



ABSCHLUSSBERICHT

Entwicklung eines Systems zur Prognose bevorstehender Wartungs- / Instandhaltungsmaßnahmen und Identifikation ungünstiger Betriebszustände von Bauteilen raumlufttechnischer Geräte und Kälteanlagen (SmartMaintenance)– Aktenzeichen 35679/01

Abschlussbericht

DBU-Projekt:

Entwicklung eines Systems zur Prognose bevorstehender Wartungs- / Instandhaltungsmaßnahmen und Identifikation ungünstiger Betriebszustände von Bauteilen raumlufttechnischer Geräte und Kälteanlagen (SmartMaintenance)

Aktenzeichen:	35679/01
Auftraggeber:	Deutsche Bundesstiftung Umwelt An der Bornau 2 49090 Osnabrück
Bewilligungsempfänger	Simon Process Engineering GmbH Ellerbachstraße 16 55546 Neu-Bamberg
Projektleitung:	Simon Process Engineering GmbH Prof. Dr. Ralf Simon Tel.: +49 160 7003939 / Fax: +49 6703 9699156 E-Mail: ralf.simon@simon-pe.de
Kooperationspartner:	MultiCross GmbH Ostermayer Straße 54 46446 Emmerich am Rhein Herr Frank Reimann
Projektlaufzeit:	01.06.2020 – 31.03.2022

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35679/01	Referat	24/0	Fördersumme	124.992 €
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel	Entwicklung eines Systems zur Prognose bevorstehender Wartungs- / Instandhaltungsmaßnahmen und Identifikation ungünstiger Betriebszustände von Bauteilen raumluftechnischer Geräte und Kälteanlagen (SmartMaintenance)
---------------------	---

Stichworte	Vorrausschauende Wartung, Lüftungsanlagen
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
22 Monate	01.06.2020	31.03.2022	

Zwischenberichte	3 Stück
------------------	---------

Bewilligungsempfänger	Simon Process Engineering GmbH Ellerbachstraße 16, 55546 Neu-Bamberg	Tel	+49 160 7003939
		Fax	+49 6703 9699156
		Projektleitung	
		Prof. Dr. Ralf Simon	
		Bearbeiter	
		Herr Johannes Langold	

Kooperationspartner	MultiCross® GmbH Ostermayer Straße 54 46446 Emmerich am Rhein
----------------------------	--

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Derzeit werden sowohl raumluftechnische als auch kältetechnische Anlagen präventiv gewartet. Dieses Wartungsprinzip führt u. a. zu einem vorzeitigen Wechsel von noch intakten Anlagenkomponenten oder ungünstige Betriebszustände werden erst beim Wartungstermin erkannt.

Ziel des Vorhabens *SmartMaintenance* war die Entwicklung eines softwarebasierten Überwachungssystems zur Prognose bevorstehender Wartungs-/Instandhaltungsmaßnahmen und Identifikation ungünstiger Betriebszustände von wartungsrelevanten Bauteilen von raumluftechnischen Geräten (kurz RLT-Geräte) und Kälteanlagen. Durch die Auswertung von kontinuierlich erfassten Mess- bzw. Betriebsdaten sollte der Algorithmus prognostizieren, wann mit einer Reparatur/ Wartung des betroffenen Anlagenbauteils zu rechnen ist. Zur Datenübertragung sollte das „Long Range Wide Area Network“ (kurz LoRaWAN) eingesetzt werden.

Durch die kontinuierliche Überwachung der wartungsrelevanten Komponenten, soll ein vorzeitiger Austausch von noch intakten Anlagenkomponenten verhindert werden. Dieser Umstand

würde bspw. den Verbrauch an Filtermaterialien bei RLT-Geräten reduzieren. Ebenso würde das Erkennen von ungünstigen Betriebszuständen zu einer Verlängerung der Lebensdauer von Anlagenkomponenten führen und den Energieverbrauch senken.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst wurden die Anforderungen an den Bewertungsalgorithmus sowie die LoRaWAN-Architektur bzw. den Datentransfer formuliert. Anschließend analysierte MultiCross, welche Daten/Informationen je überwachter Komponente bereits geräteintern erfasst werden. Während der Projektlaufzeit blieben mehrere Versuche erfolglos einen Hersteller oder Planer von kältetechnischen Anlagen für das Vorhaben zu gewinnen. In Folge konnte nicht analysiert werden, welche Messdaten ausschlaggebend sind, um die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Kompressors zu bestimmen.

Für die Komponente Luftfilter wurden historische Datenreihen eines RLT-Geräts am Standort eines Pharmaunternehmens analysiert. Für den Ventilator waren die Werte einer Vibrationsmessung entscheidend, um den Zustand bewerten zu können. Hierfür wurde ein Versuchsstand an der TH Bingen errichtet, um die notwendigen Datensätze an einem Versuchsventilator zu ermitteln.

Die Datenreihen zur Druckdifferenzmessung bei Luftfiltern wurden mittels stochastischer Funktionen und der linearen Regressionsanalyse ausgewertet. Die Rohdaten der Vibrationsmessung wurden einer Fast Fourier Transformation unterzogen. Die erarbeitete Erkennung ungünstiger Betriebszustände basiert auf einer Grenzwertüberschreitung in Abhängigkeit der Zeit. Das heißt, wenn bspw. die gemessene Druckdifferenz am Zuluftfilter des RLT-Geräts über dem zulässigen Grenzwert in einem definierten Zeitraum liegt, dann sollte der Filter bzw. die Filter kontrolliert werden. Die Grenzwerte wurden unter Berücksichtigung normativer Vorgaben sowie Praxiserfahrungen definiert. Zudem wurde ein Kommunikationsmodell unter Nutzung der LoRaWAN-Technologie und Anbindung externer Daten-Clouds erarbeitet.

Das erarbeitete mathematische Modell zum *SmartMaintenance* Algorithmus wurde in einen Programmablaufplan überführt und programmiert. In einem realen Muster-Supermarkt wurde das erarbeitete Gesamtsystem *SmartMaintenance* unter realen Bedingungen an einem RLT-Gerät getestet.

Ergebnisse und Diskussion

Die entwickelte Basisversion der *SmartMaintenance*-Software beinhaltet *das IO-Modul, die Schnittstelle zur TTN LoRaWAN Cloud, die Schnittstellen zu externen Clouds bspw. von Geräteherstellern, das Prognosemodul SmartMaintenance* und *das Frontend Maintenance-Modul*.

Das *IO-Modul* stellt sicher, dass die Daten der Messungen über die jeweiligen Schnittstellen kontinuierlich gespeichert werden und zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen. Ebenfalls können die Daten überwacht und visualisiert werden.

Das *Prognosemodul SmartMaintenance* nutzt diese Daten, um daraus bereinigte Tagesmittelwerte zu erzeugen. Die Bereinigung sieht vor, dass Ausreißer der Messungen aus den Datenreihen entfernt werden, um die Prognose nicht unnötig zu verfälschen. Für die Prognose wird über eine lineare Regression die Regressionsformel bestimmt. Daraus kann dann die Restlaufzeit bis zu einem definierten Schwellenwert berechnet werden.

Mit den Restlaufzeiten aller Komponenten kann dann der Betreiber problemlos den optimalen Wartungszeitpunkt bestimmen, der für alle Komponenten in Ordnung ist.

Die Schnittstellen zu *externen Clouds* sind notwendig, um die gerätebezogenen Messdaten herunterzuladen, welche in der jeweiligen Cloud des Anlagenherstellers kontinuierlich gespeichert werden.

Im *Frontend Maintenance-Modul* werden die Ergebnisse des Prognosealgorithmus, wie u. a. die voraussichtliche Anzahl von Tagen bis eine Wartung sinnvoll ist, dargestellt. In der Software kann man diese Kennzahl im *IO-Modul* als Wert überwachen und bei Unterschreitung einer selbst

gesetzten Grenze sich per E-Mail alarmieren lassen. Des Weiteren ist es möglich die prognostizierten Kennzahlen aller vorausschauenden Wartungen in Fließbildern zu visualisieren und somit im Blick zu behalten.

Die Innovation von *SmartMaintenance* ist die selbstständige Bewertung der Betriebszustände und Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten an RLT-Geräten mit dem Ziel die Lebensdauer dieser Komponenten zu verlängern und die Wartung effizienter zu gestalten. Zudem setzt *SmartMaintenance* für die Datenerfassung und -kommunikation teilweise auf die neuartige LoRaWAN-Technologie.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Gesellschafter der SIPE GmbH, Herr Prof. Dr. R. Simon, wird eine Teilmenge der erzielten Ergebnisse im Rahmen seiner Tätigkeit als Hochschuldozent an der TH Bingen im Fachbereich Life Sciences and Engineering einbringen.

In direkten Gesprächen mit Anwendern werden wesentliche Merkmale und Vorteile der entwickelten *SmartMaintenance*-Software erläutert.

Fazit

Die durchgeführten Arbeiten bzgl. der Entwicklung eines Algorithmus zur Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. des nächsten notwendigen Wartungstermins am Beispiel der Komponenten Luftfilter und Ventilatoren bei RLT-Geräten haben gezeigt, dass die elementare Voraussetzung für derartige Prognosen die Erfassung und Bereitstellung von Messdaten ist.

Ebenso wurde bewiesen, dass das prinzipielle Vorhaben, Messdaten an einer Stelle im Rechenzentrum zu zentralisieren und mit Hilfe eines Algorithmus mögliche Ausfallwahrscheinlichkeiten zu prognostizieren, erfolgreich umsetzbar ist.

Die aus ökologischer Sicht erzielten Einsparungen hinsichtlich eines verminderten Energieverbrauchs bei RLT-Geräten oder die Verlängerung der Produktnutzungszeit können aus ökonomischer Sicht sicherlich nicht immer den gewünschten Gewinn erzielen. Nur bei entsprechend teuren Verbrauchsmaterialien und langen Anfahrwegen kann auch ein finanzieller Mehrwert entstehen.

Inhaltsverzeichnis

A) Verzeichnis von Bildern und Tabellen	2
B) Zusammenfassung	3
1 Einleitung	4
2 Projektbeschreibung und Ergebnisse.....	7
2.1 Anforderungsprofil an SmartMaintenance	7
2.2 Gerätespezifische Messdaten & Normative Vorgaben zur Wartung von RLT- /Kältegeräten.....	7
2.3 Ungünstige Betriebszustände bei Luftfiltern und Ventilatoren und Handlungsempfehlungen	8
2.4 SmartMaintenance-Software zur vorausschauenden Wartung.....	11
2.4.1 Aufbau der SmartMaintenance-Software	11
2.4.2 Arbeiten & Ergebnisse zur Überwachung des Luftfilters	13
2.4.3 Arbeiten & Ergebnisse zur Überwachung des Ventilators	15
2.5 Nachrüstbares Sensorikkonzepts	19
2.6 LoRaWAN-Architektur & Anbindung externer Clouds für Datentransfer.....	20
2.7 Datensicherheit & Zugriffsschutz.....	21
2.8 Testlauf im Mustersupermarkt	21
2.9 Bewertung der erreichten Projektmeilensteine	23
2.10 Zusammenarbeit mit Dritten.....	24
3 Fazit und Ausblick	25

A) Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Screenshot zum IO-Modul der SmartMaintenance-Software	12
Abbildung 2:	Visualisierung mehrere RLT-Geräte im Maintenance-Modul	13
Abbildung 3:	Strömungskanal mit Ziehl-Abegg Ventilator im Labor der TH Bingen.....	15
Abbildung 4:	Versuchsventilator von Ziehl-Abegg (Quelle: https://www.ziehl-abegg.com)	15
Abbildung 5:	Diagramm der Rohdaten des Vibrationssensors vor FFT bei 1000 U/min ohne Unwucht	16
Abbildung 6:	Diagramm der mittels FFT aufbereiteten Rohdaten bei 1000 U/min ohne Unwucht	17
Abbildung 7:	Diagramm der mittels FFT aufbereiteten Rohdaten bei 1000 U/min und 1g Unwucht	17
Abbildung 8:	Kommunikationsschema zum Datentransfer an die SmartMaintenance- Software	21
Abbildung 9:	links: Schaltschrank zum eingebauten RLT-Gerät im Muster-Supermarkt, rechts: Muster-Supermarkt in Böhl-Iggelheim	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ungünstige Betriebszustände und mögliche Ursachen zur Fehlerbehebung bei Luftfilter und Ventilator	9
Tabelle 2:	Zulässige Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Maschinenklasse gemäß ISO 10816-1:1995(E) (eigene Darstellung).....	19
Tabelle 3:	Bewertung der erreichten Projektmeilensteine	23

B) Zusammenfassung

In der ersten Projektphase wurden auswertbare Daten für die Gerätekomponenten Luftfilter und Ventilator gesammelt bzw. erhoben. Beim Luftfilter wurden Datenreihen zur Druckdifferenzmessung von einem RLT-Gerät, welches bei einem Pharmaunternehmen installiert ist, für die Analyse genutzt. Zur Schaffung der nötigen Datengrundlage für die Messungen von Vibrationen bei einem Ventilator wurden Versuche an der TH Bingen mit einem Ventilator von Ziehl-Abegg durchgeführt.

Bei den Analysen der Datenreihen zur Druckdifferenzmessung wurde eine lineare Entwicklung der Druckdifferenz entdeckt. Da die Wertänderung beim Filter einen linearen Verlauf aufweist, ist eine Prognose zur Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. eines nächsten Wartungstermins möglich.

Die mittels dem Versuchsstand an der TH Bingen erfassten Rohdaten zur Vibrationsmessung wurden mit Hilfe der Fast Fourier Transformation analysiert. Es stellte sich bei der Gegenüberstellung der aufbereiteten Messwerte für den Durchlauf mit und ohne Unwucht am Ventilator ein deutlicher Schwingungsunterschied heraus.

Die entwickelten mathematischen Methoden zur Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. des nächsten notwendigen Wartungstermins bilden das Herzstück der entwickelten *Smart-Maintenance-Software*.

Die entwickelte Software besteht aus einem IO-Modul, den Schnittstellen zu externen Daten-Clouds, bspw. von Geräteherstellern und dem Prognosemodul. Das IO-Modul stellt sicher, dass die Daten der Messungen über die jeweiligen Schnittstellen kontinuierlich gespeichert werden und zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen. Ebenfalls können die Daten überwacht und visualisiert werden. Das Prognosemodul *SmartMaintenance* nutzt diese Daten, um daraus bereinigte Tagesmittelwerte zu erzeugen. Die Bereinigung sieht vor, dass Ausreißer der Messungen aus den Datenreihen entfernt werden, um die Prognose nicht unnötig zu verfälschen. Für die Prognose wird über eine lineare Regression die Regressionsformel bestimmt. Daraus kann dann die Restlaufzeit bis zu einem definierten Schwellenwert berechnet werden.

Aufgrund der hohen Datenmenge bei der Vibrationsmessung war ein Datentransfer via LoRa-WAN in der aktuellen Form nicht möglich. In diesem Zusammenhang ist über die Entwicklung eines LoRaWAN-fähigen Sensors nachzudenken. Es ist davon auszugehen, dass im Projekt angewandte Methoden und Vorgehensweisen auch auf andere gebäudetechnische Anlagen in Bezug auf die Prognose von Ausfallwahrscheinlichkeiten übertragbar sind.

An dem Vorhaben hat der Kooperationspartner MultiCross GmbH mitgewirkt, welcher für die Bereitstellung von Informationen zur Wartung von RLT-Geräten, Messdaten und dem Aufbau einer Versuchsanlage in einem Muster-Supermarkt zuständig war. Der assoziierte Partner TH Bingen stellte seine Laborinfrastruktur zur Verfügung, um die Vibrationsmessungen durchführen zu können. Mit Siemens fanden Abstimmungsgespräche bezüglich der Anbindung der Datencloud statt. Mit dem Unternehmen Ziehl-Abegg fand ein intensiver Austausch über die Vibrationsmessung und den erzeugten Daten statt.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat das Vorhaben mit dem Aktenzeichen 35679/01 mit einem Zuschuss von 124.992 € unterstützt.

Der Abschlussbericht kann über die Deutsche Bundesstiftung Umwelt bezogen werden.

1 Einleitung

Derzeit werden sowohl raumluftechnische als auch kältetechnische Anlagen präventiv gewartet. Das bedeutet, die überprüfungspflichtigen Einzelkomponenten bspw. einer Lüftungsanlage werden in vorgegebenen Intervallen überprüft. Laut den Normen VDI 6022 und DIN 1946-4 für lufttechnische Wartung ist eine Prüfung der Anlagen mit Befeuchtung alle 6 Monate und Anlagen ohne Befeuchtung alle 12 Monate durchzuführen. Dieses Wartungsprinzip birgt Nachteile. Der vorzeitige Wechsel von noch intakten Anlagenkomponenten, wie bspw. der Filter von Lüftungsanlagen, führt zu einer Materialverschwendung. Neben den Richtlinien, die die Kontrollperioden der Anlagenkomponente vorgibt, weist der VDMA an, die Filter in Normintervallen zu kontrollieren, diese jedoch erst bei Bedarf zu reinigen oder zu wechseln.

Auf der anderen Seite werden ungünstige Betriebszustände bspw. des Kompressors bei der mechanischen Kälteanlage oder des Ventilators bei der Lüftungsanlage erst beim Wartungstermin erkannt. Im Ergebnis hat die Anlage u. U. weit mehr Endenergie benötigt als bei der Planung vorgesehen.

Zukünftig sollen Wartungen zunächst zustandsorientiert und mittel- bis langfristig vorausschauend ablaufen. Bei der zustandsorientierten Wartung werden konkrete Messdaten in Echtzeit erfasst. Großer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Betriebsmittel sowie Anlagenkomponenten erst ausgetauscht werden, wenn diese verbraucht bzw. defekt sind. Im Bereich der Erfassung und Auswertung von Echtzeitdaten dominiert derzeit die Überwachung von bestimmten Werten. Das Unternehmen Smart City Solutions GmbH bietet eine Anwendung zur Raumluf-Überwachung in Klassenzimmern an. Mit Hilfe von LoRaWAN-fähigen CO₂-Sensoren, die in (Klassen-) Räumen installiert werden, wird die Zusammensetzung der Raumluf kontinuierlich gemessen und überprüft. Falls in einem Klassenraum nicht die optimale Raumluf herrscht, so können vom System automatisch Aktionen eingeleitet werden, die für eine Verbesserung der Raumluf sorgen.

Einen Schritt weiter geht die vorausschauende Wartung. Hierbei werden Daten aus verschiedenen Quellen (z. Bsp. Messdaten, Herstellerangaben) analysiert, um daraus Ausfallwahrscheinlichkeiten sowie Instandhaltungsmaßnahmen zu prognostizieren. Neben der Schonung von Ressourcen und Einsparung von Energie, können Wartungstermine sowie die sich daraus ergebenden Kosten eingeplant werden. Diese Art der Wartung findet für gebäudetechnische Anlagen derzeit keine Anwendung, da die notwendigen Algorithmen zur Verschneidung und Auswertung der Daten aktuell nicht vorliegen. Die bisherigen Kommunikationskosten zwischen Anlage und zentraler Datenbank machen dies unwirtschaftlich. Im Ergebnis wird das vorhandene Potenzial zur Schonung von Ressourcen und der Einsparung von Energie derzeit nicht gehoben. Das Unternehmen WEG, ein weltweit tätiger Hersteller von Elektromotoren, bietet für seine Elektromotoren ein Condition Monitoring an, welches die erfassten Betriebsdaten des Elektromotors auf einer App zur Verfügung stellt. Die Daten werden nicht via LoRaWAN sondern bspw. über das mobile Internet an eine Cloud übermittelt. Die App ruft dann die Daten zum jeweiligen überwachten Motor aus der Cloud ab. Vorteilhaft an dieser Lösung ist, dass die Motorenüberwachung nachrüstbar ist und bei älteren Motoren ohne entsprechende Überwachung einsetzbar ist. Aber die Lösung von WEG ist noch keine „echte“ Lösung zur vorausschauenden Wartung. Denn die Daten werden letztlich in einer nicht ausgewerteten Form dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Das heißt der Nutzer muss die Analyse übernehmen und ableiten, wann mit einem Ausfall zu rechnen ist.

Die kontinuierliche Erfassung wesentlicher Echtzeitdaten von RLT-/ Kälteanlagen und deren Auswertung sowie die Prognose des weiteren Betriebsverhaltens können zur Minimierung bzw. Behebung von umweltrelevanten Problemstellungen beitragen. Verstopfte Luftfilter in RLT-Geräten führen zu einem vermeidbaren Anstieg der Stromaufnahme des Ventilators. Neben erhöhten Betriebskosten steigt der Ausstoß an klimaschädlichen Treibhausgasemissionen. Die Produktion und Transport der Luftfilter bewirken ebenfalls eine Emittierung von Treibhausgasemissionen. Somit sollten intakte Luftfilter möglichst lang genutzt werden, um damit die Austauschquote gering zu halten. Denn eine geringe Austauschquote führt zu einem geringeren Einsatz an Filtern und damit zu einer Absenkung der produktions-/transportbedingten Treibhausgasemissionen. Der Ausfall einer gewerblichen Kälteanlage in einem Supermarkt führt dazu, dass die ungekühlten Lebensmittel nicht mehr an den Endkunden verkauft werden können. Folglich müssen diese Lebensmittel entsorgt werden. Deshalb ist unter dem Gesichtspunkt Ressourceneffizienz der Ausfall einer Kälteanlage unbedingt zu vermeiden und eine vorausschauende Anlagenüberwachung zielführend.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines *softwarebasierten Überwachungssystems zur Prognose bevorstehender Wartungs-/Instandhaltungsmaßnahmen und Identifikation ungünstiger Betriebszustände von wartungsrelevanten Bauteilen von raumluftechnischen Geräten (kurz RLT-Geräte) und Kälteanlagen*. Durch die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Betriebs-/Messdaten an ausgewählten Komponenten, wie bspw. Luftfilter oder Ventilator, sollte der zu entwickelnde Algorithmus die Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnen bzw. den Zeitpunkt eines Komponentenwechsels prognostizieren. Im Vorhaben sollten die Korrelationen zwischen am Gerät erfassten Daten und Herstellerdaten bei raumluftechnischen Anlagen für den Zuluftfilter und die Ventilatoren erarbeitet werden. Bei der Kompressionskälteanlage lag vor Projektbeginn der Untersuchungsschwerpunkt beim Kompressor. Das Überwachungssystem *SmartMaintenance* sollte die ausgewählten Anlagenbauteile von mehreren Geräten eines Gebäudes bzw. eines Quartiers überwachen können. Dafür sollte ein zentraler Datensammel-punkt geschaffen werden, welcher die gesendeten Messwerte der einzelnen Geräte speichert und an den Auswertungsalgorithmus weiterleitet. Zur Datenübertragung sollte das „Long Range Wide Area Network“ (kurz LoRaWAN) eingesetzt werden.

LoRaWAN ist ein Netzwerk, konzipiert für große öffentliche Netze, zur schnellen Datenübertragung von kleinen Datenmengen auf bis zu 10 Kilometer Entfernung. Eine Netzwerkbildung erfordert mehrere Gateway-Standorte, um Daten auf größeren Reichweiten zu übermitteln und um die Sicherheit der Datenübertragung zu erhöhen. Aktuell werden in großen und mittleren Städten die notwendigen LoRaWAN-Funkantennen aufgebaut. Da die Komponenten von LoRaWAN, bspw. im Vergleich zu einer UMTS-Infrastruktur, deutlich kostengünstiger sind, ist die Installation einer eigenen Antenne bei der Überwachung mehrerer Geräte bspw. bei einem Quartier gering. Hintergrund für die geringen Kosten ist die Tatsache, dass LoRaWAN Netze frei aufgebaut und genutzt werden dürfen. Für LoRaWAN hat die Bundesnetzagentur als zuständige Organisation eine Allgemeinzeilung veröffentlicht, so dass die Nutzung ohne Lizenzgebühr möglich ist. Somit fallen bei einem eigenen Netz keinerlei Gebühren für die Nutzung an. Aus diesem Grund wird LoRaWAN für die Entwicklung des Internet of Things (IoT) diskutiert und wahrscheinlich eine Basistechnologie werden. Derzeit wird LoRaWAN vornehmlich zur Datenerfassung von Gas-, Wasser- und Wärmehählern in Haushalten oder zur Überwachung von Fernwärmenetzen eingesetzt.

Zunächst wurden die Anforderungen an den Bewertungsalgorithmus sowie die LoRaWAN-Architektur bzw. den Datentransfer formuliert. Anschließend analysierte MultiCross, welche Daten/Informationen je überwachter Komponente bereits geräteintern erfasst werden. Während der Projektlaufzeit blieben mehrere Versuche erfolglos einen Hersteller oder Planer von kälte-technischen Anlagen für das Vorhaben zu gewinnen. In Folge konnte nicht analysiert werden, welche Messdaten ausschlaggebend sind, um die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Kompressors zu bestimmen.

Für die Komponente Luftfilter wurden historische Datenreihen eines RLT-Geräts am Standort eines Pharmaunternehmens analysiert. Für den Ventilator waren die Werte einer Vibrationsmessung entscheidend, um den Zustand bewerten zu können. Hierfür wurde ein Versuchstand an der TH Bingen errichtet, um die notwendigen Datensätze an einem Versuchsventilator zu ermitteln.

Die Datenreihen zur Druckdifferenzmessung bei Luftfiltern wurden mittels stochastischer Funktionen und der linearen Regressionsanalyse ausgewertet. Die Rohdaten der Vibrationsmessung wurden einer Fast Fourier Transformation unterzogen. Die erarbeitete Erkennung ungünstiger Betriebszustände basiert auf einer Grenzwertüberschreitung in Abhängigkeit der Zeit. Das heißt, wenn bspw. die gemessene Druckdifferenz am Zuluftfilter des RLT-Geräts über dem zulässigen Grenzwert in einem definierten Zeitraum liegt, dann sollte der Filter bzw. die Filter kontrolliert werden. Die Grenzwerte wurden unter Berücksichtigung normativer Vorgaben sowie Praxiserfahrungen definiert. Zudem wurde ein Kommunikationsmodell unter Nutzung der LoRaWAN-Technologie und Anbindung externer Daten-Clouds erarbeitet.

Das erarbeitete mathematische Modell zum SmartMaintenance Algorithmus wurde in einen Programmablaufplan überführt und programmiert. In einem realen Muster-Supermarkt wurde das erarbeitete Gesamtsystem SmartMaintenance unter realen Bedingungen an einem RLT-Gerät getestet.

2 Projektbeschreibung und Ergebnisse

2.1 Anforderungsprofil an SmartMaintenance

Zu Projektbeginn fand ein Treffen beim Kooperationspartner MultiCross GmbH statt. Es wurden der zeitliche Projektablauf sowie der Informationstransfer besprochen.

Im Anforderungsprofil zum Gesamtsystem *SmartMaintenance* wurden verschiedene Vorgaben an den Bewertungsalgorithmus, die Art und Weise des Datentransfers und die Datensicherheit formuliert.

Die Datenübertragung über LoRaWAN ist immer Ende-zu-Ende vom Gerät bis zum Anwendungsserver verschlüsselt. Vom Endgerät bis zum LoRaWAN-Netzwerkserver greifen die LoRaWAN-Sicherheitsmechanismen. Vom Netzwerkserver zum Anwendungsserver ist die Sicherheit über z.B. HTTPS oder VPN sichergestellt. Die sichere Datenhaltung im Rechenzentrum kann durch Wahl eines sicheren deutschen Rechenzentrums gewährleistet werden.

2.2 Gerätespezifische Messdaten & Normative Vorgaben zur Wartung von RLT-/Kältegeräten

Geräteintern erfasste Messdaten bei RLT-/Kältegeräten

Gemäß den Analyseergebnissen unseres Kooperationspartners, der MultiCross GmbH, ist bekannt, dass bei einem Differenzdruck von 200 bis 250 Pa (je nach Auslegungswiderstand) von einem zugesetzten Luftfilter ausgegangen werden kann. In diesem Fall ist der Filter zu wechseln. Dieser Differenzdruck ergibt sich aus dem Auslegungsdruckverlust der Anlage (z.B. 150 Pa) plus 100 Pa. Bei einem Meldedruck von 200 Pa wäre also die Hälfte der Lebenszeit des Filters erreicht, was im Front-End, also der Benutzeroberfläche, der *SmartMaintenance*-Anwendung angezeigt werden könnte. Das Wartungsunternehmen könnte sich über die Benutzeroberfläche die gewünschte RLT-Anlage mit dem aktuell gemessenen Differenzdruckwert anzeigen lassen. Neben dem Messwert könnte die berechnete Lebensdauer des Filters angezeigt werden. Gerade in größeren RLT-Geräten bspw. für die mechanische Lüftung von Bürogebäuden sind digitale Druckdifferenzmesser bereits integriert. Diese verfügen oft über Standardschnittstellen, die mit LoRaWAN Konvertern an SmartMaintenance angeschlossen werden können. Die Nachrüstung von Druckdifferenzsensoren in einer RLT-Anlage ist für einen Fachbetrieb jederzeit möglich.

Auf Grund der geringen Datenmenge, die bei der Überwachung von Filtern anfallen, ist der Einsatz von LoRaWAN zur Datenübertragung gut geeignet.

In Absprache mit dem Kooperationspartner MultiCross und dem während der Projektumsetzung zusätzlich akquirierten Praxispartner Ziehl-Abegg, einem international tätigen Hersteller von u. a. Elektromotoren und Ventilatoren, wurde ein Protokoll erstellt, in welchem die geräteintern erfassten Daten von RLT-Geräten und speziell Ventilatoren aufgelistet sind. Es stellte sich heraus, dass für die Bewertung des Betriebszustands des Ventilators die ausgesendeten Vibrationen relevant sind und für die Bewertung des Verschleißgrads von Filtern der Differenzdruck. Das Unternehmen Ziehl-Abegg bietet Ventilatormodelle an, welche über einen integrierten Vibrations-/Schwingungsmesser verfügen. Dieser zeichnet die Vibrationen in mm/s^2 auf. Die kontinuierlich erfassten Daten können dem *SmartMaintenance*-Algorithmus zur Verfügung gestellt werden, um damit den aktuellen Betriebszustand zu kontrollieren und Prognosen über

den Ausfall/Wechsel aufzustellen. Gemäß unseren Recherchen existieren zwar am Markt LoRaWAN-fähige Vibrationsmesser, welche bei bestehenden RLT-Geräten potenziell nachgerüstet werden könnten. Diese Sensoren liefern aber nicht die Daten, welche der SmartMaintenance-Algorithmus für seine Auswertung benötigt bzw. können die Datenmengen nicht über LoRaWAN übermittelt werden. Vielmehr führt der Sensor eine eigene Datenauswertung durch und übermittelt nur die Information, ob der gemessene Wert innerhalb des Grenzbereichs liegt oder warnt nach einer Grenzüberschreitung.

Während der Projektlaufzeit blieben mehrere Versuche erfolglos einen Hersteller oder Planer von Kältetechnischen Anlagen für das Vorhaben zu gewinnen. In Folge konnte nicht analysiert werden, welche Messdaten ausschlaggebend sind, um die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Kompressors zu bestimmen. Die weiteren Arbeiten innerhalb des Projekts konzentrierten sich deshalb auf die Komponenten Luftfilter und Ventilator von RLT-Geräten.

Normative Vorgaben zur Wartung von RLT-Geräten

Grundlage für die Wartung von RLT-Geräten ist das VDMA-Einheitsblatt 24197-1. Darin sind für jedes potenzielle Bauteil eines RLT-Geräts die zu prüfenden Parameter aufgelistet. Für jedes Bauteil ist eine jährliche oder halbjährliche Kontrolle vorgeschrieben. In Abhängigkeit des festgestellten Zustands ist das betroffene Bauteil zu ersetzen, um einen ordnungsgemäßen Betrieb lt. Herstellerangaben zu gewährleisten. Es gibt qualitative und quantitative Parameter, welche zu kontrollieren sind. Die qualitativen Parameter können derzeit nur durch einen Vororttermin bewertet werden. Bezogen auf das Bauteil Ventilator sind bspw. die Bewertung des akustischen Zustands oder ob die Anströmrichtung in Ordnung sind, zu kontrollierende qualitative Parameter. Bei den quantitativen Parametern sind die geförderte Luftmenge, die Leistungsaufnahme des Ventilators und die Druckdifferenz zu kontrollieren. Diese Parameter werden von neuen RLT-Geräten bereits geräteintern aufgezeichnet, sodass die *SmartMaintenance* Software diese Werte permanent kontrollieren könnte. Somit könnte die Software neben der Prognose des Verschleißes bzw. dem Zeitpunkt des Wechsels eines Bauteils auch die Kontrolle der quantitativen Prüfparameter von ausgewählten Bauteilen, wie bspw. dem Ventilator, von RLT-Geräten übernehmen.

Beim Luftfilter schreibt die Norm eine visuelle Prüfung des Filtermediums vor. Damit sind bspw. Verschmutzungen festzustellen. Als quantitativer Wert wird die Druckdifferenz kontrolliert. Ähnlich wie beim Ventilator, kann der quantitative Wert, i. d. F. die Druckdifferenz, kontinuierlich durch den *SmartMaintenance*-Algorithmus kontrolliert werden.

Die Analyse der Norm zur Wartung von RLT-Geräten zeigte, dass alle quantitativen Werte der zu prüfenden Komponenten Luftfilter und Ventilator durch eine softwaregestützte Anwendung überwacht und kontrolliert werden können. Eine Herausforderung stellen die qualitativen Prüfparameter dar, welche wahrscheinlich auch durch Algorithmen basierend auf den Methoden der künstlichen Intelligenz bzw. des maschinellen Lernens auswertbar sind.

2.3 Ungünstige Betriebszustände bei Luftfiltern und Ventilatoren und Handlungsempfehlungen

Für die zwei untersuchten Komponenten Luftfilter und Ventilator wurde analysiert, ob es einen oder mehrere Zahlenwerte gibt, die auf einen ungünstigen Betriebszustand hinweisen. Zu-

nächst wurden für Luftfilter und Ventilator ungünstige Betriebszustände definiert. In der nachfolgenden **Tabelle 1** sind für die zwei Komponenten ungünstige Betriebszustände, deren Wirkung, mögliche Ursachen und Handlungsempfehlungen aufgeführt. Innerhalb des SmartMaintenance-Algorithmus konnte diese Informationsgrundlage implementiert werden. Durch Verknüpfung der aktuell gemessenen Werte je Komponente mit den definierten Grenzwerten für einen ungünstigen Betriebszustand, kann dem Monteur bzw. Wartungsmitarbeiter Hinweise/Empfehlungen vorab mitgegeben werden, bevor er das entsprechende RLT-Gerät wartet.

Tabelle 1: Ungünstige Betriebszustände und mögliche Ursachen zur Fehlerbehebung bei Luftfilter und Ventilator

Komponente	Ungünstiger Betriebszustand	Ursache	Handlungsempfehlung	Relevanter Messwert
Luftfilter	Erhöhte Stromaufnahme des Ventilators	Verschmutzter Filter bspw. durch größere Schmutzpartikel im Raum, Induktionsstaub	Filter überprüfen/reinigen	Stromaufnahme Ventilator oder Druckdifferenz
	Erhöhte Druckdifferenz	Verschmutzter Filter	Filter überprüfen/reinigen	Druckdifferenzmessung
Ventilator	Zu geringe Luftfördermenge	Schmutzablagerungen am Ventilator/Filter	Ventilator/ Filter reinigen	Geförderter Volumenstrom
	Vibrationen	Beschädigte Ventilatorlagerung	Lager überprüfen und ggf. wechseln	Vibrationswert
	Erhöhte Stromaufnahme des Ventilators	Beschädigung am Motor	Motor austauschen	Stromaufnahme Ventilator
	Ventilator-, Luftströmungs- oder Motorengeräusche	Schalldämpfer falsch ausgelegt oder zu hohe Luftgeschwindigkeiten im Kanalsystem.	Schalldämpfer berechnen, evtl. austauschen. Luftgeschwindigkeiten reduzieren oder Gesamtluftstrom besser verteilen.	Vibrationswert

Damit der *SmartMaintenance*-Algorithmus zukünftig prognostizieren kann, ob innerhalb eines definierten Zeitraums der Eintritt eines der in Tabelle 1 beschriebenen ungünstigen Betriebszustände droht, müssen an ausgewählten RLT-Geräten kontinuierlich Daten u. a. zur Druckdifferenz oder Stromaufnahme des Ventilatormotors erhoben werden. Parallel dazu muss dokumentiert werden, wann es zu einer Störung bzw. einem Fehler kam und welche Ursache der Monteur vor Ort identifizieren konnte. Anhand der historischen Messwerte kann nachvollzogen

werden, welche zahlenmäßige Änderung bis zum Eintritt der Störung beim relevanten Messwert zu beobachten ist. Die erzielten Erkenntnisse aus der Messwertauswertung können anschließend in den *SmartMaintenance*-Algorithmus implementiert werden und verbessern dessen Prognosefähigkeit. Die beschriebenen Arbeitsschritte sind Tätigkeiten die weit über den Projektzeitraum hinausgehen und i. d. R. eine mehrjährige Datenaufnahme voraussetzen.

2.4 SmartMaintenance-Software zur vorausschauenden Wartung

2.4.1 Aufbau der SmartMaintenance-Software

Die durch uns entwickelte Basisversion der *SmartMaintenance*-Software, welche wir in unser modulares Softwaresystem flexCOCKPIT integriert haben, beinhaltet *das IO-Modul, die Schnittstelle zur TTN LoRaWAN Cloud, die Schnittstelle zur Siemens Climatix IC Cloud, die Schnittstelle zur Ziehl-Abegg Cloud, das Prognosemodul SmartMaintenance* und *das Frontend Maintenance-Modul*.

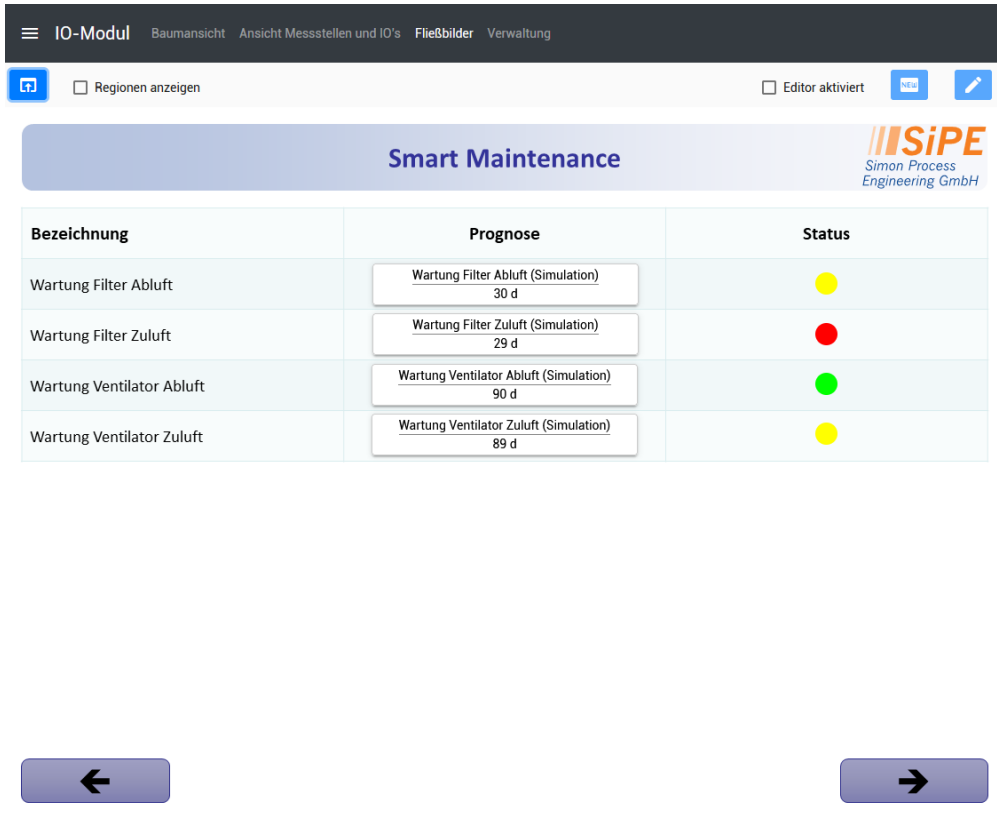
Die Hauptkomponente des Softwaresystems flexCOCKPIT ist das IO-Modul, das aus Backend und Frontend besteht. Das Backend stellt die Funktionen des Systems bereit, ist Schnittstelle zur Archivdatenbank und ist der Rechenkern des Systems. Das Frontend ist die Visualisierung des Systems und bietet die üblichen Möglichkeiten zur Benutzerinteraktion über ein Webinterface. Das *IO-Modul* stellt sicher, dass die Daten der Messungen über die jeweiligen Schnittstellen kontinuierlich gespeichert werden und zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen. Ebenfalls können die Daten überwacht und visualisiert werden.

Das *Prognosemodul SmartMaintenance* nutzt diese Daten, um daraus bereinigte Tagesmittelwerte zu erzeugen. Die Bereinigung sieht vor, dass Ausreißer der Messungen aus den Datenreihen entfernt werden, um die Prognose nicht unnötig zu verfälschen. Für die Prognose wird über eine lineare Regression die Regressionsformel bestimmt. Daraus kann dann die Restlaufzeit bis zu einem definierten Schwellenwert berechnet werden.

Mit den Restlaufzeiten aller Komponenten kann dann der Betreiber problemlos den optimalen Wartungszeitpunkt bestimmen, der für alle Komponenten in Ordnung ist.

Die Schnittstellen zur *Siemens Climatix IC Cloud* und zur *Ziehl-Abegg Cloud* sind notwendig, um die gerätebezogenen Messdaten abzuholen, welche in der jeweiligen Cloud des Anlagenherstellers kontinuierlich gespeichert werden. Der Kooperationspartner MultiCross GmbH nutzt für seine RLT-Geräte bspw. zum Zweck der Fernwartung und Aufzeichnung relevanter Gerätedaten die *Siemens Climatix IC Cloud*.

Das Prognosemodul führt die Berechnung aus und stellt die Ergebnisse dem *Frontend Maintenance-Modul* zur Verfügung. Das Ergebnis des Prognosealgorithmus ist die voraussichtliche Anzahl von Tagen bis eine Wartung sinnvoll sein wird. In der Software *flexCOCKPIT* kann man diese Kennzahl im *IO-Modul* als Wert überwachen und bei Unterschreitung einer selbst gesetzten Grenze sich per E-Mail alarmieren lassen. Des Weiteren ist es möglich die prognostizierten Kennzahlen aller vorausschauenden Wartungen in Fließbildern zu visualisieren und somit im Blick zu behalten (vgl. dazu Abbildung 1).



The screenshot shows the 'Smart Maintenance' interface within the 'IO-Modul'. The top navigation bar includes 'Baumansicht', 'Ansicht Messstellen und IO's', 'Fließbilder', and 'Verwaltung'. Below the navigation bar, there are checkboxes for 'Regionen anzeigen' and 'Editor aktiviert', along with 'NEW' and edit icons. The main content area features the 'Smart Maintenance' title and the 'SiPE Simon Process Engineering GmbH' logo. A table displays maintenance forecasts with columns for 'Bezeichnung', 'Prognose', and 'Status'. The table contains four rows of data, each with a maintenance task name, a forecast duration, and a corresponding status indicator (yellow, red, green, or yellow).

Bezeichnung	Prognose	Status
Wartung Filter Abluft	Wartung Filter Abluft (Simulation) 30 d	Yellow
Wartung Filter Zuluft	Wartung Filter Zuluft (Simulation) 29 d	Red
Wartung Ventilator Abluft	Wartung Ventilator Abluft (Simulation) 90 d	Green
Wartung Ventilator Zuluft	Wartung Ventilator Zuluft (Simulation) 89 d	Yellow

Abbildung 1: Screenshot zum IO-Modul der SmartMaintenance-Software

Im Screenshot aus Abbildung 1 sind die Grenzen bei 30 bzw. 90 Tagen festgelegt. D.h. bei einer Prognose von 0 bis 29 Tagen ist der Status rot, bei 30 bis 89 Tagen gelb und bei größer gleich 90 Tagen grün. Dies ist aber frei parametrierbar und kann an die jeweilige Wartungsaufgabe angepasst werden.

Neben der Visualisierung als Fließbild gibt es die Visualisierung im Maintenance-Modul (vgl. dazu Abbildung 2). Über die Angabe von Breiten- und Längengrad können die überwachten Anlagen auf einer Landkarte platziert werden. Dies ermöglicht eine optimierte Koordination der anstehenden Wartungen, um Anfahrtswege wenn möglich zu reduzieren.

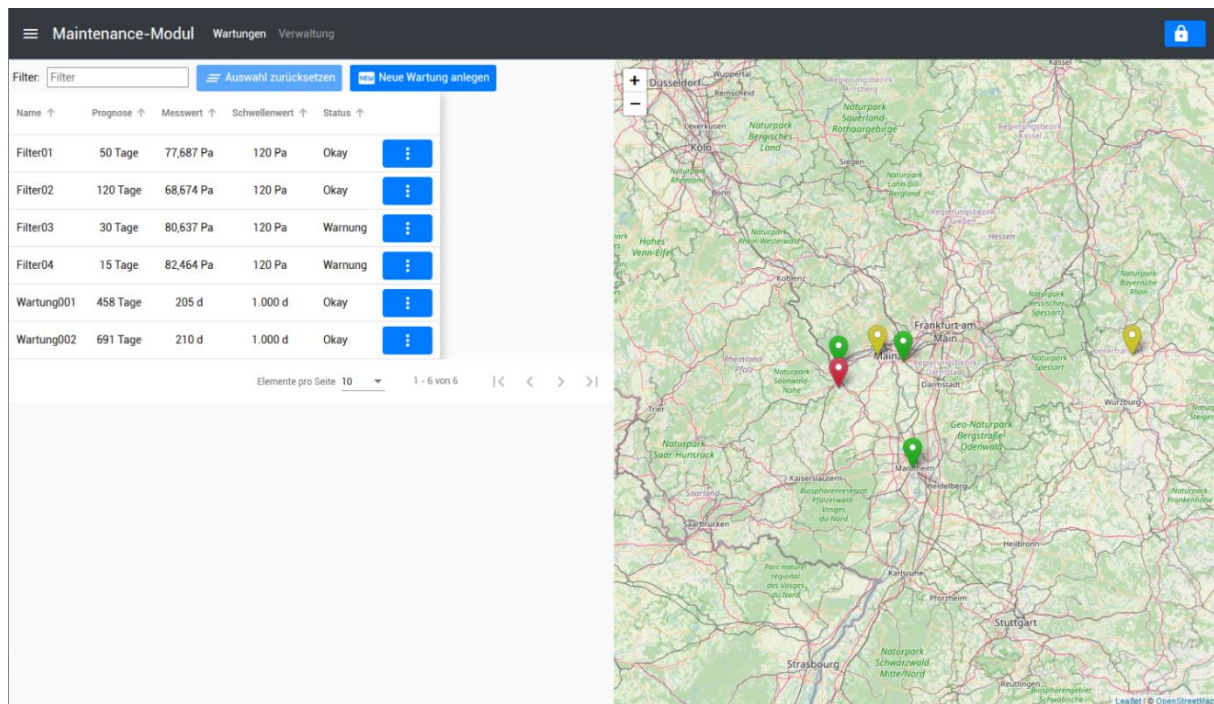


Abbildung 2: Visualisierung mehrere RLT-Geräte im Maintenance-Modul

Zudem wurde ein Handbuch zur Bedienung und Parametrierung des flexCOCKPIT Software-systems erstellt.

2.4.2 Arbeiten & Ergebnisse zur Überwachung des Luftfilters

Als erstes Prognosemodul des Backends wurde ein Algorithmus für eine lineare Prognose zur Vorhersage des Verstopfens eines Filters entwickelt. Mit Hilfe der linearen Regression wird die Vorhersage von Wartungszeitpunkten (Maintenance) bzw. die Prognose des Ausfalls des Filters vorgenommen. Der jeweilige Betrachtungszeitraum beginnt beim letzten Wartungstermin und endet zum Zeitpunkt der durchgeführten Wartung bzw. Fehlerbehebung beim Filter. Es werden die Tagesmittelwerte aus den kontinuierlich erfassten Werten zur Druckdifferenz gegen einen definierten Schwellenwert in diesem Zeitraum gelegt. Daraus berechnet sich der nächste Wartungszeitpunkt.

Es wurden archivierte Datenreihen von Druckdifferenzmessungen einer RLT-Anlage eines Pharmaunternehmens gesichtet und ausgewertet. Die Messungen wurden getätigt, um die Filterverschmutzung zu überwachen. Zunächst waren wir davon ausgegangen, dass wir eine E-Funktion vorfinden würden. Bei den von uns durchgeführten Analysen erkannten wir eine lineare Entwicklung der Druckdifferenz am betroffenen RLT-Gerät. Da die Werteänderung beim Filter über einen langen Zeitraum einen linearen Verlauf aufweist, ist eine Prognose möglich.

Im Zuge des Ein- und Ausschaltens der RLT-Anlage beim Pharmaunternehmen kommt es bei den Werten für den Druckverlust zu größeren Schwankungen. In Folge kamen wir zum Schluss, aus der großen Menge an Messdaten eines Tages, einen Tagesmittelwert zu bilden. Es kann dazu kommen, dass Daten vom Messsystem nicht richtig aufgenommen werden. Eine Standardabweichung ist nicht vorhanden.

Für das Prognosemodul zur Berechnung des nächsten notwendigen Wartungstermins bezogen auf den Luftfilter wurde ein Programmablaufplan erarbeitet, der folgende Punkte beinhaltet:

1. Kontinuierliche Speicherung der Rohwerte der Messung.

2. Bildung von Tagesmittelwerten aus den gespeicherten Rohdaten.
3. Automatische Bestimmung der linearen Funktion.
4. Berechnung des prognostizierten Wartungszeitpunktes mit Hilfe des definierten Schwellenwertes.

Dieser Ablaufplan ist in die entwickelte Software von SmartMaintenance (vgl. dazu Abschnitt 2.4.1) eingeflossen. Das Back-End für die automatische Berechnung des prognostizierten Wartungszeitraums für die Komponente Filter wurde programmiert. Die Implementierung der Prognosealgorithmen ist modular aufgebaut, so ist es möglich weitere Prognosemodule für die Komponenten Kompressor im Nachgang zu ergänzen. Der modulare Aufbau ermöglicht zudem eine schnelle Änderung des Programmcodes, bei einer Änderung des mathematischen Modells zur Prognose des Wartungszeitpunktes. Für die Programmierung wurde die Programmiersprache TypeScript genutzt.

2.4.3 Arbeiten & Ergebnisse zur Überwachung des Ventilators

Zur Schaffung der nötigen Datengrundlage für die Messungen von Vibrationen bei einem Ventilator wurden Versuche an der TH Bingen mit einem Ventilator von Ziehl-Abegg durchgeführt. In Abbildung 3 ist der Strömungskanal im Labor und in Abbildung 4 ist ein Ziehl-Abegg Ventilator dargestellt. Pandemiebedingt gab es Verzögerungen bei der Lieferung eines Mannschutzes für den Ventilator. Dieser Mannschutz ist aus Sicherheitsgründen zwingend erforderlich, damit Versuche im Strömungskanal der Hochschule gefahren werden können.



Abbildung 3: Strömungskanal mit Ziehl-Abegg Ventilator im Labor der TH Bingen



Abbildung 4: Versuchsventilator von Ziehl-Abegg (Quelle: <https://www.ziehl-abegg.com>)

An der TH Bingen wurden mehrere Versuche am Ventilator zur Erkennung von Vibrationen am Strömungskanal durchgeführt. Bei den Versuchen wurden Unwuchten mit unterschiedlichen Drehzahlen getestet. Anhand der Analyse der FFT (Fast Fourier Transformation) Daten konnten die Vibrationen klar nachgewiesen werden und ein Datensatz für ungünstige Kombinationszustände erfasst werden. Die nachfolgende Grafik in Abbildung 5 zeigt die erfassten Messwerte zur Vibrationsmessung im Rohzustand und vor der FFT. Im Rohzustand kann man erstmal nicht viel erkennen.

flexCOCKPIT® - Smart-Maintenance - Fast Fourier Transform (FFT)

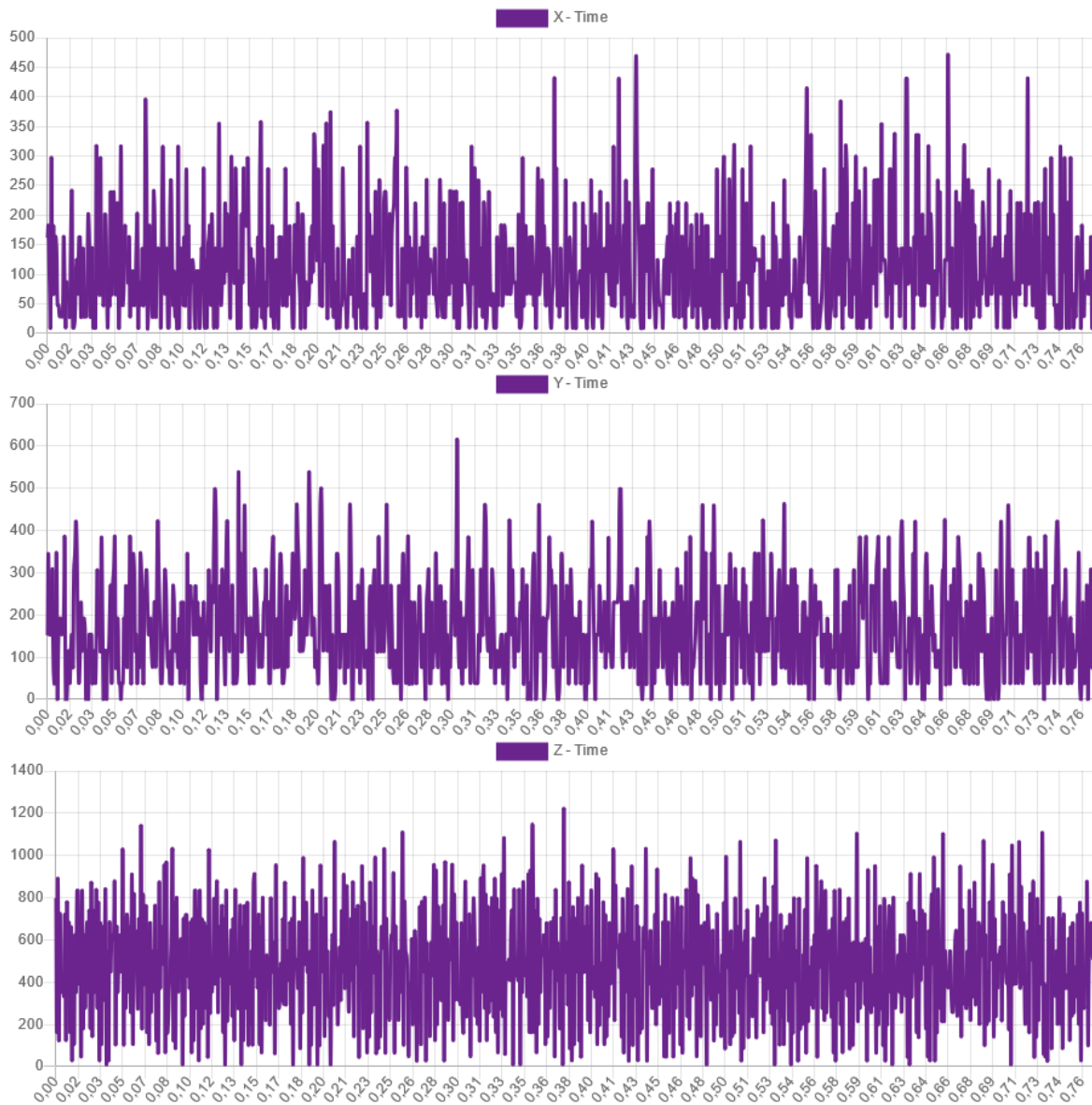


Abbildung 5: Diagramm der Rohdaten des Vibrationsensors vor FFT bei 1000 U/min ohne Unwucht

Die Abbildung 6 zeigt die FFT Daten einer Vibrationsmessung bei 1000 U/min ohne Unwucht und in Abbildung 7 mit einer Unwucht von 1 g Gewicht. Anhand der Skalierung der X-Achse kann ein 12 mal höherer Wert beim Diagramm mit den Messwerten mit einer installierten Unwucht abgelesen werden. Der durchschnittliche Wert der X-Achse ist bei dem Diagramm mit einem Gramm Zusatzgewicht ca. doppelt so groß.

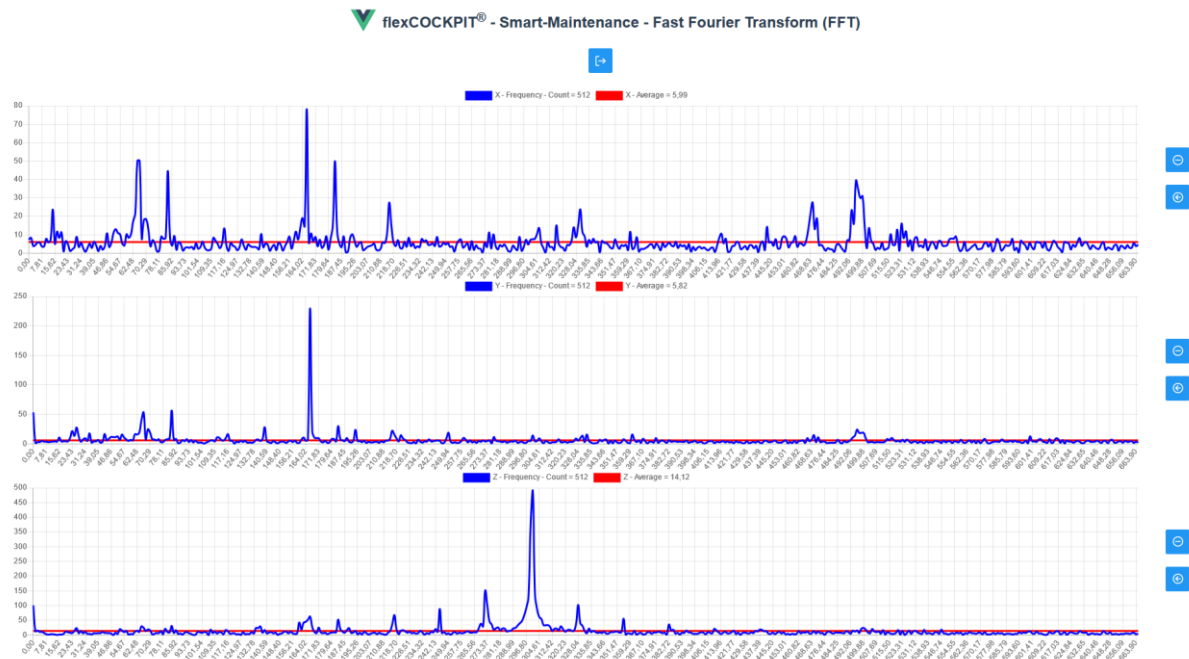


Abbildung 6: Diagramm der mittels FFT aufbereiteten Rohdaten bei 1000 U/min ohne Unwucht

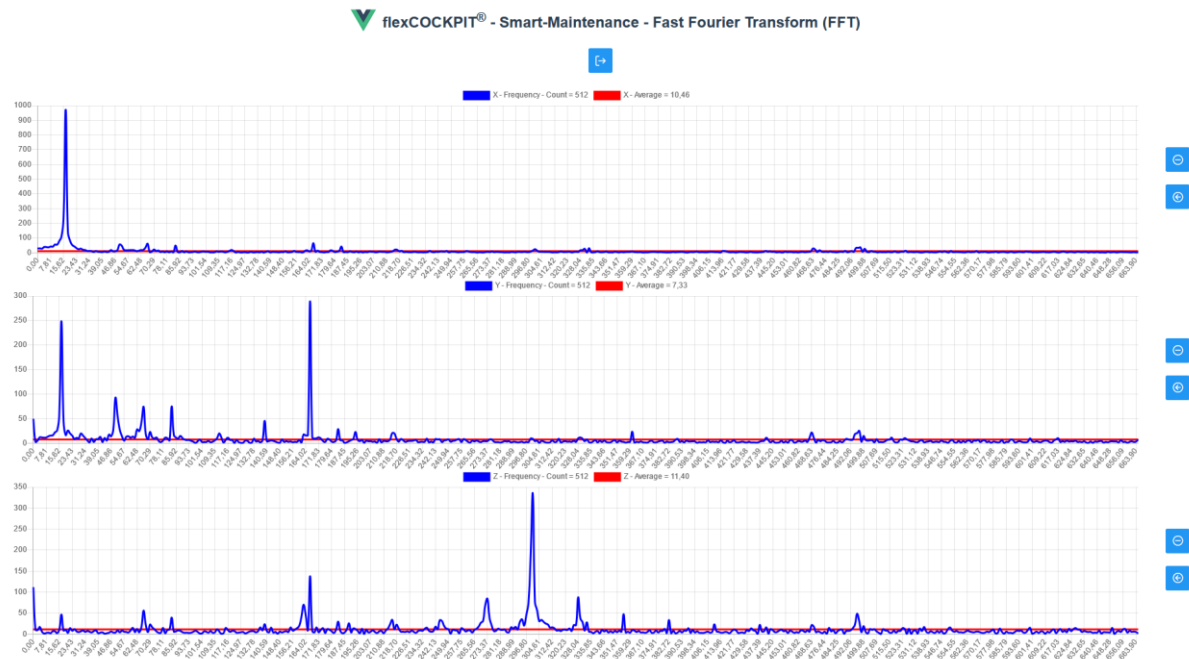


Abbildung 7: Diagramm der mittels FFT aufbereiteten Rohdaten bei 1000 U/min und 1g Unwucht

Für die Vibrationsanalyse wurde eine FFT Bibliothek für Fast Fourier Transformationen entwickelt und im Prognosemodul von *SmartMaintenance* hinterlegt. Die Entwicklung und Programmierung eines vue.js Web Frontend durch Einbindung dieser FFT Bibliothek als Werkzeug für die Analyse von Vibrationsmessungen ist erfolgt und wurde für die Vibrationsversuche verwendet.

Für das Prognosemodul zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Ventilators auf Grundlage der Vibrationsmessung wurde folgende Vorgehensweise in den SmartMaintenance-Algorithmus implementiert:

- Aktuell werden die Vibrationen des Ventilators vom internen Ziehl-Abegg Schwingungssensor erfasst und im Minutentakt vom Ziehl-Abegg Gateway ZABluegalaxy DIG-2019NE über das Internet an die Ziehl-Abegg Cloud übertragen. Der Umfang der Rohdaten und die notwendige häufige Übertragung sind über LoRaWAN nicht möglich, deshalb muss der Datentransfer über die Herstellercloud erfolgen.
- Die Rohdaten der Schwingungsmessung werden dann serverseitig analysiert. Die Analyse der Vibrationsdaten wird mit Hilfe der FFT (Fast Fourier Transformation) durchgeführt. Die FFT ist ein Verfahren zur Zerlegung eines zeitdiskreten Signals in seine Frequenzanteile, um diese besser analysieren zu können. → Frequenz, Amplitude x, Amplitude y, Amplitude z. Der hier verwendete Schwingungssensor zeichnet die Schwingungen für alle 3 Achsen separat auf, daher können hier die Vibrationen in verschiedene Richtungen unterschieden werden.
- Bestimmung der maximalen Amplitude für die aktuelle Drehzahl bzw. Frequenz aus den FFT Ergebniswerten.
- Berechnung der Schwinggeschwindigkeit 1. Ordnung für die aktuelle Drehzahl (=max. Amplitude / (2 * Pi * Frequenz) (Bei Ziehl-Abegg Ventilatoren könnte die Schwinggeschwindigkeit aus der Datenreihe genutzt werden.).
- Aktuelle Schwinggeschwindigkeit bewerten z.B. mit Tabelle aus ISO 10816-1 (siehe Tabelle 2) → Schwellenwert festlegen für z.B. Klasse 1 Maschine.
- Lineare Regression anwenden als Prognose mit den historischen Schwinggeschwindigkeiten (drehzahlabhängig) → Wann würde der Schwellenwert überschritten werden?

Tabelle 2: Zulässige Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Maschinenklasse gemäß ISO 10816-1:1995(E) (eigene Darstellung)

Schwinggeschwindigkeit [mm/s]	Klasse I kleine Maschinen < 15 kW	Klasse II mittlere Maschinen 15 - 75 kW	Klasse III große Maschinen starres Fundament	Klasse IV große Maschinen weiches Fundament
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	C	B
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

A = Neu aufgestellte Maschine
B = Dauerbetrieb geeignet
C = Kurzzeitbetrieb zulässig
D = Nicht zulässig

Im Rahmen der Erfassung der Messwerte für die Vibrationsmessung am Versuchsstand der TH Bingen stellte sich heraus, dass die Datenrate der Vibrationsmessung bei Ventilatoren sehr hoch ist. Aus diesem Grund kann die *Übertragung der Daten per LoRaWAN zum Problem werden*. Diesbezüglich wurden intensive Gespräche mit Ziehl-Abegg geführt. Aufbauend auf diesen Gesprächen wurde ein neuer Lösungsansatz abgeleitet, in welchem die Daten über die Cloud des Ventilatorherstellers abgeholt werden. Dabei werden die Daten der Vibrationsmessung zunächst mit dem Gateway ZAblegalaxy in die Ziehl-Abegg Cloud übertragen. Im weiteren Verlauf werden die Daten zyklisch abgerufen und durch das *SmartMaintenance* System analysiert. Dieses Verfahren sollte mit Hilfe kleiner Anpassungen auch auf andere Gerätehersteller übertragbar sein.

2.5 Nachrüstbares Sensorikkonzept

Gemäß den Angaben des Kooperationspartner MultiCross GmbH gehören *Temperatur- und Drehzahlsensoren bereits zum Stand der Technik bei Ventilatoren* und sind bei größeren Ventilatoren bereits werkseitig integriert. Digitale geräteinterne Druckdifferenzsensoren sind bei einigen Herstellern sowie bei der MultiCross GmbH verbaut. Dieser Sachverhalt gilt leider nicht für Vibrationssensoren an Ventilatoren. So werden Vibrationssensoren bspw. beim Hersteller Ziehl-Abegg nur bei ausgewählten Ventilatoren eingebaut. Die meisten älteren im Feld befindlichen Ventilatoren verfügen über keine entsprechenden Sensoren. Zudem ergab eine Technologierecherche, dass es derzeit keinen adäquaten LoRaWAN-fähigen Vibrationssensor gibt, welcher bei bestehenden Ventilatoren nachgerüstet werden könnte. *Folglich wäre es nützlich einen entsprechenden Sensor in einem eigenen Forschungsvorhaben zu entwickeln.*

2.6 LoRaWAN-Architektur & Anbindung externer Clouds für Datentransfer

Wie in den Ausführungen unter Abschnitt 2.2 dargestellt, stellt der Datentransfer der Messdaten zur Druckdifferenz über eine LoRaWAN-Infrastruktur kein Problem dar. Die zu übertragende Datenmenge ist vergleichsweise gering. Demgegenüber ist die Datenrate der Vibrationsmessung bei Ventilatoren sehr hoch und eine Übertragung per LoRaWAN wurde als kritisch bzw. herausfordernd eingestuft. Basierend auf intensiven Gesprächen mit Ziehl-Abegg wurde ein neuer Lösungsansatz abgeleitet, in welchem die *Daten über die Cloud des Ventilatorherstellers* abgeholt werden. Dabei werden die Daten der Vibrationsmessung zunächst mit dem Gateway ZAbuegalaxy in die Ziehl-Abegg Cloud übertragen. Im weiteren Verlauf werden die Daten zyklisch abgerufen und durch das *SmartMaintenance* System analysiert. Dieses Verfahren sollte mit Hilfe kleiner Anpassungen auch auf andere Gerätehersteller übertragbar sein. In Abbildung 8 ist die Übersicht der erarbeiteten Kommunikationswege und der dafür notwendigen Komponenten des gesamten *SmartMaintenance* Systems aufgeführt.

Im Hinblick auf die Datenübertragung und -speicherung wurde eine Anbindung zwischen Datenspeicher der Messwerte und der LoRaWAN Plattform TTN programmiert. Für die Speicherung der von der LoRaWAN Plattform TTN übertragenen Daten wird die Messdatenerfassungssoftware flexCOCKPIT verwendet. Die Messsignale werden über den LoRaWAN Connector an das IO-Modul des flexCOCKPIT Systems übertragen. Innerhalb der flexCOCKPIT Software werden die Daten in einer relationalen MySQL Datenbank (Maria-DB) archiviert. Für die Integration der Parser in die TTN Plattform des LoRaWAN Netzwerkes liegt ein genereller Plan vor, die genaue Einbindung muss jedoch für jedes Projekt einzeln angepasst werden. Die Auslegung orientiert sich maßgeblich an der eingesetzten LoRaWAN Hardware und den Signalen bzw. den Messungen des jeweiligen Projektes. Mit der typescript Programmierung MqttConnector wurde eine bidirektionale Anbindung zwischen flexCOCKPIT und der LoRaWAN Plattform TTN über das MQTT Protokoll erstellt. Mit der typescript Programmierung SiemensAPIConnector wurde eine bidirektionale Anbindung zwischen flexCOCKPIT und der Siemens Cloud über eine HTTPS REST API erstellt. Mit der typescript Programmierung Ziehl-AbeggAPIConnector wurde eine unidirektionale Anbindung zwischen flexCOCKPIT und der Ziehl-Abegg Cloud über eine HTTPS REST API erstellt. Die Entwicklung bzw. Anpassung der Parser auf der LoRaWAN Plattform TTN zur Auswertung der LoRaWAN Sensoren wurde für mehrere Sensortypen verschiedener Hersteller durchgeführt.

Die Schnittstelle zur TTN LoRaWAN Cloud, die Schnittstelle zur Siemens Climatix IC Cloud und die Schnittstelle zur Ziehl-Abegg Cloud wurden erfolgreich ins flexCOCKPIT integriert und getestet. Die Kommunikation wird immer vom flexCOCKPIT aus zu den jeweiligen Datenquellen initiiert und gehalten. Die automatisierte Datenabfrage aus der Siemens Climatix IC Cloud funktioniert ohne Probleme. Selbst eine zwischenzeitliche Unterbrechung der Datenverbindung zwischen der Siemens Steuerung und der Cloud führte lediglich dazu, dass Datenpakete in der Cloud nicht immer aktuell sind (vgl. dazu die Ausführungen zum Testlauf im Mustersupermarkt in Abschnitt 2.8). Dies beeinträchtigt aber funktional nicht die Verbindung zwischen dem flexCOCKPIT und der Siemens Climatix IC Cloud.

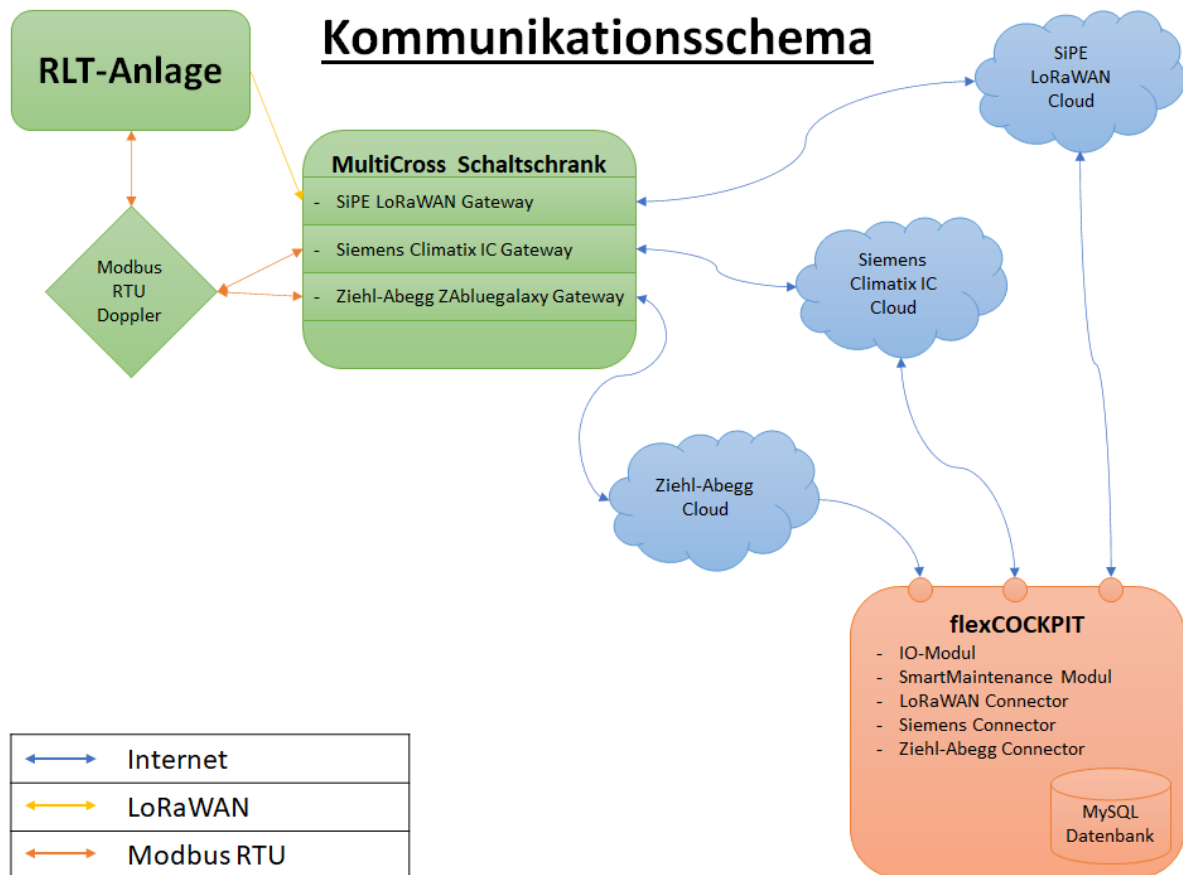


Abbildung 8: Kommunikationsschema zum Datentransfer an die SmartMaintenance-Software

Die entwickelte LoRaWAN-Architektur und Systematik zur Anbindung externer Clouds, bspw. von Geräteherstellern, ist vollständig entwickelt und einsatzfähig. Dadurch ist ein verlustfreier Datentransfer von den RLT-Geräten zur *SmartMaintenance*-Software möglich.

2.7 Datensicherheit & Zugriffsschutz

Die Sicherheit im Gesamtsystem wird auf jedem Kommunikationsweg im Internet durch eine sichere Verschlüsselung geschützt, die dem aktuellen Stand der Technik entspricht. LoRaWAN-Daten sind immer Ende-zu-Ende vom Gerät bis zum Anwendungsserver verschlüsselt, also auch die Funkstrecke zwischen LoRaWAN Gerät und Gateway.

2.8 Testlauf im Mustersupermarkt

Im 4. Quartal 2021 wurde das RLT-Gerät im Muster-Supermarkt in Böhl-Iggelheim vom Kooperationspartner MultiCross GmbH in Betrieb genommen (vgl. dazu Abbildung 9). Zu Beginn war die Datenübertragung zwischen dem gerätespezifischen Schaltschrank und unserer entwickelten *SmartMaintenance*-Software auf Grund eines zu schwachen Netzes nicht möglich.

Der Abruf des Datentransfers von der Siemens Climatic IC Steuerung zur Siemens Climatic IC Cloud, welche die erfassten Daten des RLT-Geräts vom Muster-Supermarkt speichert, war für den Kooperationspartner MultiCross GmbH sehr aufwendig. In der Basisversion war es nur

möglich, die Daten von der Siemens Cloud manuell für einen bestimmten Zeitraum herunterzuladen. Um eine automatisierte Datenabfrage und -speicherung durchzuführen, musste ein entsprechender Kanal entwickelt und programmiert werden.

Ab Anfang Januar 2022 wurde ein neues Mobilfunkmodem in Betrieb genommen, welches über mehr Übertragungskapazität verfügte, damit die relevanten Daten übermittelt werden konnten. Trotzdem konnte keine einwandfreie Übertragung sichergestellt werden. Offenbar sind die baulichen Bedingungen im Technikraum nicht für Mobilfunk geeignet. Für eine weitere Verbesserung sollte in Zukunft auf einen DSL-Anschluss gewechselt werden. Aufgrund der nicht optimalen Datenübertragung weisen die Datensätze teilweise Datenlücken auf. Außerdem ist der Zeitraum der erfassten Werte nicht so lang wie ursprünglich geplant. Die Datensätze wurden trotzdem für eine Prognose mit dem Prognosealgorithmus getestet. Wegen der Kürze des betrachteten Zeitraums wiesen die Datensätze noch keine Anhaltspunkte auf, dass sich der Betrieb der Anlagen durch Filterverschmutzung bzw. erhöhte Vibrationen verändert hat. Somit war das Prognoseergebnis der Maximalwert. Dies bestätigt aber nur, dass die jeweilige Komponente neuwertig ist und das entspricht auch der Realität.



Abbildung 9: links: Schaltschrank zum eingebauten RLT-Gerät im Muster-Supermarkt, rechts: Muster-Supermarkt in Böhl-Iggelheim

2.9 Bewertung der erreichten Projektmeilensteine

In der letzten Spalte der nachfolgenden Tabelle ist je Meilenstein aufgeführt, ob der jeweilige Meilenstein vollständig, teilweise oder nicht erreicht wurde.

Tabelle 3: Bewertung der erreichten Projektmeilensteine

MS	AP	Bezug zu AP	Grad der Erreichung
1	1	Ein überprüfbares Anforderungsprofil zu <i>SmartMaintenance</i> ist erarbeitet.	Vollständig erreicht.
2	3	Ein Maßnahmenkatalog zur Behebung ungünstiger Betriebszustände bei RLT-/Kältegeräten liegt vor.	Teilweise erreicht – Für Kälteanlagen liegt ein entsprechender Maßnahmenkatalog nicht vor, weil kein Partner zur Bereitstellung von Sachinformationen bzgl. der Wartung von Kompressoren bei Kälteanlagen gefunden werden konnte.
3	6	Ein funktionsfähiger SmartMaintenance Algorithmus liegt vor und steht für den Praxisversuch in AP 10 zur Verfügung.	Vollständig erreicht.
4	7	Ein übertragbares Konzept zur Nachrüstung von LoRaWAN-fähiger Messsensorik in RLT-/Kältegeräte ist erarbeitet.	Teilweise erreicht – Für Kälteanlagen nicht (vgl. dazu die Ausführungen zu Meilenstein 2).
5	9	Eine LoRaWAN-Architektur mit einem Sicherheitskonzept für die übermittelten Daten liegt vor.	Vollständig erreicht.
6	10	Testläufe zu SmartMaintenance wurden erfolgreich durchgeführt.	Vollständig erreicht.
7	11	SmartMaintenance erfüllt die Vorgaben gemäß dem Anforderungsprofil aus AP 1	Vollständig erreicht.

2.10 Zusammenarbeit mit Dritten

In der nachfolgenden Auflistung ist die Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner MultiCross GmbH sowie den weiteren assoziierten Praxispartnern beschrieben:

- Multicross GmbH: Als mittelständischer Hersteller für RLT-Geräte im mittleren bis großen Leistungsbereich (bis zu 20.000 m³/h Nenn-Volumenstrom pro Gerät) hat der Partner analysiert, welche Messdaten von RLT-Geräten bereits heute aufgezeichnet werden und welche normativen Vorgaben bei der Gerätewartung zu berücksichtigen sind (vgl. AP 2). Die Zusammenstellung potenzieller ungünstiger Betriebszustände bei RLT-Geräten und Handlungsempfehlungen zur Fehlerbehebung sind in die *SmartMaintenance*-Software eingeflossen (vgl. AP 3).

In Abstimmung mit dem assoziierten Partner Ziehl-Abegg wurde ein Vorgehen erarbeitet, um Vibrationsmesser bei bestehenden Ventilatoren innerhalb von RLT-Geräten nachzurüsten (vgl. AP 7). Ebenso die Anbindung an die selbstgenutzte Datencloud war ein Untersuchungsgegenstand.

Die Implementierung einer Kommunikationsstrecke bei einem Praxisgerät am Standort eines Mustersupermarkts und der Aufbau der verschiedenen Datenverbindungen wurden durch den Partner erbracht (vgl. AP 10).

- TH Bingen Technikabteilung: Die Hochschule unterstützte bei der erfolgreichen Montage und Inbetriebnahme des Strömungskanals mit Ziehl-Abegg Ventilator inklusive Vibrationsmessung und LoRaWAN Druckdifferenzmessung.
- Siemens: Die Abstimmungsgespräche bezüglich der API zur Anbindung der Siemens Climatix IC Cloud waren produktiv und führten zum gewünschten Ergebnis.
- Ziehl-Abegg: Das initiale Treffen bei Ziehl-Abegg, die Besprechungen und auch der Vor-Ort-Termin zur Inbetriebnahme der Vibrationsmessung am Ventilator an der TH Bingen waren zielführend und erfolgreich.

3 Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Arbeiten bzgl. der Entwicklung eines Algorithmus zur Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. des nächsten notwendigen Wartungstermins am Beispiel der Komponenten Luftfilter und Ventilatoren bei RLT-Geräten haben gezeigt, dass die elementare Voraussetzung für derartige Prognosen die Erfassung und Bereitstellung von Messdaten ist. Diesen Sachverhalt haben auch die Hersteller erkannt. Sowohl große, international tätige Hersteller wie Ziehl-Abegg als auch mittelständische Unternehmen, wie unser Kooperationspartner MultiCross, statten ihre Geräte mit Messsensorik aus, um unterschiedlichste Daten aufzunehmen. Auch vor diesem Hintergrund hatten wir einen Versuchsstand bei der TH Bingen zur Durchführung von Vibrationsmessungen bei einem Versuchsventilator aufgebaut, um notwendige Rohdaten zur Komponente Ventilator zu sammeln.

Im Zusammenhang mit der Generierung von Messwerten zur Vibrationsmessung stellten wir fest, dass die Datenmenge so hoch ist, dass ein Datentransfer via LoRaWAN kaum umsetzbar ist. Folglich diskutieren wir intern aktuell, ob eine Hardwareentwicklung für eine Vibrationsmessung mit integrierter LoRaWAN Übertragung in Frage kommt. Der Messsensor müsste mit einer eigenen kleinen Rechereinheit ausgestattet werden, um die Rohdatenmenge vor dem Weitertransfer via LoRaWAN aufzubereiten (vgl. dazu EdgeComputing).

Ebenso wurde bewiesen, dass das prinzipielle Vorhaben, Messdaten an einer Stelle im Rechenzentrum zu zentralisieren und mit Hilfe eines Algorithmus mögliche Ausfallwahrscheinlichkeiten zu prognostizieren, erfolgreich umsetzbar ist. Mit den Prognosedaten ist es möglich vorausschauende Wartungen zu planen und bestmöglich durchzuführen, da man gegebenenfalls mit Hilfe der Rohdaten bereits im Vorfeld Rückschlüsse auf die Art der „Beschädigung“ bzw. „Verschmutzung“ ziehen kann. Wir gehen davon aus, dass bestimmte von uns angewandte Methoden und Vorgehensweisen auch auf andere gebäudetechnische Anlagen übertragbar sind. Aus unserer Sicht ermöglicht eine softwaregestützte zustandsorientierte oder vorausschauende Wartung die Erschließung verschiedener Einsparpotentiale, die aus ökologischer Sicht positiv zu bewerten sind. Die dafür notwendigen zusätzlichen Ressourcen und Verbräuche müssen natürlich situativ bewertet werden und mit den Einsparpotentialen abgewogen werden. Nachfolgend haben wir die aus ökologischer Sicht positiven und negativen Aspekte der vorausschauenden Wartung am Beispiel von RLT-Geräten aufgelistet:

- Positiv:
 - Reduktion unnötiger Wartungstermine und Anfahrten zum Objekt.
 - Einsparung von zu früh ausgetauschten Verbrauchsmaterialien.
 - Bessere Ferndiagnosemöglichkeiten ermöglichen bessere Beratung und reduzieren gegebenenfalls wiederum Anfahrten zur Anlage.

- Negativ:
 - Wenn nicht bereits vorhanden, ist zusätzliche Sensorik und LoRaWAN Hardware oder alternative Übertragungstechniken notwendig. Dies verursacht Kosten, die im Projekt berücksichtigt werden müssen.
 - Der Server in einem Rechenzentrum zur zentralen Messwertespeicherung und Prognose führt zu weiteren Kosten.

Die aus ökologischer Sicht erzielten Einsparungen können aus ökonomischer Sicht sicherlich nicht immer den gewünschten Gewinn erzielen. Nur bei entsprechend teuren Verbrauchsmaterialien und langen Anfahrwegen kann auch ein finanzieller Mehrwert entstehen.

Die gewonnenen Erkenntnisse im Bereich LoRaWAN Sensorik und alternativen Übertragungstechniken, sowie die Informationen bezüglich der Vibrationsmessung und Analyse können wir für kommende Projekte sehr gut weiternutzen.