

Projektpartner



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01LY2110A-D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Abschlussbericht

▪ **Brehmer GmbH & Co. KG (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Moritz Schmidt

→ *Projektkoordination; Elektronik- und Firmwareentwicklung*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 A

Teilprojekttitel: Entwicklung wartungsarmes Zustandsüberwachungssystem

▪ **WALTHER Faltsysteme GmbH (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Oliver van Neerven

→ *Entwicklung des geplanten neuartigen Mehrwegladungsträgers*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 B

Teilprojekttitel: Entwicklung des neuartigen Mehrwegladungsträgers

▪ **MALORG GmbH (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Christian Wolfgarten

→ *Ganzheitliche, logistische Systemplanung- und Integration*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 C

Teilprojekttitel: Projektspezifische Modellierung logistischer Soll-Prozesse

▪ **Universität Mannheim, Institute for Enterprise Systems (InES)**

Ansprechpartner: Herr Dr. Christian Bartelt

→ *Entwicklung IoT-Plattform und KI-Algorithmen; Forschungstransfer*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 D

Teilprojekttitel: Deep-Learning-basierte Analyse- und Sensordatenplattform

Assoziierter, nicht geförderter Partner:

▪ **SPAR Österreichische Warenhandels-AG**

Ansprechpartner: Herr Alois Huber

→ *Unterstützung Anforderungsdefinition und Praxistests; potenzieller Systemanwender*

Berichtszeitraum: 01.10.2021 bis 30.09.2023

Projektname: watchER Entwicklung eines wartungsarmen cyber-physischen Logistiksystems zur lückenlosen Echtzeit-Überwachung und sukzessiven Verbesserung der Prozess- und Ressourceneffizienz innerhalb von Lieferketten		<input type="checkbox"/> Zwischenbericht 1 <input type="checkbox"/> Zwischenbericht 2 <input checked="" type="checkbox"/> Abschlussbericht	
Erstellt am: 23.05.2022	Autor (Erstellt): Projektkonsortium	Letzte Änderung: 11.04.2024	Autor (Änderung): Konsortium
Dokument erstellt: M. Schmidt		Anzahl Seiten inkl. Deckblatt: [42]	

Inhalt

Einleitung und Gesamtziel des Projektes	4
1 Erarbeitung eines Anforderungskataloges / Lastenheftes; Technische Konzeption.....	7
1.1 Ist-Prozessanalyse.....	7
1.2 Definition der Anforderungen an die neu zu entwickelnde Elektronik-Hardware.....	15
1.3 Definition der Anforderungen / Konzeptionierung des neuartigen Mehrwegladungsträgers	15
1.4 Definition der softwarespezifischen Anforderungen	16
Anforderungskatalog der Softwareplattform (watchER-Cloud).....	16
Technologiekonzept	17
Grobarchitektur	18
2 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters.....	18
2.1 Elektronik und Firmware Entwicklung.....	20
2.2 Konstruktion des angestrebten Mehrwegladungsträgers.....	21
2.3 Erarbeitung eines projektspezifischen Kleinstserienwerkzeugs.....	23
2.4 Aufbau einer cloudbasierten IoT Plattform zur Massendatenerfassung	24
.....	24
Datenmodellierung.....	24
Datenübertragungspipeline (End-to-End)	25
2.5 Gehäusekonstruktion für Elektronikbauteile; Aufbau eines ersten Funktionsmusters des Zustandsüberwachungssystems.....	26
2.6 Fertigung eines ersten Funktionsmusters	27
2.7 Entwicklung eines logistischen Soll-Konzepts	27
2.8 Entwicklung von KI-Algorithmen zur intelligenten Datenauswertung	30
3 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters.....	32
3.1 Durchführung erster Funktionsprüfungen bzw. des Funktionsmusters des nahezu wartungsfreien, IoT-fähigen Mehrwegladungsträgers im akkreditierten Prüflabor der Brehmer GmbH & Co. KG unter enger Zusammenarbeit der Projektpartner; Gezielte Auswertung der Funktionstests	32
3.2 Hard- und Firmware-Redesign und Schaltungsoptimierung	32
3.3 Konstruktive Anpassungen am Fertigungswerkzeug.....	33
3.4 Redesign und Optimierung der Software	34
Datenübertragungspipeline (End-to-End)	34
4.1 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des geplanten Zustandsüberwachungssystems.....	35
4.2 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des IoT-fähigen Ladungsträgers	35
4.3: Erarbeitung eines finalen anwendungsnahen Software-Prototyps	36

5.1 & 5.2 & 5.3 Evaluation des Demonstrators in der realen Anwendung bei dem eingebundenen assoziierten Partner; Implementierung erforderlicher Anpassungen bei Hard- & Firmware	37
5.4: Validierung des entwickelten Softwareprototyps in der realen Anwendung.....	38
Demonstrationsszenario „Neustadt“	38
KI-Evaluation für Vorhersagen der Sensordaten (Time Series Prediction)	39
Weitere Anwendungsmöglichkeiten durch BI-Software „Metabase“	40
6 Transfer und Diffusion der Projektergebnisse in die Praxis	40
6.1: Publikationen und Projektpräsentation	40
6.2: Durchführung einer Abschlussveranstaltung	40
Bewertung der erreichten Meilensteine	41
Meilenstein 1:	41
Meilenstein 2:	41
Meilenstein 3 & abschließende Bewertung:	41
Zusammenarbeit mit dem Assoziierter, nicht geförderter Partner:	42
Spar:	42
Abbildungsverzeichnis.....	42

Einleitung und Gesamtziel des Projektes

Auszug aus der Vorhabens Beschreibung:

Der globale „food wastage footprint“ bzw. die durch die Lebensmittelverschwendung entstehenden globalen CO₂-Emissionen wurden laut einer Studie der Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO) – bei einer Abfallmenge von 1,3 Mrd. Tonnen essbarer Lebensmittel und ohne die Berücksichtigung der durch eine veränderte Landnutzung und Forstwirtschaft hervorgerufenen zusätzlichen CO₂-Emissionen – für das Jahr 2007 mit 3,3 Mrd. Tonnen CO₂-Äquivalenten beziffert, wobei für das Jahr 2011 eine Aktualisierung dieses Wertes auf 3,6 Mrd. Tonnen CO₂-Äquivalente erfolgte.

Die negativen Auswirkungen auf den Klimawandel, die mit der Verschwendung von Lebensmitteln einhergehen, werden zudem sehr gut deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass laut einer Studie des Bayerischen Kompetenzzentrums für Ernährung (KErn) allein in Bayern durch das Wegwerfen von Lebensmitteln pro Jahr rund 4.000 Gigawattstunden Energie verloren gehen, was in etwa dem jährlichen Energieverbrauch der Städte Würzburg, Fürth und Erlangen zusammen entspricht. Dieser Zusammenhang lässt sich u. a. dadurch erklären, dass die Erzeugung von Lebensmitteln mit einem enormen Aufwand verbunden ist, und Verarbeitungsschritte erforderlich sind, die viel Wasser und Fläche beanspruchen.

Der Anteil an Lebensmittelabfällen, der hierbei im Rahmen von Distributions- und Handelslogistikprozessen der Lebensmittelbranche anfällt, liegt bei ca. 5,1 Prozent. Expertenschätzungen zufolge ließe sich die Entsorgungsquote von Lebensmitteln im Zusammenhang mit Distributions- und Handelslogistikprozessen durch den gezielten Einsatz von Zustandsüberwachungstechnologien auf der Ebene Ladeeinheit innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren sukzessive um bis zu 15 Prozent reduzieren, womit wiederum erhebliche Potenziale zur Einsparung von CO₂-Emissionen sowie zur Reduzierung von Energieverbräuchen einhergehen und damit entscheidend zur Bewältigung des Klimawandels beigetragen werden könnte. Eine lückenlose Zustandsüberwachung auf Ladeeinheitenebene wird im Rahmen von Transport-, Umschlag- und Lagerprozessen (TUL-Prozessen) z. B. durch elektronische Datenlogger, RFID-Sensortransponder oder drahtlose Sensornetzwerke ermöglicht. Allerdings werden diese Technologien in der Praxis, v. a. aus Kostengründen, in den meisten Fällen nur stichprobenartig oder in speziellen Anwendungsfällen (z. B. für das Monitoring von sehr hochwertigen Gütern) eingesetzt. Einem flächendeckenden Einsatz dieser Technologien auf der Ebene der Ladeeinheit steht aus Praxissicht – neben den z. T. hohen Investitionskosten – insbesondere der hohe Wartungsaufwand entgegen, der sich aufgrund der begrenzten Lebensdauer der bei den einzelnen Systemen verwendeten Energiequellen ergibt, die wiederkehrend ausgetauscht bzw. aufgeladen werden müssen. Des Weiteren bedeutet eine lückenlose, echtzeitfähige Transportüberwachung entlang der verschiedenen IT-Systeme der beteiligten Akteure aufgrund der fehlenden technischen Integrierfähigkeit der einzelnen Softwaresysteme in den unterschiedlichen Unternehmen (Produzenten, Transporteure, Lageristen, Händler etc.) eine große Herausforderung. Nach dem aktuellen Stand der Technik gehen bei der Übergabe des Transportgutes – abhängig von der Ausgestaltung der technischen Schnittstellen der jeweiligen Unternehmens-IT-Systeme – Daten zur Zustandshistorie z. B. von Lebensmitteltransporten entlang der Supply Chain verloren. Dieser Umstand behindert derzeit ein kontinuierliches Echtzeit-Monitoring und vor allem eine ganzheitliche Datenanalyse über die gesamte Logistikkette hinweg.

Um diesen Problemen zu begegnen sowie die bislang noch vorhandene Hemmschwelle für einen verbreiteten Einsatz von Technologien zur Überwachung des Zustandes einzelner Ladeeinheiten in

der Logistik auf der Anwenderseite zu reduzieren und damit u. a. die Erschließung des oben aufgezeigten erheblichen Einsparungspotenzials im Hinblick auf die durch die Verschwendung von Lebensmitteln hervorgerufenen beträchtlichen CO₂-Emissionen aus volkswirtschaftlicher Sicht zu begünstigen, wird in dem vorliegenden F&E-Vorhaben die Entwicklung eines neuartigen cyber-physischen Logistiksystems angestrebt, welches aus einer IoT-Plattform auf Cloud-Basis sowie einem IoT-fähigen Mehrwegladungsträger bestehen soll. Der zu entwickelnde intelligente Ladungsträger soll dabei im Rahmen einer echtzeitfähigen Güterüberwachung auf Ladeeinheitenebene - mit Ausnahme der regelmäßig notwendigen Kalibrierung des Messsystems - über seine gesamte Lebensdauer hinweg wartungsfrei und damit wirtschaftlich genutzt werden können, indem der im Kapitel 2.1 genauer dargelegte innovative Lösungsansatz für eine fortwährende und langfristige Energieversorgung eines in einen Mehrwegladungsträger integrierten aktiven Zustandsüberwachungssystems umgesetzt wird, bei dem die Energiequelle des Zustandsüberwachungssystems an bestimmten Punkten der Logistikkette, an denen ohnehin nutzbare elektrische Energie verfügbar ist bzw. eine Lademöglichkeit besteht, kontakt- und kabellos, induktiv aufgeladen werden soll. Durch das neue wartungsarme Design des Ladungsträgers wird der Aufbau integrativer, mobiler Systeme erst realistisch einsatzfähig. Damit erschließt der Mehrwegladungsträger erhebliche Potenziale für datenbasierte Services. So können mittels zu erarbeitender KI-Algorithmen (z. B. mithilfe künstlicher neuronaler Netze) große Datenmengen aus der Zustandsüberwachung ausgewertet werden, die der Ladungsträger an ein zentrales und für alle Prozessbeteiligten zugängliches Cloud-System überträgt. Eine solche kontinuierliche Echtzeit-Überwachung bzgl. des Zustandes einzelner Ladeeinheiten innerhalb von Lieferketten, d. h. der fortwährende allgegenwärtige Zugang zu Live-Daten wie bspw. der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, auftretenden Stoßbelastungen oder GPS-Koordinaten, im kombinierten Einsatz mit aktuellen KI-Softwaretechnologien zur systematischen und intelligenten Auswertung großer Datenmengen weist gegenüber dem bekannten Stand der Technik und Wissenschaft - neben der bereits aufgezeigten und aus Sicht des Klimaschutzes sehr vielversprechenden Möglichkeit der Reduzierung der Entsorgungsquote im Rahmen von Lebensmitteltransporten - u. a. die folgenden elementaren betriebs- und volkswirtschaftlichen Vorteile auf, welche den flächendeckenden Einsatz der im beantragten F&E-Projekt angestrebten innovativen Systemlösung in der Lebensmittelindustrie sowie auch in weiteren Branchen wie z. B. der Pharma- oder der Automobilindustrie, innerhalb derer sich durch die Transparenz- und Qualitätssteigerung von Logistikprozessen ebenfalls erhebliche Potenziale in Bezug auf Ressourceneinsparungen ergeben, wesentlich begünstigen sollten:

- Durchgängige Steuerung und lückenlose Nachweisfähigkeit entlang der Logistikkette
- Ubiquitärer Zugang zu allen relevanten Prozessparametern und Produktdaten
- Verbesserungen hinsichtlich der Entscheidungsfindung, Rückverfolgbarkeit, Qualitätssicherung und Prozesskontrolle durch deutliche Transparenzsteigerung
- Steigerung der Effizienz und Qualität von (Lebensmittel-)Logistikprozessen
- KI-basierte Datenauswertung ermöglicht neuartige Zusatzservices wie z. B. eine intelligente Problemerkennung, -analyse und -prognose bzgl. der Kühlkette, Stoßempfindlichkeit etc.
- Möglichkeit der frühzeitigen Erkennung und Behandlung von zeit- oder qualitätsbezogenen Störungen
- Potenzial zur Reduzierung grundlegender ökonomischer, sozialer und ökologischer Probleme wie bspw. Lebensmittelverschwendung, Produktpiraterie oder Ladungsdiebstahl
- Ermöglichung einer sukzessiven Optimierung von Lieferketten
- Nachhaltigere Wirtschaftsweise bei einer gleichzeitigen Stärkung von Wertschöpfungsketten
- Gewährleistung eines ökonomisch realisierbaren Mehrweg-Systems (hohe Umlauffzahlen des Ladungsträgers; nahezu wartungsfreies Zustandsüberwachungssystem)
- Optimierung bzgl. des Bestandsmanagements bzw. der Planbarkeit und Steuerung von Warenflüssen

Im Hinblick auf den Kundennutzen, der durch die geplante Systemlösung entsteht, lässt sich grundsätzlich zwischen dem unmittelbaren Nutzen, der sich durch direkte Eingriffsmöglichkeiten im Rahmen des Live-Trackings von Ladungsträgern ergibt, sowie dem langfristigen Nutzen, der durch die sukzessive Optimierung von Logistikprozessen erreicht werden kann, unterscheiden. Direkte Eingriffsmöglichkeiten im Zusammenhang mit einer Echtzeit-Überwachung auf der Ebene der Ladeinheit sind z. B. gegeben, wenn ein für ein zu transportierendes Produkt vorgegebener Temperaturschwellwert über- bzw. unterschritten wird (bspw. wird eine zu kühlende Ladeinheit im Rahmen eines Umschlagprozesses ungekühlt zwischengelagert). Dieses Szenario wird dann von dem Zustandsüberwachungssystem erkannt und die Prozessbeteiligten dahingehend aktiv und in Echtzeit informiert. Anschließend besteht die Möglichkeit, den erkannten und sich anbahnenden Kühlkettenbruch durch die Einleitung entsprechender Maßnahmen bzw. der zeitnahen Umlagerung der fehlerhaft gelagerten Ladeinheit zu beheben und damit einen Verderb bzw. die notwendige Entsorgung temperaturempfindlicher Ware zu vermeiden. Die Möglichkeit einer langfristigen Optimierung von Lieferketten ergibt sich wiederum im Zuge der Umsetzung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses mithilfe einer gezielten KI-basierten Datenauswertung bzw. der kontinuierlichen Aufdeckung etwaiger Anomalien in der Prozesskette, welche dann dauerhaft behoben werden können. Die wesentlichen Ergebnisse, die nach Projektabschluss vorliegen werden, sind ein neuartiges cyber-physisches Logistiksystem - bestehend aus einem speziellen Mehrwegladungsträger, einem in diesem zu integrierenden wartungsarmen Zustandsüberwachungssystem und einer IoT-Plattform zur gezielten KI-basierten Datenauswertung - sowie ein diesbezüglich erarbeitetes logistisches Soll Konzept.

Die WALTHER Faltsysteme GmbH ist in diesem Zusammenhang hauptverantwortlich für die Vermarktung des nahezu wartungsfreien, IoT-fähigen Mehrwegladungsträgers, für welchen die Brehmer GmbH & Co. KG die erforderlichen Elektronikbauteile produziert. Die MALORG GmbH verantwortet im Rahmen der Systemvermarktung die praktische logistische Implementierung des innovativen Ladungsträgers bei potenziellen Anwendern.

Die beteiligten Unternehmen verfügen hierbei über erfahrene Vertriebsmitarbeiter, international aufgestellte Distributoren sowie einen direkten Marktzugang durch vorhandene Kontakte zu Unternehmen aus den für die Ergebnisverwertung relevanten Branchen. Der Vertrieb von Großmengen soll im Wesentlichen im Direktvertrieb erfolgen und für den Vertrieb kleinerer Stückzahlen steht u. a. ein Online-Shop zur Verfügung.

Als gezielte Marketingmaßnahmen zur Bekanntmachung der Projektergebnisse bei der zu erschließenden Zielgruppe sind u. a. gemeinsame Auftritte der Partner z. B. auf für den Förderschwerpunkt bedeutsamen Messen, Fachtagungen oder Symposien sowie die Publikation von Kurz- und Langbeiträgen in Fachzeitschriften und geeigneten Online-Medien (hier wird v. a. die Veröffentlichung in Form von Open Access-Beiträgen angestrebt) geplant.

1 Erarbeitung eines Anforderungskataloges / Lastenheftes; Technische Konzeption

Das Arbeitspaket 1 wurde im Rahmen regelmäßiger Telefonkonferenzen sowie im erweiterten Rahmen eines vor-Ort-Termins beim Projektpartner WALTHER Faltsysteme GmbH am 27.01.22 bearbeitet. Die weiteren Erkenntnisse und Ergebnisse des Arbeitsstandes werden in den nachfolgenden untergliederten Arbeitspaketen stichpunktartig beschrieben.

1.1 Ist-Prozessanalyse

Die wesentliche Aufgabe im Arbeitspaket 1.1 lässt sich in zwei Teilbereiche gliedern. In einem ersten Schritt soll eine generelle Aussage zur grundlegenden konzeptionellen Umsetzbarkeit der Projektidee analysiert werden. Im zweiten Schritt gilt es, die grundlegenden logistischen Anforderungen an den zu entwickelnden intelligenten Ladungsträger herauszustellen und als Spezifikationen zu definieren, mit dem Zusatz einer Analyse der Möglichkeit zur induktiven Aufladung entlang der Prozesskette.

Als Vorgehensweise zur Bearbeitung der im Arbeitspaket 1.1 enthaltenen Aufgabenstellung wurden in einer frühen Phase des Forschungsprojekts weitreichende Recherche- und Validierungsarbeiten durchgeführt. Diese sollen den Zweck erfüllen, dass sämtlich geltenden Regularien und bereits eingesetzte Techniken, im Zusammenhang mit Lebensmitteltransporten, evaluiert und analysiert werden, um die konzeptionelle Umsetzbarkeit zu validieren und die Ausgestaltung des zu entwickelnden intelligenten Ladungsträgers zu präzisieren.

Ergänzend wurden die in diesem Zusammenhang stehenden Erkenntnisse aus der Vorhabens Beschreibung einer Validierung mit den Ergebnissen der angesprochenen Recherchearbeiten unterzogen.

Die Planung zum Vorgehen der IST-Prozessaufnahme mit dem Fokus einer Analyse der Prozesse entlang der Distributionskette im Zusammenhang mit dem Transport von Lebensmitteln im Tiefkühl- und Frischebereich, wurde nach Einzelschritten und geeigneten Methoden aus der eigenen Unternehmenspraxis und den erlangten Erkenntnissen im Umgang mit Lebensmitteltransporten ausgearbeitet und definiert.

Dies hat zum Ziel, eine abschließende Aussage zu den vorherigen Analysen zur konzeptionellen Umsetzbarkeit des Forschungsvorhabens zu treffen und zum anderen die technischen Spezifikationen des intelligenten Ladungsträgers und die Möglichkeit der induktiven Aufladung zu analysieren.

Die in der Vorhabens Beschreibung unter Punkt 4.4 (Zusammenarbeit mit Dritten) aufgeführte Einbindung von weiteren assoziierten und nicht geförderten Praxispartnern wurde genutzt.

Dabei wurde zunächst analysiert, welche Praxispartner in räumlicher Nähe zum Ruhrgebiet mit Bezug zur Lebensmitteldistribution einen Zugewinn für das Forschungsvorhaben darstellen könnten. Zusätzlich sollte durch eine Erweiterung der Praxispartner ein umfassenderer Erkenntnisgewinn in Bezug auf eine generelle Umsetzbarkeit der Projektidee und der logistischen Anforderungen geschaffen werden. In diesem Fall konnten vier weitere assoziierte und nicht geförderte Praxispartner evaluiert und in die erste Phase des Forschungsprojekts integriert werden, wobei die Zusammenarbeit mit einem der vier Praxispartner im späteren Verlauf intensiviert wurde. Aufgrund der vorherrschenden Regularien und Einschränkungen während der Corona Pandemie konnten Vor-Ort-Termine zunächst nicht realisiert werden. Daher wurde eine Online-Workshop-Strategie aufgebaut, bei der als Basis zur Zusammenarbeit mit den Praxispartnern eine komprimierte Projektvorstellung des Forschungsvorhabens, das Vorgehen der Prozessaufnahmen und der Nutzen für assoziierte und nicht geförderte Praxispartner erstellt wurde. Diese digitale Vorgehensweise wurde zu einem späteren Zeitpunkt durch vor Ort Ist-Prozessaufnahmen und vor Ort-Workshops erweitert, um die vorherigen Ergebnisse zu vertiefen und abschließend aus der Praxis zu validieren.

Der allgemeine Fokus der IST-Prozessaufnahme liegt aus makroskopischer Sicht bei der Verfolgung der Lebensmittel und deren Handhabung entlang des Materialflusses von der Quelle (Distributionszentrum/Lager) bis hin zur Senke (Filiale).

Der spezifischere Fokus bei der IST-Prozessaufnahme liegt bei der Evaluierung:

- der sich im Einsatz befindlichen unterschiedlichen Ladungsträger nach Art und Funktion über die verschiedenen Bereiche entlang der Distributionskette (Spezifikation Ladungsträger)
- von Anforderungen an Ladungsträger im Zusammenhang mit Lebensmitteltransporten entlang der Distributionskette (Spezifikation Ladungsträger)
- des Ladungsträgerhandlings in der Logistikpraxis (Spezifikation Ladungsträger)
- von kritischen Temperaturzonen/Prozessen (Schleusensituation, Kommissionierung, Wareneingang, Warenausgang, Transport, ...) (konzeptionelle Umsetzbarkeit)
- Identifizierung der Möglichkeit einer induktiven Aufladung (Energiebereitstellung) des intelligenten Ladungsträgers an dafür geeigneten Positionen entlang der Distributionskette

Aus den zahlreichen Workshops konnten ergänzend zu der konzeptionellen Ausrichtung und Anforderungen an zu entwickelnden Ladungsträger weitere Marktkenntnisse zur grundlegenden Umsetzbarkeit der Projektidee evaluiert werden. Hier ist besonders herauszustellen, dass innerhalb der Lebensmitteldistributionskette von der Quelle (Distributionszentrum/Lager) über die Transportwege hinweg bis zur Senke (Filiale) keine durchgängige und lückenlose Überwachung der Lebensmittel auf Ladungsträgerebene gegeben ist.

Lediglich innerhalb unkritischer Temperaturbereiche, in denen eine nahezu konstante Raumtemperatur in Kombination mit Temperaturregelung und -überwachung vorherrscht, ist das Risiko des Lebensmittelqualitätsverlusts und einhergehender Lebensmittelverschwendung als gering einzustufen. Zu den eben genannten unkritischen Temperaturbereichen innerhalb der Distributionskette zählen unter anderem die gekühlten Lebensmittellager im Bereich der Distribution und der Filiale (Tiefkühl- und Frischelager) sowie die aktiv gekühlte Ladefläche der eingesetzten Transportmittel (Sattelaufleger) hinzu. Es besteht aus dem technischen Sachverhalt heraus die theoretische Möglichkeit, dass es innerhalb von geschützten- und gesteuerten Temperaturbereichen (Lager und Sattelaufleger) zu einem Ausfall der aktiven Kühlung kommen könnte. Jedoch wird an diesen Stellen von allen Praxispartnern das Potenzial eines Überwachungssystems auf Ladungsträgerebene zur Sicherung der Lebensmittelqualität, mit dem Fokus einer Vermeidung von Lebensmittelverschwendung, als gering eingestuft. Da an diesen Bereichen ohnehin örtliche Messsysteme eingesetzt werden, welche einen Defekt der Kühlleistung sowie ein Herabfallen der Kühltemperatur erkennen und entsprechend warnen würden. Lediglich bei passiv gekühlten Transportmitteln (vorgekühlte und isolierte Sattelaufleger) wäre das Potenzial des intelligenten Ladungsträgers als etwas höher einzustufen als bei aktiv gekühlten Sattelauflegern.

Im Zusammenhang der Analysen konnten jedoch kritische Temperaturbereiche identifiziert werden, bei denen die Gefahr des Lebensmittelqualitätsverlusts als gegeben angesehen werden kann. Ein kritischer Temperaturbereich kann beschrieben werden als eine Schnittstelle bzw. Position innerhalb des Materialflusses, an der es aufgrund von äußeren Einflüssen zu Beeinträchtigungen der Lebensmittelqualität kommen kann. Die nachfolgenden Punkte innerhalb des Materialflusses konnten folglich als kritische Temperaturbereiche identifiziert werden:

- WA (Warenausgang) - Distributionszentrum:
 - Beladevorgang des Transportmittels (Lkw) am Distributionszentrum bzw. Lager, wenn keine temperatugeschützte Verbindung (Schleuse) zwischen der Lkw-Ladefläche und dem Verladetor des Lagers gegeben ist
- Transport:
 - Gesamter Transportweg (inkl. potenzieller Zwischenstopps) im Transportmittel (z. B. passiv gekühlter Lkw) von der Quelle bis zur Senke
- WE (Wareneingang) - Filiale:
 - Entladevorgang an den jeweiligen Filialen
 - Pufferung zur Warenvereinnahmung innerhalb der Filialen (i. d. R. kein gekühlter Bereich)
 - Weitertransport innerhalb der Filiale zu den jeweiligen Kühlbereichen (Tiefkühlager oder Frischelager, wenn vorhanden)
- Verkaufsfläche – Filiale:
 - Einräumen der Ware in die jeweiligen Kühlvorrichtungen auf der Verkaufsfläche innerhalb der Filiale

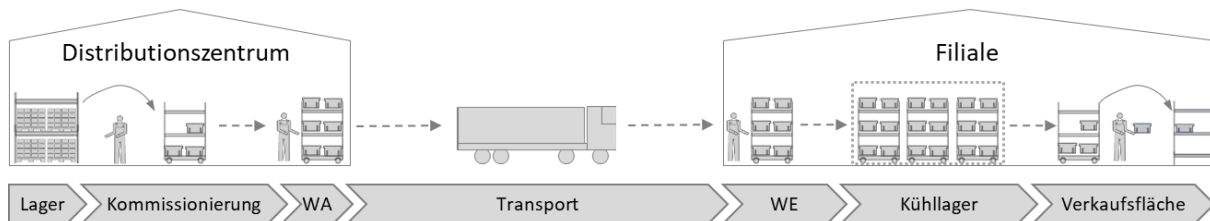


Abbildung 1: Lebensmittelprozesskette

Nach einer differenzierten Analyse der evaluierten kritischen Temperaturbereiche konnten abschließend die Pufferung zur Vereinnahmung der Waren in der Filiale (WE (Wareneingang) -Filiale) und das Einräumen der Waren in die jeweiligen Kühlvorrichtungen auf der Verkaufsfläche als hochgradig kritisch evaluiert werden. An diesen Punkten im Materialfluss ist die Ware den äußeren Einflüssen ausgesetzt, wobei die Temperatur als Einflussparameter am kritischsten zu bewerten ist. Obwohl unternehmensinterne Vorgaben zu entsprechenden Verweildauern der Ware an den beiden kritisch identifizierten Punkten im Materialfluss vorhanden sind, ist eine durchgängige aktive Überwachung der Verweildauer oder der durchgängigen thermischen Überwachung der Ware zur Gewährleistung der Lebensmittelbeschaffenheit nicht gegeben. Eine Nachverfolgbarkeit bei vermeintlicher Überschreitung der definierten Verweildauer lässt sich ebenfalls nicht vollständig und lückenlos sicherstellen. Trotz genauer Prozessbeschreibungen besteht ein Restrisiko, dass Waren, speziell Tiefkühlware, trotz Überschreitung von bestimmten Grenzwerten in die Kühlvorrichtungen im Filiallager oder der Verkaufsfläche eingelagert bzw. verräumt werden. Dieser dargestellte Sachverhalt wurde durch eine vor Ort IST-Prozessanalyse an zwei Filialen-Standorten validiert. Hierdurch ergibt sich aus Sicht der Praxispartner ein Potenzial zur Lebensmittelqualitätssicherung und damit zur potenziellen Reduzierung von Verschwendung von Lebensmitteln durch den Einsatz eines intelligenten Ladungsträgers mit Zustandsüberwachungstechnologie. Durch diesen Einsatz kann an den kritischen Stellen innerhalb der Prozesskette der Informationslücke bzgl. Zustandsdaten der Ware entgegengewirkt werden. Die gesamte Prozessqualität kann auf diese Art auch vorsorglich im Fall von direkten Warnungen unmittelbar positiv beeinflusst werden.

Zusätzlich ist gemeinsam mit den Praxispartnern ein weiteres allgemeines Potenzial identifiziert worden, welches mit der angestrebten Technologie im Sinne einer Ressourceneffizienz erfüllt werden

kann. Durch eine Echtzeitüberwachung auf Ladungsträgerebene könnte eine hochgradig transparente Prozesskette geschaffen werden, auf die nach Möglichkeit alle Interessengruppen nach unterschiedlichen Anwendungen zugreifen könnten. Hieraus würden sich über den Forschungsansatz hinaus noch weitere Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsszenarien durch eine Realisierung des angestrebten intelligenten Ladungsträgers ergeben. Diese zusätzlich identifizierten Einsatzmöglichkeiten werden im weiteren Projektverlauf im erweiterten Sinn mit dem Hinblick zur allgemeinen Ressourceneffizienz betrachtet. Als Ergebnis der zusätzlichen ressourceneffizienten Potenziale sind die nachfolgenden Punkte analysiert worden:

- Digitalisierung der Prozesskette (Industrie 4.0):
 - allgegenwärtiger Zugang zu allen relevanten Prozessparametern und Produktdaten
 - Optimierung des Bestandsmanagements bzw. der Planbarkeit und Steuerung von Warenflüssen
 - Anstoßen von kontinuierlichen Verbesserungsprozessen (KVP)
- Asset-Tracking:
 - Echtzeit Objektverfolgung und -überwachung innerhalb industrieller Logistikprozesse
 - Möglichkeit von manuellen- und systemischen Eingriffen zur Live-Prozessoptimierung
- Durchgängige Steuerungsmöglichkeit und lückenlose Nachweisfähigkeit:
 - Unmittelbare Eingriffsmöglichkeiten bei nötigen Prozessanpassungen
 - Beschädigungen von Gütern / Ladungsträgern können mittels Sensorik entlang der Prozesskette nachvollzogen werden
 - Einhaltung von gesetzlichen und allgemeinen Regularien kann im Sinn der Nachweispflicht durchgeführt werden
- KI-basierte Datenauswertung
 - IoT-Plattform zur gezielten KI-basierten Datenauswertung ermöglicht neuartige Zusatzservices wie z. B. eine intelligente Problemerkennung, -analyse und -prognose durch Implementierung und Kombination vielfältiger Unternehmens- und Zustandsdaten

Insgesamt ist bei allen Praxispartnern eine hohe Motivation zu erkennen, dass durch eine potenzielle Realisierung des angestrebten intelligenten Ladungsträgers mit Zustandsüberwachungstechnologie die vorherrschende Transparenzlücke innerhalb der gesamten Prozesskette und speziell der Lebensmitteldistribution und bei besonders kritischen Stellen entgegengewirkt werden kann.

Ein weiterer Fokus bei der Analyse und bei den IST-Prozessaufnahmen vor Ort lag in der Evaluierung von möglichen Funktionsflächen und Knotenpunkten entlang der Prozesskette, welche zur induktiven Aufladung des angestrebten intelligenten Ladungsträgers potenziell genutzt werden könnten. Die Anforderungen an eine Funktionsfläche, welche zur induktiven Aufladung von Ladungsträgern geeignet ist, werden maßgeblich durch eine ausreichend lange Standzeit und Zugänglichkeit der Aufladeschnittstellen eines Ladungsträgers definiert. Innerhalb der gesamten Lebensmittelprozesskette konnten das Distributionszentrum und der Transport als geeignete Knotenpunkte zur Möglichkeit einer Umsetzung von induktiven Lademöglichkeiten identifiziert werden. Gründe hierfür sind, dass innerhalb dieser Bereiche aus prozessualer Sicht die längsten Standzeiten eines Ladungsträgers zu beobachten sind. Zusätzlich findet im Distributionszentrum und beim Transport eine Bündelung von Ladungsträgern zur Versorgung und zum Start des Lebensmitteldistributionsprozesses statt.

Folglich konnten die nachstehenden Funktionsflächen in einer ersten Analyse zur potenziellen induktiven Aufladung identifiziert werden.

- Ladefläche des Lkw (Sattelaufleger)
- WE (Wareneingang) - Puffer
- Leergutpuffer (RC (Rollcontainer) Puffer, sonstige Ladungsträger)
- WA (Warenausgang) - Fläche

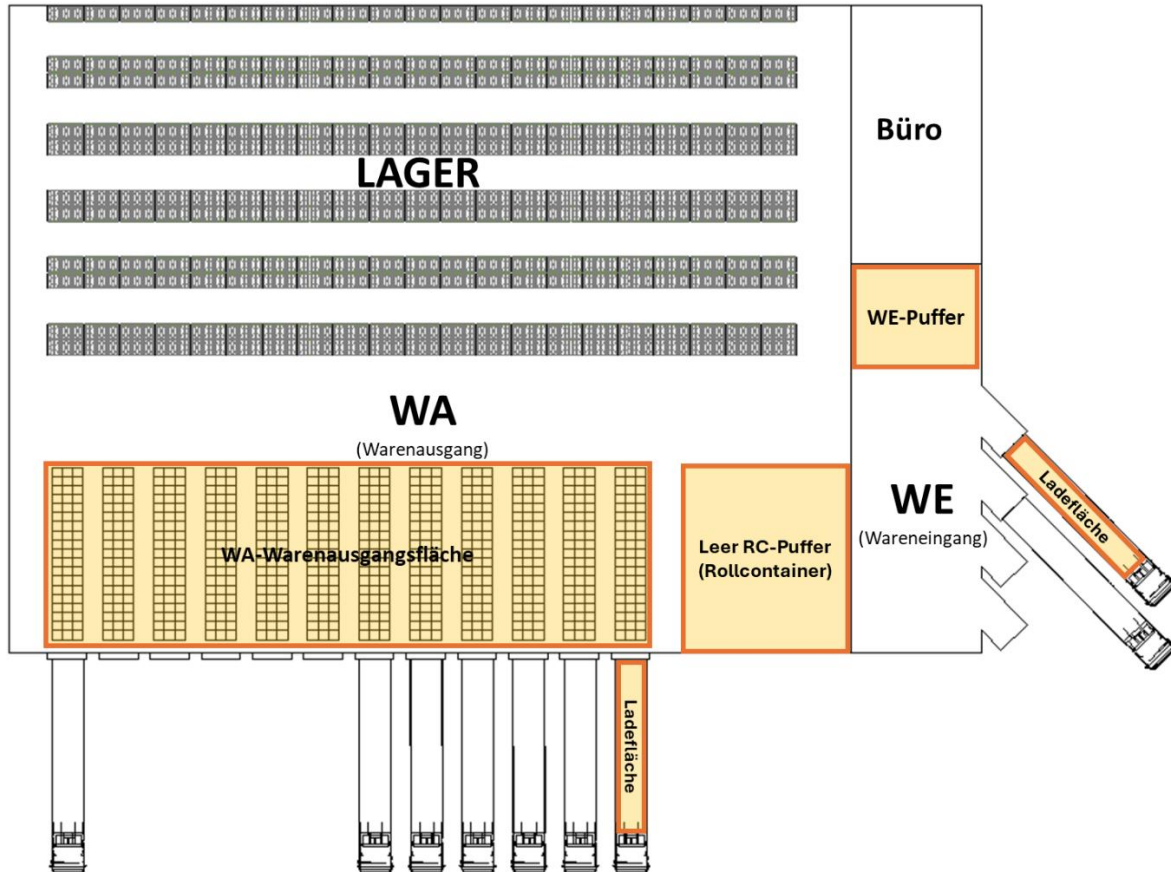


Abbildung 2: Funktionsflächen in einem Distributionszentrum zur potenziellen induktiven Aufladung

Diese in einem ersten Schritt analysierten potenziellen Funktionsflächen zur induktiven Aufladung wurden in einem folgenden Schritt weiter analysiert. Es wurden einige Herausforderungen bezüglich Umsetzung und Nutzbarkeit dieser induktiven Ladepunkte evaluiert und zur abschließenden Bewertung analysiert. Als zwei primäre Herausforderungen wurden zum einen die baulichen Veränderungen an den aufgezeigten potenziellen Funktionsflächen in Kombination mit zu erwartenden hohen Investitionskosten identifiziert. Des Weiteren muss die Ausgestaltung der induktiven Ladepunkte neben einer Anbindung zur Gewährleistung der Energieversorgung auch eine Überfahrbarkeit mit schweren Flurförderfahrzeugen, wie Staplern, gewährleisten. Zum anderen wäre die Nutzbarkeit der Flächen zur induktiven Aufladung speziell im Bereich der Leergutpufferung, in Bezug auf den Rollcontainer als erschwert identifiziert worden. Durch eine volumenreduzierte Pufferung (siehe Abbildung) von Rollcontainern befinden sich nicht alle Bodenplatten des Ladungsträgers, in dem sich die induktive Ladeschnittstelle befindet, in unmittelbarer Nähe zum Untergrund und der darin liegenden Induktionsschleifen, welche das Aufladen des Ladungsträgers gewährleisten.



Abbildung 3: Walther – Beispiele volumenreduzierter Rollcontainer (Leergutpuffer, Leerguttransport)

Als eine weitere Herausforderung wurde die Inflexibilität der Nutzung der Funktionsflächen zur induktiven Aufladung identifiziert. Dieser Punkt bezieht sich vorrangig darauf, dass bei einer prozessualen Anpassung der Funktionsflächen innerhalb des Distributionszentrums die zuvor installierte Induktionsladeinfrastruktur nicht ohne erheblichen Aufwand veränderlich ist, um diese in ein neues Flächen- und Prozesskonzept zu integrieren. Aus den identifizierten Herausforderungen können die Funktionsflächen WE-Puffer, Leer-RC-Puffer und die WA-Fläche als weniger geeignete Flächen zur induktiven Aufladung herausgestellt werden.

Folglich lässt sich aus den potenziell geeignet identifizierten Funktionsflächen der Ladeboden des Sattelauflegers als am geeignetsten herausstellen. Bei einer belastbaren und funktionalen Ausgestaltung des Ladebodens würde sich neben der Möglichkeit zur Aufladung der Ladungsträger auch eine flexible Prozessnutzung umsetzen, bei der der Laderaum auch für alle anderen Ladungsträger nutzbar bleibt. Zusätzlich wäre die Energieversorgung bzgl. der Ladeinfrastruktur innerhalb des Sattelauflegers durch die energetische Erzeugung der Zugmaschine (Lkw) gesichert. Anzumerken ist, dass die längste Standzeit der Ladungsträger zur induktiven Aufladung innerhalb des Sattelauflegers sich auf den entsprechenden Transportwegen befindet. Daher müsste eine nachhaltige Umsetzung der Energieversorgung der induktiven Ladeinfrastruktur während der Fahrt durch die Zugmaschine im Fokus stehen, um eine Ressourceneffizienz dem Umweltgedanken nach zu realisieren.

Zusätzlich ließ sich zu diesem Zeitpunkt im Forschungsvorhaben durch Erkenntnisse des Projektpartners Brehmer erkennen, dass zur energetischen Leistungsfähigkeit des Ladungsträgers prinzipiell kein „induktives Laden“ notwendig ist. Durch Algorithmen und „Deep-Sleep“ kann eine Lebensdauer von größer 6 Jahren erreicht werden. Dabei würde die geplante Lebensdauer der Batterie die durchschnittliche Lebensdauer eines Ladungsträgers übersteigen.

Aus den identifizierten und analysierten Herausforderungen bei der Umsetzung einer induktiven Aufladung und dem Planungsstand der Energieversorgung des intelligenten Ladungsträgers wurde im weiteren Projektverlauf die Umsetzung der induktiven Aufladung nicht weiter evaluiert. Die Bewältigung der Hausforderungen und Kosten nach Abstimmung mit den Praxispartnern und Projektpartnern steht in keinem Verhältnis zur geplanten energetischen Versorgung des Ladungsträgers (> 6 Jahre).

Als Grundlage zur Evaluation von Spezifikationen, die für den zu entwickelnden Ladungsträger zu berücksichtigen sind, wurden zunächst die Angaben aus der Vorhabensbeschreibung zusammengefasst und mit den nachfolgend recherchierten Regularien im Umgang mit Lebensmitteln und deren Transport und Lagerung abgeglichen.

Herangezogene Regularien sind in diesem Zusammenhang die:

- Lebensmittelhygieneverordnung (LMHV)

- Lebensmitteltransportbehälter-Verordnung (LMTV)
- Leitlinie für eine gute Lebensmittelhygienepraxis beim Lebensmitteltransport
- Verordnung (EG) Nr. 852/2004

Folglich konnten die ersten Spezifikationen aus der Vorhabensbeschreibung validiert werden. Zur weiter vertiefenden Evaluation der Spezifikationen des geplanten Ladungsträgers wurden die bisherigen Ergebnisse der durchgeführten Online-Workshops in Kombination mit vor Ort IST-Prozessaufnahmen vertieft, um eine hinreichende Ausarbeitung der Spezifikationen zu erzielen.

Durch physische Prozessaufnahme vor Ort konnten die vorangegangenen Ergebnisse aus den Workshops und internen Abstimmungen validiert werden. Demnach zeigte sich, dass der Roll-Container (Grundmaß: 814 x 722 mm) als Haupt-Ladungsträger in Lebensmittelprozessen und speziell in den Distributionsprozessen von der Quelle (Distributionslager) zur Senke (Filiale) einen überwiegenden Anteil in der Nutzung darstellt.

Darüber hinaus konnte die Halbpalette (Grundmaß: 800 x 600 mm) als ein weiterer Ladungsträger identifiziert werden, welcher jedoch in den Lebensmittelprozessen, bezogen auf Frische- und Tiefkühllebensmittel, nicht im Fokus der Anwender steht. Die Halbpalette blieb im weiteren Projektverlauf hypothetisch weiter in der Betrachtung, um die technische Adaptierfähigkeit der angestrebten Technologie auf weitere Ladungsträger evaluieren zu können.

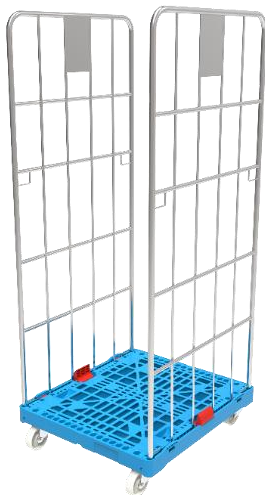


Abbildung 4: Walther – Rollcontainer



Abbildung 5: Walther – Halbpalette

Für den weiteren Forschungsansatz konnten die nachfolgenden Spezifikationen aus den dargestellten Methodiken der Workshops und Ist-Prozessaufnahmen identifiziert und mit entsprechenden technischen Anforderungen mit den Projektpartnern geteilt werden.

Die Anforderungen an den Ladungsträger gliedern sich nach:

1. Geometrie
 - a. Einhaltung der Modulmaße nach der Norm DIN 55510-3 (Modulmaß: 600 x 400 mm)
 - b. Abmessungen:
 - i. Rollcontainer: 814 x 722 x 1842 mm
 - ii. Halbpalette: 800 x 600 x 160 mm
 - c. Tragkraft: 500 kg
 - d. Möglichst geringes Eigengewicht: < 35 kg
 - e. Unterfahrbarkeit zur Aufnahme per Stapler und Hubwagen
 - f. Abnehmbare Seitengitter (Einsteckwände)
 - g. Feststellbremse
 - h. Aussparung zur Integration der Sensorik
2. Funktion
 - a. Sensorik:
 - i. Gehäuse: min. IP67 (wasser- und staubdicht)
 - ii. Energieversorgung:
 1. Sicherstellung der Aufzeichnung und Datenübertragung in Echtzeit
 - iii. Temperatursensor:
 1. Messbereich: mind. - 30 °C bis + 60 °C
 2. Messgenauigkeit: mind. +/- 0,5 °C
 - iv. Feuchtesensor:
 1. Messbereich: 0 % - 100 % relativer Feuchtigkeit
 2. Messgenauigkeit: +/- 1 %
 - v. Beschleunigungssensor:
 1. Messbereich: min. +/- 0,25 g bis 100 g
 - vi. GPS-Sensor:
 1. Messgenauigkeit: min. +/- 10 m
 - b. Unterfahrfähigkeit
 - i. Aufnahme der Ladungsträger mittels Lastaufnahmemittel (z. B. Gabelstapler)
3. Handling
 - a. Reinigungsfähigkeit
 - i. Ladungsträger muss ohne Nutzungseinschränkungen reinigungsfähig sein
 - b. Manuell verfahrbar (bezogen auf Rollcontainer)
 - i. Einsatz eines Rollcontainers durch eine Trägerplatte mit Rollen
 - ii. Zwei Lenk- und zwei Bockrollen
 - c. Zerlegbarkeit
 - i. Rollcontainer muss sich einfach und ohne Werkzeug zerlegen lassen (platzsparender Leergutrücklauf)
 - d. Einsatz von Zwischenböden muss möglich sein
 - i. Möglichkeit, fragile und nicht stapelfähige Lebensmittel zusammen auf einem Rollcontainer zu transportieren
 - e. Zugänglichkeit und Demontage der Sensorik
 - i. Die Sensorik muss zu Reparatur- und Recyclingzwecken (Wiederverwendbarkeit) zugänglich und als Einheit unversehrt vom Ladungsträger zu trennen sein
4. Werkstoff
 - a. Hinreichende Robustheit bzw. Langlebigkeit (Sicherstellung von min. 100 Umläufen)
 - b. Temperaturbeständig: - 30 °C bis + 60 °C
 - c. Sicherstellung einer Lebensmittelechtheit
 - d. Recyclingfähig
5. Ergonomie
 - a. Gewährleistung einer leichten und manuellen Verfahrbarkeit
 - b. Geräusch reduzierte Ausgestaltung der Lenk- und Bockrollen
 - c. Zugänglichkeit der Sensorik

Durch die dargestellten Ergebnisse im Arbeitspaket 1.1 konnten die konzeptionelle Umsetzbarkeit und eine Nutzbarkeit der Projektidee in einer ersten Phase durch die Marktanalyse in Bezug auf die Praxispartner und im Projektkonsortium validiert werden.

Eine induktive Aufladung des intelligenten Ladungsträgers wird aus den beschriebenen Herausforderungen und dem Stand der Forschung zur Bereitstellung der benötigten Energie nicht weiterverfolgt. Die durch Analysen, Workshops und IST-Prozessaufnahmen erarbeiteten Spezifikationen und Anforderungen an den Ladungsträger vervollständigen die erfolgreiche Bearbeitung der im Arbeitspaket 1.1 definierten Aufgabenstellung.

1.2 Definition der Anforderungen an die neu zu entwickelnde Elektronik-Hardware

Im Arbeitspaket 1.2 wurde nach Festlegung der Schnittstellen und nach entsprechender Auswahl eines für dieses Projekt beispielhaften Ladungsträgers von WALTHER Faltsysteme GmbH ein Projekthandbuch mit allen notwendigen elektronischen Anforderungen erstellt. Dieses Projekthandbuch wurde über den gesamten Projektzeitraum stetig angepasst und aktualisiert und stellt ein entsprechendes Lastenheft für die angestrebte Entwicklung dar.

Im Rahmen dieses Projekthandbuches wurden verschiedene Anforderungen an die Elektronik feingliedrig unterteilt und in die technischen Anforderungsbereiche: IoT, NB IoT, Energiemanagement, und Ladetechnologien unterteilt.

Die wichtigsten Inhalte des Projekthandbuchs werden in den einzelnen Arbeitsschritten dieses Berichts aufgeführt.

1.3 Definition der Anforderungen / Konzeptionierung des neuartigen Mehrwegladungsträgers

Im Arbeitspaket 1.3 wurde anhand der tiefgreifenden Marktkenntnis und auf Basis der IST Analyse der Firma MALORG ein entsprechender Anforderungskatalog erstellt und basierend auf diesem, ein Ladungsträger ausgewählt. Aufgrund der starken Fokussierung auf den Lebensmittelmarkt in Kombination mit der vollständig angestrebten Überwachung der Supply-Chain wurde ein Ladungsträger ausgewählt, welcher als Referenz für die weiteren im Projekt angestrebten Versuche dient. Dieser Ladungsträger wird sowohl im Lager sowie auch auf den Verkaufsflächen durch verschiedene Anwender eingesetzt. Der Ladungsträger zeichnet sich durch ein innovatives Komfortsystem aus, welches eine sehr ergonomische Handhabung ermöglicht und dadurch eine sehr hohe Akzeptanz im Markt erreicht. Damit konkurrenzfähige Preise, trotz der zusätzlich verbauten Technik erreicht werden, soll der Montageprozess ohne zusätzliche Hilfsmittel erfolgen, damit weitere Kosten vermieden werden. Weiterhin muss der Ladungsträger robust und langlebig designt werden, um die angestrebten Umläufe zu erreichen. Zusätzlich muss eine einfache Reinigung gewährleistet sein, damit der Ladungsträger ohne Einschränkungen im Lebensmittelbereich eingesetzt werden kann. Eine Zulassung für direkten Lebensmittelkontakt ist obligatorisch.

Nach Ablauf des Produktlebenszyklus wird eine 100% Recyclingfähigkeit angestrebt, welche durch einen einfachen Demontageprozess unterstützt werden soll.

Durch diese Auswahl des Ladungsträgers lassen sich großflächige Messdatenpunkte zur Umsetzung der späteren Auswertungen generieren.



Abbildung 6: WALTHER ROLLCONTAINER, Auszug Prospekt

1.4 Definition der softwarespezifischen Anforderungen

Im Arbeitspaket 1.4 erarbeitete das InES eine Grobarchitektur und ein Technologiekonzept für den Aufbau einer Softwareplattform zur IoT-Datenhaltung, im Weiteren bezeichnet als „watchER-Cloud“. Außerdem wurden bereits Möglichkeiten zur Implementierung von Datendiensten zum Exportieren, Darstellen und Analysieren der Sensordaten erarbeitet und in der watchER-Cloud berücksichtigt.

Unter anderem durch den Einsatz aktueller Requirements-Engineering-Methoden im Rahmen von Analyseworkshops mit dem Projektteam sowie Felderkenntnissen wurde ein Datenmodell entwickelt, ein geeignetes Datenbankmanagementsystem ausgewählt sowie ein Technologieframework zur Umsetzung einer Datenanalyse auf Basis künstlicher neuronaler Netze (ANNs) und kombinierter Entscheidungsbaume (DTs) spezifiziert.

Anforderungskatalog der Softwareplattform (watchER-Cloud)

Anforderungskatalog der IoT-Plattform (watchER-Cloud)	
Hosting und Nutzbarkeit:	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: durchschnittlich mind. 99,8 % • Verlässlichkeit: durchschnittlich mind. 99,0 % • Datensichtung und -auswertung mittels variabler Dashboards in GUI
Aufbau, Wartung und Erweiterbarkeit:	<ul style="list-style-type: none"> • Frühzeitige Erkennung und Behandlung von Störungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Umfangreiches Error-Handling und Feedback-Logging • Modularisierung in Funktionskomponenten (z.B. Datenbank, Schnittstelle) <ul style="list-style-type: none"> ○ Implementierung in separaten Containern • Hilfreiche Software-Dokumentation und Kommentierung • Nutzung etablierter und leistungsfähiger Frameworks und Basistechnologien • Cloud-Administration mittels GUIs und/oder Kommandozeile
Datenübertragung:	<ul style="list-style-type: none"> • Datenübertragungsrate: mind. 200 MBit/s • Latenzzeit bei der Datenübertragung: durchschnittlich maximal 750 ms • Chance auf Datenverlust minimieren (z.B. mittels lokalem Buffering) • Datenintegrität sicherstellen (z.B. durch Prüfsummenabgleich) • Hohe Sicherheit gegenüber korrupter Anfragen Dritter (z.B. durch Überprüfung der Absender-IP-Adresse) • Daten- und energieeffiziente Kommunikationstechnologie & -protokolle im Bereich IoT

Datenspezifikation, -speicherung & -transfer:	<ul style="list-style-type: none"> • Dateneffizienz: Sensorpakete so klein wie möglich (max. 200 Bytes) <ul style="list-style-type: none"> ○ Zielorientierte Auswahl der Sensorwerte und Metainformationen inkl. Datentypen • Datenvariabilität: Spezifikation nachträglich anpassbar (z.B. Sensorerweiterung oder -aktualisierung) • Big Data: Effizientes Arbeiten mit großen Datenmengen durch z.B.... <ul style="list-style-type: none"> ○ Datentrennung inkl. automatischer Archivierung alter Daten ○ Parallel Processing • Datenverlust minimieren durch Backups und Redundanz
KI-basierte Analyse:	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Herausforderungen in dynamischen Attributräumen (bspw. Sensornetzwerke) <ul style="list-style-type: none"> ○ Variable Attribute, Sensorausfall/Sensorerweiterung, ... • Unterstützung von Offline-Learning auf Datenexports • Integration von KI-Modellen in Echtzeitpipeline

Technologiekonzept

Basierend auf dem gemeinsamen Anforderungskatalog wurde eine umfassende Technologierecherche für die Umsetzung der notwendigen Basiskomponenten der watchER-Cloud durchgeführt, bewertet und konkrete Designentscheidungen abgeleitet. Die Recherche umfasste unter anderem die folgenden Aspekte:

- Datenspezifikation, Datenmodell und Datenbanksysteme
- Cloud-Hosting, Virtualisierung und Rechenzentruminfrastruktur
- KI-Dienste und externe Datenquellen (z.B. Wetterdaten, Karteninformationen)
- IoT-Datenübertragung (Technologien und Protokolle), z.B.
 - CoAP (Constrained Application Protokoll)
 - CBOR (Concise Binary Object Representation)
 - NB-IoT (Narrowband Internet of Things)
 - CAT-M1 (Category M1)
 - Zigbee

Vor allem die konkrete Ausgestaltung der Datenübertragungspipeline von watchER-Controller zur Cloud war komplex und daher möchten wir an dieser Stelle kurz auf die hier getroffenen Entscheidungen eingehen. Nach ersten Analysen wurden zwei grundsätzliche Übertragungsalternativen ausgearbeitet:

Gateway (Zigbee)	Cellular (NB-IoT, CoAP)
Idee: Indirekte, schnelle Übertragung ≥1 Controller → Gateway → Cloud	Idee: Flexible, direkte Übertragung Controller → (Funknetzbetreiber) → Cloud
<ul style="list-style-type: none"> • Energiesparende Kommunikation mit Gateway über Zigbee (anstatt WiFi) • Schnelle Übertragung zwischen Gateway und Cloud über Ethernet 	<ul style="list-style-type: none"> • Jedes Gerät ist autonom und direkt verbunden über Funknetz (Robust, örtlich flexibel, Effizient) • Energiesparende IoT-Technologien existieren (z.B. NB-IoT, CoAP)
<ul style="list-style-type: none"> • Installation von Gateways in Fahrzeugen und Lagern (Energieverbrauch, Komplexität) • Points of Failure 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung externer Dienste von Netzbetreibern • Unvollständige Abdeckung (ca. 90% bei Telekom) • Stationärer Geschwindigkeitsnachteil

Aufgrund der deutlich geringeren Anwendungshürden in der praktischen Umsetzung, der voraussichtlich nur minimalen höheren Übertragungslatenz im Vergleich zu einem deutlichen Zugewinn an Robustheit und Flexibilität entschied sich das Projektkonsortium für die direkte Lösung auf Basis der energieeffizienten Übertragungstechnologie NB-IoT (basiert auf LTE) in Kombination mit CoAP (ähnlich zu HTTP).

Hierfür wurde als Netzbetreiber die 1NCE GmbH genutzt. Dies basierte auf Basis eigener positiver Erfahrungen innerhalb des Konsortiums und attraktiver Leistungsangebote im Bereich effizienter IoT-Firmware und Datenverarbeitungsdiensten inkl. einer extern erreichbaren API.

Grobarchitektur

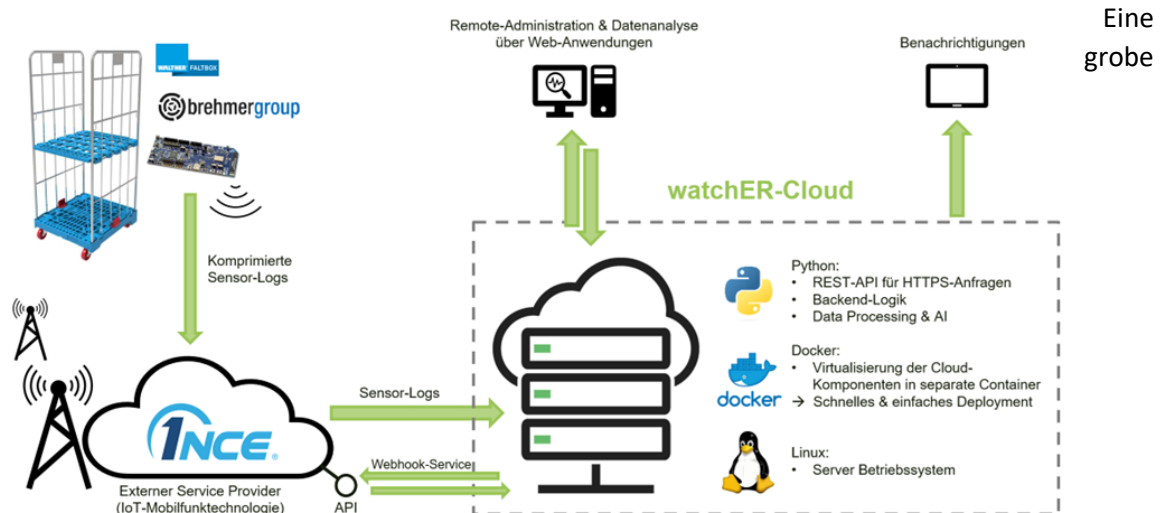


Abbildung 7: Grobarchitektur watchER-Cloud

Übersicht der Funktionsweise der Datenübertragung inkl. Basisschnittstellen und Komponenten der watchER-Cloud sind in Abbildung 1 dargestellt. Sensordaten werden vom Controller, der sich am Ladungsträger befindet, mithilfe der ausgewählten Übertragungstechnologien an den externen Service Provider 1NCE gesendet und von dort an eine externe REST-API über HTTPS an die watchER-Cloud geschickt. Technisch basiert die Cloud auf mehreren virtualisierten Docker-Containern, die wiederum in Python implementierte Logik enthalten, u.a. zur Datenverarbeitung und Ausführung bzw. Training von KI-Modellen. Als Betriebssystem dient eine klassische Linux Server Umgebung.

2 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters

Im Arbeitspaket 2, sowie in dem in Arbeitspaket 2 untergliederten Arbeitspaket 2.1, 2.2, - 2,8 wurde ein grobes Konzept des Aufbaus für das Projekt watchER beschrieben.

Dabei wurden in gemeinsamer Abstimmung durch WALTHER Faltsysteme als Ergebnis des AP 1 die nachfolgende Anforderungsliste entwickelt.

WALTHER Faltsysteme	Anforderungsliste für: Projekt watchER Projektverantwortlicher: O. van Neerven		Datum: 22.03.22 Seite 1 von 2
F/W	Anforderung	Bemerkung	Änderungs-Datum
	<p>1. Geometrie</p> <p>1.1. Einhaltung Modulmaß</p> <p>1.2. Abmessungen Ladungsträger B x T x H [mm]:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Roll-Container 814 x 722 x 1842 mm - Halbpalette 800 x 600 x 160 mm <p>1.3. Gewicht Einzelteile < 24 kg</p> <p>1.4. Dynamische Last 500 kg</p> <p>1.5. 4-Wege Zugang (Ladehilfsmittel)</p> <p>1.6. Platzbedarf für Sensorik</p> <ul style="list-style-type: none"> - 145 x 80 x 40mm <p>2. Funktion</p> <p>2.1. Stapelfähigkeit (Leergut)</p> <p>2.2. Volumenreduzierung</p> <p>2.3. Reparaturfähigkeit</p> <p>2.4. Kennzeichnung</p> <p>2.5. Identifikation</p> <p>2.6. Förderfähigkeit (Rollenbahn etc.)</p> <p>2.7. Individualisierung (Logo, Branding)</p> <p>2.8. Lebensmittelkontakt geeignet (direkt/indirekt)</p> <p>2.9. Austausch der Sensorik (Optional)</p> <p>2.10. Gewährleistung 100 Umläufe</p> <p>2.11. Reinigungsfähigkeit</p> <p>3. Handling</p> <p>3.1. Einzel transportfähig</p> <p>3.2. Doppelstock</p> <p>4. Werkstoff/Material</p> <p>4.1. Monostofflich</p> <p>4.2. Recyclingfähig</p> <p>5. Ergonomie</p> <p>5.1. Demontage ohne Werkzeug</p>		
F			
W			
F			
F			
F			
F			
F			
W			
W			
F			
F			
F			
F			
W			
W			
F			
W			

2.1 Elektronik und Firmware Entwicklung

Im Arbeitspaket 2.1 wurde ein erster Stand der Firmware auf Basis der in AP1 erarbeiteten Informationen erstellt. Zur Umsetzung wurde ein „Development-Kit“ welches verschiedenste Technologien vereint und somit eine ideale Basis für die weitere Entwicklung bietet verwendet. Das beschriebene „Development-Kit“ weist dabei die Dimensionen 145 x 80 x 40mm auf, welche auch in der obenstehenden Tabelle wiederzufinden sind.

Zur Kommunikation der Messdaten welche mit der Sensorelektronik aufgenommen und ausgewertet werden, wurden verschiedene IoT-Module untersucht und verglichen. Die Untersuchung wurde nachfolgend aufgeführt.

Tabelle: Vergleich der IoT-Module

M1/NB-IoT-Modul	Funkstandart	Stromaufnahme			Versorgungsspannung	Sensitivity
		PS-Mode In μ A	Idle Mode bei DRX = 2,56s In mA	Transm. Mode bei 23dB/m In mA		
nRF9160	LTE	2,7	0,018	115/225	3,0V – 5,5V	With GNSS 2,5mA one fix every 2 minutes
BC66-NB	LTE	3,5	0,35	110	2,1V – 3,6V	-129 dB
BC66-NB	LTE	3,5	0,25	95	2,1V – 3,6V	-129 dB
BC95-G	LTE	3,0	0,5	250	3,1V – 4,2V	-129 dB
BC660K-GL	LTE	0,8	0,11	330	2,2V – 4,3V	-114 dB
BG77-LP	LTE	3,44	15,8	165	2,6V – 4,8V	With GNSS
BG600L-M3	LTE	4	14,33	148	3,3V – 4,3V	With GNSS
BG770A-GL	LTE	1,4	1,05	TBD	2,2V – 4,35V	With GNSS

2.2 Konstruktion des angestrebten Mehrwegladungsträgers

Im Arbeitspaket 2.2 wurden erste Überlegungen zur Integration der Sensorik in den Mehrwegladungsträger begonnen.

Basierend auf der Auswahl aus Arbeitspaket 1.3 wurde die entsprechende Bodenplattenzeichnung geprüft und in Abstimmung mit der Brehmer GmbH & Co. KG Konzepte zur Integration erarbeitet.

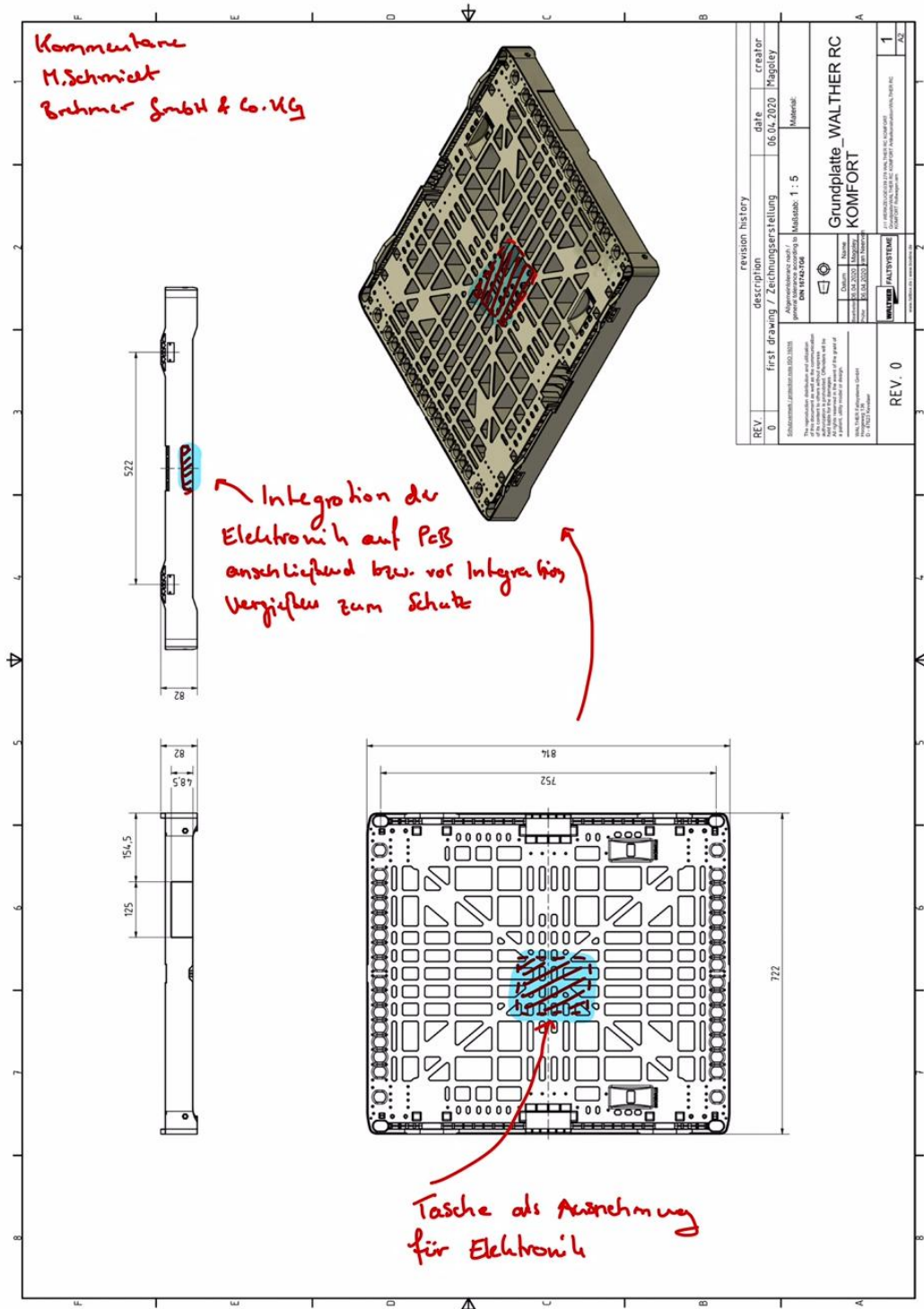


Abbildung 8: Prinzipskizze Mehrwegladungsträger - Integration der Elektronik

Nach Festlegung der erforderlichen Abmessungen durch die Brehmer GmbH & Co. KG erfolgte die genaue Platzierung der Elektronik, unter Einbeziehung der vorhandenen Werkzeuginfrastruktur in der Bodenplatte des Roll-Containers.

Unter Berücksichtigung des Anspritzsystems und der geforderten Traglast von 500 kg konnte mit Hilfe von FEM-Berechnungen eine optimale Platzierung gefunden werden. Durch den erforderlichen Bauraum für die Elektronik muss in Teilbereichen der Grundplatten die Rippenstruktur durchbrochen werden. Die FEM-Berechnungen zeigen einen Anstieg der erwarteten Durchbiegung von 3,6 mm auf 3,9 mm, was einer Steigerung von lediglich 8 %. Beide Werte liegen unterhalb der geforderten Grenzwerte.

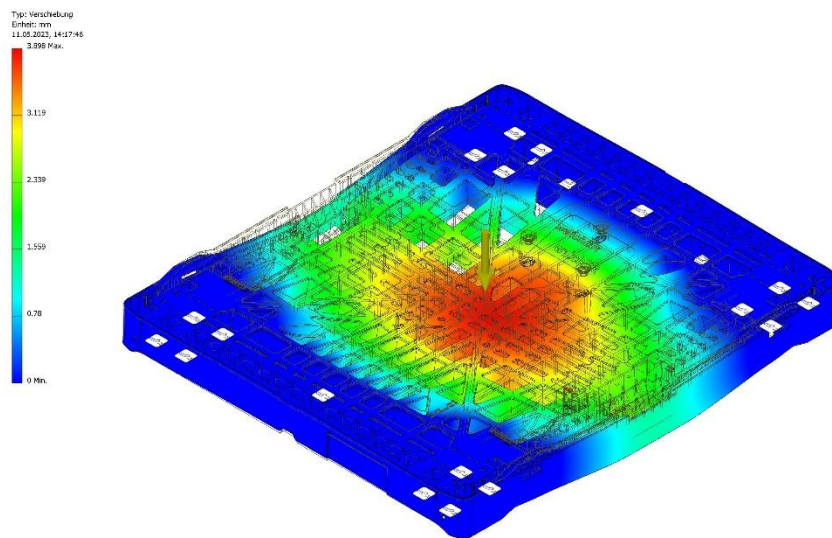


Abbildung 9: FEM Berechnung (statisch)

Damit die werkzeuglose Montage der Elektronik, gemäß der Anforderungen, realisiert werden kann, wurde ein Klips-Mechanismus entwickelt, wodurch die Elektronikkomponenten nur eingesteckt werden.

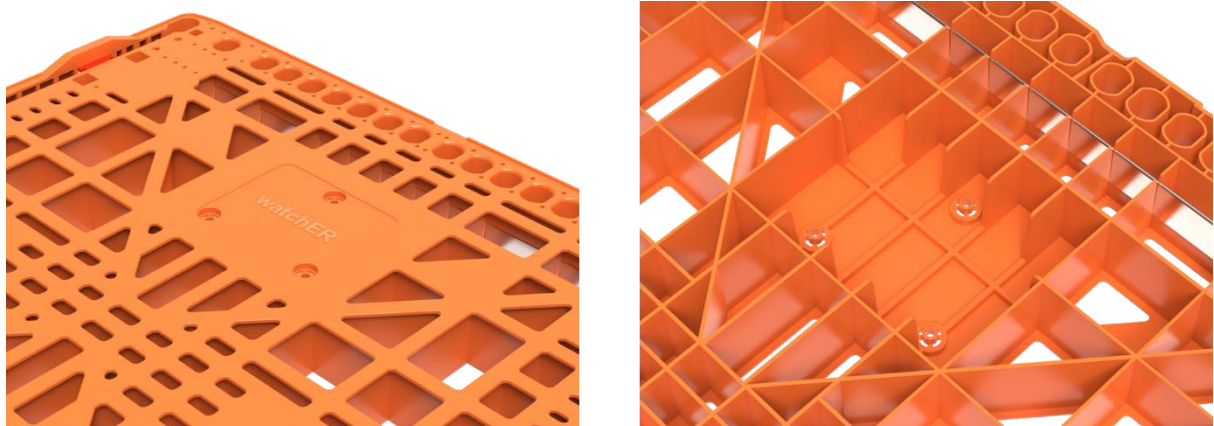


Abbildung 10: Rendering Mehrwegladungsträger - Integration der Elektronik

Das Ergebnis der neuen Konstruktion ermöglicht den Einsatz des intelligenten Ladungsträgers ohne jegliche Einschränkungen im Vergleich zum bestehenden Ladungsträger. Somit entstehen keine Einschränkungen für die Nutzer und die Technik kann in einer neuen Generation der Ladungsträger als Option angeboten werden.

Der Roll-Container soll bevorzugter Ladungsträger betrachtet werden, da bereits ein breites Kundenspektrum vorhanden ist, welches für Live-Tests genutzt werden kann, um bereits in der frühen Phase des Projektes Daten sammeln zu können. Je früher „echte“ Daten zur Verfügung stehen, desto besser kann auch die Auswertung der Daten erfolgen. Neben dem Roll-Container wird weiterhin die Halbpalette als Ladungsträger betrachtet, um eine breitere Basis an Kunden gewinnen zu können. Für weitere Untersuchungen wird in Abstimmung ein Gehäuse, welches die Elektronik des watchEr beinhaltet in einen bestehenden Ladungsträger der Walther Faltsysteme GmbH integriert.

2.3 Erarbeitung eines projektspezifischen Kleinstserienwerkzeugs

Nach Abschluss der in AP 2.2 angestrebten Anpassungen zur Integration einer Elektronik kann mit der Erarbeitung eines projektspezifischen Kleinstserienwerkzeugs gestartet werden, wobei die ersten Prototypen mithilfe des schon bestehenden Werkzeugs hergestellt wurden und die Integration der Elektronik durch eine manuelle Nachbearbeitung der Ladungsträger erfolgte.

Die Herausforderung der Werkzeugkonstruktion bestand darin, dass die Gegebenheiten des bestehenden Werkzeugs berücksichtigt werden müssen, da weiterhin die bestehenden Ladungsträger produziert werden müssen, um den bestehenden Kunden weiterhin gerecht werden zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Änderungen an dem Werkzeug durch reversible Wechseleinsätze gestaltet werden.

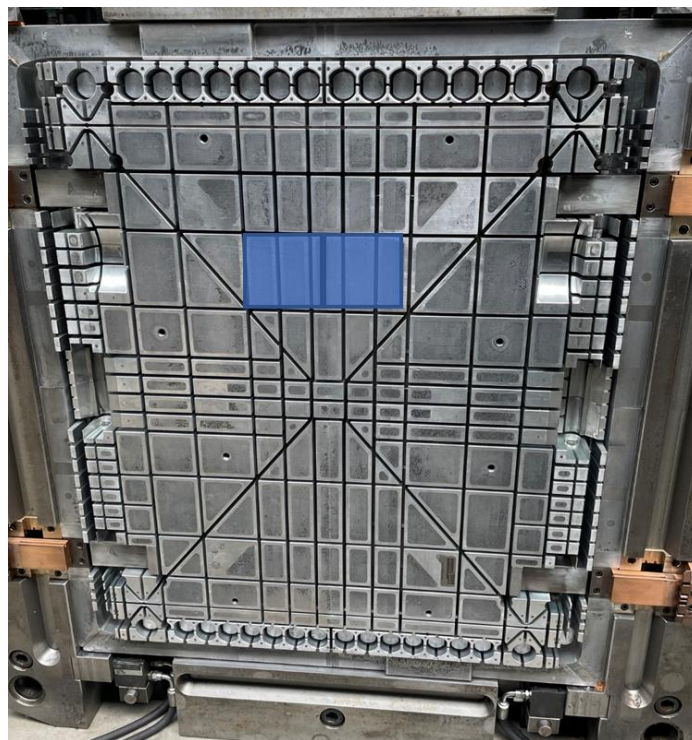


Abbildung 11: Werkzeug (Auswerferseite) - Änderungsbereich

Der Umfang der Anpassungen am Werkzeug ist trotz der begrenzten Dimensionen des Bereichs erheblich. Es müssen vier Taschen in die Werkzeuge eingefräst werden (Düsenseite & Auswerferseite), die Kühlung des Werkzeugs muss durch die zusätzlichen Trennungen im Werkzeug verlegt werden, und es müssen sowohl die neuen Werkzeugeinsätze, als auch die bestehenden Werkzeugeinsätze neu gefertigt werden.

Damit die Arbeiten durchgeführt werden können, wird das Werkzeug demontiert, damit die Bauteile auf den entsprechenden Bearbeitungsmaschinen im Werkzeugbau gefräst und geschliffen werden können.

2.4 Aufbau einer cloudbasierten IoT Plattform zur Massendatenerfassung

In diesem Arbeitspaket fand die wesentliche technische Spezifikation und Implementierung der Basisfunktionalität der watchER-Cloud entsprechend des Anforderungskataloges und der Ergebnisse des AP1 statt. Die definierten Software-Komponenten wurden erfolgreich implementiert bzw. installiert, verbunden und getestet. Eine detaillierte technische Übersicht der finalen watchER-Cloud mit der einzelnen Komponente, deren Schnittstellen und der Datenübertragungspipeline ist in nachfolgend ersichtlich. Nachfolgend sind die wichtigsten Komponenten und Funktionen beschrieben:

- Schnittstelle zum Empfangen der dekodierten Sensordatenpakete über einen HTTPS-Endpoint definiert als REST-API und implementiert mittels Flask
- KI-Modul mittels Python Data Science Bibliotheken (z.B. PyTorch, NumPy und Pandas)
- „MySQL-Server“ als Datenbankmanagementsystem (DBMS) in definiertem Schema
- Open-Source Business Intelligence Anwendung „Metabase“ mit Web-Oberfläche
- Open-Source Datenbankadministration mittels „phpMyAdmin“ über Web-Oberfläche

Bemerkung: Da es grundsätzlich um den Aufbau eines lauffähigen Cloud-Prototyps handelt, verliefen die Arbeitspakete AP 2.4, 2.8, 3.4 und 4.3 eher iterativ in mehreren Entwicklungszyklen und sind daher nicht vollständig voneinander abtrennbar im Hinblick auf die hier erzielten Ergebnisse.

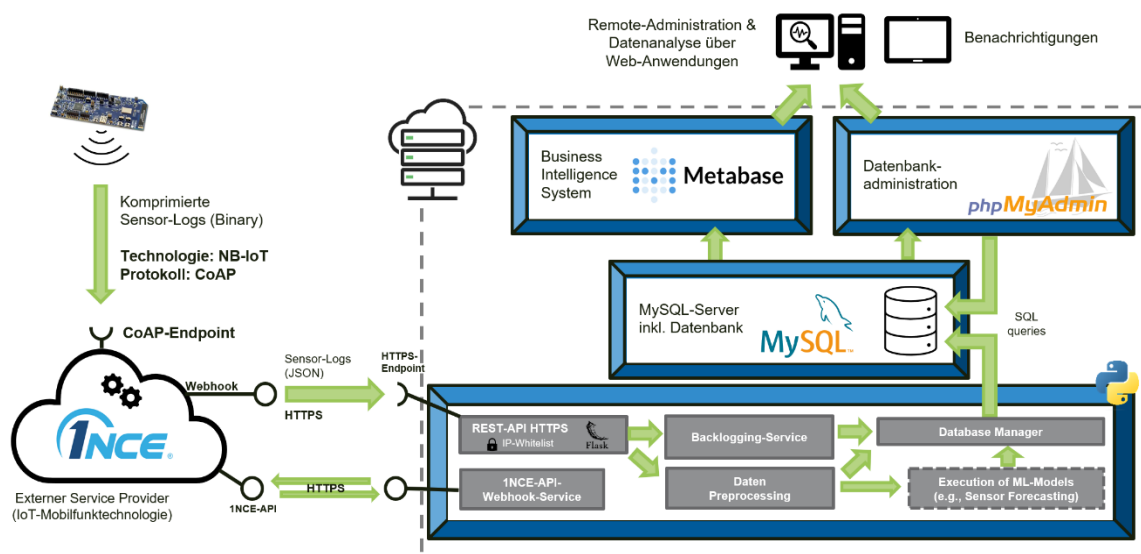


Abbildung 12: Technische Implementierung

Datenmodellierung

Ein Schwerpunkt in AP 2.4 lag auf der gemeinsam mit Brehmer erarbeiteten Datenspezifikation für die zu versendenden Pakete (s. Abbildung 3 rechts) und der Ableitung eines ganzheitlichen, relationalen Datenbankschemas für das watchER-Projekt. Diese beiden Spezifikationen wurden erfolgreich in die Cloud-Logik sowie die Web-Anwendungen angebunden, um eine effiziente Komponenteninteraktion zu gewährleisten. Darüber hinaus lag bei den Designentscheidungen besonders die Dateneffizienz im Fokus, um so ressourcenschonend wie möglich zu agieren. So umfasst ein zu übertragendes Paket in Summe nur 121 Bytes vor der Komprimierung.

Die Datenbank besteht aus drei Tabellen: "Sensor-Log", "Controller" und "Kunde". Diese drei Tabellen sind durch Primär- und Fremdschlüssel miteinander verknüpft. In der Tabelle "Kunde" werden die Kunden-ID und die Kundennamen gespeichert und "Controller" enthält Informationen zu den am Ladungsträger angebrachten Controllern, wie ICCID, IMSI, IP-Adresse und MSISDN. Die Tabelle "Sensor-Log" dient zur Speicherung von Sensor-Messungen, die von der Cloud-Schnittstelle in regelmäßigen Abständen empfangen werden. Die Datenbankstruktur kann mit externen Datenquellen ergänzt werden, z.B. mit Wetter-, Karten- oder Ladungsinformationen.

Datenübertragungspipeline (End-to-End)

Die größte technische Herausforderung stellte allerdings die Implementierung der drahtlosen Datenübertragungspipeline von Sensor-Controller zur watchER-Cloud dar. Diese Ende-zu-Ende-Pipeline erwies sich als deutlich aufwendiger als ursprünglich geplant, was u.a. auf diese Aspekte zurückzuführen ist:

- Unzureichende Dokumentation der 1NCE-Dienste und notwendigen Konfigurationen (z.B. 1NCE-SDK für die Controller-Firmware und Energy Saver Template)
- Hosting einer extern erreichbaren Schnittstelle auf dem universitätsinternen Rechenzentrum unter Einhaltung von Sicherheits- und Datenschutzkriterien

Trotzdem konnte, wenn auch verspätet, eine erste lauffähige Übertragung implementiert und erfolgreich getestet werden.

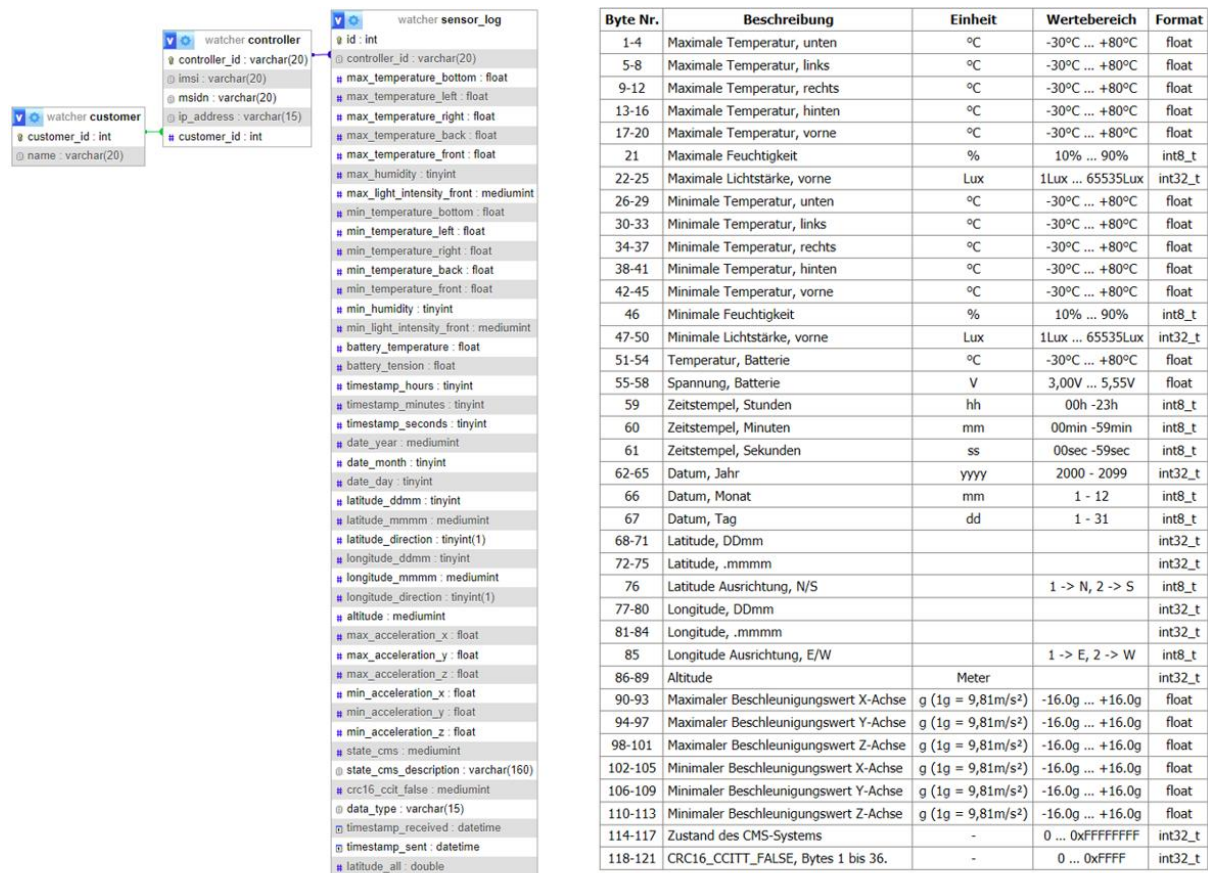


Abbildung 13: Relationales Datenbankschema (links) und Datenpaketspezifikation

2.5 Gehäusekonstruktion für Elektronikbauteile; Aufbau eines ersten Funktionsmusters des Zustandsüberwachungssystems

Basierend auf den Erkenntnissen sowie dem bis zum Arbeitspaket 2.5 erreichten Projektstatus wurde ein Gehäuse zum Schutz der Elektronikeinheit konstruiert und im 3D-Druck hergestellt. Hierzu wurde die Elektronikeinheit basierend auf einem „Development-Kit“ welches um eine Leiterplatte zur Anbindung der Sensoren erweitert wurde als Basis für die Gehäusekonstruktion genutzt. Die Baugruppe wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

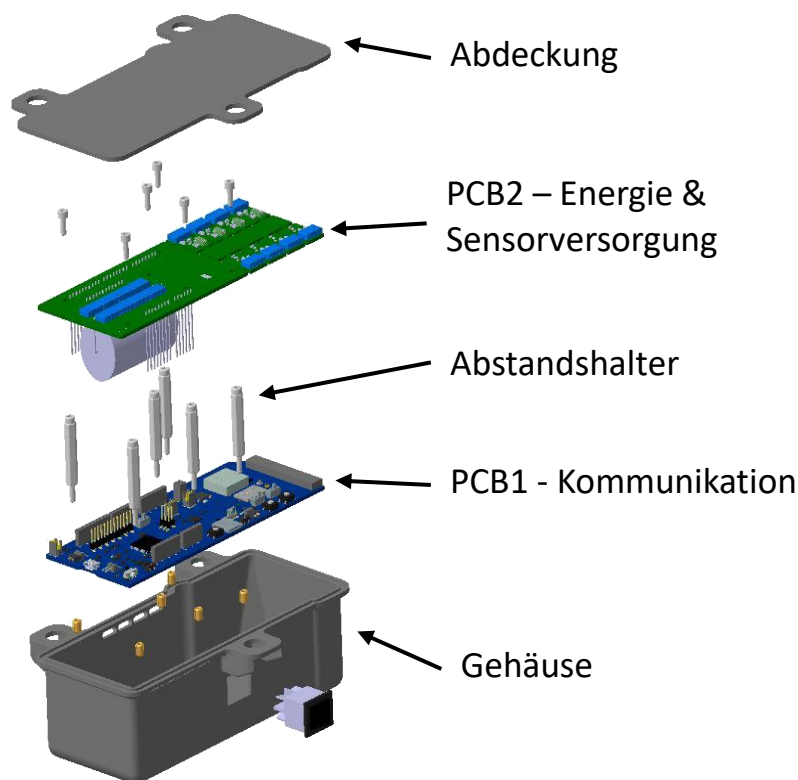


Abbildung 14: Baugruppenkonstruktion & Gehäuse

2.6 Fertigung eines ersten Funktionsmusters

Aufgrund der erheblichen Eingriffe in das bestehende Produktionswerkzeug werden die ersten Funktionsmuster durch eine manuelle Nacharbeit des bestehenden Ladungsträgers hergestellt. Durch das Funktionsmuster können die Platzverhältnisse und die Belastungsanforderungen getestet und verifiziert werden, um die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren. Die erlangten Erkenntnisse fließen wieder in die Konstruktion ein, und verringern dadurch das Risiko der Anpassungen des Serienwerkzeugs. Es werden diverse Varianten von Mustern gebaut, damit die Anpassungen vollumfänglich begutachtet werden können.

2.7 Entwicklung eines logistischen Soll-Konzepts

Das vorrangige Ziel des Arbeitspakets 2.7 war, eine Sollkonzeption zur Integration des neuartigen Mehrwegladungsträgers zu entwickeln und diesen in die bestehenden logistischen Strukturen zu integrieren.

In Kombination mit den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete wurden in Verbindung mit dem favorisiert assoziierten Praxispartner die Rahmenbedingungen für eine logistische Sollkonzeption und den Einsatz des intelligenten Ladungsträgers entwickelt. Zusätzlich wurden unterschiedliche Anwendungsszenarien ausgearbeitet, um den Nutzen des intelligenten Ladungsträgers weiter zu präzisieren. Zur abschließenden Bewertung der Anwendungsszenarien wurden diese anhand von definierten Kriterien miteinander verglichen, um am Ende dieses Arbeitspaketes neben der eigentlich ausgearbeiteten Sollkonzeption auch eine Aussage zur konkreten Anwendung des intelligenten Ladungsträgers treffen zu können.

Durch die durchgeführten Workshops konnten die folgenden zentralen Rahmenbedingungen zur Integration des intelligenten Ladungsträgers als Sollkonzeption gemeinsam mit dem Praxispartner analysiert werden:

- vollständige Integration des intelligenten Ladungsträgers in die bestehenden Ist-Prozesse
- Abweichungen der SOLL-Prozesskonzeption zu bestehenden IST-Prozessen sollen möglichst vermieden werden
- möglichst kein zusätzliches Handling für die operativen Mitarbeiter
- möglichst keine Umbauarbeiten, welche bestehende Prozesse beeinflussen oder verändern

Es kann festgehalten werden, dass der intelligente Ladungsträger in seiner Ausgestaltung sowie prozessualer Integrationsfähigkeit sich grundlegend nicht von den aktuell im Gebrauch befindlichen Ladungsträgern (s. o. Rollcontainer) unterscheiden soll. Eine vollständige Integration des intelligenten Ladungsträgers in die bestehenden und aufgenommenen Ist-Prozesse soll gewährleistet sein, ohne dass sich ein zusätzlicher Mehraufwand für den operativen Mitarbeiter ergibt. Umfassende Umbauarbeiten an der Infrastruktur sowie Änderungen an bestehenden Prozessen sollen ebenfalls vermieden werden. Dieses hat zusätzlich den Hintergrund, dass es bei einer Integration der intelligenten Ladungsträger zu einem Mischbetrieb mit Standard-Ladungsträgern kommt. Hier soll ein paralleler Prozess mit unterschiedlichen Ausgestaltungen vermieden werden, damit beide Ladungsträger simultan in den gleichen Prozessen genutzt werden können. Der operative Mitarbeiter soll in der Handhabung keinen Unterschied zwischen intelligenten und nicht intelligenten Ladungsträgern machen müssen.

Zusätzlich zum primären Ziel dieses Forschungsvorhabens, die Lebensmittelverschwendung entlang der Distributionskette zu minimieren, wurden die Aspekte zur Optimierung von Distributionsprozessen entlang der Prozesskette, wie bereits in Arbeitspaket 1.1 beschrieben, weitergehend analysiert. In Kombination mit dem zu entwickelnden intelligenten Ladungsträger könnten weitere Distributions- und Unternehmensprozesse im Zusammenhang einer CO₂-Emissionseinsparung optimiert werden. Eine beispielhafte Verringerung von Transportfahrten und ein verbesserter Ressourceneinsatz können, zusätzlich zur angestrebten Reduzierung der Lebensmittelverschwendung, einen weiteren positiven Beitrag zur Reduzierung von CO₂-Emissionen im erweiterten Sinn leisten.

Um die Soll-Konzeption und die Nutzung des intelligenten Ladungsträgers weiter zu präzisieren, wurden die nachfolgenden Anwendungsszenarien erarbeitet. Hierbei wurde unterschieden nach dem Ziel des Anwendungsszenarios, der kritischen Prozessphase in der Prozesskette, der konkreten Umsetzung und der Herausforderung bei der Umsetzung. Durch diese Vereinheitlichung soll eine Vergleichbarkeit der Szenarien zur nachgelagerten Analyse und Bestimmung von Zielszenarien gewährleistet werden.

Szenario 1) Überwachung des Lebensmittelzustands auf dem Ladungsträger mittels Sensorik:

- Ziel:
 - *Sicherung der Lebensmittelqualität*
 - *Vermeidung von Lebensmittelverschwendung*
- Kritische Prozessphase in der Prozesskette:
 - *Pufferung von Waren (Wareneingangskontrolle Filiale)*
 - *Verräumung der Ware auf der Verkaufsfläche innerhalb der Filiale*
- Umsetzung:
 - *Sensorische Zustandsüberwachung*
 - *Ausgabe einer Warnung*
- Herausforderungen in der Umsetzung:
 - *Temperatur Schwellenwert Definition, ab dem eine verlässliche Warnung ausgegeben wird*
 - *Verarbeitung, Weiterleitung und Bestimmung von Empfängern der Warnung*

Szenario 2) Tracking der Ladungsträger im Zulauf der Filialen-Anlieferung zur optimierten Prozesssteuerung

- Ziel:
 - *Sicherung der Lebensmittelqualität*
 - *Optimierung der Prozesssteuerung bei der Filialen-Anlieferung (Personalbedarfsplanung, Prozessmonitoring, Prozessoptimierung)*
- Kritische Prozessphase in der Prozesskette:
 - *Entladung der auf dem Ladungsträger befindlichen Ware*
 - *Warenhandling (Personal)*
 - *Lagerungsmöglichkeiten (Kühl- und Tiefkühlager)*
- Umsetzung:
 - *Live-Standortüberwachung in Kombination mit weiteren Geodaten (z. B. Verkehrsdaten)*
 - *Hinweismeldung zum Eintreffen der Ware*
- Herausforderungen in der Umsetzung:
 - *Ladungs- und Toureninformationen notwendig*

- *Filialinformationen notwendig*
- *Artikelinformationen auf dem Ladungsträger notwendig*

Szenario 3) Tracking von Leergut-Ladungsträgern und Optimierung der Leergutkreislaufprozesse

- Ziel:
 - *Optimierung der Prozesssteuerung bei der Leergut-Rückführung (auch Abfallrückführung/Pfand)*
 - *Ressourceneinsparung durch optimierte Nutzung von Transportmitteln und Personal*
 - *Monitoring des Leergutladungsträgerbestands*
 - *Reduzierung von Leerfahrten (Einzelfahrten) bei Umlaufverkehren*
- Kritische Prozessphase in der Prozesskette:
 - *Leergutbestandsverwaltung und Steuerung (keine klare Struktur)*
 - *Umgang mit Leergut in den Filialen*
 - *Falscher Verwendungszweck (Missbrauch der Ladungsträger als Lagerfläche)*
 - *Beschädigung am Ladungsträger*
- Umsetzung:
 - *Leergut-Identifikation der Ladungsträger durch eine Füllstandsanzeige*
 - *GPS-Tracking*
 - *Beschleunigungssensor zur Identifizierung von Belastungsspitzen*
- Herausforderungen in der Umsetzung:
 - *Systemisch korrekte und automatische Kennzeichnung des Ladungsträgers als Leergut*
 - *Ladungsträger werden nach dem Verräumen der Ware im Verkaufsraum als Zwischenpufferfläche für Pfand, Abfall und andere Prozesse genutzt und verbleiben oft in den Filialen, ohne rückgeführt zu werden*
 - *Zur Prozessoptimierung ist ein Datenbedarf an Touren- und Beladeinformationen der Transportmittel notwendig*
 - *Definition von Schwellenwerten bzgl. einer Beschädigung der Ladungsträger*

Szenario 4) Prozessmonitoring entlang der gesamten Distributionskette

- Ziel:
 - *Prozessmonitoring im Sinn von kontinuierlichen Verbesserungsprozessen (KVP) entlang der gesamten Prozesskette nach definierten Einsatzzwecken*
 - *Beispielhafter Einsatzzweck: Analyse der Durchlaufzeiten bei der Verräumung der Ware in der Filiale und Definition von Verbesserungen*
- Kritische Prozessphase:
 - *Gesamte Prozesskette im Ladungsträgerhandling im Allgemeinen kritisch hinterfragen*
- Umsetzung:
 - *Angemessene Kombination aus Sensordaten und Unternehmensdaten auf Basis des Ladungsträgers und der Ware*
 - *Beispielhafter Einsatzzweck: GPS-Sensor in Kombination mit einem Beschleunigungs-, Beladungs- und Temperatursensor erkennt das Verlassen des Ladungsträgers aus dem Kühllager in der Filiale und das Ende der Verräumung auf der Verkaufsfläche*
- Herausforderungen in der Umsetzung:

- Genauigkeit der GPS-Daten in Kombination mit einer Abgrenzung der Standortinformationen (Kühlager, -Verkaufsfläche)
- Prozessdefinition bei jedem Kunden nicht immer eindeutig und identisch
 - Verräumungsprozess in der Filiale
 - Start und Ende nicht eindeutig definiert (mehrere Zwischenpositionen)
 - Ladungsträger wird zeitgleich für Abfall (Umverpackung) genutzt

Durch die Evaluierung der einzelnen Anwendungsszenarien anhand der beschriebenen einheitlichen Kriterien kam es zu den nachfolgenden Erkenntnissen. Die Umsetzung eines finalen Sollkonzepts hängt maßgeblich von der Art und dem Umfang der bereitgestellten und/oder sensorisch erfassten Informationen ab. Durch die Evaluierung stellt sich die nachstehende klare Trennung von *sensorisch erfassten*- sowie vom *Kunden bereitzustellenden Daten bzw. Informationen* heraus.

- a. Zustandsinformationen, welche durch die Sensoren des intelligenten Ladungsträgers ermittelt werden. (Temperatur, Position, Beschleunigung etc.)
- b. Kundeninformationen, welche über geeignete Schnittstellen bereitgestellt und verarbeitet werden müssen (Transportdaten, Ladedaten, Tourenplanung, Ressourceneinsatz)

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde sich als Ergebnis zum Arbeitspaket 2.7 auf ein Sollkonzept und Anwendungsszenario verständigt, welches ausschließlich mit den vorhandenen Sensordaten des intelligenten Ladungsträgers arbeitet. Demnach beschränkt sich das entwickelte Sollkonzept, mit der Integration des zu entwickelnden Ladungsträgers, auf die reine Zustandsüberwachung der Lebensmittel entlang der Distributionskette. Die Erweiterung des Sollkonzepts um Anwendungsszenarien, bei denen Kundendaten zwingend erforderlich sind, um einen entscheidenden Mehrwert im Sinn der Ressourceneinsparung zu liefern, wurde aus Gründen der gestiegenen Komplexität in der Bereitstellung, Verarbeitung und Integration von externen Unternehmensdaten nicht weiterverfolgt. Abschließend sieht das Sollkonzept vor, dass der intelligente Ladungsträger sich ohne nennenswerte Einschränkungen in den bestehenden IST-Prozess integrieren lassen soll.

2.8 Entwicklung von KI-Algorithmen zur intelligenten Datenauswertung

In intensiven gemeinsamen Abstimmungen wurden potenzielle Anwendungsszenarien für künstliche Intelligenz erarbeitet und theoretisch hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit im Kontext des Projekts evaluiert. Darüber hinaus wurden passende Tools und erste Beispiellösungen implementiert. Eine Übersicht der KI-gestützten Anwendungsmöglichkeiten der watchER-Cloud inkl. Tools ist in Abbildung 4 beschrieben.

Nachdem trotz ausgiebiger Recherche kein passender, bereits veröffentlichter Open-Source Datensatz mit ausreichendem Bezug zu den Projekteigenschaften gefunden wurde, wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Generierung eines realitätsnahen, synthetischen Datensatzes als Demonstrationsszenario gelegt, um unabhängig von realen Daten und deren Qualität erste KI-Modelle zu generieren. Hier wurden erfolgreich auf Basis realer Fahrdaten im Raum Neustadt an der Weinstraße und moderner virtueller Sensoren erste Konzepte zur Generierung praxisnaher Demo-Daten entwickelt.

Des Weiteren wurden konkrete Machine Learning Probleme definiert und initiale Recherchen hierzu angestellt. Nach weiterführenden Bewertungen unter den Kriterien einer gesteigerten

Lieferketteneffizienz durch die verschiedenen KI-Anwendungen, wurde sich im weiteren Verlauf des Projektes auf Zukunftsprognosen im Kontext von Zeitreihendaten (Time Series Prediction) konzentriert, um zukünftige negative Entwicklungen vorherzusagen und entsprechend darauf reagieren zu können. Es wurden erste vielversprechende Modelle und Technologien abgeleitet und kleinere Evaluationen durchgeführt, um die Effektivität der gewählten Ansätze zu bewerten.

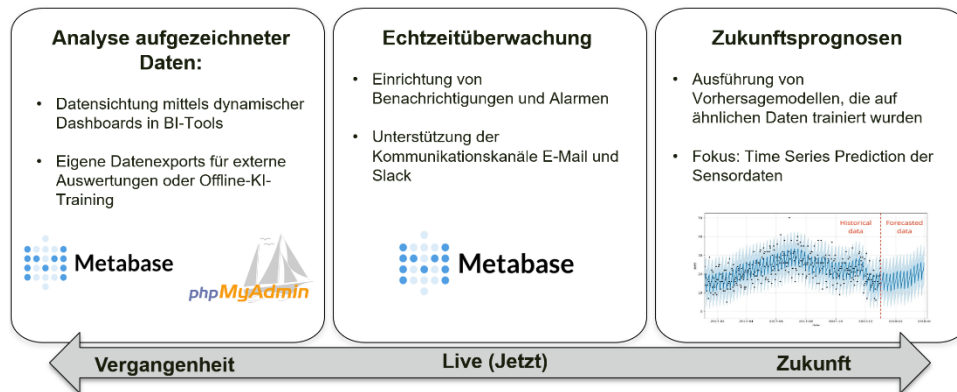


Abbildung 15: KI-gestützte Anwendungsmöglichkeiten der watchER-Cloud

3 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters

Im Arbeitspaket 3, sowie in den in untergliederten Arbeitspaketen ist die Durchführung erster Funktionstests und ein entsprechendes Reengineering der bisher entwickelten Konzepte geplant.

3.1 Durchführung erster Funktionsprüfungen bzw. des Funktionsmusters des nahezu wartungsfreien, IoT-fähigen Mehrwegladungsträgers im akkreditierten Prüflabor der Brehmer GmbH & Co. KG unter enger Zusammenarbeit der Projektpartner; Gezielte Auswertung der Funktionstests

Wie im Arbeitspaket 2.4 erklärt, dauert die Integration der WatchEr - Elektronik in die Cloud weiterhin an. Aufgrund der aktuellen Aufgabenstellungen wurde entwicklungsbegleitende Funktionsprüfungen gestartet. In enger Abstimmung zwischen InES werden hier die letzten Arbeitsschritte zur Integration von Messdaten implementiert.

Basierend auf diesen Messdaten soll dann eine während den geplanten Laborprüfungen eine direkte Auswertung der Daten durch die Cloud erfolgen, welche im Nachgang mit den Messdaten aus dem Laborbericht abgeglichen werden kann.

Durch einen gezielten Test des Controllers in einer Laborumgebung, in dem verschiedene Umwelteigenschaften simuliert werden, bspw. Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsveränderungen, wurde die Funktionalität der entwickelten Softwarekomponenten entsprechend der Anforderungen evaluiert. Darüber hinaus wurden einzelne Komponententests und Integrationstests über die Komponentengrenzen hinweg durchgeführt. Besonderer Fokus lag hier auf der Performance und Robustheit der Datenübertragungspipeline.

Erfreulicherweise konnte der Erhalt der Daten in der Cloud bestätigt werden. Ein Abgleich zwischen den abgesendeten Daten der Sensormessungen (aus dem Laborbericht) und gespeicherten Daten in der Cloud ist erfolgt mit positivem Ergebnis: Es fand kein Datenverlust statt, die durchschnittliche Latenz lag bei unter einer Sekunde und die Daten stimmen komplett überein.

Anschließend wurden weitere Verbesserungspotenziale identifiziert, konkrete Maßnahmen abgeleitet und parallel in AP 3.4 umgesetzt.

3.2 Hard- und Firmware-Redesign und Schaltungsoptimierung

Im Abgleich der Integration der Elektronik in die Cloud wurden verschiedene Anpassungen und Optimierungen vorgenommen. Abschließend zu Arbeitspaket 3.2 wurde die Elektronik durch Muster realisiert und optimiert. Mithilfe dieser Funktionsmuster kann die Firmware zur Integration der gemessenen Daten in Abstimmung mit InES optimiert werden. Die entwickelte Elektronik wird nachfolgend dargestellt.

Hardwareentwicklung

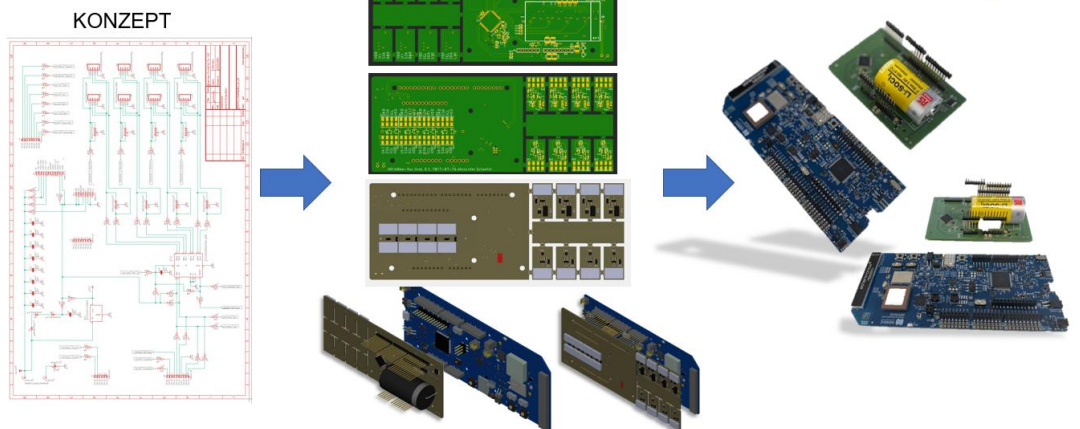


Abbildung 16: Prototyp der Elektronik WatchEr

3.3 Konstruktive Anpassungen am Fertigungswerkzeug

Die konstruktiven Anpassungen erforderlichen einen erheblichen Zeitaufwand und erfordern eine enge Abstimmung zwischen der Bauteilkonstruktion und dem Werkzeugbau. Fehler in dieser Phase führen zu erheblichen Verzögerungen und können hohe Kosten verursachen.

Alle Erkenntnisse aus den Tests werden zuerst in die Bauteilkonstruktion eingebracht und dann auf Umsetzung im Werkzeug überprüft. Aufgrund der Tragweite der Anpassungen sind viele Iterationsschleifen erforderlich, da während der Detailumsetzung jeder Aspekt geprüft werden muss. Die erforderliche Genauigkeit in den Produktionswerkzeugen sind wenige hundertstel Millimeter. In der Umsetzung müssen immer wieder Kompromisse zwischen Artikel- und Werkzeugdesign gefunden werden. Es muss nicht nur die technische Machbarkeit gewährleistet sein, auch die Standfestigkeit der Werkzeuge muss abgesichert sein.

In der Detailumsetzung werden nicht nur die Anpassungen an den formgebenden Bereichen des Werkzeugs berücksichtigt, sondern auch die Anpassungen am Grundaufbau und der Auswerferei. Anpassungen am Anspritzsystem sind von Beginn des Projekts ausgeschlossen worden, da diese so weitaus höheren Kosten führen würden und nicht berücksichtigt werden können.

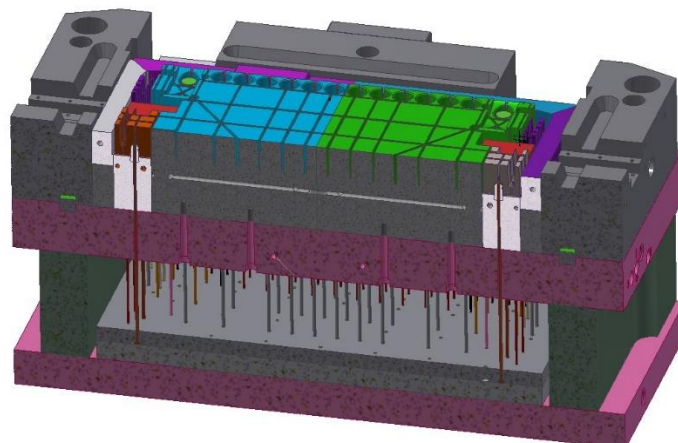


Abbildung 17: Schnitt durch Werkzeug

3.4 Redesign und Optimierung der Software

In diesem Arbeitspaket wurden iterativ und in enger Kooperation mit Brehmer mehrere Optimierungen und Anpassungen an fast allen Stellen der watchER-Cloud erfolgreich vorgenommen, z.B.:

- Erweiterung der Datenspezifikation durch das zusätzliche Sammeln und Versenden von Max- und Min-Werte der Sensoren innerhalb deutlich reduzierter Messzyklen (ca. 10 Sekunden) gegenüber einer erhöhten Frequenz des Datenversands (>1 Minute). Dadurch kann die Einhaltung von Wertegrenzen mit größerer Sicherheit und unabhängig von höheren Sendefrequenzen nachträglich gewährleistet werden.
- Ausbau des Daten-Preprocessing nach Erhalt der Daten ermöglicht sowohl effizientere Ablage im Datenbankschema (z.B. als Datentyp datetime) als auch das Hinzufügen von wichtigen Meta-Informationen (z.B. Zeitstempel des Paketerhalts).
- Optimierung des Datenbankschemas durch Auswahl minimaler Datentypen.

Datenübertragungspipeline (End-to-End)

Eine der wichtigsten Optimierungen erfolgte im Rahmen der Datenübertragung, speziell in der Integration der sogenannten „Energy Saver“-Funktion innerhalb des 1NCE Betriebssystem. Diese reduziert die vom Controller zu versendende Paketgröße und somit auch den Energieverbrauch.

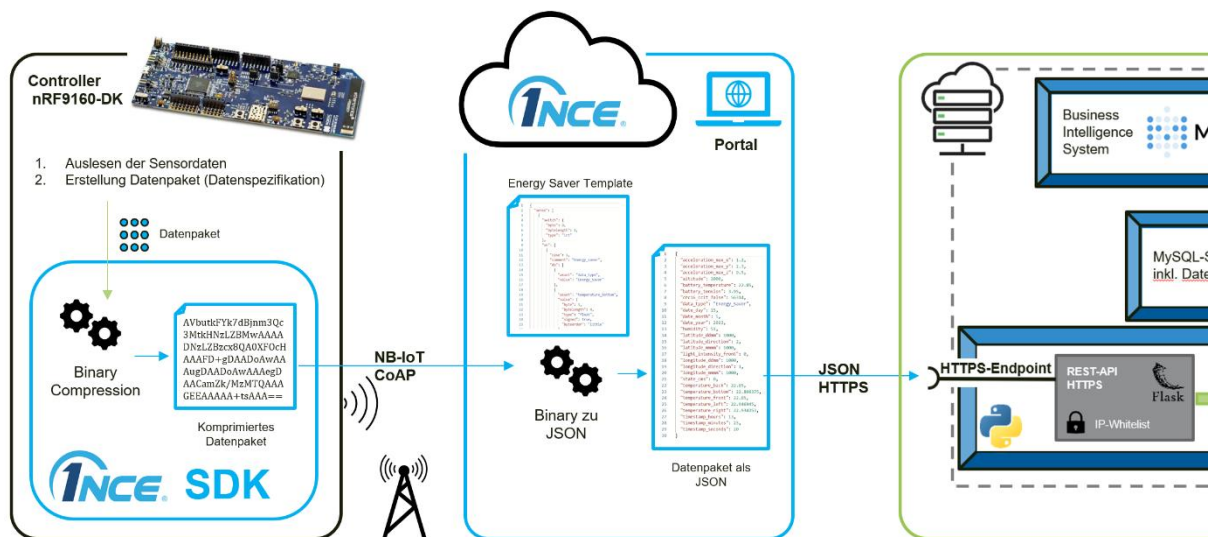


Abbildung 18: Übersicht der optimierten Datenübertragungspipeline

Entsprechend der Sendefrequenz in der Controller-Firmware, wird in fixen Intervallen ein Datenpaket auf Basis der Datenspezifikation erstellt. Anstatt dieses Datenpaket direkt zu versenden, wird es vorher mithilfe des „Energy Saver Templates“ in ein binäres Format komprimiert (Binary Compression). Hierzu wird die JSON-basierte AllThingsTalk Binary Conversion Language (ABCL) verwendet, um binäre Payloads zu definieren und auch komplexere Logik in die Konvertierungsvorlagen einzubauen. Das nun reduzierte Paket sendet der Controller mittels der NB-IoT Übertragungstechnologie und dem Protokoll CoAP an die Endpunkte der 1NCE-Cloud.

Diese wurde so konfiguriert, dass mithilfe des identischen „Energy Saver Templates“ das Datenpaket in eine strukturierte JSON-Datei dekodiert werden kann. Anschließend leitet das 1NCE Betriebssystem

die JSON-Datei mittels HTTPS-Post Anfrage an die entsprechende Schnittstelle der watchER-Cloud weiter. Diese Weiterleitung ist in 1NCE als Webhook definiert und über eine API auswert- bzw. steuerbar. Um die Sicherheit der watchER-Cloud zu gewährleisten, werden unerlaubte HTTPS-Anfragen mittels IP-Whitelisting blockiert, sodass ausschließlich POST-Anfragen von IP-Adressen der 1NCE-Cloud akzeptiert werden.

Nach Erhalt eines JSON-Datenpakets wird es zuerst verarbeitet (Preprocessing) und dann mithilfe einer Datenbankverbindung (Database Manager) in der MySQL-Datenbank gespeichert.

4. Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators

4.1 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des geplanten Zustandsüberwachungssystems

Entsprechend der Entwicklungsergebnisse aus den Arbeitspaketen 2.5, 3.1 & 3.2 konnte ein anwendungsnaher Demonstrator entwickelt werden welcher in verschiedenen Betriebszuständen am Entwicklungsarbeitsplatz sowie später auch im Umweltsimulationslabor optimiert werden konnte. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Elektronik des Demonstrator mit 8 verschiedenen Sensoren verbunden, welche die Entsprechenden Umweltbedingungen aufnehmen und verarbeiten.

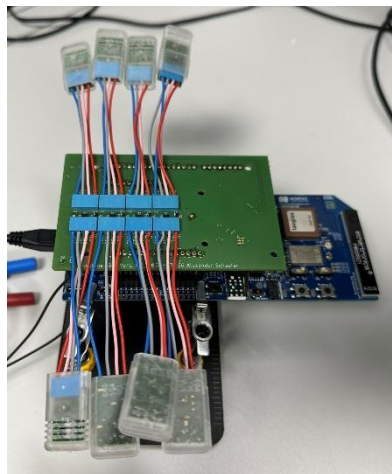


Abbildung 19: Demonstrator der Elektronik

4.2 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des IoT-fähigen Ladungsträgers

Im Laufe des Arbeitspakets wurden die Funktionsmuster immer wieder überarbeitet und verbessert. Das abschließende Funktionsmuster wird mit Hilfe eines 3D-Druck Einsatzes in die Grundplatte des Ladungsträgers integriert. Aufgrund der abweichenden Materialeigenschaften des Prototyps kann die Klipps-Verbindung nicht unter Serienbedingungen erprobt werden. Alle weiteren Aspekte entsprechen bereits dem Serienprodukt und können getestet und verifiziert werden. Es werden in Summe 6 Funktionsmuster aufgebaut, damit alle Aspekte ausgiebig getestet werden können, und die Funktionsmuster den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden können.

4.3: Erarbeitung eines finalen anwendungsnahen Software-Prototyps

Zur Vorbereitung der watchER-Cloud für den Einsatz in einem realen Anwendungskontextes wurden vertiefende Überprüfungen der existierenden Systemanforderungen und anschließend eine iterative Erweiterung dieser vorgenommen. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Verknüpfung aller Hard- und Softwareschnittstellen sowie die technische Erprobung des integrierten Kontroll- und Datenflusses.

Es fand eine zielgerichtete Definition und Entwicklung inkl. dem erfolgreichen Testen von sinnvollen Erweiterungen statt mit dem Ergebnis einer Steigerung der Robustheit und Verfügbarkeit der Cloud-Dienste. Dazu gehören hauptsächlich die folgenden beiden Funktionen, die bereits in der technischen Cloud-Darstellung (s. Abbildung 2) enthalten sind:

- Backlogging-Service: Ein zusätzlicher Dienst, der bei auftretenden Fehlern in der internen Datenverarbeitung - Empfang bis hin zum Schreiben in die Datenbank – das Paket in einen Backlog exportiert und sichert. Sobald das Problem behoben ist, z.B. ein Verbindungsabbruch mit der Datenbank, schreibt der Service selbstständig alle Daten, die sich im Backlog befinden, in die Datenbank. Nach erfolgreichem, nachträglichem Transfer in die Datenbank, wird der Backlog entsprechend geleert.
- 1NCE-API-Webhook-Service: Ein zusätzlicher Dienst, der durch Kommunikation mit der API von 1NCE kontinuierlich den Status des dort eingerichteten „HTTPS-Webhooks“ abfragt. Falls dieser nicht aktiv sein sollte durch bspw. einen internen Fehler in der 1NCE-Datenverarbeitung oder zu langer Inaktivität, wird er per API-Anfrage automatisch neu gestartet und somit automatisch eine evtl. auftretende Unterbrechung der Datenübertragungspipeline behoben.

Zusätzlich wurde eine zuverlässigere technische Infrastruktur für das Hosting der watchER-Cloud ausgewählt und spezifiziert. Im Anschluss wurde der Umzug erfolgreich durchgeführt, einschließlich der Inbetriebnahme und des Tests der neuen virtuellen Maschine innerhalb des Rechenzentrums der Universität Mannheim.

5. Praktische Systemvalidierung

5.1 & 5.2 & 5.3 Evaluation des Demonstrators in der realen Anwendung bei dem eingebundenen assoziierten Partner; Implementierung erforderlicher Anpassungen bei Hard- & Firmware

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Prototypen in Arbeitspaket 4.1 wurde dieser gemeinsam mit WALTHER & MALORG optimiert. Hierzu wurde das konstruierte Gehäuse weiterentwickelt und in einen Ladungsträger integriert. Bei der Weiterentwicklung des Gehäuses wurden die Sensoren direkt in die Gehäusegeometrie eingebunden, wie die nachfolgenden Bilder belegen.

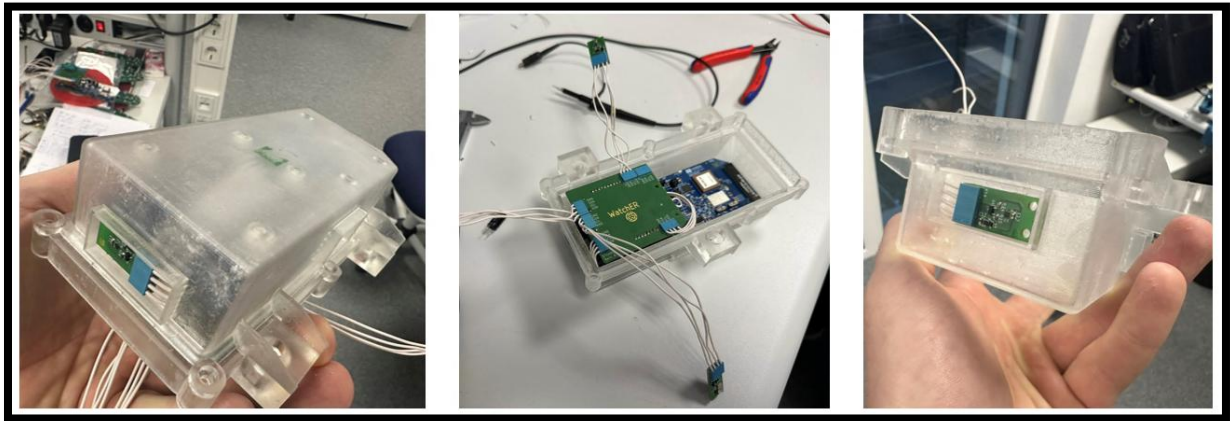


Abbildung 20: Aufbau des Demonstrators; Weiterentwicklung des Gehäuses

Das zuvor beschriebene weiterentwickelte Gehäuse wurde nachfolgend in einen Ladungsträgerausschnitt integriert und anschließend in einen Ladungsträger eingesetzt. Die nachfolgenden Bilder zeigen den überarbeiteten Ladungsträger welcher für Feldtests zum Einsatz kommen sollte.



Abbildung 21: WatchEr Demonstrator für Feldtests

5.4: Validierung des entwickelten Softwareprototyps in der realen Anwendung

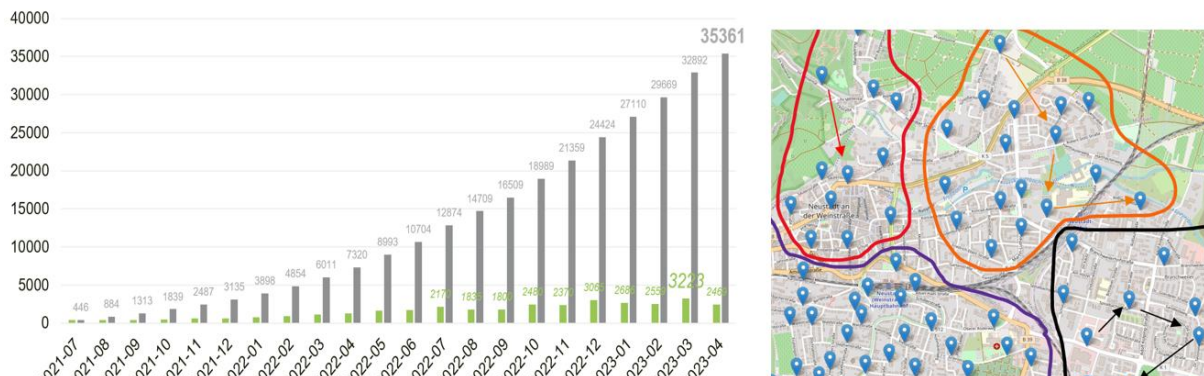


Abbildung 22: Statistik der rohen Mobilitätsdaten (links) und eine Illustration der Datentransformation für den watchER-Case (rechts)

Figure 2: Statistik der rohen Mobilitätsdaten (links) und eine Illustration der Datentransformation für den watchER-Case (rechts)

Trotz der eigenen erfolgreich durchgeführten Vorbereitungen der watchER-Cloud auf Feldtests mit der Firma „tegut...“, konnten diese aufgrund eines kurzfristig auftretenden und nicht mehr rechtzeitig zu lösenden Softwarebugs in der Controller-Firmware nicht innerhalb des Projektzeitraums durchgeführt werden. Allerdings sind alle aufgebauten und vorbereiteten Prototypen – ausgenommen des Softwarebugs – voll einsatzfähig. Um den Projektplan sowie die Projektziele bestmöglich einzuhalten bzw. zu erfüllen, wurde das AP 5 praktisch mittels dem in AP 2.8 entwickelten Demonstrationsszenarios, aber auch im Labor sowie theoretisch abgearbeitet.

Demonstrationsszenario „Neustadt“

Das in AP 2.8 entwickelte Konzept für den Aufbau eines realitätsnahen Demonstrationsszenarios auf Basis realer Mobilitätsdaten im Kreis Neustadt an der Weinstraße wurde in diesem Arbeitspaket final weiterentwickelt und angewendet. Die entstandene Pipeline ermöglicht auf Basis konfigurierbarer Hyperparameter eine Transformation der Rohdaten und gibt augmentierte Testdaten im definierten Datenbankschema zurück. Diese Datensätze wurden verwendet, um eine Systemvalidierung durchzuführen und KI-Modelle weiterzuentwickeln.

Die Rohdaten wurden im Rahmen parallel laufender Forschungsprojekte gesammelt und bisher nicht veröffentlicht. Sie enthalten insgesamt ca. 35.000 Personen- und Paketfahrten von Juli 2021 bis April 2023 (s. Abbildung 6 links) zwischen vordefinierten Standorten („Knoten“) im Raum Neustadt an der Weinstraße. Diese Knoten werden vorselektiert und repräsentieren bspw. Einzel-, Großhandelsmärkte, Distributionszentren oder kleine Zwischenlager. Die Rohdaten werden nun in verschiedenen Schritten transformiert, um mehrere watchER-Ladungsträger zu simulieren. Die wichtigsten Schritte sind hierbei:

1. Sinnvolles Gruppieren (Clustern) der mehr als 200 Knoten zu vordefinierten „Kunden“. Ein Kartenausschnitt ist in Abbildung 6 rechts dargestellt mit einer simplen farblichen Unterteilung der Knoten zu 4 Kunden.
2. Definition virtueller watchER-Module (Controller) mithilfe einer intelligenten Verkettung einzelner Fahrten unter Einhaltung gewisser Kriterien wie bspw. eine maximale Aufenthaltsdauer an einem Knoten.

3. Simulation der virtuellen Sensordaten auf Basis von 4 Transporttypen (u.a. Tiefkühl- und Kühltransporte) und externer Wetterdaten unter Einsatz verschiedener Data Augmentation Techniken, z.B. Interpolation und Hinzufügen von Noise.
4. Abschließende Filterung und Säuberung von fehlenden Daten mittels KI-Imputation.

Auf diese Weise wurde ein repräsentatives Demonstrationsszenario erzeugt mit 100 Controllern, 4 Kunden und einer Sendefrequenz von 5 Minuten. Die so generierten Zeitreihendaten enthalten ca. 3,8 Mio. Datenpunkte.

KI-Evaluation für Vorhersagen der Sensordaten (Time Series Prediction)

Diese massenhaft generierten Zeitreihendaten wurden genutzt, um performante KI-Modelle zur Vorhersage der verschiedenen Sensoren (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.) zu trainieren und auszuwerten. Das Ziel ist ein möglichst geringer Fehler bei den von einem Modell vorhergesagten Werten auf Basis der vergangenen Daten. Im Detail wurden folgende drei Problemstellungen definiert und ausgewählte Modelle angewendet:

	Input = Nur Zielparameter	Input = Alle Sensoren
I. Single-Step (t+1)	Baselines: - Naive: letzter Wert - SMA6: Gleit. Durchschnitt (w=6) - EMA6: Exponentiell gew. gleit. Durchschnitt (w=6)	Regression: - Lineare Modelle (Linear, Lasso, Ridge) - Tree-Ensembles (CatBoost, XGBoost, LightGBM) - Neural Network (Feed-forward MLP)
II. Multi-Step (t+n) iteratives single-step		
III. Multi-Step (t+n) direkt		

Sowohl das Vorhersagen des nächsten (I.) als auch eines späteren (II. und III.) Sensorwertes werden wie ein Regressionsproblem behandelt und mit passenden Fehlermetriken beurteilt, z.B. R2-Score, RMSE und MAE. In Abbildung 7 werden einige Evaluationsergebnisse grafisch in Bezug auf den Zielsensorwert *max_humidity* vorgestellt mithilfe des durchschnittlichen absoluten Fehlers (MAE) als Metrik. Die jeweils besten Modelle sind rot umrandet.

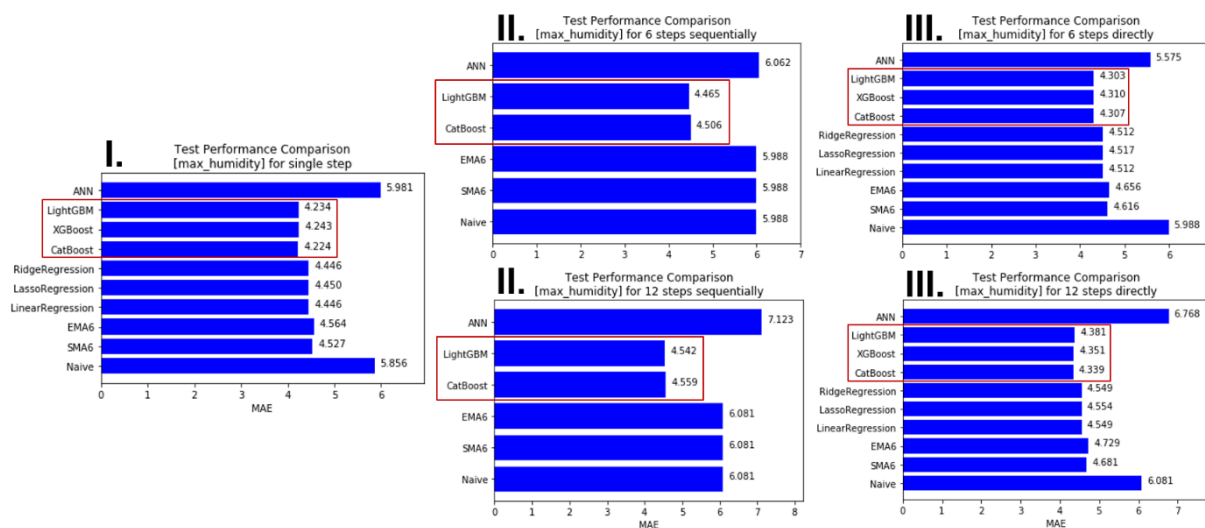


Abbildung 23: Time Series Prediction

Die folgenden Erkenntnisse konnten über die gesamte Evaluation über verschiedene Metriken und Sensoren hinweg gewonnen werden:

- SMA6 und EMA6 erzielten nur leicht schlechtere Ergebnisse für I. und III.
- Lineare Modelle erzielten in der sequentiellen Anwendung (II.) deutlich schlechtere Ergebnisse und wurden in Abbildung 7 für eine erhöhte Lesbarkeit entfernt
- Neuronale Netze (insb. die hier getesteten Typen) zeigten keinen nennenswerten Lernfortschritt und erzielten teilweise schlechtere Ergebnisse als die Baselines. Das kann an einer noch nicht optimal gewählten Architektur und/oder Hyperparametern liegen und könnte in tieferen Untersuchungen potenziell noch verbessert werden.
- Entsprechend dem State-Of-The-Art liefern Tree-Ensembles in fast allen Fällen die besten Ergebnisse und sind zudem effizient zu lernen. *CatBoost* schneidet im Durchschnitt am besten ab, wenn auch nur knapp im Vergleich zu *XGBoost* und *LightGBM*.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten durch BI-Software „Metabase“

Um die beiden übrigen Dimensionen der in AP 2.8 definierten KI-gestützten Anwendungsmöglichkeiten zu demonstrieren, wurden repräsentative und interaktive Datenvisualisierungs-Dashboards im BI-Tool "Metabase" erstellt. Diese Dashboards können individuell gestaltet werden und erlauben verschiedene Datentransformationen, -filter und -visualisierungen. Dashboards greifen sowohl auf die realen Daten aus eigenen Messungen als auch auf die verschiedenen „Neustadt“-Demonstrationsszenarien durch eine Anbindung an die Datenbanken der watchER-Cloud zu. So werden zum Einen beliebige Visualisierungen der vergangenen und aktuellen Daten, zum Anderen Echtzeitauswertungen ermöglicht durch bspw. die Einrichtung von Live-Benachrichtungen und Alarmen bei Verletzung variabel definierbarer Wertegrenzen. Die Funktionsfähigkeit dieser Technologie wurde erfolgreich demonstriert und validiert.

6 Transfer und Diffusion der Projektergebnisse in die Praxis

6.1: Publikationen und Projektpräsentation

Erfreulicherweise gelang es gemäß den Zielen zur wissenschaftlichen Verwertung Forschungsergebnisse im Rahmen eines Konferenzpapiers [2] zu veröffentlichen. Der Beitrag mit dem Titel „Online random feature forests for learning in varying feature spaces“ von C. Schreckenberger, Y. He, S. Lüdtkke, C. Bartelt und H. Stuckenschmidt wurde auf der 37. AAAI Conference on Artificial Intelligence akzeptiert und in Washington, DC, USA von 07.-14.02.2023 vorgestellt. Diese Konferenz ist eine der renommiertesten und bedeutendsten Konferenzen im Bereich KI weltweit.

6.2: Durchführung einer Abschlussveranstaltung

Neben den jährlich durchgeführten Projekttreffen fand am 31.10.2023 die geplante Projektabschlussveranstaltung in hybrider Form statt. Dort wurden die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse des Projektes innerhalb des Projektkonsortiums und mit Teilnahme des Projektträgers präsentiert, diskutiert und evaluiert.

Bewertung der erreichten Meilensteine

Meilenstein 1:

Nach Analyse und Berechnung kann eine Energieautarkie erreicht werden, im weiteren Verlauf des Projektes musste entschieden werden, ob ein Zwischenladen der Ladungsträger-Akkumulatoren notwendig ist oder ob die Lebensdauer einer Batterie die mechanische Lebensdauer eines Ladungsträgers überschreitet. Nach aktueller Bewertung und Faktenlagen sind die notwendigen Änderungen in der Infrastruktur finanziell Vertretbar. Bisher sind bei der Integration keine bislang unbekanntenen Probleme aufgetreten.

Meilenstein 2:

Das WatchEr System konnte in Betrieb versetzt werden.

Basierend auf den Marktanalysen der Firma MALORG wurde erkannt, dass eine Messung der Temperatur auf einzelnen Ebenen des Ladungsträgers nicht in der Praxis umsetzbar ist. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird das System auf eine zentrale Temperaturmessung optimiert. Temperaturschwankungen sollen so durch entsprechende Konvektion und die nachgeschaltete KI berechnet und auf die einzelnen Güter des Ladungsträgers rechnerisch übertragen werden können.

Aufgrund der, mit den obigen Beschreibungen verbundenen, Vereinfachungen des Systems durch den Wegfall erweiterter Sensorik sowie der zum Meilenstein 1 erkannten Energieautarkie, reduzieren sich bei einer späteren Serienentwicklung die Aufwände für die Integration und Herstellung eines Ladungsträgers wohingegen die Aufwände für eine entsprechende KI-Entwicklung steigen.

Meilenstein 3 & abschließende Bewertung:

Das watchEr System konnte in Betrieb versetzt und im Labor von BREHMER überprüft und optimiert werden. Aufgrund verschiedener Verzögerungen im Projekt und abschließender Herausforderungen hinsichtlich der Software konnten keine abschließenden Feldtests durchgeführt werden. Dennoch konnte das watchEr System in Funktion geprüft und vorgestellt werden. Im Rahmen der Laborversuche wurde eine entsprechende Praxistauglichkeit des Systems bestätigt, wenn auch keine induktive Ladefunktion sowie mehrdimensionale Auswertung der Messwerte als notwendige Kernfunktion evaluiert werden konnte, so konnten alle weiteren Leistungsparameter erreicht werden. Die Energieeffizienz des watchEr Systems liegt deutlich über den zu Projektbeginn angenommenem Level, wodurch die Funktion des induktiven Ladens keinen wirtschaftlichen Nutzen mehr aufzeigt.

Zusammenarbeit mit dem Assoziierter, nicht geförderter Partner:

Spar:

Aufgrund der aktuellen Corona-Pandemie und den damit verbundenen Zugangsbeschränkungen in die Produktionsbereiche konnte die Zusammenarbeit mit „SPAR“ noch nicht vollständig ausgebaut werden.

Erste Analysen und Dokumentationen konnten allerdings schon basierend auf theoretischen Betrachtungen durchgeführt werden. Zuletzt konnte die Firma „tegut“ durch „**WALTHER Faltsysteme**“ ebenfalls als Partner gewonnen werden.

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war erfolgreich, alle Arbeitspakete konnten bearbeitet werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lebensmittelprozesskette.....	9
Abbildung 2: Funktionsflächen in einem Distributionszentrum zur potenziellen induktiven Aufladung	11
Abbildung 3: Walther – Beispiele volumenreduzierter Rollcontainer (Leergutpuffer, Leerguttransport)	12
Abbildung 4: Walther - Rollcontainer.....	13
Abbildung 5: Walther – Halbpalette.....	13
Abbildung 6: WALTHER ROLLCONTAINER, Auszug Prospekt	16
Abbildung 7: Grobarchitektur watchER-Cloud	18
Abbildung 8: Prinzipskizze Mehrwegladungsträger - Integration der Elektronik	21
Abbildung 9: FEM Berechnung (statisch)	22
Abbildung 10: Rendering Mehrwegladungsträger - Integration der Elektronik	22
Abbildung 11: Werkzeug (Auswerferseite) - Änderungsbereich.....	23
Abbildung 12: Technische Implementierung	24
Abbildung 13: Relationales Datenbankschema (links) und Datenpaketspezifikation.....	25
Abbildung 14: Baugruppenkonstruktion & Gehäuse	26
Abbildung 15: KI-gestützte Anwendungsmöglichkeiten der watchER-Cloud	31
Abbildung 16: Prototyp der Elektronik WatchEr	33
Abbildung 17: Schnitt durch Werkzeug.....	33
Abbildung 18: Übersicht der optimierten Datenübertragungspipeline	34
Abbildung 19: Demonstrator der Elektronik	35
Abbildung 20: Aufbau des Demonstrators; Weiterentwicklung des Gehäuses.....	37
Abbildung 21: WatchEr Demonstrator für Feldtests.....	37
Abbildung 22: Statistik der rohen Mobilitätsdaten (links) und eine Illustration der Datentransformation für den watchER-Case (rechts).....	38
Abbildung 23: Time Series Prediction	39

Projektpartner



KURZBERICHT

▪ **Brehmer GmbH & Co. KG (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Moritz Schmidt

→ *Projektkoordination; Elektronik- und Firmwareentwicklung*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 A

Teilprojekttitel: Entwicklung wartungsarmes Zustandsüberwachungssystem

▪ **WALTHER Faltsysteme GmbH (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Oliver van Neerven

→ *Entwicklung des geplanten neuartigen Mehrwegladungsträgers*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 B

Teilprojekttitel: Entwicklung des neuartigen Mehrwegladungsträgers

▪ **MALORG GmbH (KMU)**

Ansprechpartner: Herr Christian Wolfgarten

→ *Ganzheitliche, logistische Systemplanung- und Integration*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 C

Teilprojekttitel: Projektspezifische Modellierung logistischer Soll-Prozesse

▪ **Universität Mannheim, Institute for Enterprise Systems (InES)**

Ansprechpartner: Herr Dr. Christian Bartelt

→ *Entwicklung IoT-Plattform und KI-Algorithmen; Forschungstransfer*

Förderkennzeichen:

01 LY 2110 D

Teilprojekttitel: Deep-Learning-basierte Analyse- und Sensordatenplattform

Assoziierter, nicht geförderter Partner:

▪ **SPAR Österreichische Warenhandels-AG**

Ansprechpartner: Herr Alois Huber

→ *Unterstützung Anforderungsdefinition und Praxistests; potenzieller Systemanwender*

Berichtszeitraum: 01.10.2021 bis 30.09.2023

Projektname: watchER Entwicklung eines wartungsarmen cyber-physischen Logistiksystems zur lückenlosen Echtzeit-Überwachung und sukzessiven Verbesserung der Prozess- und Ressourceneffizienz innerhalb von Lieferketten		<input type="checkbox"/> Zwischenbericht 1 <input type="checkbox"/> Zwischenbericht 2 <input checked="" type="checkbox"/> Kurzbericht	
Erstellt am: 23.05.2022	Autor (Erstellt): Projektkonsortium	Letzte Änderung: 17.01.2024	Autor (Änderung): Konsortium
Dokument erstellt: M. Schmidt		Anzahl Seiten inkl. Deckblatt: [45]	

Kurzbericht

1 Erarbeitung eines Anforderungskataloges / Lastenheftes; Technische Konzeption

Das Arbeitspaket 1 wurde im Rahmen regelmäßiger Telefonkonferenzen sowie im erweiterten Rahmen eines vor-Ort-Termins beim Projektpartner WALTHER Faltsysteme GmbH am 27.01.22 bearbeitet.

1.1 Analyse der Distributionsprozessketten (IST Analyse)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1.1 wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner sowie in direkter Kommunikation mit verschiedenen potentiellen Anwendern des hier zu entwickelten Systems die aktuellen Prozessketten analysiert.

1.2 Definition der Anforderungen an die neu zu entwickelnde Elektronik-Hardware

Im Arbeitspaket 1.2 wurde nach Festlegung der Schnittstellen und nach entsprechender Auswahl eines für dieses Projekt beispielhaften Ladungsträgers von WALTHER Faltsysteme GmbH ein Projekthandbuch mit allen notwendigen elektronischen Anforderungen erstellt. Dieses Projekthandbuch wurde über den gesamten Projektzeitraum stetig angepasst und aktualisiert und stellt ein entsprechendes Lastenheft für die angestrebte Entwicklung dar.

1.3 Definition der Anforderungen / Konzeptionierung des neuartigen Mehrwegladungsträgers

Im Arbeitspaket 1.2 wurde anhand der tiefgreifenden Marktkenntnis und auf Basis der IST Analyse der Firma MALORG ein entsprechender Anforderungskatalog erstellt und basierend auf diesem, ein Ladungsträger ausgewählt.

1.4 Definition der softwarespezifischen Anforderungen

Im Arbeitspaket 1.4 erarbeitete das InES eine Grobarchitektur und ein Technologiekonzept für den Aufbau einer Softwareplattform zur IoT-Datenhaltung, im Weiteren bezeichnet als „watchER-Cloud“. Außerdem wurden bereits Möglichkeiten zur Implementierung von Datendiensten zum Exportieren, Darstellen und Analysieren der Sensordaten erarbeitet und in der watchER-Cloud berücksichtigt.

2 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters

Im Arbeitspaket 2, sowie in dem in Arbeitspaket 2 untergliederten Arbeitspaket 2.1, 2.2, - 2,8 wurde ein grobes Konzept des Aufbaus für das Projekt watchER beschrieben.

2.1 Elektronik und Firmware Entwicklung

Im Arbeitspaket 2.1 wurde ein erster Stand der Firmware auf Basis der in AP1 erarbeiteten Informationen erstellt. Zur Umsetzung wurde ein „Development-Kit“ welches verschiedenste Technologien vereint und somit eine ideale Basis für die weitere Entwicklung bietet verwendet.

2.2 Konstruktion des angestrebten Mehrwegladungsträgers

Im Arbeitspaket 2.2 wurden erste Überlegungen zur Integration der Sensorik in den Mehrwegladungsträger begonnen. Basierend auf der Auswahl aus Arbeitspaket 1.3 wurde die entsprechende Bodenplattenzeichnung geprüft und in Abstimmung mit der Brehmer GmbH & Co. KG Konzepte zur Integration erarbeitet.

2.3 Erarbeitung eines projektspezifischen Kleinstserienwerkzeugs

Nach Abschluss der in AP 2.2 angestrebten Anpassungen zur Integration einer Elektronik kann mit der Erarbeitung eines projektspezifischen Kleinstserienwerkzeugs gestartet werden, wobei die ersten Prototypen mithilfe des schon bestehenden Werkzeugs hergestellt wurden und die Integration der Elektronik durch eine manuelle Nachbearbeitung der Ladungsträger erfolgte.

2.4 Aufbau einer cloudbasierten IoT Plattform zur Massendatenerfassung

In diesem Arbeitspaket fand die wesentliche technische Spezifikation und Implementierung der Basisfunktionalität der watchER-Cloud entsprechend des Anforderungskataloges und der Ergebnisse des AP1 statt.

2.5 Gehäusekonstruktion für Elektronikbauteile; Aufbau eines ersten Funktionsmusters des Zustandsüberwachungssystems

Basierend auf den Erkenntnissen sowie dem bis zum Arbeitspaket 2.5 erreichten Projektstatus wurde ein Gehäuse zum Schutz der Elektronikeinheit konstruiert und im 3D-Druck hergestellt.

2.6 Fertigung eines ersten Funktionsmusters

Aufgrund der erheblichen Eingriffe in das bestehende Produktionswerkzeug werden die ersten Funktionsmuster durch eine manuelle Nacharbeit des bestehenden Ladungsträgers hergestellt. Durch das Funktionsmuster können die Platzverhältnisse und die Belastungsanforderungen getestet und verifiziert werden, um die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren.

2.7 Entwicklung eines logistischen Soll-Konzepts (MALORG)

Das vorrangige Ziel des Arbeitspakets 2.7 war eine Sollkonzeption zur Integration des neuartigen Mehrwegladungsträgers zu entwickeln und diesen in die bestehenden logistischen Strukturen zu integrieren. In Kombination mit den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete wurden in Verbindung mit dem favorisiert assoziierten Praxispartner die Rahmenbedingungen für eine logistische Sollkonzeption und den Einsatz des intelligenten Ladungsträgers entwickelt. Zusätzlich wurden unterschiedliche Anwendungsszenarien ausgearbeitet, um den Nutzen des intelligenten Ladungsträgers weiter zu präzisieren.

2.8 Entwicklung von KI-Algorithmen zur intelligenten Datenauswertung

In intensiven gemeinsamen Abstimmungen wurden potenzielle Anwendungsszenarien für künstliche Intelligenz erarbeitet und theoretisch hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit im Kontext des Projekts evaluiert. Darüber hinaus wurden passende Tools und erste Beispiellösungen implementiert.

3 Technische Spezifikation und Herstellung eines Funktionsmusters

Im Arbeitspaket 3, sowie in den in untergliederten Arbeitspaketen ist die Durchführung erster Funktionstests und ein entsprechendes Reengineering der bisher Entwickelten Konzepte geplant.

3.1 Durchführung erster Funktionsprüfungen bzw. des Funktionsmusters des nahezu wartungsfreien, IoT-fähigen Mehrwegladungsträgers im akkreditierten Prüflabor der Brehmer GmbH & Co. KG unter enger Zusammenarbeit der Projektpartner; Gezielte Auswertung der Funktionstests

Aufgrund der aktuellen Aufgabenstellungen wurde Entwicklungsbegleitende Funktionsprüfungen gestartet. In enger Abstimmung zwischen InES werden hier die letzten Arbeitsschritte zur Integration von Messdaten implementiert. Basierend auf diesen Messdaten soll dann eine während den geplanten Laborprüfungen eine direkte Auswertung der Daten durch die Cloud erfolgen welche im Nachgang mit den Messdaten aus dem Laborbericht abgeglichen werden kann.

3.2 Hard- und Firmware-Redesign und Schaltungsoptimierung

Im Abgleich der Integration der Elektronik in die Cloud wurden verschiedene Anpassungen und Optimierungen vorgenommen. Abschließend zu Arbeitspaket 3.2 wurde die Elektronik durch Muster realisiert und optimiert. Mithilfe dieser Funktionsmuster kann die Firmware zur Integration der gemessenen Daten in Abstimmung mit InES optimiert werden.

3.3 Konstruktive Anpassungen am Fertigungswerkzeug

Alle Erkenntnisse aus den Tests werden zuerst in die Bauteilkonstruktion eingebracht und dann auf Umsetzung im Werkzeug überprüft. Aufgrund der Tragweite der Anpassungen sind viele Iterationsschleifen erforderlich, da während der Detailumsetzung jeder Aspekt geprüft werden muss. Die erforderliche Genauigkeit in den Produktionswerkzeugen sind wenige hundertstel Millimeter. In der Umsetzung müssen immer wieder Kompromisse zwischen Artikel- und Werkzeugdesign gefunden werden. In der Detailumsetzung werden nicht nur die Anpassungen an den formgebenden Bereichen des Werkzeugs berücksichtigt, sondern auch die Anpassungen am Grundaufbau und der Auswerferei.

3.4 Redesign und Optimierung der Software

In diesem Arbeitspaket wurden iterativ und in enger Kooperation mit Brehmer mehrere Optimierungen und Anpassungen an fast allen Stellen der watchER-Cloud erfolgreich vorgenommen.

4. Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators

4.1 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des geplanten Zustandsüberwachungssystems

Entsprechend der Entwicklungsergebnisse aus den Arbeitspaketen 2.5, 3.1 & 3.2 konnte ein anwendungsnaher Demonstrator entwickelt werden welcher in verschiedenen Betriebszuständen am Entwicklungsarbeitsplatz sowie später auch im Umweltsimulationslabor optimiert werden konnte.

4.2 Finale Herstellung eines anwendungsnahen Demonstrators des IoT-fähigen Ladungsträgers

Im Laufe des Arbeitspakets wurden die Funktionsmuster immer wieder überarbeitet und verbessert. Das abschließende Funktionsmuster wird mit Hilfe eines 3D-Druck Einsatzes in die Grundplatte des Ladungsträgers integriert.

4.3: Erarbeitung eines finalen anwendungsnahen Software-Prototyps

Zur Vorbereitung der watchER-Cloud für den Einsatz in einem realen Anwendungskontextes wurden vertiefende Überprüfungen der existierenden Systemanforderungen und anschließend eine iterative Erweiterung dieser vorgenommen. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Verknüpfung aller Hard- und Softwareschnittstellen sowie die technische Erprobung des integrierten Kontroll- und Datenflusses.

5. Praktische Systemvalidierung

5.1 & 5.2 & 5.3 Evaluation des Demonstrators in der realen Anwendung bei dem eingebundenen assoziierten Partner; Implementierung erforderlicher Anpassungen bei Hard- & Firmware

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Prototypen in Arbeitspaket 4.1 wurde dieser gemeinsam mit WALTHER & MALORG optimiert. Hierzu wurde das konstruierte Gehäuse weiterentwickelt und in einen Ladungsträger integriert. Bei der Weiterentwicklung des Gehäuses wurden die Sensoren direkt in die Gehäusegeometrie eingebunden.

5.4: Validierung des entwickelten Softwareprototyps in der realen Anwendung

Trotz der eigenen erfolgreich durchgeführten Vorbereitungen der watchER-Cloud auf Feldtests mit der Firma „tegut...“, konnten diese aufgrund eines kurzfristig auftretenden und nicht mehr rechtzeitig zu lösenden Softwarebugs in der Controller-Firmware nicht innerhalb des Projektzeitraums durchgeführt werden. Allerdings sind alle aufgebauten und vorbereiteten Prototypen – ausgenommen des Softwarebugs – voll einsatzfähig. Um den Projektplan sowie die Projektziele bestmöglich

einzuhalten bzw. zu erfüllen, wurde das AP 5 praktisch mittels dem in AP 2.8 entwickelten Demonstrationsszenarios, aber auch im Labor sowie theoretisch abgearbeitet.

6 Transfer und Diffusion der Projektergebnisse in die Praxis

6.1: Publikationen und Projektpräsentation

Erfreulicherweise gelang es gemäß den Zielen zur wissenschaftlichen Verwertung Forschungsergebnisse im Rahmen eines Konferenzpapiers [2] zu veröffentlichen. Der Beitrag mit dem Titel „Online random feature forests for learning in varying feature spaces“ von C. Schreckenberger, Y. He, S. Lüttke, C. Bartelt und H. Stuckenschmidt wurde auf der 37. AAAI Conference on Artificial Intelligence akzeptiert und in Washington, DC, USA von 07.-14.02.2023 vorgestellt. Diese Konferenz ist eine der renommiertesten und bedeutendsten Konferenzen im Bereich KI weltweit.

6.2: Durchführung einer Abschlussveranstaltung

Neben den jährlich durchgeführten Projekttreffen fand am 31.10.2023 die geplante Projektabschlussveranstaltung in hybrider Form statt. Dort wurden die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse des Projektes innerhalb des Projektkonsortiums und mit Teilnahme des Projektträgers präsentiert, diskutiert und evaluiert.

Bewertung der erreichten Meilensteine

Meilenstein 1:

Nach Analyse und Berechnung kann eine Energieautarkie erreicht werden, im weiteren Verlauf des Projektes musste entschieden werden, ob ein Zwischenladen der Ladungsträger-Akkumulatoren notwendig ist oder ob die Lebensdauer einer Batterie die mechanische Lebensdauer eines Ladungsträgers überschreitet.

Meilenstein 2:

Das WatchEr System konnte in Betrieb versetzt werden. Basierend auf den Marktanalysen der Firma MALORG wurde erkannt, dass eine Messung der Temperatur auf einzelnen Ebenen des Ladungsträgers nicht in der Praxis umsetzbar ist. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird das System auf eine zentrale Temperaturmessung optimiert.

Aufgrund der, mit den obigen Beschreibungen verbundenen, Vereinfachungen des Systems durch den Wegfall erweiterter Sensorik sowie der zum Meilenstein 1 erkannten Energieautarkie, reduzieren sich bei einer späteren Serienentwicklung die Aufwände.

Meilenstein 3 & abschließende Bewertung:

Das WatchEr System konnte in Betrieb versetzt und im Labor von BREHMER überprüft und optimiert werden. Aufgrund verschiedener Verzögerungen im Projekt und abschließender Herausforderungen hinsichtlich der Software konnten keine Abschließenden Feldtests durchgeführt werden. Dennoch konnte das WatchEr System in Funktion geprüft und vorgestellt werden. Im Rahmen der Laborversuche wurde eine entsprechende Praxistauglichkeit des Systems bestätigt.