

**Rahmenprogramm****„Mikroelektronik aus Deutschland – Innovationstreiber der Digitalisierung“****Verbundprojekt:****„Sensorbasiertes Elektroniksystem zur nachhaltigen Nutzung von Schmierstoffen in Industrieanlagen - Lube.Life“****Teilprojekt „in-Situ Monitoringsystem mit Tribo-Sensor“****Abschlussbericht**

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	16ME0106
Projektlaufzeit:	01.04.2020 bis 31.03.2023
Berichtszeitraum:	01.01.2022 bis 31.12.2022

Berichtspflichtiger: Kompass GmbH, Ehrenbergstraße 11, 98693 ILMENAU

Projektleitung: Olaf Mollenhauer



Teil I: Zusammenfassung

1) Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

- Funktionsstruktur erarbeitet,
- Technisches Prinzip festgelegt,
- Antriebe und Sensorkomponenten ausgewählt,
- Steuerungskomponenten implementiert und in Betrieb genommen,
- Mikroelektronischer Schaltungsentwurf durchgeführt,
- Steuerung aufgebaut und getestet,
- Software für die Steuerung der Antriebe realisiert,
- Mechanischer Entwurf durchgeführt,
- 3D-Drucktechnik im Unternehmen etabliert und mechanische Komponenten prototypisch gefertigt,
- Systemische Integration durchgeführt,
- Mini-Tribometer in Betrieb genommen,
- Erste Parameterermittlung durchgeführt,
- Überarbeitung der Steuerung mit dem Konzept der verteilten Intelligenz (ACB23)
- Test der Steuerung und Implementierung
- Untersuchungen zu Integration von Sensoren zur Impedanzmessung an Ölen
- Produktentwicklungs- und Vermarktungskonzept erstellt.

Meilenstein 1 - Systemdesign - wurde erreicht.

**Meilenstein 2 - Tribo-Sensor betriebsbereit - erreicht
(2 Monate Verschiebung)**

Meilenstein 3 – Miniatur-Tribometer in Betrieb - erreicht



2) Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.

AP	Bezeichnung	planmäßig begonnen							
		planabweichend begonnen							
		planmäßig abgeschlossen							
						Beginn	Ende	PM Soll	PM IST
2.2.1	Systemdesign	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Apr 20	Nov 20	7,5	7,75
2.2.1.1	Anforderungen/Lastenheft/Lösungsmatrix/ Pflichtenheft	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apr 20	Apr 20	0,5	0,5
2.2.1.2	Untersuchungen zu den Prinzipien der Teilkostenfunktionen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Apr 20	Jul 20	3	3
2.2.1.3	Untersuchungen elektr. Signalwandlung und Datenverarbeitung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sep 19	Okt 20	3	3
2.2.1.4	Systemsynthese aus verifizierten Teilkostenfunktionen	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		Okt 20	Nov 20	1	1,25
2.2.2	Entwurf und Aufbau Teilkostenfunktionen Trib-Sensor	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dez 20	Dez 21	14	22,35
2.2.2.1	Integrierte Steuerung inkl. Software mit dezentraler Intelligenz	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Dez 20	Jun 21	3	4,35
2.2.2.2	Sensorschnittstellen, Kommunikation, Datenbank	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dez 20	Jun 21	2	3,75
2.2.2.3	Probenhalterung / Probenwechsel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Jan 21	Mrz 21	1	2,25
2.2.2.4	Antriebe und elektronische Stellglieder / Drives	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mai 21	Okt 21	3	4,5
2.2.2.5	3D-Kraftaufnahme und Signalkonverter	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	April 201	Aug 21	2,5	3,75
2.2.2.6	Ölkreislauf und Gehäuse	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Aug 21	Okt 21	2,5	3,75
2.2.3	Demonstrator Miniatur-Tribometer	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Jan 22	Mrz 23	7,5	10
2.2.3.1	systemische Integration der Teilkostenfunktionen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Jan 22	Mai 22	2	3
2.2.3.2	Betriebsssoftware	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apr 22	Jul 23	3,5	4
2.2.3.3	Inbetriebsetzung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sep 22	Okt 22	1	2
2.2.3.4	Feldtest / Auswertung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Jan 23	Mrz 23	1	1
	Aufwand [PM]							29	40,10

Meilenstein 1 - Systemdesign - erreicht.

Meilenstein 2 - Trib-Sensor betriebsbereit - erreicht (2 Monate Verschiebung)

Meilenstein 3 – Miniatur-Tribometer in Betrieb - erreicht

Die Ergebnisse sind im Sachbericht zusammengefasst.



* Das Vorhaben liegt im Wesentlichen innerhalb der ursprünglichen bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Eine Anpassung des Arbeitsplans wird erforderlich (Erläuterung erforderlich).

Durch die iterative Entwicklung VDI/VDE2206 der Steuerungstechnik (drei Durchläufe) im Ergebnis der Untersuchungen im AP2.2.1 Systemdesign und der jeweiligen Erprobungsergebnissen der Teilkomponenten in AP2.2.2 wurde die inhaltlichen Planungen angepasst.

Eine ursprüngliche Vergabe eines Unterauftrages wurde nicht getätigt und stattdessen eine eigene Entwicklung im Bereich eines Öl-Zustandssensors durchgeführt, um einerseits das technische Know-How im eigenen Unternehmen zu halten und andererseits den ermittelten Anforderungen besser zu entsprechen.

Es sind Verzögerungen aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

Der Arbeitsplan wurde innerhalb der Projektlaufzeit erfüllt. Durch den Mehraufwand hatte sich jedoch der Abschluss einzelner Arbeitspunkte verzögert.

Es sind Mehr- oder Minderausgaben aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

Durch die Iteration einzelner Arbeitspunkte und die zusätzliche Entwicklung des Öl-Zustandssensors wurden im Projektzeitraum insgesamt 11,10 Mannmonate mehr für die Untersuchungen und den Aufbau des Demonstrators aufgewendet.

3) Haben sich die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?

Die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens haben sich gegenüber dem Zeitpunkt der Antragstellung nicht verändert.

* Die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens haben sich geändert (Erläuterung erforderlich).

4) Sind inzwischen von dritter Seite FuE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Nein

* Ja (Erläuterung erforderlich)

5) Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

Nein

* Ja (Erläuterung erforderlich)

6) Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend,

* Bitte ggf. per Doppelklick aktivieren.

**Angaben zu folgenden Punkten enthalten:**

- * Im Berichtszeitraum wurden auf Basis der Ergebnisse des Vorhabens Schutzrechte angemeldet, erteilt, in Anspruch genommen oder eine Anmeldung vorbereitet (Erläuterung erforderlich).
- * Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).
- * Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten nach Projektende gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).
- * Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).



Teil II: Ausführlicher Sachbericht

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Anforderungen / Lastenheft / Lösungsmatrix

Innerhalb des Vorhabens Lube.Life wurden von der Kompass GmbH die technologischen Grundlagen für ein Mini-Tribometer / Tribo-Sensor geschaffen und dieses als Demonstrator aufgebaut. Das Teilvorhaben gliederte sich in Lube.Life System-/Projektkonzept ein, das ausgehend von den Informationen der implementierten Sensoren, ein Sensor- und Servicekonzept entwickelt und getestet hat, dass die Zusammensetzung des Schmierstoffs von geschmierten Maschinenelementen erfasst und später im Hinblick auf Zuverlässigkeit interpretiert.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden drei wesentliche Projektbereiche etabliert. In Abbildung 1 ist eine Übersicht der Projektbereiche dargestellt.

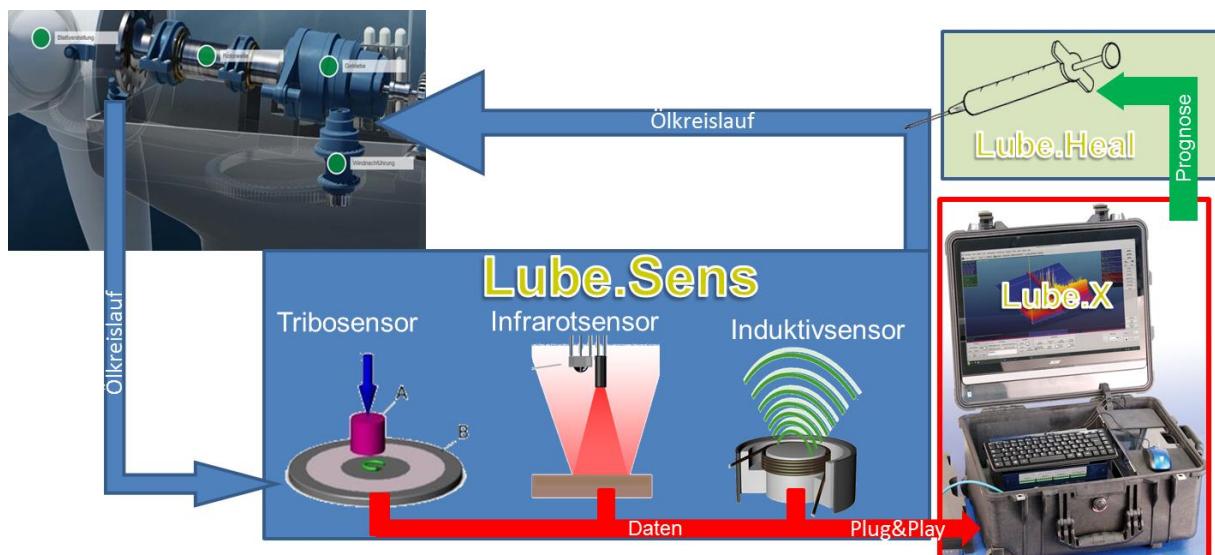
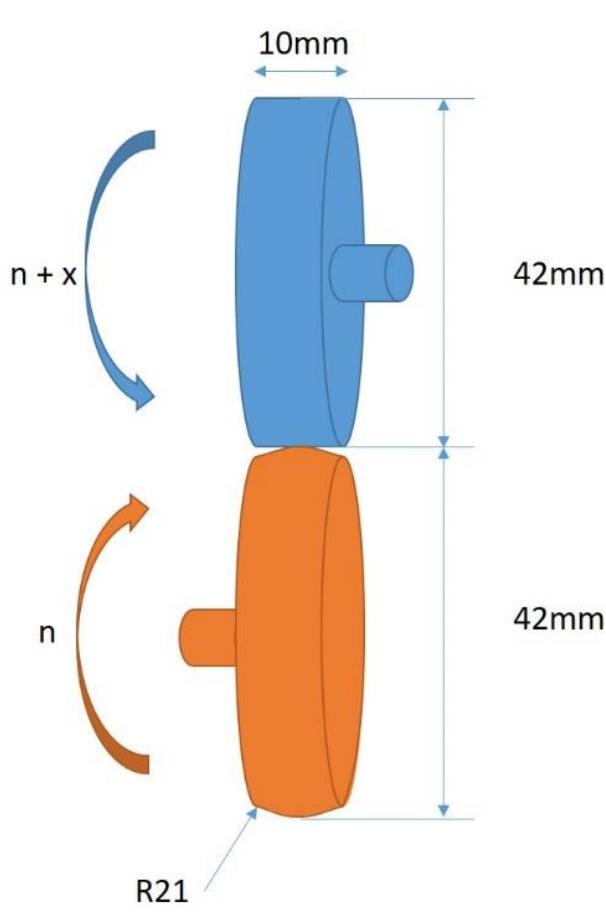


Abbildung 1 Projektbereiche Lube.Life

Das Tribometer / Tribo-Sensor beherbergt einen miniaturisierten Wälzkontakt, an dem mittels Kraft- und Drehmomenten-Sensoren das tribologische Verhalten des Wälzkontaktes in einem Ölkreislauf bestimmt wird.

Zur Herstellung der Ähnlichkeit zum Originalsystem (z.Bsp. Windkraftanlagen) werden Reibkörper derselben Materialauswahl verwendet. Zusätzlich sollen Pressungen, Gleitgeschwindigkeiten und Öltemperaturen wie im Getriebe der Windkraftanlage gefahren werden. Als Messwerte werden Reibung, Verschleiß, Temperatur und Ölzusammensetzung erfasst und zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Die Parameter sind als Vorgabe in Tabelle 1 zusammengefasst.



Ausgehend von der gewählten Probengeometrie, wie sie auch in der Tribometer-Farm des FHG-IWM zum Einsatz kommt (siehe Abbildung 2) wurden die tribologischen Parameter / Anforderungen an das Miniatur-Tribometer mit den Projektpartnern erfasst und definiert. Daraus wurden die technischen Anforderungen hinsichtlich der Probenhalterung, der notwendigen Zustell- und Antriebsbewegungen abgeleitet. Die Anforderungen an die erwartete Performance, Auflösungen und Reproduzierbarkeit der Reibkoeffizienten, die Positioniergenauigkeiten und die Datenerfassungsstrukturen, -kommunikation bildeten die Voraussetzung für die Erarbeitung des Lastenheftes.

Abbildung 2 Probengeometrie für das Miniatur-Tribometer

Die Abbildung 3 zeigt die Grundstruktur des Miniatur-Tribometers.

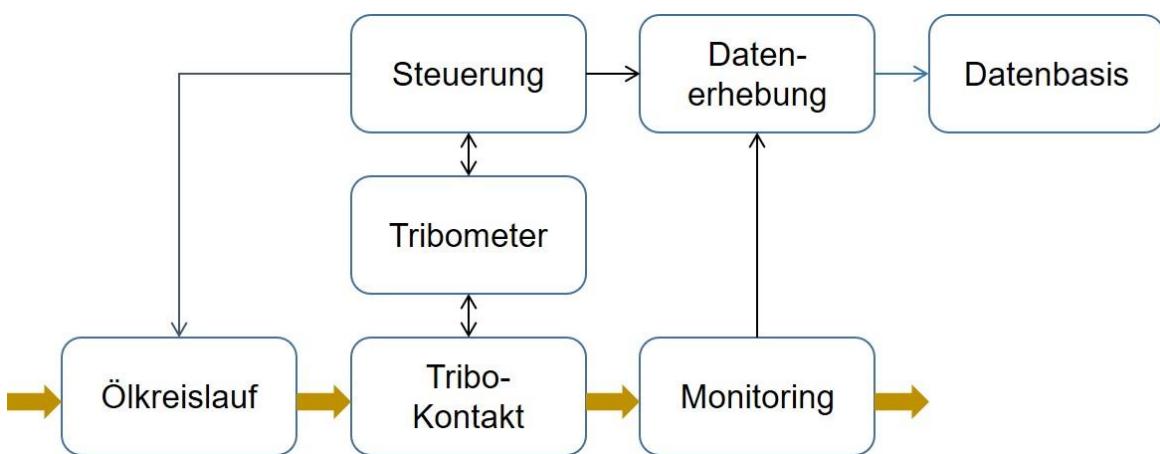


Abbildung 3 Grundstruktur Miniatur -Tribometer



Tribologie		Modelltribometer	
Tribokontakt		Wälzkontakt	
Probengeometrie		Scheibe vs Scheibe	
Rollgeschwindigkeit [m/s] max	m/s	10	
Rollgeschwindigkeit [m/s] nenn	m/s	1	
Probenabmessungen			
Durchmesser Scheibe	mm	42	
Radius Balligkeit	mm	21	
Umfang Probe	mm	132	
Drehzahl max @10m/s	rpm	4500	▼
Drehzahl nenn @ 1m/s	rpm	450	▼
Schlupf		± 5% 0...10%	
Kontaktgeometrie		Kugel-Kugel	Kugel-Zylinder
angstrebt Pressung min	MPa	750	750
angstrebt Pressung max	MPa	3000	3000
Normalkraft @750MPa	N	15	30
Normalkraft @3000MPa	N	1000	2500
COF / μ min		0,005	0,005
COF / μ max		0,01	0,01
Auflösung COF / μ		0,0001	0,0001
Reibkraft @750MPa@0,005	N	0,075	0,15
Reibkraft @3000MPa@0,01	N	10	25
Reibmoment min	N*mm	1,575	3,15
Reibmoment max	N*mm	210	525
Normalkraft Auflösung	mN	1	3,5
Drehmomentauflösung	N*mm	0,0001	0,004

Tabelle 1 Anforderungen an das Miniatur-Tribometer

Die Zielparameter wurden bewertet und durch eine Modellierung / Berechnung unterschiedliche Lösungsansätze verifiziert.

Dabei zeigte sich, dass insbesondere die hohe gewünschte Drehzahl und die hohe Auflösung des Reibmomentes, sowie die Normalkraft eine erhebliche Herausforderung bei der Realisierung darstellen.

Abbildung 4 zeigt die Funktionsstruktur zum Beginn des Projektes mit den unterschiedlichen Teilfunktionen, die durch nachfolgende Untersuchungen zu verschiedenen Lösungsansätzen zu verifizieren waren.

Im Ergebnis der ersten Untersuchungen wurde die Funktionsstruktur, in die in Abbildung 5 dargestellte Form überführt.

Nach der Festlegung der Funktionsstruktur wurde mit den Untersuchungen zu den Teilfunktionen begonnen.

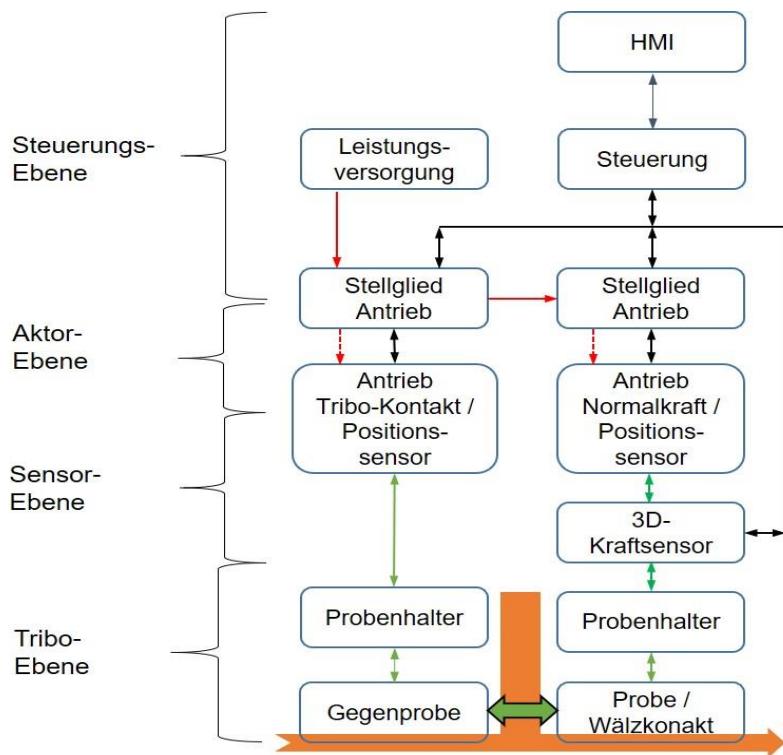
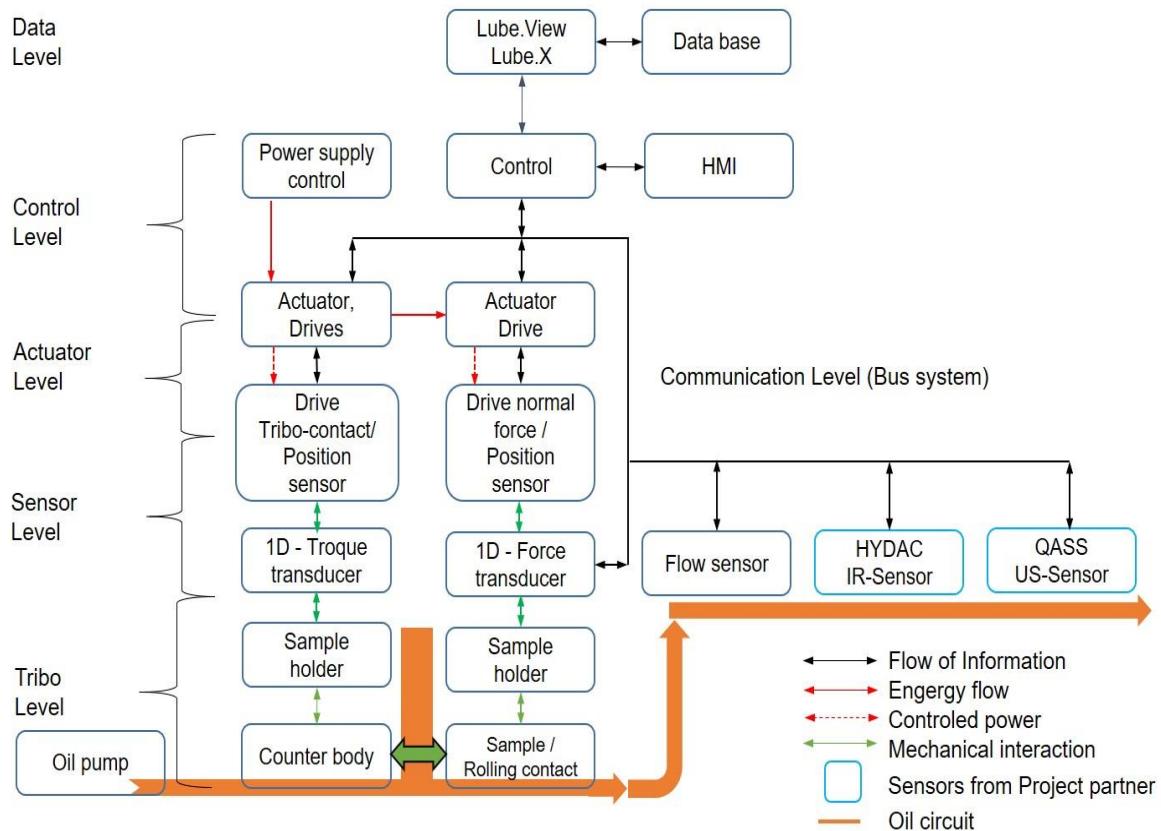


Abbildung 4 Funktionsstruktur Projektstart

Abbildung 5 Funktionsstruktur 2020
01 Mini-Tribometer



Untersuchungen zu den Prinzipien der Teilfunktionen Untersuchungen Signalwandlung und Datenverarbeitung

Die Hauptfunktionen des Miniatur-Tribometers (Antriebs- und Sensormodule) werden durch eine dezentrale Intelligenz und entsprechender CAN-Bus-Anbindung realisiert. Dazu wurden einzelne Module entworfen und als Funktionsmuster im Labor realisiert.

Abbildung 6 zeigt die prototypisch aufgebauten CAN-Module, dabei stand die Modularität und die im Vordergrund. Es konnten folgende Funktionen erprobt werden:

- CAN Communication mit USB/Ethernet-Umsetzung
- Ansteuerung von Aktuatoren:
 - o Schrittmotoren
 - o Voice coil – Motoren ,DC-Motoren
 - o Heizungselemente
- Auslesen von Sensoren:
 - o Kraftsensoren (Dehnmessstreifen)
 - o Positionssensoren (interpolierende optische Encoder 250nm)

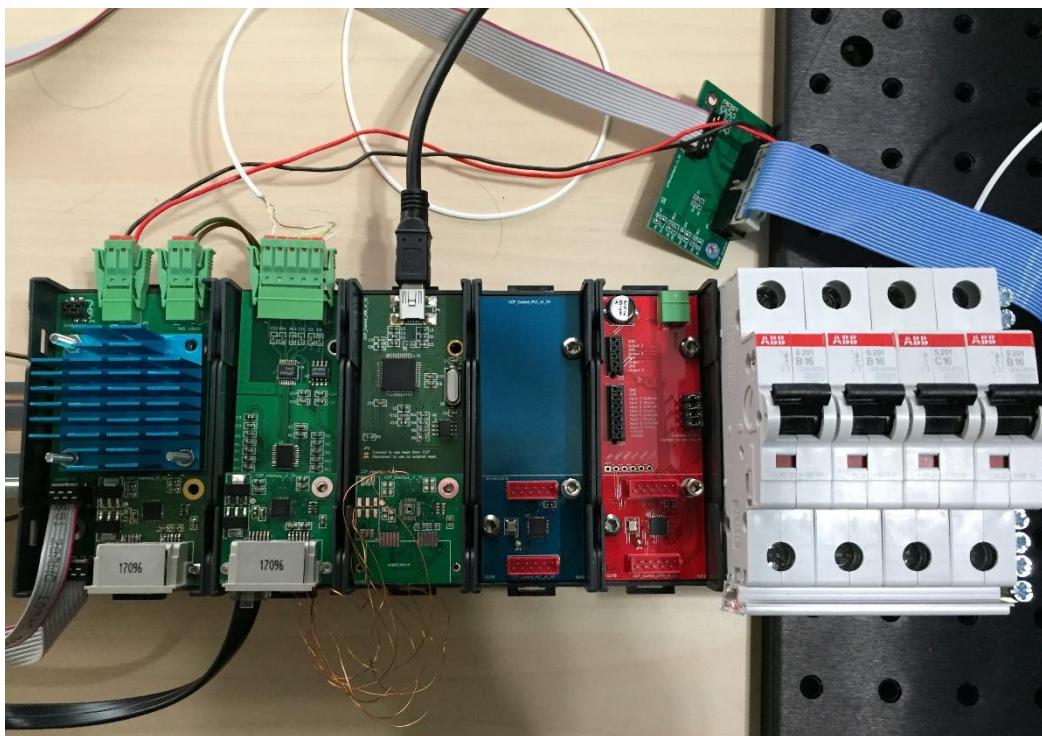


Abb. 6 Steuerungsmodule 2020 für das Miniatur-Tribometer

Für den Sedimentierungssensor wurde sowohl spektrometrische als auch spektralphotometrische Voruntersuchungen durchgeführt. Dazu wurde das Konzept eines autark agierendes I2C-Bussystems untersucht, das an das CAN-Bussystem angebunden wurde. Diese Arbeiten fanden in Ergänzung zum Arbeitsplan statt, da die Geplante Implementierung einer UWB-Impedanz Sensors sich als nicht durchführbar erwies.

Systementwurf aus verifizierten Teilfunktionsprinzipien



Der ursprüngliche Systementwurf wurde einem Review unterzogen und auf der Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen und Zielparameter angepasst (siehe Abbildung 7).

Neu dabei war der Übergang zu zwei Drehmomenten Sensoren zur Bestimmung des Reibdrehmomentes (Reibkraft) und eines Kraftsensors für die Messung der Normalkraft.

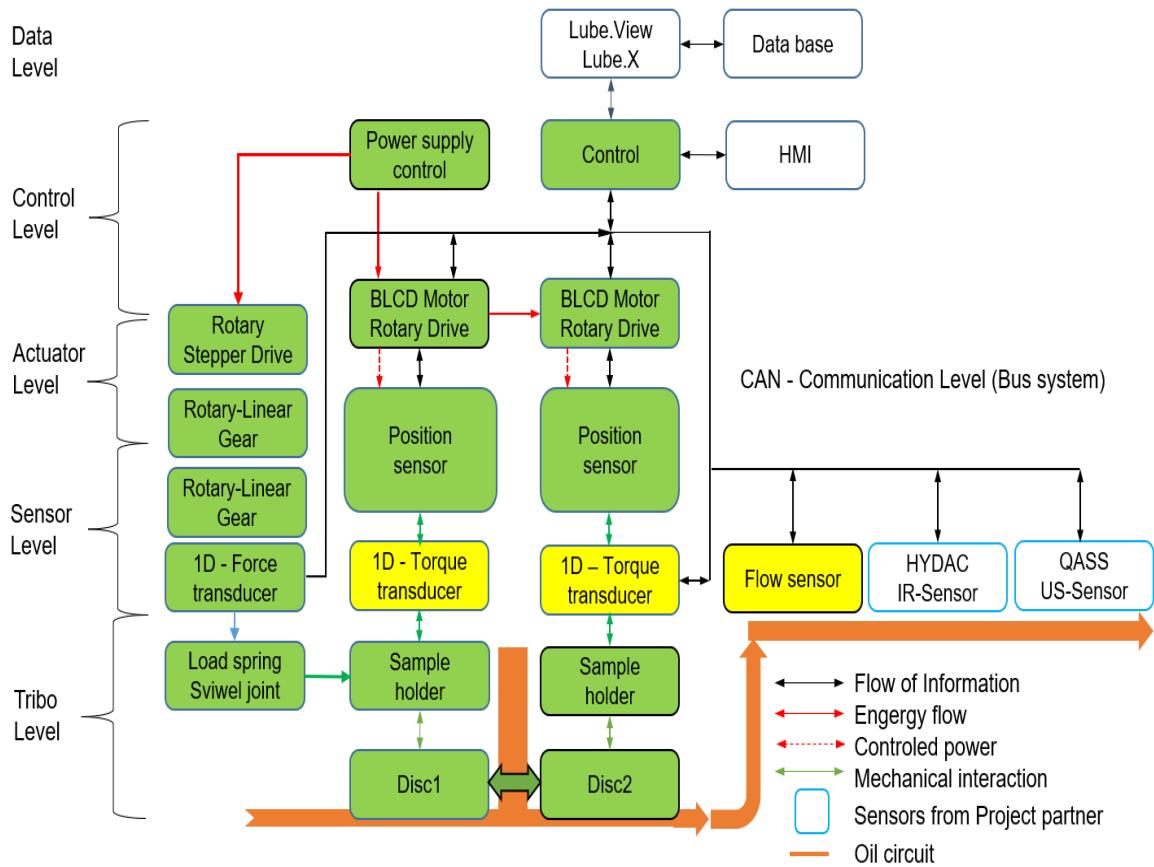


Abb. 7 angepasstes Systemdesign des Miniatur-Tribometers (2021)

Mit der Umstellung der Funktionsstruktur, als Ergebnis der Untersuchungen zu den Antriebs- und Messprinzipien sowie der elektronischen Steuerungsstruktur 2020 wurde auch eine Überarbeitung der Steuerungsstruktur vorgenommen und ein neues Elektronikkonzept erarbeitet (Abbildung 8)

Dabei wurde auf die Verwendung von FieldProgrammableGateArrays gesetzt, um die schnellen Sensorsignale sicher verarbeiten zu können. Dies hat sich später als nicht effizient für die Entwicklung erwiesen und wurde nochmals angepasst.

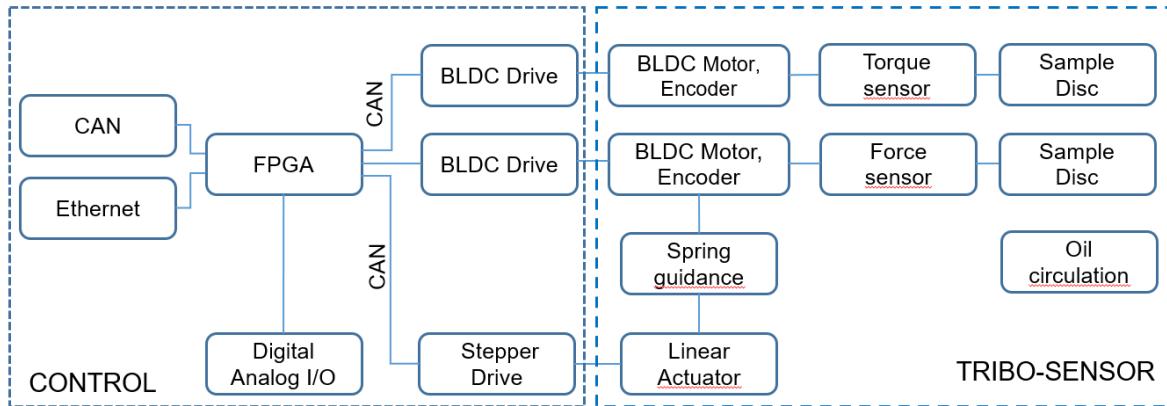


Abb. 8 Lube.Life Funktionsstruktur und **Elektronikkonzept 2021**

Die elektronischen Steuerungstechnik wurde als Ein-Platinenlösung realisiert mit einem zentralen FPGA-Baustein und elektronischen Leistungs-IC realisiert (Siehe Abbildung 9).

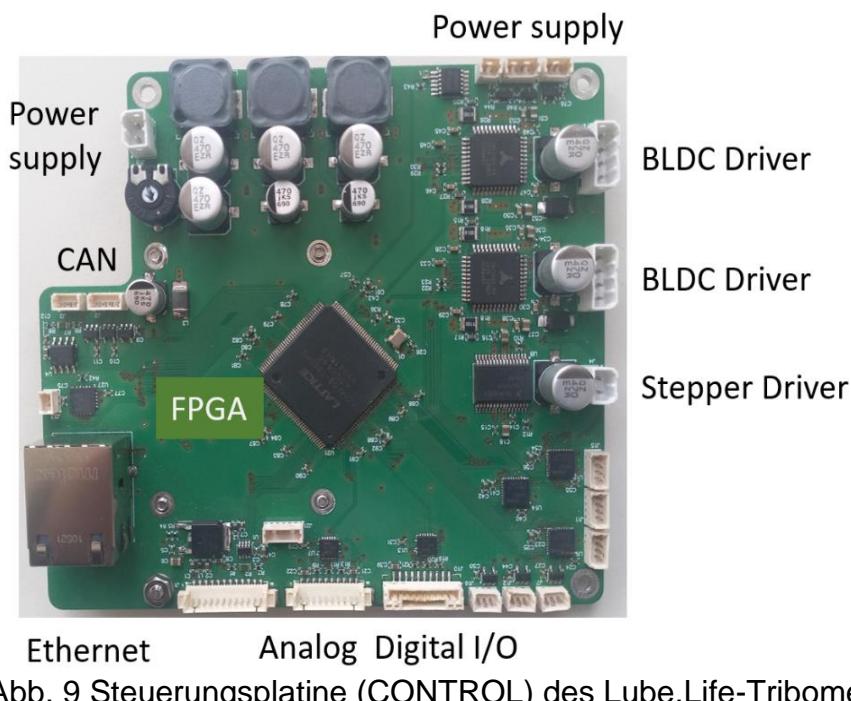


Abb. 9 Steuerungsplatine (CONTROL) des Lube.Life-Tribometers



Entwurf Mini-Tribometer

Aufgrund der festgelegten Zielparameter hinsichtlich der maximalen Drehzahl und des notwendigen Drehmomentes wurden bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC) als Antriebselemente ausgewählt. Zwischen den Scheiben (Sample Disc) muss ein Schlupf (unterschiedliche Drehzahlen) realisiert werden. Dieses lässt sich entweder über einen Zentralantrieb mit Vario-Getriebe oder zwei getrennte, synchron geregelte Antriebsstränge realisieren. Die Untersuchungen zu den elektronischen Steuerungsstrukturen im Vorhaben zeigten, dass das Konzept mit zwei getrennten Antriebssträngen durch moderne, zur Verfügung stehende mikroelektronische Komponenten besser gelöst werden kann als eine mechanisch erzeugter Drehzahlunterschied.

Zudem ergaben sich eine Reihe von weiteren Vorteilen bei der Substitution von mechanischen Komponenten durch elektronische Komponenten, trotz der höheren Komplexität der Steuerungssoftware:

- Kompaktere Bauweise,
- Erhöhter Parameterbereich,
- Einfachere Funktionsüberwachung und Eigensicherheit,
- Geringere Kosten durch Verwendung von Standardbauteilen,
- Ggf. geringere Montage- und Justage-Zeiten in der Fertigung

In Abbildung 10 ist das Prinzip der Normalkrafterzeugung dargestellt.

Dabei wird einer der Antriebsstränge (BLDC+Encoder, Probenaufnahme, Probe) durch eine geringe Verkipfung gegen den zweiten Antriebstrang gekippt.

Die Kippung wird durch einen Schrittmotor mit Spindel und Linearführung, der über einen Hebel mit einem rotativen Lager verbunden ist erzeugt (siehe auch Abbildung 11 Technisches Prinzip des Lube.Life-Tribosensors).

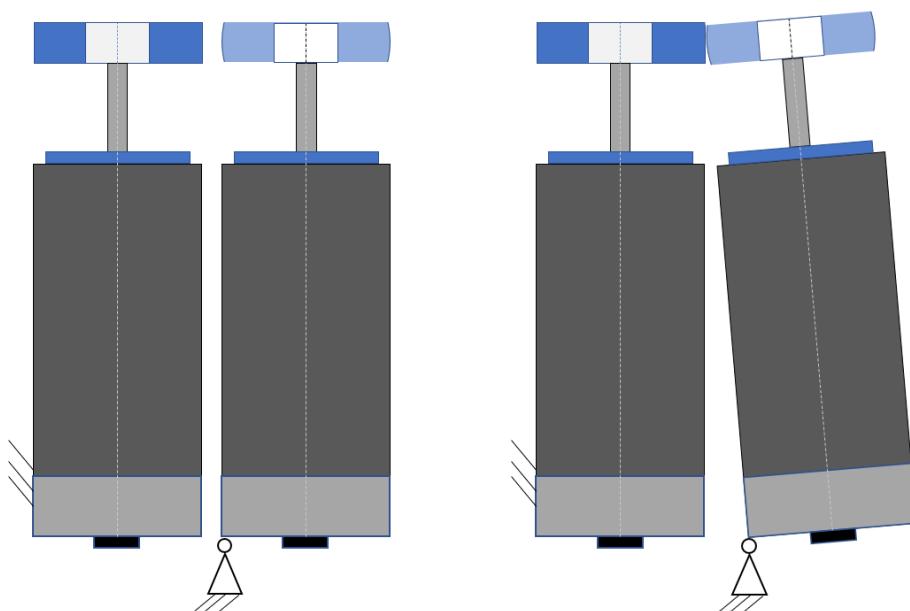


Abb. 10 Prinzip der Normalkrafterzeugung



Damit ergaben sich die Anforderungen für die elektronische Antriebssteuerung. Abbildung 10 zeigt detailliert das Technische Prinzip des Lube.Life-Tribosensors. Ausgehend vom Elektronikkonzept und dem Technischen Prinzip konnten die weiteren Entwicklungsschritte vorgenommen werden.

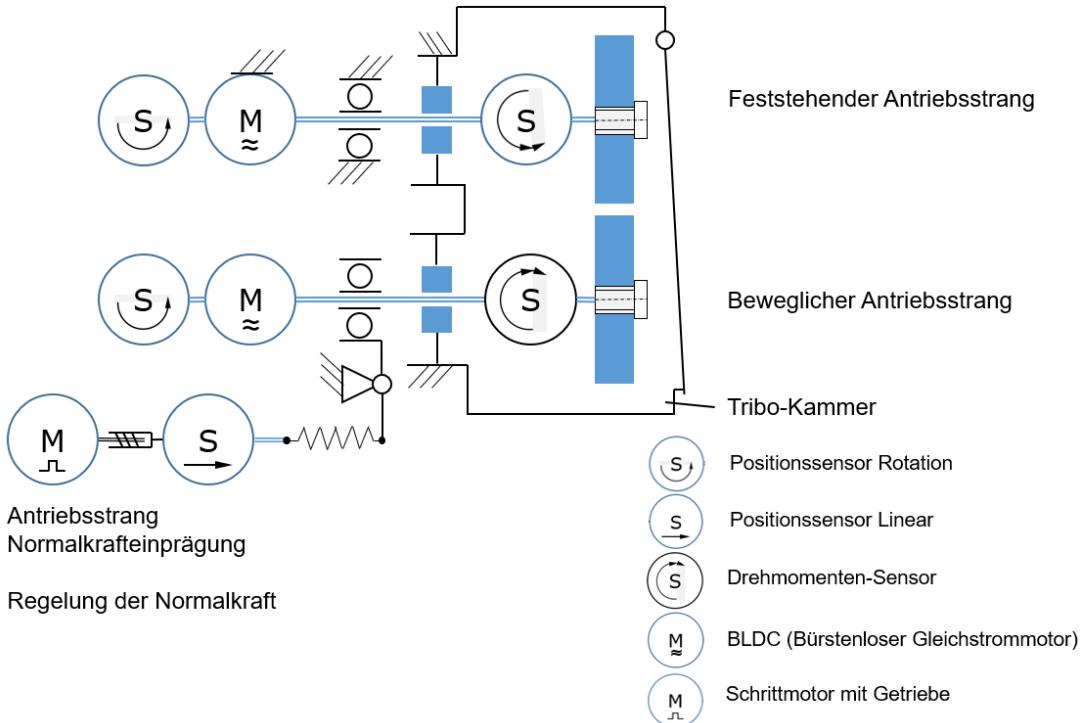


Abbildung 11 Technisches Prinzip Lube.Life-Tribosensors

Für die systemische Integration und die Evaluierung des Antriebs- und Messkonzeptes wurde ein erster mechanischer Entwurf durchgeführt. Dabei wurde insbesondere Wert darauf gelegt nur Standardkomponenten zu verwenden und die spezifischen mechanischen Komponenten (Gehäuse und Verbinder) durch ein 3D-Druckverfahren herstellen zu können, um lange Lieferzeiten zu vermeiden.

Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt des Entwurfs des Tribo-Sensors ohne die Antriebsmotoren und die Normalkrafterzeugung.

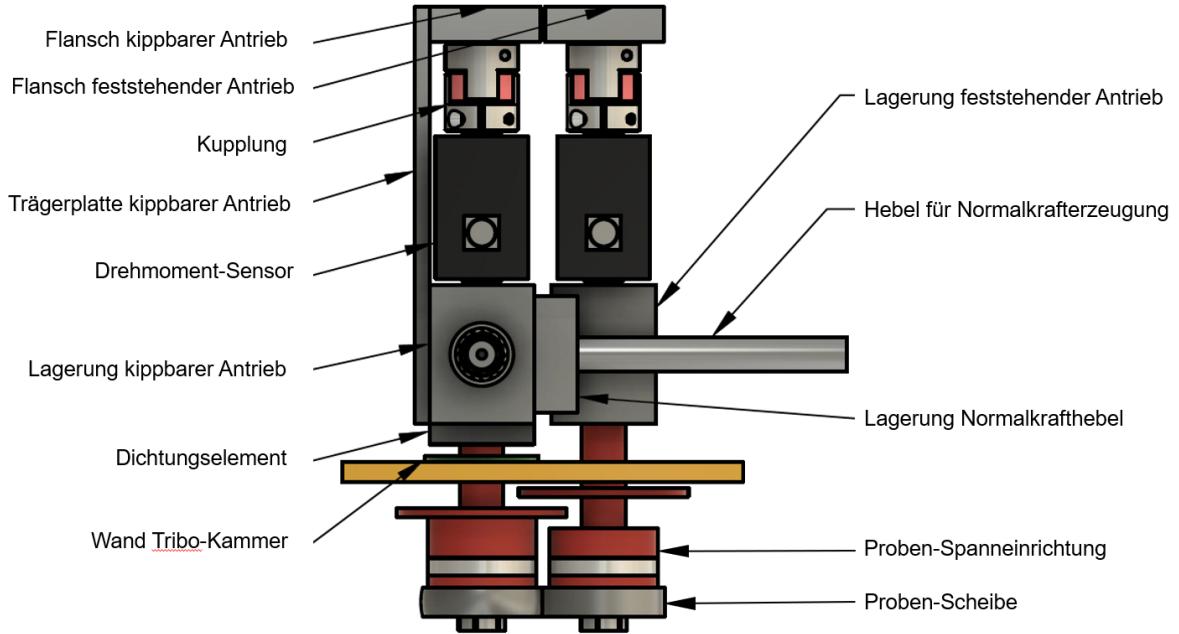


Abb. 12 Auszug Antriebsstränge Tribo-Sensor

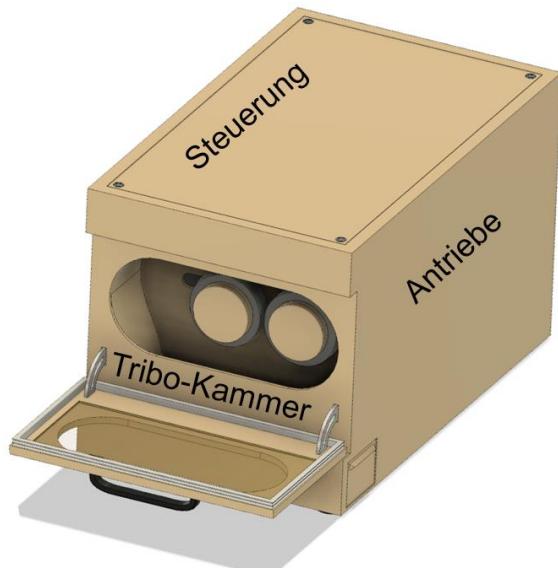


Abbildung 13 zeigt das Gehäuse Konzept

Ziel des Gehäusekonzeptes war es:

- Probenwechsel von vorn,
- Tribo-Kammer (Ölkreislauf), Antriebs- und Steuerungskomponenten kompakt,
- Sichtfenster in die Tribo-Kammer,
- seitliche Anschlüsse für die Ölzu- und Abführung,
- Nutzung 3D-Druck Technologien

Abb. 13 Gehäusekonzept Mini-Tribometer

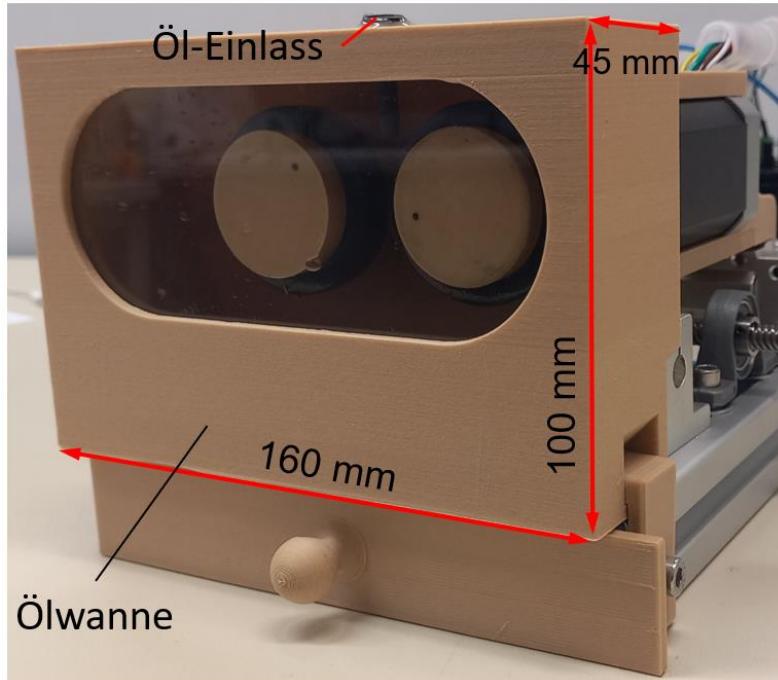


Abb. 14 Beispiel Multi-Mini-Tribometer

- möglichst kleiner seitlicher Platzbedarf,
- Stapelbar zu einem Multi-Tribometer-System (Siehe Abbildung 14),
- Zentrale Steuereinheit,
- Integrationsfähigkeit in ein LIMS (Laboratory Information Management System),



Demonstrator Aufbau Lube.Life Mini-Tribometer



Die Abbildungen 15 und 16 zeigen den realisierten Demonstratoraufbau des Lube.Life Minitribometers.

Abb. 15 Demonstrator Mini-Tribometer Frontansicht

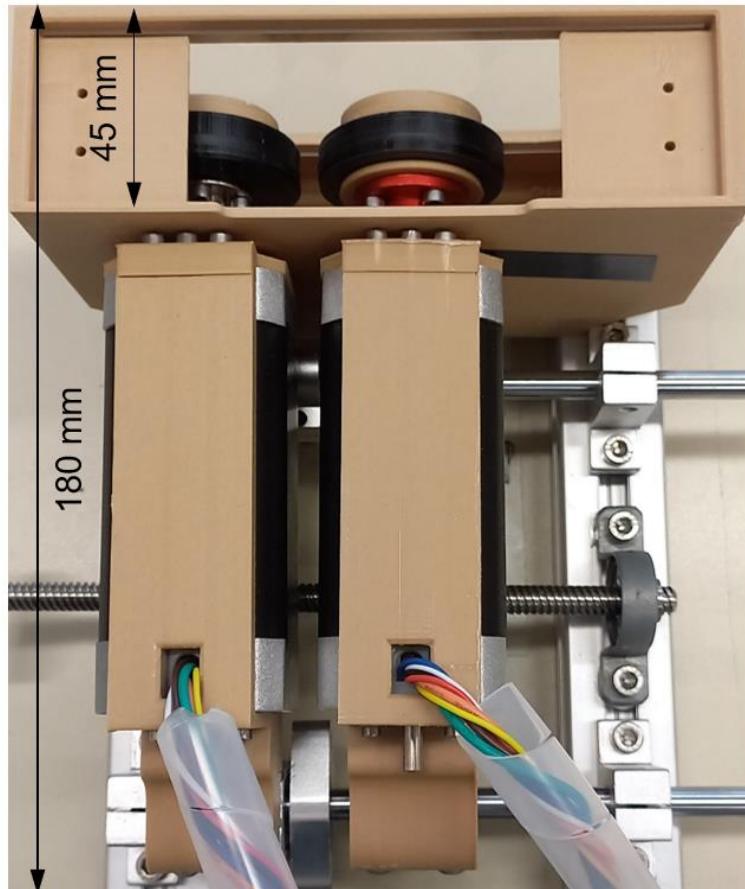


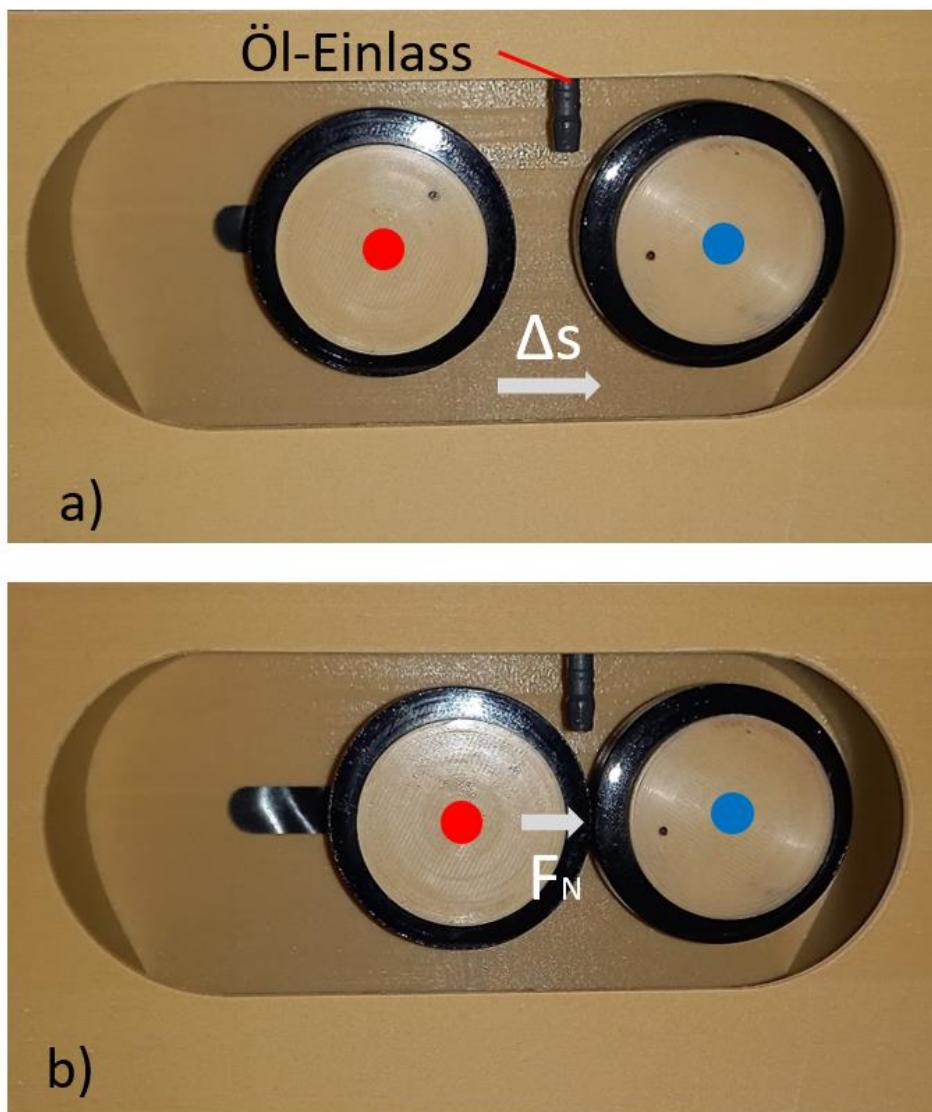
Abb. 16 Demonstrator Mini-Tribometer Draufsicht



Nach dem Aufbau des Demonstrators wurden die einzelnen Funktionen getestet und erste Parameter ermittelt.

In Abbildung 117 ist die Zustellung des beweglichen / kippbaren Antriebsstrangs (rot gekennzeichnet) gegenüber des feststehenden Antriebsstranges (blau gekennzeichnet) dargestellt.

Die im Bild dargestellten Scheiben wurden aus Polymer hergestellt.



a) Ausgangsposition b) Andrucksposition

Abb.17 Frontansicht des Mini-Tribometers



Nach der Inbetriebnahme wurden erste Parameter ermittelt.

Abbildung 18 zeigt das grundsätzliches Betriebsverhalten.

Für die einzelnen Betriebszustände sind entsprechende Videos verfügbar.

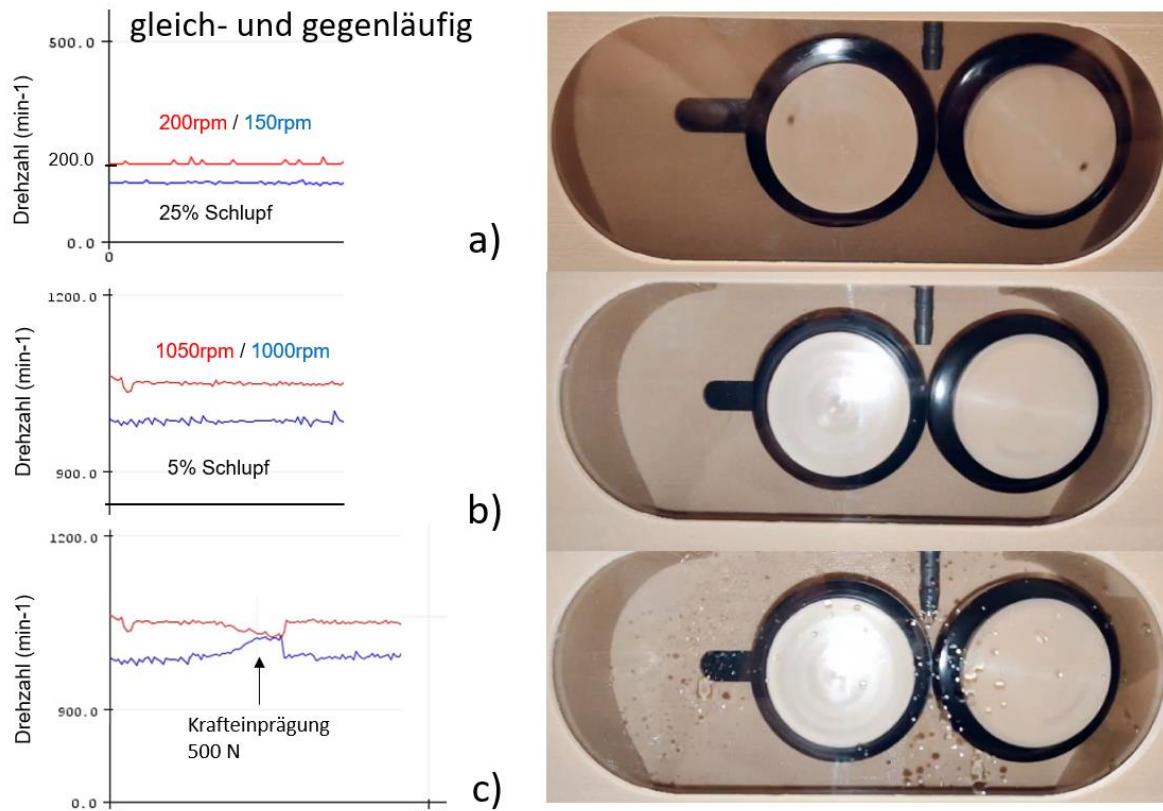


Abb. 18 Betriebsverhalten des Mini-Tribometers

In den ersten Versuchen konnte das Betriebsverhalten des Mini-Tribometers untersucht werden.

Dabei wurden in einem ersten Schritt das Regelverhalten, insbesondere die Regelung auf unterschiedlichen Schlupf, bei unterschiedlichen Grundrehzahlen untersucht.

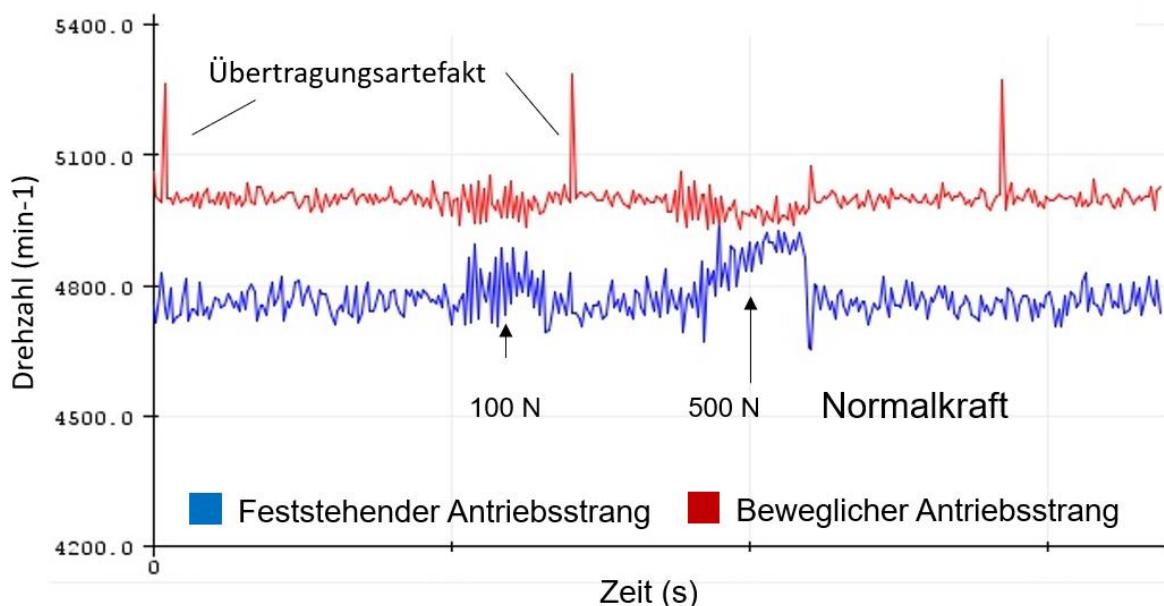
Abbildung 12 a) zeigt das Verhalten bei 25% Schlupf (Anforderung $\pm 5\%$) und bei niedriger Drehzahl. Das Regelverhalten ist als gut einzuschätzen.

Abbildung 12 b) zeigt das Verhalten bei 5% Schlupf (entsprechend der Anforderung $\pm 5\%$) und bei hoher Drehzahl. Das Regelverhalten ist als ausreichend einzuschätzen.



Abbildung 18 c) zeigt das Verhalten bei einer hohen Krafteinprägung. Hier zeigt sich, dass sich ein Gleichgewicht der beiden Antriebsstränge (gleiche Drehzahl) entsteht.

Abbildung 19 zeigt das Verhalten bei zwei unterschiedlichen Normalkräften (Pressung der Probenscheiben gegeneinander) bei maximal geforderter Geschwindigkeit.



Abbi. 19 Drehzahlverhalten bei Normalkraftänderung

Folgende Schlussfolgerungen für die Weiterentwicklung der Hardware und Software wurden / weitere Arbeiten gezogen:

- Datenübertragung stabilisieren / Vermeidung von Übertragungsartefakten
- Inbetriebnahme der Drehmomenten-Sensoren
- **Ausgehend von den erreichten Ergebnissen bei dem Test des Miniatur-Tribometers wurde festgelegt, die elektronische Datenverarbeitung und Steuerung zu überarbeiten, damit:**
 - o Regelgeschwindigkeit erhöht werden kann,
 - o Regelsteifigkeit deutlich erhöht werden kann,
 - o Anpassung der Leistungssteuerung der BLDC-Motoren vorgenommen werden kann,
 - o unterschiedlichen Softwarefunktionen (Firmware/Backend/Frontend) Mit unterschiedlichen Softwaretools und Programmierer realisiert werden können.



Überarbeitete Steuerung 2022/2023

Ausgehend von den Ergebnissen und Schlussfolgerungen beim Test des Mini-Tribometers sowie Problemen in der Zulieferung von elektronischen Baugruppen wurde eine neue Struktur der Steuerung definiert.

Ziel war es dabei: unterschiedliche Technologien so zu kombinieren, dass die Kosten/Performance-Verhältnis deutlich verbessert wird und verschiedene Entwickler parallel Hard- und Software erarbeiten konnten (Abbildung 20).

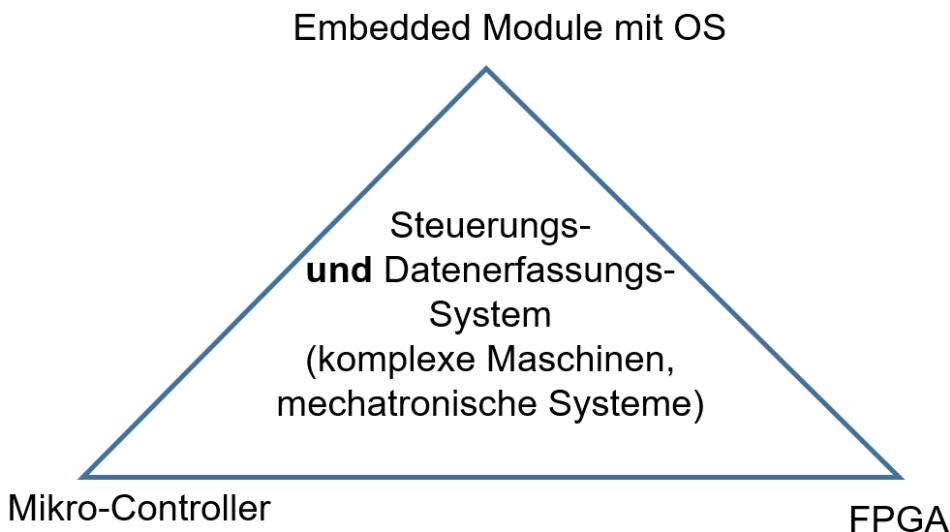


Abb. 20 Zusammenführung unterschiedlicher mikroelektronischer Technologien

Embedded Module mit OS

- Software orientiert (Hardware-Plattform) externe Hersteller,
- Komplexe Softwarefunktionen, „Hochsprachen“, hoher Datendurchsatz,
- „viele“ Ressourcen für Software-Projekte, hohe Performance => hohe Kosten, geringe Serieneffekte
- Risiken bei Modellwechsel, da Modellzykluszeiten kurz, Lieferketten gestört.

Mikro-Controller

- „Brückenfunktion“, medium komplexe Funktionen /Kommunikations- aufgaben, viele teilintegrierte Prozessfunktionen (ADC/DAC/RTC...)
- große Anzahl an Herstellern /Typenvielfalt, geringste Kosten / Performance,
- medium verfügbare Ressourcen für Software-Projekte,
- Lieferketten teilweise unterbrochen.

Gate Arrays“ FPGA, ASIC

- „Software in Hardware“, sehr kurze Prozess-Zeiten,=> Hardware nah,
- „echte“ Echtzeitfähigkeit, hohe Integration, hervorragend für Grundfunktionen, die nicht verändert werden müssen, wenige Hersteller, sehr spezifische Programmierung => wenige Ressourcen für Software-Projekte, hoher Debug-Aufwand
- Kosten-Performance in der Serie sehr gut, Initialkosten hoch, Modellzykluszeiten lang.

Struktur / Hardware der überarbeiteten Steuerung

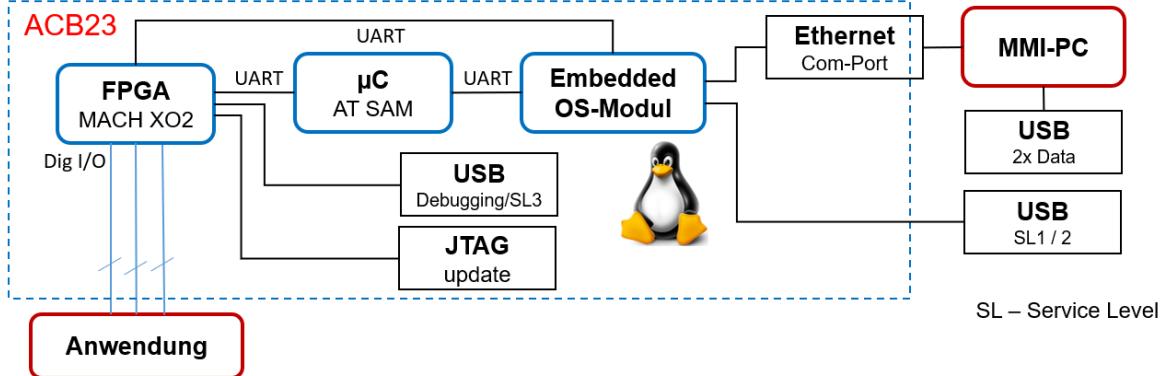


Abb. 21 Struktur ACB23

Abbildung zeigt die Struktur der überarbeiteten Steuerung mit den unterschiedlichen Technologien.

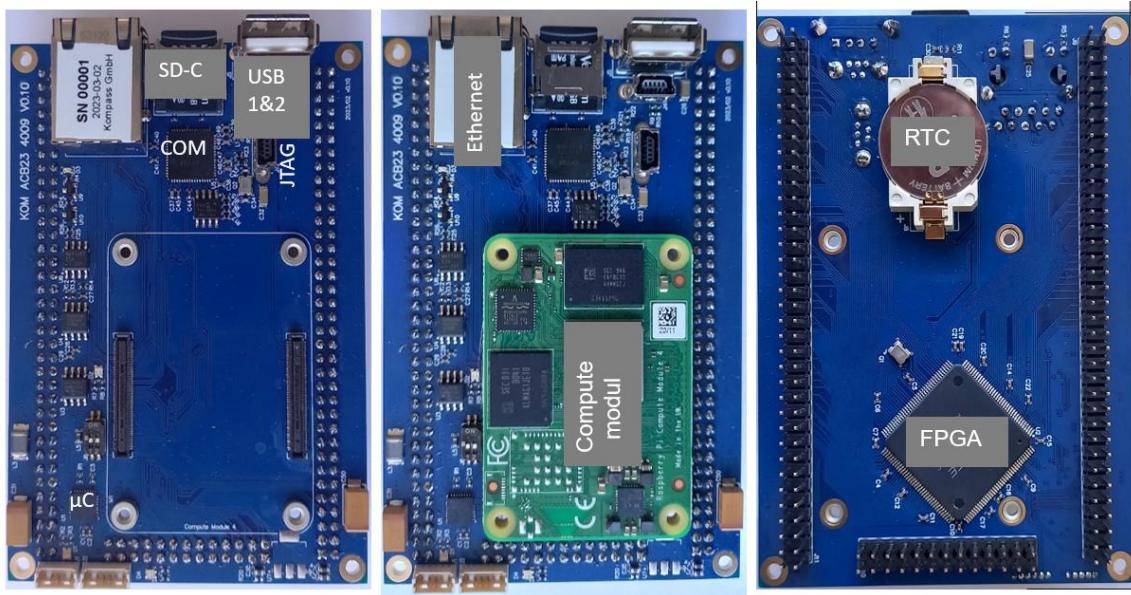


Abb. 22 Demonstrator der Steuerung des Mini-Tribometers



Systemparameter: Vergleich Soll-Ist

Tribologisches System		Lube.Life Tribo-Sensor		
		Plan - Anforderungen	IST 02/2022	IST 12/2022
Tribokontakt			Wälzkontakt	
Probengeometrie		Scheibe (Kugel) vs Scheibe (Zylinder)		
Kontaktgeometrie		Kugel-Zylinder	Kugel-Zylinder	Kugel-Zylinder
Relative Bewegung		gegenläufig	gleich-/gegenläufig	
Rollgeschwindigkeit max	m/s	8,8	11	11
Rollgeschwindigkeit min	m/s	0,088	0	0
Proben-/abmessungen		1.7131	1.7131	1.7131
Durchmesser Scheibe	mm	42	42	42
Radius Balligkeit	mm	21	21	21
Umfang Probe	mm	132	132	132
Scheibenantrieb				
Antriebsprinzip		BLDC	BLDC	BLDC
Drehzahl max	rpm	4000	5000	5000
Drehzahl nenn @ 1m/s	rpm	450	450	450
Dehzahl min	rpm	40	0	0
Drehmoment Antrieb	Nm	0,25	0,25	0,25
Schlupf		± 5%	± 100%	± 100%
Drehzahlregelung Reproduzierbarkeit	rpm		20	5
Schlupf Reproduzierbarkeit @ 1000rpm	%		2	0,5
Pressung max @Fn 2300 @ $\mu=0,01$	MPa	3035	tbt	7900*

* maximal möglicher Wert

Tabelle: 2 Soll-IST Vergleich der Parameter für das Mini-Tribometer

Sensor-Integration

Für die Detektion einer möglichen Sedimentierung von Verschleißpartikel war die Integration eines Impedanz-Sensors der Fa. ILMSENS geplant.

Die Implementierung sollte im Rahmen eines Unterauftrages im AP 2.2.2.2 realisiert werden (Untersuchungen zur Sedimentierung von Verschleißpartikeln und die Implementierung der UWB-Impedanzspektroskopie in das Elektronikkonzept). Im Ergebnis von Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Technologie der UWB-Impedanzspektroskopie zum Zeitpunkt der Durchführung der Arbeiten noch nicht so ausgereift war, um die geplante Partikelerkennung zu realisieren. Zudem waren die Kosten für potenzielle Integration in Seriengeräte zu hoch.

Aus diesem Grund wurden eigene Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt, in dessen Ergebnis eine einfache Sensorplattform entstand, mit der sowohl die Permittivität als auch die Farbe des Öles bestimmt werden können. Die Farbe dient als Indikator für den Alterungszustand des Öles.

Mit der Permittivität kann insbesondere der Wassergehalt im Öl bestimmt werden. Untersuchungen der FHG-IWM haben gezeigt, dass die durch das Mini-Tribometer bestimmten Kräfte im tribologischen Kontakt und das Verschleißverhalten wesentlich durch den Wassergehalt bestimmt werden.



Die Zusammenführung dieser Sensordaten und Auswertung mit Algorithmen der Künstlichen Intelligenz ist eine der wesentlichen sich an das Projekt anschließenden Aufgaben.

Auswirkungen des Projektes auf die Entwicklung der Kompass

Das Projekt Lube.Life hatte für die Entwicklung der Kompass GmbH sowohl in struktureller als auch in technologischer Sicht sofortige Wirkungen.

Strukturelle Auswirkungen:

- Entscheidung für den Beginn des Aufbaues der Entwicklungsabteilung für Elektronik (bislang externe Partner), dadurch
- 2 neue Arbeitsplätze (Hardware-, Software-Entwicklung) geschaffen und
- Investition in die notwendige Infrastruktur erfolgt,
- Attraktive Angebote - Praktika, Abschlussarbeiten für Studierende genutzt um Ressource für weiteres personelles, fachgerechtes Wachstum zu schaffen,
- Zusammenarbeit mit Projektpartnern, insbesondere FHG, Fuchs aufgebaut,
- bereits neue Kunden im Bereich der Auftragsentwicklung von Tribosensorik angebahnt / gewonnen,
- Geschäftsbereich der mechatronischen Systeme / Tester gefestigt,

Technologische Auswirkungen:

- Einführung einer neuen Technologie im Bereich der Elektronikentwicklung und -anwendung (FPGA + Mikro-Controller mit OS basierte komplexe embedded-Module kombiniert),
 - Ziel die spezifischen, technischen Leistungsmerkmale der verschiedenen Technologien mit den Anforderungsprofilen zu kombinieren,
 - Synthese verschiedener Hard- & Software-Ansätze
 - Höchste Flexibilität, Module in der Hard- und Softwarefunktionen, damit
 - deutliche Verkürzung Time-to-Market, (Entwicklungszeiten, Herstellungskosten),
 - Verteilung der notwendigen Entwicklungs-Ressourcen (Hard und Software auf unterschiedliche Spezialisten)
 - Ansatz ermöglicht auch auf einfachen Systemen eine höhere Performance, Skalierungsfaktor
- Anwendung von KI-Algorithmen zur Identifikation von Mustern in Sensorsignalen versuchweise implementiert,
- Know-How zu Datenbank-Systemen ausgebaut und genutzt.



Anschlussfähigkeit

Gemeinsam mit Partnern des Projekt Konsortiums wurde die Diskussion hinsichtlich geeigneter Testtechnik und Sensoren weitergeführt und Parameter für die Sensorik konkretisiert.

Die wesentlichen wissenschaftlichen Erkenntnisse:

- starke Abhängigkeit der Reibungsverhältnisse vom Wassergehalt bei Materialpaarungen aus Stahl,
- geringerer Einfluss einer Nach-Additivierung des Öles auf dessen Lebensdauer
- Einsetzbarkeit von IR/VIS Sensoren sowie die Bestimmung der Änderung Permittivität als Parameter zur Beschreibung des Öl-Zustandes werden zu weiteren F&E-Schritten führen,
- Die Einführung/Kombination von unterschiedlichen Technologien der Signal- und Datenverarbeitung, sowie die deutliche Reduzierung der Kosten, insbesondere bei der Datenspeicherung, hat zu einer wesentlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit geführt und ermöglicht bei weiteren Projekten die Anwendung von KI-Algorithmen.

Da die untersuchten und entwickelten Elektronikkomponenten vielseitig einsetzbar sind, werden diese auch in weitere angebahnte nationale und internationale F&E-Projekte insbesondere im Umweltmonitoring von gegenwärtig landwirtschaftlich genutzten, jedoch zur Renaturierung vorgesehen, Flächen eingesetzt.

Dazu sollen weitere sensorische und aktorische Prinzipien in diesen "Elektronikbaukasten" eingebunden werden. Dazu zählen insbesondere drahtlose Kommunikationskanäle.

Gemeinsam mit dem Leistungszentrum InSignA der FHG wurden für verschiedene Szenarien KI-Modelle hinsichtlich der Sensorfusion und Datenextraktion untersucht und bewertet. Gemeinsam mit dem Umweltforschungszentrum Leipzig sollen daraus Sensornetzwerke erstellt werden.



Fortschreibung des Verwertungsplanes

Die Verwertung der Projektergebnisse wird auf unterschiedliche Weis erfolgen:

- Innerhalb der entstehenden Wertschöpfungskette des Projektkonsortiums,
- innerhalb des eigenen, aktives Tribologie-Netzwerkes / Kundenstammes,
- Erschließung neuer Marktsegmente (z.Bsp. Neuzugang zum Markt der Getriebeölaufbereitung).
- Der ursprünglich geplante Einsatz in Windkraftanlagen gestaltete sich aufgrund der Sicherheitsbedenken deren Betreiber als sehr schwierig.

Die Produktstrategie

- Erweiterung des Produktpportfolios durch ein geschlossenes in-situ Miniatur-Tribometer für Windkraftanlagen und andere Marktsegmente,
- Diversifizierung, Erweiterung und Anpassung der Testeinrichtung / Sensorik (Petrolindustrie, Schmierstoffindustrie, Lebensmittelproduktion)
- Retrofit-Systeme für bestehende Anlagen / Testeinrichtungen

Die geplanten Umsatzzuwächse für die folgenden Jahre können gegenwärtig bestätigt werden.

Die Produktentwicklung für ein Seriengerät hat nach dem Projektende begonnen. Mit potenziellen Anwendern wurden die Zielsetzungen hinsichtlich der technischen Spezifikationen und der Marktakzeptanz festgelegt.