

Abschlussbericht

zum BMBF-Verbundvorhaben

Elektronikplattform für hoch-performantes Breitband-Monitoring
für Anwendungen in der Industrie 4.0

– Sonorion –

Teilvorhaben: Energieeffiziente Hardware-Plattform für hoch-
performantes Breitband-Monitoring

Zuwendungsempfänger: CoSynth GmbH & Co. KG

Förderkennzeichen: 16ME0043

Projektlaufzeit: 01.03.2020 bis 30.11.2023 (inkl. Verlängerung)

Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger VDI/VDE-IT, Berlin, betreut.

Geschwärzter Bericht aufgrund von ausstehender Schutzanmeldung. Eine ungeschwärzte Version ist auf Anfrage beim Autor erhältlich.

Verbundpartner

Fraunhofer IIS/EAS
Zeunerstr. 38
01069 Dresden
www.eas.iis.fraunhofer.de

INVENT GmbH
Christian-Pommer-Straße 47
38112 Braunschweig
www.invent-gmbh.de

CoSynth GmbH & Co. KG
Im Technologiepark 4 (zuvor Marie-Curie-Straße 1)
26129 Oldenburg
www.cosynth.com

Bosch Rexroth AG
An den Kelterwiesen 14
72160 Horb
www.boschrexroth.de

Inhalt

1. Aufgabenstellung.....	4
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	7
Eigene Kompetenzen.....	7
Bisheriger industrieller Einsatz von Condition Monitoring	8
Integrierte Auswerteelektronik.....	9
Sensorik mit Breitband-Eigenschaften	9
KI-Methoden	11
Überwachung von Axialkolbenpumpen	12
Patentlage.....	12
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
5. Erzielte Ergebnisse.....	13
Spezifikation des Sensorsystems	13
Labor- und Feldmessungen mit Piezosensorik	15
Entwicklung.....	22
6. Zahlenmäßiger Nachweis.....	33
7. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	33
8. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	35
9. Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	35

1. Aufgabenstellung

Condition Monitoring und Predictive Maintenance gehören im Industrie 4.0-Umfeld inzwischen zu den Haupttriebfeuern einer immer effizienteren und Ressourcen schonenden Produktion. Maschinen und Anlagen, die entweder in der Anschaffung kostenintensiv sind – und deshalb einem hohen Amortisationsdruck unterliegen – oder die im Falle eines ungeplanten Stillstandes hohe Kosten infolge eines Produktionsausfalles nach sich ziehen, werden zunehmend mit Überwachungseinrichtungen ausgestattet, die den Zustand der Maschine oder Anlage im Hinblick auf Verschleiß fortlaufend beurteilen. Insbesondere bei großen Maschinen oder Anlagen, an denen hohe mechanische Kräfte wirken, wie etwa Getriebe, Generatoren oder Hydrauliksysteme, werden solche Systeme heute bereits oft eingesetzt, um einen zu hohen Verschleiß bestimmter Komponenten frühzeitig erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen möglichst mit ausreichendem Vorlauf planen zu können.

Für Zustandsüberwachungssysteme werden vielfach Messungen von Vibrationen (Oberflächenschwingbeschleunigung, d.h. Körperschall) herangezogen. Neuerdings werden auch Ansätze getestet, die den abgestrahlten Luftschall, der von Mikrofonen aufgenommen wird, zur Auswertung nutzen. Diese Überwachungssysteme decken in den allermeisten Fällen bestimmte Anwendungsbereiche ab und sind aus verschiedenen Gründen in ihren Möglichkeiten eingeschränkt. Insbesondere die Betrachtung von Körperschallschwingungen war bislang nahezu durchweg auf den Bereich des hörbaren Schalls konzentriert. Hier wurde mit dem Projekt angesetzt und eine vielfach verbreiterte Betrachtung des Frequenzbereiches erforscht.

Durch die Kombination verschiedener Industrie 4.0-Ansätze – insbesondere Flexibilität, Vernetzung und Selbstadaption – mit neuester Sensortechnik und adaptiver Mikroelektronik wurden im Projekt folgende Ziele angegangen:

Erstens extrem-breitbandige Sensortechnik und adaptive Mikroelektronik kombinieren, um im Bereich der Überwachung von Maschinenbaukomponenten neue Wege zu beschreiten und bisher ungelöste Probleme beim Condition Monitoring anzugehen. Die Tauglichkeit des Ansatzes wurde im Labor und beim Projektpartner Bosch Rexroth an einem Industriedemonstrator nachgewiesen. Zur Abdeckung der breitbandig auftretenden verschleißbedingten Schwingungen wurde eine adaptive und trotzdem kostengünstige Elektronik erarbeitet und eingesetzt und der Einsatz des Systems im Umfeld von Axialkolbenpumpen – aber auch darüber hinaus – ermöglicht.

Zweitens die Kombination aus neuer Sensortechnik, dem adaptiven mikroelektronisch realisierten Frontend und selbstlernender Auswertelgorithmen zu einem wesentlichen Baustein für Industrie 4.0-Anwendungen entwickeln. Damit wird es dem deutschen Maschinenbau ermöglicht, die Überwachung von Maschinenkomponenten trotz des oftmals sehr breit aufgefächerten Einsatzgebietes mit überschaubarem Aufwand und zu vergleichsweise geringen Kosten zu realisieren und so Schritte in Richtung eines digitalen Geschäftsmodells in die Realität umzusetzen.

Drittens für einen breiten Bereich von Industrie 4.0-Anwendungen selbstlernende und selbstadaptierende Condition Monitoring-Systeme auf Basis von aktuellen KI-basierten Algorithmen durch den Forschungspartner Fraunhofer IIS/EAS erforschen und realisieren und die jüngst in deutschen und europäischen Projekten entwickelten EDA-Methoden nutzen und um Bausteine einer adaptiven Mikroelektronik erweitern.

Die Verwertung der Ergebnisse ist durch verschiedene Facetten sichergestellt. Einerseits will das Konsortium mit dem entwickelten Gesamtsystem bestehend aus Breitband-Sensor, konfigurierbarem Vorverstärker und ADC, adaptiver

Softwarelösung und selbstlernenden Datenanalysealgorithmen deutschlandweit den Markt für kostengünstige Überwachungslösungen für Komponenten von Maschinen und Anlagen ansprechen und damit Industrie 4.0-Geschäftsmodelle nachhaltig unterstützen. Andererseits hat jeder der Partner zusätzlich eigene Ideen zur Verwertung der Projektergebnisse.

Das geplante Projekt setzt auf Arbeiten auf, die in dem zuvor beendeten Projekt ACME4.0¹ durchgeführt wurden. An diesem Projekt waren drei der vier Partner dieses Vorhabens beteiligt. Die in ACME4.0 angewendete Methodik zur Elektronikentwicklung wurde im Projekt Sonorion weiterentwickelt und verbessert. Hier sind entscheidende Fortschritte bzgl. der Flexibilität der Elektronik und darüber hinaus bzgl. der Energieeffizienz erreicht worden. Die im Projekt ACME4.0 untersuchte Methodik der Datenanalyse bei Luftschall zeigte sehr gute Teilergebnisse, ist allerdings für die im geplanten Projekt angestrebte extrem-breitbandige Herangehensweise nicht sinnvoll einsetzbar gewesen. Zudem wurden weitere Fortschritte bei der Analysemethodik entwickelt.

Für das Teilvorhaben von CoSynth wurden folgende Arbeitsziele definiert:

- Planung, Design und Realisierung der integrierten Auswerteeinheit
- Optimierung, Umsetzung und Erprobung von Analysealgorithmen

CoSynth war an allen Teilarbeitspaketen beteiligt und hat vorhandene Erfahrungen und Kompetenzen in die Lösung der jeweils anstehenden Fragestellungen eingebracht.

¹ ACME4.0 – Selbstadaptierende Sensorsysteme für akustische Zustandsüberwachung für Industrie 4.0-Anwendungen, BMBF, SElekt4.0, 16ES04

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in sieben Arbeitspakete plus Projektkoordination strukturiert, für die jeweils verschiedene Partner hauptverantwortlich waren.

Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse

Im AP1 wurde eine Zusammenstellung verschiedener möglicher und sinnvoller Szenarien aus dem Anwendungsbereich der Axialkolbenpumpen erarbeitet und die Anforderungen an das Gesamtsystem definiert, bestehend aus Anforderungen an die Hardware und an die Software des integrierten Gesamtsystems. Schließlich wurden geeignete Szenarien für die Evaluierung der Gesamtlösung anhand von Prüfstandmessungen an Axialkolbenpumpen festgelegt.

Arbeitspaket 2: Konzept und Systemspezifikation

Im AP2 wurde die Spezifikation des Sensors und des sich direkt anschließenden Frontends festgelegt. Es wurden zunächst Untersuchungen zu verschiedenen Hardwarekonzepten durchgeführt, eine Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen vorgenommen und schließlich ein Konzept für die Realisierung ausgewählt. Schließlich wurde die Spezifikation der Plattform festgelegt und danach ein Konzept für einen Demonstrator und die detaillierte Versuchsplanung.

Arbeitspaket 3: Extrem-Breitband-Messsystem

In AP3.a wurden die vorhandenen Piezo-Sensoren hinsichtlich der Anforderungen der Anwendung weiterentwickelt. Dabei wurden verschiedene limitierende Eigenschaften bei höheren Frequenzen verringert, die Linearitätseigenschaften des Sensors verbessert sowie die Applikationsmethodik auf das Pumpengehäuse den Erfordernissen angepasst.

CoSynth hat in AP3.b ein diskretes Messsystem – also ein Messsystem unter Nutzung von diskreten Elektronikkomponenten – aufgebaut. Es stellt die Ausgangsplattform für die Hardware dar, die später in nochmals überarbeiteter Form im integrierten Messsystem als Elektronikumgebung des ICs genutzt wird. Zudem ist die Beschaffung von Messdaten ein sehr wichtiger Teilaspekt des gesamten Projektes, die mit dem diskreten System deutlich vor dem integrierten System möglich war.

AP3.c verfolgte das Design eines integrierten adaptiven Sensor-Frontends. Dazu wurden vorhandene Intelligent-IP-Blöcke (IIP-Blöcke) weiterentwickelt und angepasst. Die Herstellung der ICs wurde über Fremdaufträgen erledigt.

Schließlich sollte in AP3.d Entwurf und Realisierung des integrierten Messsystems erfolgen. Dazu sollte die im diskret aufgebauten Messsystem vorhandene Umgebungselektronik für die Nutzung des ICs (Versorgung, Ansteuerung, Datenhandling etc.) angepasst und entsprechend realisiert werden. Durch den hohen Zeitaufwand konnte die Realisierbarkeit eines integrierten extrem-breitbandigen Sensor-Frontends nur konzeptionell nachgewiesen werden.

Arbeitspaket 4: Selbstlernende Analysealgorithmen

Das AP4 widmete sich der Akquise und Verarbeitung der am Demonstrator erhobenen Daten. Diese Schwingungsmessungen waren Teil von AP5. Die Daten wurden bzgl. der Datenformate vereinheitlicht und eine Datensanierung (z.B. Herausfiltern ungültiger und Korrigieren falscher Daten) und Auswahl von bestimmten Teilen der Zeitsignale (z.B. bestimmte Betriebszustände) durchgeführt. Es wurden die eigentlichen Analyseverfahren für die extrem-breitbandige Schwingungsanalyse zum

Zwecke des Condition Monitoring erforscht und entwickelt. Dazu wurden verschiedene Merkmale errechnet, welche zur Trennung der Pumpenfehlerklassen geeignet erscheinen. Zur Klassifikation dieser Merkmale wurden unterschiedliche Methoden des Machine Learning getestet. Die Analyseverfahren wurden anhand von Teilen der gemessenen Daten trainiert und mit anderen Teilen der gemessenen Daten geprüft. Die entwickelten Verfahren wurden für einen Einsatz im Feld vorbereitet und dementsprechend Software-technisch umgesetzt.

Arbeitspaket 5: Demonstrator

Im AP wurde ein Testaufbau für den Einsatz der verschiedenen Messsysteme an Axialkolbenpumpen an einem vorhandenen Prüfstand realisiert. Die Erhebung der Messdaten erfolgte zu Beginn unter Verwendung eines vorhandenen professionellen Kaufsystems und den vorhandenen Sensoren zur Klärung der technischen Machbarkeit der extrem-breitbandigen Messungen und zur Beschaffung von ersten Daten für die Entwicklung der Analyse-Algorithmik. Später wurde das entwickelte diskrete Messsystem in den Prüfstand eingebaut, in den Signalfloss integriert und auf Funktionalität getestet sowie zur Erhebung weiterer Messdaten genutzt. So wurden die Daten unter einsatznahen Bedingungen erhoben.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Eigene Kompetenzen

Die CoSynth GmbH & Co. KG ist ein KMU im Bereich der Entwicklung von Embedded Systems. Das Unternehmen wurde 2010 als Spin-Off des Informatik-Instituts OFFIS in Oldenburg gegründet. CoSynth bietet Entwicklungsdienstleistungen und -werkzeuge für den schnellen und kostengünstigen Entwurf von kundenspezifischen Systemlösungen für echtzeitfähige Prüf- und Steuersysteme. Der Schwerpunkt liegt dabei auf kamerabasierten Systemen mit FPGAs. Mit diesen Systemen bedient CoSynth Kunden im Bereich Industrieautomatisierung, Automobiltechnik und Medizintechnik. Ein zweiter Geschäftsbereich realisiert kompakte, integrierte, projektspezifisch adaptierte Industriesteuerungen. Diese Steuerungen sind aufgrund der auf Leistung und Kosten optimierten Umsetzung gerade für Anwendungen der dezentralen Steuerung im Kontext von IoT und Industrie 4.0 hervorragend für die neuen Aufgaben der modernen Digitalisierung von Automatisierungs- und Produktionssystemen geeignet.

CoSynth erforscht seit seiner Gründung Verfahren zur einfachen und effizienten Realisierung von Hardwarebeschleunigung für technische Systeme im Bereich Automatisierungs- und Produktionstechnik. Neben der konkreten Realisierung von FPGA-basierter Hardwarebeschleunigung im industriellen Umfeld engagiert sich CoSynth in verschiedenen Forschungsprojekten. CoSynth entwickelte im Projekt FiPS Hardwarebeschleunigungskonzepte für energieeffiziente Hochleistungsrechner. Die Konzeption eines sehr schnellen Sensors für die Charakterisierung der Rauheit von technischen Oberflächen wurde im BMBF-Projekt OptOCHar durchgeführt, hier und im Projekt SITOCH als Konsortialführer. In diesem Projekt wurden industrietaugliche Weiterentwicklungen der Weißlicht-Interferometrie erforscht. Im BMBF-Projekt Longlife wurde ein mobiles Prüfgerät für die stichprobenartige Verschleißmessung von

Produktionsmaschinen auf Basis von multisensorischen Messgrößen konzipiert.²

2011 wurde CoSynth mit dem Innovationspreis der Region Göttingen ausgezeichnet. Derzeit erzielt CoSynth einen Umsatz von rund 750.000 Euro und beschäftigt sieben Mitarbeiter im Entwicklungsbereich.

Bisheriger industrieller Einsatz von Condition Monitoring

Heutzutage übliche Condition Monitoring-Systeme nutzen Sensoren zur Messung von unterschiedlichsten physikalischen Größen. Am häufigsten kommen dabei Vibrationsmessungen zum Einsatz. Für einige Spezialfälle existieren bereits ausgereifte Systeme, die diese Verfahren anwenden.³ Für andere Einsatzfälle, bei denen die Zusammenhänge zwischen den Symptomen des Verschleißes und den Vibrationsmessungen nicht so offen zutage treten, sind entweder überhaupt keine ausgereiften Systeme verfügbar oder diese sind in der Anschaffung sehr preisintensiv oder in der Handhabung zu kompliziert.

Allgemein kommen neben Vibrationsmessungen auch andere Verfahren zur Zustandsermittlung zum Einsatz. Diese basieren auf Temperaturen, Kräften/Drehmomenten, Drücken, elektrischen Strömen, der Zählung bestimmter Partikel in Fluiden und anderem mehr. Die Beliebtheit von Vibrationsmessungen lässt sich durch ihre universelle Einsetzbarkeit erklären. Alle derzeit verfügbaren Systeme nutzen jedoch einen eingeschränkten, auf die jeweilige Applikation zugeschnittenen Frequenzbereich für die Überwachung von Maschinen. Eine massiv breitbandige Überwachung war kommerziell nicht verfügbar. Die Gründe dafür sind sicherlich in der Tatsache zu suchen, dass entsprechend geeignete Sensorik entweder gar nicht zu Verfügung steht oder nur in einem Preissegment, welches eine Anwendung für die Überwachung von üblichen Maschinenkomponenten als nicht sinnvoll erscheinen lässt, weil es wegen Unwirtschaftlichkeit am Markt nicht durchsetzbar ist.

Die Überwachung von rotierenden Maschinen wird in der wissenschaftlichen Literatur häufig aufgegriffen.⁴ Weitere interessante Ansätze, die eventuell auch für Hydraulikkomponenten hilfreich sein könnte liefert die Anwendung von Convolutional Neural Networks (CNNs) zur Ermittlung der verbleibenden Lebenszeit (Remaining Useful Lifetime) einer Komponente.⁵

Neuerdings werden akustische Zustandsüberwachungssysteme mittels Auswertung von Luftschallschwingungen untersucht. Diese konnten sich jedoch bisher nicht durchsetzen. Hier ist das Problem der Herausfilterung von Störgeräuschen, die in sehr unterschiedlichen Frequenzen und Intensitäten auftreten können, noch zu lösen.

² FiPS, FP7, GA 609757

OptOCHar, BMBF, KMU innovativ, 13N13533

SITOH, BMBF, KMU innovativ, 13N14694

LongLife, BMBF, ReziProK, FKZ033R246D

³ Z.B. www.iba-ag.com, www.bosch-connected-industry.com, www.schaeffler.de

⁴ Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D (2014) Prognostics and health management design for rotary machinery systems - reviews. Method Appl Mech Syst Signal Process 42(1):314-334

⁵ Chen Z, Li C, Sanchez R-V (2015) Gearbox fault identification and classification with convolutional neural networks. Shock Vib 2015:1-10.

Li X, Ding Q, Sun J-Q (2018) Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. Reliab Eng Syst Saf 172:1-11.

Sateesh Babu G., Zhao P., Li XL. (2016) Deep Convolutional Neural Network Based Regression Approach for Estimation of Remaining Useful Life. In: Navathe S., Wu W., Shekhar S., Du X., Wang X., Xiong H. (eds) Database Systems for Advanced Applications 2016. LNCS, vol 9642. Springer, Cham.

Die akustische Zustandsüberwachung basiert auf der Schallemissionsprüfung (Acoustic Emission, AE). Dieses nutzt die Detektion von hochfrequentem Körperschall, der in Antrieben bspw. durch die Reibung von (verschlissenen) Oberflächen von Wälzlagern verursacht wird.⁶ Im Allgemeinen werden dazu resonante Piezosensoren eingesetzt, die nur in einem begrenzten Frequenzband eine gute Empfindlichkeit aufweisen. Unter Nutzung dieser Frequenzbänder werden AE-Verfahren gelegentlich alternativ zur Schwingungsanalyse erprobt.⁷ Allerdings wird meist sehr leistungsfähige, aber auch aufwändige und teure Hardware eingesetzt, welche für die permanente Installation in einem industriellen Umfeld nicht wirtschaftlich wäre oder eingeschränkte Genauigkeit bei der Datenerfassung aufweist.⁸

Integrierte Auswertelektronik

Es ist eine Reihe von Sensoren und Sensor-Frontends verfügbar, die in abgegrenzten Bereichen performant sind. Derzeit verfügbare Systemkomponenten, wie z.B. Analog-Digital-Wandler in typischen Sensor-Frontends, sind in ihren technischen Parameter jedoch nur eingeschränkt anpassbar. Das Anpassen der Funktionalität gar im laufenden Betrieb ist entweder überhaupt nicht oder nur mit großem Aufwand realisierbar.

Eine umfassende State-of-the-Art-Analyse zu Analog-Digital-Wandlern findet sich in.⁹ Daneben gibt es zahlreiche Publikationen, welche sich mit der Entwicklung von konfigurierbaren Analog-Digital-Wandlern beschäftigen.¹⁰ Die resultierenden Schaltungen sind aber nicht annähernd so breitbandig, wie sie im hier beantragten Projekt benötigt werden.

Ein starres, jedoch auf die Parameter des breitbandigen Sensors angepasstes System würde im typischen Anwendungsfall zunächst einmal mehr Leistung verbrauchen als nötig. Weiterhin sind Probleme bei der erreichbaren Genauigkeit zu erwarten. Systeme, die speziell auf das Einsatzgebiet hin optimiert sind, bieten für diese Komponenten nur geringe bis keine Flexibilität. Das Einholen weiterführender Systeminformation benötigt automatisch zusätzlichen Entwurfs- und Hardwareaufwand. Ein adaptives Sensor-Frontend kann die benötigte Flexibilität bereitstellen, um Systemparameter in Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalles dynamisch zu verändern und das System damit in einem Optimum zu betreiben. Eine integrierte Lösung der Auswertelektronik, konfigurierbar für die im Projekt relevante Breitbandigkeit, wird energieeffizienter arbeiten als verfügbare starre Lösungen.

Sensorik mit Breitband-Eigenschaften

Die Messung von Schwingungen hat sich bei Zustandsüberwachungssystemen weit

⁶ L. M. Rogers (2001): Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications. Hg. v. Lloyd's Register of Shipping.

⁷ Elasha, Faris; Greaves, Matthew; Mba, David; Fang, Duan (2017): A comparative study of the effectiveness of vibration and acoustic emission in diagnosing a defective bearing in a planetary gearbox. In: Applied Acoustics 115, S. 181–195

⁸ Ledeczki, A.; Hay, T.; Volgyesi, P.; Hay, D. R.; Nadas, A.; Jayaraman, S. (2009): Wireless Acoustic Emission Sensor Network for Structural Monitoring. In: IEEE Sensors J. 9 (11), S. 1370–1377

⁹ Murmann, B. (2019): ADC Performance Survey 1997-2019. web.stanford.edu/~murmman/adcsurvey.html

¹⁰ Carlton, B. R. et al. (2011): A 32nm, 1.05V, BIST enabled, 10–40MHz, 11-9 bit, 0.13mm² digitized integrator MASH $\Delta\Sigma$ ADC. IEEE Symposium on VLSI Circuits - Digest of Technical Papers, 36-37.
Danesh S, Hurwitz J, Findlater K, Renshaw D, Henderson R (2011): A reconfigurable 1GSps to 250MSps, 7-bit to 9-bit highly time-interleaved counter ADC in 0.13 μ m CMOS. IEEE Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers.

verbreitet.¹¹ Dabei werden je nach Frequenzbereich verschiedenartige Sensoren eingesetzt.¹² Piezobasierte Beschleunigungssensoren sind bewährt und besitzen oft eine hohe Präzision, erreichen aber selten höhere Frequenzen. Beschleunigungssensoren auf Basis von MEMS sind preisgünstig, können jedoch auch keine höheren Frequenzen erfassen. Zur Überwachung eines breiten Frequenzbereichs von niederfrequenten Schwingungen bis hin zu hochfrequentem Körperschall (AE) wird auch die Datenfusion genutzt.¹³ Dieses Verfahren benötigt immer mehrere Sensoren und verursacht entsprechend höheren gerätetechnischen Aufwand. Als sehr leistungsfähig haben sich faseroptische Sensoren erwiesen. Diese können für einen breiten Frequenzbereich eingesetzt werden.¹⁴ Allerdings ist diese Art Sensorik sehr aufwändig und daher oft nicht wirtschaftlich.

Neuerdings sind einige Sensoren verfügbar, die ansatzweise eine Breitbandmessung mit einer für Condition Monitoring-Zwecke notwendigen Genauigkeit vereinen. Solche u.a. von INVENT hergestellten Sensoren basieren auf Piezokeramiken. Zur Auswertung der Messungen werden allerdings bisher mittel- bis hochpreisige Elektroniksysteme verwendet, die für einen Einsatz im Bereich der Überwachung von Automatisierungskomponenten aus Kostengründen nicht in Frage kommen. Alternativen erreichen keine ausreichende Breitbandigkeit.¹⁵

Piezokeramiken finden in vielen Bereichen der Technik Anwendung. Durch die übliche Integration in stabile, relativ große Gehäuse werden die entscheidenden Vorteile der Piezokeramiken wie ihr geringer Bauraumbedarf wieder aufgehoben. Eine neuartige Bauweise, sogenannte Piezopatches¹⁶, umgeht diese Nachteile. Zur Herstellung von Piezopatches werden dünne piezokeramische Platten in eine duroplastische Hülle eingebettet. Aufgrund ihrer sehr flachen Bauweise von einigen Zehntelmillimetern lassen sich diese Piezokomponenten in und auf bestehenden Maschinenbau-Komponenten durch Verklebung mit Strukturklebstoffen applizieren. Typische Anwendungsfälle für diese Piezopatches sind hochdynamische Sensoren, adaptronische Anwendungen und die Form- oder Vibrationskontrolle.

Breitbandige Piezokeramiken nutzen oftmals den sogenannten 3-1-Effekt und haben sich wegen guter piezoelektrischer Eigenschaften und der hohen Bandbreite bewährt. Nachteilig wirkt sich allerdings das schlechtere Signal-Rausch-Verhältnis aus. Durch

¹¹ Kande, Mallikarjun; Isaksson, Alf; Thottappillil, Rajeev; Taylor, Nathaniel (2017): Rotating Electrical Machine Condition Monitoring Automation—A Review. In: *Machines* 5 (4), S. 24. DOI: 10.3390/machines5040024.

¹² Goyal, D.; Pabla, B. S. (2016): The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 23 (4), S. 585–594. DOI: 10.1007/s11831-015-9145-0.

¹³ Duan, Zhihe; Wu, Tonghai; Guo, Shuaiwei; Shao, Tao; Malekian, Reza; Li, Zhixiong (2018): Development and trend of condition monitoring and fault diagnosis of multi-sensors information fusion for rolling bearings: a review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (1), S. 803–819. DOI: 10.1007/s00170-017-1474-8.

¹⁴ Innes, Matthew; Davis, Claire; Rosalie, Cedric; Norman, Patrick; Rajic, Nik (2017): Acoustic Emission Detection and Characterisation Using Networked FBG Sensors. In: *Procedia Engineering* 188, S. 440–447. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.506.

García, Yoany Rodríguez; Corres, Jesús M.; Goicoechea, Javier (2010): Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors. In: *Journal of Sensors* 2010 (4), S. 1–12. DOI: 10.1155/2010/936487.

¹⁵ Brunner, Andreas J., et al. (2004): Composites from piezoelectric fibers as sensors and emitters for acoustic applications. *Journal of Acoustic Emission* 22:127-137.

¹⁶ Wierach, Peter (2003): Entwicklung Multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik. In: *Proc. Adaptronic Congress* 2003.

andere Wandler (z.B. Scherwellenwandler) können hier Verbesserungen erzielt werden. Für den geplanten Anwendungsfall müssen allerdings nicht nur die Polymerhülle des Moduls, sondern auch die gewählte Keramik und deren elektromechanische Eigenschaften an den Anwendungsfall angepasst werden. Weiterhin ist auch eine Anpassung der geometrischen Bauform der Sensormodule erforderlich, da diese direkten Einfluss auf die Charakteristik des Systems hat. Die Einflussfaktoren für das dynamische Verhalten (und damit die Breitbandfähigkeit) der Module sind im Prinzip bekannt, jedoch in ihrem Zusammenwirken und insbesondere in ihrer Auswirkung auf den hier verfolgten Anwendungsfall noch unerforscht.

KI-Methoden

Die Methoden der künstlichen Intelligenz lassen in nicht-neuronale und neuronale Methoden unterscheiden. Zu der erstgenannten gehören die seit langem bekannten Klassifikationsmethoden wie z.B. die Support Vector Machine, der k-NN-Algorithmus und viele andere mehr. Die neuronalen Methoden bedienen sich der Neuronalen Netze in einer der vielen erforschten Ausprägungen.

Nicht-neuronale Methoden werden zur Zustandsüberwachung seit langer Zeit erfolgreich eingesetzt.¹⁷ Oftmals wird die Support Vector Machine als Mittel der Wahl angesehen. Die zur Klassifikation verwendeten Merkmale sind allerdings stark abhängig von der jeweils untersuchten Maschine oder Anlage. Für Axialkolbenpumpen existierten keine relevanten Publikationen.

Im Zeitalter von KI mit den Bereichen Neuronale Netze und Deep Learning-Methoden ist die Zustandsüberwachung durch neuronale Methoden ebenfalls eine Möglichkeit. Die Zahl der Veröffentlichungen dazu ist unüberschaubar. Es werden Kombinationen von Zustandsmustern und grundlegenden Fehlermustern mittels unterschiedlicher statistischer Kenngrößen aus dem Zeit- und Frequenzbereich unter Verwendung von Convolutional Neural Networks (CNNs) untersucht. Auch werden Deep CNNs zur Vorhersage der verbleibenden Lebenszeit eingesetzt, auch rekurrente NNs werden mit dem gleichen Zweck untersucht.¹⁸ Ebenfalls von Interesse können Probabilistische neuronale Netze (Mixed Density Networks) sein.¹⁹ Alle Ansätze haben jedoch den Nachteil, dass große Mengen an Lerndatensätzen zur Verfügung stehen müssen, um eine korrekte Funktion garantieren zu können. Ansätze zur Beherrschung der Problematik der nicht in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehenden Datensätze

¹⁷ Meng S, Jinquan W, Ye X, Kefeng H, Haichao L, Puyu W (2019): Condition Monitoring of PWM Converter Based on Multiple Support Vector Machine Algorithm. IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China, June 2019.

Abu-Rub OH, Khan Q, Refaat SS (2019): Multi-level Defects Classification of Partial Discharge Activity in Electric Power Cables using Machine learning. Int'l Conf. Artificial Intelligence, Las Vegas, NV, US.

Ahmed H (2019): Intelligent methods for condition monitoring of rolling bearings using vibration data. Doctoral thesis, Brunel University London, UK.

Ebrahimi, E (2019): A Method Based on Support Vector Machine and Vibration Analysis for Fault Detection in Bevel Gears (Case Study: Differential). Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 61(5):279-286

¹⁸ Heimes, F.O.: Recurrent neural networks for remaining useful life estimation. In: International Conference on Prognostics and Health Management, PHM 2008, pp. 1-6, October 2008.

Nguyen, K.T.P. & Medjaher, K.: A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics. Reliability Engineering & System Safety 188, 251–262; 10.1016/j.ress.2019.03.018 (2019).

¹⁹ Bishop, C. M. Mixture Density Networks. Aston University, 1994

existieren kaum und ohne Bezug zu hydraulischen Komponenten.²⁰

Überwachung von Axialkolbenpumpen

Seit geraumer Zeit werden bei Bosch Rexroth Untersuchungen angestellt, um funktionstüchtige, gut bedienbare und bezahlbare Zustandsüberwachungssysteme für Axialkolbenpumpen zu realisieren. Bei einigen dieser Projekte waren auch weitere Projektpartner beteiligt. Dabei wurden zunächst modellbasierte Herangehensweisen erforscht. Hier konnten auf bestimmten Teilgebieten – d.h. bei der Erkennung bestimmter Verschleißphänomene – Erfolge erzielt werden. Aus der Literatur waren keine wesentlich weiter entwickelten Ansätze oder Systeme bekannt. Eine Überwachung mittels verschiedener Statistikgrößen und üblicher Klassifikationsalgorithmen und Kaufsensorik, die Körperschall-Signale im Bereich im Hörschalls aufnimmt und bereitstellt, wurde zuvor untersucht, ebenso eine Zustandsüberwachung mittels Luftschall im hörbaren Bereich. Hier konnten einige kleine Verbesserungen erzielt werden, jedoch ist eine umfassende Verschleißermittlung immer noch ungelöst.

Patentlage

Schutzrechte oder Anmeldungen, die das bekannte, klassische CM schützen, existieren sowohl national als auch international. Dem Konsortium bekannt und für das Projekt relevant sind folgende: DE102011118962A1: Robert Bosch GmbH, Diagnosemodul; DE102013211345A1: Robert Bosch GmbH, Verfahren zur Zustandsüberwachung an Verdrängereinheiten; DE102012001793A1: Robert Bosch GmbH, Diagnose- und Prognoseverfahren für eine hydrostatische Verdrängereinheit; US2019064034A1: Vibrational alarms facilitated by determination of motor on-off state in variable-duty multi-motor machines.

Durch die Umsetzung der Piezoaktuatoren wird das Patent DE10051784C1 „Elektromechanisches Funktionsmodul“ tangiert. Das Patent wird von PI Ceramic GmbH lizenziert, über einen Kooperationsvertrag hat INVENT exklusive Fertigungsrechte und uneingeschränkte Rechte zur Durchführung von FuE-Aktivitäten.

Die in dem Projekt angestrebte Condition Monitoring-Lösung ist aber hinsichtlich der Breitbandbetrachtung und der integrierten Lösung technisch neuartig und somit von den bestehenden Patenten nicht gefährdet. Darüber hinaus werden nach dem derzeitigen Kenntnisstand keine weiteren Schutzrechte der Partner oder Dritter berührt, die eine kommerzielle Verwertung der Projektergebnisse einschränken.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Nicht durchgeführt.

²⁰ Kerman López de Calle, Susana Ferreiro, Aitor Arnaiz, Basilio Sierra (2019): Dynamic condition monitoring method based on dimensionality reduction techniques for data-limited industrial environments. *Comp Ind*, 112:103114.

Salamon, J. & Bello, J. P. Deep Convolutional Neural Networks and Data Augmentation for Environmental Sound Classification. *IEEE Signal Process. Lett.* 24, 279–283; 10.1109/LSP.2017.2657381 (2017).

5. Erzielte Ergebnisse

Spezifikation des Sensorsystems

Für die initiale Projektphase sollten die Anforderungen und passend dazu die relevanten Komponenten des Sensorsystems charakterisiert und spezifiziert werden. Für CoSynth standen dabei im Wesentlichen die Prozessorwahl und die zusätzliche Peripherie des Systems, hier primär die Kommunikationsschnittstellen für die Weitergabe der Messdaten und möglicher Auswertungsergebnisse im Vordergrund. Alle Komponenten sind dabei jedoch abhängig von den weiteren Komponenten des Gesamtsystems, hierbei wesentlich die Piezosensorik und die Auswertealgorithmen. Für letztere stand bereits früh fest, dass eine genaue Festlegung auf Algorithmen erst im späteren Projektverlauf erfolgt. Daher muss das System so flexibel ausgelegt werden, dass entweder genug Rechenkapazität von Anfang an zur Verfügung steht, oder in einer späteren Iteration der Demonstratorentwicklung Prozessor oder Mikrocontroller ohne großen Aufwand gegen eine performantere Version getauscht werden kann. Für die Piezosensorik wurde festgelegt, dass Messungen an den Pumpen initial mit einem dezidierten Messrekorder erfolgen und die so gewonnenen Daten für eine genauere Charakterisierung und Anforderungsanalyse für die Schnittstelle zwischen Sensor und Prozessor darauf aufbaut.

Aufgrund der Corona-bedingten Verschiebungen der Messkampagne verzögerten sich die erforderlichen Daten und die konkrete Auswahl der Piezosensoren. Daher wurden neben den Messungen an den Hydraulikpumpen noch weitere Labormessungen der Piezosensoren durchgeführt, um belastbare Zahlen vor allem der elektrischen Eigenschaften und der Messgrößen zu bekommen. CoSynth hat eine dieser Messaufgaben übernommen, um praktische Erfahrung mit den Sensoren zu gewinnen und gezielt die für die Entwicklung erforderlichen Kennzahlen zu untersuchen. Da auch die Auslieferung der auf große Kohlefaserplatten applizierten Sensoren sich Corona-bedingt verzögerte, haben sich die Messungen zeitlich sehr verschoben und die Spezifikation musste auch bezüglich dieser Schnittstelle vage bleiben.

Für die Spezifikation blieb somit eine sehr grobe Einordnung des zu entwickelnden Sensorsystems. Da es mehrere Iterationen der Demonstratorhardware gab, konnten die jeweiligen Konkretisierungen in die weiteren Entwicklungsstufen einfließen und der finale Demonstrator so in allen Belangen den Anforderungen sowohl der technischen Schnittstellen als auch der Anwendersicht entsprechen.

Anfangs festgelegt wurde ein Prozessor oder Mikrocontroller als zentrale Recheneinheit, die sowohl für die Messwertaufnahme von den Piezosensoren als auch für eine mögliche Aufbereitung oder Analyse der Daten zuständig ist. Zudem muss die Recheneinheit auch die Kommunikation mit der nachgelagerten Ebene übernehmen und Messwerte oder Analyseergebnisse an einen Datenspeicher oder einen zentralen Prozessrechner weitersenden. Für das erste Messsystem ist Flexibilität und ausreichend Rechenkraft wichtiger als der Preis, der im späteren Verlauf sicherlich ein wichtiger Faktor wird. Aufgrund der Messfrequenzen von bis zu 1MHz und entsprechend hohen Samplingfrequenzen von mehreren MHz wurde ein ausreichend schneller Prozessor benötigt, der die Daten dann auch noch in Echtzeit, also einer am besten höheren Frequenz, weiterverarbeiten kann. Hier boten sich komplexe Mikrocontroller oder günstige Embedded Prozessoren der Klassen ARM M4 bzw. ARM Cortex an, letztlich fiel die Wahl auf die kleinere Controllervariante der M4-Klasse.

Ein weiterer Vorteil der genannten SoCs ist die in der Regel gute Ausstattung mit Kommunikationsschnittstellen. Somit ist für die Weitervermittlung der Daten und

Ergebnisse bereits Sorge getragen, egal ob letztlich CAN, RS-232, RS-485, USB oder Ethernet genutzt wird. Eigentlich alle größeren Systeme der genannten Klassen haben diese und noch weitere Schnittstellen direkt integriert oder lassen sich günstig um solche Schnittstellen erweitern.

Obwohl die Controller auch Analogeingänge mit zum Teil relativ hohen Samplingraten bieten, wird ein externer Analog-Digitalwandler (ADC) geplant. Dies ermöglicht zum einen den flexiblen Aufbau des Analogfrontends mit Filtern und Verstärkern. Zum zweiten wird so auch der Systemaufbau für die Integration des im Projekt entwickelten ADC-IC vorbereitet. Ein Neudesign mit dem neuen ADC ist so einfach möglich, da auch hier mit einem externen Chip kommuniziert werden muss.

Zusätzliche Komponenten waren für das erste Design nicht erforderlich. Der erste Demonstrator sollte nach Abschluss der ersten Labormessungen aus fertig am Markt erhältlichen Komponenten bzw. Evalboards entwickelt werden, die weitere Peripherie so genutzt, wie auf den entsprechenden Boards verbaut.

Die begonnene Spezifikation konnte mit den durch die Vorabmessungen gewonnenen Daten vervollständigt und weiter ausformuliert werden. Auf Basis der Spezifikation wurde dann das Hardwaredesign entwickelt und die konkreten Komponenten ausgewählt.

Die Aufteilung der zwei ADC-Kanäle wurde auf 50kHz festgelegt. Ab diesem Wert wird der Kanal für die niedrigen Frequenzen nach oben und der für hohe Frequenzen nach unten gedämpft, so dass keine Störungen auf den jeweils anderen Kanal wirken. Somit war auch die Samplingfrequenz auf 100kSamples/s festgelegt, im späteren Verlauf wurde diese auf 125kSamples/s erhöht. Für die Abtastung des zweiten Kanals wurde eine Samplingfrequenz von 2MSamples/s festgelegt, die aufgrund vom Zusammenspiel von Mikrocontroller und Hardware allerdings auf 1,875MSps/s reduziert werden musste, um auf der verfügbaren Hardware ein stabiles Clocksignal erzeugen zu können.

Beim Mikrocontroller reduzierten sich die Optionen auch, da zum Zeitpunkt des Designs viele Typen gar nicht käuflich erhältlich waren. Die Lieferkrise in der Mikroelektronik betraf auch andere Bauteile wie Spannungsregler und die ADCs, traf aber vor allem beim Mikrocontroller die Pläne stark, da hier eine grundsätzlich schon eingeschränktere Auswahl nutzbar war, um die Implementierung durch CoSynth und die vorhandenen (Software-)Werkzeuge zu gewährleisten.

Bezüglich der weiteren Schnittstellen ergaben sich kaum Änderungen. Die SD-Karte wird für die ersten Testmessungen genutzt, ist allerdings deutlich zu langsam, um die vollständigen Messwerte aufzuzeichnen. Daher können immer nur wenige Millisekunden aufgezeichnet werden, mit anschließenden Pausen von etlichen Sekunden zur Speicherung der Daten. Hierdurch konnte zwar bereits früh ein erster Test am Prüfstand durchgeführt werden, als die übrigen Schnittstellen noch nicht einsatzbereit waren, auf Dauer war dies aber keine gangbare Lösung.

Die Netzwerkschnittstelle war als wesentliche Übertragungsmöglichkeit vorgesehen und funktionierte auch deutlich besser. Selbst mit dem Mikrocontroller hatten Tests an einem Evaluationsboard ergeben, dass eine ausreichende Bandbreite erreichbar sein sollte. Allerdings hatte sich die Implementierung etwas länger als erwartet hingezogen, da die Synchronisation von analoger Aufnahme und gleichzeitiger Netzwerkübertragung einige zusätzliche Herausforderungen stellte, so dass sich die weiteren Messungen leicht verzögerten. Die USB-Schnittstelle wurde im Projekt nur für die Stromversorgung genutzt, da Aufwand und Nutzen in einem ungünstigen Verhältnis

stehen und wichtigere Punkte Vorrang hatten.

Labor- und Feldmessungen mit Piezosensorik

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden diverse Labormessungen zur Untersuchung und Charakterisierung der Piezosensorik und der produzierten bzw. neu konfigurierten Boards gemacht. Ziel war eine spezifischere Adaption der Hardware an die erforderlichen Szenarien sowie eine Validierung der Hardware bzw. der Messdaten in einer geschützten Umgebung. Die gefundenen Eigenschaften und Fehler flossen direkt in neue Anforderungen bzw. neue Hardwarekonfigurationen ein.

Die ersten durchgeführten Messungen mit der reinen Piezosensorik an den Hydraulikpumpen haben einige Kennzahlen der Piezosensoren geliefert, waren aber nicht ausreichend für eine detaillierte Anforderungsanalyse und Spezifikation des Analogfrontends und der elektrischen Schnittstelle zwischen Sensor und Controller. Daher wurde im Anschluss an die Auswertung der Messdaten eine weitere Messrunde im Labor durchgeführt. Hierzu hat CoSynth mit verschiedenen Piezosensoren experimentiert. Um genaue Charakterisierungen der vom Sensor gelieferten Signale zu erhalten, wurden Messungen von künstlichen Signalen, also speziell erzeugte Vibrationen und Schwingungen, genutzt. CoSynth hatte bereits früher Messungen mit Piezosensoren durchgeführt, die selbst mittels Piezoaktoren angeregt wurden und so eine detaillierte Signalanalyse ermöglichten.

Es wurden insgesamt vier typische Piezosensoren ausgewählt und durch Projektpartner Invent auf Kohlefaserplatten appliziert. Die Sensoren wurden mit Piezoaktoren angeregt – letztlich selbst auch Piezosensoren, die allerdings mit einem Strom aktiv getrieben werden und gegensätzlich zum Sensor nicht Schwingungen in Strom sondern Strom in Schwingungen umsetzen. Diese regen wiederum die Platte an, die die Schwingungen zu den Sensoren überträgt. Mit einem Signalgenerator werden unterschiedliche Frequenzen und Signalmuster auf den anregenden Piezo gegeben und die so erzeugte Vibration an dem anderen Piezo gemessen. Die verzögerte Produktion der Messplatten führte zu einer Verschiebung der Messungen auf das frühe erste Quartal 2021.

Die wesentlichen Kenngrößen zur Ermittlung bei den Voruntersuchungen waren die Stärke der Signalantwort (Amplitude in Volt) bei unterschiedlichen Frequenzen und damit auch die zu erwartende Dämpfung des Signals vor allem im hochfrequenten Bereich. Hintergrund ist die Auslegung der Verstärkerschaltung auf der Platine als Teil des Analogfrontends auf dem Sensorboard. Weiterhin sollte untersucht werden, ob besondere Vorkehrungen bei den Messungen erforderlich sind und wo genau der Trennbereich zwischen Nieder- und Hochfrequenzbereich liegen soll.

Da das Signal der Piezos um einige Größenordnungen über dem des im Vorgängerprojekt ACME gemessenen liegt, konnte die FPGA-basierte Hardware aus dem Projekt nicht für die Vormessungen genutzt werden. Stattdessen wurden für die Signalaufnahme vorhandene Oszilloskope genutzt. Diese wurden direkt an die Signalleitungen des messenden Piezo angeschlossen.

Als wichtigstes Ergebnis konnte festgehalten werden, dass bereits bei den schwachen Anregungen durch einen zweiten Piezo das Antwortsignal am messenden Piezo recht stark ist und die Verstärkung nicht sehr groß ausfallen muss. Im hochfrequenten Bereich war die Dämpfung erwartet stärker. Mit Messungen an einzelnen Frequenzen im gesamten Messspektrum konnten erste Tendenzen aufgezeigt werden, die sich so

später auch bei weiteren Messungen und Simulationen bestätigten. Die exakte Charakterisierung der Signalantwort und der Impedanz der Piezos erfolgte später.

Eine wichtige Erkenntnis während der ersten Messungen, insbesondere für die weiteren Tests und Messwerte, war die extrem starke Variabilität der Amplituden der Piezos je nach Frequenz. Diese Resonanzen führen dazu, dass selbst bei geringsten



Abbildung 1 Messung am Oszilloskop

Frequenzänderungen die Amplituden teils sehr stark variieren. Im gezeigten Beispiel sind zwei Messungen mit 74kHz und 75kHz zu sehen, wobei das Anfangssignal (unten) gleich stark bleibt, die Messung am empfangenden Sensor allerdings extrem einbricht. Diese Änderungen können in beide Richtungen ausschlagen und erschweren eine eindeutige Festlegung der Dämpfung, die daher primär gemittelt untersucht wurde.

Ein bereits während der ersten Testmessungen am Pumpenteststand gefundenes Problem einer sehr starken langwelligen Schwebung auf dem Messsignal konnte auch bei den Labormessungen nachgewiesen werden. Um diese Störung im späteren Hardwaredesign zu vermeiden, wurde ein Filter für sehr niedrige Frequenzen vorgesehen sowie eine optimierte Signalaufnahme am Analogeingang des Messboards. Vermutet wurde, dass die deutlich niedrigere Eingangsimpedanz am Messboard einen positiven Einfluss hat, da die Impedanz der Piezos bei niedrigen

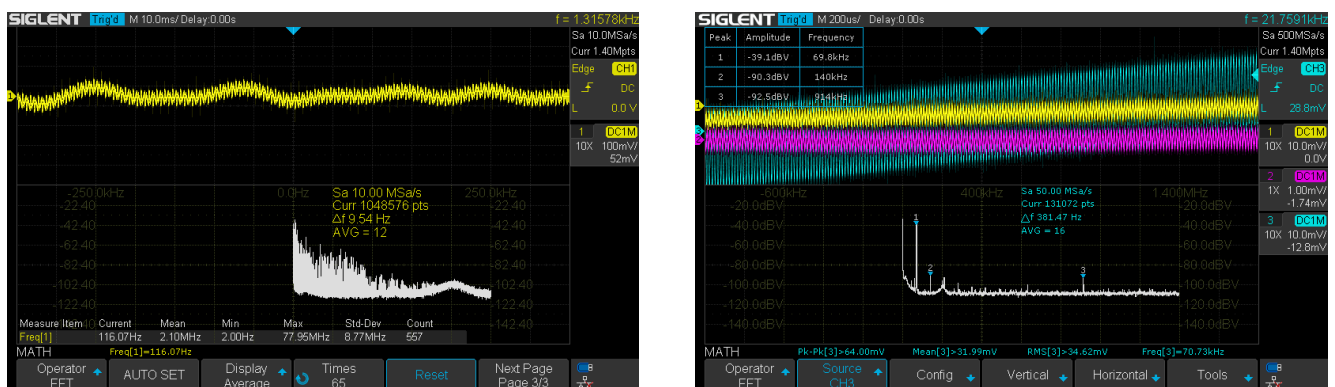


Abbildung 2 Unterschiedliche Schwebungen

Frequenzen exponentiell ansteigt und so die hochohmigen Eingänge der eingesetzten Messgeräte hier die Störungen erzeugten bzw. verstärkten. Letztlich war die Schwebung bei späteren Messungen, insbesondere mit der produzierten eigenen Messhardware, nicht mehr messbar. Allerdings wurde im späteren Verlauf eine ähnliche Störung wieder gefunden und durch weitere Maßnahmen dauerhaft gefiltert.

Die beiden Grafiken in Abb. 2 zeigen beispielhaft einige der sehr langsamen, aber z.T.

auch sehr starken Schwebungen, die bei nahezu allen Messungen in den ersten Monaten auftraten. Erst mit Nutzung der neueren Messgeräte und der eigenen Hardware waren diese Störungen verschwunden.

Die ersten Messungen mit der neuen Hardware waren die Messungen am Pumpenprüfstand. Da die Software erst kurz vorher fertig geworden ist, konnten nur

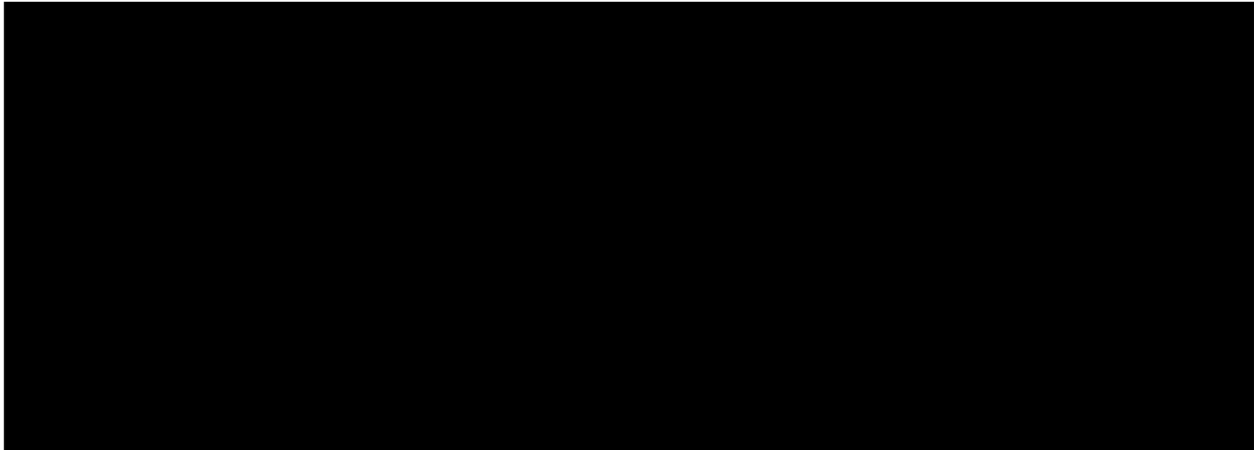


Abbildung 3 Gesamte erste Messung bei REX, einzelne Messabschnitte zusammengefügt, links langsamer ADC, rechts schneller ADC

einige schnelle Tests zur Vorabprüfung der Hardware durchgeführt werden. Hier zeigten sich keine Auffälligkeiten, so dass die neue Hardware auch für die abschließenden Messungen am Prüfstand genutzt wurde. Hier wurden die vollständigen Fahrprofile über mehrere jeweils rund 40 Minuten dauernde Tests vermessen. Da die Aufzeichnung nur auf SD-Karte erfolgte, bestehen die Daten immer nur aus kurzen Abschnitten der eigentlichen Messung und längeren Pausen, während denen keine Daten aufgenommen, sondern nur aus dem Speicher auf die SD-Karte geschrieben wurden. Diese Tests stellen daher keine weiter analysierbaren Daten dar, zeigen aber deutlich die unterschiedlichen Fahrprofile und können durch Vergleich mit den über die kommerzielle Messhardware aufgenommenen Daten auf Plausibilität getestet und für die weitere Adaption der Messhardware auf die speziellen Anforderungen auf dem Prüfstand genutzt werden. Die hier gezeigten Daten stellen jeweils prägnante Abschnitte aus den Messfahrten dar und hängen nicht miteinander zusammen.

Alle größeren Testreihen für eine eindeutige Charakterisierung der Piezos auf Basis der eigenen Hardware wurden dann erst nach Fertigstellung der Netzwerkübertragung der neuen Boards durchgeführt. Diese Messungen wurden auf neu erstellten Testboards aus Alu mit applizierten Piezos sowohl angeregt als auch gemessen. Der Testaufbau nutzte dazu einen Signalgenerator, der einzelne Schwingungen oder Sweeps durch einen Frequenzbereich erzeugte. Diese Signale wurden durch einen der auf dem Boards befindlichen Piezos auf die Grundplatte übertragen. Da sich aus den theoretischen Charakterisierungen die kleineren Piezos als Zielarchitektur ergeben hatten, wurden die großen Piezos primär als Aktoren genutzt. Dies hatte zudem den Vorteil, dass die Signale in der Regel stärker waren, als bei den flächenmäßig kleinen Piezos, die eine grundsätzlich kleinere Signalstärke erzeugen. Da die Übertragung über den Plattenboden zusätzlich stark dämpft, erfolgte die Messung über alle Versuche auf einem sehr niedrigen Signallevel. Auf Basis dieser Daten erfolgte schließlich die Auslegung der Boards für die erste vollwertige Messreihe am Prüfstand.

Zur Vollständigen Charakterisierung der Boards gehörte auch eine Rauschmessung, die das Hintergrundrauschen durch die elektronischen Komponenten und

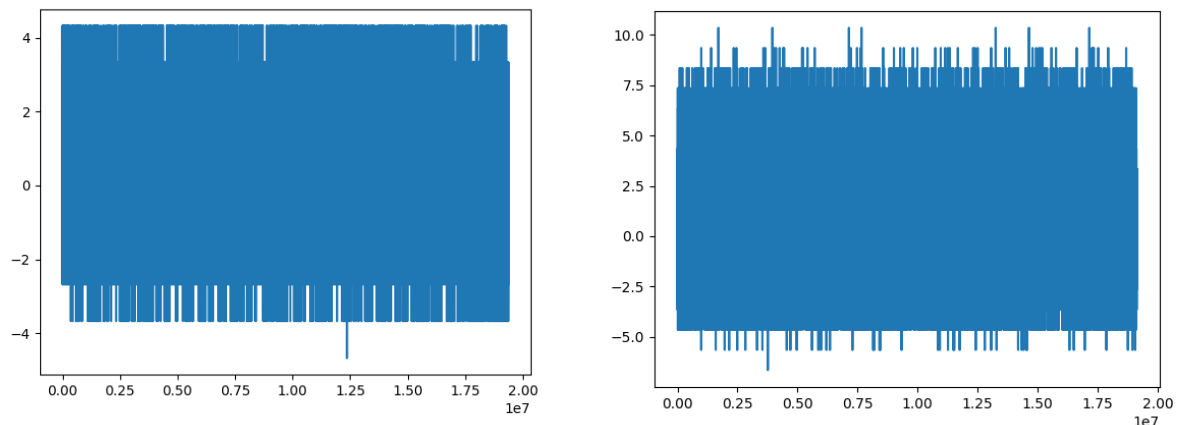


Abbildung 4 Rauschmessungen mit offenem und geschlossenem Sensoranschluss

eingefangene Störungen aus der Umgebung zeigt. Exemplarisch geben die beiden Bilder diese Ergebnisse wieder. Das Rauschlevel ohne angeschlossenen Piezo liegt bei ± 4 ADC-Werten, also 0,2 % (bei Maximalwerten von ± 2048) bzw. 3Bit, was den Erwartungen entspricht. Mit angeschlossenem Piezo, allerdings ohne Anregung – und auch ohne Kontakt zur Messplatte, der Piezo lag offen im Raum – war die Amplitude bei ca. 12 ADC-Werten mit einigen Spitzen darüber. Dieser Wert ist nicht direkt mit der Qualität der Boardelektronik in Verbindung zu setzen, sondern entspricht primär den Hintergrundstörungen, die vom Piezo aufgefangen werden. Gerade die niederfrequenten Geräusche aus der Umgebung können bereits über die Luft übertragen sehr starke Ausschläge bewirken. Dennoch sollte dieser Wert, mit Sicherheitsmarge ca. ± 8 , als Grenze für die Auswertbarkeit der Signale genommen werden, sofern nicht spezielle Schutzmaßnahmen gegen Umgebungsschwingungen ergriffen werden.

Die weiteren Messungen befassten sich mit unterschiedlichen Frequenzanregungen und Auswertung der Signalstärke und Separierbarkeit der Frequenz. Die Messungen nutzen feste Frequenzmuster, die nacheinander abgefahren und jeweils für 1 Sekunde gemessen werden. Das Signal wurde aufgezeichnet und per FFT auf die jeweils gemessene Frequenz untersucht. Da der Aktor mit einer Sinuswelle arbeitete, gab die FFT immer eine eindeutige Frequenz aus, die mit der voreingestellten am Signalgenerator verglichen wurde. Dies entsprach im Wesentlichen dem Versuchsaufbau zur Sensorcharakterisierung, nun aber strukturiert gemessen mit Testboard, festgelegten Frequenzen und einer permanenten Aufzeichnung der Werte. Insgesamt sind so hunderte Messungen erfolgt, die insbesondere die Eigenschaften der Filterung aufzeigen sollte. Eine wesentliche Validierungsgröße war die am Eingang des Sensorboards, also zwischen Piezo und Board anliegende Spannung. Diese sollte mit den Simulationen verglichen werden, um so auch die Modelle der Piezos mit der Realität abgleichen zu können. Aufgrund des verwendeten Messprinzips musste die Validierung auf Ladung statt Spannung umgeändert werden, was aber schließlich zu einer plausiblen Übereinstimmung der gemessenen und modellierten Werte führte.

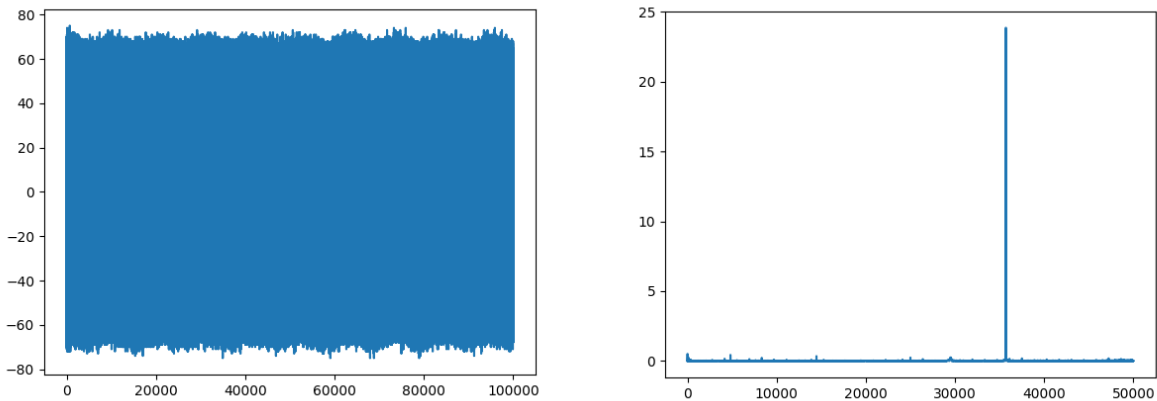


Abbildung 5 Messung mit langsamen ADC, 35.7kHz

Weitere Messungen wurden als Vorbereitung für die volle Messkampagne durchgeführt. Da noch keine Erfahrung mit der neuen Aufnahmetechnik vorlag, sollten vor der langwierigen Messung an unterschiedlich bestückten Pumpen erst eine Messung unter einigermaßen realistischen Bedingungen unternommen werden, um so das Messverfahren besser zu beherrschen und zudem die Anpassung der Messboards an die konkrete Messumgebung zu ermöglichen. Insbesondere die Signalstärke der Pumpenschwingungen war deutlich kräftiger erwartet worden, als bei den Messungen an den Testboards im Labor. Auf Basis der allerersten Messung, noch mit Aufzeichnung auf SD-Karte, war eine 10x höhere Signalstärke erwartet, als bei den Labormessungen.

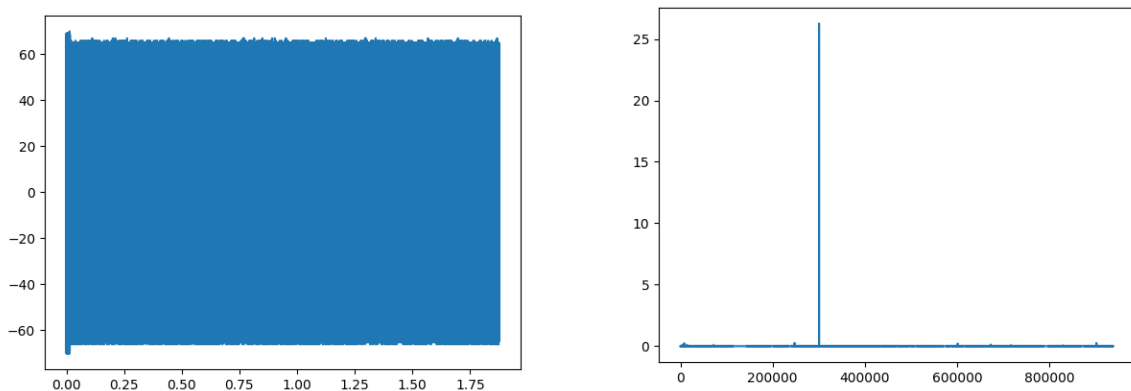


Abbildung 6 Messung mit schnellem ADC, 300.5kHz

Für die weiteren Messungen sollten die tiefen Frequenzen deutlich geringer gedämpft werden als noch bei den ersten Boardvarianten, um sicher die Kolbenfrequenzen der Axialkolbenmaschine zu messen. Die Grenzfrequenz des Hochpassfilters für den langsamen ADC (filtert niederfrequente Signale aus) wurde von ca. 8kHz auf etwa 200Hz reduziert. Dadurch kamen die sehr starken Signale aus dem Bereich <1kHz voll zum Tragen und führten zu Störungen im Bereich 10-200Hz und letztlich bei den Messungen am Demonstrator regelmäßig zu voll gesättigten Eingängen am Übergang Piezo/Board. Da die Signale grundsätzlich schon sehr viel stärker an den Pumpen bzw. Motoren sind, dazu dann noch die starken niederfrequenten Signale, lagen regelmäßig mehr als die maximal vorgesehenen 3V, bzw. das Ladungsäquivalent, am Eingangskondensator an. Dies führte zu sprunghaften Ladungen und Entladungen des Kondensators boardseitig und so zu extrem hochfrequenten Signalsprüngen zwischen

Maxima und Minima der ADCs. Die Daten der zweiten vollen Messung waren insofern nur bedingt verwendbar, da sowohl starke Amplituden ausgelöscht wurden als auch die Artefakte des Eingangskondensators als hochfrequente Störungen im Signalverlauf einfließen.

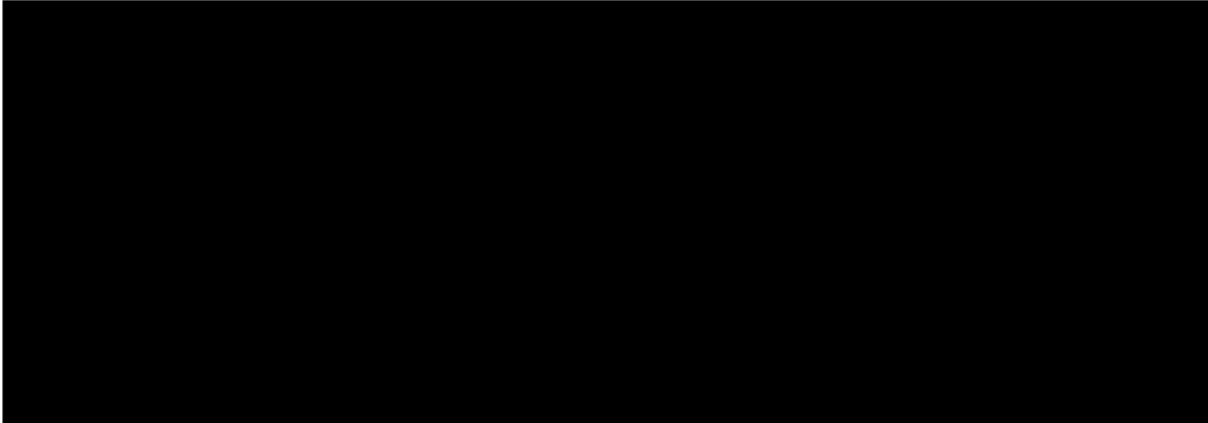


Abbildung 7 Messung an Elektromotor, langsamer ADC, Signal dauerhaft in Sättigung, FFT rechts mit dennoch einigen korrekten Frequenzen, allerdings auch vielen Artefakten

Zu sehen war der starke Einfluss der geringeren Dämpfung auch bei erneuten Rauschmessungen, hier exemplarisch mit dem großen A11-Sensor und dem langsamen ADC gemessen. Im niederfrequenten Bereich ist ein extrem starkes Rauschen vorhanden, mit Peaks u.a. bei 8Hz, 50 Hz und 225 Hz. Das Signal ist so stark, dass eine Messung mit dem langsamen ADC kaum sinnvolle Signale für den Bereich $>5\text{kHz}$ liefert.

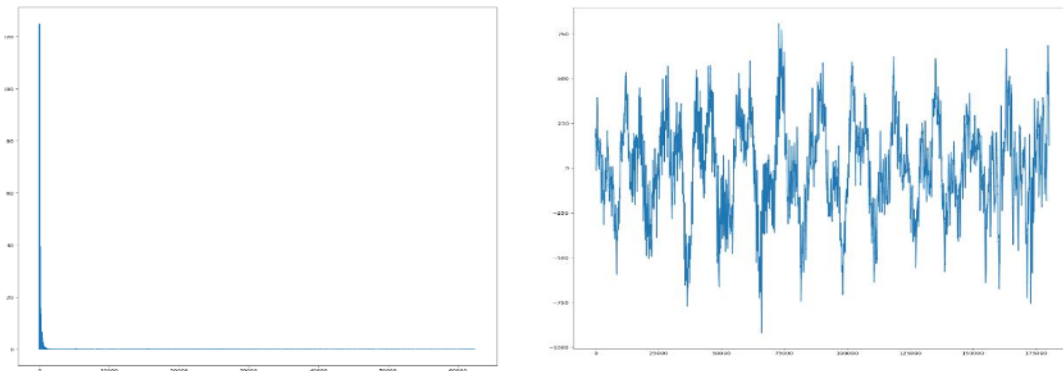


Abbildung 8 Rauschmessung mit A11 und langsamen ADC, links FFT, rechts Signal

Trotz der Störungen und Probleme konnte nachgewiesen werden, dass die langsamen Signale der Kolbenfrequenzen, die im Bereich einiger hundert Hertz liegen, auch bei stärker dämpfendem Eingang ausreichend gut analysiert und erkannt werden können. Insofern wurde nach gründlicher Analyse der Daten für die Folgemessung eine deutlich höhere Dämpfung am Eingang sowie eine wieder im ursprünglichen Bereich liegende Grenzfrequenz der Filter des langsamen Kanals ($\sim 8\text{kHz}$) angestrebt.

Neben der Anhebung der Grenzfrequenzen der Filter wurde zudem das Problem der unterschiedlichen Signalstärken angegangen. Durch die Anpassung der Eingangskondensatoren, die als Ladungs-/Spannungswandler genutzt werden, konnte die Empfindlichkeit des Systems den jeweiligen Signalamplituden angepasst werden. Mit den angepassten Boards wurde die zweite Hauptmessung an den Pumpen durchgeführt, bei der zum ersten Mal gute und schlechte Pumpen in allen Fahrmodi mit den Testboards gemessen wurden. Es wurden gleichzeitig unterschiedliche

Sensorpositionen und Boardkonfigurationen gemessen, so dass alle Pumpenkonfigurationen und alle Sensorpositionen mit drei unterschiedlichen Eingangsempfindlichkeiten vermessen wurden. Obwohl die sehr empfindliche Einstellung mit 200pF wie in den Vortests häufig in die Sättigung lief, konnten andererseits mit dieser Einstellung auch einige Fahrmodi mit geringeren Pegeln in höherer Dynamik vermessen werden.

Bei der Auswertung der Daten zeigte sich dann allerdings ein intensiver Rauschlevel, der mindestens um den Faktor 10 über den zuvor durchgeführten Rauschmessungen lag. Da die Filtereinstellungen und die Eingangsempfindlichkeit tendenziell ein geringeres Rauschen erwarten ließen, war der Grund unklar.

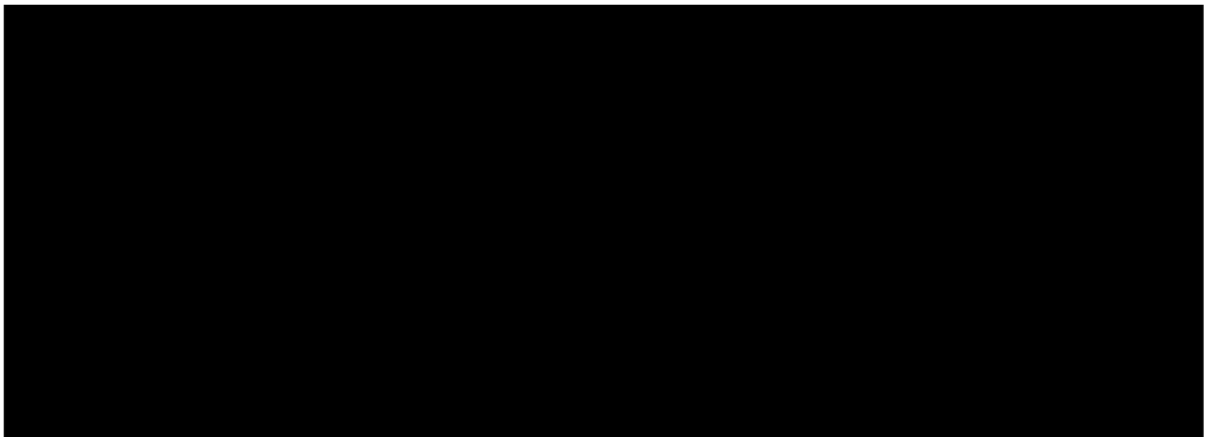


Abbildung 9 Rauschmessung am Teststand

Weitere Rauschmessungen im Laboraufbau zeigten auch keine Auffälligkeiten. Daher wurde die gesamte Messkonfiguration vom Pumpenprüfstand ins Labor verschoben. Hier wurde dann sehr schnell klar, dass die deutlich längeren Sensorkabel von einigen Metern Länge eine viel größere Störung in das System einbrachten, als die zuvor genutzten Kabel von maximal 1,5 Metern. Über die Nachrüstung einer weiteren Filterkomponente am Eingang konnte schließlich mit der dritten Revision der Hardware auch das Rauschproblem gelöst werden. Testmessungen im Prüfstandumfeld und einzelne Pumpenmessungen konnten die Ergebnisse auch im Feld bestätigen.

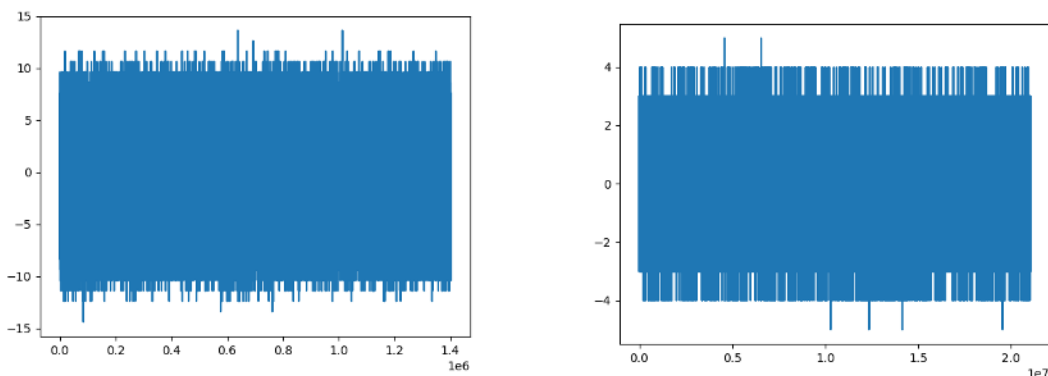


Abbildung 10 Rauschmessung mit Filter

Als letzte Messungen wurden noch einige Tests mit den zum Projektende entwickelten Flexplatinen durchgeführt. Hier wurden allerdings nur einige Charakterisierungen durchgeführt, da die Systeme sich nicht ohne weiteres für eine Messung am Prüfstand eigneten. Sowohl mit den reinen Flexplatinen mit angelötetem Piezo als auch in der

Variante, in der Piezo und Flexplatinen in eine Epoxidhülle eingehaust wurden, konnten rauschfreie Signale ohne Auffälligkeiten bezüglich Frequenz und Auflösung aufgezeichnet werden. Der Einsetzbarkeit der integrierten Sensoren sollte daher nichts entgegenstehen.

Entwicklung

Die erste Hardware wurde nach erfolgter Spezifikation fertiggestellt. Neben dem Standarddesign für den Mikrocontroller, also Schnittstellen und Stromversorgung sowie der Mikrocontroller selbst, lag die Hauptaufgabe auch im Hardwaredesign beim Analogteil und den ADCs.

Der Analogteil selbst ist diskret aufgebaut, mit passend gewählten Kenngrößen für die Widerstände in den Filtern und für die Verstärkung. Alle Werte lassen sich nachträglich durch Anpassung der Widerstände auf andere Werte einstellen. Auf einen programmierbaren Verstärker wurde verzichtet, da letztlich nur ein Testaufbau im Projekt geplant ist und damit die einfachere Lösung vorerst reichen musste. Für weitere Anwendungsfelder kann später mit dem programmierbaren Verstärker im zu entwickelnden ADC die erweiterte Flexibilität realisiert werden. Eine Besonderheit im Analogteil ist die Ladungs-/Spannungswandlung am Eingang, die für die Piezo-Charakteristik vorteilhaft ist, im Vergleich zur Strom-/Spannungswandlung bei herkömmlichen Analogsignalen. Der langsame ADC wurde durch den im Mikrocontroller integrierten ADC abgedeckt, für den schnellen ADC wurde ein externer, über SPI angebundener ADC auf die Platine integriert. Die Signalaufteilung und -aufbereitung erfolgt auf der Platine im Analogteil.

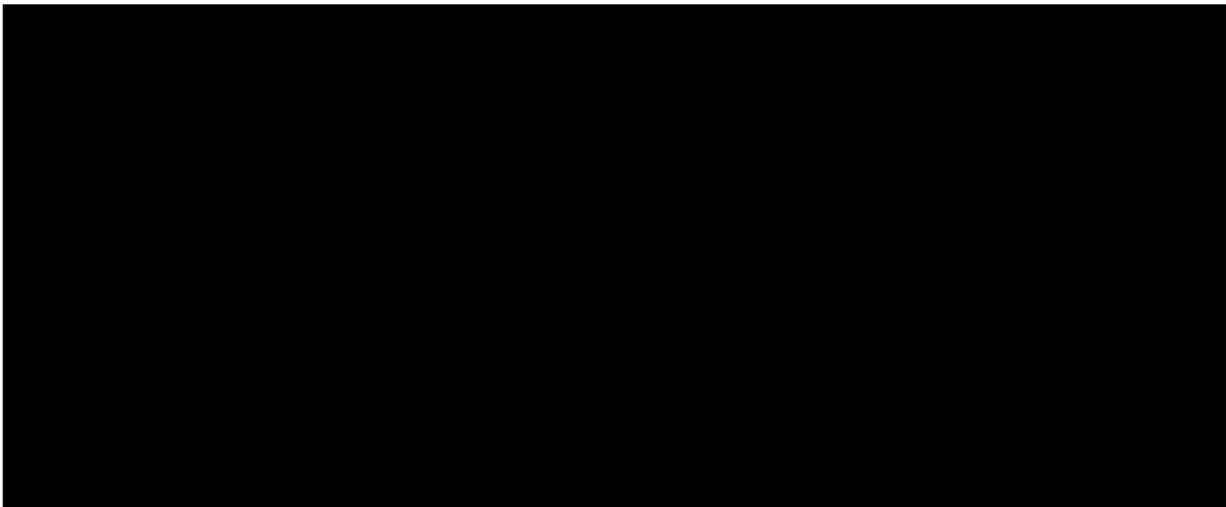


Abbildung 11 Filter-Frontend

Die gelayoutete und produzierte Platine konnte noch knapp vor der zweiten Messkampagne für erste Tests bei den Hydraulikpumpen genutzt werden, um mögliche Hardwarefehler rechtzeitig zu erkennen. Glücklicherweise gab es die Fehler nicht, so dass die Messungen wie geplant stattfanden – zu diesem Zeitpunkt aber nur mit SD-Kartenmessung.

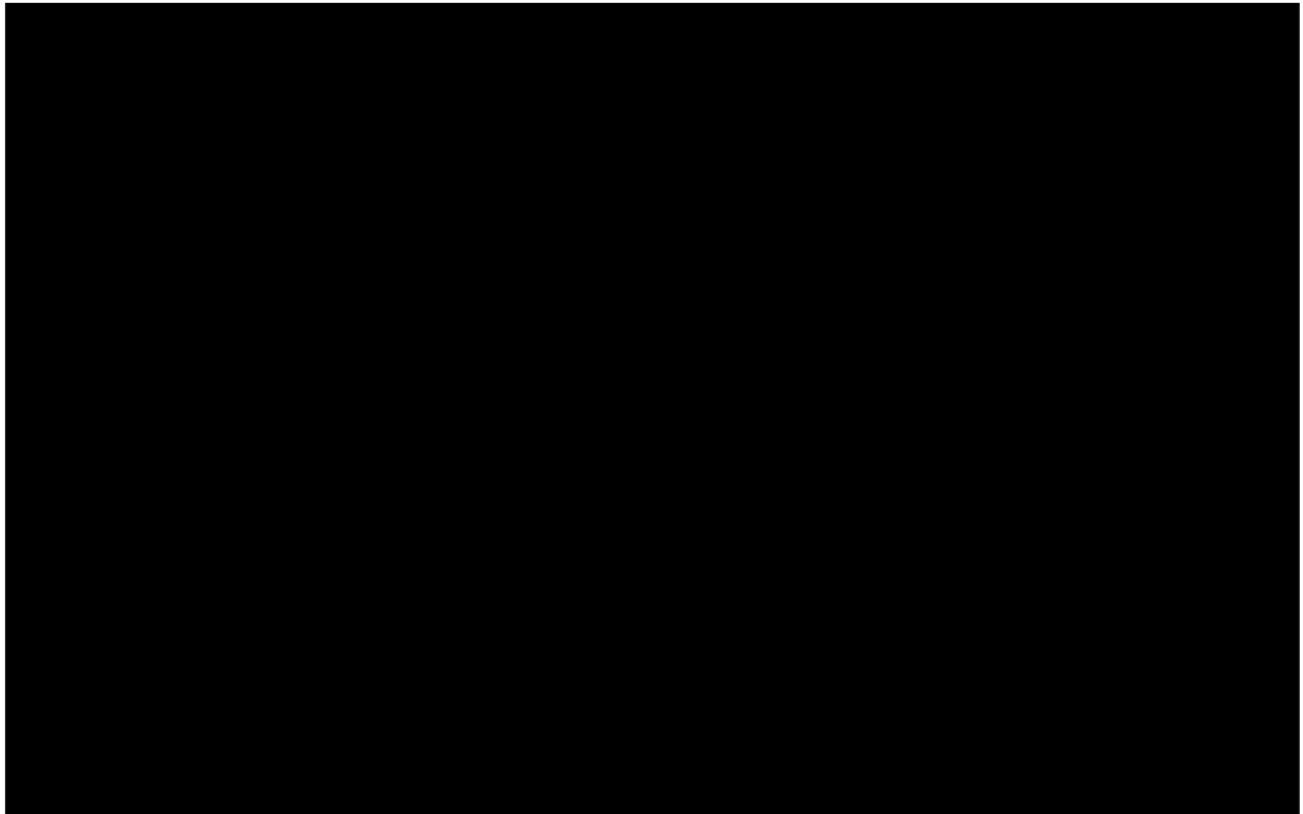


Abbildung 12 Fertige Messplatine

Parallel zur Hardwareentwicklung wurde die Firmware für den Mikrocontroller entwickelt. Alle zuvor beschriebenen Komponenten müssen dazu mit passenden Treibern angesprochen werden. Da der Analogteil nur per Hardware konfiguriert wird, beginnt die Software ab den beiden ADC die Signale aufzunehmen und zu verarbeiten. Neben der eigentlichen Datenaufnahme war für die Software die Synchronisation der Daten eine Hauptaufgabe. Beide ADC laufen vollkommen unabhängig voneinander, daher musste sichergestellt werden, dass sie immer zum exakt gleichen Zeitpunkt messen und die Messzeitpunkte sich nicht über die Zeit auseinander bewegen. Schließlich mussten die Schnittstellen nach außen umgesetzt und mit der Datenaufnahme abgeglichen werden.

Für die Realisierung einer schnelleren Datenübertragung wurde die Ethernet-Schnittstelle genutzt. Dazu waren zwei Neuentwicklungen erforderlich. Einmal die Datenübertragung vom Sensorboard aus, außerdem eine PC-Software als Gegenstelle zum Empfang der Daten.

Die beiden Seiten kommunizieren über ein einfaches und leichtgewichtiges Protokoll. Neben einem Paketzähler werden nur die Daten binär übertragen. Außerdem gibt es in Richtung vom PC zum Sensorboard noch einige Konfigurationskommandos, um die Messung zu starten und zu stoppen. Da die nutzbare Bandbreite des 100Mbit-Ethernet nur knapp für die Anwendung reicht, wurde das Hauptaugenmerk auf die Effizienz der Übertragung gerichtet. Bei möglicher 1,875MHz Samplingrate und 16Bit Datenbreite erreicht der schnelle ADC 30Mbit/s, der langsame ADC mit später 125kHz 2Mbit/s. Das experimentell ermittelte Maximum der Netzwerkschnittstelle liegt bei rund 35Mbit/s und wird so bereits sehr gut genutzt. Die beiden Geschwindigkeiten bieten ein ganzzahliges Vielfaches des schnellen zum langsamen ADC und ermöglichen so eine gemeinsame Übertragung von Paketen zusammengehöriger Samplingdaten, weshalb nicht noch marginal höhere Geschwindigkeiten genutzt werden. Jeweils 15 schnelle ADC-Daten werden mit einem langsamen ADC-Datum in einen

Messabschnitt verpackt und gemeinsam versendet. Das gesamte Datenpaket enthält mehrere dieser gemischten Einzelpakete, wobei das Optimum durch Testen ermittelt wurde. Derzeit werden 30 solche Pakete auf einmal verschickt. Die Netzwerkverbindung war zwar schon früh funktionsfähig, allerdings zu Beginn nicht schnell genug und noch zu unzuverlässig für Messungen. Daher wurden die ersten Messungen an den Pumpen mit der zuverlässigeren, aber sehr langsamen SD-Karte umgesetzt. Diese konnte zumindest über lange Zeit die Messungen abschnittsweise sicher aufzeichnen. Wesentlich für den maximalen Durchsatz ist eine kontinuierliche Anlieferung der Daten. Hierzu wurde die Datenpipeline im Code optimiert, um dem Mikrocontroller mehr Zeit zu geben und die Daten nicht unnötig zu kopieren. Mittels Interrupts und einer Multi-Buffer-Speicherung konnten Wartezeiten vermieden und eine kontinuierliche Anlieferung erreicht werden, so dass letztlich eine stabile und für die Anwendung ausreichend schnelle Lösung verfügbar war. In der weiteren Entwicklung wurden noch einige Instabilitäten und Datenverluste im Betrieb ausgemerzt. Ansonsten lief das Protokoll wie erwartet.

Zur Firmware auf dem Sensorboard musste auch eine PC-Software zum Empfang und Abspeichern der Daten entwickelt werden. Die Wahl fiel auf eine Python-basierte Entwicklung, da so auch eine grafische Oberfläche realisiert und die Anpassungen einfach umgesetzt werden konnten. Zudem war so eine Ausführung auf unterschiedlichen Plattformen möglich. Das Sensorboard öffnet zur Kommunikation mit der GUI über eine auf der SD-Karte befindliche Konfigurationsdatei eingestellte IP-Adresse und Port einen Server, der auf Kommandos wartet. In der GUI kann die Ziel-IP eingestellt werden und das Programm überprüft, ob eine passende Gegenstelle dort zu finden ist. Wenn das der Fall ist, wechselt die GUI in den Aufnahmemodus. Hier kann die Aufnahme gestartet oder gestoppt und in eine Datei geschrieben werden. In einem Graphbereich werden die aktuellen Messdaten angezeigt. Da hier nur sehr kurze Nachrichtenpakete angezeigt werden, ist so noch keine Auswertung machbar. Allerdings kann überprüft werden, ob ein Signal aufgezeichnet wird und ob dieses in die Sättigung gerät. So ist eine Überwachung der Aufzeichnung visuell in begrenztem Umfang möglich.

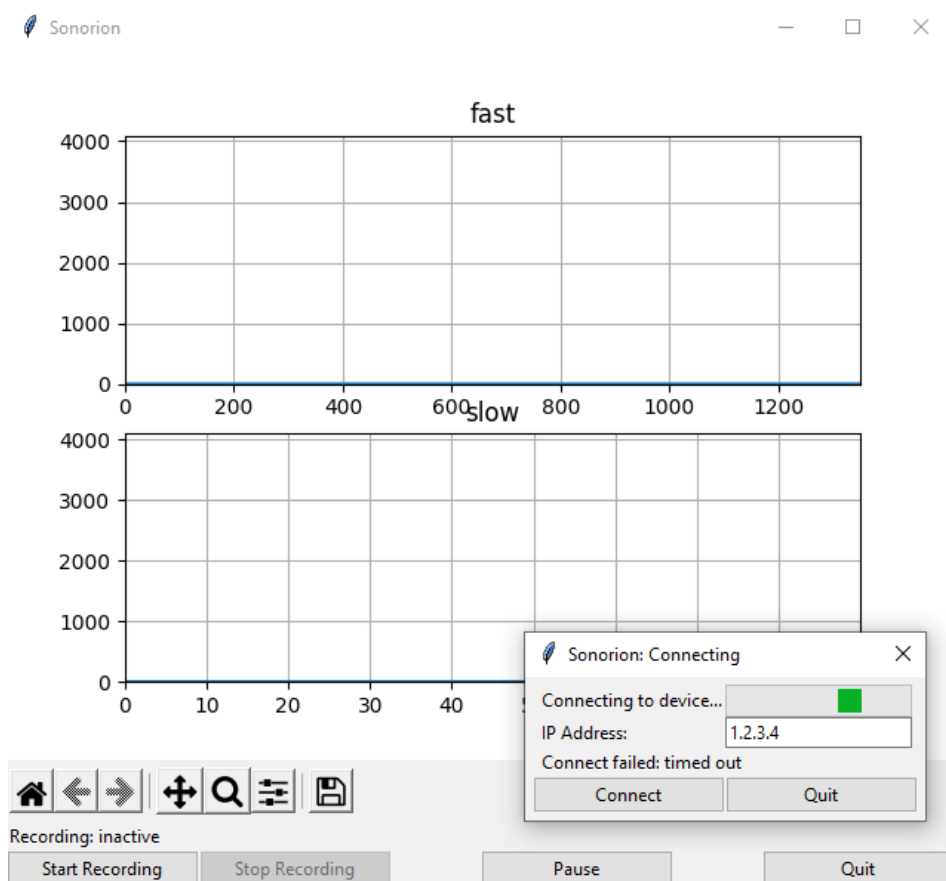


Abbildung 13 GUI für Datenaufzeichnung

Die Daten werden von der GUI als eine Gesamtdatei exakt wie empfangen abgespeichert, sowie aufgeteilt nach langsamen und schnellen ADC-Daten. Diese enthalten nur die binären Rohdaten ohne weitere Annotationen. Die GUI ist nicht auf die Auswertung der Messungen ausgelegt, hierfür existieren separate Programme bei den Projektpartnern. Die Software wurde bei CoSynth für Labormessungen und beim Projektpartner für Testmessungen am Prüfstand und Labormessungen genutzt. Die Software liefert zuverlässig Daten und kann dank der Ethernet-Schnittstelle auch aus der Ferne genutzt werden. Da eine PC-Netzwerkschnittstelle mehr als 35Mbit/s leistet, können grundsätzlich auch mehrere Sensoren an einen PC angeschlossen werden. Allerdings kann durch den zusätzlichen Overhead die Netzwerkübertragung unzuverlässiger machen, da die Übertragung per UDP erfolgt und somit Pakete verloren gehen können. Dies kann von der Software durch den Paketzähler erkannt werden, allerdings ist aufgrund der voll ausgelasteten Übertragung beim Sensor keine erneute Übertragung der fehlenden Daten möglich.

Für die erste Messreihe mit dauerhaft aufzeichnendem Sensor wurden drei Varianten der Hardware mit unterschiedlichen Analogfilter entwickelt. Da die ursprünglich eingesetzte Variante eine relativ starke Dämpfung im niederfrequenten Bereich aufweist, wurden für die Testmessung noch zwei Versionen mit geringerer Dämpfung entwickelt. Die Grenzfrequenz für den Hochpass lag bei einigen hundert Hertz. Aufgrund der dann sehr stark ausgeprägten Störungen durch extrem starke, niederfrequente Signale wurden bei Folgemessungen wieder höhere Grenzfrequenzen eingestellt. Zudem waren die Signale in dieser ersten Variante relativ schnell in die Sättigung gegangen, was insbesondere die Analyse von hochfrequenten Signalen vollständig verhindert. Daher wurde auch eine insgesamt stärkere Dämpfung des gesamten Spektrums umgesetzt werden. Die Ladungsumsetzung am Eingang des

Boards ermöglicht zusätzlich zur Erzeugung der Spannung aus der Ladung der Piezos eine Dämpfung/Verstärkung durch ein geändertes Verhältnis von Ladung zu Spannung. Die weiteren Konfigurationsmöglichkeiten im Analogteil sind in den Eingangsfiltern vor dem Verstärker, die jeweils den Messbereich begrenzen. Für diese wurde über diverse Boardrevisionen nach einer für den Anwendungsfall optimalen Kombination gesucht, wobei sich die Anpassungen durch Austausch einiger Komponenten realisieren ließ und keine Neuentwicklung erforderlich war.

Nachdem bei der zweiten großen Messung an Pumpenprüfstand ein sehr starkes Rauschen aufgetaucht war, musste für die Kompensation allerdings doch eine neue Hardware entwickelt werden. Dies betraf zwar nur das Analog-Frontend, doch der diskrete Eingangsfiler war nicht stabil in die bisherigen Komponenten integrierbar. Durch das so ohnehin erforderliche Redesign wurde nun auch die Änderung der Eingangsempfindlichkeit direkt ins Design mit aufgenommen. Hierzu kann über einen ansteuerbaren Mux zwischen unterschiedlichen Eingangskondensatoren umgeschaltet werden, so dass die gleiche Boardkonfiguration elektronisch auf unterschiedliche Szenarien angepasst werden kann. Neben der geänderten Hardware wurde dazu auch noch die GUI angepasst, hier kann nun eine der vier Stufen von sehr empfindlich bis kaum empfindlich ausgewählt werden, die Skalierung liegt bei etwa einem Faktor 50. Neben Testmessungen im Labor konnte mit diesem Design dann auch eine rauschfreie Messung am Teststand bei Bosch Rexroth durchgeführt werden. Es wurden dazu noch einige Fahrprofile vermessen, allerdings nur an einer Pumpe ohne Defekte. Hierdurch konnte zumindest der Abgleich mit den bisher erhobenen Daten und mögliche Änderungen für zukünftige Analyseverfahren abgeleitet werden, die aufgrund der nur geringfügig veränderten Signalcharakteristik allerdings auch nicht groß anders ausfallen werden. Ob die bisherigen Trainingsdaten in allen Fällen nutzbar wären, ist allerdings nicht klar. Für Guteinheiten war eine Erkennung scheinbar ohne Änderungen möglich.

Nach Abschluss der Entwicklung des diskreten Hauptdemonstrators wurden noch weitere Entwicklungsschritte angegangen, die die Einsatzmöglichkeiten des Systems verbesserten. Genauer wurden die drei Teilentwicklungen Integration des ADC-IC, Entwicklung eines kombinierten Piezo-Sensors und Evaluation von Auswertelgorithmen auf dem Mikrocontroller angegangen. Alle drei Entwicklungen wurden nur im Labor getestet.

Bei der Integration des ADC-IC, der von Fraunhofer im Projektverlauf entwickelt wurde, konnte die finale Aufbringung des IC auf der Platine aufgrund der sehr späten Fertigstellung des ICs nicht mehr durchgeführt werden. Das Design der Platine blieb daher im Konzeptstadium. Die entsprechende Treiberarchitektur, die auf Basis der Entwicklungsdokumente ohne konkrete Testmöglichkeit entwickelt wurde, konnte so auch nicht mehr auf Funktion getestet werden, steht aber für weitere Entwicklungen zur Verfügung.

Bei der Entwicklung des kombinierten Piezo-Sensors ging es primär um eine Aufwertung des bisher rein analog aufgebauten Piezos. Der Piezo, wie er im Projekt in unterschiedlichen Konfigurationen untersucht und angewendet wurde und in diesen Varianten auch direkt beziehbar ist, liefert einfach eine Spannung an den beiden an die Keramik gelöteten Anschlüssen. Es handelt sich somit um ein sehr analoges Bauteil mit nur geringer Möglichkeit zur Konfiguration der Parameter. Die Idee war nun, den Sensor mit einem Teil der Elektronik zu verheiraten und so den Sensor um eine digitale Schnittstelle zu ergänzen. Schließlich sollte diese gesamte Elektronik mit in die spezielle Umhausung des Piezo integriert werden, so dass die Spezifikation und

Handhabung des Sensors ähnlich bleiben, nur eben mit digitalem Interface. Allein schon aufgrund der sehr geringen Dicke der Sensoren musste auf eine Flexplatine statt der üblichen starren Platinen zurückgegriffen werden. Dies sollte zudem mögliche Einflüsse auf das Schwingungsverhalten des kombinierten Sensors verringern, da keine schwere und starre Platine in der Umhausung mitschwingt. Da der Einhausungsprozess relativ hohe Temperaturen nutzt das Interface zum Sensor auch möglichst einfach bleiben sollte, wurde auf eine Integration des Mikrocontrollers verzichtet. Es wurde lediglich das Analog-Frontend mit den Filtern sowie ein ADC integriert. Da im bisherigen Aufbau der zweite (langsame) ADC im Mikrocontroller integriert war, blieb dieser außen vor. Für die Nutzung des Sensors ist je nach Einsatzszenario oft nur ein ADC erforderlich, so dass der schnelle ADC alle üblichen Situationen abdecken konnte.

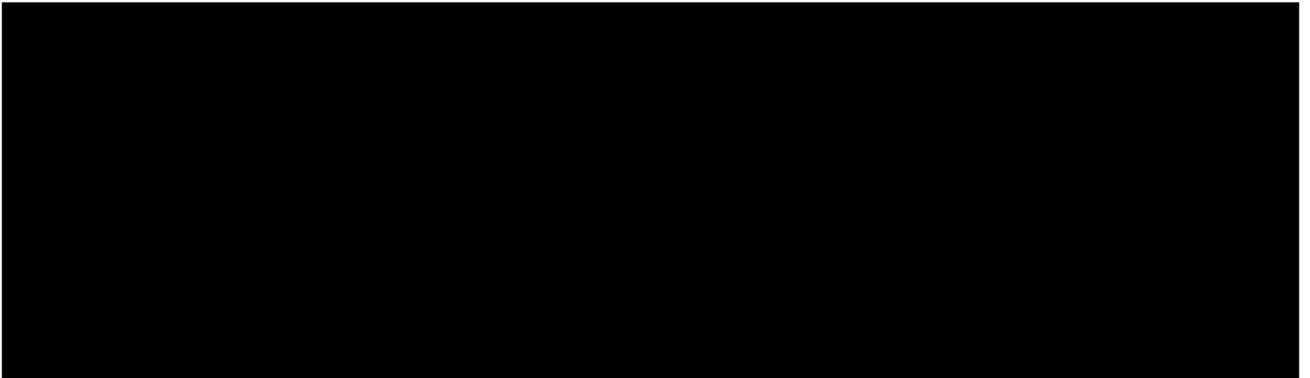


Abbildung 14 noch nicht eingehauste Platine

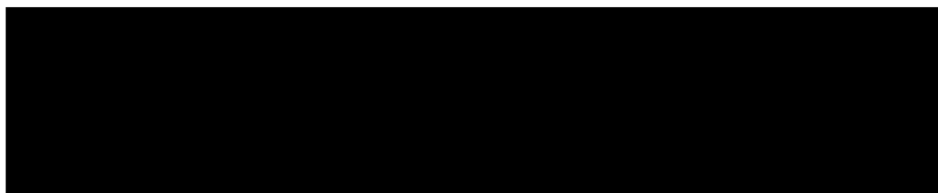
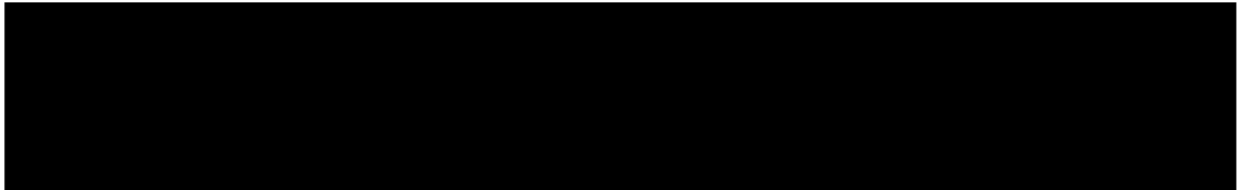
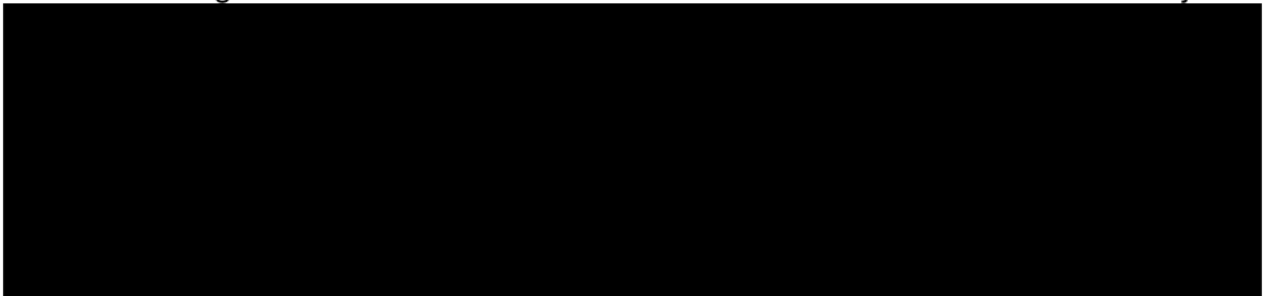


Abbildung 15 fertig integrierter Sensor

Die final integrierte Version im kombinierten Gehäuse wurde mit dem im Projekt





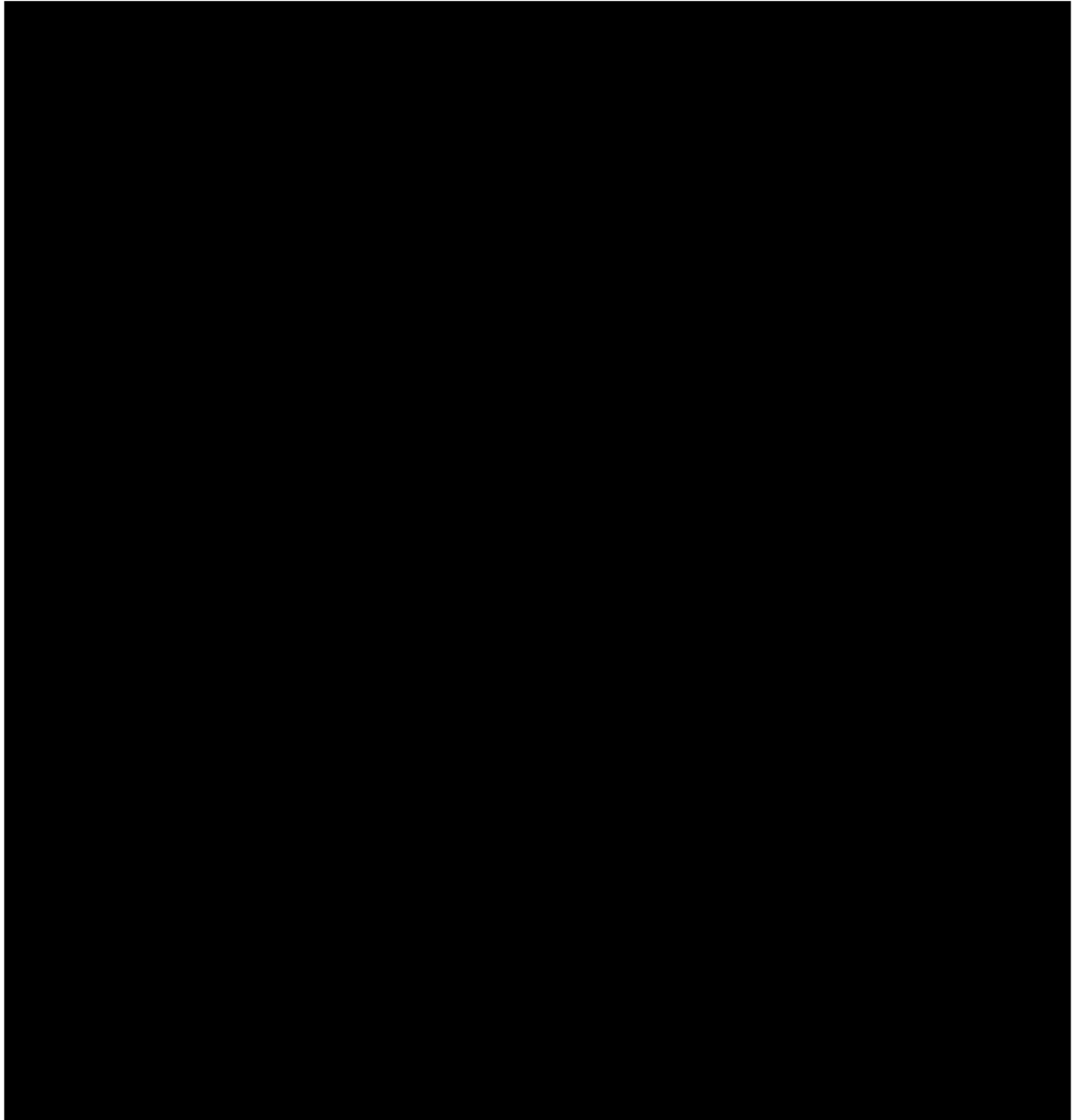
realisiert werden.

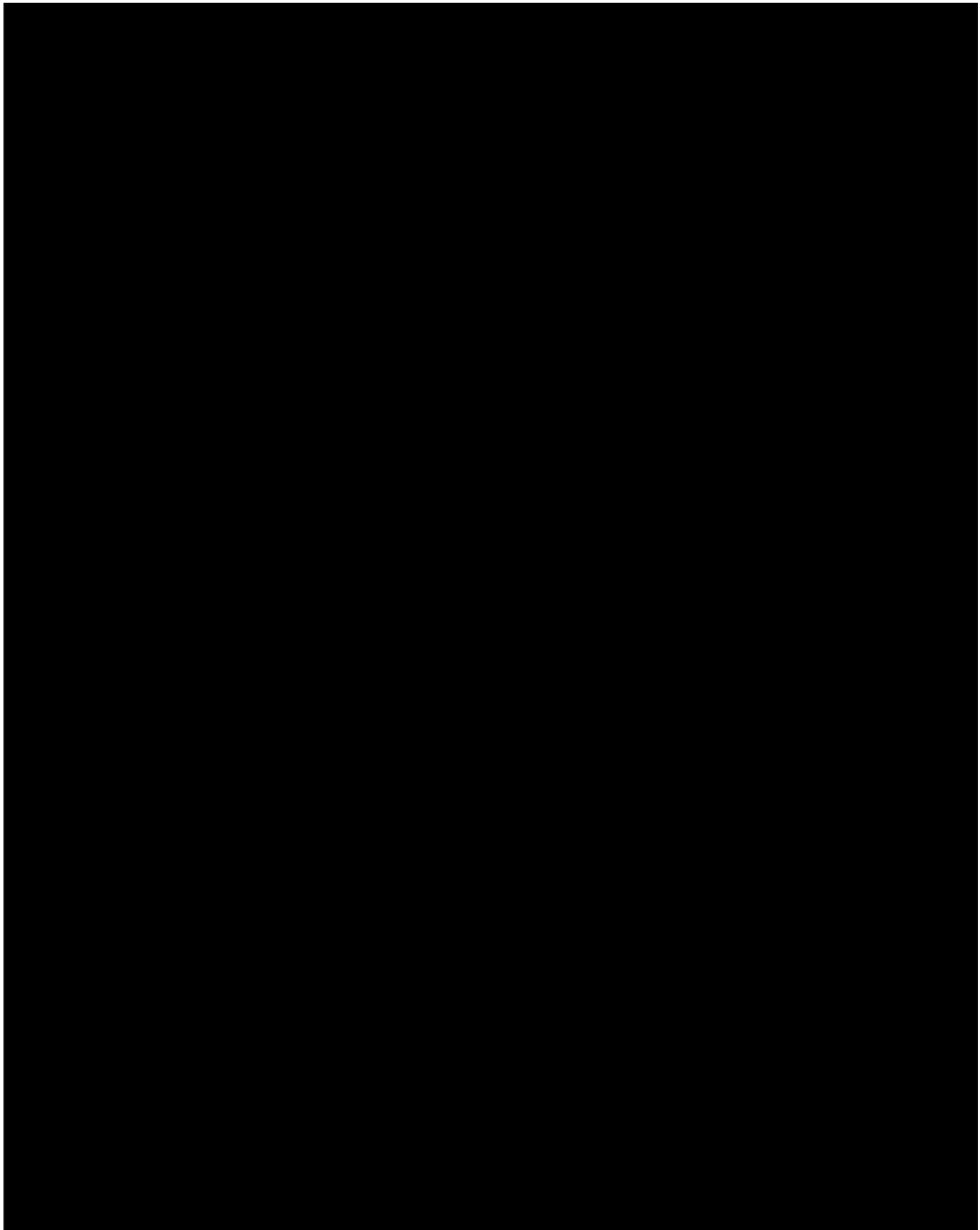
Das dritte Entwicklungspaket beschäftigte ich mit der Umsetzung von Erkennungsalgorithmen auf den Mikrocontroller. Durch die Untersuchungen im Projekt waren unterschiedliche Parameter und Algorithmen identifiziert worden, die sich für die gesetzte Aufgabe eignen. Um die Analyse nicht erst offline auf einem Prozess- oder analyserechner durchzuführen, sondern direkt bei Aufzeichnung der Sensordaten ist es erforderlich, neben der Datensammlung auch die Auswertung direkt auf dem Sensorboard zu erledigen, um Schäden an den Axialkolbenpumpen direkt zu erkennen und zu klassifizieren. Hierzu wurden einige Untersuchungen vorgenommen.

Auf eingebetteten Systemen sind nur wenig Rechenleistung und Speicher verfügbar. Der verfügbare Speicher begrenzt dabei die Größe des verwendeten Modells und die Länge des Signals. Das verwendete Testsystem hat 256 kByte RAM, der Controller ist ein Arm Cortex-M7 mit 400 MHz, außerdem steht lokal die SD-Karte zur Verfügung zur Speicherung der Daten und Ergebnisse.

Das Training des Modells erfolgt mit dem Python-Modul scikit-learn auf einem PC unabhängig vom Sensorboard. In der Trainingsphase gibt es daher nur geringe Einschränkungen an Speicherplatz und Rechenzeit. Die Modellparameter müssen dann in einem geeigneten Format gespeichert werden, um sie auf dem eingebetteten System zur Klassifikation zu verwenden. Vor der Trainingsphase und der Umsetzung der Algorithmik auf den Controller mussten noch einige Fragen geklärt werden. Zuvorderst die Auswahl eines geeigneten Modells, das gute Ergebnisse liefert, aber auch mit wenig Speicher und Rechenzeit auskommt. Die Ergebnisse des Trainings müssen in einem speichereffizienten Format gespeichert, und auf dem eingebetteten System wieder ausgelesen werden können. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Signallänge. Lange Signale benötigen mehr Speicher und mehr Zeit zur Verarbeitung, erhalten jedoch auch mehr Informationen für bessere Klassifikationsergebnisse. Nach geeigneter Implementierung der Algorithmen wird die Laufzeit ermittelt und gegebenenfalls die Berechnung weiter optimiert sobald die Berechnung grundsätzlich korrekt funktioniert.

Für die Tests wurden die Daten der letzten großen Messung am Prüfstand genutzt.





Der nach C portierte Algorithmus liefert bei einigen Testdatensätzen aus scikit-learn akzeptable Ergebnisse. Für die vorhandenen Daten zur Klassifizierung von Schäden an Axialkolbenpumpen ist der Algorithmus allerdings nicht geeignet. Dies zeigen auch die Ergebnisse in Abbildung 16.

Ein Entscheidungsbaum ist ein Binärbaum und kann aus hunderten oder tausenden Knoten bestehen. Die Pfadlängen von der Wurzel zu einem Blatt können dabei

unterschiedlich sein. Der Entscheidungsbaum (DecisionTreeClassifier) wird in mehreren Listen gespeichert, der Index in die Liste entspricht der Knotennummer. Die Länge der Listen entspricht der Anzahl der Knoten im Baum. Diese Methode benötigt unnötig viel Speicher, da einige Werte nur für innere Knoten und andere nur für Blätter

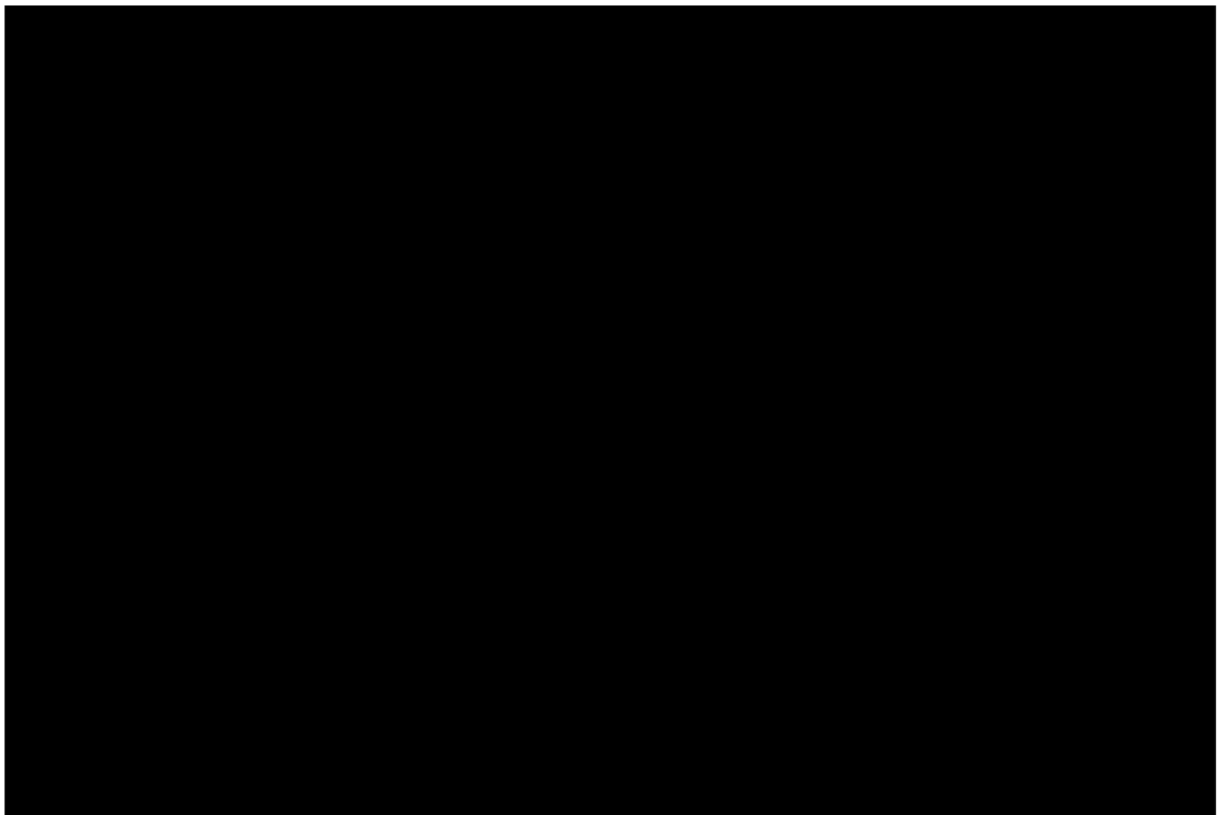
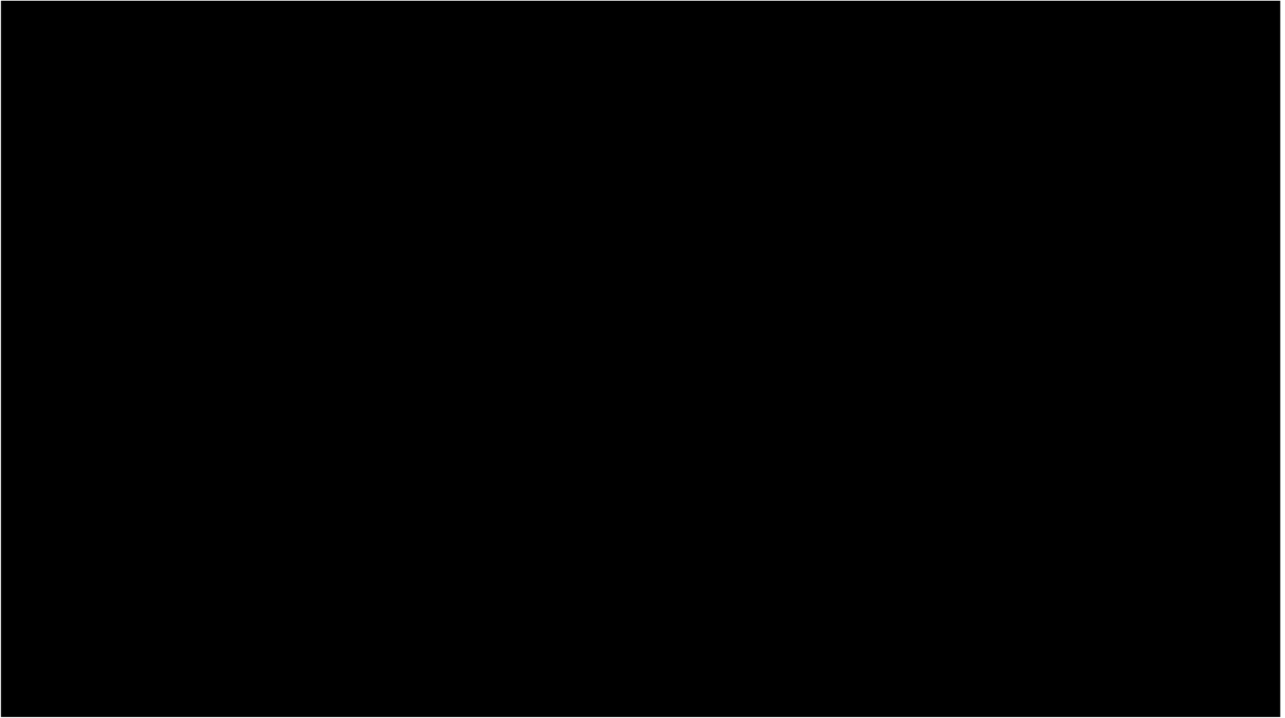
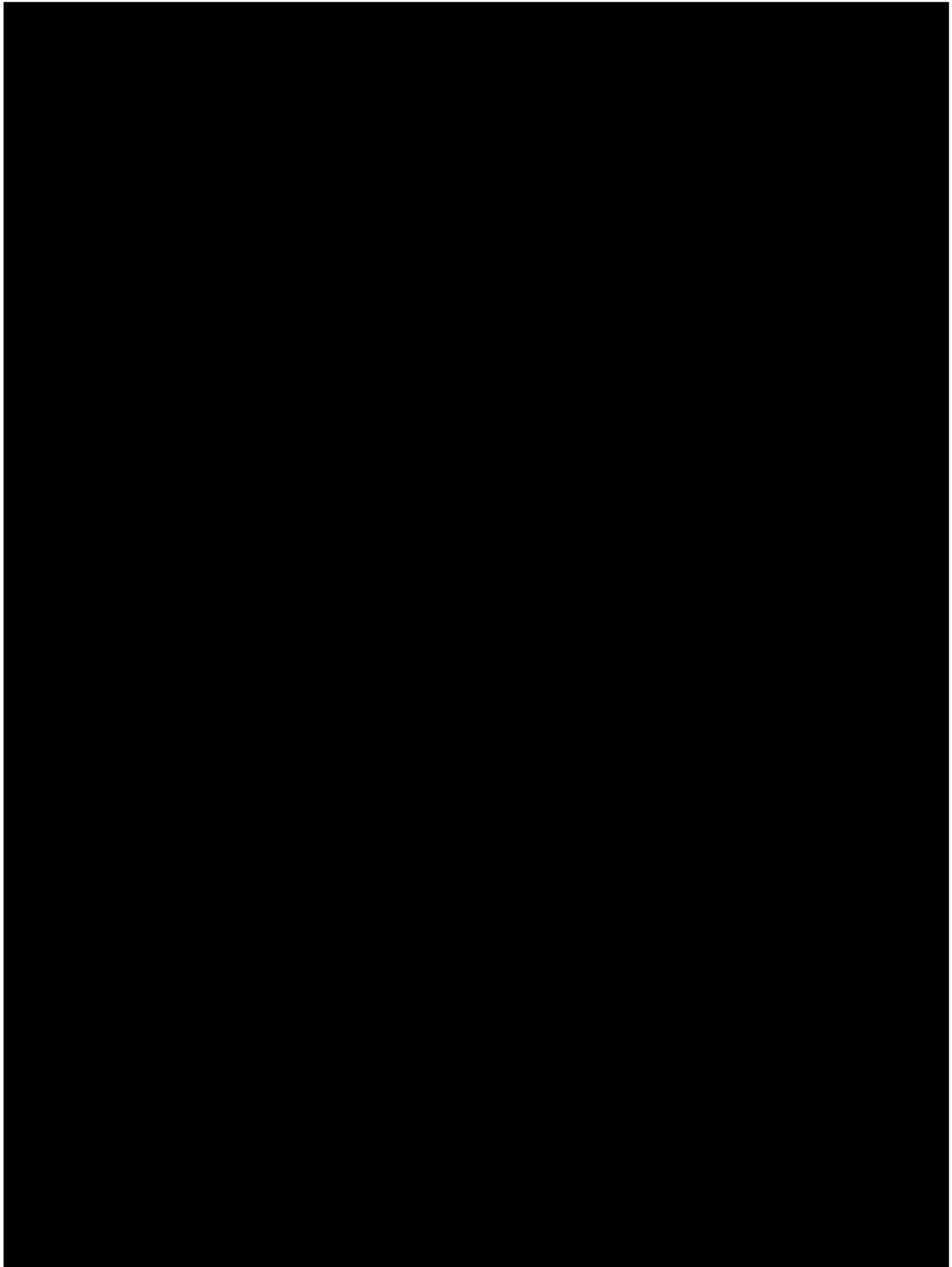


Abbildung 18 Korrektclassifikationsrate bei Random Forest mit unterschiedlicher Anzahl Bäumen. (Platine A, Position 2, 10 ms, Abtastfrequenz 125 kHz, FFT-Länge 17)

Die Laufzeit für eine Klassifikation soll auf dem eingebetteten System trotz geringer Rechenleistung möglichst kurz sein. Der gesamte Vorgang besteht aus den Schritten

Aufzeichnen des Eingangssignals, Berechnen der Merkmale und Klassifikation mit Random Forest. Für den Test werden Testdaten von SD-Karte gelesen und kein Eingangssignal über Analog-Digital-Wandler erfasst, um Ergebnisse validieren zu können.



6. Zahlenmäßiger Nachweis

Die gesamten Selbstkosten des Teilvorhabens lagen bei rund 293T€, fast ausschließlich Personalkosten. Der Bundesanteil lag, inklusive KMU-Bonus bei rund 161T€, der Eigenanteil bei 132T€ bzw. rund 45%. Materialkosten gingen in die Erstellung der Demonstratoren, Reisekosten wurden aufgrund der Pandemie nicht vollständig abgerufen.

7. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Infolge der Entwicklung hin zu einer Industrie 4.0 nimmt in vielen Anwendungsfeldern der Bedarf an Sensor- und Messsystemen zu. Dabei geht es vor allem um die Gewährleistung der Zuverlässigkeit von Produkten und Prozessen. Durch die zunehmende Vernetzung in der industriellen Fertigung dürfte sich die Anzahl der insgesamt verbauten Sensoren alle fünf Jahre verdoppeln – mit steigender Tendenz in den folgenden Jahren.

Das Thema Zustandsüberwachung erfreut sich im Kontext von Industrie 4.0 eines stark steigenden Interesses sowohl in der Industrieproduktion als auch in der Prozessindustrie. Für komplexe Maschinen und Anlagen werden zunehmend Möglichkeiten gewünscht, die einzelnen Komponenten umfassend hinsichtlich Funktionstüchtigkeit und Auftreten von Verschleiß zu überwachen. Das gilt für nahezu alle Branchen der deutschen Industrie und insbesondere dort, wo Wartungs- und/oder Reparaturarbeiten sehr kostenintensiv sind oder Stillstandzeiten von Maschinen oder Anlagen hohe finanzielle Verluste nach sich ziehen. Die Axialkolbenpumpe wird durch ihre weite Verbreitung gelegentlich als „Arbeitspferd der Hydraulik“ bezeichnet und sie ist oftmals Teil einer Prozesskette zur Herstellung hochwertiger Produkte. Insofern ist die Verschleißüberwachung natürlich auch für Komponenten der Hydraulik wie z.B. Axialkolbenpumpen von großem Interesse. Jedoch sind oftmals die derzeit verfügbaren Condition Monitoring-Systeme zu teuer, sehr aufwändig zu projektieren und/oder mit hohem Installations- und Inbetriebnahmeaufwand verbunden. Bei einem deutlich niedrigeren Preis für das Condition Monitoring-System sowie einer weit einfacheren Installation und Inbetriebnahme ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass die Akzeptanz für solche Systeme stark steigt, die Zustandsüberwachung somit eine breite Marktdurchdringung erreicht und der Industrie 4.0-Gedanke einen weiteren enormen Schub erfährt.

In diesem Kontext schafft das Projekt eine neuartige Basis, weil durch die Verbindung von Extrem-Breitband-Monitoring und selbstlernender Algorithmenanpassung die deutschen Kompetenzen auf dem Gebiet der Überwachung von Maschinen und Anlagen weiter ausgebaut und einem stark verbreiterten Anwenderkreis zur Verfügung gestellt werden können. Das erhöht die allgemeine Marktpräsenz von Condition Monitoring-Systemen für die deutsche Industrie – insbesondere den Mittelstand – und schafft für deren Anwender einen Wettbewerbsvorteil.

Im Projekt sind unterschiedliche Formen der Verwertung entwickelt worden. Einmal über Lizenzierungsaktivitäten, das betrifft zwei Verwertungspfade. Zum einen geht es um die Verwertung der Intelligenten Entwicklungsmethodik für integrierte Analog- und Mixed-Signal-Schaltungen (Intelligent IP) und der im Projekt entstandenen Schaltungs-IP in Form von Lizenzen. Zum anderen soll die Methodik zum Entwurf und zur Realisierung von Zustandsüberwachungssystemen zunächst in Dienstleistungsangeboten Verwendung finden und später eine Lizenzierung von selbstlernenden Signalanalyse-Algorithmen erfolgen.

Zudem sollen Ergebnisse des Projektes in unterschiedlichen Produkten vermarktet werden. Mit der Realisierung einer kostengünstigen Überwachungsmöglichkeit für Hydraulikprodukte können Kundenanfragen bezüglich Condition Monitoring befriedigt werden. Mit einem kostengünstigen Condition Monitoring-Modul lassen sich für die Axialkolbeneinheiten höhere Preise erzielen, Kundenbeziehungen ausbauen/intensivieren, Wettbewerbsvorteile gegenüber internationalen Mitbewerbern erzielen, neue Kunden gewinnen und auch ganz neue digitale Geschäftsmodelle etablieren.

Weitere Verwertungsperspektiven ergeben sich einerseits aus einer direkten Vermarktung der Sensoren als auch in der Erschließung neuer Absatzmärkte für diese. Durch die neuartigen Anwendungsmöglichkeiten der Sensoren werden höhere Absatzzahlen erreicht, nicht nur mit Hydraulikkomponenten sondern darüber hinaus mit allen Komponenten der Antriebstechnik über die gesamte Wertschöpfungskette der Sensorherstellung. Langfristig besteht das Ziel, die Serienfertigung von Piezosensoren für weitere industrielle Anwendungen als neues Geschäftsfeld zu etablieren. Für die Entwicklung des voll integrierten Systems ist weitere Forschungsarbeit zu effizient integrierten Auswertalgorithmen in einer kostengünstigen Kombination erforderlich.

Condition Monitoring- und Predictive Maintenance-Systeme sind durch die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten einer steigenden Komplexität und Heterogenität ausgesetzt und in einer Vielzahl von Ingenieursdomänen von wachsender Bedeutung. Durch Verallgemeinerung und Übertragung der im Projekt neu entwickelten Ansätze entsteht das Potenzial einer Vermarktung auch jenseits der im Projekt eingesetzten Demonstratoren. Für CoSynth steht die Vermarktung der konzipierten diskreten Hardware-Komponenten im Vordergrund. Als Entwicklungsdienstleister ergibt sich dabei eine zweigliedrige Verwertung. Zum einen kommen die entwickelten Boards und Sensorsysteme als vorgefertigte Komponenten für Kundenprojekte zum Einsatz. Hierdurch ergibt sich ein Zeit- und somit ein Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Dienstleistern bei der Konzeption und Vorentwicklung für die Projektdurchführung. Zum zweiten wird CoSynth die Einzelkomponenten direkt vermarkten. Bereits jetzt verkauft CoSynth FPGA-Erweiterungskarten und Sensorkomponenten an Systemintegratoren. Dieser Geschäftsbereich wird weiter ausgebaut und kann mit den im Projekt geplanten Sensormodulen signifikant erweitert werden. Die Verwertung in eigenen Projekten kann nach einer ausreichenden Evaluationsphase bereits wenige Jahre nach Projektende erfolgen. Für eine Verwertung als eigenständige Komponente sind weitere Entwicklungen für anwendungsbezogene Verarbeitungsschritte, zusätzliche Tests, ggf. Zertifizierungen und ausführliche Dokumentation nötig. Diese Vermarktung wird daher erst nach einer längeren erforderlichen Vorlaufphase erfolgen. Aufgrund der Ergebnisse und gefundenen Hürden wird diese länger als geplant ausfallen und eine Vermarktung erst nach einige Jahren erfolgen. CoSynth rechnet bei der Vermarktung im Projekteinsatz mit einer deutlichen Umsatzsteigerung bzw. Kosteneinsparung in den ersten fünf Jahren nach der Vorlaufphase, da Condition Monitoring in vielen Projekten ein wichtiges Thema ist. Bei den Einzelprodukten ist eine Vermarktung auch über Distributoren oder OEMs denkbar, so dass hier ein hoher Umsatz bei geringen Kosten erreichbar ist. Hier wird zudem eine Kooperation zur Vermarktung der integrierten digitalen Piezo-Sensoren angestrebt, die aufgrund der vollständig ausgearbeiteten Technologie deutlich kurzfristiger erfolgen kann. Die konkrete Verwertungsstrategie wird innerhalb von zwei Jahren nach Projektende entwickelt, die konkrete Verwertung danach mit ersten Anwendungen bei Kunden in den Jahren danach.

8. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Grundlegende Neuerungen im Verfahren selbst sind nicht bekannt geworden. Kommerzielle Umsetzungen für Axialkolbenmaschinen sind keine bekannt, so dass eine weitere Entwicklung auf die industrielle Nutzung hin weiterhin erfolgreich sein kann, sofern die gefundenen Herausforderungen erfolgreich gemeistert werden können.

9. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Keine eigenen Veröffentlichungen zum Thema.