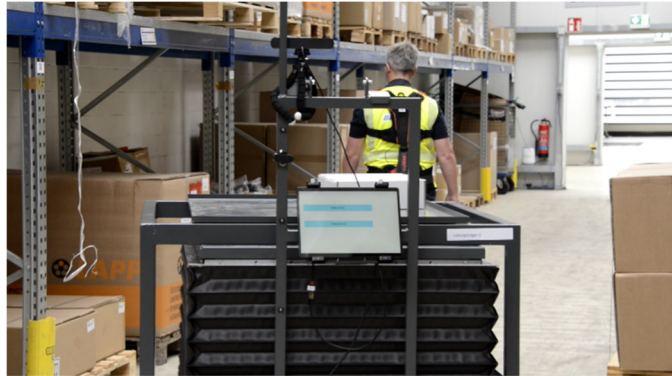


Projekt MEXOT – partnerspezifischer Schlussbericht der BLG (19 H 21008 A)

Verbundprojekt: Intelligente Arbeitsergonomie mittels sensorischer Exoskelette und autonomen Transportsystemen für die erweiterte Mensch-Technik-Interaktion im Automobilumschlag

Teilvorhaben: Intelligente Arbeitsergonomie



Gefördert durch: Bundesministerium für
Verkehr und digitale Infrastruktur

Förderprogramm: IHATEC – Innovative
Hafentechnologien

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



Projektträgerchaft
Innovative
Hafentechnologien

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Datum: 24.04.2025
Förderkennzeichen 19 H 21008 A

ALLGEMEINE INFORMATIONEN	
Zuwendungsempfänger	BLG Autotec GmbH & Co. KG Franziusstraße 70A 27568 Bremerhaven
Förderkennzeichen	19 H 21008 A
Projektleiter	Charlotte Saul
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2022 – 31.12.2024

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung.....	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	19
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	20
II.	Eingehende Darstellung.....	21
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.....	21
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	26
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	29
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Fortschreibung des Verwertungsplans.....	30
II.4.1	Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen.....	30
II.4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	30
II.4.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	31
II.4.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	31
II.4.5	Effekte in Bezug auf die Anreizwirkung.....	32
II.4.6	Verwertungstabelle BLG: Aussagen und Abgleich mit der geplanten Verwertung.....	32
II.5	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.....	35
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	35
II.6.1	Publikationen.....	36
II.6.2	Studentische Abschlussarbeiten.....	37
II.6.3	Vorträge & Veranstaltungen.....	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Mitarbeitende der Autotec GmbH & Co. KG bei der Montage eines Reifens im Technikcenter.....	4
Abbildung 2 Lösungssystem des Projektvorhabens unter Berücksichtigung vorangegangener Prozessanpassungen.....	6

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitliche Darstellung der Arbeitspakete mit Meilensteinen	8
Tabelle 2: Verwertungsplan der BLG.....	34

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
BLG	BLG LOGISTICS
BIBA	BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BPMN	Business Process Model and Notation
EAWS	Ergonomics Assessment Worksheet
FTS	Fahrerloses Transportsystem
IHATEC	Förderprogramm für Innovative Hafentechnologien
KPI	Key Performance Indicator
LMM	Leitmerkmalmethode
UI	User Interface
WLAN	Wireless Local Area Network

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Die Logistikleistungen der See- und Binnenhäfen spielen eine herausragende Rolle für den deutschen Im- und Export und nehmen für die globalen Distributionsketten der deutschen Automobilindustrie eine Schlüsselrolle ein. Für die Automobilindustrie und den Fahrzeughandel ist insbesondere das Seehafenterminal Bremerhaven als weltgrößter Umschlagplatz für Neuwagen die wichtigste Drehscheibe für den interkontinentalen Fahrzeughandel. Das Leistungsangebot der BLG auf dem AutoTerminal Bremerhaven umfasst die gesamte logistische Abwicklung von Fahrzeugen. Zusätzlich bietet die BLG den Fahrzeugherstellern technische Dienstleistungen am AutoTerminal an. Dazu dienen drei Technikcenter, welche von der BLG Autotec GmbH & Co. KG betrieben werden und je nach Leistungsspektrum in unterschiedliche Technikbereiche unterteilt sind. Im 2-Schichtbetrieb arbeiten parallel 25 MitarbeiterInnen pro Technikbereich. Typische Dienstleistungen umfassen das Waschen oder Lackieren der Fahrzeuge, den Reifenwechsel oder nachträgliche Anpassungen nach Endkundenwunsch. Auch Wartungsarbeiten oder Reparaturen gehören zum Angebot der BLG Autotec GmbH & Co. KG.



Abbildung 1 Mitarbeitende der Autotec GmbH & Co. KG bei der Montage eines Reifens im Technikcenter

Der Großteil der Technicarbeiten wurde von den MitarbeiterInnen manuell durchgeführt und geht so mit einer hohen körperlichen Belastung des Personals einher. Insbesondere das Tragen schwerer Lasten, Überkopparbeiten oder Zwangshaltungen sind dabei als physisch belastend einzustufen. Das permanente und ungeschützte Ausführen solcher Arbeiten hat

kurzfristig hohe Personalausfallquoten und -rotationen für den Betrieb sowie langfristig Muskel- oder Gelenkerkrankungen der MitarbeiterInnen zur Folge. Zusätzlich beeinträchtigt dies die Attraktivität der Arbeit und somit auch die Fachkräfteverfügbarkeit negativ.

Der Einsatz passiver Exoskelette zur ergonomischen Unterstützung der Technicarbeiten wurde am AutoTerminal Bremerhaven bereits in vergangenen Projekten getestet. Dabei zeigten sich zwei Aspekte: Zum einen gab es technische Probleme mit dem untersuchten Exoskelett in Bezug auf den Anwendungsfall. Der favorisierte Einsatz passiver Exoskelette konnte aus Kosten- und Instandhaltungssicht grundsätzlich bestätigt werden, wobei die beeinträchtigte Beweglichkeit beim Zurücklegen größerer Entfernungen neben einigen Usability-Aspekten ein Problem darstellte. Zudem konnte, wie bei vielen Arbeitshilfsmitteln, die Akzeptanz bei den MitarbeiterInnen nur bedingt hergestellt werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurde daher ergänzend zu vergangenen Projekten ein ganzheitlicher Ansatz für die ergonomische Gestaltung der Technikbereiche gewählt. Dazu gehörten neben den Technicarbeiten auch die Materialbereitstellung in den jeweiligen Technikcentern. Auf dem Terminal werden jeweils in einem Groß- und einem Kleinteilelager Materialien für die Technikcenter zentral gelagert. Sowohl in dem Groß- als auch dem Kleinteilelager werden Artikel nach dem Person-zur-Ware-Prinzip (PzW) kommissioniert und anschließend zu den Technikcentern per LKW befördert. Dort werden sie erneut eingelagert (Kleinteile) oder bedarfsgesteuert an den Arbeitsplätzen bereitgestellt (Großteile), wobei der Transport innerhalb der Halle mit Flurförderfahrzeugen (Großteile) oder manuell (Kleinteile) stattfindet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die BLG Autotec GmbH & Co. KG vor **zwei Herausforderungen** stand: Die physische Belastung der Tätigkeiten, welche hohe Krankheitsquoten sowie eine geringe Attraktivität der Arbeit zur Folge hatte, und die manuelle Materialbereitstellung, die neben einer zusätzlichen Belastung auch hohe Wege- und Rüstzeiten sowie eine geringe Effizienz bedingte.

Aus diesem Hintergrund war das **übergeordnete Ziel des Projektvorhabens** eine ganzheitliche ergonomische Ausgestaltung des Arbeitsplatzes durch den kombinierten Einsatz von Exoskeletten mit Messsensorik und die Entwicklung einer (teil-)automatisierten Materialbereitstellung anhand fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF). Auf technischer Ebene wurden Sensoren entwickelt und anschließend in das Exoskelett integriert, welche mittels einer entwickelten Bewegungsdatenanalyse die Bewegungen und Lasten der AnwenderInnen aufnimmt und die vom getragenen System geleistete ergonomische

Unterstützung messbar macht. Die Akzeptanz der AnwenderInnen wird so durch die unmittelbare Visualisierung positiver Effekte gesteigert und Hinweise zu ergonomisch ungünstigen Bewegungen gegeben. Damit wird langfristig eine sinkende Ausfallquote und geringerer Personalwechsel angestrebt. Die innerbetriebliche Materialbereitstellung mit Hilfe von autonom fahrenden Flurförderfahrzeugen sowie deren mitarbeiterzentrierte Positionierung verkürzt Wegezeiten innerhalb der Technikhallen und ermöglicht den MitarbeiterInnen die Konzentration auf wertschöpfende Tätigkeiten. Darüber hinaus kann der Materialfluss bedarfsorientiert gesteuert und Lagerbestände vor Ort minimiert werden. Die Bewegungs-, Positions- und Aktivitätsdaten der mitarbeiternahen Sensorik wurden auch für die Interaktion mit autonomen Transportsystemen genutzt, um eine intelligente und interaktive Kommissionierung und Montage zu realisieren, die Fehlerquoten verringert und Prozessabläufe effizienter gestaltet. Im Zusammenspiel mit dem sensorunterstützten passiven Exoskelett kann somit der gesamte Technikbereich am AutoTerminal ergonomisch umgestaltet werden.

Abbildung 2 stellt beispielhaft das Zielbild eines Technikbereichs der im Vorhaben ausgearbeiteten Lösung unter Verwendung von fahrerlosen Transportsystemen und sensorbasierten Exoskeletten dar. Es wurde bereits eine zukünftige Prozessumstellung aus einem vorangegangenen Projekt berücksichtigt.

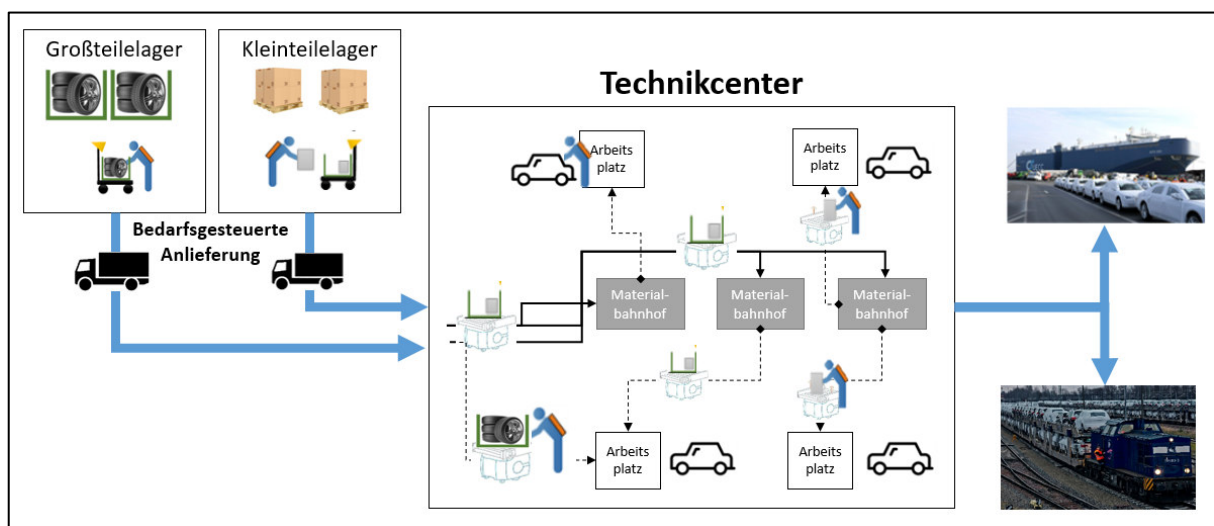


Abbildung 2 Lösungssystem des Projektvorhabens unter Berücksichtigung vorangegangener Prozessanpassungen

Durch die prototypische Validierung in Bremerhaven sollte die Anwendbarkeit der technischen Innovation sichergestellt werden.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Gesamtprojektleitung wurde durch die BLG übernommen. Aufgaben der Gesamtprojektleitung waren u. a. die Koordination zwischen den Arbeitspaketen und die Vertretung des Gesamtprojekts nach außen. Ebenso wurde durch die BLG sichergestellt, dass die Ergebnisse für eine zukünftige Verwertung in der Hafenwirtschaft geeignet sind. Darüber hinaus wurde für jedes Arbeitspaket ein Arbeitspaketleiter definiert, der die Aufgaben innerhalb des Arbeitspakets koordinierte und den Arbeitsfortschritt an die Gesamtprojektleitung kommunizierte. Um einen intensiven Austausch innerhalb des Projekts zu gewährleisten, wurden regelmäßige Projekttreffen durchgeführt: Zum einen wurden halbjährliche Konsortialtreffen durchgeführt, um den Arbeitsfortschritt anhand der definierten Meilensteine zu kontrollieren. Für die kontinuierliche Abstimmung und Koordination der laufenden Projektarbeiten wurden 2-wöchentliche Kernteamtreffen zwischen den beteiligten MitarbeiterInnen der BLG, ELROTEC und des BIBA durchgeführt.

Die BLG als Anwender stellte den Use Case, der eine anwendernahe und praxisorientierte Entwicklung des Lösungsansatzes gewährleistete. Die BLG als Anwendungspartner lieferte insbesondere auch die Anforderungen an die zu entwickelnde Systeme aus technologischer, Prozess- sowie Mitarbeiterperspektive. Darüber hinaus vergab die BLG Autotec einen Unterauftrag an die Hunic GmbH, welche im Projekt als Systementwickler fungiert und insbesondere die Forschung zum sensorischen Exoskelett sowie die Übertragung und Aufbereitung der Daten zur Gestaltung der Nutzerschnittstelle übernimmt. ELROTEC als Systemintegrator verantwortete insbesondere die Forschung und Entwicklung der persönlichen intelligenten Flurförderfahrzeuge inklusive der Integration von Sensorik und der Integration von technischen Weiterentwicklungen am autonomen Transportfahrzeug sowie anwendungsspezifischen Ladungsträgern. Das BIBA als Forschungspartner brachte sein Wissen in den Bereichen Fahrerlose Transportfahrzeuge, Mensch-Technik-Interaktion, Gamification, KI-Methoden zur Datenanalyse sowie zur mitarbeiterzentrierten Assistenz ein. Dabei leitete das BIBA insbesondere die Forschung und Entwicklung der Mensch-Technik-Interaktion mittels Smartphone, Smartwatch, Tablet und FTS-integrierter, kamerabasierter Interaktionsfunktionen sowie der Gamification-Anwendung. Zudem unterstützte das BIBA die Projektpartner ELROTEC, BLG und den Unterauftragnehmer HUNIC in enger Zusammenarbeit bei den innovativen Entwicklungen zur intelligenten Steuerung des fahrerlosen Transportsystems sowie zum sensorischen Exoskelett. Der Bereich der Öffentlichkeitsarbeit wurde durch die BLG koordiniert. Das BIBA war als wissenschaftliches Institut der Universität Bremen schwerpunktmäßig für den Bereich der wissenschaftlichen

Öffentlichkeitsarbeit, beispielsweise durch die Teilnahme an Fachkonferenzen und die Publikation in wissenschaftlichen Journals, zuständig.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit des Projekts war auf 36 Monate festgelegt. Der Arbeitsplan umfasste acht Arbeitspakete (AP) und ist in seiner zeitlichen Abfolge in Tabelle 1 als Balkenplan mit Meilensteinen dargestellt. Hierbei markiert der Projektmonat 1 den Start am 01.01.2022.

Tabelle 1: Zeitliche Darstellung der Arbeitspakete mit Meilensteinen

AP	AP - Bezeichnung	Projektmonat																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
1	Prozessaufnahme und Anforderungsanalyse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
2	Konzeption und Systemarchitektur																																							
3	Erforschung und Entwicklung sensorisches Exoskelett																																							
4	Erforschung und Entwicklung intelligentes FTF																																							
5	Erforschung und Entwicklung Mensch-Technik-Interaktion																																							
6	Implementierung Gamification und Schulungsmaßnahmen																																							
7	Integration, Validierung und Evaluation der Systeme																																							
8	Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

MS	Meilenstein-Bezeichnung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
1	Prozessanalyse und Systemspezifikation sind abgeschlossen. Die Konzept für Gesamtsystem sowie Teilsysteme sind entwickelt.																																						
2	Entwicklung der Subsysteme Elastomerschalten und Anreizsystem sind als erster Prototyp für die weitere Optimierung abgeschlossen.																																						
3	Entwicklung des Subsystems intelligentes FTF abgeschlossen; Prototyp der Objekterkennung und Interaktion zur weiteren Optimierung verfügbar.																																						
4	Entwicklung und Aufbau des Gesamtsystems sowie Anbindung aller Teilsysteme ist abgeschlossen und deren Funktionalität im Labor validiert.																																						
5	Projektabschluss; Leistungsfähigkeit des Systems ist in Feld- und Transferszenario nachgewiesen																																						

In AP 1 erfolgte eine detaillierte Prozessanalyse und ergonomische Bewertung der Ist-Situation, wobei zum einen spezifische prozessuale und ergonomische Schwachstellen identifiziert sowie zum anderen die Anforderungen an das Gesamtsystem aus sensorischem Exoskelett und assistierendem fahrerlosen Transportsystem definiert wurden. Die Projektschwerpunkte lagen in der **Konzeption** von Gesamtsystem und Lösungsbausteinen (AP 2), der **Forschung und Systementwicklung** der Teilsysteme (AP 3-6) sowie der **Evaluation und Optimierung** von Teil- und Gesamtsystem (AP 7). Ergänzend erfolgte in einem begleitenden Arbeitspaket (AP8) das **Projektmanagement** und die Öffentlichkeitsarbeit sowie die Verwertung der Projektergebnisse. Im Rahmen der Konzeption in AP 2 wurde ein Gesamtkonzept für die **ergonomische und prozessuale Unterstützung operativer Mitarbeitende** entwickelt. Für die Konzeption der Teilsysteme sensorisches Exoskelett, intelligentes, assistierendes FTF, mitarbeiterzentrierte Mensch-Technik-Interaktion sowie Gamification- und Schulungsmaßnahmen wurden jeweils

Lösungsalternativen entwickelt, in eine Gesamtsystemarchitektur eingebettet und in Form einer Systemspezifikation dokumentiert. Das AP 3 befasste sich mit der Erforschung und Entwicklung des **sensorischen Exoskeletts**, welches einerseits durch Integration von bewegungssensitiver Sensorik in das passive Exoskelett und andererseits durch Entwicklung und Integration von Funktionalitäten zum De-/Aktivieren der Elastomerspannung erfolgte. Zur Erkennung von Bewegung und Ergonomie wurden zudem entsprechende **Datenanalyse-Methoden** entwickelt und implementiert. In AP 4 erfolgte parallel die Erforschung und Realisierung des **assistierenden, intelligenten FTF**, wobei der Fokus neben der Hardwareintegration von notwendiger Sensorik und FTF-Aufbauten insbesondere auf der Entwicklung von **Algorithmen zur FTF-Lokalisierung, -Steuerung und -Positionierung** lag. Der Schwerpunkt von AP 5 lag, aufbauend auf der Erforschung eines langfristig akzeptanz- und motivationssteigerndem Anreizsystems in der Entwicklung einer hierfür notwendigen, anreizbasierten **Gamification-Anwendung und -App** sowie geeigneter **Akzeptanz- und Schulungsmaßnahmen**, wobei insbesondere deren betriebliche Implementierung einen zentralen Projektinhalt darstellte. AP 6 befasste sich schwerpunktmäßig mit der Erforschung **neuartiger Mensch-Technik-Interaktionsmethoden** zwischen den Teilsystemen. Dies umfasste die Entwicklung intuitiver Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und FTF sowie Mensch und Exoskelett sowie die informatorische Einbindung des Mitarbeitenden in den Gesamtprozess. Die entwickelten Lösungen wurden in AP 7 entsprechend der definierten Systemarchitektur fortlaufend zu einem Gesamtsystem integriert und in Labortests regelmäßig validiert. Zudem fanden mehrere **Feldtests mit AnwenderInnen im BLG-Technikcenter** statt, in denen Teilsysteme sowie abschließend das Gesamtsystem evaluiert wurden.

Berichtszeitraum I (01.01.2022 – 31.12.2022)

AP 1: Prozessaufnahme und Anforderungsanalyse

Die Prozessaufnahme und -modellierung wurde im Berichtszeitraum abgeschlossen (AP1.1). Hierfür wurden Vor-Ort Begehungen der Technikcenter und des Lagers für alle Verbundpartner organisiert und durchgeführt, die Zielprozesse für die Anwendungsszenarien im Projekt ausgewählt und die detaillierten Prozessabläufe anschließend mittels Visio als BPMN-Diagramme in Zusammenarbeit mit dem BIBA modelliert. Im Zuge der Prozessanalyse wurden darauf aufbauend und basierend auf einem Grundriss sowie den örtlichen Gegebenheiten mögliche Fahrwege und Materialübergabepunkte für den Einsatz des Fahrerlosen Transportfahrzeugs (FTF) identifiziert (AP1.3). Für die IST-Analyse der Ergonomie hat die BLG einen FuE-Unterauftrag an HUNIC vergeben und eigenständige Auswertungen der Tätigkeit anhand der Leitmerkmalermethode durchgeführt (AP1.4). Alle erfassten Ergebnisse und Anforderungen wurden dokumentiert (AP1.5). Das AP wurde im Berichtszeitraum damit planmäßig und erfolgreich abgeschlossen.

AP 2: Konzeption und Systemarchitektur

In AP2 wurden zunächst Soll-Prozesse für den Einsatz des FTF und des Exoskeletts im Technikcenter und bei der Kommissionierung entwickelt und intern abgestimmt. Dabei wurden Konzepte aus voran gegangenen Projekten berücksichtigt. Darauf aufbauend erfolgte gemeinschaftlich im Konsortium die Konzeption des Gesamtsystems, welche planmäßig abgeschlossen wurde (AP2.1). Im Rahmen einer arbeits- und organisationspsychologischen Begleitung wurden Mitarbeitendenworkshops mit einer Validierungsgruppe durchgeführt. Der FuE-Unterauftragnehmer HUNIC hat in AP2.1 unterschiedliche Unterstützungs- und Schaltsysteme konzipiert. Darüber hinaus entwickelte die BLG gemeinsam mit dem BIBA ein Anonymisierungskonzept zum Schutz personenbezogener Daten. Bei der Konzeption des intelligenten FTF wirkte die BLG unterstützend mit (AP2.4). Dafür wurde insbesondere auf die Expertise des Prozessmanagements zurückgegriffen. Durch die BLG IT wurden benötigte Schnittstellen für das konzipierte Gesamtsystem definiert. Im Rahmen der Konzeption des Anreizsystems (AP2.5) wurden zunächst Konzeptionsworkshops mit der Begleitgruppe durchgeführt und mögliche Entwicklungsansätze diskutiert. Ebenso hat die BLG ein Schulungskonzept zum richtigen Tragen des Exoskeletts und dem Einstellen der Unterstützung, zur Bedienung des FTFs sowie der Interaktion mit dem intelligentem FTF erstellt. Das AP wurde im Berichtszeitraum somit planmäßig und erfolgreich abgeschlossen.

AP 3: Erforschung und Entwicklung sensorisches Exoskelett

In AP3 wurden im Berichtszeitraum die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am sensorischen Exoskelett gestartet. Für einen Großteil der Aufgaben vergab die BLG dafür einen FuE-Unterauftrag an HUNIC, die in AP3.1 zunächst Sensorik zur Ergonomieerfassung in das bestehende passive Exoskelett integrierten und eine dafür benötigte Platine konzipierten. Als Basis stellte die BLG relevante Bewegungsdaten zur Verfügung und testete das passive Exoskelett im Lager und Technikcenter. Im nächsten Schritt konzipierte HUNIC die Schaltfunktionen (AP3.2) sowie die benötigten Datenschnittstellen (AP3.3) anhand derer die Sensorrohdaten weitergegeben und interpretiert werden.

AP 4: Erforschung und Entwicklung intelligentes, assistierendes Fahrerloses Transportfahrzeug

In AP4 war die BLG bei der Entwicklung und Integration von Algorithmen zur mitarbeiterzentrierten Positionierung des FTF involviert (AP4.3). Der Fokus lag dabei auf der Unterstützung bei der Anforderungsdefinition für die Mensch-Technik-Interaktion. Hierzu zählen die Bedienung des FTF mithilfe eines Tablets, der Follow-Me Modus sowie die individuelle Höhenanpassung anhand der Füllstandshöhenerkennung. Ebenfalls unterstützend betätigte sich das Prozessmanagement durch die Bereitstellung von Kommissionierdaten. Die BLG-IT unterstützte das BIBA bei der Definition benötigter Schnittstellen zu internen IT-Systemen zur Bereitstellung relevanter Artikelstammdaten.

Des Weiteren wurden technische Voraussetzungen bzw. Anforderungen für den FTF-Einsatz im Lager und Technikcenter überprüft. Dazu zählten die WLAN-Ausleuchtung, Verfügbarkeit von Ladekapazitäten/Stromanschlüssen, Aspekte des Personenschutzes und vorhandene Infrastruktur der Fahrwege.

AP 6: Entwicklung Gamification-Anwendung sowie Implementierung Akzeptanz- und Schulungsmaßnahmen

Im Zuge der Gamification-Anreizsystem-Entwicklung hat die BLG gemeinsam mit dem BIBA in einem ersten Schritt einen Workshop mit der Begleitgruppe zur Ideensammlung hinsichtlich geeigneter Spiele-Design-Elemente durchgeführt. Im Rahmen dessen wurden bereits Ansätze für die Anreizplattform, das Punkte-/Trophäensystem und die Smartwatchanwendung diskutiert (AP6.1). Im Sinne eines agilen Vorgehens wurde das Feedback aus den Workshoprunden bei der ständigen Weiterentwicklung berücksichtigt. Die vom BIBA erstellten Mockups für die Anreizplattform (Smartphone-App), für die

ergonomischen Notifikationen (Smartwatch) und den jeweiligen prozessualen Funktionalitäten der Anwendungen wurden seitens BLG überprüft. Ebenso wurde auf Basis eines Vorschlags des BIBA die Trophäen- und Punkteberechnungslogik entwickelt.

Die Fortschritte in diesem Arbeitspaket wurden kontinuierlich in das zuvor erstellte Schulungskonzept eingearbeitet (AP6.3).

AP 7: Prototypische Integration, Validierung und Evaluation der Systeme

Zu Projektbeginn fand im Rahmen des AP 7 ein Mitarbeitendenworkshop mit arbeitspsychologischer Begleitung und unter Einbeziehung des Betriebsrats statt. Hier wurden die Projektinhalte detailliert vorgestellt und eine Testgruppe formiert (AP7.2). Weiterhin führte BLG Autotec erste Feldtests des passiven Exoskeletts im Lagerbereich sowie im Technikcenter durch (AP7.3). Dabei kam das Exoskelett bei der Kommissionierung von schweren Artikeln und dem Reifenwechsel zum Einsatz. Es testeten jeweils drei Mitarbeitende, die anschließend mithilfe eines Fragebogens Feedback zur Anwendung gaben. Im Rahmen der durchgeführten Tests wurden durch den FuE-Unterauftragnehmer HUNIC bereits Daten zur Ergonomie erfasst und ausgewertet.

Zur Besprechung von Funktionen sowie Vorführung von (Teil-)Systemen wie Sensorik, Follow-Me und Gestenerkennung wurden Vor-Ort Termine beim BIBA durchgeführt.

AP 8: Öffentlichkeitsarbeit und Projektmanagement

Im Rahmen von AP8 hat die BLG zur Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit Projektflyer erstellt und ein Projektsteckbrief für das IHATEC-Förderprogramm veröffentlicht. Ebenso fanden diverse interne Projektvorstellungen unter anderem im Rahmen eines Digiwebinars statt. Eine weitere Veröffentlichung zum Projektvorhaben fand in der Zeitschrift „SUT – Schifffahrt und Technik“ statt (AP8.1). Für ein einheitliches Projektmanagement wurde zu Projektstart ein Onlinekanal zum gemeinsamen Zugriff aller Partner aufgesetzt. Die BLG leitet darüber hinaus ein zweiwöchiges Projektteammeeting zur Abstimmung der Fortschritte und weiteren Planung und bereitet als Konsortialführer halbjährige Treffen des Konsortiums vor. Lenkungskreise finden quartalsweise mit dem internen Management statt (AP8.2).

Berichtszeitraum II (01.01.2023 - 31.12.2023)

AP 3: Erforschung und Entwicklung sensorisches Exoskelett

In AP3 wurden im Berichtszeitraum im Rahmen des durch die BLG Autotec an HUNIC vergebenen Unterauftrags die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am sensorischen Exoskelett fortgesetzt. In enger Zusammenarbeit mit dem FuE-Unterauftragnehmer HUNIC hat die BLG das Monitoring der Fortschritte bei der Entwicklung der Ergonomiedatenerfassung übernommen. Dies beinhaltete auch die Integration der Wägezelle zur Kraftmessung. Ein Schwerpunkt lag außerdem auf der Beratung und Unterstützung bei der optimalen Positionierung der IMU-Sensoren im Exoskelett. Zur Umsetzung der Kraftmessung wurden zwei Prototypen konstruiert und aufgebaut. Dies umfasste die mechanische Integration der Wägezelle in das Exoskelett (AP 3.1).

In AP 3.2 entwickelte HUNIC die Elastomer-Schaltfunktion, woran die BLG durch regelmäßige Abstimmungen zu den Anforderungen der entwickelten Technologien beteiligt war. Um die Elastomer-Schaltfunktion zu integrieren, erfolgte eine strukturelle Anpassung des Exoskeletts. Parallel dazu wurden Workshops durchgeführt, um Verbesserungspotentiale zu identifizieren und die Anforderungen für einen Prototypen festzulegen. Basierend auf den identifizierten Optimierungsmöglichkeiten wurde die Konstruktion der Elastomer-Schaltfunktion durch HUNIC überarbeitet. Ein neuer Prototyp wurde aufgebaut, um Funktionstests durchzuführen und die aktive Elastomer-Schaltfunktion zu überprüfen.

Im Rahmen des AP 3.3 lag der Fokus auf dem Monitoring und der Abstimmung mit dem FuE-Unterauftragnehmer HUNIC und dem BIBA zur Definition der Schnittstellen für die aktive Ansteuerung der Elastomer-Schalteinheit.

Darüber hinaus übernahm die BLG die Beratung und Abstimmung der Entwicklungsfortschritte zur Sensordatenanalyse mit dem BIBA und HUNIC. In diesem Zusammenhang erfolgte die Auswahl der zu erfassenden Ergonomie-Kennzahlen. Basierend auf einer gründlichen Analyse der resultierenden Ergebnisdaten wurden die relevanten Kennzahlen identifiziert und festgelegt (AP 3.4).

AP 4: Erforschung und Entwicklung intelligentes, assistierendes Fahrerloses Transportfahrzeug

Im vorliegenden Berichtszeitraum erfolgte gemäß dem vorgesehenen Zeitplan der Abschluss der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich des intelligenten Fahrerlosen

Transportsystems (FTF). BLG Autotec stellte im Rahmen dessen maßgeblich Inputdaten an ihre Projektpartner bereit. Die Konzeption von FTF-Erweiterungen, darunter die Wägeinheit, der Hubtisch, die Aufnahmeeinheit für Kameras und das Bedien-Tablet, wurde von ELROTEC durchgeführt, wobei vorab die spezifischen Anforderungen der BLG an die Konstruktion, insbesondere hinsichtlich der Aufbauten wie Sonderladungsträger, definiert wurden. Die vom BIBA entwickelte ComFlow-Steuerung wurde einer Sichtung und Prüfung durch die IT-Abteilung der BLG unterzogen. Parallel dazu erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem BIBA die Validierung des Follow-Me-Modus in umfangreichen Labor- und Feldtests. Diese Validierungsprozesse umfassten insbesondere den Austausch von Informationen zu Kommissionierpositionen im Lager, um eine präzise Anpassung und Feinabstimmung zu gewährleisten. Gleichmaßen unterstützte die BLG die Hardwareauswahl im Rahmen der Entwicklung der WLAN RTT-Indoorortung und übermittelte relevante Gebäudedaten (AP4.3).

AP 5: Erforschung und Entwicklung Mensch-Technik-Interaktion

Im Rahmen von AP5.1 wurde im Berichtszeitraum der Forschungs- und Entwicklungsprozess für die Mensch-Technik-Interaktion eingeleitet. Die BLG beteiligte sich dabei an der Ausgestaltung der Smartwatch-App und der Tablet-Anwendung, wobei die Benutzerfreundlichkeit als zentrales Qualitätsmerkmal im Mittelpunkt stand. Die Entwicklung der genannten Anwendungen basierte auf den vom BIBA konzipierten Mockups. Diese wurden mit potenziellen Anwender:innen abgestimmt, wobei ein besonderes Augenmerk auf eine positive Bedienbarkeit und Praxistauglichkeit gelegt wurde. Das eingeholte Feedback, insbesondere im Hinblick auf die Benutzerführung, wurde dokumentiert und floss in den weiteren Entwicklungsprozess ein. Die Validierung beider Anwendungen erfolgte durch Labor- und Feldtests.

AP 6: Entwicklung Gamification-Anwendung sowie Implementierung Akzeptanz- und Schulungsmaßnahmen

In AP6 wurde die Entwicklung an der Gamification-Anreizsystem-Anwendung fortgesetzt. Die im vorherigen Berichtszeitraum konzipierte Nutzeroberfläche für die Gamification-Anwendung wurde durch das BIBA als erster Prototyp realisiert und anschließend durch die BLG validiert. Dabei gab die BLG regelmäßiges Feedback zu den Entwicklungen unter Einbeziehung der operativen Mitarbeitenden (AP6.1). Insbesondere die Ergonomieauswertung sowie das Punkte-Anreizsystem wurden hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit und praktischer Anwendbarkeit eingehend geprüft.

Die im vorherigen Berichtszeitraum erstellten Schulungsunterlagen wurden in AP6.3 laufend um neue Entwicklungen ergänzt. So wurden die überarbeitete Sensorlösung für das Exoskelett und die Erläuterungen der FTF-Aufbauten in das Dokument aufgenommen. Ebenfalls wurden die Funktionen der Smartphone-App der Anreizplattform detaillierter beschrieben, welche aus vier Tabs besteht: Start (Grundlegende prozessbezogene Funktionalitäten, z.B. Auswahl Arbeitsplatz, Prozess, VIN-Scan), Gamification- & Ergonomie (Anreizsystem-Übersicht und Ergonomiedaten-Visualisierung), Gamification-Shop (Eintausch von Punkten gegen Belohnungen) und Mitarbeiterprofil.

Für die Sicherstellung der Systemakzeptanz seitens der Mitarbeitenden wurde im Rahmen des AP6.4 Feedback der potenziellen Anwendenden zu den Teilsystemen Exoskelett, FTF und Anreizplattform eingeholt.

AP 7: Prototypische Integration, Validierung und Evaluation der Systeme

Im Rahmen von AP7 wirkte die BLG vorbereitend für die Validierung der Teilsysteme innerhalb der Feldtests an vorhergehenden Labortests beim BIBA mit. Dafür wurde auch ein Unterauftrag an die HUNIC GmbH erteilt, die gemeinsam mit dem BIBA Workshops und Erprobungen zur Elastomer-Schalteinheit durchführte. Anschließend konzipierte und organisierte die BLG Feldtests der Teilsysteme und feedbackbasierte Workshops zur Aufbereitung und Sicherstellung kontinuierlicher Verbesserungen (AP7.2).

In AP 7.3 wurden mehrere Feldtests von Teilsystemen vor Ort bei der BLG Autotec im Lager und im Technikbereich gemeinsam mit der operativen Testgruppe durchgeführt. In einem ersten Test wurde die Indoorortung mit WLAN-RTT erprobt. Dazu wurden 20 RTT-Accesspoints im Lager an den Regalanlagen angebracht und in mehreren Testläufen die Positionsgenauigkeit der Personenortung validiert, um eine spätere exakte FTF-Steuerung zu gewährleisten. Nachfolgend organisierte die BLG einen Feldtest der FTF-Steuerung und des Follow-Me Modus. Zunächst wurde das Lager und Technik-Layout durch das FTF aufgenommen und hinsichtlich der Genauigkeit überprüft. Das FTF fuhr anschließend durch Lagerreihen und Montagebereich, um etwaige Bodenunebenheiten und weitere technische Schwierigkeiten zu identifizieren und dieses im operativen Betrieb zu testen. Ebenso wurden die Materialbahnhöfe sowie der Palettenaufnahmepunkt ein erstes Mal systemisch gekennzeichnet und angesteuert. Abschließend wurde der FTF-Follow-Me-Modus während der Kommissionierung durch das Projektteam getestet. Basierend auf den Testergebnissen konnten weitere Optimierungsbedarfe identifiziert werden, die im Nachgang durch die BLG in Feedbackworkshops festgehalten wurden. Außerdem wurde in Vorbereitung für die Tests

des Gesamtsystems in Abstimmung mit dem BIBA eine erste Grobkonzeption für das Evaluationskonzept in den Feldtest-Anwendungsszenarien erarbeitet (AP7.3).

AP 8: Öffentlichkeitsarbeit und Projektmanagement

Im Rahmen von AP8 wurde im Kontext der Öffentlichkeitsarbeit die Projektwebseite fortlaufend aktualisiert. Ebenso wurden relevante Informationen zu Entwicklungen und Tests in der BLG-eigenen Mitarbeitenden-App geteilt und in internen Veranstaltungen vorgestellt. Das Projekt wurde auch vom gesamten Konsortium im Rahmen eines Besuchs vom BMDV beim BIBA vorgestellt. Die BLG war zudem zusammen mit den Projektpartner BIBA und ELROTEC auf der Fachkonferenz „Neue Technologien und Testfelder für Wasserstraßen und Häfen“ mit einem Projektstand als Aussteller vertreten (AP8.1). Für die wissenschaftliche Verwertung ist federführend das BIBA verantwortlich. Alle veröffentlichten Artikel werden vorab durch die BLG geprüft und freigegeben.

Im Rahmen des AP8.2 organisierte und leitete die BLG regelmäßige Projektteammeetings, die der Abstimmung mit allen Partnern und der Kontrolle des Projektfortschritts dienen. In internen Lenkungsreisen wurden ebenfalls über Projektstand und Zwischenergebnisse berichtet. Ebenso wurde der Betriebsrat über laufende Projektaktivitäten informiert. Die halbjährlichen Konsortialtreffen wurden durch die BLG organisiert, vorbereitet und federführend durchgeführt.

Berichtszeitraum III (01.01.2024 – 31.12.2024)

AP 3: Erforschung und Entwicklung sensorisches Exoskelett

In AP3 wurden im Berichtszeitraum die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am sensorischen Exoskelett abgeschlossen. Die BLG vergab für die Aktivitäten im AP3 einen Unterauftrag an die HUNIC GmbH, welche federführend mit dem BIBA die Entwicklung vorantrieb. Dabei wurde die Entwicklung der drei ins Exoskelett integrierten Teilsysteme, 1) die IMU-Sensorik zur Aktivitäts- und Ergonomieanalyse, 2) die Elastomer-Schaltfunktion und 3) die Kraftmessung mittels Wägezelle fertiggestellt und erfolgreich getestet. Für die Eigenentwicklung des IMU-Sensorsystems wurden durch BIBA und HUNIC drei Sensorsets gefertigt und in drei zugehörige Exoskelette mittels eingnähter Sensor-Taschen integriert (AP3.1). Zudem erfolgten mehrere Optimierungen, z. B. eine LED-Statusanzeige, eine kleinere, integrierbare Powerbank, eine im Exoskelett zentralisierte Stromversorgung, eine Sensorset-interne Kabelkommunikation und eine Umstellung der Server-Schnittstelle auf TCP/IP (AP3.1 und AP3.3).

Im Rahmen des Unterauftrags entwickelte HUNIC für die Elastomer-Schaltfunktion im Berichtszeitraum zwei Hardware-Generationen, welche im Zuge deren Entwicklung jeweils mehrere Verbesserungen vorgenommen wurden. So wurden erstens der Freilauf der Elastomere mittels einer Führungs- und Umlenkschiene verbessert, zweitens die Wägezelle, der Servo-Motor, der Akku und der Mikrocontroller direkt in ein Housing integriert, drittens ein stärkerer Motor verwendet sowie die Verzahnung für eine robuste Arretierung optimiert und viertens die Kabelführung durch Optimierung der räumlichen Anordnung der genannten Komponenten verbessert (AP3.2). Darüber hinaus wurde eine automatische Schaltfunktion entwickelt und mittels Laborstudien validiert (AP3.4). Ebenfalls wurde im Berichtszeitraum die Messung der Exoskelett-Unterstützungsleistung mittels der Wägezelle hardwaretechnisch durch HUNIC implementiert. Die Funktionalität der Schaltfunktion als auch der Wägezelle wurden im Rahmen einer Laborstudie systematisch validiert.

AP 6: Entwicklung Gamification-Anwendung sowie Implementierung Akzeptanz- und Schulungsmaßnahmen

In Arbeitspaket 6 wurde im Berichtszeitraum die Entwicklung der Gamification-Anwendung abgeschlossen und die Schulungsmaßnahmen finalisiert und umgesetzt. (AP6.1).

Vor der Durchführung der Feldtests fanden detaillierte Schulungen der Mitarbeitenden statt. Die Mitarbeitenden der Technik (Montage) wurden insbesondere hinsichtlich der FTS-Nutzung (Einstellung der Hubtisch-Höhe, grundlegende Funktionsweise des FTS, Nutzung der Smartphone-App und Anfordern des FTS über die Smartphone-App, Materialentnahme) geschult; die Schulungen für die Mitarbeitenden im Lager (Kommissionierung) umfassten das Exoskelett (korrektes Anlegen und Tragen, Funktionsweise der Sensorik), die Interaktion mit dem FTS (individuelle Einstellung der Hubtisch-Höhe, Anfordern des FTS über die Smartphone-App, Verwendung des Follow-Me-Modus im Lager und grundlegende Funktionsweise des FTS) sowie die Anreizplattform und Ergonomie-Auswertung (Bedienung der Smartphone-App für Ergonomie-Visualisierung, Kennzahlen der Ergonomie-Auswertung, Datenverarbeitung, Punktesystem und Belohnungen sowie Einlösen der Belohnungen in der Kantine) (AP6.3). Außerdem unterstützte die BLG im Zuge von iterativen Tests, Workshops und der Felderprobung die Korrektur mehrere Bugs in der App (AP6.4).

AP 7: Prototypische Integration, Validierung und Evaluation der Systeme

In Arbeitspaket 7 wurden im Berichtszeitraum einerseits mehrere Labortests zur Validierung der Funktionalität und zur Optimierung der entwickelten Systeme (AP7.1 und AP7.2) und andererseits umfangreiche Feldtests bei der BLG – sowohl in der Montage als auch im Lager

– durchgeführt, um die Funktionalität und Praxistauglichkeit der einzelnen Komponenten sowie des Gesamtsystems zu erproben (AP7.3). Die Vorbereitung und Durchführung der Feldtests übernahm die BLG. Dies umfasste mehrere wesentliche Schritte. Zunächst wurden die FTF-Wegpunkte für die Arbeitsplätze in der Montage und für die Kommissionierung im Lager definiert, durch das BIBA in das ComFlow-System integriert und mit räumlich applizierten QR-Codes verknüpft. Im Zuge der Vorbereitungen wurden die verschiedenen Prozesse zudem ausführlich mit operativem Personal der Autotec GmbH getestet – in der Montage z. B. sowohl mit einem einzelnen Auftrag als auch mit mehreren parallel eingehenden Montageaufträgen. Außerdem wurde das Studiendesign der Feldtests detailliert ausgearbeitet, einschließlich der Erstellung von Fragebögen für die Erhebung qualitativer und quantitativer Rückmeldungen der Teilnehmenden, wobei die BLG hierbei unterstützend tätig war. Diese Fragebögen wurden über Google Forms erstellt und von den operativen Mitarbeitenden nach jeder Schicht und zum Abschluss der Testphase ausgefüllt (AP7.1 und AP7.3). Die Feldtests wurden dabei über mehrere Wochen hinweg durchgeführt. In der Montage wurde der MEXOT-Montageprozess unter realen Bedingungen bei der BLG erprobt. Parallel dazu fand im Lager (in den Prozessen der Kommissionierung und der Entladung von Reifen aus LKWs) die Erprobung des sensorischen Exoskeletts und der Gamification-App statt. Die Ergebnisse der Feldtests wurden umfassend ausgewertet, grafisch aufbereitet und im Projektteam bewertet. Die Auswertung umfasste sowohl das qualitative Feedback der Testpersonen als auch quantitative Messwerte (z. B. Usability, Prozesszeiten, Qualität der Zusammenarbeit mit FTS, Nützlichkeit des FTS) (AP7.3).

AP 8: Öffentlichkeitsarbeit und Projektmanagement

Im Berichtszeitraum wurden im Rahmen von AP 8 mehrere Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit vorgenommen und ein enges internes und externes Projektmanagement seitens BLG betrieben, um das Projekt erfolgreich abzuschließen. Im Zuge der Öffentlichkeitsarbeit (AP8.1) wurden mehrere Maßnahmen umgesetzt, um die Projektergebnisse einer breiten Zielgruppe zugänglich zu machen. Dazu zählte der Dreh, Schnitt und die Veröffentlichung eines Abschlussvideos im Lager und Technikbereich der BLG Autotec, das die zentralen Projektergebnisse anschaulich zusammenfasst.

Ebenfalls erfolgten begleitend diverse Posts über Social-Media-Kanäle und BLG-interne Mitarbeitendenapp zum erfolgreichen Abschluss der Testphase. Die MEXOT-Projektwebseite wurde fortlaufend aktualisiert, um den Projektfortschritt widerzuspiegeln. Das Abschlussvideo wurde in diesem Zuge prominent auf der Startseite eingebunden, und

es wurden mehrere Neuigkeiten-Beiträge verfasst, um die Öffentlichkeit über die erfolgten Entwicklungen, Veröffentlichungen und den Fortschritt zu informieren. Im Bereich der wissenschaftlichen Verwertung wurden die Projektergebnisse in Form von wissenschaftlichen Fachpublikationen hauptsächlich durch das BIBA aufbereitet. Das Projektmanagement (AP8.2) umfasste die Organisation und Durchführung regelmäßiger Planungstreffen zur Steuerung der Projektaktivitäten (insbesondere auch der Feldtests) sowie die Vorbereitung und Durchführung der Konsortialtreffen, einschließlich des abschließenden Projekt-Abschlusstreffens. Schließlich fanden Abstimmungen zur Verwertung der Projektergebnisse statt, um konkrete Implementierungsszenarien zu definieren und mögliche Verwertungsmöglichkeiten der Projektpartner zu identifizieren. Alle Aktivitäten des Projektmanagements wurden federführend von der BLG vorbereitet, koordiniert und durchgeführt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt MEXOT wurde als interdisziplinäres Forschungsprojekt geplant und durchgeführt. Daher bildet der im Gesamtbericht dargestellte Stand der Technik den Ausgangspunkt für alle Projektaktivitäten. Eine gesonderte Darstellung des Stands der Technik, an dem angeknüpft wurde, welche ausschließlich auf Einzelaktivitäten eines Projektpartners abzielt, ist nur bedingt möglich und eingeschränkt zielführend. Deswegen wird an dieser Stelle auf den dargelegten Stand der Technik in dem Gesamtbericht verwiesen.

Wie im Gesamtbericht beschrieben, stellen die gemeinsam generierten Projektergebnisse aus vorangegangenen Verbundforschungsprojekten einen wichtigen Ausgangs- und Anknüpfungspunkt dar. Die BLG bringt als Vorarbeit in erster Linie Ergebnisse der im Jahr 2019 abgeschlossenen Durchführbarkeitsstudie „Kali“ ein, welche als Basis für MEXOT dienen. Im Fokus der Studie stand die Identifikation von technischen Lösungen, die die kognitiven Fähigkeiten und die Berufserfahrung von MitarbeiterInnen nutzen und Ihnen ein ermüdungsfreies Arbeiten ermöglichen. Im Rahmen dessen wurde der Einsatz passiver Exoskelette in unterschiedlichen Anwendungsfällen der BLG getestet. Im Rahmen des unternehmensinternen Projekts „Masterplan Autotec 2022“ wurde die Materialbereitstellung in den Technikcentern sowohl systemisch als auch physisch überarbeitet. Die Prozesskonzeption im Projekt MEXOT berücksichtigt diese Vorarbeiten. Eine Detailauflistung zum wissenschaftlichen und technischen Stand befindet sich im Gesamtbericht.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen wird in dem Gesamtbericht für alle Projektpartner umfassend dargelegt. An dieser Stelle wird daher ausschließlich auf die Zusammenarbeit mit anderen Stellen aus Sicht der BLG fokussiert. Diese umfasst zum einen die Zusammenarbeit mit der HUNIC GmbH hinsichtlich der Sensorikintegration und der Entwicklung der Elastomer-Schaltfunktion.

Zudem vergab die BLG F&E-Unteraufträge über bestimmte Arbeitsleistungen innerhalb des eigenen Konzerns. Aus organisatorischen und strukturellen Gründen innerhalb der BLG mussten diese Unteraufträge an die BLG LOGISTICS GROUP AG & Co. KG (Bereich ZBA ND), die BLG LOGISTICS GROUP AG & Co. KG (Bereich IT-Systems), und die BLG Autoterminal Bremerhaven GmbH & Co. KG vergeben werden. Aufgrund interner organisatorischer Umstrukturierungen übernahm das Team Technology der BLG Handelslogistik GmbH & Co. KG die anfangs von der GROUP (ZBA ND) verantworteten Aktivitäten während der Projektlaufzeit. Somit wurde der Unterauftrag auf diese Gesellschaft umgewandelt.

Einige im Projekt MEXOT durchzuführenden Arbeiten wurden von Stabsfunktionen. Die BLG Handelslogistik stellt mit dem Team Technology den Bereich, der Forschungsaktivitäten für die Unternehmensgruppe koordiniert und die Anwendbarkeit der Ergebnisse unternehmensübergreifend prüft. Die Abteilung verfügt über langjährige Erfahrung in der Leitung von F&E-Projektverbänden. Alle im Projekt geplanten Aktivitäten, die sich auf die BLG-eigenen IT-Systeme beziehen, werden von der BLG LOGISTICS GROUP AG & Co. KG (IT-Services), erbracht. Die Abteilung entwickelt, implementiert und unterhält die Logistiksysteme, die die Fahrzeuge durch das Netzwerk der BLG steuern und gleichzeitig mit den Logistiksystemen der Kunden kommunizieren. Das Prozessmanagement (BLG Autoterminal Bremerhaven GmbH & Co. KG) arbeitete zu Beginn der Projektlaufzeit eng mit den zuständigen Bereichen der genannten Gesellschaften zusammen, um ein passendes Konzept zu erstellen.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Im Folgenden soll die im Projekt geleistete Arbeit den jeweiligen Zielen und geplanten Ergebnissen der Arbeitspakete gegenübergestellt werden. Neben einer groben Zusammenfassung aus Sicht des Gesamtprojekts wird insbesondere die Arbeit der BLG fokussiert, die auf nachfolgende Arbeits- bzw. Unterarbeitspakete aufgeteilt war:

Arbeitspaket 1: Prozessaufnahme und Anforderungsanalyse

- Prozessaufnahme und -modellierung (1.1)
- Digitalisierung Arbeitsanweisungen (1.2)
- Prozessanalyse (1.3)
- Ergonomische Bewertung IST-Prozess (1.4)
- Anforderungsdefinition und -spezifikation (1.5)

Arbeitspaket 2: Konzeption und Systemarchitektur

- Konzeption Gesamtsystem & Datenmanagement (Anonymisierung) (2.1)
- Konzeption intelligentes FTF (2.4)
- Konzeption Gamification & Schulung (2.5)

Arbeitspaket 3: Erforschung und Entwicklung sensorisches Exoskelett

- Integration IMU-Sensorik und S-Wägezelle in Exoskelett (3.1)
- Entwicklung Schaltfunktion für Elastomerverbindungen (3.2)
- Entwicklung Datenschnittstelle und -plattform (3.3)
- Datenanalyse Exoskelett-Sensorik (3.4)

Arbeitspaket 4: Erforschung und Entwicklung intelligentes FTF

- Algorithmenentwicklung mitarbeiterzentrierte Positionierung (4.3)

Arbeitspaket 5: Erforschung und Entwicklung Mensch-Technik-Interaktion

- Erforschung Pick-by-Motion und Assembly-by-Motion (5.1)
- Erforschung & Entwicklung MTI zwischen Mitarbeiter und Exoskelett (5.4)

Arbeitspaket 6: Implementierung Gamification und Schulungsmaßnahmen

- Erforschung & Entwicklung Anreizsystem (6.1)
- Entwicklung Schulungskonzept (6.3)
- Umsetzung Maßnahmen zur Akzeptanzsteigerung (6.4)

Arbeitspaket 7: Prototypische Integration, Validierung und Evaluation der Systeme

- Integration Gesamtsystem & Optimierung für industriellen Einsatz (7.2)
- Evaluation in Feldtests (7.3)

Arbeitspaket 8: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

- Verwertung und Öffentlichkeitsarbeit (8.1)
- Projektmanagement (8.2)

Eine detaillierte Erläuterung der Arbeitsaktivitäten und Projektergebnisse befindet sich im Gesamtbericht des Projektkonsortiums auf den hiermit hingewiesen sei. Nachfolgend wird deshalb lediglich in Kurzfassung auf die Arbeiten der BLG in den Arbeitspaketen eingegangen.

Arbeitspaket 1

Im Rahmen von AP 1, von der BLG verantwortet, wurde eine umfangreiche Ist-Analyse für die ergonomischen und prozessualen Optimierungspotentiale durchgeführt sowie Spezifikation der Anforderungen an die zu entwickelnden Systeme formuliert.

Die BLG übernahm in diesem AP die Prozessaufnahme und -modellierung (AP1.1), wofür Vor-Ort-Begehungen in den Technikcentern und Lagern durchgeführt wurden. Die Zielprozesse für die Anwendungsszenarien des Projekts wurden ausgewählt und anschließend mittels BPMN-Diagrammen in Visio modelliert. In der Prozessanalyse wurden basierend auf einem Grundriss sowie den örtlichen Gegebenheiten Fahrwege und Materialübergabepunkte für den Einsatz eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs (FTF) identifiziert (AP1.3). Die BLG vergab einen FuE-Unterauftrag an HUNIC zur Durchführung einer IST-Analyse der Ergonomie, die durch die Leitmerkmalermethode erfolgte (AP1.4). Alle Ergebnisse und Anforderungen wurden dokumentiert (AP1.5). Alle Ziele des Arbeitspakets wurden wie angegeben erreicht.

Arbeitspaket 2

Im Rahmen von AP 2 wurde das Gesamtsystem konzipiert, indem zunächst eine Detaillierung der einzelnen Systemfunktionalitäten, der Systemarchitektur und der Datenverarbeitung

erfolgte. Anschließend wurden die spezifischen Konzepte für die verschiedenen Teilsysteme – die Mensch-Technik-Interaktion, das sensorische Exoskelett, das intelligente assistierende Transportsysteme und die Gamification-Plattform sowie die Schulungsmaßnahmen – ausgearbeitet. Das Arbeitspaket wurde von ELROTEC verantwortet.

In AP2 übernahm die BLG eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Abstimmung der Soll-Prozesse für den Einsatz des FTF und Exoskeletts (AP 2.1). Gemeinsam mit dem BIBA erarbeitete die BLG ein Anonymisierungskonzept zum Schutz personenbezogener Daten und unterstützte aktiv bei der Konzeption des intelligenten FTF (AP 2.4). Zudem definierte die BLG IT die benötigten Schnittstellen für das Gesamtsystem (AP 2.5). Die BLG war maßgeblich an der Entwicklung des Anreizsystems beteiligt und führte Konzeptionsworkshops mit der Begleitgruppe durch. Darüber hinaus wurde ein Schulungskonzept für die richtige Nutzung des Exoskeletts, des FTFs und deren Interaktion erstellt, wodurch das Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen wurde.

Arbeitspaket 3

Im Rahmen von AP 3 wurde ein sensorisches Exoskelett entwickelt. Dazu wurde auf ein Modell aufgebaut, welches bereits in der Industrie angewandt wird, und dieses durch verschiedene sensorische Komponenten und digitale Schnittstellen erweitert. Zunächst wurden IMU-Sensorik, S-Wägezelle sowie WiFi RTT-Komponenten in das Exoskelett integriert. Anschließend wurde eine Schaltfunktion für Elastomerverbindungen erforscht und validiert. Im nächsten Schritt konzentrierte sich die Arbeit auf die Entwicklung einer Datenschnittstelle und -plattform sowie auf die Ausarbeitung von Datenanalyse-Algorithmen für die Exoskelett-Sensorik. Das Arbeitspaket wurde von der BLG verantwortet.

Die BLG vergab im AP 3 für die Forschung und Entwicklung des sensorischen Exoskeletts, einen FuE-Unterauftrag an HUNIC. Dafür stellte sie relevante Bewegungsdaten zur Verfügung und testete das passive Exoskelett im Lager und Technikcenter, während HUNIC die Sensorik zur Ergonomieerfassung integrierte und eine Platine konzipierte (AP3.1). Die BLG überwachte den Fortschritt der Entwicklung, einschließlich der Integration einer Wägezelle zur Kraftmessung, und beriet bei der Positionierung der IMU-Sensoren im Exoskelett. Bei der Entwicklung der Elastomer-Schaltfunktion (AP 3.2) war die BLG durch regelmäßige Abstimmungen zur Optimierung der Technologie und der Anpassung des Exoskeletts eng eingebunden. Zudem arbeitete die BLG mit HUNIC und dem BIBA an der Sensordatenanalyse und der Festlegung relevanter Ergonomie-Kennzahlen (AP 3.3 und AP 3.4).

Arbeitspaket 4

Im Rahmen von AP 4 wurde ein FTF um flexible Lastaufnahme, verbesserte Interaktion mit den Werkern, ergonomische Hilfen und flexibler Prozesssteuerung erweitert. Zunächst lag der Fokus auf der Entwicklung und Integration einer universellen Lastaufnahme sowie eines adaptiven Hubtisches für FTF. Im Anschluss wurden Sensorik und Visualisierung zur MIT in FTF integriert. Abschließend erfolgte die Entwicklung und Integration von Algorithmen zur Interaktion und mitarbeiterzentrierten Positionierung (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sowie zur Steuerung des FTF. Das Arbeitspaket wurde von ELROTEC verantwortet.

In AP4 unterstützte die BLG maßgeblich bei der Anforderungsdefinition für die Mensch-Technik-Interaktion, einschließlich der Bedienung des FTF per Tablet, dem Follow-Me-Modus und der Höhenanpassung anhand der Füllstandshöhenerkennung. Das Prozessmanagement der BLG stellte Kommissionierdaten bereit, während die BLG-IT das BIBA bei der Definition der Schnittstellen zu internen IT-Systemen unterstützte. Zudem prüfte die BLG technische Voraussetzungen für den FTF-Einsatz, wie WLAN-Abdeckung, Ladekapazitäten und Personenschutz, und stellte Inputdaten für die Konzeption von FTF-Erweiterungen zur Verfügung. In Zusammenarbeit mit dem BIBA validierte die BLG den Follow-Me-Modus und unterstützte die Auswahl der Hardware für die WLAN RTT-Indoorortung sowie die Bereitstellung relevanter Gebäudedaten (AP 4.3).

Arbeitspaket 5

Im Rahmen von AP 5 wurde die Mensch-Technik-Interaktion analysiert. Zunächst wurden Pick-by-Motion und Assembly-by-Motion erforscht. Anschließend wurden Methoden zur Objekt- und Bewegungserkennung entwickelt und validiert. Abschließend wurden Methoden zur MTI zwischen Mitarbeitenden und FTF erforscht und entwickelt. Das Arbeitspaket wurde vom BIBA verantwortet.

Im Rahmen von AP5.1 war die BLG aktiv an der Ausgestaltung der Smartwatch-App und der Tablet-Anwendung beteiligt, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Benutzerfreundlichkeit gelegt wurde. Die Entwicklung basierte auf den vom BIBA erstellten Mockups, die mit potenziellen Anwender:innen abgestimmt wurden, um eine hohe Praxistauglichkeit sicherzustellen. Das Feedback der Nutzer:innen zur Benutzerführung wurde dokumentiert und in den weiteren Entwicklungsprozess integriert. Die Validierung der Anwendungen erfolgte durch umfassende Labor- und Feldtests.

Arbeitspaket 6

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurden Methoden und Technologien entwickelt, um die Nutzung von Exoskeletten durch Mitarbeitende zu fördern und ergonomisches Arbeiten nachhaltig zu unterstützen. Dieses Arbeitspaket umfasst mehrere Teilaufgaben, die von der Konzeption eines Anreizsystems bis hin zu dessen technischer Umsetzung und Schulung reichen. Das Arbeitspaket wurde vom BIBA verantwortet.

Im Rahmen der Entwicklung des Gamification-Anreizsystems führte die BLG gemeinsam mit dem BIBA einen Workshop zur Ideensammlung bezüglich geeigneter Spiele-Design-Elemente durch. Basierend auf dem Feedback aus diesen Workshops wurde die Anreizplattform weiterentwickelt, wobei die BLG die vom BIBA erstellten Mockups überprüfte und die Trophäen- und Punkteberechnungslogik mitentwickelte. Im weiteren Verlauf validierte die BLG die von BIBA entwickelte erste Nutzeroberfläche der Gamification-Anwendung und gab regelmäßiges Feedback, insbesondere zu Ergonomie und Benutzerfreundlichkeit (AP 6.1). Die BLG passte zudem das Schulungskonzept kontinuierlich an und ergänzte es mit neuen Entwicklungen wie der Sensorlösung für das Exoskelett und Funktionen der Smartphone-App (AP 6.3). Zur Sicherstellung der Systemakzeptanz holte die BLG Feedback von den Mitarbeitenden zu den Teilsystemen Exoskelett, FTF und Anreizplattform ein und unterstützte durch Schulungen und Felderprobungen die Mitarbeitenden im Umgang mit den neuen Technologien (AP 6.3 und AP 6.4).

Arbeitspaket 7

Im Rahmen von AP 7 wurden die Systeme integriert, validiert und evaluiert. Zunächst wurden Labortests durchgeführt und im ersten Schritt validiert. Anschließend wurde das Gesamtsystem integriert und für den industriellen Einsatz optimiert. Daraufhin erfolgte die Auswertung der Feldtests und abschließend wurde das Transferszenario untersucht. Das Arbeitspaket wurde von der BLG verantwortet.

Zu Beginn des Projekts fand im Rahmen von AP 7 ein Mitarbeitendenworkshop statt, der mit arbeitspsychologischer Begleitung und unter Einbeziehung des Betriebsrats durchgeführt wurde. In diesem Workshop wurden die Projektinhalte vorgestellt und eine Testgruppe gebildet (AP 7.2). Die BLG führte daraufhin erste Feldtests des passiven Exoskeletts in der Kommissionierung und beim Reifenwechsel durch, wobei Feedback der Mitarbeitenden gesammelt und Daten zur Ergonomie erfasst wurden. Weitere Tests, wie die Indoorortung mit WLAN-RTT und die FTF-Steuerung, wurden von der BLG organisiert und durchgeführt,

um die Genauigkeit und Praxistauglichkeit der Technologien kontinuierlich zu überprüfen. Die BLG führte umfangreiche Feldtests – sowohl in der Montage als auch im Lager – durch, um die Funktionalität und Praxistauglichkeit der einzelnen Komponenten sowie des Gesamtsystems zu erproben und wertete die Testergebnisse in Zusammenarbeit mit dem Projektteam aus (AP7.3).

Arbeitspaket 8

Inhalte des AP 8 waren das Projektmanagement, die Öffentlichkeitsarbeit und die Verwertung der Projektergebnisse. Das Arbeitspaket wurde von der BLG verantwortet.

Im Rahmen von AP8 unterstützte die BLG die Öffentlichkeitsarbeit durch interne Projektvorstellungen, wie in einem Digiwebinar und erstellte einen Projektflyer. Weitere Veröffentlichungen fanden in der Zeitschrift „SUT – Schifffahrt und Technik“ statt (AP 8.1). Ebenso wurde die Projektwebseite fortlaufend aktualisiert und das Abschlussvideo, das die Projektergebnisse zusammenfasst, auf der Webseite sowie in sozialen Medien und der Mitarbeitenden-App veröffentlicht. Die BLG war außerdem zusammen mit Projektpartnern auf Fachkonferenzen vertreten und sorgte für die Koordination und Durchführung des Projektmanagements, einschließlich der Organisation der Lenkungsreise und der Verwertung der Projektergebnisse. Dafür wurde zu Projektbeginn ein Onlinekanal für den gemeinsamen Zugriff aller Partner eingerichtet und regelmäßige Projektteammeetings sowie halbjährliche Konsortialtreffen zur Abstimmung und Planung des Projekts organisiert (AP 8.2).

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die BLG hatte Mittel in den folgenden Positionen beantragt 0823 FE-Fremdleistungen, 0837 Personalkosten, 0838 Reisekosten, 0847 Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen, 0850 sonstige unmittelbare Vorhabenkosten. Auf diese Positionen soll nun entsprechen eingegangen werden. Da zum Zeitpunkt der Berichterstellung der zahlenmäßige Nachweis noch nicht vollständig abgeschlossen ist, sei auch auf den zahlenmäßigen Nachweis für die finalen Zahlenwerte verwiesen. Um Doppeldeutigkeiten und Widersprüchen zu dem Nachweis vorzubeugen, werden die konkreten Zahlenwerte an dieser Stelle nicht explizit ausgewiesen. Die beschriebenen Tendenzen und Effekte sind in dem zahlenmäßigen Nachweis ersichtlich und werden dort explizit ausgewiesen.

Aufgrund einer internen Unternehmensumstrukturierung kam es zwischenzeitlich zu einer Reduzierung der Projektressourcen. In diesem Zusammenhang wurden im Jahr 2023 in fast allen Positionen Mittel gekürzt. Ebenso ging die Abteilung ZBA ND der BLG LOGISTICS GROUP, welche über einen FE-Unterauftrag am Projekt beteiligt war, in die Abteilung Technology der BLG Handelslogistik GmbH & Co. KG über. Somit wurde der Unterauftrag angepasst und die gekürzten Mittel wurden zu dieser Gesellschaft hin verschoben.

0823 FE-Fremdleistungen

In dieser Position subsumieren sich die Aufwände der FE-Unteraufträge der BLG LOGISTICS GROUP bzw. BLG Handelslogistik GmbH, der BLG Autoterminal Bremerhaven GmbH & Co. KG und der HUNIC GmbH. Die Aufwände der einbezogenen BLG-Gesellschaften setzten sich im Wesentlichen aus Personalkosten für die Durchführung der Projektarbeiten (u.a. Prozessaufnahmen, Konzeption, Projektmanagement, Schnittstellenentwicklung oder auch Testbegleitungen) zusammen. Neben den Personalkosten sind die entstandenen Reisekosten in dieser Position enthalten. Im Verlauf der Projektlaufzeit wurde eine Anpassung des geplanten Personaleinsatzes aller beteiligten Stellen (Technology, IT Services und ATB) aufgrund der oben erläuterten internen Umstrukturierung sowie Ressourcenknappheit insbesondere der IT vorgenommen. Ebenso erforderte die Konzeptionsphase dank einer hohen Kompatibilität der Soll-Prozesse mit den bestehenden Prozessen weniger Aufwände als geplant. Auch mussten zu Projektbeginn einige Workshops mit operativen Mitarbeitenden aufgrund der anhaltenden Corona-Pandemie ausfallen. Die geplanten Kosten nach der Anpassung wurden in vollem Umfang realisiert.

Zum anderen vergab die BLG Autotec einen Unterauftrag an die HUNIC GmbH, welche im Projekt als Systementwickler fungierte und insbesondere die Forschung zum sensorischen Exoskelett hinsichtlich der Sensorikintegration und der Entwicklung der Elastomer-Schaltfunktion verantwortete. Dieser Unterauftrag wurde in vollem Umfang ausgeführt.

0837 Personalkosten

Die realisierten Personalkosten stellen eine weitere wichtige Position des zahlenmäßigen Nachweises dar. Die geleistete Arbeit bezieht sich sowohl auf inhaltliche Tätigkeiten (u.a. Prozessaufnahmen, Konzeption, Testbegleitungen und Mitarbeiter*innenworkshops) ebenso wie auf das allgemeine Projektmanagement. Wie bei den FuE-Fremdleistungen wurde eine Anpassung bereits während der Projektlaufzeit durchgeführt. Aufgrund der minimierten Projektbeteiligung wurden einige Arbeiten lediglich in geringerem Aufwand ausgeführt. Alle benötigten Vorarbeiten für eine erfolgreiche Entwicklung wurden seitens Autotec jedoch

vorab abgeschlossen. Der Fokus lag dann auf der Testbegleitung. Weitere Minderaufwände fanden ihre Ursachen einerseits in den geringeren Abstimmungsaufwänden während des zweiten Arbeitspakets mit dem operativen Management und andererseits in den durch das Coronavirus eingeschränkten Workshopumfängen. Zudem sind durch den Einsatz niedrigerer Lohngruppen in den Tests geringere Kosten als geplant entstanden. Es kamen insbesondere operative Mitarbeitende zum Einsatz. Somit entfielen Kosten für Personal der Kategorie Senior Mitarbeitende und Mitarbeitende in höherem Umfang. Insgesamt wurden ca. 78% der geplanten Kosten realisiert. Die geplanten Testumfänge wurden trotz der niedrigeren Kosten vollständig erfolgreich durchgeführt.

0838 Reisekosten

Hinsichtlich der Reisekosten wurden weniger als die geplanten Ausgaben realisiert. Dies ist nicht in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die auswärtigen Termine von Mitarbeiter*innen der Zentralbereichsabteilung Nachhaltigkeit und Digitalisierung bzw der Abteilung Technology durchgeführt wurden. Aufgrund der operativen Gegebenheiten fand der überwiegende Teil der Termine bei Autotec am Autoterminal Bremerhaven statt. Tätigkeiten, die von Mitarbeiter*innen dieser Abteilung durchgeführt werden, fallen unter den Kostenpunkt FE-Fremdleistungen. Um dieser Tendenz Rechnung zu tragen, wurde die Position der Reisekosten bereits im Rahmen der Mittelreduzierung vollständig gestrichen.

0847 Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen

Die im Antrag geplante Anschaffung von zwei Tablets und drei Smartphones wurde während des Vorhabens nicht getätigt. Zunächst konnte die Beschaffung der Smartphones (Zebra TC26) entfallen, da auf einen internen Gerätevorrat zugegriffen werden konnte. Auch durch die Einkürzung in der Schnittstellenentwicklung resultierend aus der Reduzierung der IT-Beteiligung war eine Anschaffung von Neugeräten nicht mehr notwendig. Darüber hinaus wurde das Gesamtsystem so konzipiert, dass das FTF mit lediglich einem Tablet zur Steuerung und Visualisierung ausgestattet wurde. Diese Anschaffung lag bei den Projektpartnern, da dieses direkt mit dem FTF verbunden ist. Weitere Tablets wurden somit nicht mehr benötigt. Bereits während der Projektlaufzeit wurden deshalb in dieser Kategorie alle Mittel vollständig gekürzt.

0850 sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Unter dieser Position sind die Kosten für eine ursprünglich angesetzte arbeitspsychologische Begleitung, Präsentationsmaterial wie Flyer und Roll-Up sowie eine Lizenz für ein

Ergonomieassessmenttool zusammengefasst. Von diesen geplanten Kostenpunkten wurden während des Projekts lediglich die Flyer angeschafft. Wie bereits beschrieben, konnten aufgrund der Corona-Pandemie zu Beginn des Projekts einige Workshops nicht in dem ursprünglich geplanten Maße durchgeführt werden. Aus diesem Grund und aufgrund der darauffolgenden Aufwandskürzung bei BLG Autotec wurde die arbeitspsychologische Begleitung nicht in Anspruch genommen. Während der Prozessaufnahmen im Arbeitspaket 1 zeichnete sich bereits ab, dass die Ergonomieanalyse der Ist-Prozesse durch das Projektteam anhand der Leitmerkmalmethoden durchgeführt werden kann. Somit entfielen Aufwände für eine Software des Ergonomieassessments ebenfalls. Auch hier fanden die entsprechenden Korrekturen bereits im Projekt statt, sodass alle Mittel verwendet wurden.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die BLG Autotec GmbH & Co. KG bietet auf dem Autoterminal Bremerhaven ihren Kunden neben dem Fahrzeugumschlag zahlreiche Dienstleistungen als Value Added Services an. Das Spektrum der technischen Dienstleistung reicht vom Waschen oder Lackieren der Fahrzeuge, den Reifenwechsel oder nachträgliche Anpassungen nach Endkundenwunsch. Auch Wartungsarbeiten oder Reparaturen gehören zum Angebot der BLG Autotec GmbH & Co. KG. Der Großteil dieser Tätigkeiten findet nach wie vor manuell ohne technische oder automatisierte Unterstützung statt. Dies gilt auch für alle vorbereitenden Tätigkeiten wie die Lagerung und Kommissionierung der benötigten Materialien und die anschließende Bereitstellung am Montagearbeitsplatz. Durch das Tragen schwerer Lasten, Überkopfarbeiten oder Zwangshaltungen sind die Mitarbeitenden einer hohen physischen Belastung ausgesetzt. Das permanente und ungeschützte Ausführen solcher Arbeiten hat kurzfristig hohe Personalausfallquoten und -rotationen für den Betrieb sowie langfristig Muskel- oder Gelenkerkrankungen der MitarbeiterInnen zur Folge. Zusätzlich beeinträchtigt dies die Attraktivität der Arbeit und somit auch die Fachkräfteverfügbarkeit negativ. Das Forschungsprojekt MEXOT hat in diesem Zusammenhang ein Gesamtsystem entwickelt, welches die Ergonomie der Arbeitsplätze im Lager und im Technikbereich verbessert und dabei auch den Materialfluss effizienter gestaltet. Darüber hinaus steigert die entwickelte Lösung die allgemeine Akzeptanz marktreifer passiver Exoskelette mithilfe der Anreizplattform und dem dabei verwendeten Gamificationansatz. Die prototypische Evaluierung der entwickelten Systeme haben gezeigt, dass diese ein hohes Potenzial für die Optimierung der Arbeitsverhältnisse in einem solch von manueller Arbeit geprägtem Umfeld beinhalten. Somit wurde deutlich, dass die geleisteten Arbeiten für den Projekterfolg erforderlich und angemessen waren, um den Projekterfolg zu gewährleisten.

Das Forschungsprojekt wurde als Verbundvorhaben durch die BLG Autotec, das BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH und der ELROTEC GmbH ausgeführt. Die BLG verfügt über hohe Kompetenzen in den Bereichen der Fahrzeugdistribution und der Lagerlogistik und stellte mit BLG Autotec am BLG betriebenen Automobilterminal Bremerhaven den Anwendungsfall für die Entwicklung und Evaluierung des sensorischen Exoskeletts, des individuellen FTFs und der Anreizplattform bereit. Das BIBA brachte als Forschungsinstitut seine Kompetenzen in den Bereichen der Steuerung logistischer Prozesse sowie zugehöriger Methoden aus dem Bereich der Automatisierung, sensorbasierten Systeme und der Ergonomiebewertung in das Projekt ein. ELROTEC agierte im Projekt als Technologieanbieter und -integrator und verantwortete sowohl hardware- als auch softwareseitige Entwicklungen des fahrerlosen Transportsystems. Unterstützt wurde das Konsortium von der HUNIC GmbH, die als Unterauftragnehmer über die BLG am Projekt beteiligt war. HUNIC stellte insbesondere ihre vorhandene Expertise im Zusammenhang des Exoskeletts zur Verfügung und brachte so auch die Entwicklungen an der Sensorik voran. Die Projektpartner verfügen gemeinsam als Projektkonsortium über die erforderlichen Kompetenzen, die für eine erfolgreiche Bearbeitung des Verbundprojekts erforderlich waren

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Fortschreibung des Verwertungsplans

II.4.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Keine

II.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse der prototypischen Validierung der im Projekt entwickelten Lösungen haben gezeigt, dass insbesondere das sensorische Exoskelett und die daran gekoppelte Anreizplattform hohes Potential haben, die Ergonomie zu verbessern, die Mitarbeitendenakzeptanz für die Lösung zu maximieren und somit langfristig Krankheitskosten zu senken. Nach Projektende soll deshalb nun zunächst der Fokus auf diese Teilsysteme gelegt werden und in enger Zusammenarbeit zwischen BIBA und BLG Schritte besprochen werden, um den jeweiligen Prototypen in ein praxistaugliches, operativ einsetzbares Modell zu überführen. Hierzu wurden erste Gespräche initiiert. Anschließend soll es zunächst bei der BLG Autotec in Bremerhaven implementiert werden, um dann die beiden Teilsysteme auf weitere Standorte der BLG auszuweiten.

Das entwickelte individuelle FTF kann darüber hinaus dazu beitragen, die Prozesse im Lager und im Technikcenter effizienter zu steuern und manuelle Tätigkeiten auf wertschöpfende Aktivitäten zu minimieren. Der Einsatz des FTF bei der BLG Autotec stellte sich im Laufe des Projekts aufgrund von schmalen Wegen, Hindernissen und langen Berechnungszeiten als herausfordernd dar. Nichtsdestotrotz soll an der Technologie festgehalten werden, da die BLG bereits anderweitig marktreife FTF einsetzt. Die BLG verspricht sich dadurch einen höheren Automatisierungsgrad des intralogistischen Transports und eine bessere Auslastung der personellen Ressourcen. Der im Projekt entwickelte Comflow-Steuerungsserver kann dazu eine exzellente Ergänzung sein. Dieser ermöglicht eine flexible Anpassung des Prozessablaufs im operativen Betrieb, indem eine intuitive Eingriffsmöglichkeit in die Steuerung des FTF anhand von Prozessbausteinen geschaffen wurde. Die Verwendung dieses Steuerungsservers soll direkt nach Projektende geprüft werden.

II.4.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Eine eigenständige wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse wird seitens der BLG nicht angestrebt. Dennoch sieht die BLG die vom BIBA verantwortete wissenschaftliche Verwertung für die allgemeine Dissemination als bedeutungsvoll an. Aus diesem Grund war die BLG während der gesamten Projektlaufzeit bei der Veröffentlichung von wissenschaftlichen Fachartikeln beteiligt. Aus technischer Perspektive schätzt die BLG den entwickelten Lösungsansatz als anschlussfähig ein.

II.4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Rahmen des MEXOT-Projekts wurden umfassende Tests der entwickelten Systeme durchgeführt. Diese Erprobungen fanden sowohl im Lager als auch im Technikbereich der BLG Autotec statt. In beiden Bereichen konnten sämtliche Systemkomponenten erfolgreich getestet werden, wobei die Ergebnisse positiv ausfielen. Die entwickelten Konzepte und Technologien haben in diesen Tests ihre Praxistauglichkeit unter realen Bedingungen unter Beweis gestellt. Daher ist die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit als hoch einzuschätzen. Nach Abschluss des Projekts wird die BLG als bisheriger Pilotanwender die Weiterentwicklung der Projektergebnisse vorantreiben, um mittelfristig eine Implementierung insbesondere zur Verbesserung der Ergonomie mithilfe des Gamificationansatzes zu ermöglichen. Dabei ist vorgesehen, diese Ansätze schrittweise auf mehreren Terminals und an weiteren Standorten in der Kontraktlogistik anzuwenden. Der bestehende

Verwertungsplan wird auch nach Projektende kontinuierlich weitergeführt, um dies zu realisieren.

II.4.5 Effekte in Bezug auf die Anreizwirkung

Durch das Projekt konnten seitens des Verbunds und der BLG als Verbundkoordinator verschiedene hochgradig innovative technische Ansätze für eine effiziente Materialbereitstellung unter zeitgleicher Ergonomieverbesserung miteinander verbunden, weiterentwickelt und unter Laborbedingungen evaluiert werden. Durch die Durchführung als Verbundprojekt konnten die jeweiligen Expertisen der Verbundpartner effizient miteinander vernetzt werden. Hierdurch konnten wesentliche Risiken, wie sie bei einer alleinigen Projektdurchführung aufgetreten wären, vermieden werden. Seitens der BLG bestand in vielen Projektbereichen wie der technischen und softwareseitigen Weiterentwicklung des FTF sowie der Exoskelettsensorik keine ausreichende Expertise, um dieses Projekt durchführen zu können.

Im Rahmen des Verbundprojekts MEXOT wurden gemeinsam qualitativ hochwertige Ergebnisse erzielt, die eine hohe Anschlussfähigkeit aufweisen. Diese Anschlussfähigkeit zeigt sich in den kontinuierlichen Verwertungsaktivitäten aller Projektpartner sowie in der geplanten fortgesetzten Zusammenarbeit nach Projektabschluss. Die beabsichtigte Verwertung, die eine schrittweise Integration der Ergebnisse in den operativen Betrieb der BLG-Standorte umfasst, sowie der Ausbau der prototypischen Lösungen zu vollständig einsatzfähigen Ergonomielösungen, verdeutlichen die nachhaltige Relevanz der im Projekt erbrachten Arbeit.

II.4.6 Verwertungstabelle BLG: Aussagen und Abgleich mit der geplanten Verwertung

Der spezifische Nutzen des Projekts aus Sicht der BLG ist auf verschiedenen Ebenen zu betrachten. Zum einen konnte die BLG hinsichtlich neuer Technologien, wie beispielsweise den Sensoren von Motion Miners sowie der Eigenlösung des BIBAs, moderner Indoor-Datenempfangsmethoden, der Weiterentwicklung eines fahrerlosen Transportsystems und der Entwicklung mobiler Applikationen durch das Projekt wichtige Erfahrungen sammeln. Der Hauptnutzen der BLG liegt in der Entwicklung der jeweiligen Teilsysteme und der unmittelbaren Erprobung dieser. Als Teil der Projektarbeit wurde die Wirksamkeit der entwickelten Tools direkt mit evaluiert. Zudem wurden während des Projekts zahlreiche Mitarbeitendenworkshops und -befragungen durchgeführt. Somit konnte schon im Rahmen

der Entwicklungsphase wertvolles Feedback für Optimierungen eingesammelt werden, was wiederum die spätere Akzeptanz der Lösungen garantiert. Daher wird seitens der BLG ein hohes Nutzenpotenzial für die spätere operative Anwendung insbesondere für das sensorische Exoskelett mit der Anreizplattform erwartet. Auf dieser Einschätzung basiert auch der Verwertungsplan, der in Tabelle 2 dargelegt ist.

Tabelle 2: Verwertungsplan der BLG

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Vorstellung der Projektergebnisse bei internen und bei externen Informationsveranstaltungen, z. B. bei Veranstaltungen des Zentralverbands der deutschen Seehafenbetriebe e.V., des Deutschen Logistik-Kongresses, der transport logistic Messe.	fortlaufend
2	Vorstellung des Projekts und dessen Ergebnisse in der MitarbeiterInnenzeitschrift „WIR – Das MitarbeiterInnen-Magazin“, Kunden-Newslettern und bereichsspezifischen Imagebroschüren	fortlaufend
3	Mitwirkung bei der Publikation der Projektergebnisse in wissenschaftlichen Fachzeitschriften	fortlaufend
4	Vermittlung innovativer Ergonomielösungen im Logistikumfeld unter Berücksichtigung praxisbezogener Anforderungen an HochschulpraktikantInnen sowie die Ausschreibung von Studien- und Abschlussarbeiten	fortlaufend
5	Schrittweise Weiterentwicklung der entwickelten Konzepte und Implementierung der sensorischen Exoskelette	2 Jahr nach Projektstart
6	Weiterentwicklung und schrittweise Umsetzung des Gamification-Ansatzes im Zusammenhang der sensorischen Exoskelette	3 Jahr nach Projektstart
7	Schrittweise Einführung der Lösungen an weitere BLG-Standorte	3 - 5 Jahre nach Projektstart

Die Positionen 1-4 wurden während der gesamten Projektlaufzeit vorgenommen. Die Dissemination der Ergebnisse wird, wie im Verwertungsplan vorgesehen, auch noch nach Projektende fortgeführt.

Auch zukünftig soll dem Verwertungsplan gefolgt werden. Die Verwertung in der Form einer operativen Weiterentwicklung von (Teil-)Ergebnissen ist weiterhin direkt nach dem Projektabschluss vorgesehen (Positionen 5 und 6). Hier soll jedoch der Fokus auf das sensorische Exoskelett mit der Anreizplattform gelegt werden. In diesem Sinne werden bereits zum Zeitpunkt der Berichterstellung in enger Zusammenarbeit zwischen BIBA und BLG Schritte besprochen, um den jeweiligen Prototypen in ein praxistaugliches, operativ einsetzbares Modell zu überführen. Gelingt die Implementierung unter Position 5 und 6, soll anschließend die Technologie auf weitere deutschlandweite Standorte der BLG voran getrieben werden (Position 7).

Der Einsatz des FTF bei der BLG Autotec stellte sich im Laufe des Projekts aufgrund von schmalen Wegen, Hindernissen und langen Berechnungszeiten als herausfordernd dar. Aus diesem Grund wird diese Lösung für eine unmittelbare Verwertung zunächst nicht weiter berücksichtigt. Nichtsdestotrotz soll an der Technologie festgehalten werden, da die BLG bereits anderweitig marktreife FTF einsetzt. Die BLG verspricht sich dadurch einen höheren Automatisierungsgrad des intralogistischen Transports und eine bessere Auslastung der personellen Ressourcen.

II.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind von anderen Stellen nur wenige Entwicklungen in Vergleich zu dem in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Stand der Technik erfolgt. Erwähnenswert ist an dieser Stelle die Entwicklung eines echtzeitfähigen Wearable-Sensorsystems durch die MotionMi-ners GmbH (vgl. Zwischenlösung für sensorisches Exoskelett), welche allerdings – im Gegenteil zu dem im Projekt MEXOT final entwickelten Sensorsystem – erstens auf zusätzlich zu tragende Elemente (Armbänder und Gürtelclip) zurückgreift statt eine vollständige Integrierbarkeit in die Exoskelette zu ermöglichen, zweitens keine Erfassung der ergonomischen Rückenhaltung und drittens durch die Cloud-Architektur lediglich bei verfügbarem Internetzugang lauffähig ist.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die im Verlauf des Projekts entstandenen Publikationen, die besuchten Konferenzen sowie die Veranstaltungen, auf denen die Projektergebnisse vorgestellt wurden, sind nachfolgend aufgeführt.

II.6.1 Publikationen

Veröffentlicht:

- C. Petzoldt, M. Lütjen, L. Panter, D. Niermann, B. Vur, M. Quandt, L. Rolfs, J. Arango Castellanos, N. Jathe, D. Boger, M. Freitag, C. Saul, K.-H. Kösters, J. Mast, Operator 5.0: Intelligente Arbeitsergonomie im Automobilumschlag - Konzept zur Mensch-Technik-Interaktion mit autonomen Transportsystemen und sensorischen Exoskeletten, Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetr. 117 (2022) 644–650. <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1125>.
- N. Jathe, M. Lütjen, C. Petzoldt, D. Boger, M. Freitag, Intelligente Kontexterfassung im Automobilumschlag – Einsatz von Prozess- und Aktivitätserkennung zur kontextabhängigen Mensch-Technik-Interaktion in (teil-)autonomen Arbeitsumgebungen, Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetr. 118 (2023) 376–381. <https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1085>.
- D. Niermann, C. Petzoldt, M. Freitag, Intuitive and Flexible Process Control for Autonomous Mobile Robots: A Case Study in a Large Logistics Enterprise, in: Procedia CIRP, Elsevier, 2023: pp. 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.028>.
- B. Vur, N. Jathe, D. Boger, C. Petzoldt, M. Lütjen, M. Freitag, A Portable Localization System for Dynamic AGV Positioning in Indoor Warehouses, in: M. Freitag, A. Kinra, H. Kotzab, N. Megow (Eds.), Dyn. Logist. Proc. 9th Int. Conf. LDIC 2024, Bremen, Ger., Springer, Cham, Bremen, 2024: pp. 293–305. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56826-8_23.

Akzeptiert (in print):

- Jathe, N.; Staar, B.; Lütjen M.; Freitag, M.; (2024): Vision-Based Pallet Detection and Load Height Estimation for Autonomous Material Handling Systems. Procedia CIRP, Elsevier (in print).

Geplant:

- Panter, L.; Jathe, N.; Boger, D.; Petzoldt, C.; Freitag, M. (2025): Ergonomics Improvement in Logistics: Implementation and Evaluation of Smartphone-Based Incentive Systems using Sensor-Integrated Exoskeletons for Human Posture and

Activity Recognition. International Journal of Computer-Integrated Manufacturing, Taylor & Francis (in Arbeit, noch nicht eingereicht).

- Vur, B.; Petzoldt, C.; Panter, L.; Boger, D.; Jathe, N.; Freitag, M. (2025): Integrated Force Measurement and Adaptive Support for Passive Exoskeletons, International Conference on System-Integrated Intelligence (SysInt 2025), Springer (extended abstract eingereicht; Full Paper in Arbeit, noch nicht eingereicht).

II.6.2 Studentische Abschlussarbeiten

Masterarbeiten:

- C. Kämena: Konzeptionelle Entwicklung einer Methode zur systematischen Zuordnung von Exoskeletten für den Einsatz in manuellen Arbeitsprozessen, Universität Bremen, 2023.
- E. Maack: Analyse und Bewertung der ergonomischen Potentiale von Exoskeletten in unterschiedlichen Logistikprozessen, Universität Bremen, 2024.

Lehrprojekte:

- B. Bergtosun, G. Havuc, M. Juganaru, F. Paulsen, B. Seevers, Y. Taz: Entwicklung einer Smartphone-basierten Lokalisierungsmethode für geschlossene Räume, 2023, Universität Bremen, BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Bremen
- E. Harlan, L. Gibbins, S. Pokhrel, A. Swaidan, A. Almoussa, T. Lohmann: Netzwerkbasierte Steuerung omnidirektionaler Transportfahrzeuge, 2023, Universität Bremen, BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Bremen

II.6.3 Vorträge & Veranstaltungen

- D. Niermann, C. Petzoldt, M. Freitag, Intuitive and Flexible Process Control for Autonomous Mobile Robots: A Case Study in a Large Logistics Enterprise, in: Procedia CIRP, Elsevier, 2023: pp. 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.028>.
 - Wissenschaftlicher Fachvortrag zum Konferenz-Beitrag auf Konferenz in Kapstadt, Südafrika
- B. Vur, N. Jathe, D. Boger, C. Petzoldt, M. Lütjen, M. Freitag, A Portable Localization System for Dynamic AGV Positioning in Indoor Warehouses, in: M. Freitag, A. Kinra, H. Kotzab, N. Megow (Eds.), Dyn. Logist. Proc. 9th Int. Conf. LDIC 2024, Bremen, Ger., Springer, Cham, Bremen, 2024: pp. 293–305. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56826-8_23.

- Wissenschaftlicher Fachvortrag zum Konferenz-Beitrag auf Konferenz in Bremen, Deutschland
- Jathe, N.; Staar, B.; Lütjen M.; Freitag, M.; (2024): Vision-Based Pallet Detection and Load Height Estimation for Autonomous Material Handling Systems. Procedia CIRP, Elsevier (in print).
 - Wissenschaftlicher Fachvortrag zum Konferenz-Beitrag auf Konferenz in Neapel, Italien
- Ausstellung des MEXOT-Projektes und Teilnahme an der Veranstaltung „Vernetzungskonferenz IHATEC / DigiTest“ am 28.09.2022 in Berlin (<https://www.innovativehafentechnologien.de/erfolgreiche-vernetzungskonferenz-ihatec-digitest/>)
- Ausstellung des MEXOT-Projektes und Teilnahme an der Veranstaltung „Fachkonferenz: Neue Technologien und Testfelder für Wasserstraßen und Häfen“ am 05. und 06.10.2023 in Karlsruhe (<https://www.innovativehafentechnologien.de/erfolgreicher-abschluss-der-fachkonferenz-neue-technologien-und-testfelder-fuer-wasserstrassen-und-haefen/>)
- Vortrag mit dem Titel „Operator 5.0 – Intelligente Arbeitsgestaltung durch Kombination autonomer Transportsysteme und sensorischer Exoskelette“ zur Vorstellung des MEXOT-Projekts auf der Fachveranstaltung „Future of Industrial Engineering Day 2024 (FIED24)“, präsentiert von Petzoldt, C. (https://www.linkedin.com/posts/biba.uni-bremen.de_fied24-arbeitsplatz-zukunft-activity-7244749594113228802-YahC/).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Partnerspezifischer Bericht
3. Titel Projekt MEXOT – partnerspezifischer Schlussbericht von der BLG Verbundprojekt: Intelligente Arbeitsergonomie mittels sensorischer Exoskelette und autonomen Transportsystemen für die erweiterte Mensch-Technik-Interaktion im Automobilumschlag Teilvorhaben: Intelligente Arbeitsergonomie	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Saul, Charlotte	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 24.04.2025
	7. Form der Publikation Projektbericht – Partnerspezifischer Schlussbericht von der BLG
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BLG Autotec GmbH & Co. KG Franziusstraße 70A 27568 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 19 H 21008 A
	11. Seitenzahl 38
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Digitales und Verkehr Invalidenstraße 44 D-10115 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 2
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Das Hafenumfeld zeichnet sich durch den Umschlag großer Lasten aus, in dem der Mensch trotz fortschreitender Automatisierung unerlässlich ist. Im Anwendungsfall des Automobilumschlags werden in Technikcentern die Fahrzeuge für den jeweiligen Zielmarkt aufbereitet. Das repetitive Tragen schwerer Lasten führt zu starken körperlichen Belastungen, hohen Personalausfallquoten und geringer Arbeitsattraktivität. Ziel von MEXOT war die Entwicklung eines Gesamtsystems für eine ergonomischere und produktivere Arbeitsplatzgestaltung durch den kombinierten Einsatz von sensorischen Exoskeletten und einer mitarbeiterspezifischen Materialzuführung mittels autonomen mobilen Robotern (AMR). Dabei wurde ein menschenzentrierter Unterstützungs- und Automatisierungsansatz im Sinne des Operator 5.0 verfolgt: Passive Exoskelette wurden durch schaltbare Elastomere und integrierte Sensorik erweitert, um die Unterstützungsleistung des Exoskeletts kontextabhängig anzupassen und die Körperhaltung in Echtzeit zu analysieren. Eine entwickelte Smartphone-Anwendung ermöglicht die Prozesssteuerung und integriert ein Gamification-Anreizsystem zur Förderung von Akzeptanz und ergonomischer Arbeitsweise. Die AMR wurden um einen Follow-Me-Modus und einen adaptiven Hubtisch für eine ergonomische Materialübergabe erweitert. Mit dem Software-Framework ComFlow werden alle Teilsysteme koordiniert und Prozessanpassungen durch intuitive No-Code-Programmierung ermöglicht.	
19. Schlagwörter Fertigfahrzeuglogistik, Materialtransport, Ergonomie, Exoskelette, Automatisierung, Autoterminal, Mensch-Technik-Interaktion, Fahrerlose Transportsysteme, Menschenzentrierung; Operator 5.0	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Individual project report
3. title MEXOT project - partner-specific final report from BLG; Joint project: Intelligent work ergonomics using sensory exoskeletons and autonomous transport systems for enhanced human-technology interaction in automobile handling; Sub-project: Intelligent work ergonomics	
4. author(s) (family name, first name(s)) Saul, Charlotte	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 24.04.2025
	7. form of publication Individual Project report
8. performing organization(s) (name, address) BLG Autotec GmbH & Co. KG Franziusstraße 70A 27568 Bremerhaven	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19 H 21008 A
	11. no. of pages 38
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Digitales und Verkehr Invalidenstraße 44 D-10115 Berlin	13. no. of references -
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 2
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The port environment is characterized by the handling of large loads, where humans remain essential despite advancing automation. In the case of automobile handling, vehicles are prepared for their respective target markets in technical centers. The repetitive lifting of heavy loads results in significant physical strain, high employee absenteeism rates, and low job attractiveness. The goal of MEXOT was the development of an integrated system for a more ergonomic and productive workplace design through the combined use of sensory exoskeletons and employee-specific material supply via autonomous mobile robots (AMRs). A human-centered support and automation approach was pursued in the sense of Operator 5.0: Passive exoskeletons were enhanced with switchable elastomers and integrated sensors to adapt the exoskeleton's support performance contextually and to analyze posture in real-time. A developed smartphone application enables process control and integrates a gamification incentive system to promote acceptance and ergonomic work practices. The AMRs were enhanced with a Follow-Me mode and an adaptive lifting table for ergonomic material handover. The software framework ComFlow coordinates all subsystems and enables process adjustments through intuitive no-code programming.	
19. keywords automobile logistics; material transport, ergonomics, exoskeleton, roro-terminal; human-machine interaction; autonomous mobile robots; human-centered automation; Operator 5.0	
20. publisher -	21. price -