

Schlussbericht vom [30.09.2022]

zu IGF-Vorhaben Nr. 21159 N

Thema

Smart Rack Monitoring (SmaRackT)

Berichtszeitraum

01.04.2020 bis 30.06.2022

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtungen

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Arbeitsgruppe Supply Chain Services SCS
Nordostpark 93
90411 Nürnberg

Technische Universität München
Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik
Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik (FML)
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung	4
2 Stand der Technik	6
3 Anforderungserhebung	10
3.1 Analyse von Einsatzszenarien und Aktionspunkten	10
3.2 Definition der Anforderungen	16
4 Konzeptionierung und Umsetzung einer MVP-Lösung	21
4.1 Erstellung eines Umsetzungskonzeptes	23
4.2 Erweiterung der Nahfeldortungstechnologie	27
5 Entwicklung eines Verfahrens zur Objekterkennung	31
5.1 Erfassung und Augmentierung von Daten	32
5.2 Erstellung und Bewertung der Datensätze	36
5.3 Analyse der Spektralen Merkmale	39
5.4 Erstellung und Evaluation mittels Benchmarking Umgebung	42
6 Integration der SW-Komponenten für einen Gesamtsystem-Demonstrator	46
7 Evaluierung des Systems	48
7.1 Evaluierungsschritt 1: Technische Evaluierung in Laborumgebung	48
7.2 Evaluierungsschritt 2: Technische Evaluierung inkl. zusätzlicher Störungen	49
7.3 Evaluierungsschritt 3: Erprobung des Systems bei Projektpartnern	50
8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	54
8.1 Zusammenfassung	54
8.2 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	54
8.3 Ausblick	55
9 Verwendung der Zuwendungen	56
Forschungsstelle 1: Fraunhofer IIS	56
Forschungsstelle 2: Technische Universität München, Lehrstuhl fml	56

10	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	56
11	Nutzen der Forschungsergebnisse für Unternehmen (insbes. KMU)	57
12	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	58
13	Abbildungsverzeichnis	61
14	Tabellenverzeichnis	62
15	Anhang	63
	Literatur	67

1 Einleitung

Materialflüsse in Produktion und insbesondere Logistik sind oftmals intransparent. Ihre Nachverfolgung erfordert manuelle, potenziell fehlerbehaftete Tätigkeiten wie beispielsweise Scannen oder das kostenintensive Tagging von Artikeln und Behältern. Um Materialflüsse an Aktionspunkten automatisiert zu erfassen, muss festgestellt werden, welches Material in welcher Menge an einem vordefinierten Ort (Aktionspunkt) lagert oder diesen passiert. Deshalb hat das Forschungsprojekt SmaRackT (Smart Rack Monitoring) die Entwicklung und Evaluierung einer autonomen und aufwandsarmen **intelligenten Objektklassifikation und Mengenquantifizierung an Aktionspunkten zum Ziel**. Die Besonderheit dabei ist, dass keines der Objekte mit Tags ausgestattet wird, sondern Identifikation und Tracking durch induktive Nahfeldortung und maschinelles Lernen ermöglicht werden. Potenziell können damit entlang einer Prozesskette alle Materialbewegungen an Aktionspunkten erfasst werden. Bisherige Lösungen wie Barcodescanner könnten damit in einer Vielzahl von Anwendungsfällen (z.B. Erfassung von C-Teilen) abgelöst werden.

Die Objekte werden dabei auf Grundlage ihrer Reaktion auf ein niederfrequentes magnetisches Wechselfeld unterschieden. Durch ein äußeres primäres Magnetfeld werden leitfähige Objekte innerhalb der Reichweite dazu angeregt aufgrund der entstehenden Wirbelströme ein eigenes, sekundäres Magnetfeld auszubilden. Dieses wird vom SmaRackT-System bei verschiedenen Frequenzen aufgezeichnet und als „magnetischer Fingerabdruck“ eines Objektes weiterverarbeitet. Dabei haben Größe, Form, Material und Menge unterschiedlich starken Einfluss auf Betrag und Phase der erfassten Sekundärfelder bei unterschiedlichen Frequenzen und machen eine Unterscheidung von Materialien, Objekten und Mengen möglich.

Im Projekt wurden mögliche Anwendungsszenarien für eine solche Technologie erarbeitet und mit Partnern aus dem projektbegleitenden Ausschuss weiter detailliert. Daraus wurden Anforderungen für die Technologie abgeleitet und in ein Konzept für eine prototypische Umsetzung der Technologie im Sinne eines Minimum-Viable-Product (MVP) überführt. Mit diesem MVP-Demonstrator wurden Verfahren zur Objekterkennung und Mengenschätzung entwickelt und erprobt. Der MVP-Demonstrator wurde dazu auch an die Middleware-Plattform des Fraunhofer IIS angebunden und bei Projektpartnern evaluiert.

Als Ergebnis des Projektes konnte mit dem Demonstrator ein System als MVP aufgebaut werden, mit dem die Leistungsfähigkeit der Technologie in verschiedenen Anwendungsfällen mit unterschiedlichen Objekten demonstriert werden kann.

Dabei zeigt die Objekterkennung auf Basis von magnetischen Feldern das Potential, auch geringe Detailunterschiede zwischen ansonsten ähnlichen Objekten aufzulösen. Im Vergleich zu vergleichbaren Analysemethoden wie Röntgentechnologie oder Bilderkennung verspricht die Technologie zuverlässige, schnellere und kostengünstigere Lösungsansätze und trifft deshalb auf starkes Interesse für die relevanten Einsatzszenarien.

Abbildung 1-1 zeigt die Vision der Objekterkennung mit SmaRackT aus Vorversuchen bei Projektbeginn.

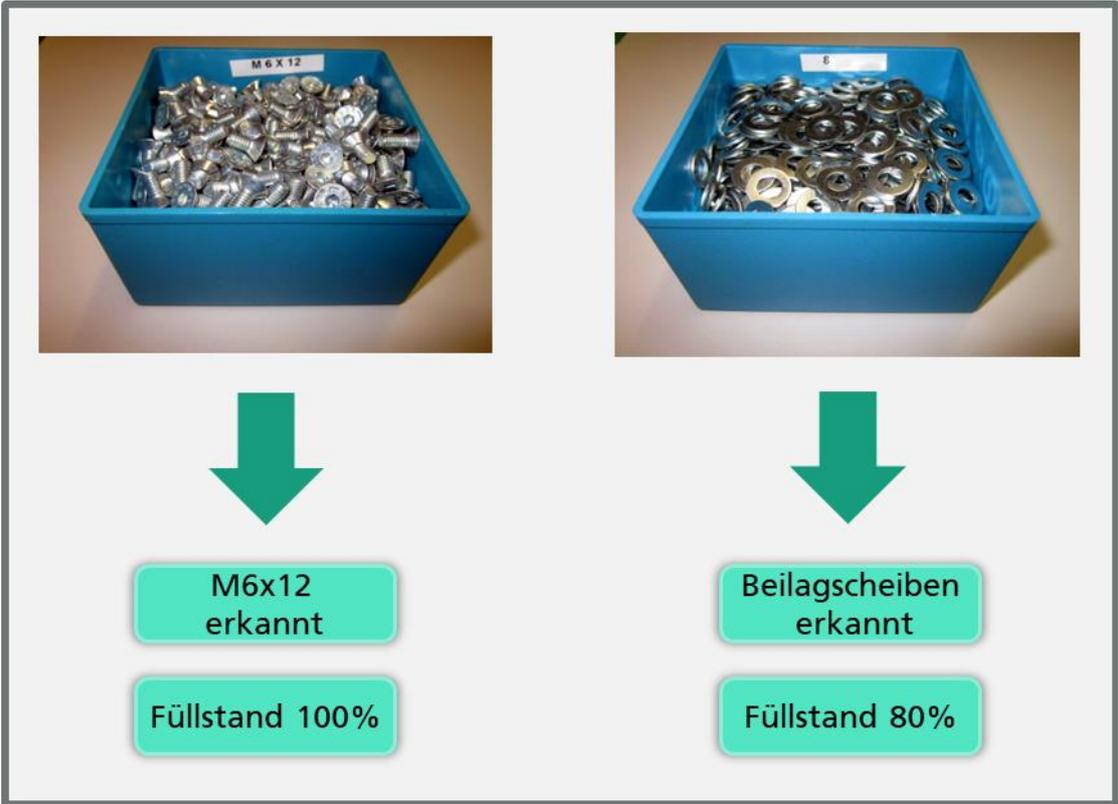


ABBILDUNG 1-1: VISION DER OBJEKTERKENNUNG IN SMARACKT

2 Stand der Technik

Fehlende Artikel, fehlerhafte Materialnachbestückungen und Entnahmefehler in Logistik und Montage sorgen für hohe Kosten bei Unternehmen. In der nachgelagerten Prozesskette führen diese Fehler zu Bandstillständen, Nachlieferungen oder Ausschuss. Eine Minute Bandstillstand in der Automobilbranche verursacht bspw. vierstellige Kosten in € [DVZ-15]. Zudem müssen Materialflüsse (Zu- und Abgänge) häufig manuell erfasst werden, bspw. durch Scannen der Artikelnummern mit einem mobilen Datenterminal. Dies führt einerseits zu hohen Kosten, verursacht durch die manuellen Aufwände, und andererseits ist dies fehleranfällig, da Fächer, Barcodes oder Artikel leicht vertauscht werden können.

Diese Prozesskosten sind gerade bei der manuellen Nachbestellung von Kleinteilen (C-Teile) gegenüber dem Wert der Teile verhältnismäßig hoch. Studien erkennen Kosteneinsparpotenziale von bis zu 50% [BAI-14], [BME-18] im bislang wenig strukturierten Orderprozess von C-Teilen. Eine Shopfloor-nahe Initiierung von Nachschubprozessen auf Basis automatisierter Buchungen könnte dabei helfen, bestehende Kosteneinsparungspotenziale zu realisieren.

2.1 Technologien zur Überwachung von Materialflüssen und Materialnachbestellung

Die Überwachung von Materialflüssen und Materialnachbestellung wird momentan von vielen Unternehmen halbautomatisiert oder komplett manuell durchgeführt. Deshalb ziehen diese Prozesse branchenübergreifend hohe manuelle Aufwände in Intralogistik und Produktion nach sich, bleiben aber trotzdem meist intransparent. Als typische Vertreter von halbautomatisierten Verfahren können Kommissionierverfahren [GUO-14] berücksichtigt werden, bei denen Informationsrückflüsse manuelle Eingaben bedingen (Quittierung, Entnahmemenge). Das gesamte Problem der Überwachung von Materialflüssen kann in zwei Teilaufgaben gegliedert werden:

- Warenerkennung und -klassifikation sowie
- Feststellung der Materialmenge an Ablageorten.

Die erste Teilaufgabe tritt z.B. immer häufiger bei Analysen des Käuferverhaltens im Einzelhandel auf. Zur Erkennung der Waren werden dabei oft optische Verfahren angewendet [VAR-15]. Kamerabilder werden dabei von Bildverarbeitungsalgorithmen analysiert. Dies funktioniert im Einzelhandelsumfeld sehr gut, da die Waren dort so platziert sind, dass sie für Kunden und damit auch Kamerasysteme deutlich sichtbar sind. In der Intralogistik wäre diese Lösung aber mit hohen Kosten und Veränderungen verbunden, zum einen durch infrastrukturelle Veränderungen der bestehenden Ausstattung (Beleuchtung und Warenanordnung), zum anderen durch die Ausstattung logistischer Strukturen mit teuren, industriellen Kamerasystemen. Hierbei kostet die Ausstattung eines Aktionspunktes bereits einen mittleren vierstelligen Eurobetrag [LOG-18].

Die RFID-Technologie oder Strichcodes werden auch oft zur Warenerkennung benutzt, z.B. bei dem Totally Integrated Automation System von Siemens [SIE-18]. Wenn jedoch Kleinwaren oder niedrigkomplexe Güter erkannt werden sollen, ist ihre Verwendung technisch unmöglich (bspw. zu kleine Artikelgröße für eine Anbringung) oder unrentabel (bspw. wenn Etiketten teurer als die Artikel selbst sind).

Die Füllstandüberprüfung ist eine wichtige Aufgabe in Logistik und Produktion, um Nachbestellungen auslösen zu können. Einige Lösungen ermöglichen eine automatisierte Überprüfung von Tanks und Behältern mit Hilfe von Ultraschall Sensorik [OPA-18], [WSS-18]. Diese Verfahren liefern keine präzise Information über Waren- oder Materialmengen, weil sie lediglich Schwellwerte detektieren können. Auf Ultraschall Sensorik basierende Lösungen sind aber besser für Flüssigkeiten geeignet, weil diese sich gleichmäßig im gesamten Behälter verteilen. In anderen Fällen können diese Ansätze zu unzuverlässigen Ergebnissen führen.

Im Kontext der Füllstandüberprüfung können auch 3D-Kamera-Systemen verwendet werden. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes Lynkeus wurden mittels PMD-Kameras (Photonic Mixer Device) Volumenmessungen in Paketen durchgeführt [ECK-18]. Die hohen Kosten solcher Kamerasysteme verhindern jedoch eine weite Verbreitung.

Pepperl+Fuchs bietet ebenfalls eine Lösung für die automatisierte Warenerkennung in der Intralogistik an [PFS-18]. Das System kombiniert optische Matrix-Codelesegeräte zur Objekterkennung und Distanzsensoren zur Feststellung der Warenmenge. Dafür wird eine standardisierte Prozessfolge unter Zuhilfenahme von Fördertechnik benötigt. Die Verwendung von Fördertechnik und Barcodes ist gerade in der kritischen Versorgung von Prozessen mit Kleinteilen schwer realisierbar. Darüber hinaus können dabei Fehler aufgrund von mangelhafter Etikettierung von Artikeln oder Behältern auftreten.

Das im Projekt entstehende SmaRackT-System adressiert die bestehenden Lücken in der Anwendung. Es ist sehr günstig in der Anschaffung (die Kosten liegen unter 1000 € pro Aktionspunkt), kann insbesondere metallische Kleinteile sehr gut detektieren sowie quantifizieren, und eine Ausstattung der Artikel mit Tags oder anderen Kennzeichnungen ist dabei nicht notwendig.

2.2 Induktive Nahfeldortung

Während der Kommissionierhandschuh UHF-RFID einsetzt [IFF-11], wurden im IGF-Projekt ValidKomm induktive Systeme zur Fehlererkennung in der Kommissionierung verwendet [LUD-17]. Induktive Systeme waren bereits allgemein Gegenstand der Forschung, bspw. im Hinblick auf ein kollaboratives Kontextererkennungssystem (DFKI Cocorec, siehe [DFKI-15]) und haben darüber hinaus Beachtung in anderen Anwendungsbereichen gefunden.

Induktive Systeme kommen im Sport bei der Torlinienentscheidung im Fußball (Fraunhofer IIS GoalRef, siehe [IIS-15]) oder bei Ziellinienentscheidung in der Leichtathletik (Mylaps Sports Timing, siehe [MYL-15]) zum Einsatz. Bei beiden Anwendungsszenarien wird aber nur eine Grenzüberschreitung ausgewertet, d. h. die Ortung ist auf einen konkreten Linien- oder Flächendurchschritt beschränkt, ungeachtet der genauen Position entlang dieser Linie oder innerhalb der Fläche. Kennzeichnend für diese Anwendungen in Sportbereich sind die hohe Genauigkeit der Systeme im Überwachungsbereich und deren Toleranz gegenüber Umwelteinflüssen und Störungen in unmittelbarer Nähe des Systems, beispielsweise durch Metallobjekte oder andere Funksignale.

Das induktive System aus dem Projekt ValidKomm erkennt zusätzlich die genaue Position der Grenzüberschreitung. Damit das ValidKomm-System die Eingriffe des Kommissionierers erkennt, muss dieser ein spezielles Armband mit einer passiven Spule tragen. Das ValidKomm-

System erkennt die Anzahl der Eingriffe in ein Fach, jedoch nicht die Änderung des Füllstandes eines Behälters oder andere Manipulationen des Fachinhaltes.

Durch die Verwendung von niedrigen Frequenzen im Kilohertz-Bereich operieren diese Systeme im Nahfeld der Antennen mittels magnetischer Felder. Die Antennen sind als Spulen ausgeführt. Dadurch ist die Reichweite der Systeme auf die unmittelbare Nähe der Spulenantennen begrenzt. Anders als Funkssysteme wie UHF-RFID oder auch Funkortungssysteme, z.B. mittels UWB-Technologie, sind diese induktiven Nahfeldsysteme weniger für Überreichweiten und Reflexionen im unmittelbaren Arbeitsbereich anfällig. Das induktive System erzeugt in der zu überwachenden Fläche (z.B. Regalebene), durch eine umliegende Spule ein niederfrequentes magnetisches Wechselfeld. Das zu überwachende Objekt reagiert auf dieses Wechselfeld innerhalb der Reichweite des Regals mit einem eigenen, durch Induktion hervorgerufenen Sekundärfeld. Dieses Sekundärfeld wird vom ValidKomm-System empfangen und ausgewertet.

Bei der induktiven Lokalisierung gelten metallische Objekte als Störobjekte, da in elektrisch leitfähigen Objekten Wirbelströme auftreten, die genau wie das zu detektierende Objekt ein Sekundärmagnetfeld erzeugen. In der induktiven Nahfeldortung lassen sich die Sekundärfelder solcher metallischen Objekte durch die Verwendung einer Referenzfrequenz leicht herausrechnen. Jedoch enthalten die Sekundärmagnetfelder von metallischen Objekten wertvolle Informationen, anhand derer ein Rückschluss auf das Objekt möglich ist.

So erfolgt die Suche von Minen und nicht explodierter Munition mit Hilfe von niederfrequenten Magnetfeldern [GRZ-11] [ONE-06]. Die Problematik besteht dabei in der Unterscheidung zwischen den Minen oder der nicht explodierten Munition und anderen harmlosen Metallobjekten. Für die Unterscheidung werden die Informationen aus dem Sekundärmagnetfeld der Objekte genutzt. Zur Füllstanderkennung von elektrisch leitfähigen Objekten lassen sich die Informationen aus dem Sekundärmagnetfeld analog nutzen. In einem Laborversuch am Fraunhofer IIS konnte gezeigt werden, dass sowohl der Füllstand eines Behälters mit Schrauben ermittelt werden konnte, als auch die Erkennung, um welchen Schraubentyp (M8 oder M6) es sich handelt. Das entsprechende System muss dazu für die zu unterscheidenden Objekte angelernet werden. Gleichzeitige Füllstands- und Objekterkennungen über Magnetfelder sind nach dem aktuellen Stand der Technik noch nicht erforscht und sollen daher im Vorhaben SmaRackT zum ersten Mal genauer untersucht werden.

Eine bestehende Forschungsfrage ist dabei, wie ein System entwickelt werden kann, das skalierbar in verschiedenen Anwendungsbereichen einsetzbar ist. So ist die Integration in ein Kommissionierregal, wie auch die Verwendung des Systems an einzelnen Behältern oder in der Fertigung am Band zur Unterscheidung von Objekten denkbar.

2.3 Objekterkennung und -klassifikation

Objekterkennung ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die auch viele Bereiche außerhalb der Warenlogistik betrifft, z.B. fahrerlose Transport- und Verkehrssysteme, Werkstoffprüfungssysteme oder Bilderverarbeitung.

Diese Aufgabe wird oft durch den Einsatz optischer Systeme gelöst. Bilder von Kameras [VAR-15] oder Röntgenbilder [MER-17] werden mit Hilfe von Bilderverarbeitungsalgorithmen analysiert [MOU-05], [MOU-05a]. Eine Anwendung von Time-of-Flight-Kameras ermöglicht es,

sich bewegende Objekte wie Menschen zu identifizieren [LAN-17]. In der Intralogistik ist die Verwendung solcher Verfahren jedoch problematisch, weil sie zum einen eine gute Beleuchtung benötigen und zum anderen aufgrund der räumlichen Limitationen kaum an Regalen umgesetzt werden können.

Im Bereich von fahrerlosen Verkehrssystemen und der Verkehrsüberwachung wurde das Problem häufig durch Anwendung von Lidar-Systemen (light detection and ranging) behoben [HSU-14]. Nachteil der Verwendung von Lidar-Systemen ist, dass damit nur Objekte, die direkt sichtbar sind, erkannt werden können.

2.4 Resultierendes angestrebtes Wirkprinzip

Das Prinzip und die Funktionen der zu entwickelnden Technologie sind schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben. In einem segmentierbaren Überwachungsbereich wird ein magnetisches Feld mit Erregerspulen erzeugt. Das magnetische Feld in dem Überwachungsbereich (bspw. vor dem Regal) verändert sich, wenn Materialien oder Artikel (z.B. Schrauben oder Unterlegscheiben) hindurchbewegt werden. Die Art der Veränderung im magnetischen Primärfeld wird mit Hilfe von Antennen bestimmt, und die Daten werden an eine Softwareplattform gesendet. Dort wird eine Analyse vorgenommen und mit einem Modell abgeglichen, um den Typ, die Anzahl und Position der Waren zu erkennen.

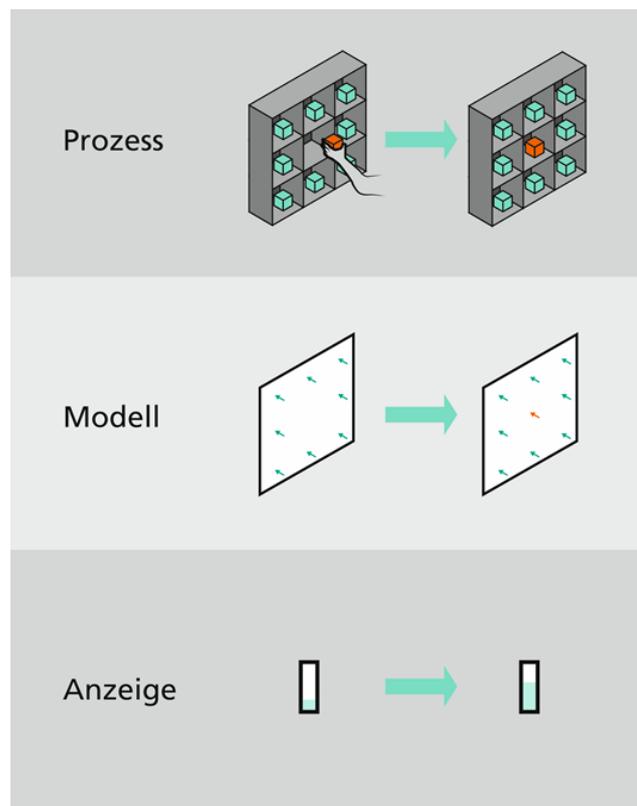


ABBILDUNG 2-1: PRINZIPDARSTELLUNG DES KONZEPTS SMARACKT

3 Anforderungserhebung

Das folgende Kapitel beschreibt die Erhebung erforderlicher Anforderungen an das SmaRackT-System. Dazu wurden in einem ersten Schritt Einsatzszenarien für das zu entwickelnde System analysiert und geeignete Szenarien ermittelt (Abschnitt 3.1). Anschließend wurden erforderliche Anforderungen an das System abgeleitet (Abschnitt 3.2).

3.1 Analyse von Einsatzszenarien und Aktionspunkten

Für die Ermittlung geeigneter Einsatzszenarien und Aktionspunkte bedarf es einer systematischen und umfassenden Prozessaufnahme entsprechender Logistik- und Produktionsprozesse. Die Prozesse müssen insbesondere in Bezug auf eine potenziell vorteilhafte Identifikation und Quantifizierung von Materialien an einzelnen Aktionspunkten analysiert werden. Ziel war eine umfassende Aufnahme des Ist-Stands von Produktions- und Logistikprozessen, die zur Erkennung von Objekten an den Aktionspunkten verwendet werden. Zur Identifikation der geeigneten Einsatzszenarien wurde im Rahmen des Projekts ein mehrstufiges Vorgehen verwendet:

- 1) Durchführung einer strukturierten Literaturrecherche
- 2) Erarbeitung eines Interviewleitfadens
- 3) Leitfadengestützte Befragung von Experten
- 4) Prozessaufnahmen mit Projektpartnern

Nach Durchführung einer strukturierten Literaturrecherche im ersten Schritt wurde anschließend ein geeigneter Interviewleitfaden erarbeitet. Dieser Leitfaden strukturiert die Aufnahme der erforderlichen Informationen bei den Projektpartnern. Der Leitfaden ermöglicht die strukturierte Erfassung von Angaben zum Unternehmen, Rahmenbedingungen, Aktionspunkten und Einsatzszenarien. Diese werden sowohl im Sinne einer „Top-Down“-Logik als auch einer „Bottom-Up“-Logik erfasst, um ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten. Basis der zu identifizierenden Einsatzszenarien sind daher letztendlich die leitfadengestützte Befragung der Experten und die Prozessaufnahmen mit den Projektpartnern, vornehmlich aus kleinen und mittleren Unternehmen.

Tabelle 1 zeigt den Abschnitt des Interviewleitfadens, der die Rahmenbedingungen erfasst. Weiterhin sind in Tabelle 2 der Abschnitt zur Informationsaufnahme beispielhafter Aktionspunkte und in Tabelle 3 der Abschnitt zur Erfassung weiterer Einsatzszenarien dargestellt.

TABELLE 1: INTERVIEWLEITFADEN ABSCHNITT „RAHMENBEDINGUNGEN“

2. Rahmenbedingungen	
<i>Dieser Abschnitt dient der Schaffung eines ersten Überblicks über Ihr Unternehmen, wobei insbesondere der Status quo Ihrer Prozessketten in Bezug auf Objektklassifikation und Mengenquantifizierung von besonderem Interesse sind.</i>	
2.1 Unternehmen und Geschäftstätigkeit	
Bitte beschreiben Sie in Kürze Ihr Unternehmen und ihre Geschäftstätigkeit	
(Produkte/Dienstleistungen, Geschäftsmodell, Märkte, Umsatz und Mitarbeiterzahl, ...)	
2.2 Prozesse und Systeme	
Welche intralogistischen Systeme und Technologien nutzen sie wofür?	
System/ Technologie	Zweck
Bitte beschreiben Sie – sofern möglich – typische Prozessketten in ihrem Unternehmen und erläutern dabei speziell die Rolle, welche Objektklassifikation und Mengenquantifizierung darin spielen.	

TABELLE 2: INTERVIEWLEITFADEN ABSCHNITT „BEISPIELHAFTE AKTIONSPUNKTE“

3. Beispielhafte Aktionspunkte	
<i>Dieser Abschnitt dient der detaillierten Betrachtung bestimmter Einzelprozesse mit ggf. besonderer Relevanz für SmaRackT.</i>	
3.1 Wareneingang	
3.1.1	Wie erfolgt derzeit Ihr Wareneingang?
	(Rahmenbedingungen? Mitarbeiter? Förderzeuge? Identifikationstechnologie? ERP-Integration?)

3.1.2	<p>Welche Arten von Artikeln in welcher Form und Menge durchlaufen typischerweise diesen Prozessschritt?</p> <p>(Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)</p>
3.1.3	<p>Wie bewerten Sie den Status quo dieses Prozessschritts?</p> <p>(Prozess, Kosten, ...)</p>
3.1.4	<p>Wie bewerten Sie die Möglichkeit der Identifikation und Mengenquantifizierung mittels Nahfeldinduktion und automatischer Datenverarbeitung?</p> <p>(betroffene Materialien, Prozessintegration, alternative Technologien, ...)</p>

TABELLE 3: INTERVIEWLEITFADEN ABSCHNITT „WEITERE EINSATZSZENARIEN“

4. Weitere Einsatzszenarien								
<i>Ergänzend zu den vorherigen Betrachtungen dient dieser Abschnitt zur Identifikation weiterer Potenziale.</i>								
4.1 Vorteilhafte technische Rahmenbedingungen								
4.1.1	<p>Material: In welchen Prozessschritten sollten insb. metallische Gegenstände erkannt werden?</p>							
4.1.2	<p>Prozess: In welchen Prozessschritten innerhalb des Materialflusses verharren die Artikel mind. vier Sekunden am selben Ort?</p>							
4.2 Handlungsbedarf aus Unternehmenssicht								
4.2.1	<p>In welchen fünf Prozessschritten innerhalb Ihres Unternehmens sehen Sie die größten Handlungsbedarfe bzw. Potenziale in Bezug auf die Objektklassifikation und Mengenquantifizierung von Artikeln?</p>							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="292 1861 335 1906"></th> <th data-bbox="335 1861 571 1906">Prozessschritt</th> <th data-bbox="571 1861 1437 1906">Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="292 1906 335 2018">1</td> <td data-bbox="335 1906 571 2018"></td> <td data-bbox="571 1906 1437 2018"></td> </tr> </tbody> </table>		Prozessschritt	Beschreibung	1			
	Prozessschritt	Beschreibung						
1								

	2		
	3		

Mit Hilfe des mehrstufigen Vorgehens konnten insgesamt vier Einsatzszenarien identifiziert werden (Abbildung 3-1). Diese wurden von den Projektpartnern in Abhängigkeit der individuellen Rahmenbedingungen unterschiedlich priorisiert. Die vier Einsatzszenarien umfassen eine Regalentnahme, einen Kommissionierwagen, eine Qualitätssicherung im Bereich Produktion und eine Qualitätssicherung im Bereich Logistik. In den nachfolgenden Absätzen werden diese weiter konkretisiert und dargestellt.



ABBILDUNG 3-1: EINSATZSZENARIEN

Einsatzszenario I: Regalentnahme

Im identifizierten Einsatzszenario I (Abbildung 3-2) wird eine Regalentnahme fokussiert. Hierbei wurde ein Regal mit einzelnen sortenreinen Behältern und Fächern betrachtet. Das entwickelte System soll in diesem Szenario die in den Behältern gelagerten Objekte identifizieren sowie ihre Menge mit ausreichender Genauigkeit quantifizieren und den Füllstand entsprechend anzeigen. Das Regal ist fest installiert und kann beispielsweise an einem Montagearbeitsplatz positioniert sein. Werden aus dem Regal Objekte entnommen, wird dies durch das System in dem jeweiligen Behälter erkannt. Die veränderte Restmenge wird über eine Middleware an das Warehouse Management System (WMS) übermittelt und dort aktualisiert.



ABBILDUNG 3-2: EINSATZSZENARIO I: REGALENTNAHME

Einsatzszenario II: Kommissionierwagen

Das zweite Einsatzszenario (Abbildung 3-3) beschreibt eine dynamische Anwendung, bei der das zu entwickelnde System in Bewegung ist. Hierzu wurde das System modifiziert als Ablagefläche auf einem Kommissionierwagen montiert. Dadurch besitzt der Kommissionierwagen Ablageflächen, auf denen einzelne Objekte abgelegt werden können. Während des Kommissionierens legt die kommissionierende Person das entsprechende Objekt auf der Ablagefläche des SmaRackT-Systems auf dem Kommissionierwagen ab. Die abgelegten Objekte werden anschließend vom System identifiziert und ggf. quantifiziert. Dadurch kann ein Abgleich des abgelegten und identifizierten Objekts mit dem zu kommissionierenden Objekt durchgeführt werden. Bei etwaigen Pick-Fehlern gibt das System eine Warnung aus, sodass der Fehler korrigiert werden kann.

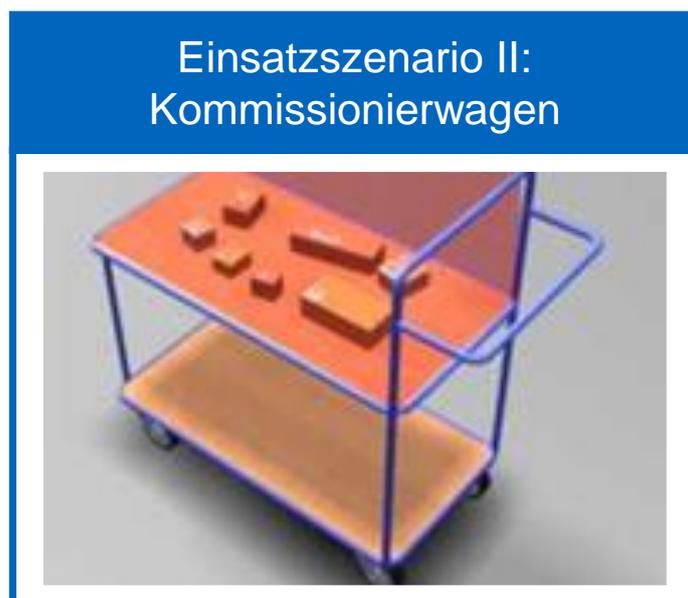


ABBILDUNG 3-3: EINSATZSZENARIO II: KOMMISSIONIERWAGEN

Einsatzszenario III: Qualitätssicherung Produktion

Im dritten Einsatzszenario (Abbildung 3-4) werden qualitätssichernde Aufgaben in der Produktion unterstützt. Ziel ist die Vermeidung von Ereignissen, die eine aufwendige und häufig manuelle Korrektur und Bearbeitung erfordern. Diese ist insbesondere erforderlich, wenn fehlerhafte Objekte erst spät im Prozess erkannt werden und häufig bereits fälschlicherweise vorherige Prozessschritte durchlaufen haben. Weiterhin erfolgt die Fehlererkennung aktuell aufgrund ungelöster technischer Fragestellungen häufig zumindest in Teilen manuell. Das zu entwickelnde SmaRackT-System soll daher Beschädigungen oder Montage- oder Bestückungsfehler einzelner Objekte automatisch erkennen. Hierzu wurden entsprechende fehlerfreie und intakte Objekte im Produktionsbereich mit dem aktuellen Objekt verglichen. Dadurch können fehlerhafte Objekte automatisch erkannt und ausgeschleust werden. Das System gibt einen Hinweis aus und der nachfolgende Prozess kann korrigierend ausgelöst werden.



ABBILDUNG 3-4: EINSATZSZENARIO III: QUALITÄTSSICHERUNG PRODUKTION

Einsatzszenario IV: Qualitätssicherung Logistik

Als abschließendes und viertes Einsatzszenario (Abbildung 3-5) wurde gemeinsam mit den Projektpartnern die Qualitätssicherung in der Logistik definiert. Auch dieses Szenario fokussiert eine aufwendige manuelle Fehleridentifikation. Dazu erkennt das SmaRackT-System Objekte (beispielsweise Halbfertigteile), sodass mit den Informationen aus dem ERP-System und WMS ein Soll-Ist-Vergleich bezüglich des Fertigstellungsgrades und der Vollständigkeit von Einzelkomponenten durchgeführt werden kann. Weiterhin kann das System dazu verwendet werden, um verpackte und damit nicht visuell einsehbare Objekte vor dem Versand zu identifizieren und zu überprüfen.



ABBILDUNG 3-5: EINSATZSZENARIO IV: QUALITÄTSSICHERUNG LOGISTIK

3.2 Definition der Anforderungen

Für die vier identifizierten Einsatzszenarien

- Einsatzszenario I: Regalentnahme
- Einsatzszenario II: Kommissionierwagen
- Einsatzszenario III: Qualitätssicherung Produktion
- Einsatzszenario IV: Qualitätssicherung Logistik

werden im aktuellen Abschnitt Anforderungen abgeleitet. Anknüpfend an die initiale Identifikation von Einsatzszenarien wurde auch in Hinblick auf die darauffolgende Anforderungsdefinition zunächst eine systematische Literaturrecherche durchgeführt und anschließend Experteninterviews mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses abgehalten, um alle erforderlichen Anforderungen zu ermitteln und abzugleichen. Die Anforderungen wurden strukturiert erfasst und dokumentiert, sodass diese eine fundierte Grundlage für die Entwicklung des SmaRackT-Systems darstellen.

Die dadurch erfassten Anforderungen wurden in die Bereiche Anzeigen, IndLoc-Technologie, Middleware und Gesamtsystem kategorisiert. Alle Anforderungen setzen sich zusammen aus einem Merkmal und einer entsprechenden Ausprägung des Merkmals. Neben der strukturierten Erfassung und Kategorisierung wurden die Anforderungen mit Hilfe der MoSCoW-Priorisierung [KUS-19, S. 90] priorisiert und somit in eine für die Umsetzung des technischen Systems relevante Reihenfolge gebracht. Diese Form der Priorisierung umfasst Anforderungen, die umgesetzt werden müssen (M: must have), umgesetzt werden sollten (S: should have), umgesetzt werden könnten, sofern diese Umsetzung M- und S-Anforderungen nicht beeinträchtigt (C: could have) oder zukünftig umgesetzt werden könnten, jedoch nicht aktuell (W: won't have).

Nachfolgend werden die priorisierten Anforderungen tabellarisch erfasst und auszugsweise diskutiert. Tabelle 4 zeigt die Anforderungen im Bereich „Anzeigen“, Tabelle 5 im Bereich

„IndLoc-Technologie“, Tabelle 6 im Bereich „Middleware“ und Tabelle 7 im Bereich „Gesamtsystem“.

TABELLE 4: ANFORDERUNGEN IM BEREICH „ANZEIGEN“

Nr.	Merkmal	Ausprägung	MoSCoW	Beschreibung
A-T-2	Schutz gegen Feuchtigkeit und Fremdkörper	IP44	M	Schutz der Anzeige gegen Spritzwasser und Fremdkörper
A-T-3	Verfügbarkeit	> 99%	M	Verfügbarkeit der Anzeige nahe 100%
A-L-4	Abmessungen Anzeige	keine Störung der Handhabungsprozesse, Abmessung ...	M	Für die Anbringung an Kommissionierwagen
A-T-5	Anbringungsmöglichkeiten Kommissionierwagen	Auf Metall, Kunststoff, Holz	M	Eine Anbringung der Anzeige soll auf herkömmlichen Wagenkonstruktionen möglich sein
A-T-6	Temperaturbereich	0° bis 50°C	M	Entsprechend Kategorien für Elektronikartikel
A-T-7	Blickwinkel	160°	S	Optische Sichtbarkeit des Displays für den Kommissionierer
A-T-8	Lesbarkeit	2 m	S	Schriftgrößen, Kontrast, etc.
A-T-9	Diebstahlschutz		W	Sicherung des Displays am Regal gegen unerlaubtes Demontieren
A-T-10	Energy Harvesting		W	Gewinnung von Energie aus Bewegung, Licht, o. Ä. Wird aus Kostengründen nicht weiter verfolgt

Die Anforderungen im Bereich Anzeige umfassen insbesondere einen Schutz gegen Feuchtigkeit und Fremdkörper, eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Anzeige und Abmessungen, die die erforderlichen Handhabungsprozesse nicht beeinträchtigen. Weiterhin müssen in Abhängigkeit des Einsatzszenarios Anbringungsmöglichkeiten auf dem Kommissionierwagen vorgesehen werden und der Temperaturbereich eine Temperaturausprägung zwischen 0° und 50°C aufweisen. Nicht umgesetzt wurde beispielsweise ein Diebstahlschutz, der verhindern könnte, dass die Anzeige unerlaubt demontiert und gestohlen werden kann.

TABELLE 5: ANFORDERUNGEN IM BEREICH „INDLOC-TECHNOLOGIE“

Nr.	Merkmal	Ausprägung	MoSCoW	Beschreibung
I-T-1	Verfügbarkeit	> 99 %	M	
	Identifikationspunkt	Ein Identifikationspunkt pro Objekttypus	M	Für Szenario I: Ein ID-Punkt je Regalfach Für Szenario II: Vier ID-Punkte auf Kommissionierwagen
I-T-2	Schutz gegen Feuchtigkeit und Fremdkörper	IP54	M	Schutz gegen Spritzwasser und Fremdkörper
I-T-3	Frequenzbereiche	24 verschiedene Frequenzen	M	30 kHz – 145 kHz (alle 5 kHz)
I-L-4	Reaktionszeit	< 4 s (< 2 s bei Einsatz optimierter Algorithmen)	S	Aktualisierungsfrequenz der Erfassung elektromagnetischer Signale
I-T-5	Temperaturbereich	0° bis 50°C	M	Kein Einsatz in TK-Bereichen o. Ä.
I-L-6	Anbringungsmöglichkeiten	fest montiert	S	Vorrichtung für die Montage am Kommissionierwagen oder Regal
I-T-7	Erfassungsreichweite	20x20 cm	S	Amplitude am stärksten in der Mitte des aktiven Feldes 20x20 cm) → Markierung des Mittelpunkts zur bestmöglichen Signalerfassung +/- 5 cm
I-T-8	Sendeleistung	@50-140 kHz: 42 dBµA/m in 10 m Entfernung	S	Einhaltung der gesetzl. Grenzwerte
I-L-9	Robustheit des Systems	Keine Störanfälligkeit gegenüber anderen Objekten	M	Tolerierung insb. von Mobiltelefonen
I-T-10	Energieversorgung	stationär	S	Akkuversorgung soll möglich sein (z.B.: 12 V)
I-L-11	Leistungsfähigkeit	Identifikation und Quantifizierung	M	Tolerierung unterschiedlicher Positionen, Gemengelagen etc. im Behälter

I-L-12	Erfassbare Materialien	Metall und Kunststoffe	M/S	Erkennung metallischer Gegenstände sowie getagter Kunststoffe (S)
I-L-13	Quittierungsfunktion	manuell	S	Für Szenario II: Bestätigung der korrekten Entnahmemenge des korrekten Artikels
I-L-14	Quittierungsbestätigung	Akustisch, visuell, haptisch	S	Für Szenario II: Die Quittierung muss in geeigneter Form bestätigt werden
I-L-15	Nachschubfunktion		C	Für Szenario I: Meldung an WMS oder Middleware, dass Lagerfach leer bzw. bei Mindestfüllmenge
I-L-16	Inventur		C	Zentrale Ausgabe der Behälterfüllmengen
I-L-17	Meldung von Fehlern/Ausfällen		C	Bei Fehlern und Defekten wird eine Meldung ausgegeben

Die Anforderungen im Bereich der IndLoc-Technologie beziehen sich einerseits auf technische Funktionalitäten und die Kompatibilität mit Umgebungsbedingungen in Produktionssystemen, andererseits auf prozessuale Bedarfe und damit zusammenhängende technische Leistungsgrößen. Erste umfassen bspw. die Sendeleistung oder Frequenz- und Temperaturbereiche, letztere die Robustheit gegenüber Störsignalen oder die Anwendbarkeit für bestimmte Objektkategorien. Nachdem die Erfassung von Kunststoffobjekten auf Basis des vorliegenden Technologieansatzes nicht möglich ist, wurde zumindest die Erfassung getagter Kunststoffobjekte als „soll“-Anforderung mit aufgenommen.

TABELLE 6: ANFORDERUNGEN IM BEREICH „MIDDLEWARE“

Nr.	Merkmal	Ausprägung	MoSCoW	Beschreibung
M-L-1	WMS-/ERP-Anbindung		C	Schnittstelle an WMS- bzw. ERP-Systeme
M-T-2	Performanz des Webservers	Updatezeiten < 1min	M	Hohe Kommunikationsanforderung für Zugriff auf Datenbanken und Informationsabgleich

M-L-3	Datenimport/-export	Einlesen und Ausgeben von Daten	C	Objekte, Füllstände und Zeitstempel, auch ohne Anbindung an weitere Systeme
M-L-4	Skalierbarkeit	> 1000	M	Für Szenario I: Einbindung weiterer Lagerfächer möglich

Wesentliche Aufgaben der Middleware sind die Datenverarbeitung und die informationslogistische Einbindung des Systems, woraus sich technische und logistische Anforderungen ableiten lassen, beginnend mit einer Basisperformanz des Webservers und die Skalierbarkeit des Systems über Datenpunkte bei Ein- und Auslesung bis hin zur potenziellen Einbindung in die in Produktionsumgebungen bestehenden WMS- und ERP-Systeme.

TABELLE 7: ANFORDERUNGEN IM BEREICH „GESAMTSYSTEM“

Nr.	Merkmal	Ausprägung	MoSCoW	Beschreibung
G-L-1	Nachrüstbarkeit/ Integrierbarkeit		M	Flexible Installationsmöglichkeit in bestehenden und neuen Anlagen
G-L-2	Unterstützung verschiedener Logistikprozesse	Kommissionierung, Einlagerung, Inventur, Nachschub	S	Bereitstellung verschiedener Prozesse neben der Kommissionierung
G-W-3	Anschaffungskosten	< 250 € je Fach	C	Maximale Kosten je Fach inklusive Gehäuse und Montage

Für das Gesamtsystem spielen übergeordnete logistische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle. Einerseits die für Unternehmen und insb. KMU darstellbaren Anschaffungskosten, welche in Relation mit dem durch das System geschaffenen Mehrwert stehen müssen. Andererseits die Anwendbarkeit auf unterschiedliche logistische Prozesse (jenseits der Kommissionierung als Hauptanwendungskontext) sowie die Integrierbarkeit und flexible Nachrüstbarkeit innerhalb bestehender und neuer Anlagen.

Basierend auf der Identifikation relevanter Einsatzszenarien und der Ableitung entsprechender Anforderungen im Einzelnen sowie als Gesamtsystem folgte im nächsten Schritt die Konzeptionierung und Umsetzung einer MVP-Lösung, welche im Folgekapitel erläutert wird.

4 Konzeptionierung und Umsetzung einer MVP-Lösung

Auf Grundlage der definierten Anforderungen wurden Umsetzungskonzepte für die verschiedenen Anwendungsfälle entworfen und priorisiert. Dabei wurde in zwei Stufen vorgegangen. Zunächst wurde ein einfacher Demonstrator entworfen, der zur Demonstration der Technologie und erste Tests mit Anwendungsszenarien verwendet werden konnte. Auf der Basis der damit gemachten Erfahrungen und den Vorgaben aus den anderen Arbeitspaketen sowie den Anwendungsszenarien wurde im weiteren Projektverlauf ein modulares System konzeptioniert, mit dem eine Vielzahl verschiedener Anwendungsszenarien abgedeckt werden kann. Schließlich wurde mit diesen Komponenten der anfangs erstellte Demonstrator nochmal überarbeitet, um so als MVP dieser Technologie zur Verfügung zu stehen. Dieses Vorgehen wurde im Verlauf durch theoretische Berechnungen und FEM-Simulationen zur Erzeugung und Erfassung der magnetischen Wechselfelder unterstützt.

Grundlage für SmaRackT ist die Indloc-Technologie des Fraunhofer IIS. Ursprünglich wurde diese Technologie für die Ortung von Objekten auf Basis von niederfrequenten magnetischen Feldern entwickelt. Für SmaRackT wird auf dieser vorhandenen Basis ein System entwickelt, um Objekte und Füllstände zu erkennen. Das SmaRackT-System besteht dabei aus vier Hauptkomponenten:

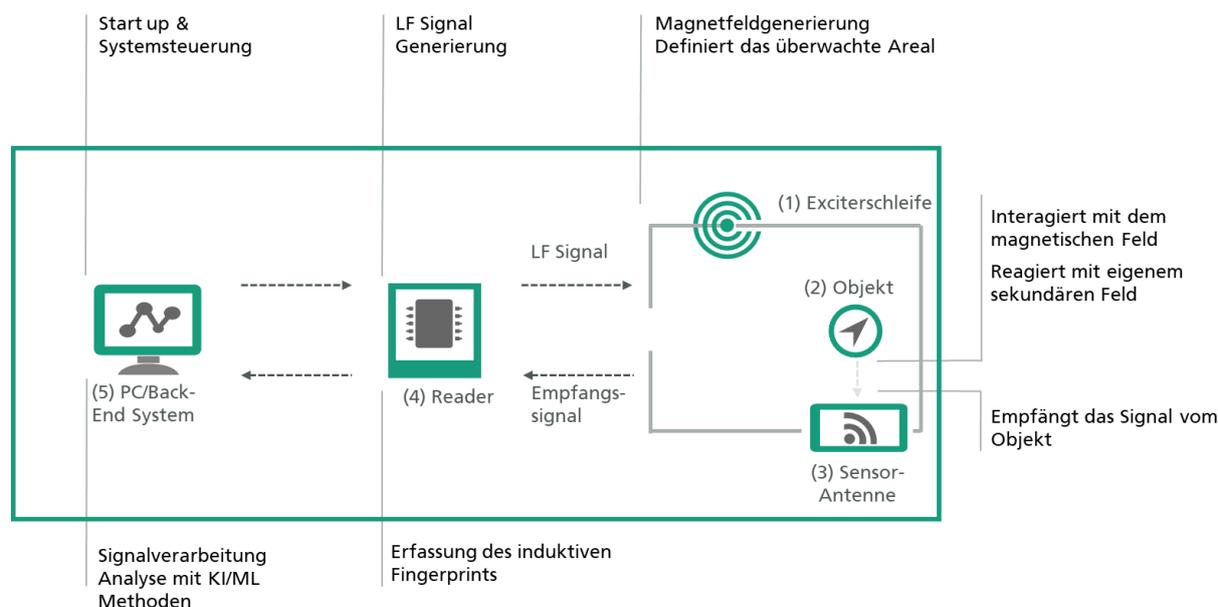


ABBILDUNG 4-1: HAUPTKOMPONENTEN DES SMARACKT-SYSTEMS

Die erste Komponente bildet eine Luftspule (1), der sogenannte Exciter (vgl. Abbildung 4-1). Dabei handelt es sich um einen stromdurchflossenen Leiter, der ein schwaches magnetisches Primärfeld im kHz-Bereich erzeugt. Hierdurch kann der zu überwachende Bereich definiert werden, der damit nicht an eine bestimmte Form gebunden ist und somit auch abstrakte Konturen annehmen kann. Das zu überwachende Areal wird also variabel in Größe und Geometrie definiert. Das durch den Exciter erzeugte magnetische Feld regt das zu untersuchende Objekt an. Dies ist vor allem bei leitfähigen oder permeablen Objekten möglich.

Das zu untersuchende Objekt (2) emittiert aufgrund der entstehenden Wirbelströme ein sekundäres Magnetfeld, das von Sensorantennen (3) im Exciter-Rahmen empfangen wird. Um einen induktiven Fingerabdruck zu erstellen, wird die Frequenz des Excitersignals variiert.

So können abhängig von den Objekteigenschaften unterschiedliche Sekundärfelder aufgezeichnet werden. Abbildung 4-3 zeigt ein Messbeispiel für die Unterscheidung von 4 symmetrischen Präzision-Stahlkugeln (Abbildung 4-2) mit jeweils wenigen μm unterschiedlichen Durchmessern (21,5 mm; 21,431 mm; 19,050 mm und 19,036 mm) durch das System. Die unterschiedlichen Farben im Graph zeigen dabei den Verlauf von Betrag und Phase des gemessenen Sekundärfeldes der einzelnen Kugeln bei verschiedenen Exciterfrequenzen.



ABBILDUNG 4-2: FOTO UNTERSUCHTE STAHLKUGELN

Die durch die Sensorantennen empfangenen Signale werden dann im Reader (4) vorverarbeitet und mit Bezug zur Exciterfrequenz an ein Back-End System (5) zur weiteren Analyse und Interpretation weitergegeben.

Mit Hilfe des SmaRackT-Systems können, je nach Aufbau und Prüfobjekt, Strukturunterschiede bis in den μm -Bereich erkannt werden. Auch die Unterscheidung von Objekten hinsichtlich einzelner Materialien, Sortenreinheit und Beschichtungen ist denkbar, wie Vorversuche zu diesem Projekt gezeigt haben.

21.500mm 21.431mm 19.050mm 19.036mm

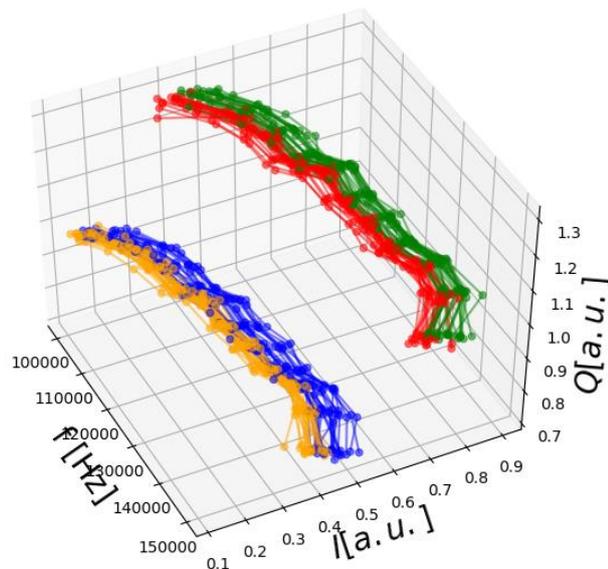
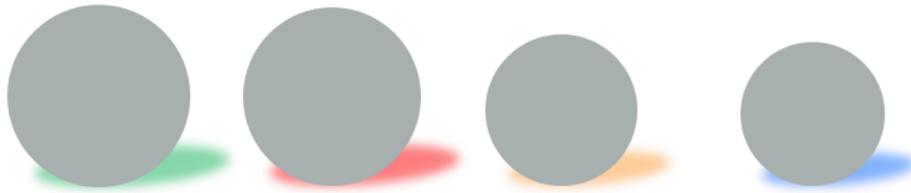


ABBILDUNG 4-3: „FINGERABDRUCK“ FÜR VERSCHIEDENE STAHLKUGELN

Für die Umsetzungskonzepte im Projekt SmaRackT mussten neben der mechanischen und konzeptionellen Umsetzung Lösungen für die Exciterspule und die Sensorspulen untersucht und für die neuen Anwendungsfälle optimiert werden, sodass gut weiter verarbeitbare bzw. zu interpretierende Signale erzeugt und aufgezeichnet werden können.

4.1 Erstellung eines Umsetzungskonzeptes

Für die Konstruktion des ersten Demonstrators wurden verschiedene Vorgaben gemacht:

- Einfach zu transportieren, um bei Pilotkunden und Messen verwendet zu werden
- Zwei separate Sensorfelder
- Sensorfelder dimensioniert für „übliche“ Kleinteilebehälter, z.B. Sichtlagerbox 230x150 mm
- Betrieb mit max. 230V/16A
- Demobetrieb auch ohne WMS-Anbindung an Standard PC möglich

Neben diesen funktionalen Anforderungen wurden zur weiteren Konzeptionierung Vorversuche mit verschiedenen Systemkomponenten durchgeführt.

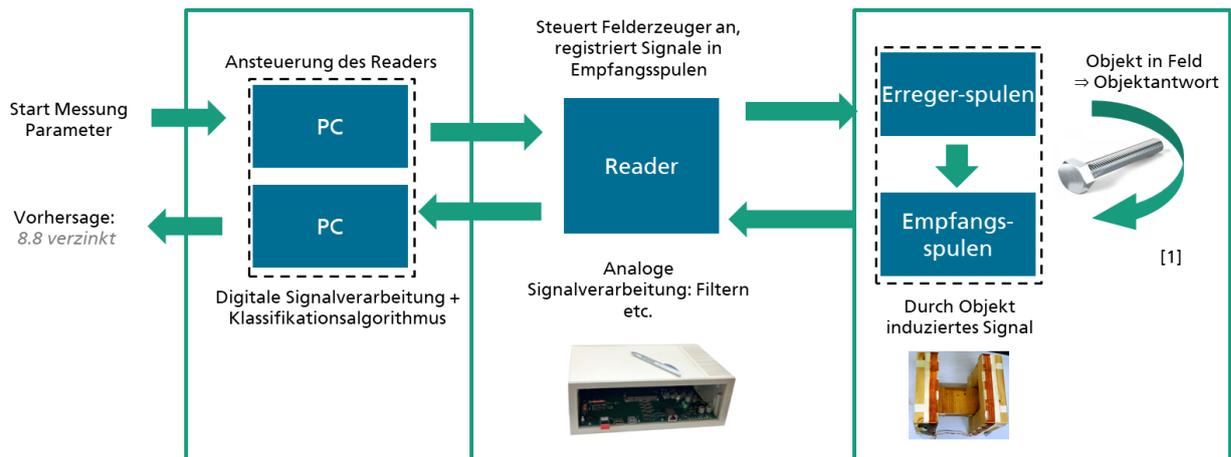


ABBILDUNG 4-4: MESSAUFBAU UND SIGNALVERARBEITUNG FÜR LABORVORVERSUCHE

Dabei wurden verschiedene Anordnungen und Bauformen hinsichtlich Exciterspule und Senserspulen simuliert, aufgebaut und getestet. Mit der in Abbildung 4-4 dargestellten Signalverarbeitungskette und Systemkomponenten wurde zunächst ein Helmholtzspulenpaar als Exciterspule (Erregerspulen) im Labor an einem Holzrahmen aufgebaut (Abbildung 4-5). Diese Spulenanordnung für den Exciter hat den Vorteil, dass in ihrem Innenraum ein homogenes Magnetfeld entsteht und so Materialien, die zur Untersuchung eingebracht werden, möglichst gleichmäßig diesem anregenden Magnetfeld ausgesetzt werden. Dadurch werden Nichtlinearitäten und Positions- sowie Richtungsabhängigkeiten reduziert, was sich auch auf die entstehenden Sekundärfelder teilweise überträgt.



ABBILDUNG 4-5: LABORAUFBAU MIT HELMHOLTZSPULENPAAR

Die Verwendung einer Helmholtzstruktur für den anregenden Exciter zeigte gute Ergebnisse, da hierdurch im Bereich des zu untersuchenden Objektes sehr homogene Felder entstehen. So konnten auch Untersuchungen zur Unterscheidung einzelner, nicht symmetrischer Objekte wie zum Beispiel einzelner Schrauben, abhängig von der Orientierung im Vergleich zu Objektgemengen durchgeführt werden, wie in (Abbildung 4-6) dargestellt.

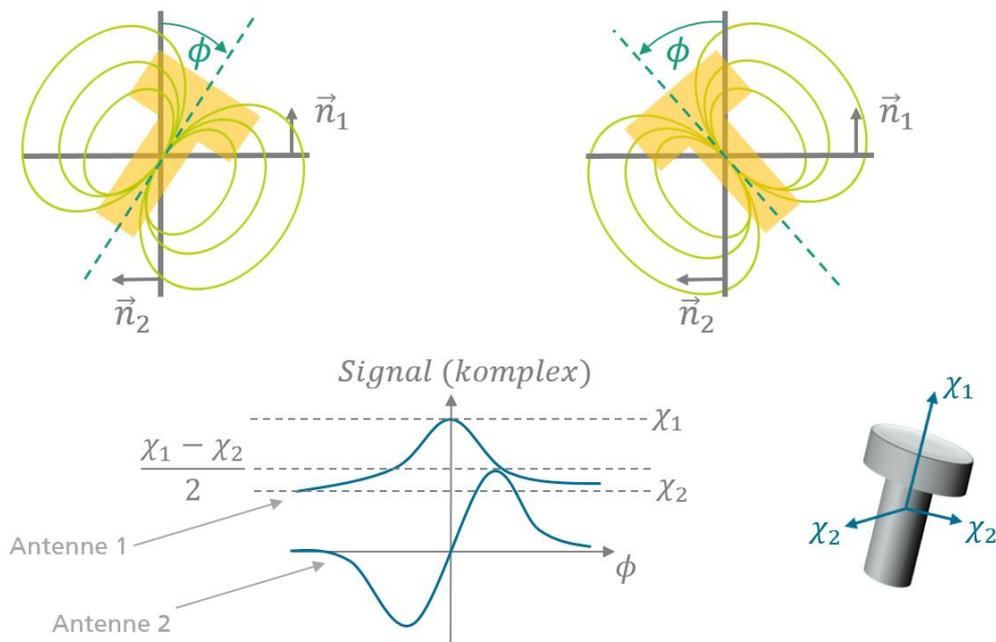


ABBILDUNG 4-6: BEISPIEL LAGEABHÄNGIGE SIGNALE BEI UNSYMMETRISCHEN OBJEKTEN

Jedoch ist dieser Aufbau mechanisch komplex und nur schwierig auf verschiedene Anwendungsfelder anzupassen. Ein Einsatz bzw. Umsetzung in Logistik-Szenarien scheint daher unwahrscheinlich.

Für die Sensorspulen (Empfangsspulen) wurden ebenfalls verschiedene Realisierungsmöglichkeiten diskutiert und erprobt. So kommen PCB-Spulen auf Leiterplatten (Abbildung 4-7), handgewickelte Drahtspulen oder industriell gefertigte Luftspulen (Abbildung 4-8) in verschiedenen Größen für die Umsetzung in Frage. Für die Auswahl sind neben der Produktionsmethode, die Kosten und Toleranzen bestimmt auch die Flexibilität hinsichtlich der Umsetzung verschiedener Anwendungsszenarien und die erzielbare Signalgüte entscheidend. Dabei sind Parameter wie Windungszahl und Windungswiderstand sowie wirksame Fläche gegeneinander abzuwägen.



ABBILDUNG 4-7: BEISPIEL PCB-SPULE MIT ANSTEUERUNGSELEKTRONIK



ABBILDUNG 4-8: BEISPIEL INDUSTRIELL GEFERTIGTE LUFTSPULE

Neben der Auswahl der Senserspulen ist auch die Anordnung von Exciter und Senserspulen zueinander sowie die Positionierung der Messobjekte zu untersuchen. Dazu wurden zunächst Berechnungen und Simulationen mit dem Ziel der Maximierung und Homogenisierung der Sekundärfelder durchgeführt. Zudem wurden Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit der Sekundärfelder für Einzelobjekte sowie verschiedene Objektverteilungen innerhalb von Kleinteilebehältern durchgeführt. Abbildung 4-9 zeigt eines der Simulationsmodelle im FEM-Feldsimulator (CST Studie Suite) mit Exciterspule und zwei Kleinteilebehälter.

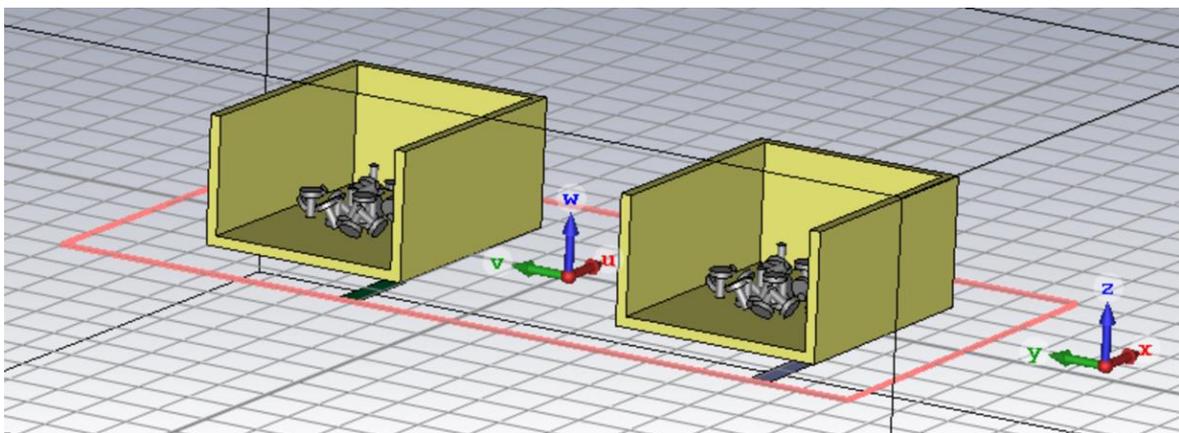


ABBILDUNG 4-9: SIMULATIONSMODEL FÜR AUFBAU MIT ZWEI KLEINTEILEBEHÄLTERN

Mit diesen FEM-Simulationsmodellen konnten verschiedene Anordnungen aus Exciter- und Senserspulen bei unterschiedlichen Behältergrößen, Objektmaterialien und Füllgraden prinzipiell untersucht werden. Abbildung 4-10 zeigt exemplarisch einen Feldverlauf für zwei Behälter.

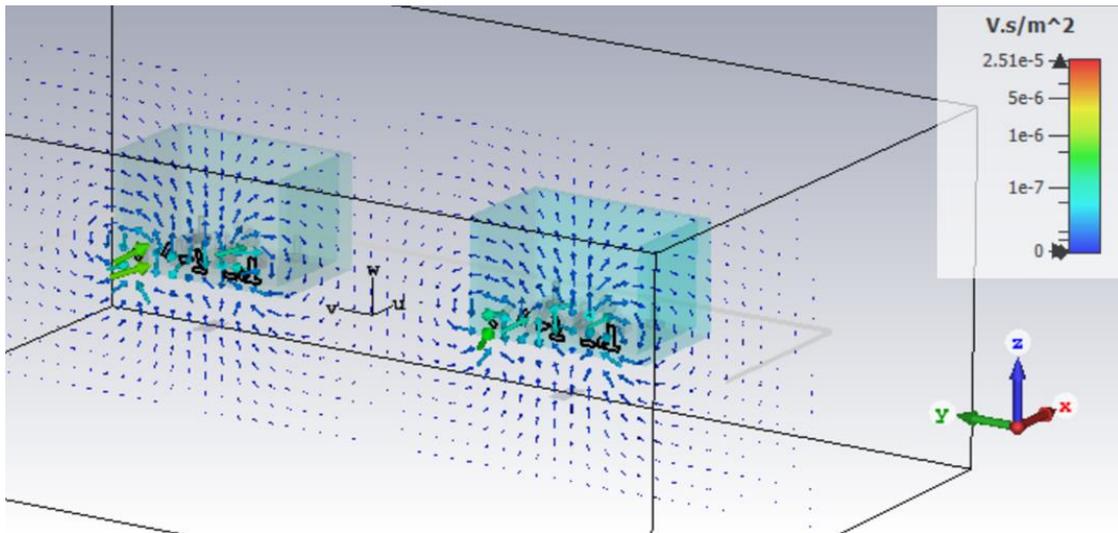


ABBILDUNG 4-10: FEM SIMULATION FELDVERTEILUNG BEI HOMOGENER BEHÄLTERFÜLLUNG

Mit den Simulationsergebnissen und den grundlegenden Laboruntersuchungen konnte das mechanische und elektrische Konzept für einen ersten Demonstrator Aufbau und später ein MVP entwickelt werden.

4.2 Erweiterung der Nahfeldortungstechnologie

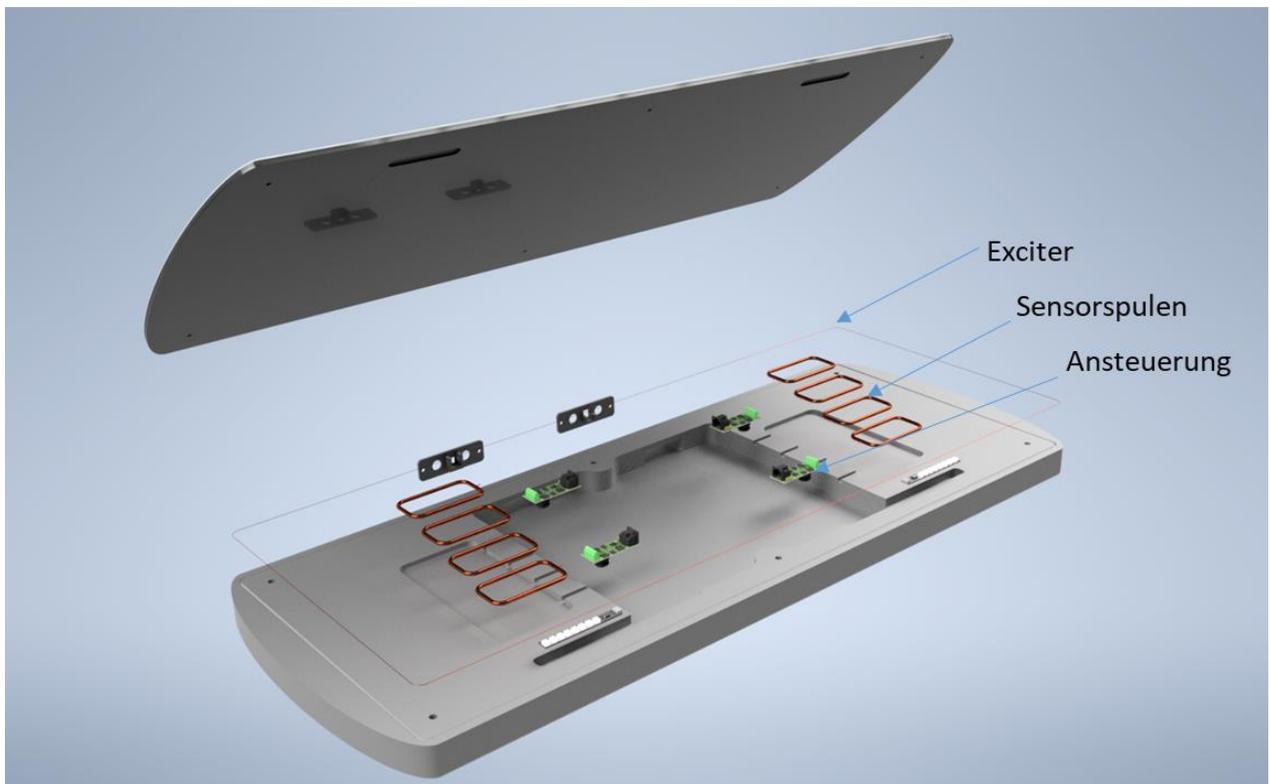


ABBILDUNG 4-11: SCHEMATISCHER AUFBAU ERSTER DEMONSTRATOR

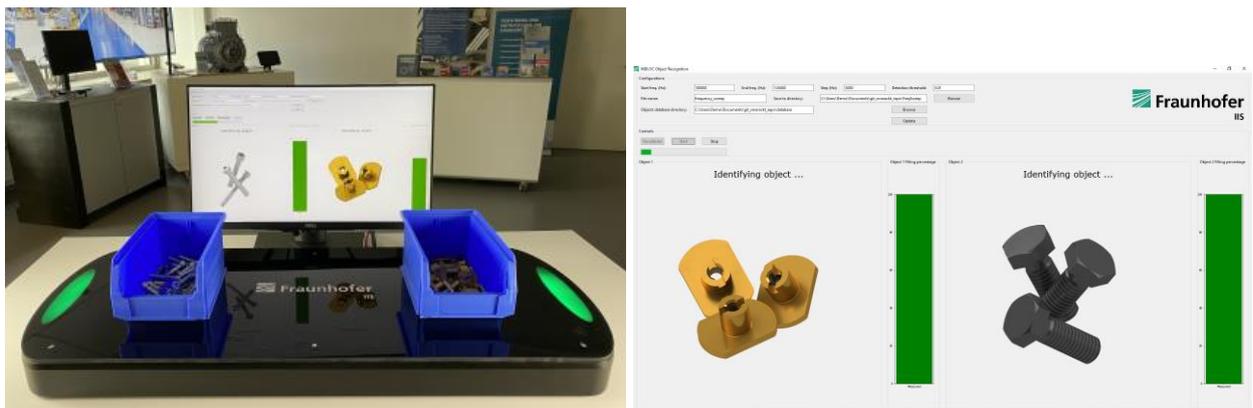


ABBILDUNG 4-12: UMSETZUNG ERSTER DEMONSTRATOR

Die Erweiterung der induktiven Nahfeldortungstechnologie auf Grundlage der Voruntersuchungen wurde als erster Demonstrator umgesetzt. Abbildung 4-11 zeigt als Explosionszeichnung den dazu umgesetzten Aufbau. Dabei wurde eine mechanische Konstruktion für zwei Messflächen entworfen, die leicht zu transportieren ist. Als Exciter wurde eine große, umlaufende Windung auf Grundlage der Simulationen gewählt, für die beiden Messflächen wurden jeweils 4 Sensorspulen vorgesehen, um auch ungleichmäßige Materialverteilungen oder kleinere Objekte auflösen zu können. Zur Ansteuerung bzw. Signalerfassung der Sensorantennen wurde das in Abbildung 4-13 dargestellte Modul entworfen. Mit diesem neuen Hardwareboard ist es möglich, beliebige Sensorantennen einzeln oder im Paar an das Indloc-System anzuschließen. Damit ist das System für andere Konzepte und Designs modular erweiter- und konfigurierbar. Das als Demonstrator aufgebaute System eignet sich vor allem zur prototypischen Realisierung der Einsatzszenarien III: Qualitätssicherung Produktion und IV: Qualitätssicherung Logistik. Der Demonstrator hat dabei eine Abmessung von 950x370x8 mm (LxBxH) mit zwei aktiven Bereichen mit jeweils einer Fläche von 150x250 mm.

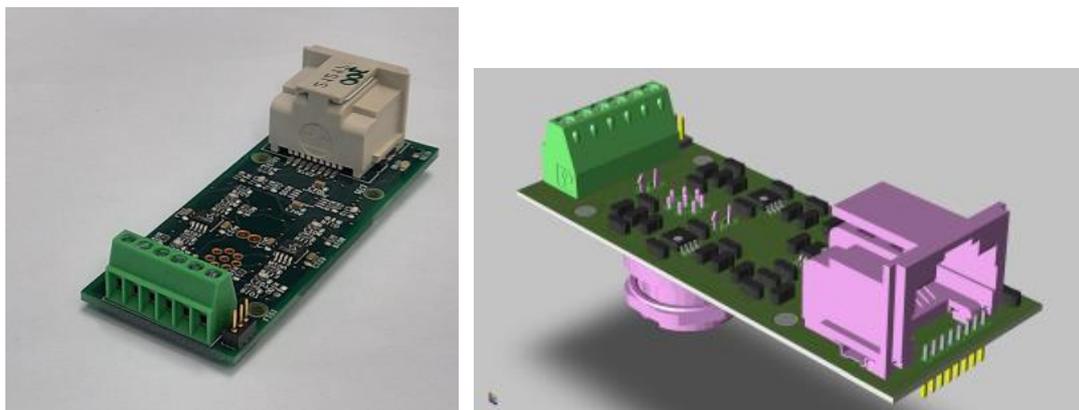


ABBILDUNG 4-13: ANSTEUERUNGSMODULE FÜR SENSORSPULEN

Darüber hinaus wurden an der Indloc-Mikrocontroller- und FPGA-Firmware sowie an der Python-PC-Software die notwendigen Änderungen vorgenommen, um die neuen Ansteuerungsmodule mit weiteren Sensorantennen im System zu unterstützen.

Abbildung 4-14 gibt dazu einen Überblick über die einzelnen Systemkomponenten aus Software-Sicht. Für die Weiterverarbeitung der gemessenen Objektdaten wurde eine Messdatenbank implementiert. Für direktes Feedback bzw. Demonstration kann aber auch in der Bedienoberfläche eine unmittelbare Interpretation dargestellt werden.

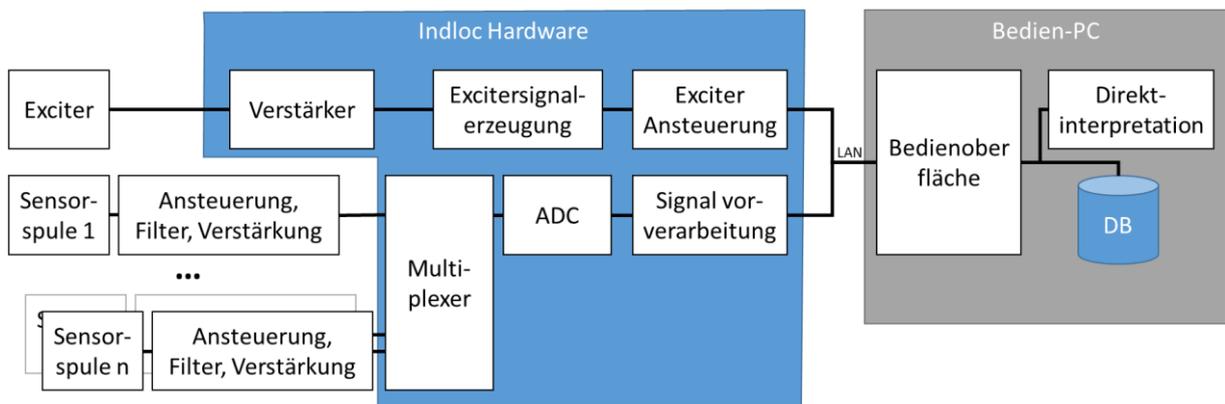


ABBILDUNG 4-14: ANGEPASSTES SIGNALFLUSS-BLOCKDIAGRAMM FÜR INDLOC-SYSTEM

Für die flexible Integration der Technologie in verschiedene Anwendungsszenarien wurde das System weiter modularisiert und verkleinert, wodurch ein Einbau der Antennenmodule auch in Regalfachböden oder Kommissionierwagen möglich wurde.

Dazu wurde ein Modul (Abbildung 4-15) mit den Abmessungen 360x250x2,5 mm (LxBxH) entwickelt, das in Regalfachböden oder anderen mechanische Aufbauten integriert werden und beliebig für mehrere Erfassungsplätze kaskadiert werden kann, um Lösungen für die Einsatzszenarien I Regalentnahme (Abbildung 4-16) und II Kommissionierwagen zu bieten.

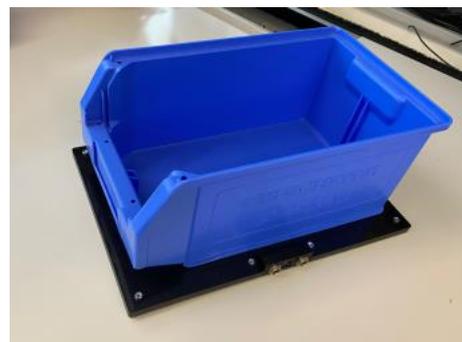
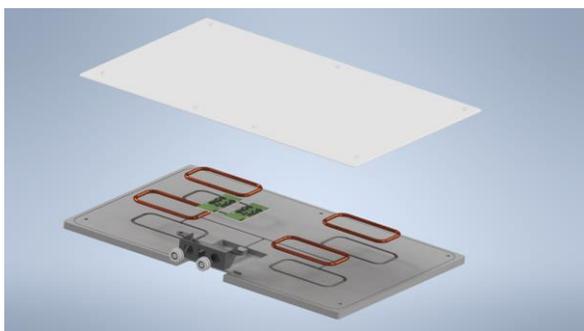


ABBILDUNG 4-15: ENTWURF UND UMSETZUNG EINZELMODUL EXCITER MIT SENSORANTENNEN

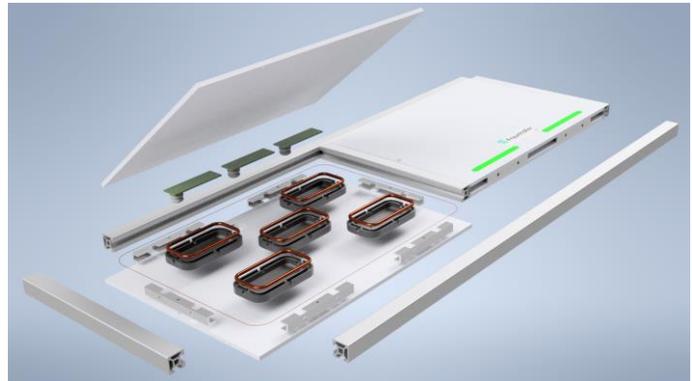
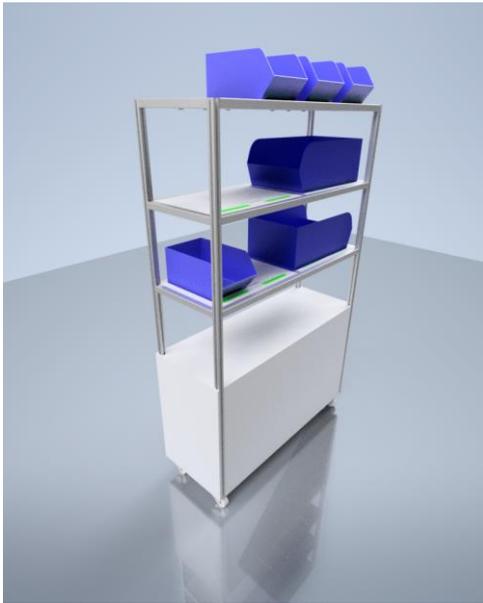


ABBILDUNG 4-16: ENTWURF AUFBAU AM REGAL

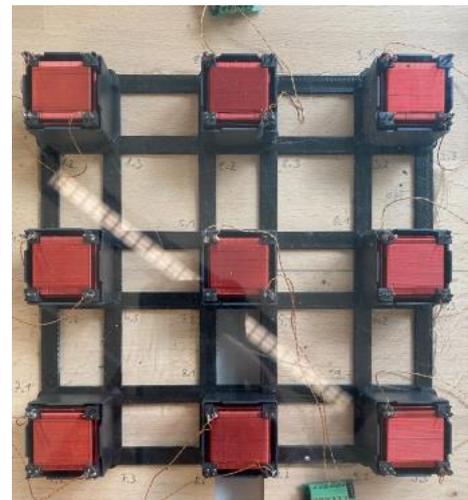


ABBILDUNG 4-17: ANTENNENARRAY ZUR ERFASSUNG UNTERSCHIEDLICHER BEHÄLTERGRÖßEN

Für die Erfassung von unterschiedlichen Behältergrößen wurden Aufbauten mit Sensorantennenarrays (Abbildung 4-17) entwickelt und im Labor getestet, um auch solche Anwendungsfälle abbilden zu können.

5 Entwicklung eines Verfahrens zur Objekterkennung

Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Objekterkennung wurde ein methodischer Ansatz auf Basis des CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data-Mining) gewählt. Dabei wurde auf Basis der während der Anforderungserhebung (Siehe Kapitel 3) geführten Gespräche mit den Anwendungspartnern ein sukzessive wachsende Wissensbasis über die Anwendungsdomäne und den Objektbestand aufgebaut. Dies erfolgte mit den Anwendungspartnern in einer iterativen Schleife analog zu den Phasen *Business Understanding* und *Data Understanding* (siehe Abbildung 5-1).

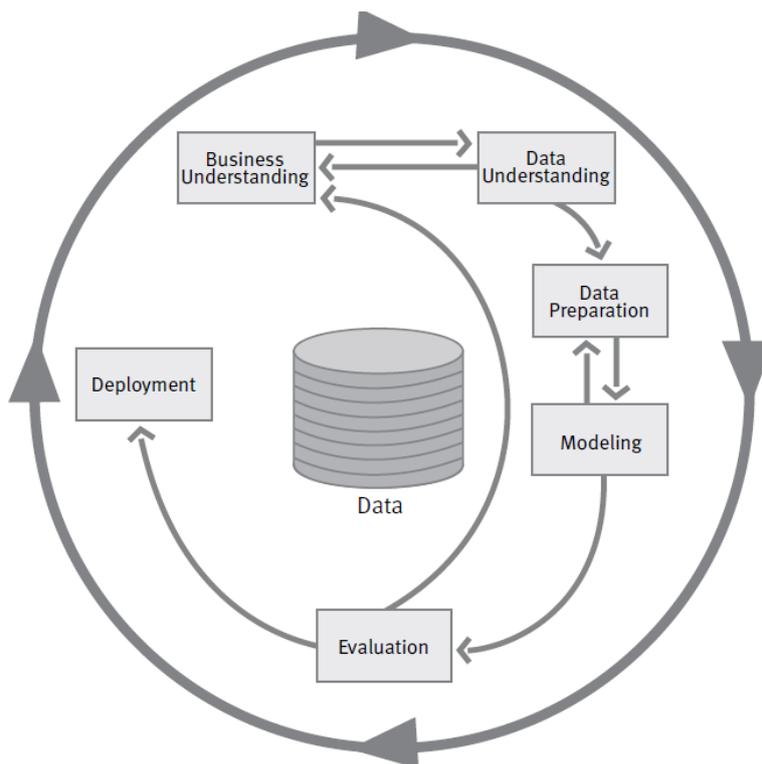


ABBILDUNG 5-1: CRISP-DM VORGEHENSMODELL [THE-04]

Anschließend wurde mit dem in Kapitel 4 beschriebenen System Messungen der Objekte mit unterschiedlich gefüllten Ladungsträgern erstellt. Tabelle 8 stellt eine Übersicht über die im Zuge der Messkampagnen erstellten Messungen dar. Dabei wurden für spezifische *Objekte* (*O*) jeweils ein *Batch* (*B*) mit 20 Messungen pro Mengenstufe aufgenommen. Der Füllstand des Ladungsträgers variiert dabei in prozentualer Stufung mit 10 Abstufungen.

TABELLE 8: ÜBERSICHT ÜBER DIE MENGENMESSUNGEN ZU DEN OBJEKTEN

Füllmenge	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Messungen (O x B)	120 (6x20)	120 (6x20)	120 (6x20)	120 (6x20)	120 (6x20)	520 (26x20)	120 (6x20)	120 (6x20)	120 (6x20)	520 (26x20)

In der ersten Iteration wurden zunächst Messungen für alle Objekte mit maximalen Füllstand erfasst, da die maximale Superposition der Wirbelströme eine maximale Varianz in der spektralen Charakteristik des Objektbestands zur Folge hat. Anschließend wurde bei

ausgewählten Objekten weitere Messungen mit abgestuften Füllständen vorgenommen, damit die spektralen Merkmale auf eine mengenabhängige Varianz hin untersucht werden konnten. Weitere Details sind in Kapitel 5.4 beschrieben. Im Zuge der Entwicklung einer Data Augmentation Umgebung wurden anschließend weitere Referenzmessungen mit einem Füllstand von 55 % vorgenommen, damit die notwendigen Messdaten für die Interpolation weiterer Füllstände zur Verfügung stehen.

Anschließend wurde in einem iterativen Prozess mittels der Benchmarking Umgebung unterschiedliche Klassifizierungsmodelle mit wechselnden Merkmalsätzen trainiert und anhand der Anwendungsfälle evaluiert. Die untersuchten Anwendungsfälle wurden in Abstimmung mit den Projektbegleitenden Ausschuss ausgewählt und sind in Kapitel 3 im Detail beschrieben.

5.1 Erfassung und Augmentierung von Daten

Die Grundlage für die Ermittlung eines optimalen Verfahrens zur Erkennung- und Quantifizierung von Objekten sind möglichst viele und qualitativ ausreichend gute Messdaten. Dabei ist die Qualität einer Messung maßgeblich von den Rahmenbedingungen bzw. Varianzen, unter denen die Messung durchgeführt wurde, abhängig. Um diese Varianzen zu berücksichtigen und um unterschiedliche Messungen untereinander zuordnen zu können, wurde zunächst ein Messprozess definiert. Der Messprozess deckt typische Grenzfälle ab, wodurch die Praxistauglichkeit des Systems für den Anwender erhöht wird. Abbildung 5-2 stellt die unterschiedlichen Grenzfälle dar, die während des Messprozesses mit Ladungsträgern berücksichtigt werden.

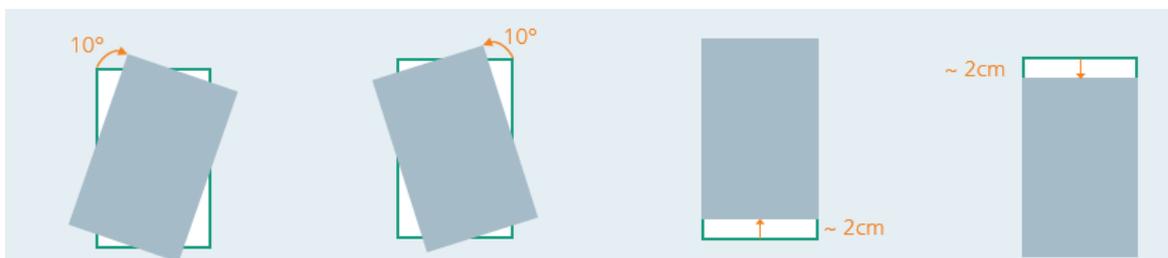


ABBILDUNG 5-2: GRENZFÄLLE MIT LADUNGSTRÄGERN (ROTATION UND VERTIKALER VERSATZ)

In einem ersten Schritt wurde eine Grenzfalluntersuchung durchgeführt, um aus optimalen Messungen spektrale Varianzen auf Basis der untersuchten Grenzfälle ableiten zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in ein Softwaremodul für die Augmentierung der Grenzfallmessungen eingegangen. Eine weitere Entropiequelle stellt die sich typischerweise bei teilgefüllten Ladungsträgern ergebende Kontaktvarianz dar. Dabei kann bei leitfähigen Schüttgütern der wirksame Wirbelstromwiderstand aufgrund der unterschiedlichen Kontaktwiderstände und -flächen stark variieren. Abbildung 5-3 stellt einen teilweise gefüllten Ladungsträger mit variierenden Kontaktflächen dar. Damit diese Varianzen in der Messkampagne berücksichtigt werden kann, wurden typisierte Messdatenpools mit bis zu 20 Messungen pro Mengenstufe, sowie variabler Durchmischung, gebildet.



ABBILDUNG 5-3: LADUNGSTRÄGER MIT KONTAKTVARIANZ

Abbildung 5-4 stellt die spektralen Verläufe realer (orange), originaler (grün) und augmentierter (blau) Messungen dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Modellierung der Abweichungen im Messprozess durch die spektralen Varianzen des Submoduls zur Augmentierung abgebildet werden können.

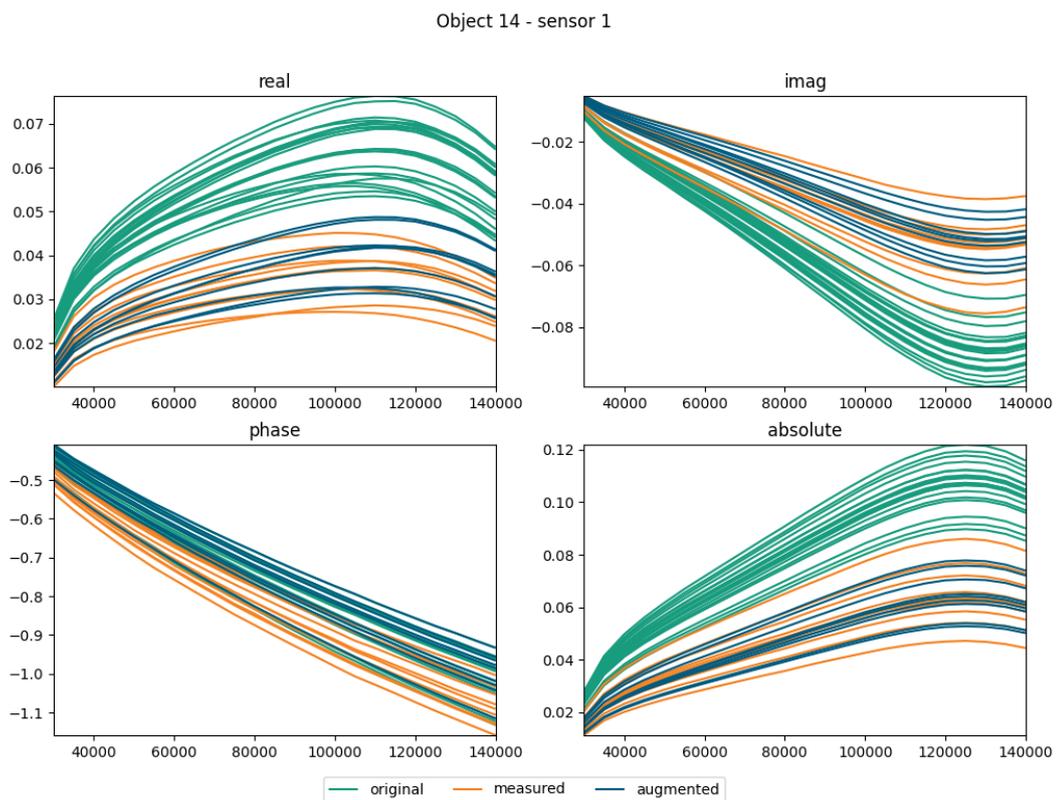


ABBILDUNG 5-4: DATA AUGMENTATION DER GRENZFÄLLE

Da der Messprozess insbesondere bei der Erfassung unterschiedlicher Stufen von Füllständen aufwändig ist, wurde hierfür eine separate Subroutine zur Interpolation einzelner Stufen

entwickelt. Abbildung 5-5 ist im Zuge der Analysen der spektralen Merkmale und der Abhängigkeit zu unterschiedlichen Füllständen entstanden. Dabei setzt ab einem Füllstand von 50 Prozent ein deutliches Sättigungsverhalten im Verlauf der spektralen Maxima ein. Dies lässt sich mit der fortgeschrittenen Überdeckung des Messfeldes durch bereits vorhandene Objekte erklären, was dazu führt, dass betragsmäßige Mengenänderungen nur eine geringere spektrale Varianz zur Folge haben.

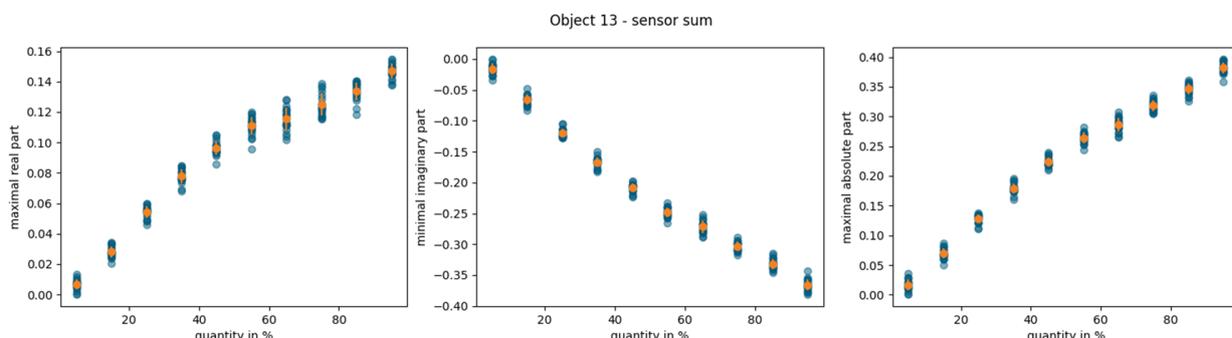


ABBILDUNG 5-5: VERLAUF DER SPEKTRALEN MAXIMA MIT VARIABLEN FÜLLSTÄNDEN

In der Konsequenz muss die Routine zur Augmentierung unterschiedlicher Füllstände insbesondere die mengenabhängigen Varianzen der spektralen Verläufe berücksichtigen. Die Abbildung 5-6 bzw. Abbildung 5-7) stellen die Interpolationsergebnisse der Subroutine zur Quantifizierung der Mengenmessungen auf Basis zweier Messdatenpools dar. Hier wurden für die Interpolation ein Pool aus 3 Messungen mit einem Füllstand von 45 %, sowie ein Pool aus 4 Messungen mit einem Füllstand von 95 % gebildet.

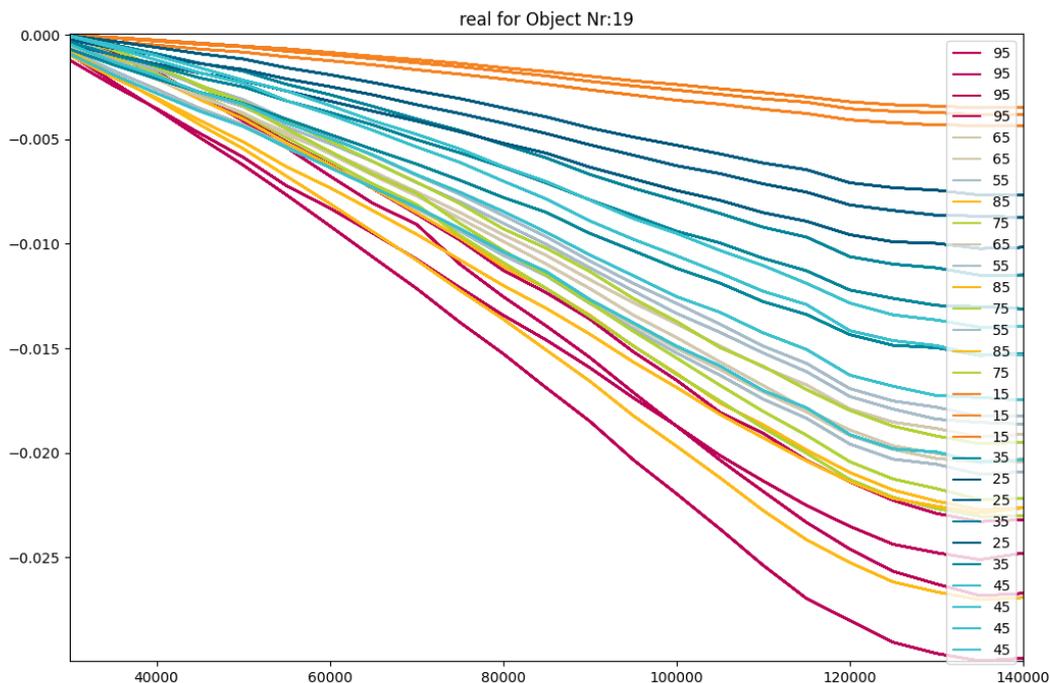
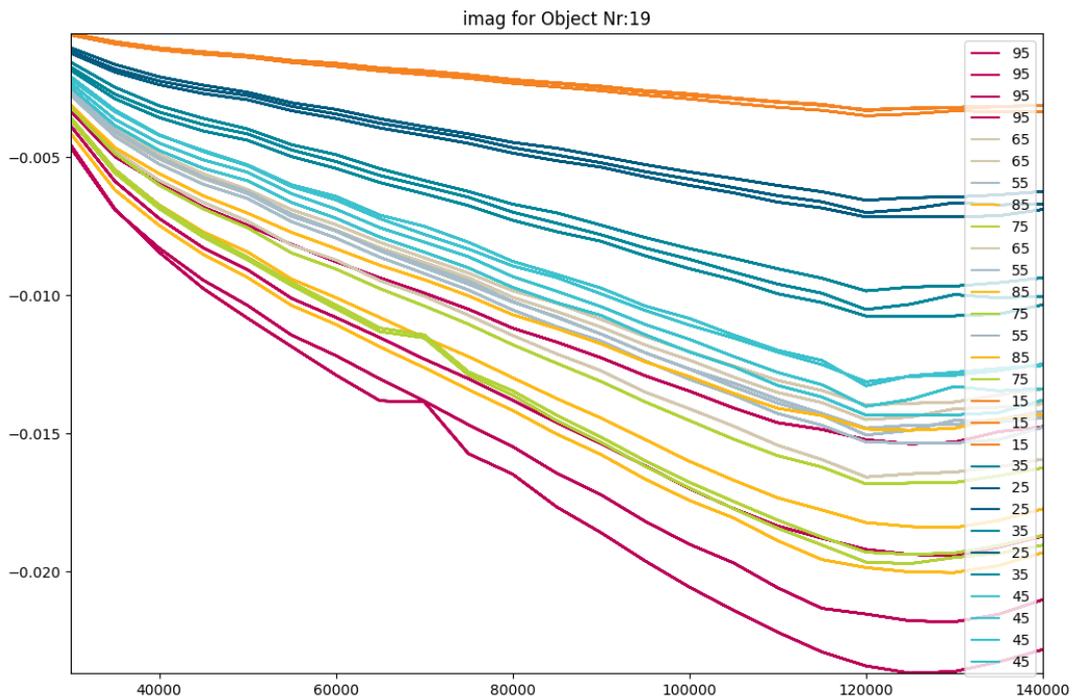


ABBILDUNG 5-6: INTERPOLATIONSERGEBNIS DATA AUGMENTATION REALLEISTUNGSANTEIL



**ABBILDUNG 5-7: INTERPOLATIONSERGEBNIS DATA AUGMENTATION
IMAGINÄRLEISTUNGSANTEIL**

Der Prozessablauf zum Anlernen neuer Objekte unter Berücksichtigung der Data Augmentation kann in Abbildung 5-8 eingesehen werden. Dabei müssen zunächst zwei Pools an Referenzmessungen erstellt werden. Die Pools enthalten Messungen mit den Füllständen 50 bzw. 100 Prozent und ermöglichen eine abschnittsweise Interpolation der Zwischenstände. Hierfür werden zufällige Messungen aus den Pools verwendet, wodurch Varianzen aufgrund der unterschiedlichen Durchmischung innerhalb der Ladungsträger berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund von eingekoppelten Störquellen (bspw. große Maschinen oder Vibrationen) in der Praxis starke Verzerrungen der Messdaten vorhanden sein können. Deshalb ist im Prozessablauf ein separater Validierungsschritt vorgesehen, damit solche Messdaten frühzeitig identifiziert und aussortiert werden können. Anschließend werden durch die Data Augmentation weitere Messpunkte abschnittsweise interpoliert und dem Trainingsdatensatz hinzugefügt. Abgeschlossen wird der Prozess mit dem Anlernen der Klassifizierungsmodelle und dem anschließenden Speichern im ONNX (Open Neuronal Network Exchange) Format. Dabei stellt ONNX einen Standard zum Speichern und portablen Austauschen von Machine Learning Modellen dar [ONN-22]. Diese werden anschließend in die Demonstrator-Plattform geladen (siehe Kapitel 6).

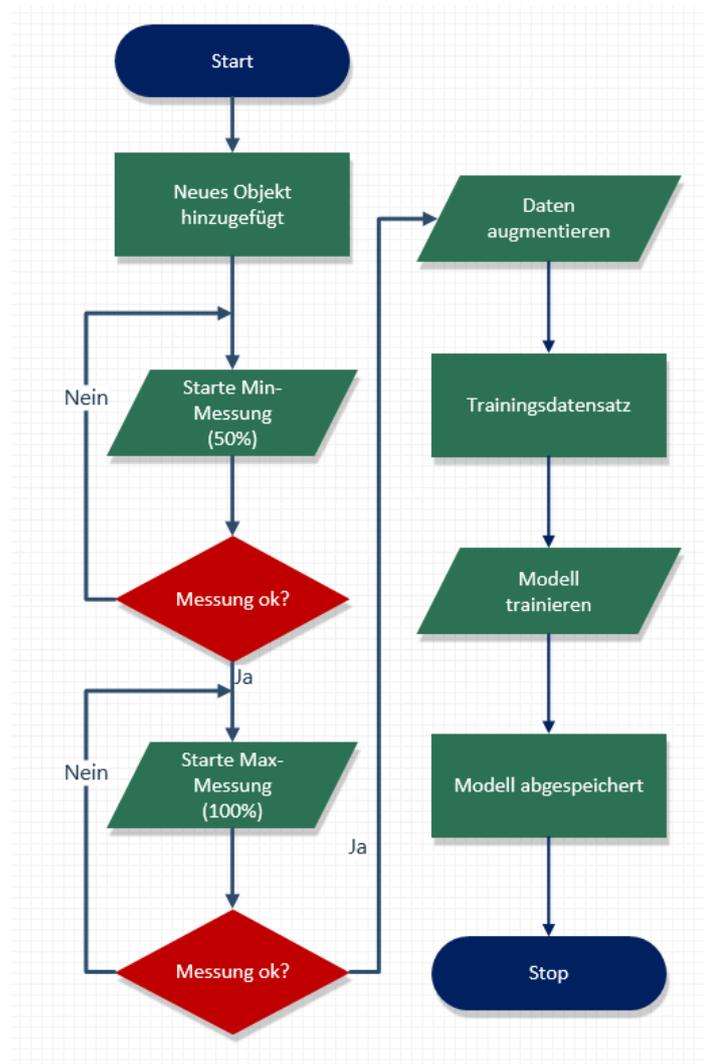


ABBILDUNG 5-8: PROZESSDIAGRAM ZUM ANLERNEN NEUER OBJEKTE

5.2 Erstellung und Bewertung der Datensätze

In diesem Kapitel werden die untersuchten Objekte, deren Eigenschaften und die konstruktiven Maße zwecks Erstellung der Datensätze detailliert beschrieben. Dabei wurden die Messdaten bei Schüttgütern mit dem in Kapitel 5.1 vorgestellt Messprozess erstellt. Ergänzt wurde diese mit Einzelmessungen, die insbesondere für die fertigungsnahen Anwendungsszenarien von Relevanz sind. Bei den Objekten in Tabelle 8 wurden Messungen mit unterschiedlichen Füllständen durchgeführt. Dabei wurde der Objektbestand so gewählt, dass diese in unterschiedliche Kategorien zusammengefasst werden können. Bei den Kategorien handelt es sich um:

- Objekte mit gleichen konstruktiven Maßen und unterschiedlichen Materialien
- Objekte mit gleichen Materialien und unterschiedlichen Längen
- Objekte mit gleichen Materialien und unterschiedlichen Radien

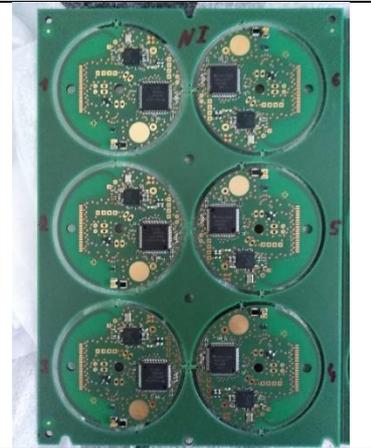
TABELLE 9: FRAUNHOFER-DATENSÄTZE

Id	Bezeichnung	Material	Länge in mm	Radius in mm
1	Senkschraube Kreuzschlitz H (Phillips), A2, M6x25	Austenitic steel (A2)	25	11
2	Sechskantschraube, Stahl 8.8, blank	Bare steel (iron + medium carbon)	25,3	13
3	Sechskant, Messing, M10	Brass	8	17
4	Sechskantschraube, Stahl 10.9, blank, M8x20	Bare steel	25,3	13
5	Sechskantschraube M8, Messing, blank	Brass	25,3	13
6	Sechskantschraube, Stahl A4, blank	Austenitic steel (A4)	25,3	13
7	Senkschraube Innensechskant, A2, M6x25	Austenitic steel (A2)	25	13,44
8	Sechskantschraube, Stahl A2, blank	Austenitic steel (A2)	25,3	13
9	Sechskant, Stahl 8, verzinkt, metrisches Feingewinde M12x1	Galvanized bare steel (iron + carbon)	10	19
10	Sechskant, Stahl 8, verzinkt M12	Galvanized carbon steel	10,8	18
11	Sechskant, Edelstahl A2, Größe M12	Austenitic steel (A2)	10,8	18
12	Messing?	Brass	12	?
13	Stahl verzinkt? 8.8	Galvanized carbon steel	69	16
14	Stahl verzinkt? 8.8	Galvanized carbon steel	38	13
15	Stahl 10.9 blank? M8x20	Bare steel (iron + medium carbon)	27,5	13

Weiterhin wurden separate Datensätze mit den Objekten der Firmen Lorenz GmbH und Elabo GmbH erstellt. Die Motivation hierfür ist die anwendungsfallspezifische Evaluierung der Machine Learning Modelle für die unterschiedlichen Anwendungsszenarien aus Kapitel 3.1.

Für das Anwendungsszenario von Lorenz wurden Einzelmessungen mit den Objekten durchgeführt, da die Kernfrage darin bestand, ob mittels eines induktiven Systems Fertigungsfehler erkannt werden können. Die Tabelle 10 stellt eine Übersicht über die von der Firma Lorenz zugeschickten Objekten dar. Die Objekte *W1* – *W4* sind montagefertige Wasserzähler mit unterschiedlichen Bestückungsfehlern. Bei den Varianten *N1* – *N3* handelt es sich um Platinen mit systematischen Bestückungsfehlern. Weiterhin wurde noch Datensätze für die dazugehörigen Hydrauliken und Wasserzähler inklusive Hydrauliken erstellt.

TABELLE 10: LORENZ OBJEKTE

		
Wassermähler standalone W1 – W4	Hydrauliken	Wassermähler inklusive Hydrauliken
		
Platine Variante N1	Platine Variante N2	Platine Variante N3

Zusammenfassend lassen sich die Fehlervarianten wie folgt einteilen:

- W1: LP Rev.4 ohne 32 kHz-Oszillator CC13
- W2: LP R5a vollständig bestückt (Referenz)
- W3: **LP V06** max. Unterschied Referenz
- W4: LP Rev. 4 ohne MR-Sensor

Das Anwendungsszenario von Elabo beinhaltet die Objektbestandsüberwachung in fertigungsnahen Kleinteilelagern. Tabelle 11 stellt eine Übersicht über den Objektbestand dar, der dort in typischen Fertigungsprozessen eingesetzt wird. Dabei wurden für die Objekte Schüttgutmessungen mit variablen Füllständen durchgeführt. Die Objekte O25 – O28 sind konstruktiv sehr ähnliche und unterscheiden sich lediglich in der Reihung bzw. Kontaktierung der Klemmen. Hierbei besitzt O25 – O26 jeweils eine 5er Reihung und unterscheiden sich nur von der Kontaktierung, d. h. mit und ohne Stift. O27 – O28 besitzen eine 3er Reihung und unterscheiden sich ebenfalls lediglich in der Kontaktierung. Die Objekte O21 – O23 sind BNC-Anschlussklemmen und unterscheiden sich konstruktiv nicht voneinander. Die Motivation hierfür bestand darin zu untersuchen, ob die Objektchargen aufgrund geringfügiger Varianzen in der

Kontaktbeschichtung, voneinander unterscheidbar sind. Die restlichen Objekte (O16 – O20 und O24) unterscheiden sich in ihrem konstruktiven Aufbau stark voneinander, weshalb hier primär die Mengenschätzung getestet wurde.

TABELLE 11: ELABO OBJEKTE

	
<p>O25 – O28 Steck-Anschlussklemmen</p>	<p>O21 – O23 BNC-Anschlussklemmen</p>
	
<p>O16 – O20 u. O24 Diverses Elektroinstallationszubehör</p>	

5.3 Analyse der Spektralen Merkmale

Die technologische Vorarbeit für die Auswahl geeigneter Merkmale zur Objekt- und Mengenbestimmung wurde durch O'Toole [O'T-18] gesetzt. In der Abbildung 5-9 sind die spektralen Verläufe eines induktiven Systems zur eigenschaftsbasierten Sortierung von Materialien im Recyclingprozess beschrieben. Hierbei ist gut zu erkennen, wie bei der Betrachtung von simplen Objekten (geschredderte Teilchen mit variablem Durchmesser) das spektrale Minimum der imaginären Leistungsdichtekomponente eine negative Korrelation zur Leitfähigkeit aufweist. Gleichzeitig existiert eine entsprechende spektrale Abhängigkeit zum Radius der Objekte.

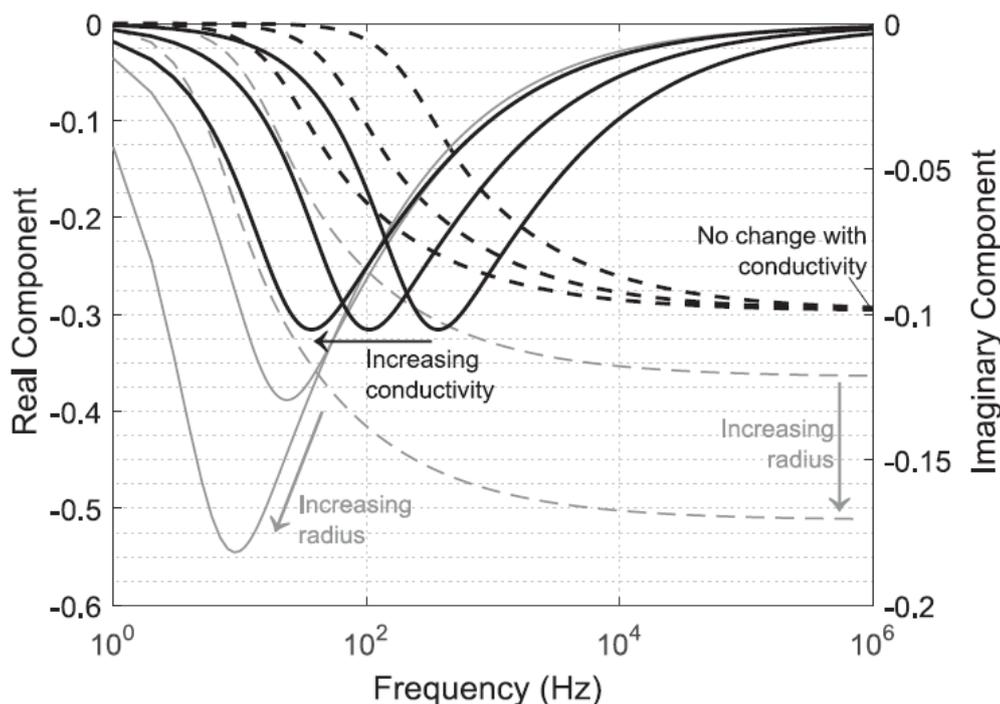


ABBILDUNG 5-9: MAGNETISCH INDUZIERTE SPEKTRALVERLÄUFE [O'T-18]

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit der Erkennung von menschlicher Bewegung unter Ausnutzung induktiver Sensoren. Hierbei wurden bisher insbesondere die Merkmale wie Extremwerte, Mean, Median, Standardabweichung, Lower Quartil, Upper Quartil, die Schiefe, die Kurtosis und die Korrelation zwischen den Signalquellen verwendet [NEG-21].

Untersuchungsgegenstand dieses Kapitels ist die Eignung der in dem Forschungsantrag vorgeschlagenen, sowie die in der Literatur beschriebenen, Merkmale für den Anwendungsfall der Objekt- und Mengenbestimmung. Die Evaluation dieser Merkmale erfolgte mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Fraunhofer Datensatz. In einem ersten Schritt wurde experimentell überprüft, ob die in Abbildung 5-9 beschriebenen Zusammenhänge für die komplexe Objektbestimmung verwendet werden können. Hierfür wurden hochaufgelöste Messungen mit einem statischen Füllstandsniveau und mit einer Auflösung von 500 Hz erstellt. Anschließend wurde der Verlauf von charakteristischen Merkmalen objektspezifisch betrachtet.

Abbildung 5-10 stellt den Verlauf der Minima des imaginären Leistungsdichtespektrum dar. Dabei ist der Durchschnitt der Minima über die schwarzen Punkte visualisiert. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass Objekte mit einem hohen Leitwert, bspw. bestehend aus Messing (2, 4 und 11) eine signifikant geringere Frequenz des spektralen Minimums besitzen. In der Konsequenz lassen sich die Erkenntnisse von O'Toole auf komplexe Objekte übertragen und die Messdatenerfassung sollte im Bereich von 115k – 135k Hz eine feingranulare Abtastung für eine optimale Objektbestimmung aufweisen.

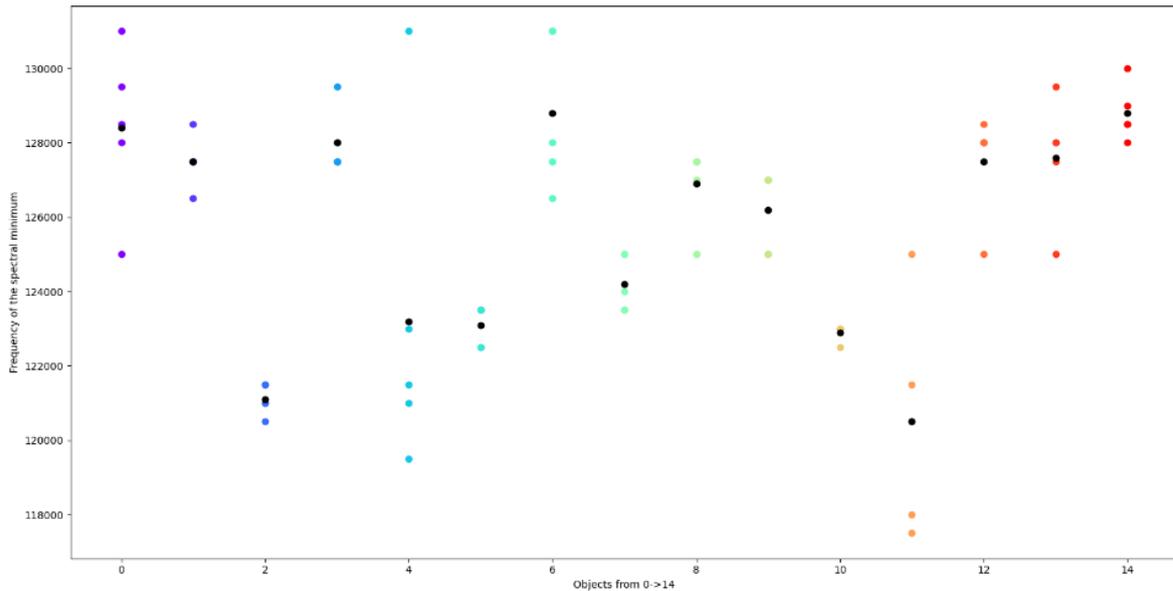


ABBILDUNG 5-10: FREQUENZ DES MINIMUMS IM IMAGINÄREN LEISTUNGSDICHTESPEKTRUM ABHÄNGIG VOM OBJEKT

Ergänzend wurden die Merkmalsdatensätze über eine Pearson-Matrix auf lineare Korrelation mit Objekt- bzw. Materialeigenschaften untersucht. Dabei sind auf den Achsen jeweils die betrachteten Charakteristiken aufgetragen; ein betragsmäßig hoher Wert stellt einen Indikator für eine hohe Korrelation dar.

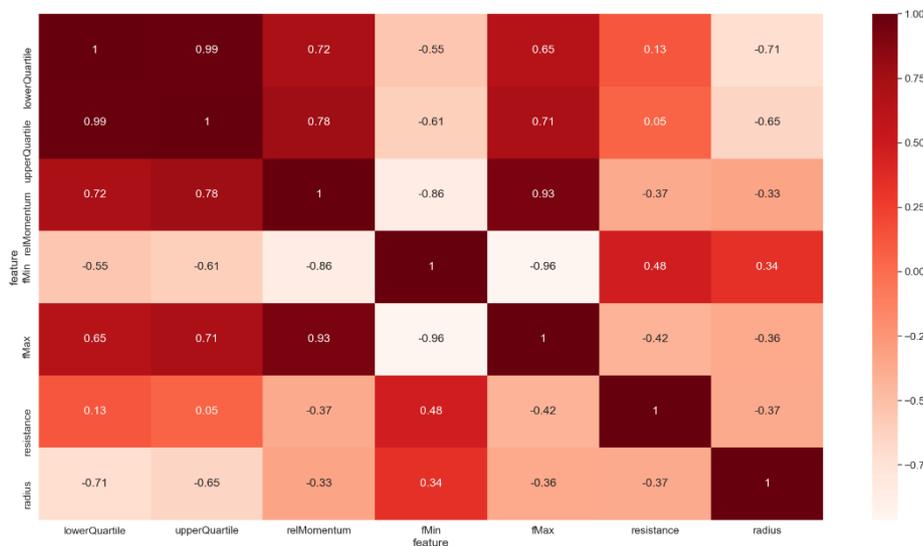


ABBILDUNG 5-11: PEARSON MATRIX FÜR MATERIAL- UND OBJEKTEIGENSCHAFTEN

Die Abbildung 5-11 stellt die Korrelation verschiedener Merkmale und spezifischer Material- und Objekteigenschaften dar. Dabei weisen das untere Quartil und das obere Quartil eine hohe Korrelation mit dem Objektradius auf. Die restlichen Merkmale weisen eine gemischt hohe Korrelation zum Widerstand und dem Objektradius auf.

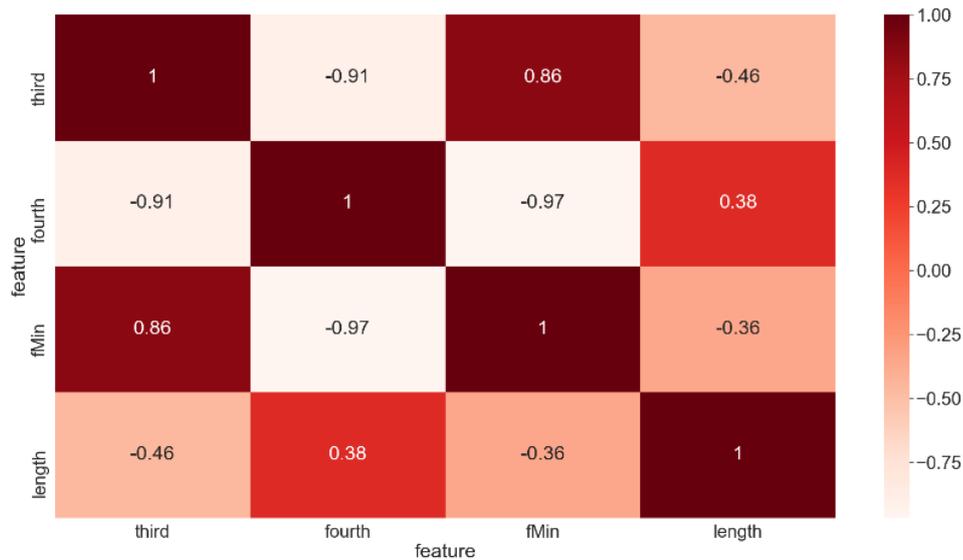


ABBILDUNG 5-12: PEARSON MATRIX FÜR OBJEKTEIGENSCHAFTEN

In Abbildung 5-12 sind die Komponenten angetragen, die eine signifikant hohe Korrelation mit der Objektlänge aufweisen und deswegen unter anderem für die Objektbestimmung verwendet werden.

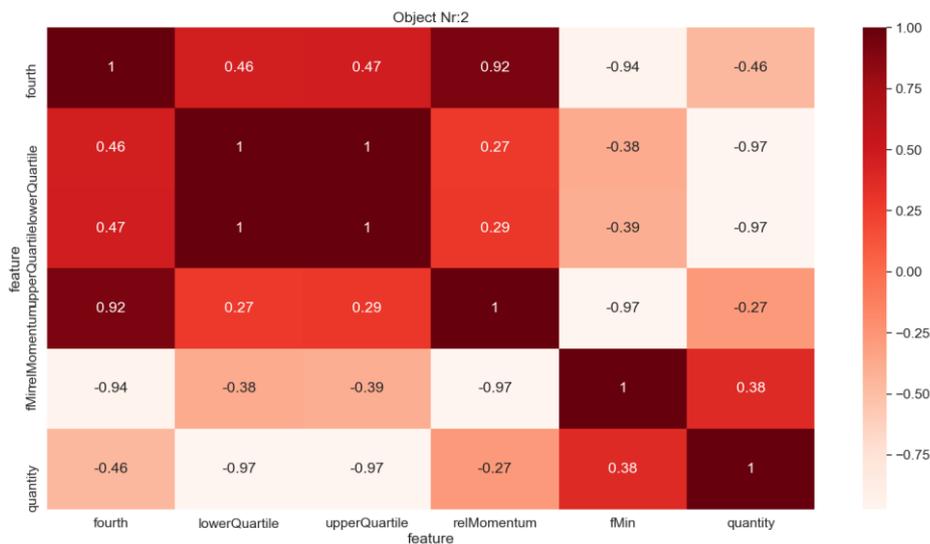


ABBILDUNG 5-13: PEARSON MATRIX FÜR FÜLLSTÄNDE

Analog erfolgt die Betrachtung für einzelne Objekte auf Basis von unterschiedlichen Mengenstufen. Abbildung 5-13 stellt dabei die Korrelation der Merkmale zur Menge am Beispiel von Objekt 2 auf Basis der realen Leistungsdichteanteile dar. Hierbei ist ebenfalls eine deutlich erhöhte Korrelation zu dem unteren und oberen Quartil zu beobachten. Darüber hinaus besteht eine hohe Korrelation zu den betrachteten Momenten.

5.4 Erstellung und Evaluation mittels Benchmarking Umgebung

Ein zentraler Bestandteil in der Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Machine Learning Modelle inklusive der Merkmalsdatensätze ist die im Zuge des Forschungsprojektes entwickelte

Benchmarking Umgebung. In diesem Kapitel werden die Funktionen der Benchmarking Umgebung und die für die Anwendungsfälle abgeleiteten theoretischen Ergebnisse vorgestellt.

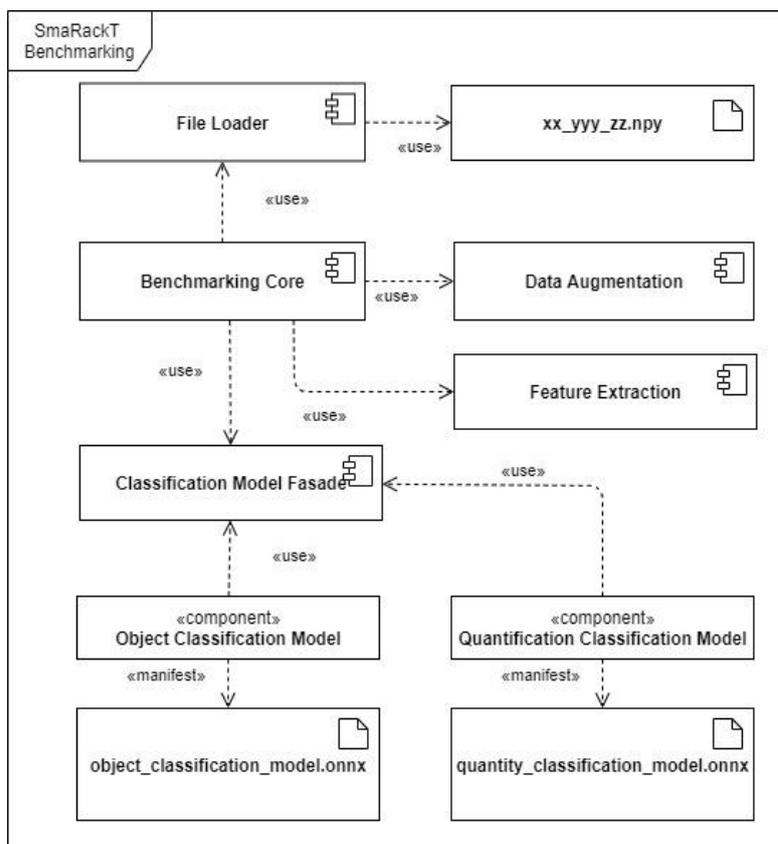


ABBILDUNG 5-14: UML-KOMPONENTENDIAGRAMM DES BENCHMARKINGS

In Abbildung 5-14 sind alle zentralen Komponenten der Benchmarking Umgebung dargestellt. Dabei müssen zunächst die in Kapitel 5.2 erfassten Messdaten als npy-Dateien eingelesen werden. Über das Submodul *Data Augmentation* (vgl. 5.1) wird anschließend der Datensatz vervollständigt und aus dem Submodul *Feature Extraction* (vgl. 5.3) werden die Merkmaldatensätze abgeleitet. Anschließend werden die Modell-Instanzen angelegt, trainiert und getestet. Die Modell-Instanzen bestehen aus Klassen, die auf die Algorithmen wie Support-Vector Machine, Gaussian Native Bayes, K-Nearest Neighbors und ein Deep Neuronal Network aufbauen. Die Testergebnisse werden in einer Confusion-Matrix und auch als modellspezifischer Score tabellarisch abgespeichert. Ergänzend können die trainierten Modelle individuell als ONNX-Datei exportiert und für die in Kapitel 6 beschriebene Demonstrator-Plattform zur praktischen Evaluation verfügbar gemacht werden.

Die in Abbildung 5-15 dargestellten Benchmarking Ergebnisse wurden mit dem Fraunhofer Datensatz und ohne eine separate Daten Augmentierung erzielt. Dabei zeigte der Vergleich der Algorithmen, dass mit der in Kapitel 5.2 beschriebenen Datengrundlage die Klassifizierung mittels K-Nearest Neighbors am besten abschneidet. Vergleicht man nun diese Ergebnisse mit denen aus Abbildung 5-16, dann wird der positive Effekt der Data Augmentation deutlich. Dabei konnte insbesondere das Klassifizierungsmodell auf Basis des Deep Neural Networks überproportional stark von einer verbesserten Datenbasis profitieren. In der Konsequenz ist nun der Score des Deep Neural Network am besten für diese Problemstellung geeignet.

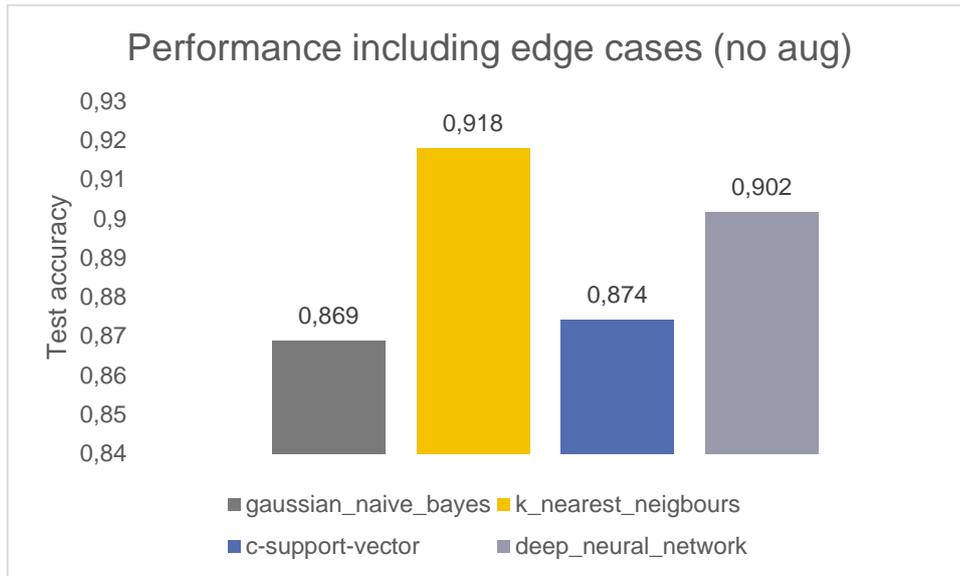


ABBILDUNG 5-15: BENCHMARKING OHNE AUGMENTATION

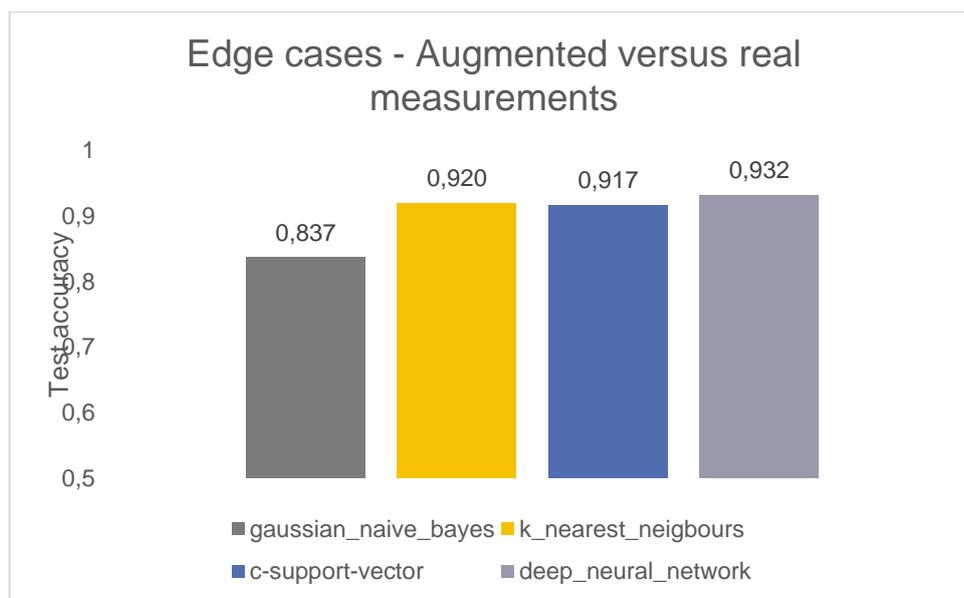


ABBILDUNG 5-16: BENCHMARKING MIT AUGMENTATION

Abbildung 5-17 stellt eine Übersicht über die theoretische Evaluation der mit den Objekten der Firmen Lorenz GmbH und Elabo GmbH erstellten Datensätze mittels der Benchmarking Umgebung dar. Dabei stellt die eingebettete Grafik eine Confusion-Matrix für die jeweils besten Klassifizierungsmodelle dar. Die Y-Achse ist mit den richtigen Label-Klassen angetragen und die X-Achse mit den durch die Modelle vorhergesagten Label-Klassen. Insbesondere durch die in Kapitel 5.1 beschriebene Data Augmentation konnte die Datengrundlage insoweit verbessert werden, dass bei allen Datensätzen das Klassifizierungsmodell auf Basis eines Deep Neural Networks die besten Ergebnisse liefert.

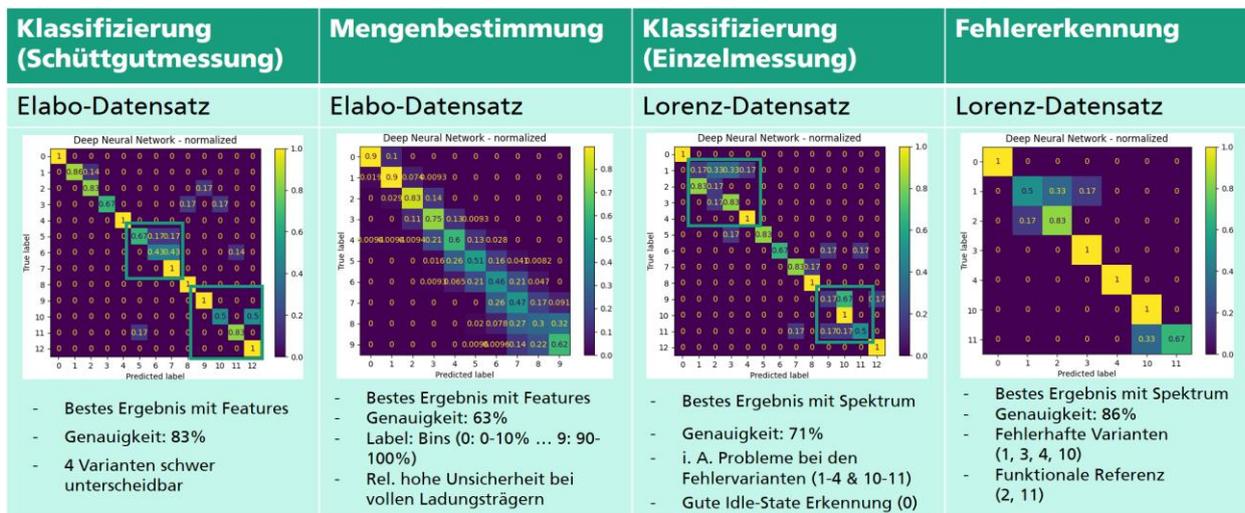


ABBILDUNG 5-17: ÜBERSICHT ÜBER DIE EVALUATIONSERGEBNISSE DER ANWENDUNGSFÄLLE

Bei der Objektidentifikation mittels der Elabo-Objekte (vgl. 1. Spalte links) wurden die besten Ergebnisse mit den Merkmalsdatensatz aus Kapitel 5.3 ermittelt. Hierbei sind jedoch in der Confusion-Matrix zwei problematische Bereiche zu erkennen, die jeweils mit grünen Kästen umrandet sind. Hierbei handelt es sich um die Anschlussklemmen, bei denen sich das Klassifizierungsmodell systematisch verschätzt. In der 2. Spalte sind die zugehörigen Mengenschätzung für die Schüttgutmessungen abgebildet. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass insbesondere bei geringen Füllständen eine hohe Schätzgenauigkeit erzielt werden kann. Aufgrund des in Kapitel 5.1 beschriebenen Sättigungsverhaltens steigt die Unsicherheit ab dem Füllstand von 40 Prozent sukzessive an, wodurch die Schätzgenauigkeit abnimmt.

Betrachtet man die Lorenz-Objekte in Einzelmessung (vgl. 3. Spalte), dann erkennt man gut die Grenzen des Klassifizierungsmodells. Dabei wurde eine systematische Fehlschätzung bei den mit grünem Rand markierten Fehlervarianten erzielt. Weiterhin wurden hier die besten Klassifizierungsergebnisse mit den spektralen Leistungsdichtekomponenten erzielt, was auf eine unzureichende Eignung des Merkmalsdatensatz für den Anwendungsfall hindeutet. In der 4. Spalte sind die Klassifizierungsergebnisse für ein spezifisch zur Fehlererkennung trainierten Modell abgebildet. Hierbei konnten die fehlerhaften Zählwerke 3 (W3) bzw. 4 (W4) sehr gut erkannt werden. Probleme bestehen bei der Unterscheidung des fehlerhaften Zählwerkes 1 (W1) mit der funktionalen Referenz 2 (W2). Eine detaillierte Untersuchung des Nutzenpotentials dieser Technologie für die Identifikation von Fehlervarianten in Produktionsprozessen konnte nicht innerhalb dieses Forschungsprojektes vorgenommen werden, soll aber in weiteren Forschungsaktivitäten zu dieser Technologie am Fraunhofer IIS aufgegriffen werden.

6 Integration der SW-Komponenten für einen Gesamtsystem-Demonstrator

Als Grundlage für die praktische Evaluation in Kapitel 7 erfolgt in diesem Kapitel die Beschreibung der Umsetzung als Gesamtdemonstrator für das SmaRackT-System. Dafür müssen zunächst alle Hard- und Softwaremodule über vordefinierte Schnittstellen miteinander interagieren. Abbildung 6-1 stellt eine Übersicht über die Kernkomponenten des SmaRackT-Systems dar. Die in Kapitel 4 beschriebene Hardware-Komponente wird über einer Ethernet-Schnittstelle in die *Device Support Suite* Komponente integriert. Dabei werden die bereitgestellten Messdaten über eine Daten-Pipe zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Für die Interaktion mit der Middleware wurde ein separates Modul entwickelt, welches über eine REST-Schnittstelle eine Fernsteuerung des Demonstrators durch die Middleware ermöglicht. Mit dem Start der Softwareapplikation werden zunächst die anwendungsfallspezifischen Klassifizierungsmodelle als ONNX-Datei aus dem lokalen Verzeichnis geladen. Hiermit werden die Komponenten *Object Classification Model* und *Quantification Classification Model* erstellt. Anschließend werden mittels der *Feature Extraction* Komponente Merkmale aus den Messdaten abgeleitet und für die Klassifizierungsmodelle zur Verfügung gestellt.

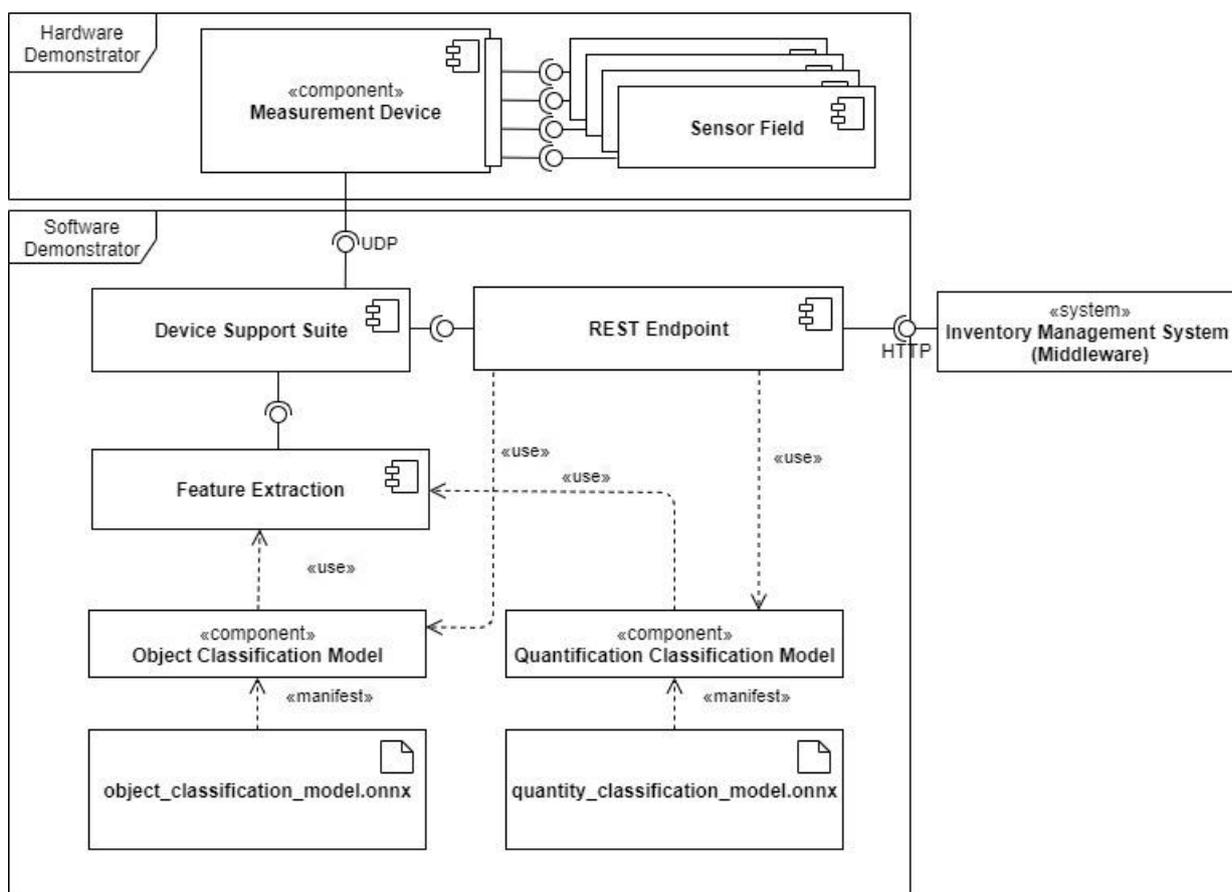


ABBILDUNG 6-1: UML-KOMPONENTENDIAGRAMM DES DEMONSTRATORS

Die Abbildung 6-2 stellt das Web-Frontend der Middleware inklusive der Steueroptionen zur Bedienung des SmaRackT-Systems dar. Das Menü mit den Steueroptionen kann über den Button Einstellungen rechts oben auf der Ansicht geöffnet werden. Dabei muss zunächst der Demonstrator kalibriert werden, bevor anschließend die Messung gestartet werden kann.

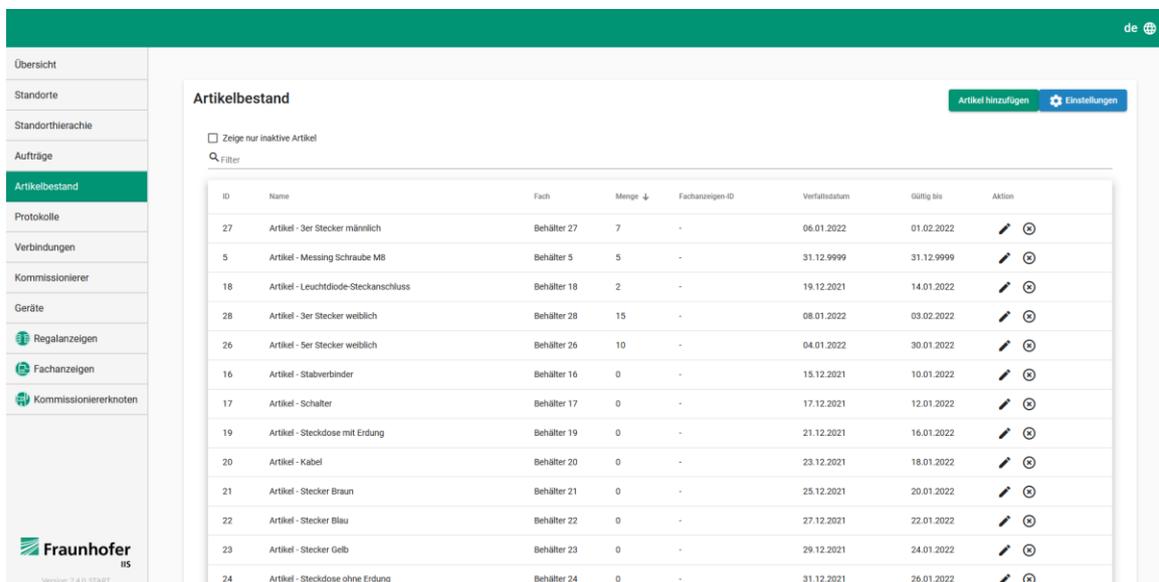


ABBILDUNG 6-2: WEB-FRONTEND MIT STEUERELEMENTEN

Da das Klassifizierungsmodell den Füllstand in prozentualen Bins schätzt, muss zunächst eine Übertragung in absolute Beträge vorgenommen werden. Dies erfolgt mithilfe von artikelspezifisch definierten Maximalfüllständen für die Ladungsträger. Hierbei kann über eine feinere Abstufung der geschätzten Bins, die Granularität der Mengenschätzung sukzessive gesteigert werden.

Diese Software und Front-End Komponenten wurden mit den in Kapitel 4 beschriebenen Aufbauten als Gesamtdemonstrator (vgl. Abbildung 6-3) kombiniert und im Folgenden als Gesamtsystem evaluiert, womit auf die flexible Anbindung unterschiedlicher, Use Case spezifischer Hardwareimplementierungen und die modulare Erweiterung des Systems erprobt werden konnte.

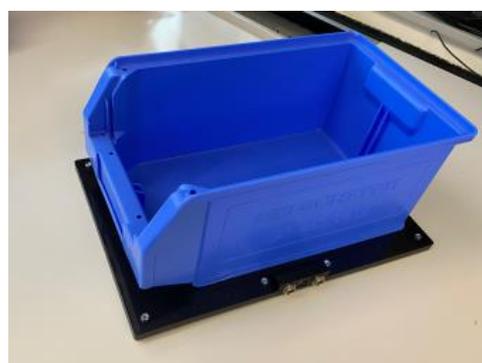


ABBILDUNG 6-3: VERWENDETE DEMONSTRATORAUFBAUTEN

7 Evaluierung des Systems

Das aktuelle Kapitel beschreibt die Evaluierung des entwickelten Systems. Diese fokussiert die Einsatzfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz des Demonstrators. Es soll insbesondere überprüft werden, ob dieser gemäß den definierten Anforderungen entwickelt wurde und ob diese den angestrebten Nutzen sicherstellen. Die Evaluierung des Systems wird in einem dreistufigen Verfahren durchgeführt (Abbildung 7-1). In einem ersten Schritt erfolgte eine technische Evaluierung mit entsprechenden Funktionstests des Systems im Labor des Fraunhofer IIS (Abschnitt 7.1), bevor in einem zweiten Schritt das System in dieser Umgebung durch die Berücksichtigung zusätzlicher Störungen iterativ verbessert wird (Abschnitt 7.2). Abschließend erfolgt eine direkte Erprobung des Systems bei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (Abschnitt 7.3). Diese Evaluierung des Systems konnte für die identifizierten Anwendungsszenarien bei der ELABO GmbH in Crailsheim und bei der Lorenz GmbH & Co.KG in Schelklingen-Ingstetten durchgeführt werden. Für die Evaluierung wurde auf die in Kapitel 5.4 beschriebenen optimalen Klassifizierungsmodelle für die einzelnen Anwendungsfälle zurückgegriffen.

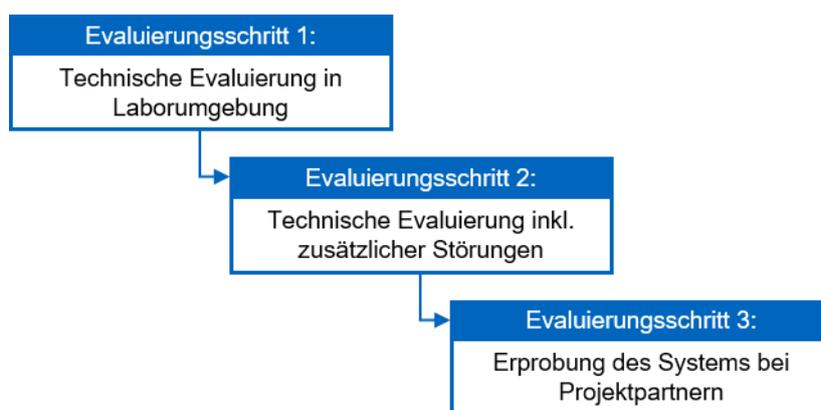


ABBILDUNG 7-1: EVALUIERUNGSSCHRITTE

7.1 Evaluierungsschritt 1: Technische Evaluierung in Laborumgebung

Das System wurde im Labor des Fraunhofer IIS in Betrieb genommen und technisch evaluiert. Dabei wurden vor allem die I/Q Signale als Rohdaten für verschiedene Messobjekte untersucht und die Spulenanordnung sowie Verstärkungsfaktoren weiter optimiert, um möglichst starke und deutliche Messdaten aufnehmen zu können. Relevant ist dabei der Abgleich zwischen Excitersignalstärke und Verstärkungsfaktor der Sensorantennen. Hier muss ein Optimum zwischen möglichst starken Signalen und möglichst geringem Signalrauschen gefunden werden. Nach abgeschlossener Pegeloptimierung wurden Verfahren zur Kalibrierung des Systems entwickelt und erprobt. Dabei gilt es zunächst Drifts der Signalverarbeitungskette durch Temperatureffekte und ggf. auftretenden Änderungen z.B. durch Erschütterungen zu begegnen. Dazu werden I/Q Signale der Sensorspulen betrachtet und zunächst Ruheamplituden ermittelt auf deren Grundlage dann die Kalibrierung des Systems vorgenommen wird. Für anschließende Messungen werden nur Signale berücksichtigt, die über

diesen Kalibrierwerten liegen. Dabei dürfen sich während des Kalibriervorgangs keine Objekte auf dem System befinden.

7.2 Evaluierungsschritt 2: Technische Evaluierung inkl. zusätzlicher Störungen

Typische Störer für das System sind Schaltnetzteile mit Schaltfrequenzen im kHz Bereich, Systeme zur drahtlosen Energieübertragung und LF RFID Systeme. Während Systeme zur drahtlosen Energieübertragung und LF RFID Systeme meist räumlich gut von dem SmaRackT-System abgesetzt werden können und so durch zusätzlichen Abstand das von ihnen ausgehende Störsignal stark reduziert werden kann sind Schaltnetzteile in einer Vielzahl von Geräten enthalten und daher nicht so einfach aus der unmittelbaren Umgebung des Systems zu entfernen. Daher müssen die Störsignale von Netzteilen, enthalten z.B. in Bildschirmen oder Steckernetzteilen, mit dem zuvor entwickelten Kalibrieralgorithmus erkannt und aus dem Nutzsignal herauskalibriert werden.

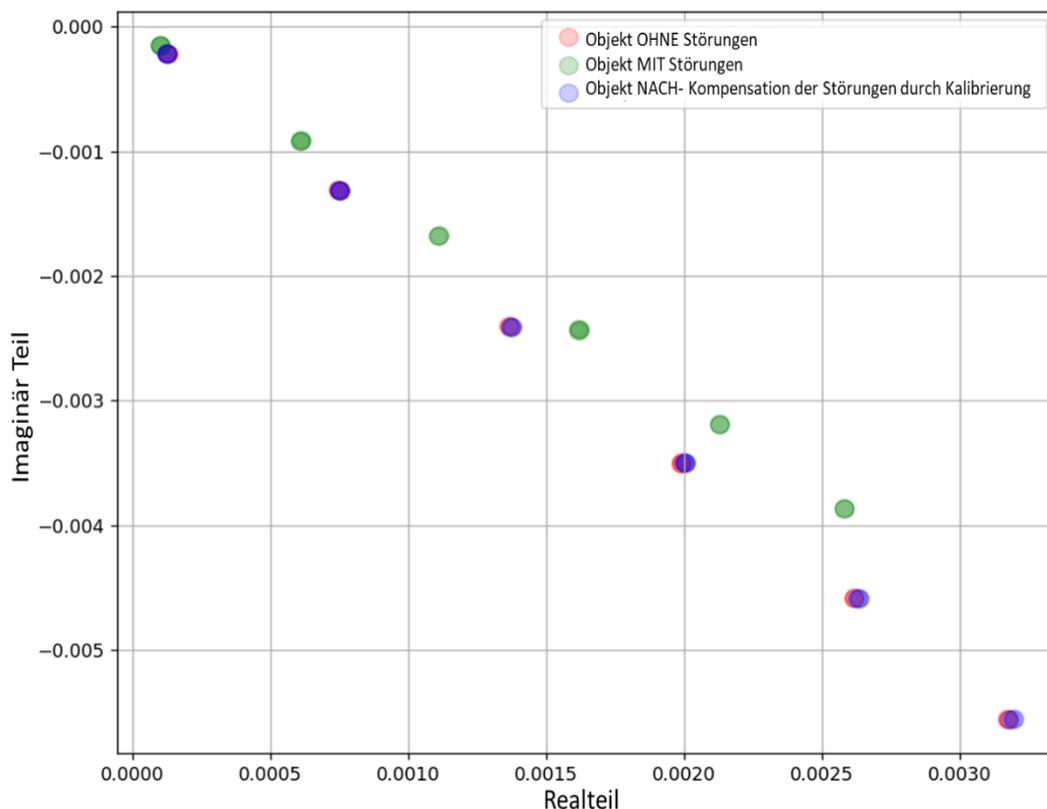


ABBILDUNG 7-2: EINFLUSS VON STÖRUNGEN MIT/OHNE KALIBRIERUNG AUF DIE SYSTEMGENAUIGKEIT

Dazu werden nun bei der Kalibrierung mehrere Exciterfrequenzen und die zugehörigen I/Q Signale der Sensorspulen berücksichtigt, um so einzelne wie auch breitbandige Störer zu erkennen. Auch Messungen ohne aktivem Excitersignal werden berücksichtigt. Dabei werden die zur Kalibrierung aufgezeichneten I/Q Signale zeitlich gemittelt, um auch zyklisch auftretende Störungen mit berücksichtigen zu können. Abbildung 7-2 zeigt den Einfluss von Störsignalen

und Kalibrierung auf das System exemplarisch an einer Objektmessung bei 6 verschiedenen Frequenzen.

7.3 Evaluierungsschritt 3: Erprobung des Systems bei Projektpartnern

Die Erprobung des technischen Systems erfolgte in zwei separat durchgeführten Evaluierungen. Hierzu wurde das System von Mitarbeitenden des entsprechenden Unternehmens für die jeweiligen Anwendungsfälle getestet. Anschließend sollten die Anwendenden in je einem Fragebogen die Benutzerfreundlichkeit und Funktionalität des SmaRackT-Systems bewerten. Für die Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit des Systems wurde auf den System Usability Scale (SUS) zurückgegriffen. Dieser bewertet anhand von zehn Aussagen die Gebrauchstauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit technologieunabhängig [Lew-09, S. 94]. Tabelle 12 zeigt die zehn Aussagen des SUS.

TABELLE 12: SYSTEM USABILITY SCALE

Position	Aussage im SUS
1	Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
2	Ich empfinde das System als unnötig komplex.
3	Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
4	Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.
5	Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
6	Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
7	Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.
8	Ich fand das System sehr umständlich zu bedienen.
9	Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.
10	Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

Die Auswertung der Fragen erfolgt auf Basis einer Likert-Skala [ALB-07, S. 73], sodass ohne großen Zeitaufwand ein SUS-Score berechnet und für die Beurteilung des Systems verwendet werden kann. Dazu werden die einzelnen Aussagen mit einem Punktwert zwischen null und vier verknüpft und die Zahlenwerte aufsummiert, bevor ein Mittelwert über alle Teilnehmer gebildet wird. Abschließend kann der SUS-Score berechnet werden, der einen Wertebereich von null (schlechtest denkbare System) bis 100 (bestes denkbare System) umfasst. Eine qualitative Übersetzung der Bewertung kann beispielsweise mit Hilfe von [Ban-08] durchgeführt werden (Abbildung 7-3).

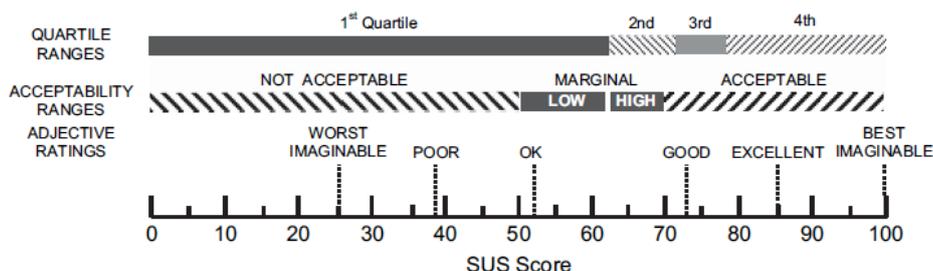


ABBILDUNG 7-3: SUS-SCORE

Für die Beurteilung der Funktionalität des SmaRackT-Systems wurde ein für die Technologie spezifischer Fragebogen erstellt, der diese anhand von sechs Aussagen und teilweise offenen Kommentar-Feldern bewertet. Für die Bewertung der jeweiligen Aussagen wird eine fünfstufige Bewertungsskala zwischen eins („Stimme voll und ganz zu“) und fünf („Stimme überhaupt nicht zu“). Die Aussagen des Fragebogens zur Bewertung der Funktionalität zeigt Tabelle 13.

TABELLE 13: BEWERTUNG DER FUNKTIONALITÄT

Position	Aussage
1	Das System demonstriert, wie metallische [oder entsprechend getaggte] Objekte identifiziert und quantifiziert werden können.
2	Das System gibt klare und eindeutige visuelle Rückmeldungen.
3	Das System bietet alle erforderlichen Funktionen zur Identifikation und Quantifizierung metallischer Objekte.
4	Die Funktionalität des Systems sollte erweitert werden.
5	Ich kann mir vorstellen, dass der Einsatz eines solchen Systems vorteilhaft ist.
6	Ich würde das System gerne zukünftig nutzen.

ELABO GmbH (Crailsheim)

Die ELABO GmbH hat ihren Unternehmenssitz in Crailsheim und ist Spezialist für intelligente Lösungen zur Gestaltung individueller Arbeitsplätze sowie für Montage- und Prüfsysteme für die industrielle Serienfertigung. Das Unternehmen ist sehr aktiv im Bereich Industrie 4.0 und beschäftigt ca. 185 Mitarbeitende. Die Erprobung des SmaRackT-Systems erfolgte bei ELABO für die Einsatzszenarien I (Regalentnahme) und II (Kommissionierwagen).

Für die Erprobung der beiden Einsatzszenarien haben die Mitarbeitenden den Demonstrator mit unternehmensspezifischen Teilen getestet. Dabei hat sich für die Bewertung der Benutzerfreundlichkeit des Systems ein SUS-Score von 67 ergeben. Das System zeigt also eine gute Benutzerfreundlichkeit mit einer Akzeptanz im zweiten Quartil. Der Demonstrator ist daher grundsätzlich intuitiv zu bedienen, weist jedoch noch Verbesserungspotenzial auf.

Rückschlüsse auf konkret umzusetzende Verbesserungsmaßnahmen bietet der SUS jedoch nicht.

Die Funktionalität des SmaRackT-Systems haben die Mitarbeitenden anhand des zweiten Fragebogens bewertet. Die Ergebnisse dieser Bewertung zeigt Tabelle 14.

TABELLE 14: BEWERTUNG DER FUNKTIONALITÄT FÜR EINSATZSZENARIO I UND II

Position	Aussage	Bewertung
1	Das System demonstriert, wie metallische Objekte identifiziert und quantifiziert werden können.	4,8
2	Das System gibt klare und eindeutige visuelle Rückmeldungen.	3,3
3	Das System bietet alle erforderlichen Funktionen zur Identifikation und Quantifizierung metallischer Objekte.	2,5
4	Die Funktionalität des Systems sollte erweitert werden.	4,0
5	Ich kann mir vorstellen, dass der Einsatz eines solchen Systems vorteilhaft ist.	3,3
6	Ich würde das System gerne zukünftig nutzen.	3,5

Die Bewertung der Mitarbeitenden bestätigt eine grundsätzliche Funktionalität des Systems, indem dieses gut die Identifikation und Quantifizierung metallischer Objekte ermöglicht. Insbesondere die Rückmeldungen des Systems sollten jedoch verbessert werden, da diese nicht durchgängig als eindeutig und klar verständlich wahrgenommen wurden. Weiterhin sollten zusätzliche Funktionen in das System integriert werden. Die Mitarbeitenden nennen hier beispielsweise eine mitlaufende und dynamische Prüfung während einer Bewegung des entsprechenden Objekts. Diese Verbesserungen würden die Vorteilhaftigkeit und den Nutzen des Systems weiter steigern, der jedoch bereits für den aktuellen Demonstrator grundsätzlich bestätigt wird. Neben den betrachteten Einsatzszenarien wurde von einigen Mitarbeitenden eine potenzielle Vorteilhaftigkeit des Systems im Bereich der automatisierten Qualitätssicherung gesehen.

Lorenz GmbH & Co.KG (Schelklingen-Ingstetten)

Die Lorenz GmbH & Co.KG beschäftigt am Standort Schelklingen-Ingstetten insgesamt ca. 250 Mitarbeitende. Lorenz ist ein Spezialist für die Durchflussmessung und führender Hersteller sowie Anbieter von Wohnungs-, Haus- und Großwasserzählern. Weiterhin vertreibt Lorenz entsprechende Kommunikationstechnik und Dienstleistungen und bezeichnet sich als einen Vorreiter für Smart Metering und eine ressourcenorientierte Circular Economy Strategie. Das im Rahmen des Projekts entwickelte SmaRackT-System wurde bei Lorenz für die Einsatzszenarien III (Qualitätssicherung Produktion) und IV (Qualitätssicherung Logistik) erprobt.

Die Mitarbeitenden haben analog zur Evaluierung bei ELABO zunächst die Benutzerfreundlichkeit anhand des SUS bewertet. Dazu wurden einzelne Teile nacheinander auf dem Demonstrator platziert und ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Weiterhin sollten

verpackte Produkte vor dem Versand auf ihre korrekte Bestückung überprüft werden. Für die Benutzerfreundlichkeit des Demonstrators für die beiden Einsatzszenarien ergibt sich auf Basis der Rückmeldungen der Mitarbeitenden ein SUS-Score von 88. Das System weist dementsprechend eine exzellente Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz im vierten und damit höchstmöglichen Quartil auf. Der Demonstrator weist für diese Einsatzszenarien also eine äußerst intuitive Bedienbarkeit auf.

Die Ergebnisse der Funktionalitätsbewertung zeigt Tabelle 15.

TABELLE 15: BEWERTUNG DER FUNKTIONALITÄT FÜR EINSATZSZENARIO III UND IV

Position	Aussage	Bewertung
1	Das System demonstriert, wie metallische Objekte identifiziert und quantifiziert werden können.	4,4
2	Das System gibt klare und eindeutige visuelle Rückmeldungen.	2,7
3	Das System bietet alle erforderlichen Funktionen zur Identifikation und Quantifizierung metallischer Objekte.	4,2
4	Die Funktionalität des Systems sollte erweitert werden.	4,3
5	Ich kann mir vorstellen, dass der Einsatz eines solchen Systems vorteilhaft ist.	4,8
6	Ich würde das System gerne zukünftig nutzen.	4,6

Die Bewertung der Funktionalität des Systems ergibt einen durchschnittlichen Wert von 4,2. Es zeigt sich dementsprechend, dass die Funktionalität des Systems grundsätzlich sehr positiv bewertet wird. Es hat sich insbesondere bestätigt, dass das System die Funktionsweise einer Identifizierung und Quantifizierung metallischer Objekte sehr gut demonstriert. Dies bestätigte sich zusätzlich durch eine sehr hohe Bewertung eines vorteilhaften Einsatzes des Systems (Bewertung 4,8 für Position 5). Eine potenzielle Erweiterung der Funktionalität des Systems wird ebenfalls verstärkt gewünscht, sodass fehlende Funktionalitäten ergänzt werden können. Sinnvolle Funktionalitätserweiterungen umfassen beispielsweise ein vergrößertes Feld für die Platzierung der Objekte sowie zusätzliche Positionen. Für die visuellen Rückmeldungen des Systems sehen die Mitarbeitenden die derzeit größten Verbesserungspotenziale (Bewertung 2,7 für Position 2). Weitere Verbesserungsvorschläge der Mitarbeitenden umfassen daher insbesondere ein überarbeitetes User Interface. Dieses sollte beispielsweise eine Visualisierung der benötigten Zeit bis zur vollständigen Erfassung des jeweiligen Objekts umfassen. Die diesbezügliche bisherige Rückmeldung wird als unzureichend wahrgenommen, sodass einzelne Objekte teilweise zu früh vom Erfassungsfeld entfernt wurden.

Die Vorteilhaftigkeit des entwickelten Systems sehen die Mitarbeitenden verstärkt in den Prozessen des Qualitätsmanagements, wodurch die identifizierten Einsatzszenarien bestätigt werden. Großes Potenzial bietet das System bei verpackten Objekten, sodass diese ohne direkten Sichtkontakte automatisch erfasst und überprüft werden können. Dadurch ist der Einsatz eines entsprechenden Systems beispielsweise auch in der Reklamationsbearbeitung denkbar.

8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Nachfolgend werden in diesem Kapitel die Forschungsergebnisse zusammengefasst, industrielle Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt und ein Ausblick gegeben.

8.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts SmaRackT wurde ein System zur autonomen, aufwandsarmen und intelligenten Objektklassifikation und Mengenquantifizierung an Aktionspunkten entwickelt.

Basierend auf der Analyse von Einsatzszenarien und Aktionspunkten und der daraus folgenden Definition von Anforderungen (Kap. 3) wurde ein Umsetzungskonzept erstellt und hierfür die bestehende Nahfeldortungstechnologie gezielt erweitert (Kap. 4). Daraufhin wurden im Rahmen der Entwicklung eines Objekterkennungsverfahrens (Kap. 5) Lösungen für die erforderliche Datenerfassung und -augmentierung, die Erstellung und Bewertung von Datensätzen, die Analyse der spektralen Merkmale und die Erstellung von optimierten Modellen und deren Evaluation erarbeitet. Ein realisierter Demonstrator (Kap. 6) wurde in verschiedenen Labor- und Produktionsumgebungen in Hinblick auf seine Leistungsfähigkeit und industriellen Anwendungsmöglichkeiten evaluiert (Kap. 7).

Über diesen Projektrahmen hinaus wurde und wird die entwickelte Technologie in weiteren Anwendungsszenarien und mit weiteren Objekten getestet und findet weiterhin große Interesse in der Industrie.

8.2 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Aus der technischen Leistungsbemessung und praktischen Evaluierung in realen Produktionsumgebungen, sowie den Rückmeldungen der am Projekt im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses beteiligten Industriepartner, ließen sich bereits während der Projektbearbeitung Möglichkeiten und Grenzen des industriellen Einsatzes des in SmaRackT entwickelten Systems feststellen.

Wie in 7 sowie zusammenfassend in Kapitel 11 erläutert, konnten die Einsatzszenarien in unterschiedlicher Hinsicht bestätigt werden, wobei Teile der Arbeitshypothesen relativiert werden mussten, andere hingegen noch erweitert werden konnten. Einsatzszenario I (Regalentnahme) beinhaltet Anwendungspotenziale für die Erhöhung von Prozesstransparenz und Sicherheit bei Lagerung und Picking, Einsatzszenario II (Kommissionierwagen) die Übertragung auf mobile Arbeitsplätze und/oder Routenzüge. Vielversprechend sind darüber hinaus insbesondere die Einsatzszenarien III (Qualitätssicherung Produktion) und IV (Qualitätssicherung Logistik), da die anfänglich höheren Investitionskosten des Systems durch die Vermeidung hoher Folgekosten von Prozessfehlern potenziell deutlich amortisiert werden können. Weiterhin interessante Anwendungspotenziale bieten sich in Spezialanwendungen, wie in Kapitel 6 erläutert.

8.3 Ausblick

Die neben den ursprünglich angedachten Einsatzszenarien zur Kommissionierungsunterstützung in Produktion und Logistik identifizierten Szenarien zur Qualitätssicherung lassen sich möglicherweise auch auf die Analyse leitfähiger Bauteile, Riss- und Produktionsfehlererkennung sowie Material- oder Legierungserkennung erweitern. Konkrete Anknüpfungspunkte werden detailliert in Kapitel 11 erläutert.

Die Ergebnisse von SmaRackT münden darüber hinaus in zahlreichen Weiterentwicklungen in anderen Forschungsvorhaben. Das erarbeitete Wissen wird im derzeit beantragten IGF-Forschungsvorhaben InOrt eingesetzt, um eine fehlerfreie Kommissionierung zu ermöglichen. Darüber hinaus sollen die entwickelte Hard- und Software aus SmaRackT gemeinsam mit Technologien aus anderen Forschungsvorhaben in eine Plattform einfließen, welche die praktische Anwendung und wissenschaftliche Weiterentwicklung im Sinne einer modernen, effizienten und leistungsfähigen Produktion und Logistik begleiten soll.

Um dies auch über das SmaRackT-Projekt hinaus zu fördern, werden für die Technologie am Fraunhofer IIS in einem intern finanzierten Projekt weitere Anwendungsmöglichkeiten und Marktchancen untersucht. Dazu wurde auch eine weitere Zielmarktanalyse und Marktstudien durchgeführt sowie Betrachtungen zu einem Businessplan angestoßen. Ziel ist es hier, bis Mai 2023 Pilotanwender für die beschriebenen Anwendungsfälle zu akquirieren sowie weitere Anwendungsszenarien zu identifizieren und konkrete Möglichkeiten zur Kommerzialisierung der Technologie auszuarbeiten.

Hierzu konnten ab Juli/August 2022 schon zwei Pilotanwender im Bereich Qualitätsmanagement im Wareneingang/-ausgang gewonnen werden, mit denen die Anwendbarkeit der SmaRackT Technologie weiter innerhalb der nächsten 5 Monate untersucht werden soll. Daneben soll der KI-Aspekt zur Auswertung der SmaRackT-Systemdaten in einem weiteren intern finanzierten Forschungsprojekt für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von metallischen Objekten untersucht werden. Das Projekt dazu läuft über den Zeitraum von November 2022 bis Juni 2023 und beschäftigt sich mit der Qualitätsanalyse von metallischen B-Teilen, Aludruckguss-Objekten und Legierungen.

9 Verwendung der Zuwendungen

Forschungsstelle 1: Fraunhofer IIS

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans): Es wurden wissenschaftliche Mitarbeiter im Umfang von 20,39 Personenmonaten von den beantragten 26 Personenmonaten gebucht. Die Differenz kommt v. a. aufgrund erhöhter Regelsätze durch den Wechsel der Forschungsstelle Arbeitsgruppe für Supply Chain Services an die Forschungsstelle des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS im Jahr 2020 und Personalbuchungen im Projektverlauf, die nicht abrechenbar waren, zustande.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffung beantragt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): Es wurden keine Leistungen für die Arbeit Dritter beantragt.

Forschungsstelle 2: Technische Universität München, Lehrstuhl fml

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans): Es wurden ein wissenschaftlicher Mitarbeiter im Umfang von 16,67 Personenmonaten sowie studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 8,38 Personenmonaten (mit 20 Stunden pro Woche) eingesetzt.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffung beantragt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): Es wurden keine Leistungen für die Arbeit Dritter beantragt.

10 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten entsprechen in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und wurden von den eingesetzten wissenschaftlichen Mitarbeitern mit Unterstützung studentischer und wissenschaftlicher Hilfskräfte sowie den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Als Orientierung diente dabei stets der genehmigte Arbeitsplan des Forschungsprojekts. Alle Arbeiten waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Die angestrebten Ergebnisse wurden erreicht.

11 Nutzen der Forschungsergebnisse für Unternehmen (insbes. KMU)

Insbesondere KMU sollen von den Projektergebnissen profitieren können. Dies gilt für Anbieter und Integratoren von Logistiksystemen und Hersteller entsprechender Hardware im Sinne der Einsatzszenarien I und II, sowie deren Anwender aus unterschiedlichen Branchen. In Einsatzszenario I kann die Einführung des Systems im Sinne der primären Projektziele auf Transparenz und Prozesssicherheit einzahlen. Wenngleich die Kosten in frühen Phasen vergleichsweise hoch sein werden, bestätigten die mittelständischen Industriepartner die Relevanz der Technologie speziell für hochpreisige Objekte, etwa in der Luft- und Raumfahrttechnik. In Einsatzszenario II ermöglicht die drahtlose und energieautarke Umsetzung darüber hinaus weitere Anwendungen, welche sich jenseits des betrachteten Kommissionierwagens auch auf mobile Arbeitsplätze oder Routenzüge übertragen lassen.

Darüber hinaus können insbesondere auch die Einsatzszenarien III und IV Anwendung in verschiedensten mittelständischen Unternehmen finden, wie die Ergebnisse aus den Feldtests bei Industriepartnern demonstrieren. Die Qualitätssicherung und Vermeidung von Folgekosten kann dabei erheblich zum Erfolg und zur Wettbewerbsfähigkeit mittelständischer Unternehmen beitragen. Hinzu kommen bislang unvorhergesehene Spezialanwendungen, wie in Kapitel 6 beschrieben.

Vorausblickend sollen weitere Entwicklungen in Folge des Projekts dazu beitragen, die Realisierung der beschriebenen Anwendungsfälle sicherzustellen. Gemeinsam mit Partnern aus dem Projekt treiben Fraunhofer IIS, SCS und TUM fml diese Entwicklung. Am Fraunhofer IIS wurden dazu schon zwei intern finanzierte Projekte angestoßen. Anknüpfend an Einsatzszenario III plant der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik gemeinsam mit dem Industriepartner Lorenz GmbH & Co. KG die Zusammenarbeit an einer intelligent vernetzten und automatisierten Demontagelinie für Smart Meters im Rahmen eines Kreislaufwirtschaftskonzepts, bei dem die SmaRackT-Technologie zur Identifikation und Zustandsbewertung zurückgeführter Messgeräte dienen könnte.

Die Ergebnisse von SmaRackT münden darüber hinaus in zahlreichen Weiterentwicklungen in anderen Forschungsvorhaben. Das erarbeitete Wissen wird im derzeit beantragten IGF-Forschungsvorhaben InOrt eingesetzt, um eine fehlerfreie Kommissionierung zu ermöglichen.

Die Hardware- und Software-Entwicklungen aus SmaRackT sollen darüber hinaus analog zu verwandten Forschungsvorhaben eine Plattform für eine Vielzahl von weiteren Entwicklungen im Bereich Logistik und Produktion bilden. Damit trägt SmaRackT dazu bei, dass die Intralogistik die nächsten Schritte hin zu der Vision einer Industrie 4.0 nehmen kann. Es stärkt damit nachhaltig Deutschland als innovativen Standort für Produktion und Logistik und verhilft sowohl anwendenden als auch anbietenden Unternehmen zu Wettbewerbsvorteilen in einer globalisierten Welt.

Aus öffentlichen Präsentationen der Technologie auf Messen (IoT Wireless Tomorrow 2021 und 2022 geplant) sowie hausintern beim Fraunhofer IIS entstanden Kontakte zu 5 weiteren Unternehmen (davon 3 KMU), die an der Anwendung der Technologie starkes Interesse haben. Während die Mehrzahl der Unternehmen auf die hier schon beschriebenen Einsatzszenarien fokussiert, haben zwei KMU hier auch neue Anwendungsfälle zur Qualitätsprüfung von Metallobjekten (Lufteinschlüsse, Legierungsbestandteile) eingebracht, die vom Fraunhofer IIS in bereits angestoßenen Forschungsaktivitäten zunächst technisch in 2022/23 bearbeitet werden.

12 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Maßnahme A1:** Erstes Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten am 28.05.2020
- Maßnahme A2:** Zweites Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung und Diskussion sowie Auswahl des Konzeptes am 29.03.2021
- Maßnahme A3:** Drittes Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung der technischen Umsetzung und die Evaluation der ausgewählten Anwendungsfälle am 14.12.2021
- Maßnahme A4:** Abschlusstreffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung der Ergebnisse aus dem Feldtest und weiterer Forschungsmöglichkeiten am 20.06.2022
- Maßnahme B3:** Präsentation auf der „RFID & Wireless IoT Tomorrow“ 2021 sowie den „Fraunhofer Technologietagen“ 2021
- Maßnahme C1:** Projektvorstellung im Newsletter des Lehrstuhls fml, fml Newsletter Ausgabe 2020
Projektvorstellung im Newsletter (vom 01.09.2020) des Fraunhofer IIS - Arbeitsgruppe SCS
- Maßnahme C2:** Frei zugänglicher Internetauftritt des Forschungsvorhabens über die Homepage des fml und des Fraunhofer IIS - Arbeitsgruppe SCS
- Maßnahme C3:** Erstellung eines Videos zur Demonstration der Funktionsweise für Pilotakquise (Homepage des Fraunhofer IIS, YouTube)
- Maßnahme C4:** Verbreitung der Projektergebnisse über das Social Media Profil des Fraunhofer IIS (YouTube, LinkedIn)
- Maßnahme D1:** Vortrag auf dem deutschen Materialflusskongress am 18. März 2021
- Maßnahme E1:** Fachbeitrag in der „Elektronik“, Ausgabe 25, Dezember 2020, Seite 30ff über IndLoc und die Erweiterungen in SmaRackT
- Maßnahme E2:** Fachbeitrag in der „DVZ“ von September/Okttober 2020
- Maßnahme E3:** Fachbeitrag in der „MM Logistik“, Ausgabe 12/2020, Dezember 2020
- Maßnahme E4:** Fachbeitrag in der „K-Zeitung“, Ausgabe 18/2020, September 2020
- Maßnahme E5:** Fachbeitrag in der „ident“, Jahrbuch 2021
- Maßnahme E6:** Wissenschaftliche Veröffentlichung mit dem Titel „Identification and Quantification of Metallic-Conductive Objects Using Low Frequency Magnetic Field“ bei der „ATRASC“ (Atlantic Radio Science Meeting) 2022

Maßnahme F1: Während der Projektlaufzeit unterstützten studentische Hilfskräfte die folgenden projektbezogenen Aufgabenstellungen:

- Unterstützung bei Anforderungsaufnahme
- Recherche
- Softwareentwicklung, Hardwareansteuerung
- Unterstützung bei Qualifizierung und Test

Maßnahme F2: Während der Projektlaufzeit wurden begleitende studentische Qualifizierungsarbeiten am Fraunhofer IIS betreut (1 Bachelorarbeit und 2 Praktika). Dabei ging es um die folgenden Themenstellungen:

- Simulation und Ermittlung von Genauigkeitsgrenzen für das Indloc-System zur Materialerkennung
- Optimierung von Spulenanordnungen und Geometrien
- Test und Auswertearithmik

Aus dem Antrag:

	Ziel	Rahmen	Zeitraum	
Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Der PA stellt ein tragendes Element in der Konzeption dieses Forschungsvorhabens dar. Er sichert den engen Praxisbezug und sorgt zugleich für eine frühzeitige Weitergabe von Untersuchungsergebnissen während der Projektlaufzeit	A1	Vorstellung des Projekts und Einbringung bedarfsbezogener Anforderungen der KMU	Durchgeführt
		A2	Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse	Durchgeführt
		A3	Vorstellung der erweiterten Technologie und der Objekterkennung	Durchgeführt
		A4	Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse mit dem PA	Durchgeführt
Maßnahme B: Vorträge	Präsentation von (Teil-) Ergebnissen des Projekts auf Fachtagungen von Industrie und Wissenschaft	B1	Präsentation auf der Messe „LogiMAT“ bzw. „Transport und Logistik“	LogiMAT 2020 abgesagt, 2021 (Besucher-) Teilnahme und Experten- und Nutzergespräche zu SmaRackT
		B2	Vortrag auf den „Magdeburger Logistiktage“ oder einer äquivalenten Konferenz	Geplant für 2021: Veranstaltung fand nicht statt
		B3	Präsentation auf der „RFID & Wireless IoT Tomorrow“ sowie den „Fraunhofer Technologietagen“	Durchgeführt
Maßnahme C: Internetdarstellung	Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse zur Gewinnung weiterer interessierter Unternehmen	C1	Vorstellung des Projekts über den Newsletter des Logistik-Innovations-Zentrums des Lehrstuhls fml sowie den Newsletter des Fraunhofer SCS	Durchgeführt
		C2	Internetauftritt des Forschungsvorhabens	Durchgeführt
Maßnahme D: Messepräsentationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	D1	Vorstellung von Projekt und Demonstrator am „Deutschen Materialflusskongress“, der	Teilweise durchgeführt (MFK 2021)

			„Electronica“ und der „Embedded World“	
Maßnahme E: Veröffentlichungen	Präsentation von (Teil-) Ergebnissen des Projekts in Fachzeitschriften	E1	Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften wie „Fördern+Heben“, „Logistik heute“ oder ähnlichen Zeitschriften betroffener Industriezweige	Durchgeführt
Maßnahme F: Übernahme in die Lehre	Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	F1	Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Durchgeführt
		F2	Betreuung von studentischen Qualifikationsarbeiten und Praktika	Durchgeführt

Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss der Projektlaufzeit:

	Ziel	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme G: Beratung, Weiterbildung	Ergebnistransfer an KMU ohne eigene Forschungsaktivitäten	G1	Beratung von KMU zur Auswahl geeigneter Kommissionierverfahren	ab Oktober 2022
		G2	Schulungsangebote über Veranstaltungen des Logistik-Innovations-Zentrums (liz)	ab Oktober 2022
		G3	Transfer über fachspezifische Foren (z.B. Kommissionierfachtagungen)	ab Oktober 2022
Maßnahme H: Dissertation	Die geplante Stelle des Projektleiters sieht die Möglichkeit einer Promotion vor.	H1	Nach Abschluss der Forschungsarbeiten wird das Thema in Form einer Dissertation weiterverfolgt. Ein denkbare Thema wäre z.B. Technische und strukturelle Entwicklung der Person-zu-Ware Kommissionierung in Zeiten der Automatisierung	ab Oktober 2022
Maßnahme I: Forschungsbericht	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	I1	Der Abschlussbericht wird auf den Websites des Lehrstuhls fml, des Fraunhofer IIS, der BVL und auch in gedruckter Form erhältlich sein.	IV. Quartal 2022
Maßnahme J: Übernahme in die Lehre	Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	J1	Ergebnisse des Forschungsprojektes werden im Rahmen verschiedener Vorlesungen in den Lehrbetrieb am Lehrstuhl fml, am Fraunhofer IIS angebundenen Lehrstuhl für SCM in Bamberg sowie der Fakultät Elektrotechnik eingebunden.	ab IV. Quartal 2022
Maßnahme K: Demonstratoren	Möglichkeit der weiteren Begutachtung der Demonstratoren	K1	Die Demonstratoren verbleiben nach Projektende an den Forschungsstellen und können somit zur Information interessierter Unternehmen genutzt werden.	ab Oktober 2022
Maßnahme L: Messepräsentationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	L1	Vorstellung der Projektergebnisse auf „LogiMAT“, dem „Deutschen Materialfluss-Kongress“ und weiteren Fachmessen und -foren wie „Wireless IoT Tomorrow“	ab Oktober 2022

Die zum Zeitpunkt der Abgabe des Abschlussberichts noch ausstehenden, geplanten Maßnahmen (G-L) werden als durchaus realisierbar eingeschätzt und daher aller Voraussicht nach auch noch durchgeführt. Die Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der Technologie in verschiedenen Anwendungsszenarien liegt auf der strategischen Roadmap der bearbeitenden Gruppe am Fraunhofer IIS (FE1).

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Vision der Objekterkennung in SmaRackT	5
Abbildung 2-1: Prinzipdarstellung des Konzepts SmaRackT.....	9
Abbildung 3-1: Einsatzszenarien	13
Abbildung 3-2: Einsatzszenario I: Regalentnahme	14
Abbildung 3-3: Einsatzszenario II: Kommissionierwagen	14
Abbildung 3-4: Einsatzszenario III: Qualitätssicherung Produktion.....	15
Abbildung 3-5: Einsatzszenario IV: Qualitätssicherung Logistik	16
Abbildung 4-1: Hauptkomponenten des SmaRackT-Systems.....	21
Abbildung 4-2: Foto Untersuchte Stahlkugeln	22
Abbildung 4-3: „Fingerabdruck“ für verschiedene Stahlkugeln	23
Abbildung 4-4: Messaufbau und Signalverarbeitung für Laborvorversuche	24
Abbildung 4-5: Laboraufbau mit Helmholtzspulenpaar	24
Abbildung 4-6: Beispiel Lageabhängige Signale bei unsymmetrischen Objekten	25
Abbildung 4-7: Beispiel PCB-Spule mit Ansteuerungselektronik	25
Abbildung 4-8: Beispiel industriell gefertigte Luftspule	26
Abbildung 4-9: Simulationsmodell für Aufbau mit zwei Kleinteilebehältern	26
Abbildung 4-10: FEM Simulation Feldverteilung bei homogener Behälterfüllung	27
Abbildung 4-11: Schematischer Aufbau erster Demonstrator.....	27
Abbildung 4-12: Umsetzung erster Demonstrator.....	28
Abbildung 4-13: Ansteuerungsmodule für Sensorspulen.....	28
Abbildung 4-14: angepasstes Signalfuss-Blockdiagramm für Indloc-System	29
Abbildung 4-15: Entwurf und Umsetzung Einzelmodul Exciter mit Sensorantennen	29
Abbildung 4-16: Entwurf Aufbau am Regal.....	30
Abbildung 4-17: Antennenarray zur Erfassung unterschiedlicher Behältergrößen	30
Abbildung 5-1: CRISP-DM Vorgehensmodell [THE-04].....	31
Abbildung 5-2: Grenzfälle mit Ladungsträgern (Rotation und Vertikaler Versatz).....	32
Abbildung 5-3: Ladungsträger mit Kontaktvarianz	33
Abbildung 5-4: Data Augmentation der Grenzfälle	33
Abbildung 5-5: Verlauf der spektralen Maxima mit variablen Füllständen	34
Abbildung 5-6: Interpolationsergebnis Data Augmentation Realleistungsanteil.....	34
Abbildung 5-7: Interpolationsergebnis Data Augmentation Imaginärleistungsanteil	35
Abbildung 5-8: Prozessdiagramm zum Anlernen neuer Objekte	36
Abbildung 5-9: Magnetisch induzierte Spektralverläufe [O'T-18].....	40
Abbildung 5-10: Frequenz des Minimums im imaginären Leistungsdichtespektrum abhängig vom Objekt.....	41
Abbildung 5-11: Pearson Matrix für Material- und Objekteigenschaften.....	41
Abbildung 5-12: Pearson Matrix für Objekteigenschaften.....	42
Abbildung 5-13: Pearson Matrix für Füllstände.....	42

Abbildung 5-14: UML-Komponentendiagramm des Benchmarkings	43
Abbildung 5-15: Benchmarking ohne Augmentation.....	44
Abbildung 5-16: Benchmarking mit Augmentation.....	44
Abbildung 5-17: Übersicht über die Evaluationsergebnisse der Anwendungsfälle	45
Abbildung 6-1: UML-Komponentendiagramm des Demonstrators	46
Abbildung 6-2: Web-Frontend mit Steuerelementen.....	47
Abbildung 6-3: Verwendete Demonstratoraufbauten.....	47
Abbildung 7-1: Evaluierungsschritte	48
Abbildung 7-2: Einfluss von Störungen mit/ohne Kalibrierung auf die Systemgenauigkeit	49
Abbildung 7-3: SUS-Score.....	51

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Interviewleitfaden Abschnitt „Rahmenbedingungen“	11
Tabelle 2: Interviewleitfaden Abschnitt „Beispielhafte Aktionspunkte“	11
Tabelle 3: Interviewleitfaden Abschnitt „Weitere Einsatzszenarien“	12
Tabelle 4: Anforderungen im Bereich „Anzeigen“	17
Tabelle 5: Anforderungen im Bereich „IndLoc-Technologie“	18
Tabelle 6: Anforderungen im Bereich „Middleware“	19
Tabelle 7: Anforderungen im Bereich „Gesamtsystem“	20
Tabelle 8: Übersicht über die Mengenummessungen zu den Objekten	31
Tabelle 9: Fraunhofer-Datensätze	37
Tabelle 10: Lorenz Objekte.....	38
Tabelle 11: Elabo Objekte	39
Tabelle 12: System Usability Scale	50
Tabelle 13: Bewertung der Funktionalität	51
Tabelle 14: Bewertung der Funktionalität für Einsatzszenario I und II	52
Tabelle 15: Bewertung der Funktionalität für Einsatzszenario III und IV.....	53

15 Anhang

Nachfolgend ist der Fragebogen für die Erhebung der Anforderungen und Identifikation der Einsatzszenarien dargestellt.

Anforderungserhebung – Anwender

Das Projekt SmaRackT (Smart Rack Monitoring) hat die Entwicklung und Evaluierung einer autonomen und aufwandsarmen intelligenten Objektklassifikation und Mengenquantifizierung an Aktionspunkten zum Ziel. Die Besonderheit dabei ist, dass keines der Objekte mit Tags ausgestattet wird, sondern Identifikation und Tracking durch induktive Nahfeldortung und maschinelles Lernen ermöglicht werden.

Um einen engen Praxisbezug herzustellen und Anforderungen aus der Industrie zu berücksichtigen, sind wir für Ihre Einblicke und Anregungen dankbar.

1. Allgemeines		
<i>In diesem Abschnitt werden allgemeine Informationen und Ihre Kontaktdaten abgefragt.</i>		
1.1 Unternehmen		
1.1.1	Unternehmensname	
1.1.2	Straße, Hausnummer	
1.1.3	PLZ, Ort	
1.1.4	Website	
1.2 Ansprechpartner		
1.2.1	Name, Vorname	
1.2.2	Position/Funktion	
1.2.3	Abteilung	
1.2.4	Telefon Festnetz	
1.2.5	Telefon mobil	
1.2.6	E-Mail	
1.3 Weitere Informationen		
1.3.1	Branche	
1.3.2	Anzahl Mitarbeiter	
1.3.3	Jahresumsatz	
1.3.4	Weitere Standorte	

2. Rahmenbedingungen																	
<i>Dieser Abschnitt dient der Schaffung eines ersten Überblicks über Ihr Unternehmen, wobei insbesondere der Status quo Ihrer Prozessketten in Bezug auf Objektklassifikation und Mengenquantifizierung von besonderem Interesse sind.</i>																	
2.1 Unternehmen und Geschäftstätigkeit																	
2.1.1	Bitte beschreiben Sie in Kürze Ihr Unternehmen und ihre Geschäftstätigkeit (Produkte/Dienstleistungen, Geschäftsmodell, Märkte, Umsatz und Mitarbeiterzahl, ...)																
2.2 Prozesse und Systeme																	
2.2.1	Welche intralogistischen Systeme und Technologien nutzen sie wofür?																
	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">System/Technologie</th> <th>Zweck</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	System/Technologie	Zweck														
System/Technologie	Zweck																
2.2.2	Bitte beschreiben Sie – sofern möglich – typische Prozessketten in ihrem Unternehmen und erläutern dabei speziell die Rolle, welche Objektklassifikation und Mengenquantifizierung darin spielen.																
3. Beispielhafte Aktionspunkte																	
<i>Dieser Abschnitt dient der detaillierten Betrachtung bestimmter Einzelprozesse mit ggf. besonderer Relevanz für SmaRackT.</i>																	
3.1 Wareneingang																	
3.1.1	Wie erfolgt derzeit Ihr Wareneingang? (Rahmenbedingungen? Mitarbeiter? Förderzeuge? Identifikationstechnologie? ERP-Integration?)																
3.1.2	Welche Arten von Artikeln in welcher Form und Menge durchlaufen typischerweise diesen Prozessschritt? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)																
3.1.3	Wie bewerten Sie den Status quo dieses Prozessschritts? (Prozess, Kosten, ...)																

3.1.4	Wie bewerten Sie die Möglichkeit der Identifikation und Mengenquantifizierung mittels Nahfeldinduktion und automatischer Datenverarbeitung? (betroffene Materialien, Prozessintegration, alternative Technologien, ...)
3.2 Ein- und Auslagerung	
3.2.1	Wie erfolgen derzeit Ein- und Auslagerung in Ihrem Warenlager? (Rahmenbedingungen? Mitarbeiter? Förderzeuge? Identifikationstechnologie? ERP-Integration?)
3.2.2	Welche Arten von Artikeln in welcher Form und Menge durchlaufen typischerweise diesen Prozessschritt? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)
3.2.3	Wie bewerten Sie den Status quo dieses Prozessschritts? (Prozess, Kosten, ...)
3.2.4	Wie bewerten Sie die Möglichkeit der Identifikation und Mengenquantifizierung mittels Nahfeldinduktion und automatischer Datenverarbeitung? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)
3.3 Kommissionierung und Verarbeitung	
3.3.1	(Wie) erfassen Sie Teile und Mengen innerhalb von Kommissionier- und Verarbeitungsprozessen? (Rahmenbedingungen? Mitarbeiter? Förderzeuge? Identifikationstechnologie? ERP-Integration?)
3.3.2	Welche Arten von Artikeln in welcher Form und Menge durchlaufen welche Prozessketten? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)
3.3.3	Wie bewerten Sie den Status quo der Kommissionier- und Verarbeitungsprozesse? (Prozess, Kosten, ...)
3.3.4	Wie bewerten Sie die Möglichkeit der Identifikation und Mengenquantifizierung mittels Nahfeldinduktion und automatischer Datenverarbeitung? (betroffene Materialien, Prozessintegration, alternative Technologien, ...)
3.4 Versand	
3.4.1	Wie erfolgen derzeit Versandprozesse? (Rahmenbedingungen? Mitarbeiter? Förderzeuge? Identifikationstechnologie? ERP-Integration? Prüfung der Versandbereitschaft)
3.4.2	Welche Arten von Artikeln in welcher Form und Menge durchlaufen typischerweise den Versand? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)
3.4.3	Wie bewerten Sie den Status quo Ihrer Versandprozesse?

	(Prozess, Kosten, ...)												
3.4.4	Wie bewerten Sie die Möglichkeit der Identifikation und Mengenquantifizierung mittels Nahfeldinduktion und automatischer Datenverarbeitung? (Materialien, Anzahl unterschiedlicher Artikel pro Tag, Regelmäßigkeit, ...)												
4. Weitere Einsatzszenarien													
<i>Ergänzend zu den vorherigen Betrachtungen dient dieser Abschnitt zur Identifikation weiterer Potenziale.</i>													
4.1 Vorteilhafte technische Rahmenbedingungen													
4.1.1	Material: In welchen Prozessschritten sollten insb. metallische Gegenstände erkannt werden? 												
4.1.2	Prozess: In welchen Prozessschritten innerhalb des Materialflusses verharren die Artikel mind. vier Sekunden am selben Ort? 												
4.2 Handlungsbedarf aus Unternehmenssicht													
4.2.1	In welchen fünf Prozessschritten innerhalb Ihres Unternehmens sehen Sie die größten Handlungsbedarfe bzw. Potenziale in Bezug auf die Objektklassifikation und Mengenquantifizierung von Artikeln?												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Prozessschritt</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Prozessschritt	Beschreibung	1		2		3		4		5	
Prozessschritt	Beschreibung												
1													
2													
3													
4													
5													

5. Bemerkungen
<i>Abschließend haben Sie Gelegenheit für zusätzliche Anmerkungen.</i>

Literatur

[ALB-07]

Sönke Albers, Daniel Klapper, Udo Konradt, Achim Walter, Joachim Wolf: Methodik der empirischen Forschung. Gabler Verlag Wiesbaden, 2007.

[ANT-16]

ANTIPOV, S.G.; FOMINA M.V.; VAGIN V.N.; EREMEEV A.P.; GANISHEV V.A.: Methods and Algorithms of Time Series Processing in Intelligent Systems. International Journal "Information Theories and Applications", Vol. 23, Number 1, 2016.

[BAI-14]

BAIN&COMPANY: Building a world-class global procurement organization. Eigene Publikation, Düsseldorf, 2014.

[BAN-08]

Bangor, & Aaron, & Kortum, Phil & T., Philip & Miller, & T., James. (2008). The System Usability Scale (SUS): an Empirical evaluation. International Journal of Human-Computer Interaction. 24. 574-. 10.1080/10447310802205776.

[BME-18]

BUNDESVERBAND MATERIALWIRTSCHAFT UND EINKAUF (BME): C-Teile Management, Brachliegende Potenziale bei Global Playern und KMU. URL: <https://www.bme.de/c-teile-management-brachliegende-potenziale-bei-global-playern-und-kmu-208/>.

[CHE-04]

CHEUNG, S.Y.; COLERI, S.; DUNDAR, B.; GANESH, S.; TAN, C.-W.; VARAIYA, P.: Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor. California PATH Working Paper, 2004.

[CHE-18]

CHEN, X.; KONG, X.; XU, M.: Road Vehicle Recognition Using Magnetic Sensing Feature Extraction and Classification. International Journal of Electronics and Communication Engineering Vol. 12, No.4, 2018.

[DFKI-15]

DEUTSCHES FORSCHUNGSZENTRUM FÜR KÜNSTLICHE INTELLIGENZ (DFKI): Magnetic Sensors. Magnetfeldbasierende Positionsbestimmung in geschlossenen Räumen. URL: <http://www.dfki.de/web/aktuelles/cebit2014/magnetic-sensors>.

[DHA-17]

DHAS, R.: The Rain Rfid Market. IDTechEx Präsentation, URL: <https://rainrfid.org/wp-content/uploads/2017/05/6-IDTechEx-RAIN-RFID-Market-v2-1.pdf>.

[DVZ-15]

DEUTSCHE VERKEHRSZEITUNG: IT in der Logistik – Gerüstet für den Blackout. URL: <https://www.dvz.de/rubriken/logistik/it-in-der-logistik/detail/news/geruestet-fuer-den-blackout.html>.

[ECK-18]

ECKELMANN: Image processing in plant automation.

URL: <https://www.eckelmann.de/en/products-solutions/plant-automation/image-processing/>.

[FRA-18]

FRAUNHOFER IML: Intelligenter Behälter.

URL: https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b1/automation_eingebettete_systeme/Produkte/IntelligenterBehaelter.html.

[GRZ-11]

GRZEGORCZYK, T. M.; BARROWES, B., E.; SHUBITIDZE, F.; FERNÁNDEZ, J., P.; O'NEILL, K.: Simultaneous Identification of Multiple Unexploded Ordnance Using Electromagnetic Induction Sensors, VOL. 49 NO: 7, 2011, pp. 2507–2517.

[GUO-14]

GUO, A.; RAGHU, S.; XIE, X.; ISMAIL, S.; LUO, X.; SIMONEAU, J.; GILLILAND, S.; BAUMANN, H.; SOUTHERN, C.; STARNER, T.: A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list. In: Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, Seattle, 2014, S. 71–78.

[HSU-14]

HSU, P.-M.; LI M.-H.; SU, Y.-F.: Object Detection and Recognition by Using Sensor Fusion. In: Proceedings of 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), 2012, S. 56–60.

[IFF-11]

FRAUNHOFER IFF: RFID-Handschuh für eine effiziente Güter-Identifikation. Magdeburg, 2011.

[IIS-15]

FRAUNHOFER IIS: GoalRef- Die Torlinientechnik.

URL: <http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/kom/proj/goalref.html>.

[KEA-08]

KEAWKAMNERD, S.; CHINRUNGRUEN, J.; JARUCHART, C.: Vehicle classification with low computational magnetic sensor. In: 8th International Conference on IST telecommunications (ITST), 2008, S. 164–169.

[KUS-19]

Jürg Kuster, Christian Bachmann, Eugen Huber, Mike Hubmann, Robert Lippmann, Emil Schneider, Patrick Schneider, Urs Witschi, Roger Wüst: Handbuch Projektmanagement. Springer Gabler, 2019.

[LAN-17]

LANG, A.; FOTTNER, J.: Konzeption eines kamerabasierten Kollisionswarnsystems zur Prävention von Arbeitsunfällen an Gabelstaplern. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2017

URL: <https://www.logistics-journal.de/proceedings/2017/4588/>.

[Lew-09]

Lewis, J.R., Sauro, J. (2009). The Factor Structure of the System Usability Scale. In: Kurosu, M. (eds) Human Centered Design. HCD 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5619. Springer, Berlin, Heidelberg.

[LOG-18]

LOGIVATIONS: Kamera-basierte Objekterkennung – Deep Machine Learning in Verbindung mit Computer Vision.

URL: http://www.logivations.com/de/land/pdf/KameraBasierte_Objekterkennung.pdf.

Aktualisierungsdatum 30.08.2018.

[LUD-17]

LUDWIG, C.; DRÄGER, T.; HÖLCZLI, A.: Alles im Griff - Kommissionierarmband zur Validierung von Pickingprozessen. Hebezeuge Fördermittel, 1-2 (2017), S. 42–43.

[MER-17]

MERY, D.; RIFFO, V.; ZUCCAR, I.; PIERINGER CH.: Object recognition in X-ray testing using an efficient search algorithm in multiple views. In: Insight – Non-destructive Testing and Condition Monitoring 59 (2), 2017, S. 85–92.

[MOU-05]

MOURA, E.P.; SIQUEIRA, M.H.S.; DA SILVA, R.R.; REBELLO J.M.A.: Welding defect pattern recognition in TOFD signals Part 1. Linear classifiers. In: OR Insight 47 (12), 2005, S. 777–782.

[MOU-05A]

MOURA, E.P.; SIQUEIRA, M.H.S.; DA SILVA, R.R.; REBELLO J.M.A.: Welding defect pattern recognition in TOFD signals Part 2. Non-linear classifiers. In: OR Insight 47 (12), 2005, S. 783–787.

[MYL-15]

MYLAPS SPORTS TIMING: BibTag Timing System. URL: <http://www.mylaps.com/en/timing-systems/bibtag-timing-system/263>. Aktualisierungsdatum: 22.06.2015.

[NEG-21]

Negar Golestani MM (30.06.2021); A Comparison of Machine Learning Classifiers for Human Activity Recognition using Magnetic Induction-based Motion signals; URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9135215> (Zugegriffen: 30.06.2021).

[NG-01]

NG, A.Y.; JORDAN, M.I.: On Discriminative vs. Generative Classifiers: A comparison of logistic regression and naive Bayes. Advances in neural Information Processing Systems 14, MIT Press 2001, S. 841–848.

[ONE-06]

O'NEILL, K; SUN, K; SHUBITIDZE, F; SHAMATAVA, I; PAULSEN, K.,D.: Accounting for the Effects of Widespread Discrete Clutter in Subsurface EMI Remote Sensing of Metallic Objects, VOL. 44 NO. 1, 2006, pp. 32–45.

[ONN-22]

Onnx Community (2022); ONNX | Home; URL: <https://onnx.ai/> (Zugegriffen: 23.03.2022).

[O'T-18]

O'Toole MD, Karimian N, Peyton AJ; Classification of Nonferrous Metals Using Magnetic Induction Spectroscopy; IEEE Trans. Ind. Inf., 2018, S. 3477–3485.

[OPA-18]

ONEPLUS: Case Studies. Aaron Oil Inc. URL: <https://oneplussystems.com/case-studies/aaron-oil-inc/>. Aktualisierungsdatum: 26.07.2018.

[PFS-18]

PEPPERL+FUCHS: Accurate by Design, Sensor Solutions for Material. URL: https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct0885d_eng.pdf?v=26-APR-18. Aktualisierungsdatum: 26.07.2018.

[SHK-16]

SHKODA, V.; BRAEUNING, S.; TOEPFER, H.; GOETZE, M.: An Approach to Extract Significant Features for Vehicle Classification Based on Magnetic Field Sensor Data. In: Proceedings of the International Academic Forum AMO - SPITSE - NESEFF, 20.-25.06.2016, Moscow / Smolensk, Russia, 2016, S. 40–41.

[SIE-18]

SIEMENS: Totally Integrated Automation Produktportfolio: Industrial Identification Systeme. URL: https://www.industry.siemens.com/topics/global/de/tia/produktportfolio/Seiten/field_industrial-identification.aspx.

[THE-04]

The Modeling Agency (2004); CRISPMWP-1104-1C.qxd; URL: <https://the-modeling-agency.com/crisp-dm.pdf> (Zugegriffen: 14.03.2022).

[VAR-15]

VAROL, G.; KUZU R.S.: Toward retail product recognition on grocery shelves. In: Proceeding of 6th International Conference on Graphic and Image Processing, 2015.

[WSS-18]

WSS, NETHERLANDS: Smart Waste Platform. URL: <http://www.wss.eu/en/home-page-1-3/products/smart-waste-platform/>.

[WUE-18]

WÜRTH: iBin – Bestände im Blick. URL: https://www.wuerth-industrie.com/web/de/wuerthindustrie/cteile_management/kanban/ibin_intelligenterbehaelter/ibin.php.

[ZHA-04]

ZHANG, H.: The Optimality of Naive Bayes. In: Proceeding of the seventeenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, 2004.