

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Verbundprojekt

Nutzung digitaler Abbilder zur effizienten Steuerung von  
Aufbereitungsprozessen der Kreislaufwirtschaft am Beispiel von  
Kühlgeräterecyclinganlagen  
DiKueRec

## in der Fördermaßnahme

DigitalGreenTech

### Autoren:

IUTA e.V.: Jochen Schiemann, Franziska Blauth, Christian Thiehoff, Fabian Hübner  
Bliersheimer Straße 58-60, 47229 Duisburg; j.schiemann@iuta.de  
RIF e.V.: Jochen Deuse, Mikhail Polikarpov, Georgii Emelianov  
Joseph-von Fraunhofer-Str.20, 44227 Dortmund; mikhail.polikarpov@aps.rif-ev.de  
URT Recycling GmbH, Peter Heßler  
Am Hammersteig 5a; 97753 Karlstadt; p.hessler@urt-reycycling.de  
Aprotec GmbH, Michael Landgraf  
Seegrubenstrasse 11, 97753 Karlstadt; m.landgraf@aprotec-gmbh.de  
Riwald Electronics Recycling GmbH, Ingo Groschup  
Heilbronner Strasse 13, 7501 Eppingen, ingo.groschup@riwald.de

**Projektlaufzeit:** 01.04.2021 – 31.03.2024

**Erstellungsdatum:** 30.09.2024

### Projektpartner:

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V.; IUTA	FKZ: 02WDG016A
Institut für Forschung und Transfer e.V.; RIF	FKZ: 02WDG016D
URT Umwelt- und Recyclingtechnik GmbH; URT	FKZ: 02WDG016B
Aprotec GmbH; Aprotec	FKZ: 02WDG016C
Riwald Electronics Recycling GmbH; Riwald	FZK: 02WDG016E

### Weitere Partner:

Klink Entsorgung GmbH, Liebherr-Hausgeräte GmbH, Miele & Cie. KG, Remondis  
Electrorecycling GmbH

Das diesem Bericht zugrundeliegende  
Vorhaben wurde mit Mitteln des  
Bundesministeriums für Bildung und  
Forschung (BMBF) gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt der  
Veröffentlichung liegt bei der Autorin /  
beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzbericht .....	5
I.1 Aufgabenstellung.....	5
I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	5
I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick .....	6
II. Teil II Eingehende Darstellung .....	8
II.1 Motivation und Aufgabenstellung .....	8
II.2 Stand der Wissenschaft .....	10
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	10
II.3.1 AP 1: Ist-Analyse und Datenerhebung zur Zusammensetzung des Abfallstroms von Kühlgeräten.....	11
II.3.2 AP 2: Datenverständnis, Datenvorverarbeitung und Erstellung eines Datenmodells für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte .....	12
II.3.3 AP 3 Entwicklung und Bau einer modularen Eingangserfassung .....	12
II.3.4 AP 4 Inbetriebnahme und Test .....	12
II.3.5 AP 5 Prognosemodellierung und Konzeption adaptiver Steuerung. ....	13
II.3.6 AP 6 Entwicklung der Datenbündelung und -Darstellung.....	14
II.3.7 AP 7 Ableitung zukünftiger Übergabeschnittstellen .....	15
II.3.8 AP 8 Validierung und Optimierung .....	15
II.3.9 AP 9 Koordination, Transfer und Berichterstattung.....	16
II.4 Erzielte Ergebnisse .....	17
II.4.1 AP 1 Ist-Analyse und Datenerhebung zur Zusammensetzung des Abfallstroms von Kühlgeräten.....	17
II.4.2 AP 2: Datenverständnis, Datenvorverarbeitung und Erstellung eines Datenmodells für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte .....	20
II.4.3 AP 3 Entwicklung und Bau einer modularen Eingangserfassung & AP 4 Inbetriebnahme und Test.....	26
II.4.4 AP 5 Prognosemodellierung und Konzeption adaptiver Steuerung .....	32
II.4.5 AP 6 Entwicklung der Datenbündelung und -Darstellung.....	38
II.4.6 AP 7 Ableitung zukünftiger Übergabeschnittstellen .....	39
II.4.7 AP 8 Validierung und Optimierung .....	40
II.4.8 AP 9 Koordination, Transfer und Berichterstattung .....	43
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	44

II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse ...	44
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes.....	45
II.8	Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. ....	46
II.9	Literaturverzeichnis .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Auszug der Reifegradbewertung zur Erhebung der Digitalisierungspotentiale.....	18
Abbildung 2 - Auszug aus der Bilddatenbank.....	19
Abbildung 3 - Auszug aus der „Eigenschaften“- Datenbasis.....	19
Abbildung 4 – Datenmodell für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte.....	21
Abbildung 5 - Kühlschranksattribute für die Prognose der Stoffmengen.....	22
Abbildung 6. Links: Angestochenes Kühlgerät zur Trockenlegung des Kältekreislaufs durch Absaugung des Kältemittel-/Öl-Gemisches. Rechts: Detailaufnahme eines digitalen Manometers zur Beurteilung des Druckzustandes des Kältekreislaufes. ...	23
Abbildung 7 – Verteilung der Außenmaße der erfassten Kühlgeräte und Klassenzuordnung (farbliche Kodierung).....	24
Abbildung 8 - Korrelation zwischen Außenabmessungen und Nettovolumen.....	25
Abbildung 9 - Datenbankvisualisierung in der grafischen Umgebung von Software Grafana.....	26
Abbildung 10 – Entwicklungsstufen der prototypischen Eingangserfassung .....	27
Abbildung 11 – miniaturisiertes Mock-Up für die Eingangserfassung.....	27
Abbildung 12 - 2D-LiDAR-Punktwolke, die die innere Geometrie eines Kühlschranks abbildet. (a): Die Tür ist vorhanden (erkennbar an der geraden Scanlinie zwischen den grünen Punkten); (b): Die Tür fehlt (rote Punkte entsprechen innerer Kühlschranksgeometrie).....	33
Abbildung 13 - Vergleich der Genauigkeit verschiedener Zuordnungsalgorithmen ..	34
Abbildung 14 - Konfusionsmatrix für kNN-Algorithmus.....	34
Abbildung 15 - Erkennung von Warnzeichen W021, die für das entflammbare VHC-Kältemittel repräsentativ sind.....	35
Abbildung 16 – OCR-Ablesung der Treibmittelart.....	35
Abbildung 17 - Kompressor- und Flammenzeichenerkennung mittels YOLOv8-Modell .....	36
Abbildung 18: Prozessgasbehandlungsanlagen - Adsorptionsanlage (links), Kryogenanlage (rechts).....	37
Abbildung 19: Messkonzept im Reingas für die bedarfsorientierte Zuschaltung zusätzlicher Filtereinheiten bei der Kryogenkondensation.....	38
Abbildung 20: exemplarische Eingabemaske auf Basis einer Pythonprogrammierung für die Auswahl der Klasse und die Eingabe des Kältemittels. ....	39
Abbildung 21: Beispiel für die schrittweise Erkennung der Kompressorenkennzeichnung .....	40

# I. Teil I Kurzbericht

## I.1 Aufgabenstellung

In dem vom BMBF geförderten Projekt **DiKueRec** wurde für die Branche des Kühlgeräterecyclings eine (teil-)automatisierte Eingangserfassung der zu entsorgenden Altgeräte mit digitalen Zwillingen entwickelt, die eine Qualitätsverbesserung des Stoffstrom-Monitorings und der Prozessüberwachung sowie eine Erhöhung der Prozesseffizienz ermöglichen soll.

## I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Alte Kühl- und Gefriergeräte enthalten Kälte- und Treibmittel mit hohem Treibhauspotential und hohem Potential, die Ozonschicht zu schädigen (FCKW, HFKW und KW). In Deutschland werden in ca. 15 spezialisierten Entsorgungsbetrieben jährlich über drei Millionen gebrauchte Kühlgeräte aus Haushalten sowie zusätzliche Mengen aus dem Gewerbe verwertet. Die Vielfalt der eingesetzten Stoffe sowie die hohe Heterogenität des Abfallstroms erschweren die Qualitätsüberwachung der immer komplexeren Prozesse in diesem Entsorgungszweig. So sind mehr als 30 Jahre nach dem Verbot von halogenierten Kohlenwasserstoffen nach wie vor Altgeräte mit FCKW im Entsorgungsstrom (bis zu 30%) anzutreffen. Diese fallen gleichzeitig mit moderneren Geräten an, welche nun leicht entzündliche und brennbare Kohlenwasserstoffe enthalten. Dieser Geräte- und Generationenmix sowie neue Entwicklungen wie z.B. Vakuumisulationspanels, stellen den Verwertungsprozess hinsichtlich Anlagensicherheit, Emissionsvermeidung und Energie- und Rückgewinnungseffizienz vor enorme Herausforderungen. Aktuell werden diese Prozesse mit manuell geführten Strichlisten, die anschließend in eine Datei überführt werden, protokolliert und überwacht. Eine schnelle Identifikation von Störungen, Betriebsbeeinträchtigungen oder das Absinken der Qualität der Prozesse ist deshalb nicht möglich. Ebenso ist die Datenaufnahme oft lückenhaft und fehlerbehaftet und stellt deshalb nur eine unzureichende Grundlage für z.B. behördliche Überprüfungen oder durchzuführende Audits und Zertifizierungen dar.

Die hohe Klimarelevanz der in den 3 Mio. zu behandelnden Altgeräten enthaltenen Treibhausgase mit 200 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalent pro Jahr sowie die durch Materialrecycling zusätzlichen 200.000 Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalent an möglichen Einsparungen pro Jahr sollten für Forschung und Entwicklung eine entsprechende Grundlage und auch Anreiz sein. Es finden sich jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg nur wenige Projekte, deren Inhalte auf die Kühlgeräteverwertung und deren Optimierung abzielen. Der weltweit zugehörige Anlagenbau ist hochspezialisiert und beschränkt sich auf wenige Unternehmen, so dass auch hier keine Mitbewerbersituation technische Fortschritte und Entwicklungen forciert.

Aktuell sind zwei Forschungsprojekte bekannt, deren Inhalt auf eine verbesserte Verwertung von Polyurethanschäumen abzielen. Primär werden Matratzen oder gleichartige Produkte aus nur einem Material untersucht aber auch durch andere Stoffe verunreinigte Materialströme wie Polyurethanschäume aus Kühlgerätefraktionen werden untersucht. Die Ergebnisse sind noch nicht abschließen veröffentlicht. In einem weiteren FuE-Projekt wurden recyclinggerechte Designkonzepte entwickelt. Forschungsprojekte zur Digitalisierung sind nicht bekannt.

Eine systematische Entwicklung oder systematische Untersuchungen zur Digitalisierung waren vor Projektbeginn aber auch in der Industrie nicht wahrnehmbar.

Die behördlichen Auflagen und Kontrollen werden in Deutschland durch privatwirtschaftliche Auditierungssysteme flankiert, deren Häufigkeit und Intensität die staatlichen Vorgaben bei weitem übersteigen. Im Rahmen dieser Prüfungen, Auditierungen und Abfragen werden eine Vielzahl von Produktionsdaten und Verarbeitungsdaten auch unterjährig abgefragt. Alle Entsorgungsunternehmen versuchen deshalb die dafür notwendigen Datenaufnahmen, Protokollierungen und Auswertungen zeitnah und qualitätsgesichert aufzustellen.

### **I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick**

Die Norm DIN EN CLC/TS 50625-2-3 und CLC/TS 50625-3-4 versucht die Attribute von Kühlgeräten für die Stofffassung und die Behandlung zu beschreiben. Analog zu den behördlichen Vorgaben werden Zielwerte von 90 % der erwarteten Treib- und Kältemittel zur Rückgewinnung und kontrollierten Vernichtung vorgeschrieben. Für jede Stoffgruppen beschreibt die Norm die Kältegeräteattribute zur Bestimmung der erwarteten Massen.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene digitale Erfassungssensoren auf Basis von 2D- und 3-D Entfernungssensoren sowie Bildauswertungen auf KI Basis geprüft, zu Systemen zusammengefasst und digital verknüpft.

Es konnten für die Behandlung der Kältekreisläufe erfolgreich die manuellen Erfassungen und Dokumentierungen der folgenden Attribute durch sensorische digitale Erfassungen ersetzt werden:

- Vorhandensein eines Kompressors oder
- Beraubung von Kompressoren
- Vorhandensein zweier Kompressoren (bei Geräteklasse 2 oder Geräteklasse 3) oder
- Beraubung von Kompressoren
- KW-haltige Kältemittel im Kompressor oder
- FCKW, FKW oder HFKW-haltige Kältemittel im Kompressor

Damit sind alle notwendigen Attribute für die Behandlungsstufe 1 digital erfassbar und auswertbar. Die Fehlerquoten der digitalen Erfassung sind mit den Praxispartnern überprüft und mit den jeweiligen real auftretenden Fehlern der manuellen Erfassung verglichen worden.

Die Attribute für die Eingangserfassung der Stufe 2 sind digital sensorisch ersetzt worden für die Ermittlung von:

- Gerätevolumen
- Zusammenhang zwischen Gerätevolumen und den Geräteklassen 1, 2, 3 und 4  
(Die Fehlerquote bei der Unterscheidung eines abmessungsgleichen Gerätes Klasse 3 < 80 cm und Klasse 1 ist noch nicht ausreichend niedrig)
- Vorhandensein einer Gerätetür oder
- Fehlende Gerätetüren

Damit sind bis auf die Schäumungsart alle Attribute für die Eingangserfassung der Stufe 2 Behandlung digital umgesetzt worden. Die sensorische Ermittlung der Schäumungsart wurde beim Industriepartner Riwald bereits eingesetzt und die Integration der Datenermittlung und Verarbeitung in das Erfassungssystem im Rahmen des Projektes eruiert und weiterentwickelt. Die Fehlerquoten der digitalen Erfassung sind mit den Praxispartnern überprüft und mit den jeweiligen real auftretenden Fehlern der manuellen Erfassung verglichen worden.

Das modulare Erfassungssystem wurde in Abhängigkeit der Kompetenzen der Projektpartner gemeinschaftlich entwickelt, in verschiedenen Realisierungsstadien gefertigt und mit den Praxispartnern erprobt.

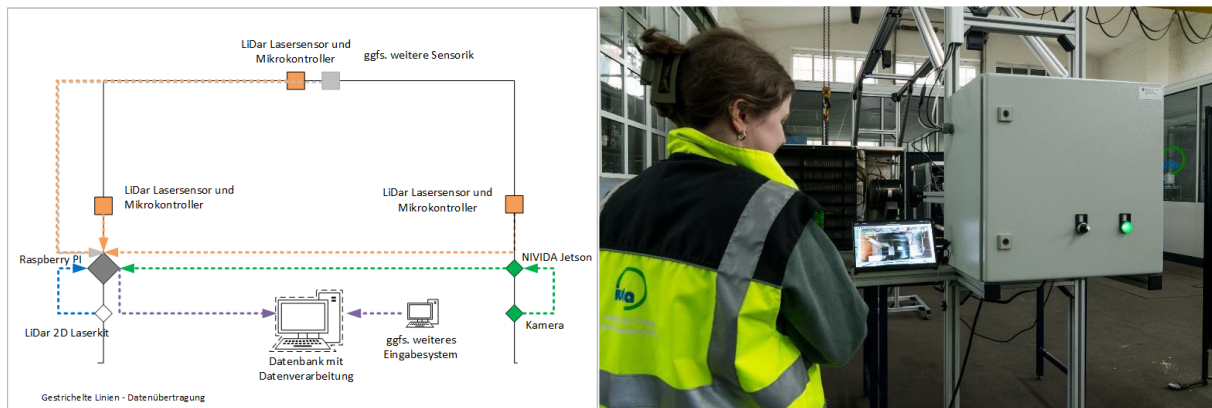


Abbildung K 1: Demonstrator-Testaufbau

Ein weiterer Schwerpunkt der Projektarbeiten lag in der schnellen Auswertung der Produktions- und Betriebsdaten zur Nutzung von Eingriffen in die Apparatechnik um Qualitätsminderungen frühzeitig entgegenzuwirken oder drohende Emissionssteigerungen zu verhindern. Es wurden Optimierungsoptionen an der Prozesssteuerung, z.B. für die Aktivkohleanlage, in Hinblick auf Anlagenverfügbarkeit und Energieeffizienz untersucht. Es wurden Konzepte erarbeitet, um die Beladung der Aktivkohlestufe auf Basis des Materialeingangs oder auf Basis von Rohgasmessungen abzuschätzen, um Adsorptions- und Desorptionsphasen unter Berücksichtigung der Einhaltung aller Emissionsgrenzwerte nicht zeitgesteuert, sondern beladungsgesteuert zu regeln. Für kryogen betriebene Prozessluftreinigungen wurde an bedarfsweise nachgeschalteten Polzeifiltern gearbeitet.

Für die Geräteattribute, deren Ermittlung durch Sensorik nur sehr kostenintensiv zu realisieren ist (z.B. Treibmittelerkennung), wurden Kennzeichnungsmöglichkeiten empfohlen. Die assoziierten Partner Miele & Cie. KG und Liebherr-Hausgeräte GmbH unterstützten das Projektkonsortium im Rahmen der Identifikation und Auslegung möglicher geeigneter Kennzeichnungen für Geräte zur erleichterten Erkennung von Merkmalen in der Zukunft.

Die entwickelte Sensorik, die Digitalisierungsmodule und deren Auswertungen sind geeignet, um Verluste und Emissionen von FCKW oder KW bei den Entsorgungsprozessen relevant zu minimieren und die Überwachung und Kontrolle der Betriebe und Anlagen deutlich zu optimieren.

## II. Teil II Eingehende Darstellung

### II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Alte Kühl- und Gefriergeräte enthalten Kälte- und Treibmittel mit hohem Treibhauspotential und hohem Potential, die Ozonschicht zu schädigen (FCKW, HFKW und KW). In Deutschland werden in ca. 15 spezialisierten Entsorgungsbetrieben jährlich über drei Millionen gebrauchte Kühlgeräte aus Haushalten sowie zusätzliche Mengen aus dem Gewerbe verwertet. Die Vielfalt der eingesetzten Stoffe sowie die hohe Heterogenität des Abfallstroms erschweren die Qualitätsüberwachung der immer komplexeren Prozesse in diesem Entsorgungszweig. So sind mehr als 30 Jahre nach dem Verbot von halogenierten Kohlenwasserstoffen nach wie vor Altgeräte mit FCKW im Entsorgungsstrom (bis zu 30%) anzutreffen. Diese fallen gleichzeitig mit moderneren Geräten an, welche nun leicht entzündliche und brennbare Kohlenwasserstoffe enthalten. Dieser Geräte- und Generationenmix sowie neue Entwicklungen wie z.B. Vakuumisulationspanels, stellen den Verwertungsprozess hinsichtlich Anlagensicherheit, Emissionsvermeidung und Energie- und Rückgewinnungseffizienz vor stetig neue enorme Herausforderungen. Aktuell werden diese Prozesse visuell und mit manuell geführten Strichlisten, die anschließend in eine Datei überführt werden, protokolliert und überwacht. Eine schnelle Identifikation von Störungen, Betriebsbeeinträchtigungen oder das Absinken der Qualität der Prozesse ist deshalb immer personenabhängig und damit nur subjektiv möglich.

Da die Anlagen strengen Umweltvorschriften aus dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), der Entsorgungsfachbetriebsverordnung (EfbV) und dem Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG) genügen müssen, werden sie regelmäßig behördlich und im Rahmen der geteilten Produktverantwortung auch privatwirtschaftlich von den Herstellern und Inverkehrbringern dieser Gerätearten überwacht und überprüft. Im Rahmen dieser Prüfungen, Auditierungen und Abfragen werden eine Vielzahl von Verarbeitungsdaten und Prozessdaten auch unterjährig abgefragt. Alle Entsorgungsunternehmen versuchen deshalb die dafür notwendigen Datenaufnahmen, Protokollierungen und Auswertungen zeitnah und qualitätsgesichert aufzustellen. Aufgrund der nachfolgend erläuterten Umstände ist die Datenaufnahme oft lückenhaft und fehlerbehaftet und bietet deshalb nur eine unzufriedenstellende Grundlage.

Dies liegt im Wesentlichen an folgenden Beeinträchtigungen für die Erfassung auditrelevanter Daten über den Eingangsstrom von Kühlgeräten:

1. Fehlender Informationsfluss zwischen Herstellern und Entsorgern aufgrund der Produktnutzungszeit,
2. Vielfalt der Produkte (inhomogener Eingangsstrom),
3. Individueller Reifegrad der EDV-Infrastruktur,
4. Mangel an digitalen Lösungen zur Datenerfassung,
5. Einsatz unterschiedlicher Technologien
6. Einsatz verschiedener Betriebsführungen

Im Folgenden werden die Punkte kurz erläutert:

**Punkt 1:** Die meisten recyclingrelevanten Eigenschaften von Altgeräten wären durch Herstellerangaben in Ergänzung zu visuellen Prüfungen der Geräte darstellbar. Bei vielen der Altgeräte existiert der Hersteller nicht mehr (z.B. Quelle, VEB). Für andere Geräte wäre die Kontaktaufnahme zum Hersteller oder Inverkehrbringer nicht trivial (durch Globalisierung und Zentralisierung des Herstellermarktes). Je nach Zustand und Alter der Geräte sind auch die Identifikationsmöglichkeiten nicht ausreichend. Daher ist der Aufbau einer einheitlichen, geeigneten Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen dem Hersteller und den verwertenden Unternehmen nicht möglich.

**Punkt 2:** Es fallen Geräte aus über 40 zurückliegenden Jahren der Nutzung an und es ergibt sich dadurch ein täglich schwankender und inhomogener Strom von Altgeräten, der von Kälte- und Treibmitteln unterschiedlicher Generation, Art und Menge geprägt ist. Dies macht es unmöglich, den Materialfluss zu planen oder auch in verschiedene Batches dynamisch aufzuteilen.

**Punkt 3:** Die Entsorgungsanlagen werden i.d.R. durch individuelle Verarbeitung von sensorischen Daten gesteuert (Siemens, Beckhoff, ABB, Phoenix Contact). Auch die sonstige Verarbeitung von Daten erfolgt mit individueller Software (Google Forms, Microsoft Office, Linux, Apple). Branchenspezifische Lösungen sind nicht käuflich erhältlich.

**Punkt 4:** Die Kühlgeräteverarbeitungsbetriebe sind durch einen geringen Grad an Digitalisierung gekennzeichnet. Der Abfallstrom alter Kühlgeräte wird derzeit anhand von manuellen Protokollen und Listen überwacht und bewertet. Dies ist fehleranfällig und verhindert eine datenorientierte Prozesssteuerung.

**Punkt 5:** Die verschiedenen Kühlgeräteverarbeitungsbetriebe nutzen unterschiedliche Technologien und unterschiedliche Betriebsabläufe. Die Auswertung von digital erfassten Prozessdaten zur Optimierung von Prozessabläufen oder zur Identifizierung von sinkenden Wirkungsgraden kann nur individuell zugeschnitten erfolgen.

**Punkt 6:** Kühlgeräteverarbeitungsbetriebe nutzen unterschiedliche Technologien und unterschiedliche Betriebsabläufe. Es gibt Betriebe, die lineare Verbindungen zwischen den Anlagenteilen haben und nach der ersten Geräteaufgabe keine Geräte ein- oder ausschleusen, und so mit einer zentralen Datenerfassung arbeiten können. Andere Betriebe mit modular eingesetzten Anlagenteilen und Zwischenlagerungen der Altgeräte können flexibler verwerten, benötigen aber mehrere Datenerfassungen.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Modulen zur stärkeren Nutzung von sensorbasierten Daten, zur übergeordneten Datenverarbeitung für die Prozessoptimierung und zur qualitätsgesicherten Durchführung und Überwachung von Entsorgungsprozessen.

## II.2 Stand der Wissenschaft

Die hohe Klimarelevanz der in den 3 Mio. zu behandelnden Altgeräten enthaltenen Treibhausgase mit 200 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalenten pro Jahr sowie die durch Materialrecycling zusätzlichen 200.000 Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalenten an möglichen Einsparungen pro Jahr sollten für Forschung und Entwicklung eine entsprechende Grundlage und auch Anreiz sein. Es finden sich jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg nur wenige Projekte, deren Inhalte auf die Kühlgeräteverwertung und deren Optimierung abzielen. Aktuelle Forschungsvorhaben und Industriekonsortien beschäftigen sich mit weiterführenden Behandlungsverfahren der Schaumfraktion (z.B. EU-Projekt CircularFoam [1]). Im Forschungsprojekt „Circularby Design“ [2] wurde anhand eines neu zu gestaltenden Kühlgerätes untersucht, inwieweit bereits bei der Produktion die Recyclingfähigkeit positiv beeinflusst werden kann.

Aus angrenzenden Bereichen des Recyclings sind einzelne Projekte zu Digitalisierungsvorgängen angesiedelt. Anreize zur erhöhten Nutzung von Rezyklaten sollen z.B. im durch das BMBF geförderte Projekt „DiLink“ unter Leitung des Wuppertal Instituts gesetzt werden. Durch die sensorische Datenerfassung und an die Datensammlung angepasste digitale Tools sollen Informationslücken gefüllt werden und die Schließung der Wertschöpfungskette zu einem Wertschöpfungskreislauf ermöglichen [3].

Einzelne Systeme zur bild- und sensorgestützten Analyse und Sortierung von Abfällen wurden bereits in anderen Bereichen umgesetzt. ZenRobotics aus Finnland bieten einen Sortierroboter für verschiedenste heterogene Abfallströme an. Die Sortierentscheidung wird über die Bildauswertung mit Hilfe künstlicher Intelligenz getroffen. Hohe Abtastraten der Kameras sowie Entnahmeraten (Zugriffe/h) sollen eine industrielle Umsetzung ermöglichen. Die erste großtechnische Umsetzung ist an einigen Referenzanlagen erfolgt [4]. Eine flächendeckende Umsetzung von robotergestützten Recyclingtechnologien gibt es derzeit noch nicht.

Künstliche Intelligenzen können auch dabei unterstützen, Altteile zu identifizieren und zu bewerten, um so eine Wiederverwendung zu ermöglichen. Aktuell wird im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes „EIBA“ diese Art der Unterstützung für Gewinnung von Teilen aus Altfahrzeugen untersucht. Ein Übertrag der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes in die Wiederverwendung von Elektro- und Elektronikaltgeräten ist denkbar [3].

## II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Kerninhalte des Forschungsprojektes waren die Entwicklung einer Eingangserfassung zur Abbildung digitaler Zwillinge von eingehenden Kühlgeräten sowie die Verknüpfung dieser Abbilder und weiterer Betriebsdaten zu einer effizienten Steuerung der Aufbereitungs- und Reinigungsprozesse. Der digitale Zwilling adressiert hierbei die datentechnische Repräsentation eines eingehenden Kühlgeräts, der um beschreibende Attribute der ausgehenden Stoffströme zu erweitern ist und diese vollumfänglich umschreibt. Hierzu waren innerhalb von drei Arbeitsschwerpunkten (AS) zehn Arbeitspakete (AP) geplant.

### II.3.1 AP 1 Ist-Analyse und Datenerhebung zur Zusammensetzung des Abfallstroms von Kühlgeräten

Zur Feststellung des Ist-Zustands und der Digitalisierungspotentiale wurden gemeinsam mit dem Projektpartner Riwald und dem Unterauftragnehmer KLINK mehrere Arbeitsgespräche geführt und betriebsbegleitende Untersuchungen vor Ort durchgeführt. Die Anlagen und die Betriebsabläufe wurden dafür in Einzelprozesse unterteilt und bewertet. Damit wurde der aktuelle Entsorgungsprozess hinsichtlich der durchgeführten Datenerfassung, dem Stichprobenumfang und der Datenspeicherung beurteilt.

Es wurden die geltenden Gesetze, Normen und Standards sowie die relevanten Berichtspflichten mit den Anlagenbetreibern eruiert und die darin enthaltenen Kerninhalte der Berichtspflichten extrahiert.

Ausgehend von den zusammengefassten Ergebnissen der durchgeführten Anlagen und Betriebsbegehungen wurden die von außen erkennbaren Kühlgeräteeigenschaften (Attribute) zur Ableitung der Parameter des digitalen Zwillings eines Kühlgerätes ausgewählt und die Vorgehensweise zur Etablierung einer Ausgangsdatenbasis erarbeitet.

Bei durchgeführten Messkampagnen wurden behandelte Kühlgeräte jeweilig fotografiert und die ausgewählten Attribute, z.B. Abmaße der Geräte, Kältemittel, Treibmittel, Kompressor, Informationen auf Aufklebern und Typenschildern aufgenommen und dokumentiert. Die Geräte wurden zusätzlich entsprechend den Vorgaben der EN 50625-2-3 in Geräteklassen kategorisiert. Alle Daten wurden in eine Datenbank integriert, in der ca. 500 Geräte vollständig und mehrere Tausend Geräte mit ausgewählten Daten erfasst wurden.

Die Praxispartner recherchierten historische Anlagendaten und erfassten die aktuelle Eingangsfractionen in Bezug auf Aufkommen, jahreszeitliche Schwankungen, Auffälligkeiten in der Zusammensetzung des Altgerätestroms und bewerteten diese gemeinsam mit dem IUTA. Die assoziierten Gerätehersteller Liebherr und Miele stellten relevante Daten zu ihren aktuellen Kühlgerätemodellen bereit.

Das RIF war an repräsentativen Messkampagnen in den Recyclingbetrieben beteiligt und unterstützte die Datenaufnahme und Datenorganisation/-strukturierung, insbesondere in Hinblick auf die spätere Verarbeitung mittels KI-Werkzeugen.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>1 Ist-Analyse und Datenerhebung zur Zusammensetzung des Abfallstroms von Kühlgeräten</b>		
Start	01.04.2021	Ende	30.09.2021
Beteiligt	IUTA, Riwald, RIF, assoziierte Partner		
Ergebnis	Ist-Zustand, Erfassung relevanter Stoffströme und ihrer Eigenschaften, Datenbasis.		
Personal	Der Einsatz des jeweilig bei den Partnern eingesetzten Personals war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben	Gemäß dem Förderantrag wurde von IUTA ein Unterauftrag an die Klink GmbH für alle weiteren Bearbeitungsschritte vergeben. Dienstreisen zu den Industriepartnern.		
Änderungen, Anpassungen, Zeitplan	Die im Rahmen dieses AP durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Die ursprünglich angesetzte Dauer des AP wurde ausgeweitet, da die Datenerfassung kontinuierlich, begleitend zu den Entwicklungsarbeiten fortgeführt wurde.		

### II.3.2 AP 2: Datenverständnis, Datenvorverarbeitung und Erstellung eines Datenmodells für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte

Anhand der aufgenommenen Geräteattribute und der erstellten Datenbasis wurden Methoden zur zukünftigen automatisierten Datenaufnahme untersucht und ausgewählt und in eine Übersichtsmatrix überführt. Die Ergebnisse der Methodenentwicklung wurde fortlaufend durch das IUTA bewertet. Ein weiteres Ergebnis ist die konzeptionelle Gestaltung für den digitalen Zwilling auf Grundlage eines UML-Klassendiagramms gemeinsam mit dem kompletten Konsortium.

In enger Abstimmung mit den Anlagenbetreibern erfolgte die Analyse und Auswahl der für die Stoffstrombilanzierung (Ist-Zustandserfassung der Stoffsammelmengen) und für die Überwachung der Stoffrückgewinnungseffizienz relevanten Kühlschranksattribute. Dabei wurden die bekannten Normen z.B. DIN EN 50625, die manuell bereits ermittelten Attribute sowie weitere für die Prozesssteuerung relevante Daten betrachtet.

Es wurden ein relationales Datenbankmodell zur Speicherung von Daten der entsprechenden Kühlschranksattribute entwickelt und implementiert.

Arbeitspaket	2 Datenverständnis, Datenvorverarbeitung und Erstellung eines Datenmodells für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte		
Start	01.07.2021	Ende	31.03.2022
Beteiligt	RIF, IUTA		
Ergebnis	Datenmodell zur Repräsentation eines digitalen Kühlgerätezwillings (UML-Klassendiagramm, Datenbankmodell).		
Personal	Der Einsatz des jeweilig bei den Partnern eingesetzten Personals war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben	Dienstreisen zu den Partnern		
Änderungen, Anpassungen, Zeitplan	Die im Rahmen dieses AP durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen.		

### II.3.3 AP 3 Entwicklung und Bau einer modularen Eingangserfassung

#### II.3.4 AP 4 Inbetriebnahme und Test

Durch den stark inhomogenen Stand der Technik in den unterschiedlichen Entsorgungsanlagen wurde die im Antrag ursprünglich dargestellte Unterteilung von AP 3 und AP 4 aufgelöst. Die Erstellung einer einzelnen, übergreifend zu testenden Demonstrationsanlage war nicht möglich, weil die Grundvoraussetzungen der Entsorgungsanlagen extrem verschieden sind. Daher wurde ein modulares System entworfen, mit dem die Untersuchungen sowie die Validierung an unterschiedlichen Anlagen erfolgen konnte.

Deshalb wurde die Bearbeitung der Arbeitspakete 3 und 4 in enger Verzahnung durchgeführt.

Zuerst erfolgte von RIF der Aufbau eines miniaturisierten Mock-Ups des Erfassungssystems im Labor zum Test der grundlegenden Sensorfunktionalität. Anschließend wurde eine größere, mobile Variante konstruiert, deren Funktionalitäten an den Recyclinglinien des Unterauftragnehmers Klink und des assoziierten Partners Remondis untersucht wurden. Es wurden auf Basis der Ergebnisse der vor-Ort-Tests die geeigneten Hardware- und die

Softwarekomponenten gemeinsam mit den Industriepartnern beurteilt und exemplarisch ausgewählt. Eine exemplarische Demonstratorvariante wurde von URT und Arotec konzipiert und im Technikum von IUTA aufgebaut.

Bei Riwald erfolgte aufgrund der örtlichen Gegebenheiten kein Einsatz des Testsystems. Riwald hat das Arbeitspaket dahingehend unterstützt, dass Anforderungen an eine digital gestützte, manuelle Datenerfassung eruiert wurden.

<b>Arbeitspakete</b>	<b>3 Entwicklung und Bau einer modularen Eingangserfassung</b> <b>4 Installation und Inbetriebnahme von Demonstratoren</b>		
Start	01.01.2022	Ende	31.03.2024
Beteiligt	URT, Arotec, IUTA, RIF, Riwald, Klink + assoziierte Partner		
Ergebnis	Modulare Eingangserfassung: Mock-UP, mobiles Testsystem zur Funktionsprüfung, Demonstratorvariante.		
Personal	Der Einsatz des jeweilig bei den Partnern eingesetzten Personals war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben	Bei den jeweiligen Partnern wurden Halbzeuge für den Aufbau eines Mock-Ups sowie für die mobilen Aufbauten und den Demonstratoraufbau beschafft. Das umfasste z.B. Rahmenbauteile, Halterungen, Winkel, Verschraubungen sowie Sensoren, PC-Komponenten (Raspberry Pi, Jetson Nano,...), Kameras, Touch Display, Beleuchtung, Rollenbahn, Anschlusskabel und Zubehör zur Bedienung. Die konkreten Positionen sind den zahlenmäßigen Verwendungsnachweisen der jeweiligen Partner zu entnehmen.		
Zeitplan, Änderungen	Die Arbeiten im Rahmen dieses AP wurden in hohem Maße durch externe Faktoren, wie pandemiebedingte Personalengpässe (Corona) und kriegsbedingte Lieferengpässe (Ukraine) beeinträchtigt. Der vorgesehene Zeitraum konnte daher nicht eingehalten werden. Durch die schrittweise Bearbeitung des APs durch die Erstellung des Mock-Ups, des darauf basierenden Testsystems sowie des Demonstratoraufbaus wurde das Arbeitspaket in enger Verzahnung mit AP 4 durchgeführt, um jeweilig Untersuchungen an den einzelnen Entwicklungsschritten durchzuführen. Die Industriepartner URT und Arotec wurden bei diesen Arbeiten durch die Partner RIF und IUTA zusätzlich unterstützt. Die dafür benötigten (Personal)-Aufwendungen wurden bei anderen AP der zwei Forschungspartner eingespart. Durch die enge Verzahnung der AP 3 und 4 war dies möglich. Das Testsystem wurde an zwei Standorten, bei dem Unterauftragnehmer Klink und bei dem assoziierten Partner Remondis, installiert und zur Funktionsprüfung genutzt. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen.		

### II.3.5 AP 5 Prognosemodellierung und Konzeption adaptiver Steuerung.

Dieses Arbeitspaket hatte die Entwicklung von digitalen Methoden zur Erfassung von ausgewählten Kühlschranksattributen sowie die Prognosemodellierung zur Ermittlung der genormten Zielwerte der Stoffsammlmengen als Ziel.

Vom Forschungspartner RIF wurden verschiedene Methoden für die Erfassung und Vorhersage der Attribute betrachtet, gegenübergestellt und die jeweils geeignete Methode ausgewählt.

Von den Projektpartnern Aprotect und URT wurden Optimierungsoptionen an der Prozesssteuerung insbesondere in Bezug auf die Prozessgasbehandlung untersucht. Es wurden Konzepte erarbeitet, um die Beladung der Aktivkohlestufe auf Basis des Materialeingangs oder auf Basis von Rohgasmessungen abzuschätzen, um Adsorptions- und Desorptionsphasen unter Berücksichtigung der Einhaltung aller Emissionsgrenzwerte nicht zeitgesteuert, sondern beladungsgesteuert zu regeln. Ergänzend wurden von IUTA und dem assoziierten Partner Remondis die alternative Prozessgasbehandlungstechnologie Kryogenkondensation betrachtet.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>5 Prognosemodellierung und Konzeption adaptiver Steuerung</b>		
Start	01.10.2021	Ende	30.09.2023
Beteiligt	RIF, IUTA, URT, Aprotect, Remondis		
Ergebnis	Modell zur Ermittlung relevanter Daten zum Gerätezustand anhand von Lasermessungen, Modell zur Geräteklassezuordnung auf der Basis der gemessenen Korpusmaße, KI-basierte Objekterkennungsmodelle zur Detektion und Zählung von Kompressoren sowie Klassifizierung der Kältemittelart anhand der Kompressoraufkleber (RIF), Konzepte zu Steuerungsanbindung (Aprotect + URT), (IUTA + Remondis).		
Personal	Der bei den jeweiligen Partnern eingesetzte Personalaufwand war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben	Reisekosten		
Zeitplan, Änderungen	Die Bearbeitungsdauer dieses AP wurde verlängert. Der Projektpartner RIF hat mit Fertigstellung seiner Arbeiten im Projekt dieses AP im September 2023 abgeschlossen. Die Praxispartner sowie IUTA haben weitere Arbeiten durchgeführt. Das RIF stand weiterhin als Ansprechpartner zur Verfügung.		

### II.3.6 AP 6 Entwicklung der Datenbündelung und -Darstellung

Die in den vorangegangenen Arbeitspaketen gesammelten Daten wurden in einem geeigneten Format zusammengefasst. Darüber hinaus wurden Informationsbedürfnisse verschiedener Stakeholder erfasst und zur Konzeption der Ausgabe der Daten in übersichtlicher Form genutzt.

Es wurden hierbei u.a. Berichtspflichten für Behörden oder Auditierungsorganisationen wie z.B. WEEELABEX sowie die Bedürfnisse zur eigenen Anlagenüberwachung berücksichtigt.

Verschiedene exemplarische Eingabemasken mit unterschiedlichen EDV-Programmen für eine digitalgestützte manuelle Eingabe wurden erarbeitet und erprobt.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>6 Entwicklung der Datenbündelung und -Darstellung</b>		
Start	01.01.2022	Ende	31.01.2024
Beteiligt	IUTA, RIF, Remondis		
Ergebnis	Darstellungsformen der gesammelten Daten in Abhängigkeit der Stakeholderbedürfnisse, exemplarische Eingabemasken.		
Personal	Der bei den jeweiligen Partnern eingesetzte Personalaufwand war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben			
Zeitplan, Änderungen	Das AP wurde später gestartet und erst in 2022 begonnen begleitend zu den Arbeitspaketen 3 und 4 fortlaufend bis Anfang 2024 durchgeführt. Da dieses AP zeitlich unabhängig der anderen AP durchgeführt werden konnte, haben sich dadurch keine weiteren Verzögerungen ergeben.		

### II.3.7 AP 7 Ableitung zukünftiger Übergabeschnittstellen

Mittels Markt- und Technologierecherchen wurden mögliche Kennzeichnungsmöglichkeiten identifiziert, bewertet und zusammengefasst. In Kommunikation mit den assoziierten Geräteherstellern wurde der Einsatz in Frage kommender Kennzeichnungsmethoden diskutiert.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>7 Ableitung zukünftiger Übergabeschnittstellen</b>		
Start	01.08.2023	Ende	31.03.2024
Beteiligt	IUTA, RIF, Liebherr, Miele		
Ergebnis	Diskussion über zukünftige Kennzeichnungsmethoden		
Personal	Der bei den jeweiligen Partnern eingesetzte Personalaufwand war notwendig und angemessen.		
Sonstige Ausgaben	Keine		
Ergebnis	Handlungsempfehlungen zur zukünftigen Kennzeichnung		
Zeitplan, Änderungen	Das AP wurde später gestartet und erst ab Mitte 2023 durchgeführt, da die Bearbeitung von AP 3 und AP 4 Vorrang hatte. Da dieses AP zeitlich unabhängig der folgenden AP durchgeführt werden konnte, haben sich dadurch keine weiteren Verzögerungen ergeben.		

### II.3.8 AP 8 Validierung und Optimierung

Die Validierung der digitalen Eingangserfassung erfolgte auf unterschiedlichen Ebenen. Die Einsatzmöglichkeiten in Stufe 1 und Stufe 2 wurden erstmal unabhängig voneinander bewertet. Dabei wurde die Fehlerquoten der manuellen Eingangserfassung und der digitalen Eingangserfassung ermittelt und verglichen.

Von den Industriepartnern wurde die praktische Einsatzfähigkeit bewertet, Hemmnisse und Optimierungspotenziale für den betrieblichen Einsatz abgeleitet.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>8 Validierung und Optimierung</b>		
Start	01.01.2023	Ende	31.03.2024
Beteiligt	IUTA, RIF, Aprotect, URT, Riwald		
Ergebnis	Validierung der Eingangsdatenerfassungssysteme in Stufe 1 und 2, Bewertung der Steuerungskonzepte und Ermittlung von Emissions-einsparpotenzialen.		
Personal	Der bei den jeweiligen Partnern eingesetzte Personalaufwand war notwendig und angemessen.		
Sonstige Aufwendungen	Reisekosten		
Zeitplan, Änderungen	Das AP ist mit den Arbeiten in AP3 und AP4 verbunden und wurde daher erst in 2023 gestartet und bis zum Projektende durchgeführt. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen.		

### II.3.9 AP 9 Koordination, Transfer und Berichterstattung

Das Projekt musste aufgrund externer Einflüsse (Pandemie, Ukrainekrieg) kostenneutral verlängert werden. Aufgrund von vertraglichen Verbindlichkeiten konnte das RIF der Projektverlängerung nicht vollständig folgen und ist vorzeitig ausgeschieden. Durch intensiven Kontakt zwischen IUTA und RIF ist ein Informationsfluss bis zum Ende sichergestellt worden, so dass die weitere Bearbeitung und die gemeinsame Berichterstellung beeinträchtigungsfrei durchgeführt werden konnten.

Der wissenschaftliche Austausch wurde durch die Teilnahme an verschiedenen Konferenzen und der Ausübung von Transfermaßnahmen sowie mehrerer Veröffentlichungen umgesetzt. Der projektbegleitende Kontakt zur Industrie und den Stakeholdern führte während der Projektlaufzeit zur Erweiterung des Konsortiums (Remondis als assoziierter Partner). Während der gesamten Laufzeit wurden Entwicklungen in angrenzenden Bereichen beobachtet sowie weitere Fragestellungen identifiziert. IUTA und RIF erwägen weitere anschließende Projekte durchzuführen.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>9 Koordination, Transfer und Berichterstattung</b>		
Start	01.03.2021	Ende	31.03.2024
Beteiligt	IUTA, RIF, URT, KLINK, Riwald, (Remondis, Liebherr, Miele)		
Ergebnis	Die Liste der Veröffentlichungen und Aktivitäten ist in Kapitel II.8 zu finden.		
Personal	Der bei den jeweiligen Partnern eingesetzte Personalaufwand war notwendig und angemessen.		
Sonstige Aufwendungen	Reisekosten zu Projekttreffen und zu DGT-Statuskonferenzen und Treffen im Rahmen des Begleitvorhabens, Eintritte und Reisekosten für Messebesuche und Konferenzteilnahmen.		
Zeitplan, Änderungen	Mit der Verlängerung der Gesamtlaufzeit dieses Projektes verlängerte sich auch dieses AP. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen.		

## II.4 Erzielte Ergebnisse

### II.4.1 AP 1 Ist-Analyse und Datenerhebung zur Zusammensetzung des Abfallstroms von Kühlgeräten

#### IST-Analyse zur Reifegradbewertung

Es wurde eine umfangreiche Analyse des IST-Zustandes an unterschiedlichen Anlagen durchgeführt. Vorrangig wurden vor-Ort-Begehungen und Untersuchungen bei den zwei involvierten Praxispartnern durchgeführt, die bereits zwei sehr unterschiedliche Anlagen in strukturell unterschiedlichen Einzugsgebieten abbilden. Um die Datenlage noch zu erweitern und ein umfassendes Bild des technologischen Standards bei der Datenerfassung zu erlangen, wurden Erfahrungen und Beobachtungen aus den gutachterlichen Tätigkeiten bei zehn weiteren Anlagen durch das IUTA aufgenommen und anonymisiert mit einbezogen.

Für die systematische Reifegradbewertung wurden die Betriebsprozesse in Teilprozesse unterteilt und damit 26 distinkte Prozessschritte identifiziert. Jeder Prozessschritt und die mit ihm verbundenen Datenquellen wurden nach den folgenden Kriterien charakterisiert und bewertet:

1. Datenerfassung
  - a) Messgerät
  - b) analoge oder digitale Erfassung
  - c) Häufigkeit bzw. Abtastfrequenz
2. Stichprobenumfang
3. Datenhaltung
4. Datenformat
5. Datenstruktur
6. Merkmalsausprägung
7. Bezugsebene
8. Konsistenz
9. Rückverfolgbarkeit

Als Ergebnis wurde eine Bewertungsmatrix für den digitalen Reifegrad der jeweiligen Anlagenbereiche erstellt (siehe Abbildung 1).

Anlagenbereich	Prozessschritt/Anlagenteil	Priorisierung (1. sehr hoch - 5. kaum wichtig)	Erfasste Daten (Einheit)	Datenerfassung				Reifegrad
				Messgerät	Analog/ digital	Häufigkeit/ Aktstfrequenz	Kommentar	
Eingangserfassung	Sichtprüfung		Breite [cm] Höhe [cm] Tiefe [cm]	Maßband Maßband Maßband	analog analog analog	je Kühlgerät je Kühlgerät je Kühlgerät	derzeit nicht erfasst derzeit nicht erfasst derzeit nicht erfasst	
	Sichtprüfung		1 Geräteklasse [-]	Mitarbeiterentscheidung	analog	je Kühlgerät	Papierform/Exceltabelle bei behördlichen Tests, Volumen abgeschätzt	1
	Sichtprüfung		1 mit/ohne Tür	Mitarbeiterentscheidung	analog	je Kühlgerät	Papierform/Exceltabelle	1
	Sichtprüfung		1 beraubt/nicht beraubt	Mitarbeiterentscheidung	analog	je Kühlgerät		1
	Wägung Anlieferung		1 Gewicht	Waage	digital	Je Anlieferung	Containerwägung nicht durchgehend eingesetzt, Speicherung/Verwendung der Daten unklar	2
	Wägung Einzelgerät		3 Gewicht	Waage	digital	je Gerät		2 bis 3
	Kältemittelerfassung		1 Art und Menge	Sichtprüfung	analog	je Gerät	nur in behördlichen Tests erfasst	1
Stufe 1 Behandlung	Absaugstation Kältemittel		1 Druck im Kältekreislauf	Manometer	analog/digital	je Kühlgerät	Entscheidung über defekt/nicht defekt. Vermerk auf Papier	1
	Abfüllung Kältemittel		1 Menge (kg)	Waage		je Schicht/Tag/	zur Dokumentation der Rückgewinnungsmengen	1 bis 2
	Kompressoren Demontage		1 Anzahl (?), Menge	Waage		je Schicht/vollst. Gef. Container		1 bis 2
Stufe 2 Zerkleinerung	Inertisierung		1 VHC-Gehalt	FID, FTIR o.Ä.	digital	kontinuierlich		2 bis 3
	Zerkleinerungsaggregat		3					
	Hubstation Schleuse		4 Position (offen/zu)	versch. Sensork	digital		keine Dokumentation	4

Abbildung 1 - Auszug der Reifegradbewertung zur Erhebung der Digitalisierungspotentiale

Als allgemeines Ergebnis der Reifegradbewertung in Hinblick auf Digitalisierungsprozesse wurde festgestellt, dass die Mehrzahl der 26 betrachteten Einzelschritte überwiegend manuell dokumentiert werden und auch manuell in gängige EDV-Anwendungen überführt werden. Einzelne Attribute (z.B. Gewicht) können an einzelnen Anlagen bereits analytisch erfasst werden. Bei einer einzelnen Anlage (Riwald) wird die Treibmittelart analytisch bestimmt, jedoch nicht für weiterführende Prozessschritte gespeichert.

### Erstellung einer Gerätedatenbank

Um einen Überblick über das aktuelle Geräteaufkommen an unterschiedlichen Standorten zu bekommen, wurde eine umfassende Bilddatenbank mit 900 Geräten erstellt, in der die Kühlgeräte jeweils von vorne, von hinten und der hinten liegende Kompressor sowie das innenliegende Typenschild dargestellt sind (siehe Abbildung 2).

Zeitgleich wurden die Geräteeigenschaften in separaten Datenbanken aufgenommen. Dafür wurden die Dimensionen des Gerätes sowohl von außen als auch von innen aufgenommen und die Klasse des Gerätes gemäß der als relevant identifizierten Normen *TA Luft*, *DIN EN 50625*, *WEEELABEX* ermittelt. Weiterhin wurden Anmerkungen über den Zustand des Gerätes, zur Lesbarkeit der Kompressorinformationen, zum Vorhandensein von Kennzeichnungen und zur Kältemittelart vermerkt (siehe Abbildung 3). Für diese Datenbank wurden 500 Geräte aufgenommen. Weitere mehrere 1000 Geräte wurden in separaten Datenbanken mit verringertem Datenumfang für statistische Betrachtungen gespeichert.

Ausgehend von diesen Datenbanken konnten die für die Erfassung notwendigen Anforderungen an die Sensortechnik, an die Dimensionen der Eingangserfassung sowie an die Bilderkennung abgeleitet werden. Dabei wurden bereits potentielle Herausforderungen für sensorbasierte Systeme ermittelt.



Abbildung 2 - Auszug aus der Bilddatenbank

fdNr	Abmessungen außen			Abmessungen innen			Kompressor vorhanden?	lesbare Information auf Kompressor?	Tür vorhanden?	Plakette vorhanden?	lesbare Information auf Plakette?	Kältemittel	TM	Klasse
	B [cm]	H [cm]	T [cm]	B [cm]	H [cm]	T [cm]	ja/nein?	ja/nein	ja/nein	Lage innen/außen	ja/nein?	Art	Art	TR,KS, KO
1	47	80	52	42	73	41	1		1	1	0	R600a	Pentan	KS
2	75	150	61	68	137	58	1		1	0	1	R134a	FCKW	TR
3	59	155	54	55	143	47	1		0	0	1	R12	Pentan	KS
4	60	84	59	52	72	46	1		1	1	1	R600a	Pentan	KS
5	54	88	47	49	82	42	1		0	0	1	R600a	Pentan	KS
6	54	88	52	48	79	46	1		1	1	1	R600a	Pentan	KS
7	69	190	68	62	166	52	1		1	1	1	R600a	Pentan	KO
8	53	169	55	47	146	44	1		1	1	1	R600a	Pentan	KO
9	55	88	50	50	81	41	1		1	1	0	R12	FCKW?	KS
10	58	184	65	51	161	49	1		0	1	1	R600a	Pentan	KO
11	90	174	67	77	157	54	1		1	1	1	R600a	Pentan	KO
12	65	146	54	49	124	45	1		1	1	1	R600a	Pentan	TR
13	54	178	48	48	156	44	1		1	0	1	R600a	Pentan	KO
14	56	122	52	48	111	43	1		1	1	1	R600a	Pentan	KS
15	56	99	46	50	93	42	1		1	0	1	R600a	FCKW	KS
16	69	156	56	63	147	151	1		1	0	1	R134a	FCKW	KS
17	54	71	52	46	60	42	1		1	1	1	R12	FCKW	KO
18	54	88	50	48	78	47	1		0	0	1	?	FCKW	KS
19	59	141	54	53	127	44	1		1	1	1	R12	FCKW	KS
20	56	78	65	45	49	44	1		1	0	1	R600a	Pentan	TR
21	59	146	56	46	121	43	1		1	1	1	R600a	Pentan	KS
22	65	173	69	50	146	44	1		0	1	1	R12	FCKW?	TR

Abbildung 3 - Auszug aus der „Eigenschaften“- Datenbasis

## II.4.2 AP 2: Datenverständnis, Datenvorverarbeitung und Erstellung eines Datenmodells für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte

Aufgrund der Umweltrelevanz, sind die zwei wichtigsten Punkte für die Stoffstrombilanzierung die Ermittlung der zu erwartenden Kältemittelmasse im Kältekreislauf der Stufe 1 sowie die zu erwartende im Schaum enthaltende Treibmittelmasse für die Stufe 2.

Eine geschlossene Bilanzierung für die Kältemittel aus Stufe 1 erscheint möglich, da auf den Typenschildern die Füllmengen der Kältekreisläufe explizit ausgewiesen sind. Die Typenschilder sind jedoch bei 90% der Geräte innenliegend und oftmals im Rahmen der Nutzung entfernt, beschädigt bzw. nicht lesbar.

Eine geschlossene Bilanzierung für die Treibmittel aus Stufe 2 ist nicht möglich, weil keine Information über die eingesetzte Treibmittelmenge bekannt ist.

Aus diesen Gründen enthält die DIN EN 50625-2-3 länderspezifische, empirische Werte für geräteklassenspezifische Kälte- und Treibmittelmengen. Mit Kenntnis der Geräteklasse und darüber hinaus der Kälte- und Treibmittelart können die Eingangsmengen abgeschätzt werden.

Darüber hinaus gibt es noch weitere Einzelbauteile mit hoher Umweltrelevanz, wie z.B. Quecksilberschalter und PCB-Kondensatoren. Ebenso sollten die enthaltenen Wertstoffe (z.B. Metalle) sowie sonstige Materialien zur Wiederverwertung (z.B. Öl), zur thermischen Verwertung (z.B. PUR-Schaum) oder zur Entsorgung (z.B. Stäube, Schadstoffe) erfasst werden.

Einige der erforderlichen Informationen können direkt am zu entsorgenden Altgerät erkannt werden, andere müssen erst aus Merkmalen des Gerätes abgeleitet werden. Es sind folglich geeignete, äußerlich erkennbare Attribute festzulegen, um die für die Stoffstrombilanzierung erforderlichen Eigenschaften zu ermitteln.

### Ermittlung der zu erfassenden Kühlgeräteattribute

Für die Stufe 1, in der der Kältemittelkreislauf entleert und der Kompressor entfernt wird, wurden folgende zu erfassende Attribute identifiziert:

- Vorhandensein eines Kompressors oder
- Beraubung von Kompressoren
- Vorhandensein zweier Kompressoren (bei Geräteklasse 2 oder Geräteklasse 3) oder
- Beraubung von Kompressoren
- KW-haltige Kältemittel im Kompressor oder
- FCKW, FKW oder HFKW-haltige Kältemittel im Kompressor

Für die Stufe 2, in der die Zerkleinerung des Korpus, die Weiterbehandlung der Ausgangsfraktionen sowie die Behandlung des Prozessgases erfolgen, sind folgende Attribute zu erfassen:

- Gerätevolumen bzw. Gerätedimensionen (L-B-H)
- Zusammenhang zwischen Gerätevolumen und den Geräteklassen 1, 2, 3 und 4
- Vorhandensein einer Gerätetür oder
- Fehlende Gerätetüren

Anhand der Ergebnisse des AP 1 wurde beschlossen, dass das Eingangserfassungssystem modular aufgebaut sein sollte, um eine separate (stufenweise) Datenerfassung für den Recyclingprozess von Stufe 1 (Verwertung Kältekreislauf) und Stufe 2 (Verwertung Korpus) durchführen zu können, auch vor dem Hintergrund, dass in einigen Anlagen nur Stufe 1 oder nur Stufe 2 betrieben wird.

### Datenmodell für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte

Für die Erfassung der als relevant identifizierten Kühlgeräteattribute wurden in enger Abstimmung mit den Anlagenbetreibern die konkret zu erfassenden Parameter bzw. die entsprechenden Hilfsgrößen (z.B. Gerätedimensionen für das Volumen) ermittelt. Um diese später in einer Datenbank abbilden zu können, wurde eine entsprechende Datenstruktur entwickelt. Diese lässt sich in Form eines UML-Klassendiagramms dargestellt (siehe Abbildung 4).

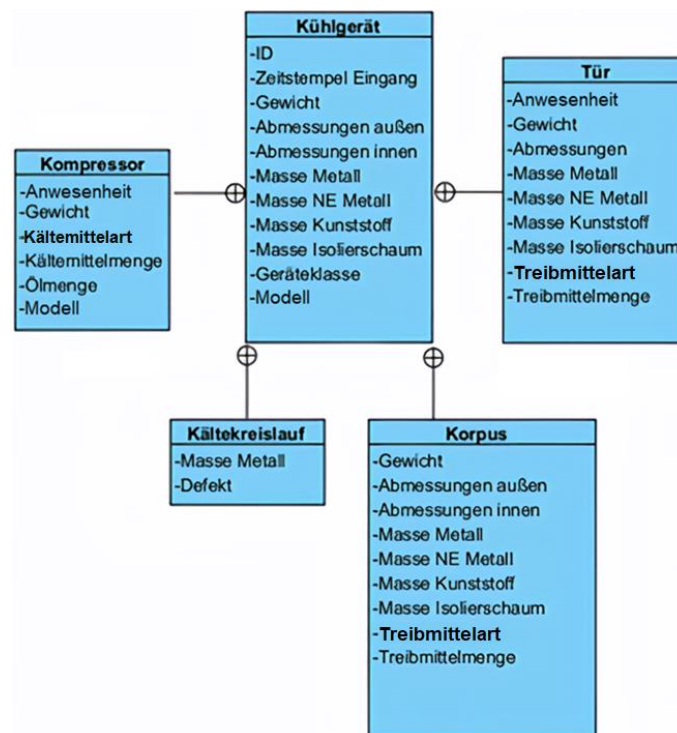


Abbildung 4 – Datenmodell für den digitalen Zwilling der Kühlgeräte

Für jedes Attribut wurde eine angestrebte Art der Datengewinnung zugeordnet. Dazu gehören insbesondere die Erfassung mithilfe von Messgeräten, die Ableitung von Erwartungswerten nach DIN EN 50625, das optische Ablesen der Informationen mithilfe von optischer Texterkennung (OCR) und Deep Learning sowie die Abschätzung mithilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens. Eine tabellarische Übersicht dieser Zuordnung ist in der Ergebnisbeschreibung des AP 5 zu finden.

In den angewendeten Normen zur Bilanzierung werden Kategorisierungen in Geräteklassen vorgegeben, die sich zum einen an der Größe der Geräte und an der Art (Kühlgerät, Gefriertruhe, Kombi) orientieren. Für diese Geräteklassen gibt es Erwartungswerte für die im Schaum enthaltenen Treibmittel und für die zu erwartete Kältemittelmasse. Die Kältemittelmasse ist zusätzlich noch von der Intaktheit des Kältekreislaufes und von dem Vorhandensein und der Anzahl der Kompressoren abhängig. Die Zusammenhänge zwischen den zu ermittelnden Attributen und den Erwartungsparametern sind in Abbildung 5 dargestellt.

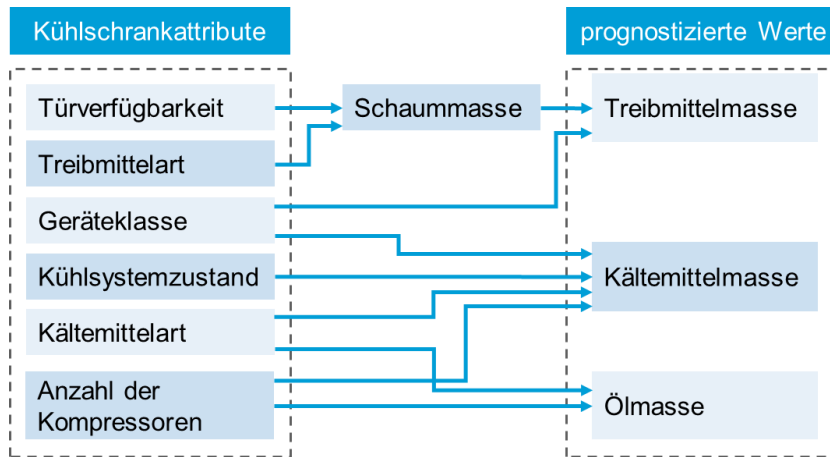


Abbildung 5 - Kühlschrankattribute für die Prognose der Stoffmengen

Bei der Erfassung dieser Attribute für das Datenmodell ist hervorzuheben, dass die bestehenden Anlagen die erforderlichen digitalen Schnittstellen aufweisen müssen. Diese Attribute sind in Tabelle 1 nach den zuvor genannten Ebenen unterteilt.

Bei der Verfügbarkeit vorhandener Schnittstellen zur Verknüpfung mit der digitalen Eingangserfassung ergibt sich daraus, dass für einige Attribute eine Mess- bzw. Detektionsmethode über Hilfsgrößen zur digitalen Erfassung entwickelt werden muss. Zum Beispiel kann die Geräteklasse nicht über eine Schnittstelle direkt registriert werden.

Bei den Attributen mit vorhandener Schnittstelle ist lediglich eine Einbindung bzw. Verknüpfung des entsprechenden Signals zum Prototypen erforderlich. Zum Beispiel könnte für die Unterscheidung intakt/nicht intakt des Kältekreislaufes an die Druckmessung beim Ansteuern des Kreislaufes eine entsprechende Datenschnittstelle angebunden werden (Abbildung 7).

Tabelle 1 – Erforderliche digitale Schnittstellen für die Erfassung von Kühlschrankattributen

Stufe	Attribut	Merkmal	Voraussetzung
Stufe 1	Kühlsystemzustand	intakt / defekt	Schnittstelle an der Absauganlage
	Kältemittelmenge	Gewicht (kg)	Schnittstelle zur Waage unter dem Flüssigkeitsbehälter
	Ölmenge	Gewicht (kg)	Schnittstelle zur Waage unter dem Flüssigkeitsbehälter
Stufe 2	Treibmittelmenge	Gewicht (kg)	Schnittstelle zur Waage unter dem Flüssigkeitsbehälter
	Treibmittelart	VFC / VHC	Schnittstelle zum Chromatograph falls vorhanden

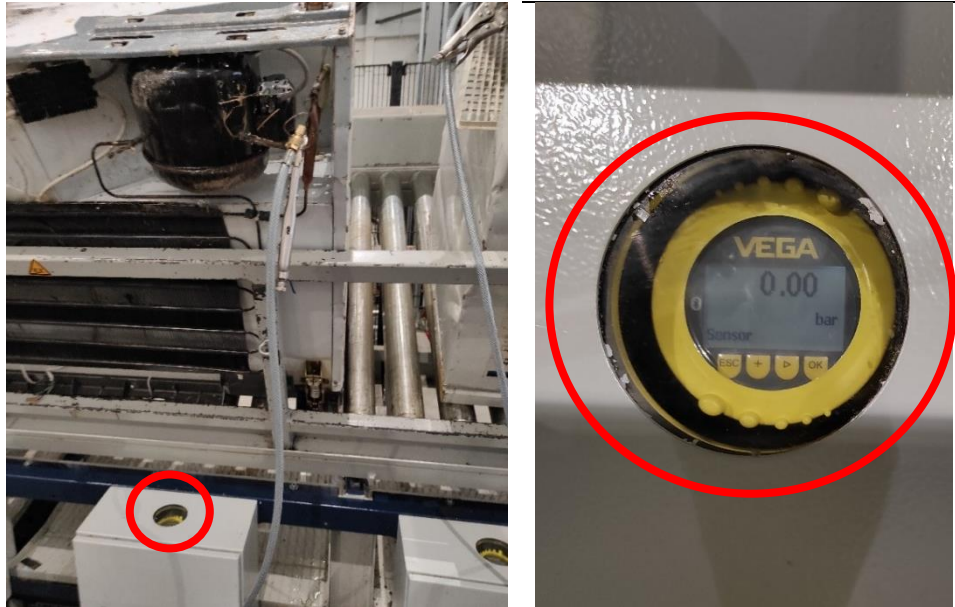


Abbildung 6. Links: Angestochenes Kühlgerät zur Trockenlegung des Kältekreislaufs durch Absaugung des Kältemittel-/Öl-Gemisches. Rechts: Detailaufnahme eines digitalen Manometers zur Beurteilung des Druckzustandes des Kältekreislaufes.

### Statistische Datenanalyse

Die im AP 1 gesammelte Datenbasis wurde auszugsweise zwecks Datenverständnis explorativ analysiert. Dafür wurden die recyclingrelevanten Eigenschaften der erfassten Kühlgeräte statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die explorative Analyse hat die Vielfalt der möglichen Zustände zu entsorgender Kühlgeräte auf den Recyclinglinien bestätigt.

Tabelle 2 – Ergebnisse der explorativen Datenanalyse

Merkmal	Ausprägung	Anteil
Anzahl eingebauter Kompressoren	0	1%
	1	98%
	2	1%
Lesbarkeit/ Vorhandensein von Kompressoraufliegern	Ja	79%
	Nein	21%
Lesbarkeit/ Vorhandensein von Typenschildern	Ja	94%
	Nein	6%
Vorhandensein von isolierten Türen	Ja	81%
	Nein	19%
Kältemittelart	R600a	64%
	R134a	30%
	R12	6%
Treibmittelart	Pentan	57%
	FCKW oder unbestimmt	43%
Gerätetyp	Kühlschrank	65%
	Kombigerät	20%
	Kühltruhe	13%
	Gewerblich	2%

Weitere wichtige Erkenntnisse ergaben sich aus der Analyse der Außenabmessungen der Kühlgeräte und ihrer Korrelation mit den zu ermittelnden Attributen. In Abbildung 7 ist eine dreidimensionale Darstellung der Außenabmessungen der erfassten Kühlgeräte zu sehen (alle Werte in cm, jeder Datenpunkt entspricht einem Kühlschrank). Die tatsächlichen Geräteklassen, die anhand des Nettovolumens und des Gerätetyps zu ermitteln sind, sind nach der Norm DIN EN 50625 farblich kodiert. Es ist zu erkennen, dass insgesamt eine gute Trennung der Geräteklassen anhand der Außenabmessungen möglich ist. Eine Ausnahme bildet eine Überlappung bestimmter Geräte von Klassen 1 und 3, deren Unterscheidung schwierig ist, da die äußeren Dimensionen vergleichbar sind. Diese Beobachtung entspricht dem Aufbau der industriell verwendeten Norm, die je nach Gerätetyp (einfacher Kühlschrank oder Kühltruhe) Geräte von gleichen Nettovolumina in verschiedene Klassen (1 oder 3) zuordnet.

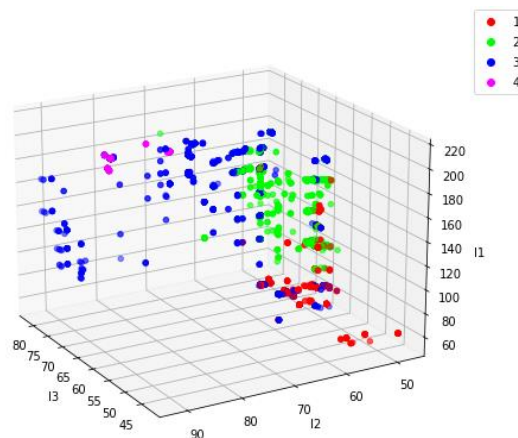


Abbildung 7 – Verteilung der Außenmaße der erfassten Kühlgeräte und Klassenzuordnung (farbliche Kodierung)

Eine weitere Korrelationsanalyse zwischen den aufgezeichneten Merkmalen zeigte, dass die Korrelation zwischen Netto- und Außenvolumina großer Kühlgeräte schwächer ist als bei kleinen Geräten. Dies ist wichtig, da das Nettovolumen letztendlich von der Norm als Klassifizierungsmerkmal verwendet wird, vgl. Abbildung 8. Die Klassenzuordnung anhand der einfachen linearen Regression des Nettovolumens mit dem Außenvolumen wurde im späteren Projektverlauf mit der Vorhersage der Geräteklasse anhand von drei Außenmaßen verglichen. Trotz ähnlicher Zuordnungsgenauigkeit der beiden Methoden wurde die Vorhersage anhand der drei Außenmaße weiterverfolgt, da die letztere Methode in der Zukunft theoretisch in der Lage sein wird, mit dem wachsendem Datenbestand einzelne wiederkehrende Kühlschrankmodelle anhand ihrer Außenmaße wiederzuerkennen. Die Verwendung dieser Daten wird näher im AP 5 unter Punkt 2 erläutert.

Die anfangs vermuteten Zusammenhänge zwischen den spezifischen Abmessungen der Kühlgeräte und den enthaltenen Kälte- oder Treibmittelarten konnten mit der explorativen Datenanalyse nicht bestätigt werden. Für die Unterscheidung der Kälte- und Treibmittelarten muss daher entweder auf bildbasierte Erkennung der Markierungen oder auf chemische Analytik zurückgegriffen werden.

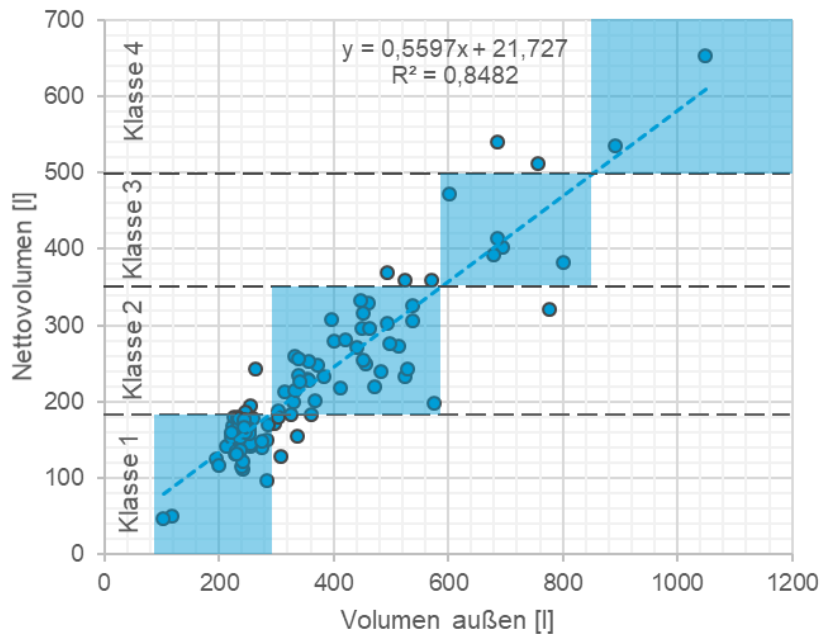


Abbildung 8 - Korrelation zwischen Außenabmessungen und Nettovolumen

Um die Beseitigung bestehender Digitalisierungslücken zielgerichtet anzugehen, wurden alle für die Prognose erforderlichen Kühlschrankattribute zusammengefasst, die nicht direkt digital erfasst werden könnten oder für die keine Sensoren bzw. Schnittstellen in den Anlagen vorhanden sind. Diese Attribute sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 – Kühlschrankattribute ohne digitale Erfassungsmethoden

Kühlschrankattribut	Bezeichnung in der Datenbank
Türverfügbarkeit	fridge_door
Geräteklasse (basierend auf den Korpusmaßen)	fridge_depth; fridge_height; fridge_width;
Kältemittelart	fridge_coolant
Anzahl der Kompressoren	fridge_comp1; fridge_comp2

Ein relationales Datenbankmodell zur Speicherung von Daten der oben benannten Kühlschrankattribute wurde entwickelt und implementiert. Eine Visualisierung des Datenbankmodells ist in Abbildung 9 dargestellt.

The screenshot shows a Grafana interface displaying a table view of data from a database. The table has the following columns: Time, fridge\_id, fridge\_comp1, fridge\_comp2, fridge\_door, fridge\_depth, fridge\_height, and fridge\_width. The data is as follows:

Time	fridge_id	fridge_comp1	fridge_comp2	fridge_door	fridge_depth	fridge_height	fridge_width
2022-06-29 14:47:45	12352	1	1	true	33	59	35
2022-06-29 15:03:21	12353	1	1	false	30	46	34
2022-06-29 16:28:03	12354	1	1	false	30	56	36
2022-06-29 16:28:16	12355	1	1	false	28	58	36
2022-06-29 16:31:26	12356	1	1	false	29	41	36
2022-06-29 16:32:42	12357	1	1	true	28	46	36
2022-07-07 11:15:25	12358	1	1	false	34	42	28
2022-07-11 11:29:17	12359	1	1	true	32	58	34
2022-07-11 11:29:57	12360	1	1	false	30	59	34

Abbildung 9 - Datenbankvisualisierung in der grafischen Umgebung von Software Grafana

### II.4.3 AP 3 Entwicklung und Bau einer modularen Eingangserfassung & AP 4 Inbetriebnahme und Test

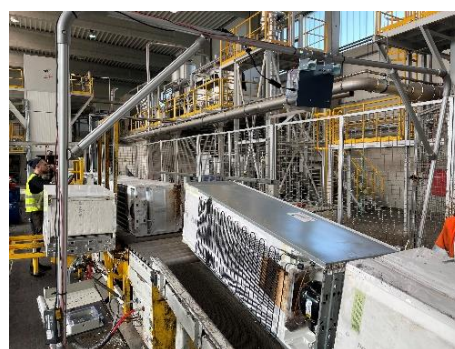
Der Aufbau einer modularen Eingangserfassung wurde stufenweise durchgeführt, um schrittweise die Funktionalität einzelner Systeme untersuchen zu können.

Es wurde ein Aufbau zur Auswahl geeigneter Sensoren sowie zur Verknüpfung untereinander und mit den Datenbanken bei RIF im Technikum als Mock-Up erstellt. Es wurden Untersuchungen der Funktionalitäten mit unterschiedlichen Sensoren und Kameras bei den Praxispartnern durchgeführt. Aufbauend darauf wurde ein Demonstrator für Funktionstests mit einem entsprechendem Rollenband bei RIF erstellt und betrieben, um vor allem das Anlernen der Sensoren, die Datenübertragbarkeit sowie die –verarbeitung zu untersuchen. Von den Industriepartnern URT und Aprotect wurde gemeinsam mit IUTA ein Demonstrator-Testsystem realisiert, das durch eine höhere mechanische Stabilität und eine hohe Flexibilität gekennzeichnet ist.

Die verschiedenen Entwicklungsstufen der Testsysteme sind in Abbildung 10 zu erkennen. Im Folgenden werden die einzelnen Entwicklungsstufen sowie die Ergebnisse der jeweiligen Untersuchungen beschrieben.



a) Mock-Up



b) Testsystem



c) Demonstrator für Funktionstests



d) Demonstrator-Testsystem

Abbildung 10 – Entwicklungsstufen der prototypischen Eingangserfassung

### Mock-Up und Einzelkomponenten

Im ersten Schritt ein miniaturisierter Mock-Up im Labor aufgebaut, um die Funktionalität der künftigen modularen Erfassung der eingehenden Kühlschränke gebündelt zu untersuchen. Dieser diente als Entwurf der Hardware- und Softwarearchitektur. Verfügbare kostengünstige Sensoren, Elektronikkomponenten und Recheneinheiten wurden zu einem minimalen funktionalen Erfassungssystem verknüpft (siehe Abbildung 11).

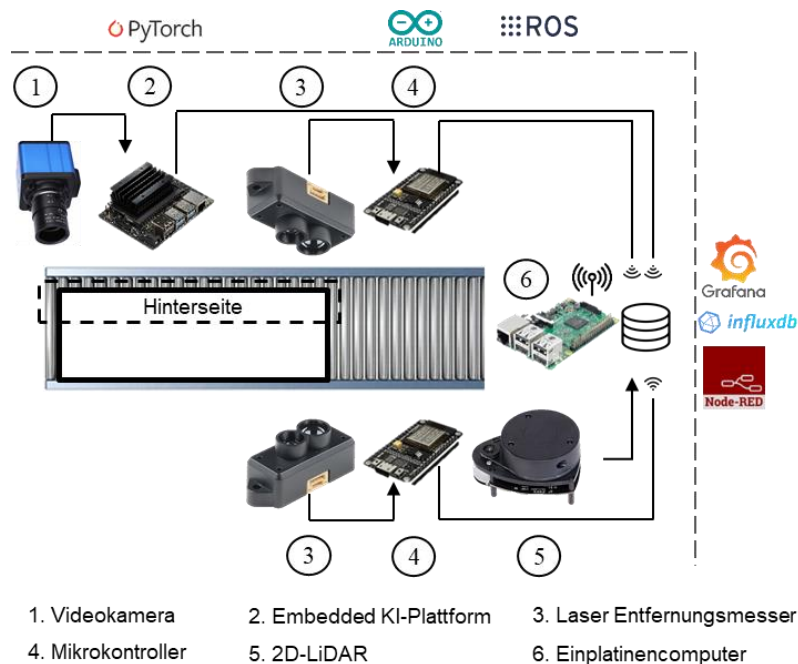


Abbildung 11 – miniaturisiertes Mock-Up für die Eingangserfassung

Es wurden verschiedene, mögliche einzusetzende Sensoren für die digitale Erfassung der relevanten Kühlschrankattribute analysiert und die vielversprechendsten ausgewählt (siehe Tabelle 4). Für die Erfassung der Kühlgerätedimensionen sowie die Türverfügbarkeit zeigten sich optische Sensoren zur Entfernungsmessung als am besten geeignet. (Laserentfernungsmesser, 2D-LiDAR-Sensor).

Für die Ermittlung der Kältemittelart sowie der Anzahl und Vorhandensein von Kompressoren wurde eine Bilderkennung mittels geeigneter Kamera eingebaut. Dort wurden mehrere mögliche Systeme untersucht.

Die mit diesen Sensoren realisierbare, optische Erfassung bietet den Vorteil, dass eine berührungslose Messung möglich ist, die ohne direkten Eingriff in die Transportmimik der

Recyclinglinien, auch an bestehenden Anlagen, bei entsprechender Platzverfügbarkeit angeflanscht werden könnte.

Tabelle 4 – Sensoren des Eingangserfassungsprototyps

Kühlschrankattribut	Gerätetyp	Gerätebezeichnung
Türverfügbarkeit	2D-LiDAR-Sensor	RPLidar A1M8
Geräteklasse (Kühlschrankabmessungen)	2D-LiDAR-Sensor, Laserentfernungsmesser	Benewake TFMini-S
Kältemittelart	Kamera	ELP-USB8MP02G-SFV
Anzahl der Kompressoren	Kamera	ELP-USB8MP02G-SFV

Weiterhin wurden die erforderlichen Geräte für die Datenverarbeitung und den Datenaustausch recherchiert und ausgewählt (siehe Tabelle 5). Die Daten aller Sensoren werden auf dem Einplatinencomputer über eine drahtlose WLAN-Verbindung zusammengeführt. Diese drahtlose Kommunikation vermeidet eine physische Verbindung, sodass die einzelnen Module weit voneinander entfernt sein können. Dies ermöglicht eine räumlich getrennte sowie modulare Datenerfassung für Stufe 1 und Stufe 2. Als zentrales Hardwareelement des Systems wurde ein Raspberry Pi-Einplatinencomputer als geeignete Hardware identifiziert. Diese ist im Einkaufspreis günstig, maximal flexibel und wird auch zunehmend von professionellen Unternehmen als Hardwarekomponente für Datenübertragungsaufgaben eingesetzt. Dieses Board sammelt alle Daten und stellt sie dem Benutzer über ein informatives Dashboard zur Verfügung.

Drei Benewake Laserentfernungsmesser werden verwendet, um die Tiefe und die Breite der ankommenden Kühlgeräte zu bestimmen. Die Erfassung, Analyse und Weiterleitung der Daten von diesen Sensoren an den Raspberry Pi erfolgt mittels ESP32-Mikrocontrollern. Ein 2D-LiDAR-Sensor ist direkt mit dem Raspberry Pi verbunden, um die Höhe des Kühlgeräts zu messen und um zu prüfen, ob Türen vorhanden sind. Visuelle Daten werden über Kameras erfasst und auf einer KI-Computing Plattform, z.B. Edge Device Nvidia Jetson Orin NX, verarbeitet.

Tabelle 5 - Geräte für die Datenverarbeitung und den Datenaustausch des Prototyps

Funktion	Gerätetyp	Gerätebezeichnung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verarbeiten von Daten von dem Laserentfernungsmesser</li> <li>• Senden der Messergebnisse (Korpusbreite und -tiefe) an den Einplatinencomputer</li> </ul>	Mikrokontroller	Espressif ESP32
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verarbeiten von Videodaten von Kameras</li> <li>• Senden der Ergebnisse (Kältemittelart und Anzahl der Kompressoren) an den Einplatinencomputer</li> </ul>	Edge-Computing-Gerät	z.B. Nvidia Jetson Nano oder Jetson Orin NX (verbesserte Funktionalität)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenverarbeitung von 2D-LiDAR-Messwerten (Korpushöhe und Türverfügbarkeit)</li> <li>• Aggregation und Speicherung der Daten von anderen Geräten (Mikrokontroller und Embedded KI-Plattform) in der Datenbank</li> <li>• Anwendung von Modellen zur Prognose der Stoffsammelmengen</li> </ul>	Einplatinencomputer	Raspberry Pi 4

Der letzte Auswahlschritt betraf Softwarelösungen entsprechend der im Vorfeld identifizierten Funktionen der Eingangserfassung (siehe Tabelle 6). Mehrere mögliche Systeme wurde in Betracht gezogen. Im Projekt wurde die grafische Open-Source-Entwicklungsumgebung für IoT-Automatisierung „Node-RED“ als geeignete Software-Lösung ausgewählt.

Die Messergebnisse aller Lasersensoren sowie die Ergebnisse der Bildverarbeitung auf dem Jetson Orin NX-Gerät werden in einer laufenden Instanz von Node-RED zusammengefasst.

Tabelle 6 - Softwarelösungen des Eingangserfassungsprototyps

Identifizierte / Erforderliche Funktion zur Eingangserfassung	Ausgewählte Softwarelösung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vernetzung der Geräte, Datenaggregation und -verarbeitung</li> <li>• Eintrag der Kühltankschrankattribute in die InfluxDB-Datenbank</li> </ul>	NodeRED
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenspeicherung</li> </ul>	InfluxDB
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenvisualisierung</li> </ul>	Grafana
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verarbeitung und Übertragung von Daten aus Entfernungssensor</li> </ul>	Arduino IDE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkennung von Kompressoren und Kältemitteltypen</li> </ul>	PyTorch
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verarbeitung und Übertragung von Daten aus 2D-LiDAR-Sensor</li> </ul>	ROS

### Funktionstests im Anlagenbetrieb

Die unter Laborbedingungen verknüpften und getesteten Hardware- und Softwarekomponenten wurde auf eine andere mechanische Struktur übertragen und zu einem mobilen Testsystem zusammengefasst. Die Sensoren wurden dazu auf einem Leichtbaurahmen montiert, der an den realen Recyclinglinien schnell auf- und abgebaut werden konnte.

Die verschiedenen Funktionsprüfungen erfolgten bei dem Unterauftragnehmer Klink und bei dem während der Projektlaufzeit hinzugenommenen assoziiertem Partner Remondis. Bei Riwald erfolgte aufgrund der baulichen Gegebenheiten kein Vor-Ort-Test.

Bei diesen Tests wurde die korrekte Funktionsweise der Lasersensoren und Kameras an realen Kühlgeräten bestätigt. Die Abmessungen und das Türvorhandensein konnten erfasst werden. Es wurde ein erforderlicher Mindestabstand von 1,5 m auf dem Förderband ermittelt, damit die Geräte als eigenständige Geräte erfasst werden können. Diese Vorgabe zeigte in den ausgewählten Praxisanlagen keinen Einfluss auf den Vertriebsablauf. Die Verarbeitung der Geräte erfolgte in der üblichen Geschwindigkeit.

Die von RIF entwickelte, KI-basierte Objekterkennung (Prototyp) wurde erprobt und zeigte vielversprechende Ergebnisse mit ca. 80% Erkennungsgenauigkeit der Kompressoren an der Kühlgeräterückseite.

Die Erfahrungen mit dem mobilen Erfassungssystem bewiesen die Funktionalität der entwickelten Sensoren und der KI-Modelle zur Extraktion notwendiger Daten für den digitalen Zwilling der eingehenden Kühlgeräte.

Für die weiteren Untersuchungen wurden bei diesen Tests konkrete weiterführende Fragestellungen eruiert, wie z.B. Kameraposition und Notwendigkeit externer Beleuchtungsquellen, Fehlerminimierung in der Abgrenzung einzelner Kühlgeräte durch optimierte Positionierung der Sensoren sowie Positionierungsvorgaben für die Kühlgeräte.

### Demonstratoraufbau zur Validierung der Sensoren und der Datenerfassung

Die während der Anlagenläufe eruierten weitergehenden Fragestellungen wurden in einer Laborumgebung untersucht und dienten dazu, die KI-Modelle zu verfeinern. Am RIF wurde dazu ein Aufbau mit einer Rollenbahn installiert, in dem die Erfassung von Kühlgeräten unter definierten Bedingungen nachgestellt werden konnte. Dieser wurde vor allem genutzt, um die unter AP 5 dargestellten Untersuchungen durchzuführen. An diesem Aufbau war es u.a. möglich, definierte Beleuchtungskonzepte zu untersuchen oder Aussagen zu minimalen und maximalen Abständen sowie die Limitierungen z.B. Übergrößen bei Geräten oder unleserliche Aufschriften zu identifizieren.

### Konstruktion eines flexiblen Demonstratoraufbaus

Die besondere Herausforderung für einen Demonstratoraufbau waren die extrem unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Kühlgeräteentsorgungsanlagen, insbesondere hinsichtlich der anwendungsspezifischen Software für Anlagensteuerungen sowie Datenerfassung und –auswertung, des verfügbaren Platzes und der Breite und Höhe der Transportlinien. Der physikalische Versuchsaufbau sollte möglichst flexibel in Breite und Höhe sein und trotzdem eine hohe mechanische Stabilität aufweisen.

Daher wurde der Aufbau mit Aluprofilen realisiert. Der Demonstratoraufbau wurde so konzipiert, dass zwei Alustreben parallel aufgebaut wurden, um für die Installation von Sensoren und Hardwarekomponenten maximal flexibel zu sein. Die Stabilität des Aufbaus wurde durch eine diagonale Verstärkung jeweils an den oberen Ecken und den Fußkonstruktionen erreicht. Die Füße sind mit Gewinden versehen, so dass unebene Böden ausgeglichen werden können.

Der exemplarische Demonstratoraufbau ist so konstruiert, dass eine Breite zwischen 2 und 3,5 m als Abstand eingestellt werden kann. Das lässt sich dadurch realisieren, dass jeweils zwei gegeneinander verschiebbare Aluprofile miteinander befestigt sind. Die Befestigungsschienen können leicht gelöst und der Versuchsaufbau flexibel in seiner Breite verändert und anschließend wieder befestigt werden.

Im Vergleich zu dem mobilen Testsystem wurden teilweise die in den Praxistests bewährten Sensoren sowie teilweise angepasste Komponenten ausgewählt. Die Anlage ist mit zusätzlicher Sensorik erweiterbar.

Der Funktionstest erfolgte im Technikum des IUTA und wurde erfolgreich durchgeführt. Die Funktion der Datenerfassungssysteme zur Erkennung der Kühlgerätedimensionen, zur Erkennung des Türvorhandenseins sowie zur Kompressor- und Treibmittelerkennung wurde nachgewiesen. Die Übergabeschnittstelle bildet eine entsprechende Datenbank. Die

automatische Eingruppierung in FCKW- und HKW-Geräte sowie die Klassierung in die entsprechende Kategorie wurde gezeigt.

#### II.4.4 AP 5 Prognosemodellierung und Konzeption adaptiver Steuerung

Das Ziel von AP 5 war die Entwicklung der Klassifikations- und Regressionsmodelle sowie Objekterkennungsalgorithmen zur Ermittlung der genormten Zielwerte der Stoffmengen. Diese Arbeiten haben eine enge zeitliche und inhaltliche Verknüpfung zu den Arbeiten in AP 2.

Zusätzlich wurden Konzepte zur adaptiven Steuerung für verschiedene Technologien zur Prozessgasbehandlung erarbeitet.

##### Prognosemodellierung

Für die Strukturierung der Modelle und für deren Bewertung wurde eine Matrix erstellt, in der direkt erfassbare Daten mit den für die Abschätzung von Kälte- und Treibmittelmassen erforderlichen Attributen in eine Beziehung gesetzt werden (siehe

Tabelle 7).

*Tabelle 7 - Matrix zur Modellerstellung. Leere Felder stehen für nicht vorhandene, nicht im laufenden Betrieb zu erfassende oder redundante Zusammenhänge.*

		Inputdaten			
		Vorderseite Laserscan	Hinterseite Bild	Kompressor Bild	Abmessungen außen
<b>Vorhersage / Detektion</b>	Tür vorhanden ja/nein	<b>1</b>			
	Geräteklasse nach DIN EN 50625-2-3				<b>2</b>
	Kältemittelart			<b>3</b>	
	Treibmittelart		<b>4</b>		
	Treibmittelmenge				<b>5</b>
	Kompressordetektion		<b>6</b>		

Im Folgenden sind die einzelnen zielführenden und umgesetzten Datenerfassungsmethoden in Bezug auf die nummerierten Felder der Matrix erläutert. Es wurden zahlreiche andere Kombinationen von Rohdatenquellen und zu ermittelnden Informationstypen erprobt, wurden hier aber aus Platzgründen nicht aufgeführt, da sie keine nützlichen Zusammenhänge ergaben. Für mehr Details wird an dieser Stelle auf die Zwischenberichte (ZB 22 Teilprojekt RIF) verwiesen.

**Punkt 1:** Ob Türen an den Kühlschränken vorhanden sind, beeinflusst die erwartete Schaumstoff- und Treibmittelmenge eines Kühlschranks und lässt sich anhand der Laserscandaten von einem 2D-LiDAR-Sensor zuverlässig ermitteln. Dazu wird die horizontale Ebene gescannt und eine Punktwolke vermessen (siehe Abbildung 12). Innerhalb des von dem Endanwender festzulegenden Scanbereichs auf dem Förderband (blau umrandeter Bereich) werden die Punkte analysiert. Falls der Distanzunterschied zwischen zwei benachbarten Reflexionspunkten im Uhrzeigersinn 1 m übersteigt, entsprechen solche Punkte den Ecken des Kühlschranks, der vor dem Laserscanner liegt. Im nächsten Schritt werden die Punkte zwischen den Eckpunkten analysiert. Sollte der mittlere Abstand der inneren Punkte mehr als 15 cm weiter vom Laserscanner liegen als der mittlere Abstand von den Eckpunkten zum Laserscanner, deutet das auf die Abwesenheit der Türen hin. Im Rahmen aller praktischen Versuche an Recyclinglinien hat diese Regel richtige Ergebnisse geliefert, solange sichergestellt wird, dass sich nur ein Kühlschrank gleichzeitig im blauen Scanbereich befindet. Im Verlauf des Projekts wurden auch rein bildbasierte Methoden der KI erprobt, um Bildaufnahmen binär als „mit Tür“ und „ohne Tür“ zu klassifizieren, allerdings waren die Ergebnisse nicht zuverlässig, sodass die laserbasierte Methode aufgrund ihrer Einfachheit und geringerem Datenbedarf bevorzugt wurde.

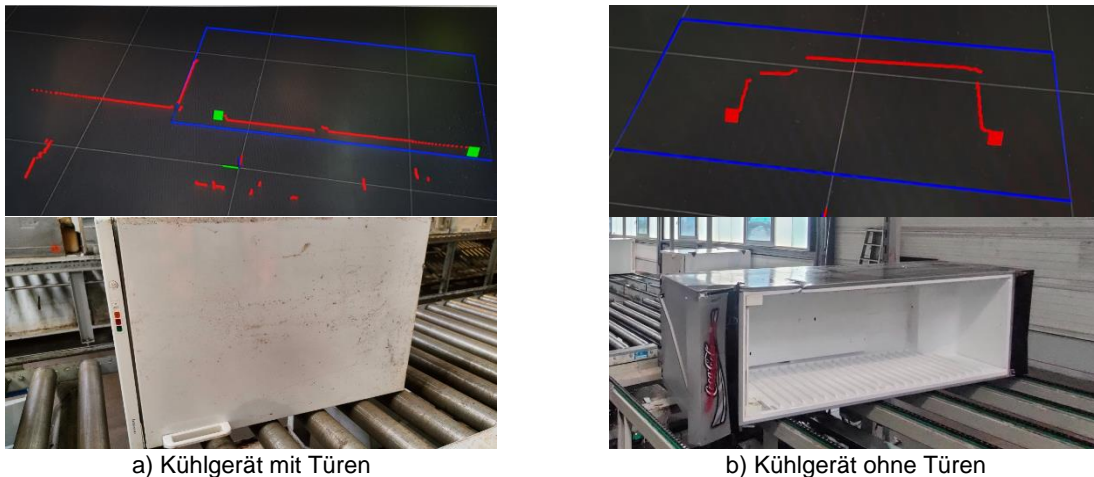


Abbildung 12 - 2D-LiDAR-Punktwolke, die die innere Geometrie eines Kühlschranks abbildet. (a): Die Tür ist vorhanden (erkennbar an der geraden Scanlinie zwischen den grünen Punkten); (b): Die Tür fehlt (rote Punkte entsprechen innerer Kühlschrankgeometrie).

**Punkt 2:** Die Außenabmessungen der Kühlschränke stellen eine leicht zu erfassende Datenquelle für digitale Zwillinge der Kühlgeräte dar. Wie in der Ergebnisbeschreibung des AP 2 dargestellt, können die Geräte anhand der drei Außenmaße in die Geräteklassen entsprechend der Norm eingruppiert werden, was zur Ermittlung der Sollwerte für die Stoffmassen genutzt werden kann. Die durchschnittliche Genauigkeit der Klassenzuordnung einzelner Geräte betrug mit der besten KI-Methode k-Nearest-Neighbors (kNN) 80,1% (siehe Abbildung 13). Die Daten wurden über die innerhalb einer Arbeitsschicht (8 h) aufgenommenen Werte aggregiert. Anhand der KI-Vorhersagen mit kNN wurde lediglich eine Abweichung von 4,4% von der tatsächlich gesammelten Stoffmenge festgestellt (aggregierte KI-Vorhersagen: 60,37 kg Treibmittel pro Schicht, Ist-Sammelmenge: 63,00 kg Treibmittel pro Schicht). Der Grund für die bessere Genauigkeit im Endergebnis liegt darin, dass die Fehlzugeordnungen durch das KI-Modell sich teilweise kompensieren. So führt z.B. eine Fehlzugeordnung einer wahren Klasse 1 als Klasse 3 zu einer höheren erwarteten Schaum- und Treibmittelmasse, und umgekehrt. Eine beispielhafte Aufteilung der richtigen und falschen Zuordnungen ist in der Abbildung 14 in Form einer Konfusionsmatrix dargestellt.

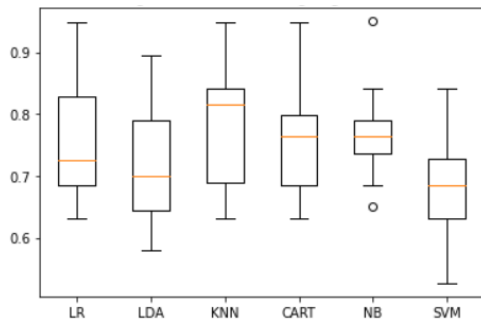


Abbildung 13 - Vergleich der Genauigkeit verschiedener Zuordnungsalgorithmen

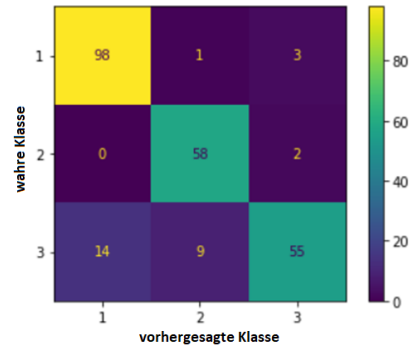


Abbildung 14 - Konfusionsmatrix für kNN-Algorithmus

Dabei ist wichtig zu beachten, dass die erwartete Treibmittelmenge von der Treibmittelart abhängig ist, sodass für die normgerechte Ermittlung der erwarteten Treibmittelmenge neben der Geräteklasse auch die Treibmittelart des vermessenen Geräts bekannt sein muss. Die obige quantitative Evaluierung wurde unter Verwendung der durch Experten aufgeschriebenen Treibmittelarten der analysierten Geräte durchgeführt.

Die berührungslose Ermittlung der Treibmittelart ist mit den erprobten existierenden Methoden der Text- und Objekterkennung nicht immer möglich, da stets Vorhandensein, sehr gute Sichtbarkeit und ausreichende Größe der Treibmittelbeschriftungen gewährleistet sein müssen (siehe Punkt 4). Eine zuverlässige Erfassung der Treibmittelart ist eine Voraussetzung für die Verwendung der beschriebenen Methode zur Geräteklassenzuordnung und der Ableitung der zu erwartenden Stoffmengen.

Trotz interessanter Erkenntnisse bei der Klassenzuordnung anhand der Außenmaße bleiben die Möglichkeiten dieser Methode grundsätzlich beschränkt. Insbesondere lassen sich baugleiche Kühlschränke und Truhen nicht ohne Kenntnisse über spezielle Bedienelemente oder schwer zugängliche Beschriftungen am Gerät voneinander unterscheiden. Die große Variantenvielfalt der zu entsorgenden Kühlgeräte stellt hier also weiterhin eine große Hürde für automatisierte Datenerfassung entsprechend der aktuell geltenden Norm DIN CLC/TS 50625-3-4 dar und sollte weitergehend untersucht werden. Alternativ könnten Kennzeichnungen auf den Geräten die Schwierigkeiten beseitigen.

**Punkt 3:** Im Konsortium wurde herausgearbeitet, dass die Kältemittelart verlässlich anhand der Warnzeichen W021 nach ISO 7010 („Flammenzeichen“) erkannt werden kann. Anhand des Warnzeichens kann auf die Verwendung von VHC-Kältemittel geschlossen werden. Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus zur automatischen Objektdetektion dieses Zeichens in einem Videostream entwickelt. Eine qualitative Bewertung unter Laborbedingungen zeigte eine stabile Erkennung bei Nahaufnahmen (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15 - Erkennung von Warnzeichen W021, die für das entflammbare VHC-Kältemittel repräsentativ sind

**Punkt 4:** Zur berührungslosen Erfassung der Treibmittelart wurde die Methode der optischen Texterkennung (OCR) anhand der Bilder der Kühlgeräterückseite erprobt (siehe Abbildung 16). Das maschinelle Lesen von Symbolen wurde mithilfe von Python-Bibliothek EasyOCR umgesetzt. Die generelle Machbarkeit der Methode ist gegeben, falls der Kältemittelkreislauf die Beschriftungen nicht bedeckt. Oftmals sind die entsprechenden Beschriftungen bei älteren Geräten nicht ausreichend groß oder nicht vorhanden, sodass für die zuverlässige Erfassung der Treibmittelart eine gasanalytische Messung bevorzugt werden sollte.

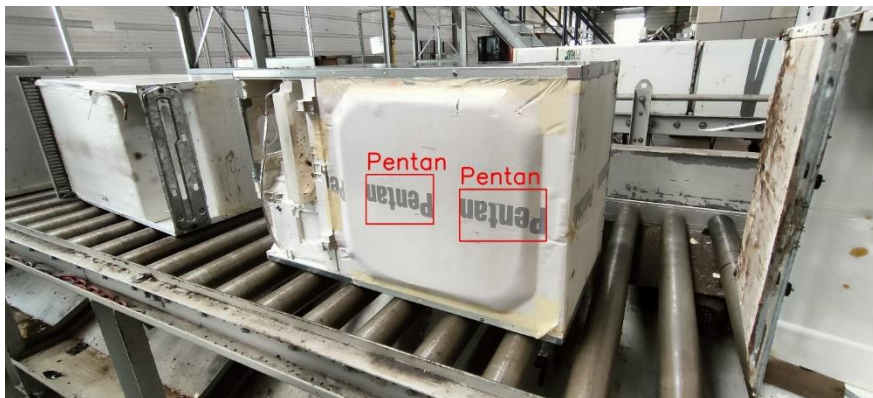


Abbildung 16 – OCR-Ablesung der Treibmittelart

**Punkt 5:** Die Vorhersage der Treibmittelmasse pro Kühlgerät folgt unmittelbar mit den in der Norm vorgegebenen Formeln bei bekannter Geräteklasse und Treibmittelart. Das Ergebnis ist entsprechend direkt unter Punkt 2 erläutert.

**Punkt 6:** Die Erkennung der Kompressoren im Videostream erfolgt durch ein YOLOv8-Modell welches anhand der gesammelten Kompressor-Bilder trainiert wurde. Insgesamt wurden mehrere Hundert qualitativ hochwertige Bilder als Trainingsdatensatz für einen kunden-spezifischen Objekterkennungsalgorithmus ausgewählt, der auf dem vortrainierten YOLOv8 basiert. Das trainierte Modell wurde auf dem Nvidia Jetson Orin NX installiert. Die Validierung wurde auf Videoaufnahmen von zwei laufenden Recyclinglinien durchgeführt, wobei die Kompressorerkennung bei einer vorkonfigurierten Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde

zufriedenstellend funktionierte (siehe Abbildung 17). Bei Tests an drei Kühlschränken unter definierten Bedingungen wurde das Modell ebenso erfolgreich auf Erkennungsstabilität der Kompressoren und der Flammenzeichen geprüft.

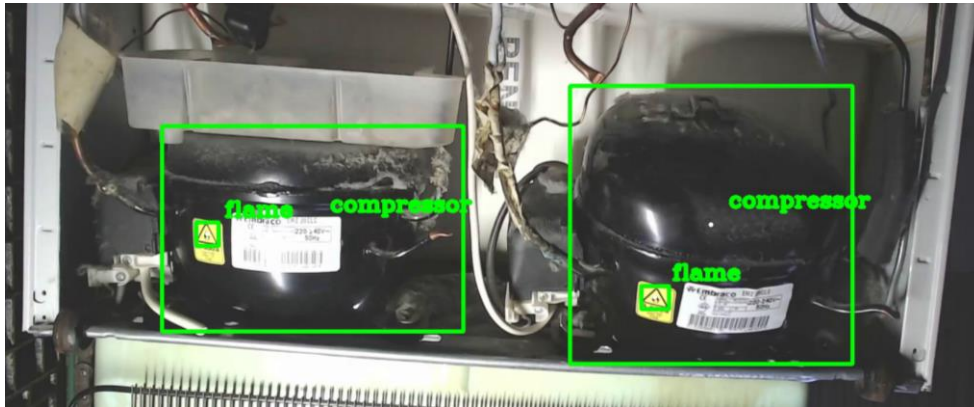


Abbildung 17 - Kompressor- und Flammenzeichenerkennung mittels YOLOv8-Modell

Die Ergebnisse der Prognosemodellierung zeigen, dass bisher nicht automatisiert erfasste Datenquellen erfolgreich für digitale Zwillinge zugänglich gemacht werden können, wenn geeignete Sensortechnik mit zielführenden Datenverarbeitungsmethoden (regelbasiert oder KI-basiert) kombiniert wird. Bei der Erfassung von Korpusdaten, die relevant für Prozesse der Stufe 2 in Bezug auf Schaumstoffmenge, Treibmittelmenge und Treibmittelart sind, konnten ausgewählte Attribute zuverlässig digitalisiert werden. Z.B. konnten die Vermessung des Geräts und die Türdetektion erfolgreich nachgewiesen werden. Die automatisierte normgerechte Zuordnung der Geräte in spezifische Klassen ist aufgrund der komplexen Struktur der Normungsvorschrift und aufgrund der beachtlichen Variantenvielfalt der Kühlgeräte weiterhin mit Schwierigkeiten verbunden. Mehr vielversprechende Ergebnisse wurden bei der Erfassung von Kompressordaten erzielt (Stufe 1: Anzahl Kompressoren, Kältemittelart).

#### Konzepte für die angepasste Prozesssteuerung

Von den Industriepartnern Aprotect und URT wurden durch Unterstützung von IUTA und dem assoziierten Partner Remondis die Anlagensteuerung der Prozessluftanlagen hinsichtlich möglicher Optimierungsansätze, Emissionsminderung und Energieeffizienz und Minimierung der Störanfälligkeit betrachtet. Die Konzepte wurden für die beiden aktuell auf dem Markt befindlichen Technologien, Aktivkohleadsorption und Kryogenkondensation, erarbeitet (siehe Abbildung 18).

Ein besonderes Augenmerk wurde bei diesen Betrachtungen auf das Abfangen von unvorhersehbaren Treibmittelkonzentrationsspitzen gelegt, die durch den inhomogenen Eingangsstrom plötzlich auftreten können.



Abbildung 18: Prozessgasbehandlungsanlagen - Adsorptionsanlage (links), Kryogeanlage (rechts)...

Es wurden Konzepte erarbeitet und geprüft, um die Beladung der Aktivkohlestufe auf Basis des Materialeingangs oder auf Basis von Rohgasmessungen abzuschätzen, um Adsorptions- und Desorptionsphasen unter Berücksichtigung der Einhaltung aller Emissionsgrenzwerte nicht zeitgesteuert, sondern beladungsgesteuert zu regeln.

Da zu erwarten ist, dass die Grenzwerte der Emissionen zukünftig abgesenkt werden, basierten die Arbeit auf der Auswertung der aktuell erreichten Prozessgasreinigungsleistung bei den vorhandenen Kundenanlagen. Eine entsprechende Recherche lieferte die notwendige Datenbasis für eine praxisnahe Auslegung. Die digitalen Schnittstellen waren an allen Praxisanlagen bereits vorhanden, es fehlten die Korrelationen und die Auswertungen und die Zusammenführung der Praxisdaten.

Aus analoger Motivation hat IUTA und der assoziierte Partner Remondis die alternative Technologie der kryogenen Kondensation untersucht.

Hier konnten keine Potenziale für Energieeffizienzsteigerungen identifiziert werden, da die untersuchten Anlagen keine Wirkungsgradreserven enthielten. Im Fall einer Absenkung des erlaubten Emissionsgrenzwertes müssten die Anlagen erweitert werden. Die Projektpartner haben deshalb Konzepte zur energieeffizienten Erweiterung der Anlagen durch das bedarfsgerechte Zuschalten von Polzeifiltereinheiten entwickelt.

Hierbei sollen adsorptiv arbeitende Zusatzfilter nachgeschaltet werden, wenn die Grenzwerte in Gefahr laufen, überschritten zu werden. Dazu werden die Messungen im gereinigten Prozessgas verwendet, um prognostische Halbstundenmittelwerte der Emission zu berechnen und anhand dieser Berechnungen die Anlage bedarfsgerecht zu erweitern siehe Abbildung 19.

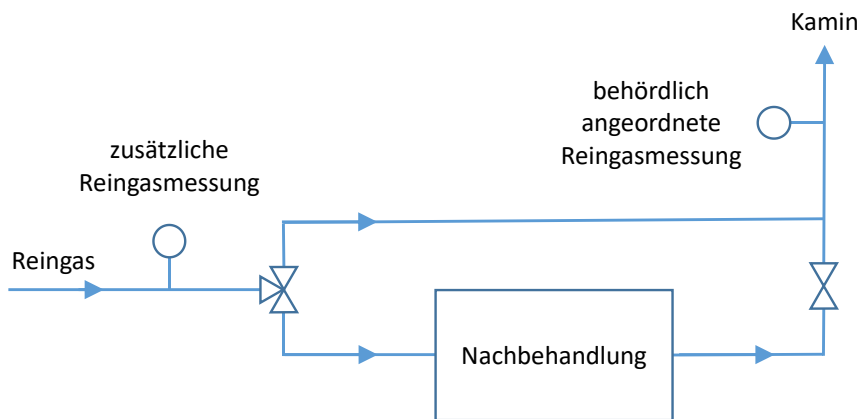


Abbildung 19: Messkonzept im Reingas für die bedarfsorientierte Zuschaltung zusätzlicher Filtereinheiten bei der Kryogenkondensation.

#### II.4.5 AP 6 Entwicklung der Datenbündelung und -Darstellung

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden alle deutschen Anlagenbetreiber kontaktiert und die Berichtspflichten sowohl gegenüber Behörden, als auch gegenüber Dritten abgefragt und analysiert.

Die wesentlichen Berichtspflichten sind von den Aufsichtsbehörden in den Genehmigungsunterlagen der Betreiber hinterlegt. Gemeinsamkeiten bei allen Anlagenbetreibern existieren bei hinterlegten Berichtspflichten gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz sowie als sogenannte Erstbehandlungsanlage durch die EAR. Variationen und alle weiteren Berichtspflichten erscheinen individuell und sind nicht zu verallgemeinern. Sowohl das Kreislaufwirtschaftsgesetz, als auch die EAR adressieren kalenderjährliche Zyklen. Beide Vorgaben sind ähnlich und erwarten Angaben von Durchsatzmassen getrennt nach Kategorie sowie Angaben über die Art der Verwertung (stoffliche Verwertung, energetische Verwertung oder Entsorgung) und über Exporte in das Ausland in Masse.

Als zweitwichtigster Stakeholder wurden von allen Anlagenbetreibern die aktuellen Gerätehersteller genannt, da diese nicht nur die Verarbeitung der Altgeräte bezahlen, sondern für die ordnungsgemäße Behandlung mit verantwortlich sind. Es ist deshalb üblich, dass hier verschiedene privatwirtschaftliche Auditierungssysteme eingesetzt werden. Die Vielfalt der daraus entstehenden Informationspflichten ist dennoch weder konfus noch unübersichtlich. Die Mehrzahl der Auftraggeber benennen die Inhalte und Vorgaben der DIN EN 50625-2-3 als die wesentliche Vorgabe für alle kontinuierlichen Betriebsbeschreibung und -berichte. Hier werden wöchentliche, monatliche, und dreimonatliche Zyklen für Berichtsangaben basierend auf der Anzahl der behandelten Stückzahlen erwartet. Auch die jährlichen Angaben über die Gesamtmassen im Ein- und Ausgang werden abgefragt, allerdings in analoger Weise zu den behördlichen Abfragen, so dass keine zusätzlichen Pflichten entstehen.

Für alle Informationspflichten oder -wünsche wurden geeignete Datenvorlagen erstellt und evaluiert.

Der Abgleich bzw. die Umrechnung der stückbezogenen Angaben zu den massenbezogenen Angaben stellt die größte Herausforderung für die zuverlässige und rückführbare Berichtserstellung dar. Dies ist aktuell nicht marktdeckend einheitlich umsetzbar.

Die Zyklen von Wochen-, Monats- oder Quartalsdauer stellen Anforderungen an die Abgrenzung von zum Beispiel nicht vollständig gefüllten Containern oder Behältern. Diese Problematik kann nicht durch digitale Instrumente, sondern nur organisatorisch gelöst werden.

#### Erarbeitung einer zusätzlichen manuellen Eingabemaske

Zusätzlich zu der sensorischen Datenerfassung ist es erforderlich, dass eine manuelle Eingabe erfolgen kann. Das kann z.B. dann notwendig werden, wenn Kennzeichnungen nicht mehr vorhanden oder nicht erkennbar sind. Daher wurde parallel zu der Sensorerfassung eine Benutzeroberfläche zur manuellen Eingabe als exemplarisches Modell erarbeitet, siehe Abbildung 20.

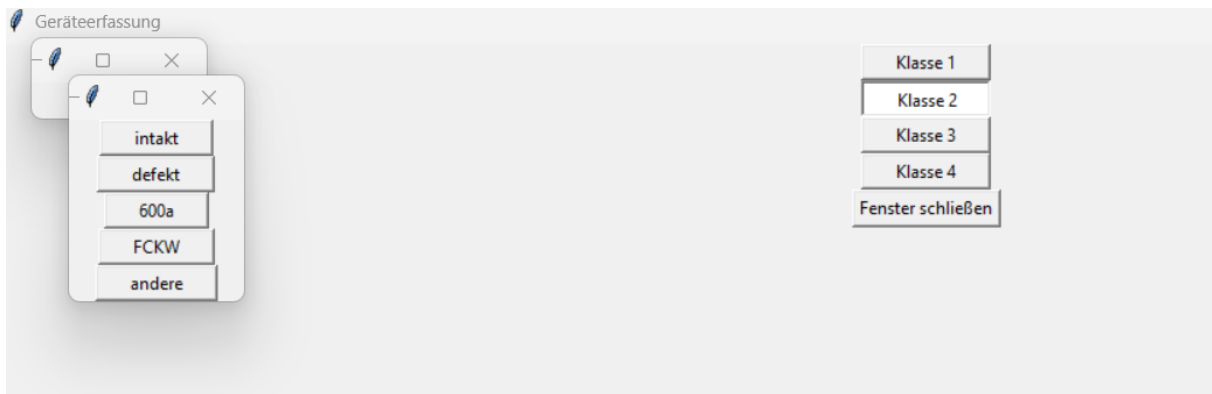


Abbildung 20: exemplarische Eingabemaske auf Basis einer Pythonprogrammierung für die Auswahl der Klasse und die Eingabe des Kältemittels.

### **II.4.6 AP 7 Ableitung zukünftiger Übergabeschnittstellen**

#### Empfehlungen für die Kennzeichnung von Kompressoren

Bei der Bildauswertung mit Hilfe einer Kamera sind einige Anforderungen an die Labels identifiziert worden, damit die Erkennung fehlerarm funktionieren kann. Die in diesem Projekt entwickelte Bildauswertung nutzt eine 3stufige Erkennung:

1. Der Kompressor wird erkannt
2. Bei Vorhandensein des Kompressors wird das Label oder der Aufkleber gesucht
3. Bei Vorhandensein eines Labels wird die Flamme gesucht

Aus den Praxistests wurden folgende Anforderungen an das Kompressorlabeling abgeleitet:

- Das Label sollte möglichst mittig am Kompressor angebracht sein
- Label und Flammenzeichen sollten in räumlicher Nähe angebracht sein
- Das Flammenzeichen sollte eine dreieckige Form aufweisen



Note:  
The idea behind is to use a three-stage object detection:

1. detect the compressor in the frame
2. if there is one, try to find the label/sticker
3. if there is a label, try to detect a flame on it

Abbildung 21: Beispiel für die schrittweise Erkennung der Kompressorenkennzeichnung

### Empfehlungen für alternative Kennzeichnungen für die Treibmittel

Es wurden verschiedene mögliche Kennzeichnungen betrachtet und die jeweiligen Vor- und Nachteile herausgearbeitet, siehe Tabelle 8.

Bei allen möglichen Kennzeichnungen ist die Hauptproblematik, dass diese erst bei Lebensende der Kühlgeräte greifen. Eine jetzige Einführung hätte also erst in 10-15 Jahren einen Effekt im Recyclingprozess. Die ideale Kennzeichnung wird fortlaufend mit den assoziierten Kühlgeräteherstellern intensiv diskutiert.

Tabelle 8: Mögliche Kennzeichnungen für Kühlgeräte

Kennzeichnung	Vorteile	Nachteile
Eingepägter QR-Code	Kamera mit entsprechender Software nutzbar	anfällig bei Verschmutzungen, bei schlechten Lichtverhältnissen ev. nicht erkennbar
Aufkleber mit QR-Code	Kamera mit entsprechender Software nutzbar	leicht ablösbar
RFID-Plakette (Chip)	Mit entsprechender Hardware auslesbar	Extra Scanner erforderlich, begrenzte Haltbarkeit
Aufkleber mit Kältemittelbezeichnung	Kamera mit entsprechender Software nutzbar	anfällig bei Verschmutzungen

### II.4.7 AP 8 Validierung und Optimierung

Die Validierung der Geräteklassenzuordnung und der Türerkennung wurden an den Partnerindustrieanlagen durchgeführt. Um die erfassten Daten mit den realen Daten zu vergleichen, wurden die Attribute jedes Kühlgeräts manuell von IUTA als zu Grunde zu

legende Referenzdaten erfasst. Dieses AP hat enge Anknüpfungspunkte mit den in AP 5 dargestellten Ergebnissen.

Um den Istzustand bei der Datenaufnahme während des Regelbetriebs beurteilen zu können, wurden in drei Messkampagnen bei drei Entsorgungsbetrieben die manuelle Datenaufschreibung durch den Betreiber ausgewertet. Von IUTA wurden gleichzeitig die Referenzdaten ermittelt.

Die in diesem Projekt entwickelte automatisierte Datenerfassung wurde den Ergebnissen der manuellen Datenerfassung im Regelbetrieb und den durch IUTA ermittelten Referenzwerten gegenübergestellt. Es wurden die Kategorien Gerätezählung, korrekte Eingruppierung in die jeweilige Gerätekategorie und die korrekte Erfassung der Gerätedimensionen bewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden detailliert erläutert.

### Geräte-zählung

Die sensorische Geräteerfassung erfolgt über drei Laserentfernungsmesser und einen 2D-LiDAR-Sensor. Die Erfassungsergebnisse sind Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 9 – Auswertung der Geräte-zählung*

Geräte-zählung	behandelte Geräte Stufe 2	gezählte Geräte IUTA	manuelle Zählung Entsorger	Sensorische Erfassung	Differenz IUTA	Differenz manuell	Differenz Sensorik	Fehler IUTA	Fehler manuelle Zählung	Fehler Sensorik
[Einheit]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[%]	[%]	[%]
Anlage A (vier Schichten)	792	790	821	(n.e.)	-2	29	(n.e.)	0,3%	3,5%	(n.e.)
Anlage B (drei Schichten)	603	620	706	(n.e.)	17	103	(n.e.)	2,8%	14,6%	(n.e.)
Anlage B (eine Schicht)	217	217	200	(n.e.)	0	-17	(n.e.)	0,0%	8,5%	(n.e.)
Anlage B (eine Schicht)	264	264	(n.e.)	241	0	(n.e.)	-23	0,0%	(n.e.)	8,7%
Anlage C (zwei Schichten)	246	246	297	241	0	51	-5	0,0%	17,2%	2,1%

Die festgestellten Fehler bei der Geräte-zählung unterscheiden sich von Anlage zu Anlage. Zusätzlich zur Aufschreibung durch einen geschulten IUTA-Mitarbeiter wurden die im Shredder (Stufe 2) behandelten Geräte erfasst.

Die Abweichungen der manuellen Aufschreibung variierte von Anlage zu Anlage und auch während der einzelnen Schichten. Teilweise liegt das darin begründet, dass zwischendurch unvorhergesehene Sonderfälle z.B. in Form von einer anderen Geräteart (z.B. NH<sub>3</sub>-Geräte) auftraten. Bei der Bewertung der manuellen Eingangserfassung durch den Entsorger als Vergleichswert ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Daten eine Momentaufnahme darstellen und sich nicht verallgemeinern lassen. Da die Aufschreibungen an unterschiedlichen Tagen und Anlagen aufgenommen wurden, werden diese als repräsentativ bewertet und sind daher als orientierende Vergleichswerte nutzbar.

Bei den Testläufen mit der sensorischen Eingangserfassung wurden Fehler zwischen 2,1 % und 8,7 % ermittelt. Diese sind mit den Fehlern der manuellen Eingangserfassung vergleichbar. Im direkten Vergleich der Anlagen, bei denen die Tests mit der sensorischen Datenerfassung durchgeführt wurden, ist der Fehler damit geringer als mit der manuellen Aufschreibung. Im Vergleich mit Anlage A, bei der kein Testlauf mit der sensorischen Eingangserfassung stattfand, ist der über die Testläufe gemittelte Fehler geringfügig größer als mit der manuellen Aufschreibung.

## Geräte kategorisierung

Die Eingruppierung der Geräte in die vier Kühlgeräteklassen wurde mit der sensorischen Eingangserfassung an zwei Entsorgungsanlagen (Anlage B und C) getestet. Die ausführlichen Ergebnisse davon sind unter AP 5 dargestellt.

Bei dem Testlauf an Anlage C wurde gleichzeitig die manuelle Aufschreibung durch die Mitarbeiter des Entsorgungsbetriebs bewertet. Bei Anlage B erfolgte die Bewertung der sensorischen Eingangserfassung und der Mitarbeiteraufschreibung in zwei getrennten Kampagnen.

Für die Bewertung der sensorischen Eingangserfassung wurde eine Fehlermatrix (Konfusionsmatrix) erstellt. Diese ist mit entsprechenden Erläuterungen exemplarisch für Anlage B dargestellt.

Tabelle 10. Konfusionsmatrix für die Tests bei Anlage B

Kat.	KI-Modell (Vorhersage)			Produktionsgenauigkeit	
	1	2	3		
1	106	2	7	115	92,2%
2	0	60	2	62	96,8%
3	17	15	55	87	63,2%
	123	77	64	264	84,1%
Nutzer genauigkeit	86,2%	77,9%	85,9%		

Fast alle Geräte der Kat. 2 wurden als solche erkannt.

Die Zuverlässigkeit der erfassten Geräte in der jeweiligen Kategorie liegt zw. 78 und 86 %

Die Vollständigkeit für die als Kat 3 erkannten Geräte liegt bei 63%

## Gerätevermessung

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 11 dargestellt. Als Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass die durchschnittliche Differenz in einem akzeptablen Bereich liegt. Die Standardabweichung jedoch sehr hoch. Das kann damit begründet werden, dass teilweise zwei Geräte hintereinander als ein Gerät erfasst wurden. Das wäre zu vermeiden, wenn die Abstände zwischen den Kühlgeräten entsprechend groß sind. Er ermittelte Mindestabstand für eine sichere Erkennung des Einzelgerätes wurde mit 1,5 m ermittelt. Weitere Abweichungen bei der Erfassung der Gerätedimensionen können auftreten, wenn die Geräte schräg aufgelegt oder nicht mittig auf dem Transportband liegen. Weiterhin können z.B. offene Geräte mit Fächern die Dimensionserkennung beeinflussen, da einzelne Fächer ggfs. als Einzelgerät erfasst werden könnten.

Tabelle 11 – Abweichungen der Laserscanner-Messungen von der Realität

Abmaß	Durchschnittliche Differenz Laser-Manuell [cm]	Standardabweichung der Differenzwerte [cm]
1.-längster (I1)	-2,45	24,53
2.-längster (I2)	+2,27	5,27
3.-längster (I3)	+1,22	3,32

#### II.4.8 AP 9 Koordination, Transfer und Berichterstattung

Die ergriffenen Maßnahmen in AP 9 sind unter II.3.9 bereits dargestellt worden. Als Ergebnisse sind Teilnahmen an Konferenzen mit aktiven Beiträgen und diverse Veröffentlichungen zu nennen.

- Forschungsprojektvorstellung auf der Homepage des RIF (<https://www.rif-ev.de/artikel/dikuerec>) und des Kooperationspartners TU Dortmund (<https://ips.mb.tu-dortmund.de/forschen-beraten/forschungsprojekte/dikuerec/>) zur öffentlichkeitswirksamen Darstellung des Projektes.
- Teilnahme am Begleitforschungsvorhaben „Netzwerk DigitalGreenTech“, insbesondere in den Arbeitskreisen „KI und lernende Systeme“ und „Digitale Zwillinge“, zum querschnittsthemenbezogenen Austausch in einem deutschlandweiten Forschernetzwerk.
- Erstellung von Artikeln für die Fachmagazine EU Recycling (<https://eu-recycling.com/Archive/34960>) und RECYCLING magazin (<https://www.recyclingmagazin.de/2022/04/06/kuenstliche-intelligenz-soll-beim-kuehlgeraete-recycling-helfen/>) mit der Beschreibung des aktuellen Projektstandes.
- Bewerbung um die Teilnahme an der re:publica 2022 Convention (Berlin) mit zwei Session Proposals für eine breitenwirksame Vermittlung von Projektentwicklungen (abgelehnt).
- 02.-05.09.2021. Teilnahme an der Konferenz der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB). Vorstellung des Projektziels sowie der erreichten Projektergebnisse. Zudem projektübergreifender Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen hinsichtlich der Reduzierung von umwelttechnischen Belastungen.
- 26.-28.10.2021. Teilnahme an der digitalen Konferenz „Sustainability Heroes“ der Deutschen Gesellschaft für Qualität zur Einarbeitung in die Emissionsvermeidung und -reduzierung bei industriellen Betrieben, Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten, Carbon Footprints und Ökobilanzen, im Hinblick auf die umwelttechnische Bedeutung des Projektes.
- 30.05.2022. Besuch der Hannover Messe, um die aktuellsten Sensorlösungen im Hinblick auf ihre Verwendung bei der Entwicklung von digitalen Zwillingen kennenzulernen.

- 05.-09.09.2022. Forschungsprojektvorstellung auf der Konferenz „2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)“ in Stuttgart. Anschließende Veröffentlichung eines IEEE-Artikels „Automated Multi-sensory Data Collection System for Continuous Monitoring of Refrigerating Appliances Recycling Plants“ (DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921641).
- 08.-10.09.2022. Teilnahme an der WGAB Konferenz. Projektübergreifender Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen hinsichtlich der Reduzierung von umwelttechnischen Belastungen im Rahmen der Kreislaufwirtschaft.
- 05.10.2022. Besuch der Vision-Messe in Stuttgart, um die neuesten KI-optischen Lösungen für die automatische Datenerfassung von Produktattributen kennenzulernen.
- 07.-08.11.2022. Projektstatustreffen sowie Teilnahme am Begleitforschungsvorhaben „Netzwerk DigitalGreenTech“ in Göttingen. Insbesondere in dem Arbeitskreis „KI und lernende Systeme“, zum querschnittsthemenbezogenen Austausch in einem deutschlandweiten Forschernetzwerk.
- 02.06.2023. Vortrag über das Projekt bei der Forschungsvereinigung Smart Engineering (FVSE) im Rahmen der Impulsreihe „Digitales Datenmanagement für die Kreislaufwirtschaft“.
- 28.-30.09.2023. Teilnahme an der WGAB Konferenz zum Thema „How can industrial management contribute to a brighter future?“. Die Forschungsergebnisse wurden im Beitrag „Green digital twins in product lifecycle: Opportunities and challenges for sustainability“ präsentiert (DOI: [https://doi.org/10.30844/wgab\\_2023\\_10](https://doi.org/10.30844/wgab_2023_10)).
- 17 – 18. 11 2023. Teilnahme an DGT Konferenz in Karlsruhe mit Präsentation der Ergebnisse.

## **II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Im Bereich der Forschung sind keine weiteren Aktivitäten auf dem Gebiet bekannt geworden. Die Akteure der Wirtschaft haben während der Projektlaufzeit die Digitalisierung aufgegriffen und in ihren Betrieben vorangetrieben. Dabei stehen individualisierte Lösungen für die Erstellung der Stoffstrombilanzierung in Vordergrund.

## **II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse werden in weiterführende Entwicklungsarbeiten bei den Industriepartnern einfließen. URT und Aprotect arbeiten bei vielen Projekten eng verzahnt. Es ist geplant, die Ergebnisse bei der Konzeptionierung von Neuanlagen zu berücksichtigen und diese bereits bei den kommenden Aufträgen zu berücksichtigen.

Ebenfalls können Nachrüstungen bei Bestandsanlagen durchgeführt werden. Potentielle Kunden sind die Anlagenbetreiber in Deutschland. Ausgehend davon ist die Expansion in den europäischen und internationalen Markt geplant.

IUTA kann die Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse in die Beratungstätigkeiten übernehmen. Die Beratungstätigkeiten werden außerdem auf die Technologiebewertung von technologischen Entwicklungen im Bereich der Kühlgeräteentsorgung ausgeweitet. Die Erweiterung des Angebotes auch auf mögliche Schulungen von Entsorgungsmitarbeitern ist denkbar.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Projektes werden intern verarbeitet und genutzt, praxistaugliche Konzepte und kundenorientierte Lösungen zu erarbeiten. Die Erkenntnisse werden auf Messen (z.B. IFAT 2024 München) und Konferenzen kommuniziert und zur Ansprache interessierter Netzwerkpartner genutzt.

Von den wissenschaftlichen Partnern konnten auf Basis der Versuchsergebnisse weitere interessante Fragestellungen identifiziert werden, die ggfs. in Folgeprojekten adressiert werden. Weitern werden die Ergebnisse in die Arbeit in diversen Normungsgremien eingebracht. Dort findet der Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen in die Praxisanwendungen statt.

Die Forschungsergebnisse werden in die universitäre Ausbildung angehender Ingenieure und Betriebswirte unter Kooperation mit dem Institut für Produktionssysteme der TU Dortmund verbreitet.

Von Seiten des Wissenschaftspartners RIF werden die neuen Erkenntnisse zur Ausgestaltung und Umsetzung von IoT-Referenzarchitekturen in die aktuelle Lehre integriert (Vorlesung „IT-Systeme in der industriellen Produktion“). Zudem wurde eine Vorlesungsreihe zum Thema „Industrial Data Science“ initiiert, die sich mit maschinellem Lernen im industriellen Umfeld beschäftigt.

Von den im Projekt beteiligten Praxispartnern und assoziierten Partnern werden die Ergebnisse in der internen Betriebsoptimierung eingesetzt. Es werden interne Mitarbeiterschulungen durchgeführt.

Darüber hinaus erfolgte ein enger Austausch mit Miele und Liebherr als assoziierte Partner, insbesondere in Hinblick auf die Anforderungen an das zukünftige, recyclinggerechte Kühlgerätedesign und erforderliche Kennzeichnungen für die sensorische Erkennung im Recyclingprozess.

## **II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

Außerhalb des Verbundvorhabens fand im Rahmen der Audit-Tätigkeiten von IUTA ein enger Austausch mit weiteren Entsorgern statt. Ergebnis dieser Austausche war die Aufnahme von Remondis als weiteren assoziierten Partner während der Projektlaufzeit.

Die europäischen Entwicklungen, insbesondere in Hinblick auf die Anwendung der Normen wurden im Rahmen von Weeelabex-Auditierungen beobachtet. Dabei gab es auch Berührungspunkte mit Anlagen außerhalb Deutschlands, z.B. in Rumänien, Österreich und Griechenland. Einmal jährlich erfolgt eine Schulung im Rahmen der Weeelabex-Auditor-Zertifizierung, an der Herr Schiemann teilnimmt.

Weiterhin erfolgt die Teilnahme an den Normungssitzungen für die EN 50625-X.

Bei der Teilnahme am programminternen Begleitprojekt erfolgte der Austausch mit anderen KI-basierten Projekten. Interessante Anknüpfungspunkte konnten identifiziert werden.

## II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

- Beitrag bei der Online-Fachzeitschrift EU Recycling: „Kühlgeräterecycling mit KI und digitalen Zwillingen“ (<https://eu-recycling.com/Archive/34960>)
- Beitrag bei der Online-Fachzeitschrift RECYCLING Magazin: „Künstliche Intelligenz soll beim Kühlgeräte-Recycling helfen“ (<https://www.recyclingmagazin.de/2022/04/06/kuenstliche-intelligenz-soll-beim-kuehlgeraete-recycling-helfen/>)
- Polikarpov, Mikhail; Emelianov, Georgii; Hübner, Fabian; Farooq, Aqib; Prasad, Rekha; Deuse, Jochen; Schiemann, Jochen (2022): Automated Multi-sensory Data Collection System for Continuous Monitoring of Refrigerating Appliances Recycling Plants. In: IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 6.-9-09.2022, Stuttgart (Germany). DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921641
- Beitrag im Jahresbericht 2022 der Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft e.V. über das Projekt DiKueRec (<https://jrf.nrw/wp-content/uploads/2023/03/jrf-jahresbericht-2022.pdf>)
- Deuse, Jochen; Wagstyl, David; Hernandez Moreno, Victor; Polikarpov, Mikhail; Wöstmann, René; Hoffmann, Florian (2023): Green Digital Twins in the Product Life Cycle. In: Jochen Deuse (Hg.): How can industrial management contribute to a brighter future? Berlin: GITO Verlag (Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e. V), S. 167–186. DOI: [https://doi.org/10.30844/wgab\\_2023\\_10](https://doi.org/10.30844/wgab_2023_10)
- Dr. Thiehoff, Christian; Emelianov, Georgii; Deuse, Jochen; Schiemann, Jochen; Polikarpov, Mikhail (2024). Kosteneffiziente Digitalisierungslösung im Kühlgeräterecycling. Industry 4.0 Science, 2024, 40. Jg., Nr. 1, S.76-82.
- 02.06.2023. Vortrag über das Projekt bei der Forschungsvereinigung Smart Engineering (FVSE) im Rahmen der Impulsreihe „Digitales Datenmanagement für die Kreislaufwirtschaft“.
- Dr. Thiehoff, Christian; Nutzung digitaler Abbilder zur effizienten Steuerung von Aufbereitungsprozessen der Kreislaufwirtschaft am Beispiel von Kühlgeräterecyclinganlagen. Vortrag auf der DGT-Konferenz Karlsruhe, 17.-18.10. 2024
- Schiemann, Jochen, Digitaler Zwilling beim Gerätereycling: Prozessoptimierung und digitales Monitoring bei der Verwertung von Kühlgeräten. Geplanter Vortrag auf dem Kongress BW am 17.10.2024

## II.9 Literaturverzeichnis

[01] <https://circular-foam.eu/>

[02] [https://innovative-produktkreislaeufe.de/Verbundprojekte/Circular+by+Design+%28CbD%29/PRO\\_2019\\_CircularD.pdf](https://innovative-produktkreislaeufe.de/Verbundprojekte/Circular+by+Design+%28CbD%29/PRO_2019_CircularD.pdf).

[03] <https://innovative-produktkreislaeufe.de/Projekte/%C3%9Cbersicht.html>

[04] <https://zenrobotics.com/>