rechts, Rückseite des Sensorchips mit Rückseitenmetallisierung ausgehend von den TSVs.

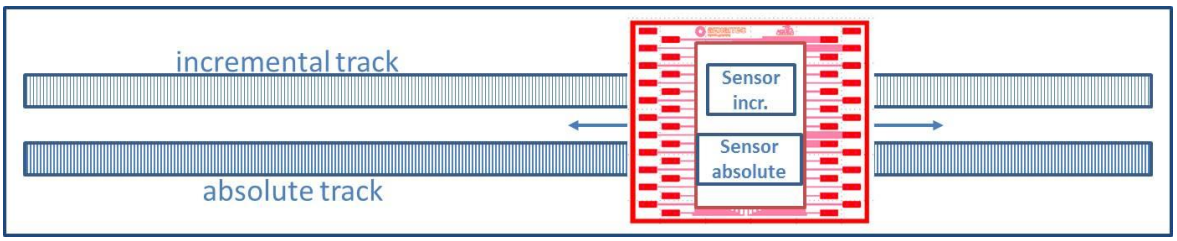

Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau für eine True power on Absolutmessung. Die Maßverkörperung besteht aus zwei Spuren und der Sensorchip enthält entsprechend zwei Sensoren, die auf die jeweiligen Spuren ausgelegt und optimiert sind.

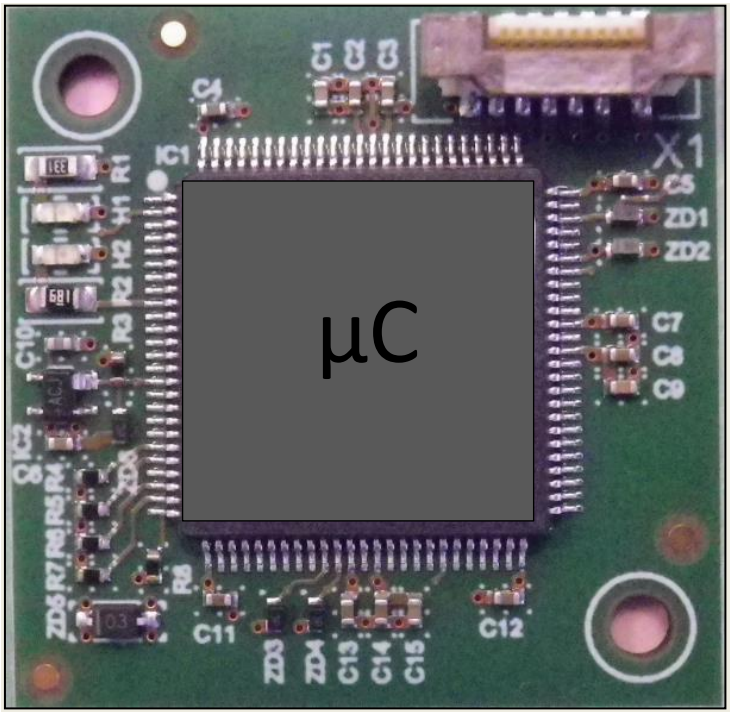

Abbildung 32: Elektronikmodul zur Bestimmung der Absolutposition. Die Elektronikkomponenten befinden sich auf der Vorderseite der Platine, der TMR Sensor ist auf der Rückseite der Platine platziert. Die Absolutposition wird digital an dem Stecker oben rechts ausgegeben.

Literatur

[1] Küster, R et al: Verschleißarme Beschichtungen für Mikroaktoren, MST-Kongress 2005 (SFB 516)

[2] Paulkowski, D. et al: Friction of flat-flat micro contacts coated with amorphous carbon, Tribologie + Schmierungstechnik, 57. Jahrgang, 4/2010

[3] Santra, T. S. et al: Diamond, Diamond-Like Carbon (DLC) and Diamond-Like Nanocomposite (DLN) Thin Films for MEMS Applications, 2012

[4] C. Vetter: Handbuch Tribometer, Hochschule Kaiserslautern, Dez. 2017