GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

ReziProK
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft –
Innovative Produktkreisläufe

BMBF-Fördermaßnahme

**„Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft –
Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“**

SACHBERICHT

Teil I: Kurzbericht

Neue Geschäftsmodelle für die Weiternutzung technischer Systeme basierend auf einer einfachen, dezentralen Zustandsbestimmung und Prognose der Restnutzungsdauer

New business models for the continued use of technical systems based on a simple, decentralized status determination and forecast of residual service life

LongLife

TP 1 Qualitätsstandards, Prüfmethoden, Geschäftsmodelle und Projektkoordination (033R246A)

TP 2 Prozesssicherheit bei Komponenten einer Schuhmaschine (033R246B)

TP 3 Methoden und Tools (033R246C)

TP 4 Entwicklung eines Funktionsmodells des mobilen Prüfstands (033R246D)

TP 5 Validierung der Modelle und Datenzusammenführung (033R246E)

Projektlaufzeit: 01.07.2019 – 31.12.2022

DESMA THE FINEST IN SHOE PRODUCTION ENGINEERING · encoway standard for variety · CoSynth · aimpulse intelligent systems · Universität Bremen · BIK

Inhaltsverzeichnis

I.1 Aufgabenstellung 3

I.2 Einbettung des LongLife-Lösungsansatzes in den Stand der Technik 4

I.3 Ablauf und Organisation 6

I.4 Wesentliche Ergebnisse 7

I.5 Literatur 16

I.6 Erklärung bzgl. der Nutzung des Sachberichts 17

I.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben LongLife wurde von den Projektpartnern DESMA Schuhmaschinen GmbH (Achim bei Bremen), encoway GmbH (Bremen), CoSynth GmbH & Co. KG (Oldenburg), Aimpulse Intelligent Systems GmbH (Bremen) sowie der Universität Bremen mit dem Forschungsinstitut BIK (Integrierte Produktentwicklung) durchgeführt. Ziel war es aufzuzeigen, dass mit Hilfe dezentraler Sensorik (mobile Prüfstation) eine Zustandserfassung technischer Systeme möglich ist, um hierauf aufbauend eine Zustandsdiagnose bzw. -prognose ableiten zu können.

Viele Komponenten werden heute vorzeitig einer stofflichen Verwertung bzw. einer Entsorgung zugeführt, was wenig nachhaltig ist und einen großzügigen Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen bedeutet. Dieses bezieht sich dabei nicht nur auf die direkt betroffenen Komponenten und Systeme und deren Herstellungsprozess, sondern auch auf indirekte Ressourcen, wie beispielsweise Services und Reiseaktivitäten. Gründe für einen frühzeitigen Austausch sind u.a.:

- Unsicherheiten in Bezug auf den tatsächlichen Zustand einzelner Komponenten und der zu erwartenden Lebensdauer.
- Optionen für eine Weiternutzung bzw. Wiederverwendung in anderen Anwendungsszenarien mit geringeren Anforderungen sind nicht bekannt oder werden nicht genutzt.
- Im Allgemeinen sind Geschäftsmodelle nicht auf eine Weiternutzung bzw. Wiederverwendung ausgerichtet. Für einen Teil der beteiligten Stakeholder ist es lukrativer, neue Komponenten zu verwenden als vorhandene weiter zu nutzen.

Mechanische Systeme haben vielfach eine begrenzte Lebensdauer aufgrund von Verschleiß, unsachgemäßem Einsatz etc. und im Allgemein werden Wartungsintervalle vorgebeben, die verhindern sollen, dass es zu einem Betriebsausfall kommt. Die Vorgaben sind immer systembezogen und gelten damit übergreifend für alle Varianten eines Produkts und sind nicht ressourcenschonend, da ein Wartungsservice i. A. verbunden ist mit dem frühzeitigen Austausch von kritischen Komponenten.

Entwickelt bzw. verifiziert wurden Methoden und Werkzeuge zur Prognose des weiteren Nutzungspotenzials von Komponenten anhand von zwei unterschiedlichen Use Cases. Zum einen handelte es sich um die *Einspritzeinheit einer Schuhmaschine* und zum anderen um ein *Schnelllaufrolltor*, welches in unterschiedlichen Konfigurationen in Betriebsstätten eingesetzt wird. Beide Anwendungsfälle haben gemeinsam, dass es sich vorrangig um mechanische Systeme mit typischen Maschinenelementen (Wälzlager, Spindel, Feder, Zahnriemen, Halte- bzw. Zurrgurt) handelt, die nach Angaben der Hersteller zumeist für einen Ausfall verantwortlich sind. Darüber hinaus wurden Referenz-Geschäftsmodelle entwickelt, die sich aus einer Weiternutzung ergeben können. Hierzu wurden existierende und in der Literatur beschriebene Smart-Service-Geschäftsmodelle identifiziert, dokumentiert und analysiert. Durch eine Synthese der Geschäftsmodelle können dann Smart-Service-Referenzgeschäftsmodellen definiert werden, die Unternehmen als Vorlage für die Entwicklung eigener Smart-Service-Geschäftsmodelle im Zusammenhang mit der mobilen Prüfstation nutzen können („*Win-win-Situation*“ bei einer Weiternutzung).

Eine Nachhaltigkeitsbewertung ergänzt den betriebswirtschaftlichen Fokus der Geschäftsmodelle um die Dimensionen Umwelt, Soziales sowie den Aspekt der externen Kosten. Hierbei wurden die Nachhaltigkeitsauswirkungen der konkreten Anwendungskontexte (Use Cases) untersucht und für die entwickelten Referenzgeschäftsmodelle verallgemeinert.

I.2 Einbettung des LongLife-Lösungsansatzes in den Stand der Technik

Technische Systeme basieren auf dem Zusammenspiel ihrer Bauteile, die über ihre Betriebsphase Abnutzungen erfahren. Die Lebensdauer eines Systems ist i. d. R. durch die Lebensdauer seiner Bauteile bedingt. Betriebsstörungen und auch Betriebsausfälle einzig über wenige Kenngrößen (betriebsbereit / nicht betriebsbereit / Störung etc.) zu erfassen, reicht heute aber in vielen Fällen nicht mehr aus, da die beteiligten Stakeholder spezifischere Informationen benötigen. Hieraus sind Condition-Monitoring-Systeme entstanden. Diese beschreiben ein Verfahren zur Echtzeit-Zustandsüberwachung eines Systems via Fernzugriff und geben in Bezug auf verbaute Sensorik detailliert wieder, an welcher Stelle in einem System Veränderungen festgestellt wurden. Notwendig sind hierfür robuste Sensoren, eine permanente Datenerfassung und -übertragung sowie eine Auswerte- und Monitoring-Einheit. Monitoring Software gibt es in einer großen Bandbreite für die Überwachung physikalischer Größen. Temperatur, Drehzahl etc. werden beispielsweise hier erfasst und ausgewertet. Abweichungen von vorab festgelegten Schwellwerten werden dann als Störung gekennzeichnet und diese initiieren Folgeprozesse, wie vorgezogene Wartungsarbeiten oder auch den Austausch von Ersatzteilen. Diese wiederum eröffnen neue Ansätze für weitere, geänderte Geschäftsmodelle mit einem Fokus auf Ressourceneffizienz.

KI-Technologien (KI: Künstliche Intelligenz) sind seit einigen Jahren ein Thema der IT und deren Anwendung auch die Basis für neue, digitale Geschäftsmodelle. KI beschreibt im Zusammenhang mit dem Vorhaben LongLife die Anstrengungen, Maschinen intelligent zu machen und vorausschauend auf den Zustand betrachteter kritischer Komponenten zu schauen. Wurden in der Vergangenheit vorrangig regelbasierte Ansätze verfolgt, finden sich heute vielfach datengetriebene Ansätze in vielen Anwendungen wieder. Allgemein bedeutet ein regelbasierter Ansatz, dass mit einem festgelegten Modell vorab definierte Regeln befolgt werden und als Ergebnisse bestimmte Folgeaktionen initiiert werden (bspw. Entscheidungsbäume mit vordefinierten Filtern: Betriebstemperatur > 80 °C => Belastung reduzieren um …. / Betriebsstunden > 1000 h => Austausch von Komponente …). Es ist also kein flexibler Prozess gegeben. In entsprechenden Expertensystemen bzw. wissensbasierten Systemen wird also zunächst das spezifische Fachwissen in formale Regeln übersetzt, die bei Eintreten eines bestimmten Ereignisses eine bestimmte Handlung automatisch auslösen sollen [Mainzer und Kahle 2022]. Demgegenüber definiert sich ein datengetriebener Ansatz dadurch, dass hier die Verwendung der zugrundeliegenden Daten genutzt wird, um quasi in Echtzeit bestimmte Muster über Kausalitätszusammenhänge erkennen zu können und diese spontan in ein dynamisches Modell zu überführen. Auswertung und Umsetzung erfolgen permanent und in Echtzeit. In Hintergrundprozessen werden chronologische Zusammenhänge verglichen, wobei konversionsstarke wie auch abgebrochene Pfade beachtet werden. Ein datengesteuerter (getriebener) Ansatz beinhaltet also die Sammlung und Analyse von Daten, um hierauf fundierte Entscheidungen zu treffen.

Doch bevor dieses für das Projekt LongLife erfolgen konnte, musste ein System eingerichtet werden, das einige wichtige Fragen im Zusammenhang mit Daten beantwortet:

- Welche Art von Entscheidungen sind zu treffen?
- Wie viele Daten werden benötigt, um eine aussagekräftige Entscheidung treffen zu können?
- Welche Art von Daten müssen erfasst werden?
- Wo befinden sich diese Daten?
- Wie lange müssen die Daten gesammelt werden und wie oft?

Das LongLife-Projektkonsortium verfolgte hierbei einen flexiblen Lösungsansatz, in dem unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt wurden.

Unternehmen sind in der Regel sehr restriktiv bzgl. des Zugriffs auf Firmennetze und die eigenen Daten. Dieses fanden wir auch bei den von uns betrachteten Unternehmen vor. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Datenerfassung (was den Stand der Technik entspricht und abhängig ist von der Leistungsfähigkeit der Mess- und Datentechnik ist) wurde deshalb ein temporärer Zugriff auf die Daten der überwachten kritischen Komponenten gewählt, um die Hemmschwelle zu senken. Dieses setzte aber wiederum voraus, dass technisch die Voraussetzungen gegeben sein mussten, Modelle zu entwickeln, die es erlaubten, diese diskreten Strukturen abzubilden. Rechenzeit, Speicherplatz, Übertragungsraten gehörten hier zu den wesentlichen diskreten Größen.

Aus der Konstruktion ist bekannt, dass mit Hilfe analytischer Modelle das Betriebsverhalten mechanischer Komponenten abgebildet werden kann. Jedes Bauteil weist während der Betriebsphase eine bestimmte Gebrauchs- und Funktionsfähigkeit auf. Diese Fähigkeiten nehmen in der Regel während der Betriebsphase ab und in der Literatur [DIN 31051 2012, Ritter 2011] wird dieses als Abnutzungsvorrat bezeichnet. Vor der ersten Beanspruchung verfügt ein Bauteil über einen Abnutzungsvorrat von 100 %, der mit der Dauer, Häufigkeit und Stärke der auftretenden Belastungen abnimmt. Dieser Abnutzungsvorrat reduziert sich im Verlauf der Betriebsphase und kann aber durch verschiedene Maßnahmen wiederhergestellt bzw. verzögert werden; diese werden nach DIN 31051 als Instandsetzungsmaßnahmen zusammengefasst.

Im Betrieb wirken auf ein Bauteil eine oder mehrere Belastungen (Kräfte, Momente), die konstant oder zeitlich veränderlich sein können und auch andere Störgrößen wie z. B. Temperaturschwankungen ein. Diese Belastungen führen wiederum zu Beanspruchungen im Bauteil und sie müssen im Gleichgewicht zu einander stehen, um keine Bauteilschädigungen hervorzurufen. Ein Bauteilversagen ist in der überwiegenden Anzahl von Fällen auf dynamisch wirkende Belastungen (Kräfte, Momente, Temperatur etc.) zurückzuführen. Ein Ansatz für einen sicheren Betrieb ist die Bauteilauslegung nach Gesichtspunkten der Betriebsfestigkeit [Wächter, Müller und Esderts 2017]. Hierbei wird ausgehend von den Kennwerten eines verwendeten Werkstoffs rechnerisch ermittelt, ob die Grenzwerte einer Beanspruchung die maximal zulässigen Werte übersteigen [Radaj und Vormwald 2007]. Erfahrungsgemäß unterliegen die Ergebnisse einer großen Streuung. Schwankungen bei Belastungen, verschiedene Korrekturfaktoren, die aus experimentellen Versuchen verallgemeinert wurden bzw. die unternehmensspezifisch berücksichtigt wurden, führen u. a. in der Praxis und bei konkreten Anwendungsfällen zu Abweichungen. Die theoretisch nachgewiesenen, ertragbaren Lebensdauerwerte werden deshalb immer mit Sicherheitsbeiwerten beaufschlagt, die die gesamten Unsicherheiten bei einer Auslegung kompensieren sollen.

Eine zusätzliche Datenerfassung und -speicherung bedeutet für ein Produkt bzw. System immer, dass hierfür entsprechende Sensorik zu integrieren ist. Dieses ist oftmals verbunden mit Produktänderungen, da nicht immer eine einfache Kopplung, beispielsweise über einen Adapter, gegeben ist. Für einen Hersteller muss also deutlich werden, welcher Mehrwert durch eine sensorische Überwachung generiert werden kann, da ansonsten nur zusätzliche Ressourcen gebunden werden. Neben den Produktänderungen sind dies Investitionen für Informationssysteme zur Datenspeicherung und -analyse sowie die benötigten Personalressourcen.

Um einen Mehrwert zu beschreiben, kann üblicherweise über ergänzende Geschäftsmodelle nachgedacht werden, um mit den erfassten Daten zusätzliche Gewinne zu erwirtschaften. Ein Geschäftsmodell besteht aus einem Nutzenversprechen, einer Architektur der Wertschöpfung und einem Ertragsmodell. Durch seine Beschreibung

wird u.a. ein Unternehmen in die Lage versetzt, die Schlüsselfaktoren des unternehmerischen Erfolges oder Misserfolges zu identifizieren. Das *Business Model Canvas* [Osterwalder, Pigneur 2011] ist eine Methode zur Visualisierung, Strukturierung und Weiterentwicklung von Geschäftsideen und basierend auf den technischen Lösungsansatz sollen hiermit Referenz-Geschäftsmodelle entwickelt werden und damit einen Beitrag liefern, um die Attraktivität der entwickelten Lösung zu steigern.

I.3 Ablauf und Organisation

Das Gesamtvorhaben LongLife wurde in 11 Arbeitspaketen organisiert. Beginnend mit einer umfassenden „Anforderungsanalyse“ (AP1) bis hin zum AP10 „Ökonomische und Ökologische Betrachtung“ wurden die inhaltlichen Arbeiten unterteilt. Ergänzt wurden diese durch das „Projektmanagement“ (AP11). Der Gesamtprojektzeitraum betrug 42 Monate.

Regelmäßige Zusammenkünfte zwischen allen Projektpartnern stellten über die gesamte Projektlaufzeit den Informationsaustausch sicher. Darüber hinaus wurde dieses ergänzt durch spezifische Arbeitstreffen zwischen einzelnen Partnerunternehmen.

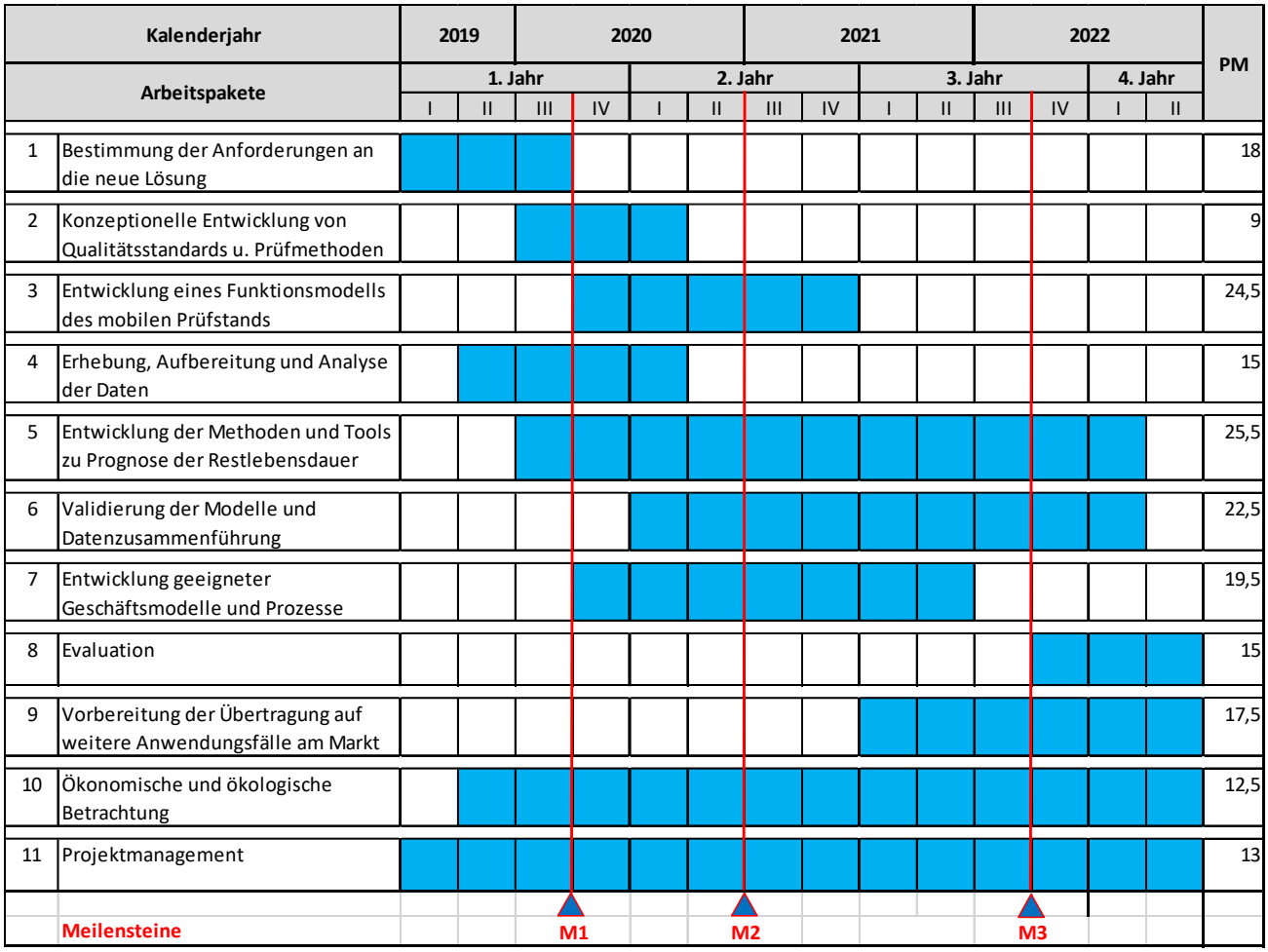

Abbildung 1: Der LongLife-Projektplan

I.4 Wesentliche Ergebnisse

Um die übergeordneten Projektziele zu erreichen, wurden die in den voranstehenden Kapiteln benannten Themen adressiert. Nachstehend erfolgt eine Unterteilung und Beschränkung auf die wesentlichen Themen „Technisches System inkl. der Datenakquisition“, „Vorhersagemodell / Diagnose / Prognose“, „Geschäftsmodelle“ sowie der Beitrag zur „Ressourceneffizienz“.

Technisches System inkl. der Datenakquisition und Entwicklung der LongLife-Sensorbox

Ansatz im Verbundvorhaben war es, eine temporäre Lösung zu konzipieren und zum Einsatz zu bringen, die bereits vorhandene Sensorik mit ergänzender Sensorik sowie Expertenwissen kombiniert, um hierauf aufbauend eine Datenanalyse mit Hinweisen über den Zustand kritischer Komponenten durchführen zu können. Das zu entwickelnde Konzept sollte dabei die vorhandene Dateninfrastruktur nutzen, aber nicht direkt in die vorhandene Betriebsdatenerfassung eingreifen.

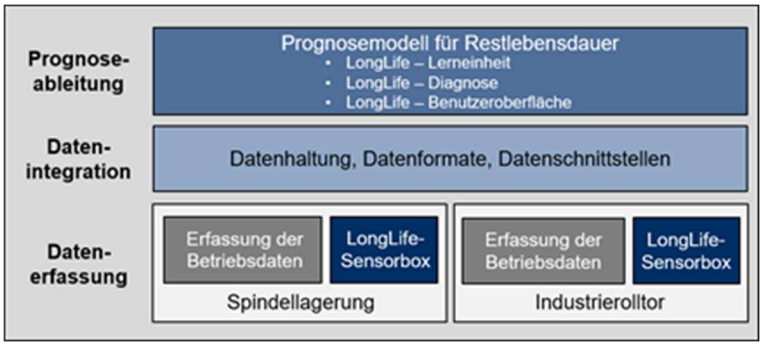

Abbildung 2: Die Konzept der Datentechnik im LongLife-Ansatz

In Bezug auf die Spindellagerung der Einspritzeinheit einer Schuhmaschine bedeutete dieses, dass eine eigenständige *LongLife-Engine* als weitere Cloud-Anwendung, die parallel zum *Smart Shopfloor-System* (Betriebsdaten) der Fa. DESMA fungierte, zu konzipieren war. Analog hierzu galt das gleiche für das *Schnelllaufrolltor (Industrierolltor)*, wobei hier die Steuerungsdaten vom Servo-Umrichter (Antrieb) verwendet werden konnten.

Aufgabe des LongLife-Datenservers (LongLife-Cloud) ist einerseits das Entgegennehmen des Datenstroms, die Analyse der Daten und die Anreicherung des Datenstroms mit abgeleiteten Prognosen (bspw. aus ähnlichen Anwendungsfällen). Andererseits die Bewertung, also die Erkennung von Ereignissen auf der Basis der Prognosen. Im LongLife-Kontext kann ein solches Ereignis beispielsweise sein, dass der Schwellenwert für die erwartete Restnutzungsdauer einer Komponente unterschritten wurde.

Für einen Datenaustausch von Diensten existieren eine Vielzahl von Ansätzen und einhergehend mit der fortschreitenden Durchdringung des Internets haben sich zunehmend auf dem HTTP-Protokoll basierende Verfahren durchgesetzt [Daigneau 2011]. Entsprechend wurde auch der Fokus bei der Umsetzung hierauf gelegt. Die RESTful Web Services (Representational State Transfer) haben eine weite Verbreitung [Richardson & Amundsen 2013] und die OpenAPI Specification ist ein Standard zur Spezifikation von REST-APIs. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen hat sich das Projektkonsortium auch für die Verwendung von OpenAPI entschieden.

Die Datenhaltung in der LongLife-Cloud erfolgt in einer PostgreSQL-Datenbank. Hierbei handelt es sich um ein freies, objektrelationales Datenbank-Managementsystem, welches von einer Open-Source-Community weiterentwickelt wird. PostgreSQL ist weitgehend konform mit dem SQL-Standard und in den meisten Linux-Distributionen enthalten. Ein weiteres Argument lag darin, dass die Datenbankanwendung auch in Docker-Containern als Open-Source-Lösung zur Verfügung steht. Der Docker-Ansatz zur Containerisierung konzentriert sich auf die Möglichkeit, einen Teil einer Anwendung zu aktualisieren oder zu reparieren, ohne die gesamte Anwendung deaktivieren zu müssen. Damit kann insbesondere für die Implementierungs- und Testphase eine größtmögliche Flexibilisierung erreicht werden.

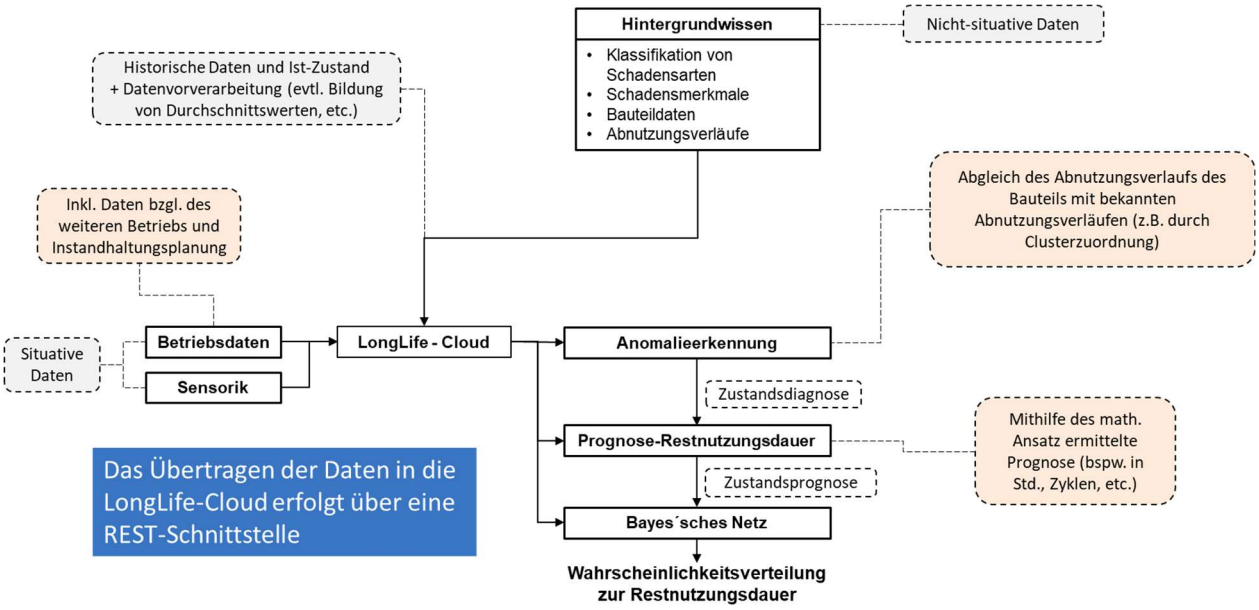

Abbildung 3: Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Datenquellen bis hin zur Prognose der Restnutzungsdauer

Die implementierte Tabellenstruktur für die LongLife-Cloud ist in Abbildung 4 dargestellt. Neben den maschinen- bzw. anlagenbezogenen Daten sind dieses unternehmens- und benutzerspezifische Daten. Diese Unterteilung ist notwendig, da in dem verfolgten Ansatz sämtliche erfassten Daten (in Bezug auf die überwachten Systeme) zusammenfassend gespeichert werden. Hierüber lassen sich dann verschiedene Rollen einnehmen. Ein Anlagenbetreiber kann bspw. nur die eigenen Systeme auswerten, während ein Anlagenbauer übergreifend die überwachten Systeme auswerten kann.

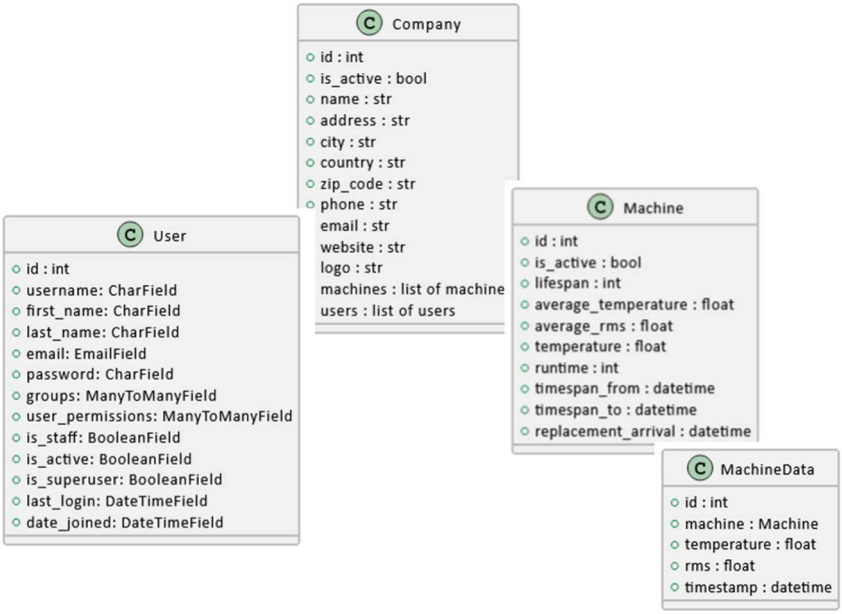

Abbildung 4: Die Tabellenstruktur der implementierten LongLife-Datenbankanwendung (ohne die vorzugebenen Bauteildaten)

Die Visualisierung erfolgt über das Web-Interface Grafana. Grafana ist ein Visualisierungs- und Monitoringwerkzeug, welches als plattformübergreifende Open-Source-Anwendung häufig für Überwachungsanwendungen genutzt wird. Diese Anwendung verfügt über Schnittstellen zu verschiedenen Datenbanksystemen, u. a. PostgreSQL.

Grafana wurde im Rahmen des Verbundvorhabens als Entwicklungsplattform für die Datenzusammenführung, Datenauswertung und Datenaufbereitung eingesetzt.

Abbildung 5: Auszug aus einem exemplarischen Dashboard für das Schnelllaufrolltor

Aus der Analyse der betrachteten Use Cases ergab sich, dass einige der erforderlichen Informationen, die für das verfolgte Konzept zur Bestimmung der Restnutzungsdauer benötigt werden, bisher nicht Bestandteil der vorhandenen Sensordaten waren. Entsprechend wurde aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse und den Kenntnissen

bzgl. des Versuchsstands beim Projektpartner DESMA ein technischer Entwurf für eine sensorgesteuerte Datenerhebung erstellt und vorangetrieben (s. Abbildung 6). Es wurde hierbei Sensorik für Vibration, Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit implementiert. Für die Konnektivität wurde der Standard Ethernet und TCP/IP und ebenfalls eine REST-API für die Datenübertragung vorgesehen.

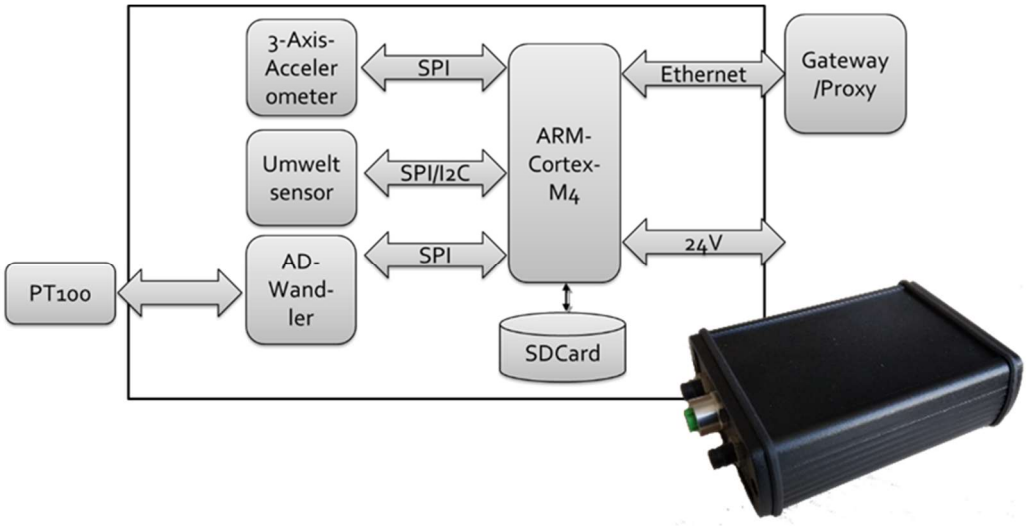

Abbildung 6: Smart-Sensor HW-Architektur (LongLife Sensorbox LLMS1)

Mit Hilfe dieser Sensorik werden die Parameter Beschleunigung in allen drei Raumachsen, Lager-Temperatur, Umgebungs-Temperatur, Luftdruck, Luftqualität und relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Analog zu den BDE-Daten (Betriebsdatenerfassung) werden die Messdaten der Sensorbox ebenfalls im JSON-Format übertragen und in PostgeSQL-Datenbank der LongLife-Cloud abgelegt.

Für die Sensorbox wurde das Echtzeitbetriebssystem FreeRTOS eingesetzt, um für die Sensordatenverarbeitung und -übertragung ein periodisches Auslesen der Werte zu ermöglichen. Optional wurde die Speicherung auf SD-Karten vorgesehen, um als Alternative zur Übertragung per REST-API eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung (direkt an der Sensor-Box) sicherzustellen.

Umsetzung des Vorhersagemodells mit dem Ziel der Diagnose sowie der Prognose

In Anlehnung an das Vorgehensmodell von Bandow & Holzmüller (s. Abbildung 7) wurde die Diagnose der Restnutzungsdauer durchgeführt. Grundlage des verfolgten Ansatzes bildete das Zusammenführen der unterschiedlichen Datenquellen und in Anlehnung an die Schadensakkumulation erfolgt die Bestimmung einer Restnutzungsdauer über allgemeingültig gruppierte Abnutzungsarten. Ausgehend von der rechnerischen Bestimmung der Wöhlerkurven [Radaj und Vormwald 2007] auf Basis der Belastungsgrößen sowie den entsprechenden Werkstoffkennwerten erfolgt eine Zuordnung von empirisch ermittelten Kenngrößen für Verschleiß, Korrosion, Materialermüdung und Alterung, die jeweils für sich als Anteil für die Abnutzung in die Prognose eingehen.

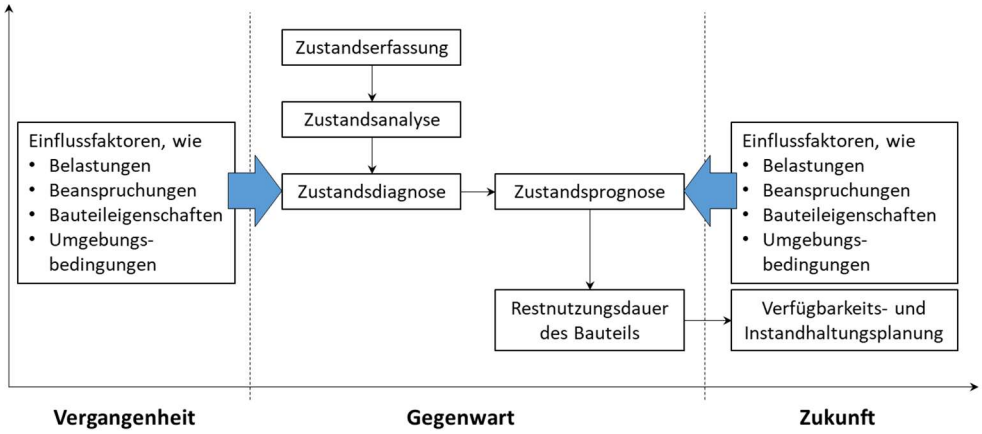

Abbildung 7: Ablauf einer Prognose nach [Bandow & Holzmüller 2010]

Die identifizierten verschleißbehafteten Komponenten an den betrachteten Use Cases wurden in Testanwendungen untersucht und es wurden hierbei verschiedene Versuchsreihen zur Zustandsüberwachung aufgenommen. Eine Herausforderung lag in der informationstechnischen Umsetzung. Die Messwerte aus den Antriebsdaten (Servo-Umrichter) bzw. den BDE-Daten mussten mit den Sensordaten der entwickelten Sensor-Box zusammengeführt werden, wobei für den Datentransport das in der Umgebung der Anlagen gegebene Netzwerk der jeweiligen Anwender genutzt wurde. Dieses begrenzte die übertragbare Datenmenge und es musste eine Datenvorverarbeitung am Sensorknoten durchgeführt werden, um eine Datenreduzierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Datenqualität für die sich anschließende Analyse aufrechtzuerhalten.

Kerngedanke des Modells ist der Vergleich der Soll- und Ist-Verläufe über die Bauteillebensdauer. Liegen bekannte Soll-Verläufe der erfassten Parameter vor, wird die Bauteilabnutzung anhand der Ist-Verläufe und der ermittelten Abweichungen bestimmt. In Abbildung 8 wird beispielsweise deutlich, dass das Drehmoment nach relativ kurzer Zeitspanne deutlich abnimmt, was korreliert mit dem Verlauf einer Wöhlerkurve.

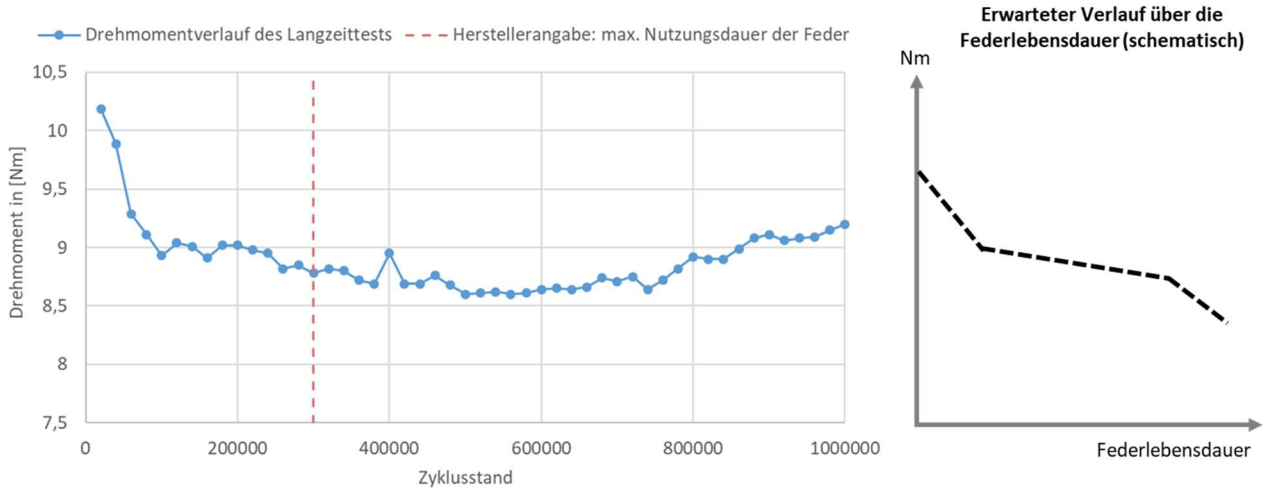

Abbildung 8: Der sensorisch erfasste Drehmomentverlauf als wesentliche Kenngröße für das Bauteil Feder im Schnelllaufrolltor aus einem durchgeführten Langzeittest versus einer schematischen Darstellung einer Wöhlerkurve

Veränderungen an den erhobenen Messgrößen konnten also identifiziert und zugeordnet werden. Unter anderem konnte aus dem Verlauf des Drehmoments am Antrieb auf die Federlängung geschlossen werden. Mit steigendem Zyklusstand (Schließ- und Öffnungsvorgänge) sinkt das aufgebrachte Drehmoment des Antriebs und die Ursache hierfür ist die Materialermüdung der Feder und die damit einhergehende Veränderung der Federrate.

Ergänzt wurden die Sensordaten mit visuellen Einschätzungen. An einem Schnelllaufrolltor gehören auch Gurte zu den verschleißbehafteten Bauteilen und hier sind im Laufe des Betriebs deutliche Veränderungen erkennbar gewesen. Optische und akustische Messverfahren wurden hier erprobt bzw. getestet. Hierbei zeigte sich aber sehr schnell, dass damit eine automatische Zustandserfassung und -identifizierung zwar möglich, aber nur mit sehr großem Aufwand umzusetzen ist. Als pragmatischer Ansatz erwies sich hier die Inaugenscheinnahme. Die am Gurt erkennbaren Veränderungen (ansteigendes Ausfransen und Verfärben) wurden zyklisch erfasst und Skalenwerten zugeordnet. Diese wurden wiederum in einem empirischen Ansatz berücksichtigt, um näherungsweise Aussagen über die Abnutzung zu erhalten.

Neben diesem Ansatz wurden darüber hinaus verschiedene Machine-Learning- bzw. KI-Methoden anhand der aus einem Langzeittest (Use Case „Schnelllaufrolltor“) erfassten Datensätze erprobt. Prinzipiell eignen sich auch diese Methoden für eine Zustandsdiagnose bzw. -prognose. Für eine belastbare Aussage sind die bisher erfassten Datensätze aber nicht ausreichend. Auch wurde als Nachteil erkannt, dass insbesondere für eine Prognose vergleichbare Versuchsreihen vorliegen müssen, bei denen ein realer Ausfall der betrachteten Komponenten vorliegt.

Geschäftsmodelle

Neue technische Lösungen bedeuten vielfach auch, dass sich hierüber neue Geschäftsmodelle definieren lassen, die wiederum Veränderungen in bestehenden Prozessen nach sich ziehen. Das Ersetzen oder mindestens Ergänzen von Geschäftsmodellen, die auf einen frühzeitigen Austausch und die Entsorgung von Komponenten ausgerichtet sind, findet nur Akzeptanz, wenn für die Beteiligten deutlich wird, welche Vorteile damit verbunden sind, z.B. eine deutlich längere Nutzung kritischer Komponenten oder reduzierte Stillstandzeiten (Ausfälle).

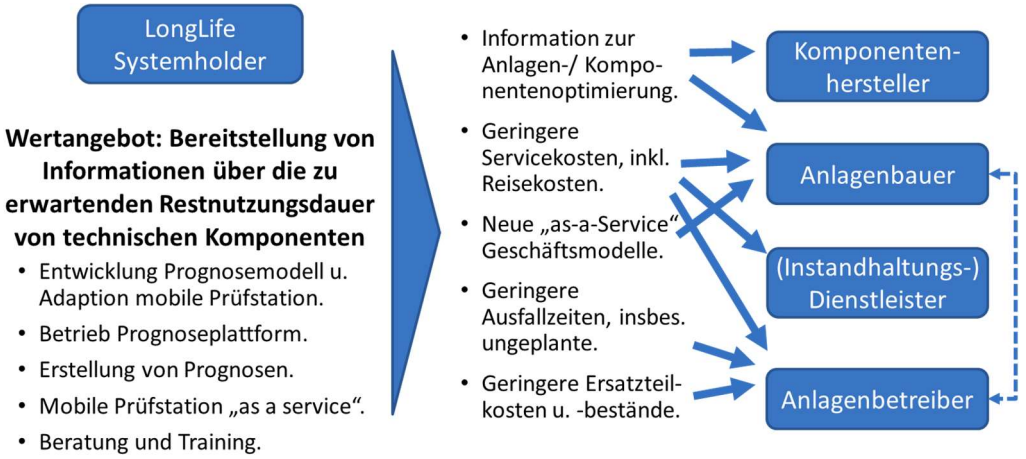

Abbildung 9: Wertangebot und Auswirkungen auf beteiligte Stakeholder

Für die Erstellung der Business-Model-Canvas [vgl. Osterwalder, Pigneur 2011] bzw. der Smart Service Canvas [Pöpelbuß u. Durst 2017] wurden mögliche Bausteine im Sinne eines Referenzmodells entwickelt. Ziel war es, für die beteiligten Stakeholder Möglichkeiten für Leistungs- und Gegenleistungen aufzuzeigen und den zu erwartenden Mehrwert darzustellen (s. Abbildung 10). Bei Letzteren ging es speziell um alternative Vergütungs-/Erlösmodelle. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich die Leistungsbeziehungen zwischen unterschiedlichen Partnern, z.T. in Netzwerken, abspielen können. Zudem wurde untersucht, welche Wechselwirkungen sich aus der Wahl bestimmter Ausprägungen der Leistungsbeziehungen zu unterschiedlichen Bausteinen des Geschäftsmodells ergeben und wie sich weitere Charakteristiken des Anwendungsfalls (z.B. installierte Basis oder Reifegrad der betrachteten Komponente) auswirken. Neben den traditionellen Geschäftsmodellen wurden auch digitale und auf ökologische Nachhaltigkeit ausgerichtete Geschäftsmodelle in die Überlegungen einbezogen (s. Abschlussbericht Teil II).

Abbildung 10: Bausteine für Geschäftsmodelle und Leistungen für unterschiedliche Stakeholder

Durch die Referenzbausteine ergaben sich konfigurierbare Geschäftsmodelle. Die Möglichkeit der Konfiguration soll die Anbieter der technischen Systeme, im Anwendungsfall den Maschinenhersteller, dabei unterstützen, die LongLife-Lösung den Kunden entsprechend den Vorstellungen des jeweiligen Anbieters und der Wünsche seiner Kunden in das Servicegeschäft einzubinden. Gemäß der erstellten Muster-Geschäftsmodellszenarien kann eine Prüfstation z. B. als Teil der Wartungsarbeiten eingesetzt und direkt im Rahmen eines bestehenden Wartungsvertrags inbegriffen sein. Alternativ wurden Szenarien betrachtet, bei denen die Kunden die Prognosen gesondert beauftragen (Prognosen „as a Service“) oder wo sie die Daten mithilfe einer mobilen Prüfstation selber aufnehmen, um die Prognose zu erstellen. Letzteres kann insbesondere für Anlagenbetreiber mit eigenem Instandhaltungspersonal interessant sein, um Kosten zu sparen und die Überprüfung der Maschinen zeitlich besser einzuplanen.

Neben den erstellten Geschäftsmodellmustern wurde im Verlauf des Projekts eine Lösung („*Geschäftsmodell-Konfigurator*“) entwickelt, die ausgehend von verschiedenen Anforderungen internetbasiert typische passende Geschäftsmodellbausteine vorschlägt. Abbildung 11 gibt das Grundkonzept wieder.

Das System unterstützt bei der Entscheidung, welches Geschäftsszenario für den jeweiligen Stakeholder (Anlagenbetreiber, Anlagenbauer, Komponentenhersteller, Dienstleister) am besten geeignet ist und zeigt auf, welche

Vorteile damit verbunden werden können. Anhand verschiedener Fragen kann sich somit ein Systemanbieter in einer prototypischen Webanwendung ein passendes Geschäftsmodell konfigurieren.

Der Konfigurator ist über die LongLife-Website (https://longlife.uni-bremen.de) erreichbar.

Abbildung 11: Das Konzept für die Umsetzung des Geschäftsmodell-Konfigurators

Ressourceneffizienz / Nachhaltigkeitsbewertung

Die im Projekt vorgesehene Nachhaltigkeitsbewertung ergänzte den betriebswirtschaftlichen Fokus der Geschäftsmodelle um die Dimensionen Umwelt, Soziales sowie den Aspekt der externen Kosten und orientierte sich an den methodischen Ansätzen der Ökobilanzierung (LCA), der Social LCA / Life Cycle Sustainability Assessment und des Life Cycle Costing, deren Sichtweise auf den gesamten Lebenswegzyklus des Produktes bzw. der Dienstleistung abzielen.

Die konkreten Anwendungskontexte im Projekt wurden umfassend über den gesamten Produktlebensweg, d.h. unter Berücksichtigung der relevanten Stoff- und Energieströme für die Phasen Rohstoffgewinnung / Vorproduktion, Fertigung, Gebrauchsphase und Recycling / Entsorgung, bilanziell erfasst und analysiert. Für den bilanziellen Vergleich wurden die konventionellen Systeme in einem weiteren Schritt um die entwickelte Smart-Sensorbox erweitert und ergänzend um Optimierungspotentiale bilanziert.

Um die ganze Bandbreite erwartbarer Ressourceneffizienzpotentiale und Nachhaltigkeitswirkungen aufzeigen zu können, wurden verschiedene Minimal-/ (Extrem)Maximalnutzen-Varianten untersucht. Hierbei konnte z.B. im DESMA-Anwendungsfall aufgezeigt werden, dass der kontinuierliche Einsatz einer Smart-Sensorbox bei (unterstellter nachweisbarer) Optimierung des Spindeleinsatzes zu einer erhöhten Ressourceneffizienz führt. Der erwartbare Nutzen z.B. bei der Umweltwirkungskategorie Klimawandel kann je nach untersuchter Variante um den Faktor 5 bis 500 höher sein als die Umweltwirkungen, die durch die Herstellung und den Betrieb der Sensorbox und deren Datenauswertung zusätzlich generiert werden. Besonders interessant ist dabei, dass der Aufwand für die Datenübertragung im Gesamtsystem nur marginal ausfällt.

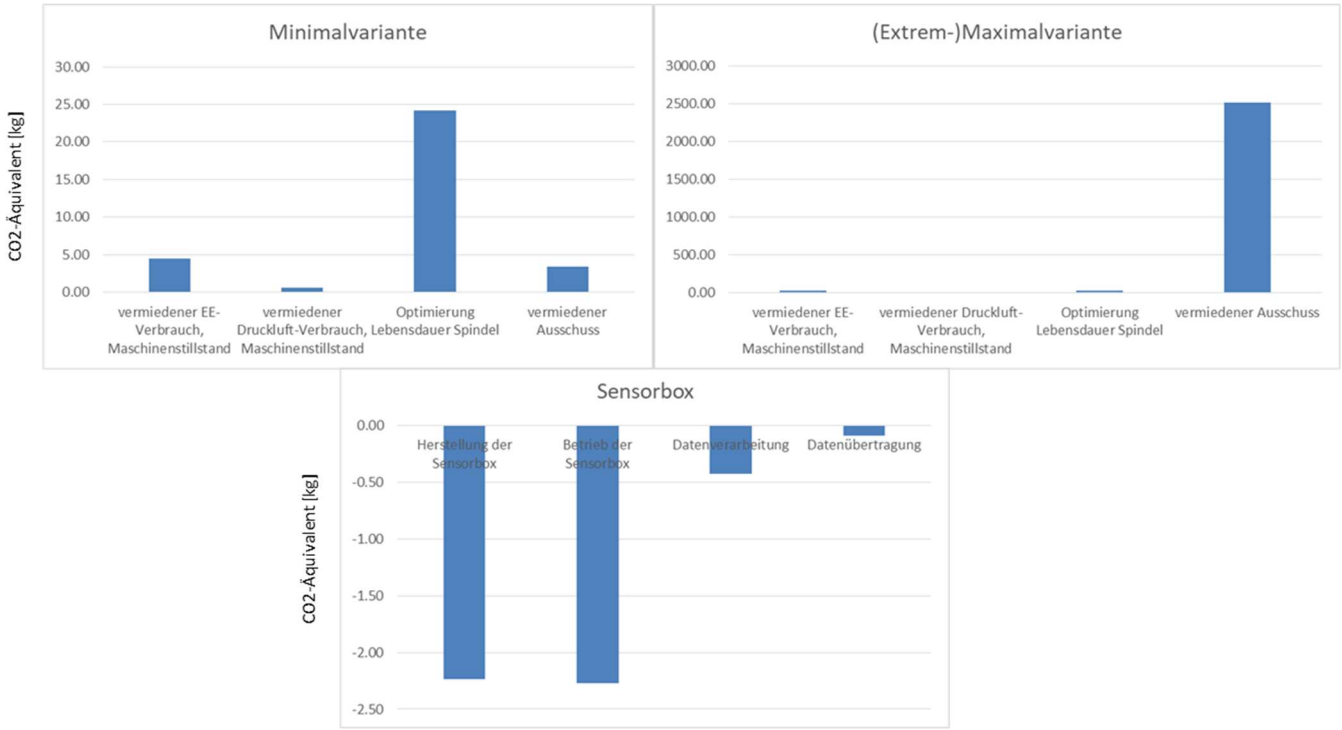

Abbildung 12: Vergleich des Umweltnutzens für die Umweltwirkungskategorie Climate Change für die Minimal- und (Extrem)Maximalnutzen-Variante ‚Spindelausfall' im Vergleich zum Aufwand des zusätzlichen Smart-Sensorbox-Systems

I.5 Literatur

Bandow, G.; Holzmüller, H. H. (Hrsg.) (2010): „Das ist gar kein Modell“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Gabler Research Verlag

Daigeneau, R. (2011): Service Design Patterns: Fundamental Design Solutions for SOAP/WSDL and RESTful Web Services. Upper Saddle River, NewYork / USA, Addison-Wesley Verlag

DIN 31051 (2012): Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag

Mainzer, K.; Kahle, R. (2022): Grenzen der KI – theoretisch, praktisch, ethisch. Springer-Verlag

Osterwalder, A.; Pigneur, Y. (2011): Business Model Generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer. Campus Verlag

Pöpelbuß, J.; Durst, C. (2017): Smart Service Canvas – Ein Werkzeug zur strukturierten Beschreibung und Entwicklung von Smart-Service-Geschäftsmodellen. In: Dienstleistungen 4.0 Geschäftsmodelle - Wertschöpfung - Transformation. Band 2. Springer Verlag

Radaj, D.; Vormwald, M. (2007): Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. 3. Auflage. Springer Verlag

Richardson, Leonard; Amundsen, Mike; Sam Ruby (2013): RESTful Web APIs: Services for a Changing World. O'Reilly Media Verlag.

Ritter, F. (2011): Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertationsschrift TU Darmstadt

Wächter, M.; Müller, C.; Esderts, A. (2017): Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie. Springer Vieweg Verlag

I.6 Erklärung bzgl. der Nutzung des Sachberichts

Hiermit erklären die Projektpartner (Urheber/innen des Sachberichts Teil I und Teil II) gegenüber dem Zuwendungsgeber, dass sie ihm die Nutzung gestatten.

Universität
Bremen

Universität Bremen

Bibliothekstraße 1, D-28359 Bremen

Bremen, 04. MAI 2023

Frauke Meyer

(Kanzlerin der Universität Bremen)

Universität Bremen

Hiermit erklären die Projektpartner (Urheber/innen des Sachberichts Teil I und Teil II) gegenüber dem Zuwendungsgeber, dass sie ihm die Nutzung gestatten.

DESMA
THE FINEST IN SHOE PRODUCTION ENGINEERING

DESMA Schuhmaschinen GmbH

Desmastraße 3/5, D.28832 Achin

Achim, 23.05.2023

Christian Decker – Klaus Freese

(Geschäftsführer)

Hiermit erklären die Projektpartner (Urheber/innen des Sachberichts Teil I und Teil II) gegenüber dem Zuwendungsgeber, dass sie ihm die Nutzung gestatten.

aimpulse intelligent systems

Aimpulse Intelligent Systems GmbH

Konrad-Zuse-Straße 8, D-28359 Bremen

Bremen, 4.5.2023

Dr. Jan D. Gehrke

(Geschäftsführer)

Hiermit erklären die Projektpartner (Urheber/innen des Sachberichts Teil I und Teil II) gegenüber dem Zuwendungsgeber, dass sie ihm die Nutzung gestatten.

CoSynth

CoSynth GmbH & Co. KG

Marie-Curie Str. 1, D-26129 Oldenburg

Oldenburg, 24.05.23

Andreas Herrholz

(CTO, Co Founder)

CoSynth Embedded System Design
cosynth.com

Hiermit erklären die Projektpartner (Urheber/innen des Sachberichts Teil I und Teil II) gegenüber dem Zuwendungsgeber, dass sie ihm die Nutzung gestatten.

encoway
standard for variety

Encoway GmbH

Konrad-Zuse-Straße 6, D-28359 Bremen

Bremen, 03.05.2023

K. Christoph Ranze

(Geschäftsführer)