

# Luka-Beverage

## Ein KI-basierter Mobiler Handhabungsassistent für die Getränkelogistik

In Europa befinden sich 530 Millionen Getränkekisten und mehrere Milliarden Getränkeflaschen im umweltfreundlichen Kreislaufsystem im Umlauf. Das damit verbundene berufliche Kommissionieren, Palettieren und Sortieren von Getränkeflaschen und Getränkekisten ist insbesondere in Bezug auf Arbeitssicherheits- und Gesundheitsschutz sowohl in der Industrie als auch im Handel herausfordernd (Kistengewicht bis zu 20 kg, Bewegen von 8-12 t Gewicht pro Schicht). Das Projekt Luka-Beverage hatte die Zielsetzung, durch einen Proof-of-Concept Versuch zu validieren, ob bisher manuelle Prozesse in diesem Umfeld wirtschaftlich durch den mobilen Handhabungsassistenten Luka automatisiert werden können. Zu solchen Prozessen zählen u.a. die Palettierung von Getränkekisten und -gebunden, speziell Mischtalone aus Flaschengebunden bilden, Mischkisten aus verschiedenen Sorten bilden und palettieren (Hersteller), Getränkekisten und -gebinde im Markt einräumen, oder Leergutkisten palettieren (Märkte), s. Abbildung 1. Eine besondere Herausforderung an die Automatisierung stellen die dynamischen, komplexen, engen und unstrukturierten Umgebungen dar, so dass die veränderlichen Aufgabenprofile hohe Anforderungen an das Erkennungs- und Urteilsvermögen des Roboters stellen. Die Luka-Beverage-Plattform wurde dementsprechend als eine kompakte, mobile, flexible und kostengünstige Automatisierungslösung entwickelt.

Abbildung 1:

*Erstellen von Mischkisten beim Hersteller (links)*

*Leergutpalettierung im Markt (rechts)*



## Zusammenfassung des Projektverlaufs und der Projektergebnisse

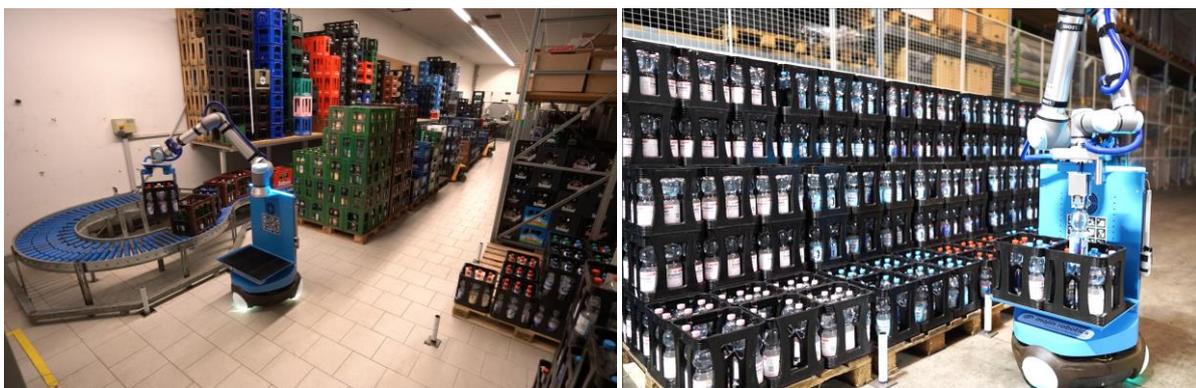
Zu Beginn des Projektes wurden die möglichen Einsatzszenarien des Roboters intensiv mit den Projektpartnern diskutiert und sondiert. Sowohl für den Einsatzbereich beim Hersteller (ENS) als auch im Markt (GEB) ergaben sich jeweils 3 attraktive Anwendungen. Mit Hilfe eines umfangreichen Kriterienkatalogs wurde aus diesen für jeden Endanwender eine priorisierte und im Projekt umzusetzende Demonstratoranwendung ausgewählt: die Palettierung von Leergutkisten im Markt in der Leergutanahme (GEB) sowie die Kommissionierung von gemischten Getränkekisten beim Hersteller (ENS). Darüber hinaus wurden für alle Einsatzszenarien die benötigten technischen Komponenten und deren Fähigkeiten erarbeitet, so dass für alle 6 Einsatzszenarien entsprechende Entwicklungsroadmaps aufgestellt werden konnten. Die ausgewählten zwei Anwendungsszenarien wurden zudem einer intensiven Sicherheitsanalyse unterzogen, welche entsprechende Konzepte für den sicheren Einsatz des Roboters bei den Endanwendern in der Zielumgebung ergab.

Mit Hinblick auf die zwei ausgewählten Einsatzbereiche wurden von den technischen Projektpartnern entsprechend benötigte technische Komponenten im Projekt umgesetzt: Mojin entwickelte einen spe-

zialisierten Kombinationsgreifer für die Handhabung von beliebigen Getränkekisten und -flaschen, welcher mittlerweile als Europäisches Patent (unter EP21199751.5) angemeldet ist. NODE setzte visuelle Lokalisierungsmethoden für den Roboter um, damit er auch in dynamischen und engen Umgebungen durch Techniken wie visuelle Odometrie und Visual SLAM zusätzlich zum Laserscanner stets bestmöglich lokalisiert ist. Darüber hinaus erlauben die visuellen Daten eine weiterführende semantische Interpretation der Szene, wodurch typische dynamische Objekte wie Personen, Kisten, Kartons etc. aus den Daten herausgefiltert und für die Kartierung und Lokalisierung aktiv verworfen werden konnten. Dadurch wurden deutlich stabilere und zuverlässigere Karten erzeugt, die Lokalisierungsqualität verbessert und das Fahr- und Ausweichverhalten um dynamische Hindernisse optimiert. Für das Training der lernbasierten Methoden wurde eine neue dynamische Simulationsumgebung aufgebaut. Das Fraunhofer IPA entwickelte verschiedene Bildverarbeitungs-komponenten, welche ebenfalls in einer stark weiterentwickelten Simulationsumgebung ohne Sammlung aufwändiger Realdaten trainiert werden konnten. Dazu zählen die generische Lokalisierung von Getränkekisten, welche auch unbekannte, neue Kisten auf Paletten erkennen und präzise verorten kann, sowie die Lokalisierung von Getränkeflaschen in den Kisten, damit diese entnommen und in andere Kisten wieder einsortiert werden können. Die für die Handhabungsvorgänge benötigten Greiftechniken wurden durch Mojin programmiert, wie auch die inverse Kinematik und Armplanung zur kollisionsfreien Bewegung des Roboterarms.

Unter der Leitung von Mojin wurden alle Funktionskomponenten in den Luka-Beverage-Roboter integriert. Dazu wurden zu Projektbeginn in der Planungsphase entsprechende Architekturdiagramme und Schnittstellen unter den Partnern abgestimmt, wodurch sich während der Integrationsphase die Partner vor allem auf die Funktion der Komponenten im Gesamtsystem konzentrieren konnten. In mehrwöchigen Integrations-sprints und Optimierungsrunden wurde der Roboter im Labor bei Mojin in Betrieb genommen und durch Mojin eine Anwendungssteuerung für die beiden Anwendungen programmiert.

Nach Abschluss der Integrationsphase wurde der Roboter zuerst beim Endanwender aktiv-markt Manfred Gebauer (GEB) im Anwendungsfall der Leergutannahme getestet. Der Roboter fuhr hierbei ans Band der einfahrenden Leergutkisten, nahm eine Kiste auf, transportierte diese an die Zielpalette und stellte sie dort geordnet ab (Abbildung 2, links). Im zweiten Anwendertest bei Ensinger Mineral-Heilquellen (ENS) kommissionierte der Roboter im Lager gemischte Getränkekisten, indem aus verschiedenen sortenreinen Kisten auf Quellpaletten Flaschen entnommen und in zwei mitgeführte Kisten einsortiert wurden (Abbildung 2, rechts).



*Abbildung 2: Leergutpalettierung im Markt (links) und Erstellen von Mischkisten beim Hersteller (rechts) mit dem Luka-Beverage-Roboter*

Im Projekt konnten einige wesentliche technische Hürden für den Einsatz des Luka-Beverage-Roboters in den Zielanwendungen überwunden werden, jedoch ergaben sich auch weiterführende Problemstellungen, welche im Anschluss an das Projekt noch zu lösen sind. Limitierungen der im Projekt erreichten Lösung sind zum einem der Greifer, welcher zur Finalisierung noch einer zweiten Entwicklungsiteration

bedarf, um wie gewünscht generell und automatisch für alle Kisten- und Flaschentypen prozesssicher einsetzbar zu sein, zum anderen kam der im Projekt eingesetzte Industrieroboter UR10 an seine Grenzen, so dass im Projekt bisher nur Lasten bis ca. 7,5 kg gehoben werden konnten. Zwar wurden im Projekt Methoden für das Stapeln der Getränkeboxen vorbereitet, jedoch ließ das aktuell noch auftretende Spiel im Greifer einen aussagekräftigen Test der Stapelfunktion noch nicht zu. Nichtsdestotrotz sind die erreichten Projektergebnisse ermutigend, und die Projektpartner gehen davon aus, dass die bereits spezifizierten, folgenden Entwicklungsschritte und Maßnahmen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führen werden. Allerdings ist klargeworden, dass ein wirtschaftlicher Einsatz nur mit einer Nutzlast von 20 kg erreicht werden kann, so dass eine Eigenentwicklung der Armkinematik erforderlich ist, die einer weiteren Kommerzialisierung noch als risikobehaftete technische Hürde entgegensteht. Das Konsortium beabsichtigt dementsprechend, den Weg der Kommerzialisierung des erarbeiteten Prototypen weiter zu verfolgen.

## Beteiligte Projektpartner

Neben dem Technologieentwicklungspartner und Projektkoordinator Fraunhofer IPA waren am Projekt **4 Unternehmen** beteiligt, wovon **3** als **KMU** eingestuft werden können.

Projektpartner	Rolle im Projekt
Fraunhofer IPA <b>(IPA)</b> 	Projektkoordination, Technologieentwicklung Objekterkennung und Greifplanung, Unterstützung bei visueller Navigation, Integration und Anwendertests
NODE Robotics GmbH <b>(NODE)</b> <b>[KMU]</b> 	Technologieentwicklung visuelle Navigation, Unterstützung bei Integration und Anwendertests
Mojin Robotics GmbH <b>(Mojin)</b> 	Hardwareentwicklung, insbesondere Greifsystem, Systemintegration, Inbetriebnahme, Sicherheit Anwendertests
Ensinger Mineral-Heilquellen GmbH <b>(ENS)</b> <b>[KMU]</b> 	Endanwender für Mischpalettierung von Vollgut und Sortieren/Bereinigen von Leergut
aktiv-markt Manfred Gebauer GmbH <b>(GEB)</b> <b>[KMU]</b> 	Endanwender für Palettierung von Leergut und Einsortierung von Leergutflaschen in Kisten

## Darstellung der umgesetzten Arbeiten

Nachfolgend sind die im erreichten Projektergebnisse nach Arbeitspaketen detailliert aufgeschlüsselt.

### AP1: Roboterhardware: Greifer

Im AP1 sollte ein kombinierter **Greifer** zur Aufnahme von Getränkekisten und einzelnen Flaschen entwickelt und umgesetzt werden. Hierfür wurde nach der Anforderungsanalyse ein Konzept für einen Zwei-Finger-Kombinationsgreifer erarbeitet, bei dem Kisten (nach außen drückend) und Flaschen (nach innen drückend) von oben gegriffen werden. Außerdem sind 2 Kameras (innenliegend und außenliegend) für die sensorgeführte Aufnahme und das Ablegen aller Objekte verbaut. Der Greifer wurde bereits auf eine Nutzlast von 20 kg ausgelegt. Das Konzept beinhaltet eine starre Kopplung der Finger, um ohne weiteren Motor zur Aktuierung auszukommen und dadurch Kosten einzusparen. Auch die Klemmeinheit ist passiv ausgeführt, so dass der Greifer nur einen Stellmotor besitzt. Im Rahmen der experimentellen Validierung wurde jedoch festgestellt, dass die Positionierung der Finger durch die starre Kopplung mit der Achse der Greiferbacken nicht sowohl für das Kisten- als auch das Flaschengreifen in der erforderlichen Genauigkeit möglich ist. Das Einfahren in die Kiste ist nur bei einer präzisen Stellung der Finger möglich, da sonst eine Kollision mit dem Kistenrand oder Flaschen erfolgen würde. Weiterhin wurde bei der Montage festgestellt, dass die Verkabelung beider Kameras in der aktuellen Ausführung nicht möglich ist. Daher konnten die Versuche nur mit der Top-Kamera durchgeführt werden.

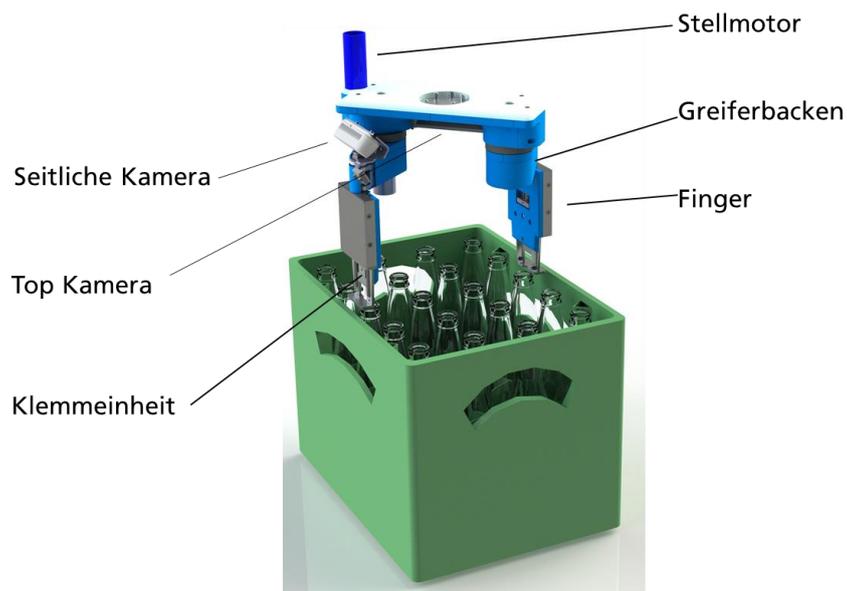


Abbildung 3:  
Darstellung Flaschen- /  
Kistengreifer

**Ergebnis:** Universeller Greifer für die Handhabung von Getränkekisten und-flaschen, noch ohne separate Aktuierung der Finger.

## AP2: Methoden zur Objekterkennung und Handhabung

Für die **Lokalisierung von Getränkeboxen**, also die Lagefeststellung einer zu greifenden Kiste, wurde eine bereits vorhandene, CNN-basierte Lösung zur Gebindeerkennung weiterentwickelt. Das System wurde hierbei auf vollständig synthetisch generierten Daten von Getränkeboxen und Flaschengebinden trainiert (s. Abbildung 4).



Abbildung 4: Detektion von Kisten/Flaschengebinden in synthetischen Daten, wie sie auch für das Training des CNNs verwendet wurden: untere Kante der Kisten (rot), Klassifizierung lange/kurze Seite und geschätzte Sichtbarkeit (cyan)

Dank aufwändiger Simulation und Domaintransfer bietet die Lösung eine hohe Robustheit gegenüber externen Störeinflüssen und generalisiert selbst bei schlechter Sensorqualität (s. Abbildung 5) auf beliebige Kistentypen. Die Kistenerkennung kann in deutlich weniger als 100 ms auf einer GPU ausgeführt werden und ist somit sehr performant. Die **Greifpose** zur Aufnahme der Kisten leitet sich anschließend direkt aus den Stammdaten (Kistenabmessungen) und dem vom CNN prädizierten Kistenkoordinatensystem ab. Die für die Greifausführung benötigte **inverse Kinematik** und **Bahnplanung** ab Roboterflansch für den Arm und die mobile Plattform wurden für die gewählte Roboterhardware modelliert und in Movelt umgesetzt.

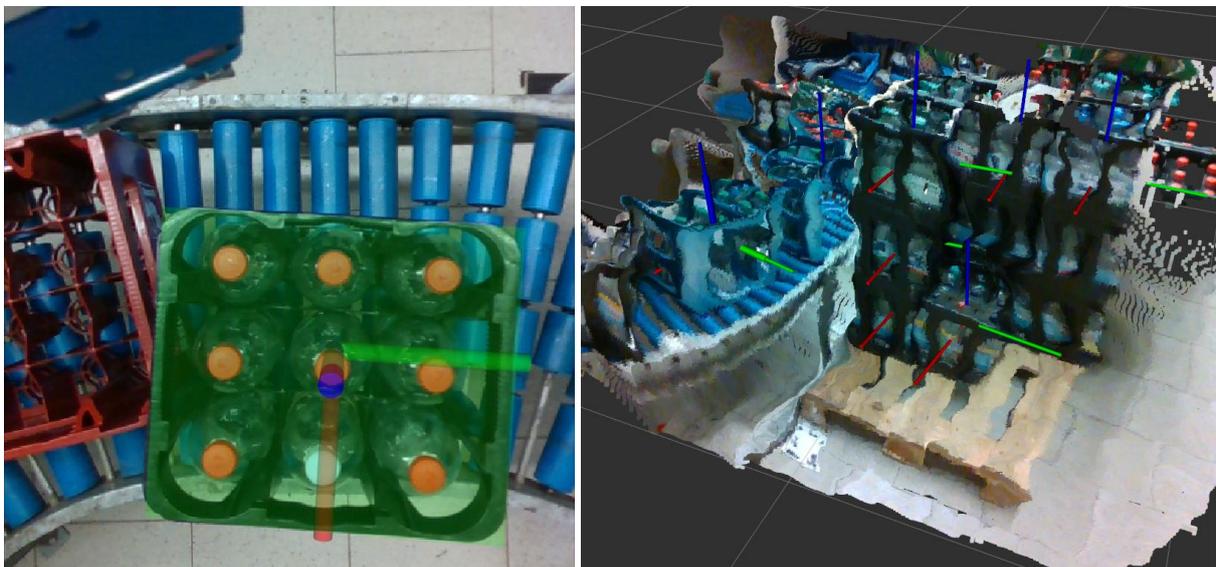


Abbildung 5: CNN-basierte Kistenerkennung auf Paletten und Rollbahn (ENS); typische Ergebnisse für Kisten mit Sichtbarkeit größer 80%. Das eingezeichnete Koordinatensystem mit roter, grüner und blauer Achse markiert den Mittelpunkt der Kiste und die Orientierung im Raum.

Da die Kistenlokalisierung Stammdaten (Kistenabmessungen) benötigt, ist zuvor eine **Kistenerkennung** vonnöten, welche den Kistentyp bestimmt und die Kiste für die Kistenlokalisierung grob in der Sensoraufnahme verortet. Hierfür wurde eine schnell adaptierbare Objekterkennungslösung eingesetzt. Diese basiert auf einem Template-Matching-Ansatz, welcher den jeweiligen Kistentyp einzig auf Basis weniger Beispielbilder in den Sensordaten verorten kann (s. Abbildung 6). Dadurch können auch neue Kistentypen jederzeit durch Laien anhand weniger Beispielaufnahmen ins System gespeist werden. Die sowohl für Kisten als auch für Flaschen entwickelte, CNN-basierte, schnell adaptierbare und skalierbare

Klassifizierung mit Hilfe von Produktbildern ist prinzipiell anwendbar, in der Leistungsfähigkeit aber aufgrund beschränkter Datengrundlage noch auf einen kleinen Satz an Getränkekisten limitiert.

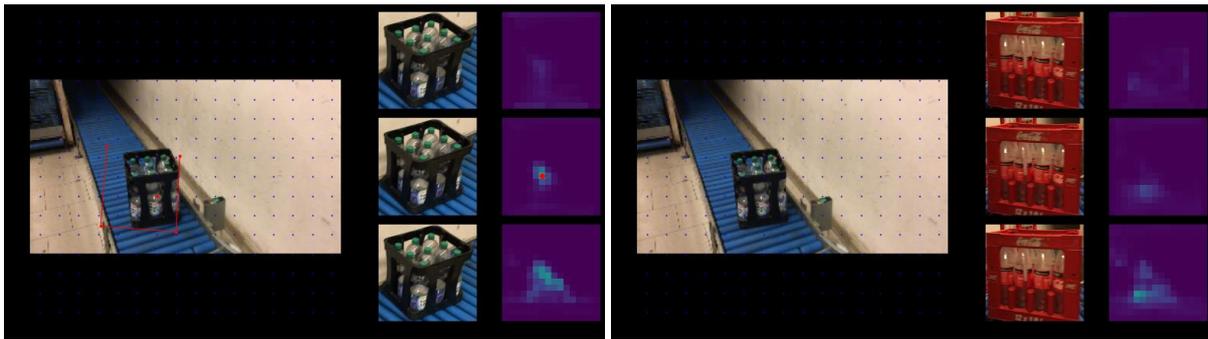


Abbildung 6: Template-Matching-Ansatz, welcher anhand von Beispielbildern den Kistentyp bestimmen und grob im Bild verorten kann. Im Beispiel wird die durch die Beispielbilder repräsentierte Kiste erkannt (links), bei Abfrage anhand von Beispielbildern eines anderen Kistentyps dagegen nicht (rechts).

Für die Erkennung von Flaschen innerhalb der Kisten wurde davon ausgegangen, dass die Anordnung der Flaschen in den Kisten aus den Stammdaten bekannt ist und folglich nur die 3D-Tiefeninformation in der Draufsicht auf die Kisten ausgewertet zu werden braucht. Ergänzend zur Auswertung des Höhenprofils kann bei sehr niedriger Sensorqualität auf das zuvor gezeigte Template-Matching-Verfahren zur Erkennung der Deckel im Farbbild der Kamera zurückgegriffen werden.

Als Ausblick auf den im Projekt nicht priorisierten Anwendungsfall der Leergutflaschenhandhabung wurden erste Versuche zur Lokalisierung von Flaschen bei der Leergutannahme durchgeführt. Hierfür wurde ein Ansatz basierend auf Methoden der klassischen Bildverarbeitung verfolgt, der verlässliche 3D-Informationen erfordert. Dabei erwies sich der im Projekt verwendete Low-Cost Sensor (RealSense D435, Datenqualität wie in Abbildung 5) als nicht ausreichend. Speziell an transparenten, reflektierenden und das Sensorlicht absorbierenden (dunklen) Flaschen (s. Abbildung 7) wurden die Schwächen des Sensors deutlich.



Abbildung 7: Flaschenerkennung an der Leergutannahme (ENS)

Zur Validierung der Lokalisierung wurden zwar kleinere Mengen Realdaten annotiert. Da diese für das Training eines CNN-basierten Ansatzes, der sich auch für eine Klassifizierung der Flaschen eignen würde, bei weitem nicht ausreichen, ist in Folgeprojekten geplant, einen derartigen Flaschendetektor auf synthetischen Daten zu trainieren.

**Ergebnis:** Generisch einsetzbare Kistenlokalisierung für das Greifen von Getränkekisten umgesetzt, Template-Matching-basierte Erkennung des Kistentyps umgesetzt, Flaschenlokalisierung über Template-Matching und 3D-Punktwolkenanalyse, Greifpunktbestimmung, inverse Kinematik und kollisionsfreie Bahnplanung verfügbar.

### AP3: Methoden zur visuellen Navigation

Um die Navigation testen und mit synthetischen Daten trainieren zu können wurde eine **Simulationsumgebung** mit Unity3D und einer neuen ROS-Bridge basierend auf TCP/IP Technologie mit C Sharp umgesetzt und dort das Luka-Modell inkl. Sensoranbindung integriert (s. Abbildung 8). Die Simulation erlaubt das Abbilden der dynamischen und semi-dynamische Anforderungen und bietet Möglichkeiten zum Entfernen und Hinzufügen von Objekten.



Abbildung 8: Logistikhallensimulation mit Luka-Roboter realisiert in Unity

Zur besseren Umgebungsrepräsentation wurden Algorithmen zur **Segmentierung** und Unterteilung der Umgebung entwickelt (s. Abbildung 9). Hierfür wurden Segmentierungsalgorithmen basierend auf einem Region-Growing Ansatz verwendet. Diese Informationen können genutzt werden, um die Umgebung in statische und dynamische Objekte zu unterteilen. Durch die ausschließliche Kartierung der stabilen statischen Umgebungsmerkmale werden sowohl die Karte als auch die Lokalisierung robuster gegen dynamische Artefakte der Umgebung.

Für die **visuelle Lokalisierung** wurde das Framework zur Fusionierung der Kamera- und Laserscandaten entwickelt. Dieses kann durch Feature-Erkennung und Matching aus RGB-D-Daten die visuelle Odometrie berechnen sowie Voxel- und 2D-Umgebungsmodelle erzeugen. Tests auf einem Datensatz der Uni Freiburg haben vielversprechende Resultate ergeben. Es wurden weitere Tests auf einem realen Roboter von NODE in der Testumgebung von NODE sowie mit Hilfe der oben genannten Simulationsumgebung durchgeführt. Die Lokalisierung erlaubt auch die Feinlokalisierung gegen Paletten. Dafür werden Paletten aus der Punktwolke extrahiert und gegen ein Modell evaluiert und lokalisiert. Diese Information kann wiederum genutzt werden, um sich positionsgenau vor der Palette zu positionieren um ein Greifen oder Stapeln der Kisten zu ermöglichen (s. Abbildung 10).

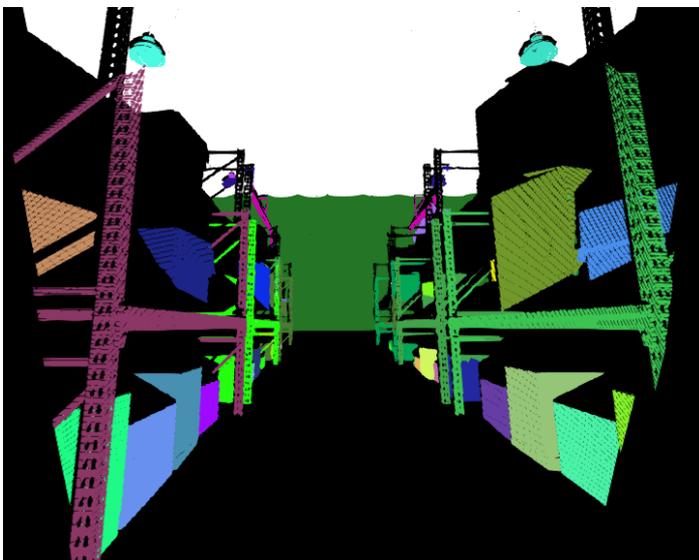


Abbildung 9 Segmentierung der Simulationsumgebung

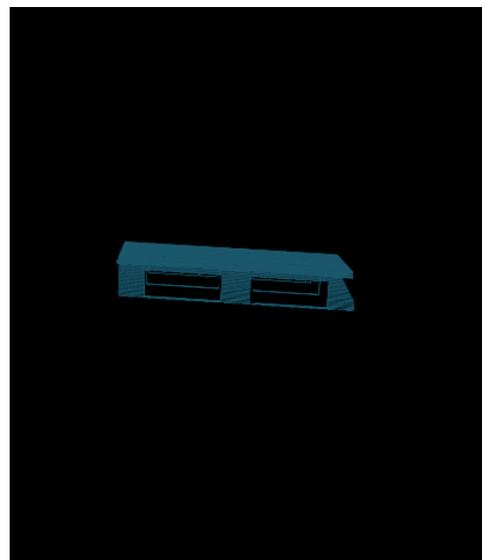


Abbildung 10: Palette für die Detektion

Die **Pfadplanung** wurde entsprechend erweitert, um Kollisionsvermeidung sowohl mit 2D-Informationen (getestet auf Roboter) als auch mit 3D-Informationen auf Basis des Voxel-Grids zur Umgebungsdarstellung und Kollisionsvermeidung zu gewährleisten. Hierfür wurde ein Test mit dem LUKA Roboter bei Mojin gemeinsam durchgeführt. Es wurden weitere Zielanfahrtsalgorithmen zum Docken an Paletten evaluiert und in Simulation getestet.

**Ergebnis:** Visuelle Navigation und Lokalisierung sowie die erweiterten Komponenten zur Segmentierung und Palettendetektion sind einsatzbereit.

#### AP4: Integration, Inbetriebnahme, Sicherheit



Abbildung 11: Integrierter Luka-Beverage-Roboter

Die **mobile Roboterplattform Luka** ist für das Projekt mit einem UR10e-Arm ausgestattet worden, da die geplante Eigenentwicklung eines kompakten und bis zu 20 kg hebenden Arms von Mojin noch nicht verfügbar war. Zudem wurden RGB-D-Sensoren im Torso und am Greifer für die Navigation und das Greifen zweckmäßig verteilt und eingebaut. Die Hardwareplattform wurde auf die analysierten Arbeitsabläufe in den Anwendungen angepasst und war nach Integration des in AP1 neu entwickelten Greifers für die Softwareintegration und Anwendertests einsatzbereit (s. Abbildung 11).

Für die Integration der Softwaremodule aller Partner und das Design der **Robotersteuerung** wurden Komponenten- und Ablaufdiagramme gemeinsam erarbeitet, welche die Aufteilung der Softwaremodule und Zuständigkeiten im Systemarchitekturdiagramm sowie die Ablauflogik und Kommunikation in den Anwendungsfällen visualisieren (s. Abbildung 12). Die Ablaufsteuerung wurde von Mojin erfolgreich für die zwei ausgewählten Anwendungsfälle umgesetzt und orchestriert jeweils alle benötigten Funktionskomponenten (u.a. Navigation, Perzeption, Manipulation). Die **Integrationsprints** zur Umsetzung der Anwendungsfälle Leergutannahme (GEB) und Mischkisten erstellen (ENS) wurden im September und Oktober im Labor bei Mojin mit Unterstützung durch NODE und IPA durchgeführt.

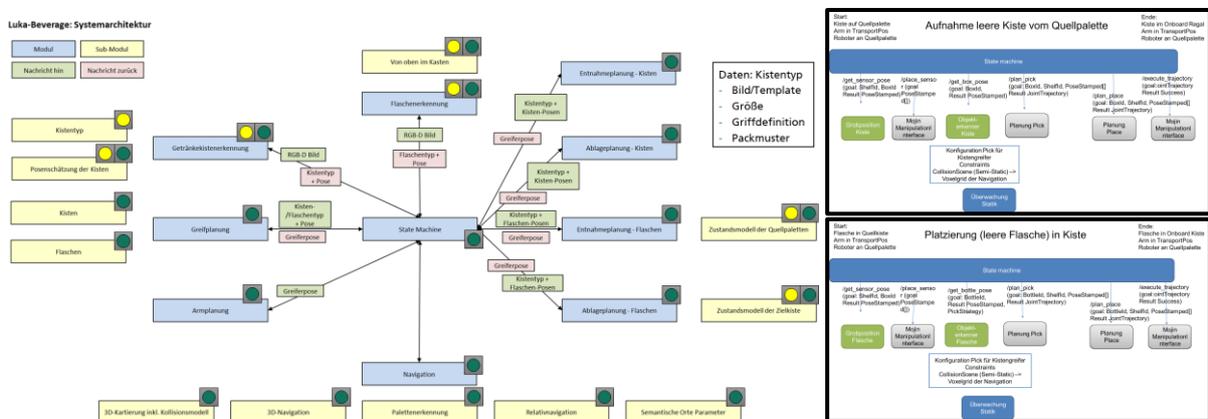


Abbildung 12: Softwarekomponentenübersicht und Systemarchitektur (links) und beispielhafte Ablaufdiagramme der Robotersteuerung für das Aufnehmen einer leeren Kiste und das Platzieren einer Flasche in einer Kiste (rechts).

Die **Sicherheitsanalyse** ist mit der Erstellung einer Risikobeurteilung und der Ableitung technischer und organisatorischer Maßnahmen erfolgreich durchgeführt worden (s. Abbildung 13). Im Ergebnis sind die Roboteranwendungen sowohl als Demonstrator als auch in der Realanwendung darstellbar.

Risikobeurteilung							
Gefährdungstyp	Gefährdung	Schadensausmaß 1: reversibel, leicht 2: irreversibel, schwer	Wahrscheinlichkeit (auf Basis von Exposition, technischer Zuverlässigkeit und menschlichem Fehlerhalten) 1: extrem selten/unwahrscheinlich 2: eher wahrscheinlich 3: sehr wahrscheinlich	Erkennungs-/Ausweichmöglichkeit 1: möglich 2: (nahezu) unmöglich	Prio	Mögliche Maßnahmen zur Risikominderung	Sonstiges
Mechanische Gefährdungen	Freier Stoß (ohne Quetschen): Mitarbeiter stößt sich am statischen/bewegten Roboter	2	3	2	12	Demo: Überwachung des Arbeitsraumes durch den technischen Mitarbeiter -> Einweisungsprotokoll Lang: Dynamisch schaltbare Schutzfelder der Sicherheitslaserscanner (2,3 m Abstand) Warnfeld + Schutzfeld ODER per Lichtschranke den Arbeitsbereich des Roboters einschränken (mit Quittierung nach Verlassen)	Liste für Aufsichtsperson notieren mit den Aufgaben
Mechanische Gefährdungen	Quetschen beim Ablegen der Kiste	1	3	1	3	Betriebsanweisung: Mitarbeiter muss den Arbeitsbereich des Roboters meiden Kraftbegrenzung des Armes in Gravitationsrichtung	
Mechanische Gefährdungen	Einquetschen durch den Zugriff des Greifers	1	2	1	2	Greifer ist passiv ausgelegt, geringe Quetschkraft, normgerecht	
Mechanische Gefährdungen	Herabfallen der gegriffenen Kiste	2	2	2	8	Betriebsanweisung: Mitarbeiter tragen meist Sicherheitsschuhe, aber nicht alle, Separation der Arbeitsbereiche -> organisatorisch	Auch Projektpartner müssen im Raum Sicherheitsschuhe tragen
Mechanische Gefährdungen	Roboter stößt Kistenstapel um	2	2	1	4	Betriebsanweisung: Mitarbeiter sind konzentriert und weichen aus, Sicherheitsabstände und Platz sind ausreichend groß -> organisatorisch lösen	
Mechanische Gefährdungen	Quetschen beim Bewegen des Armes (gegen Roboterhardware)	2	2	1	4	Kraftbegrenzung des Armes als Sicherheitsfunktion	
Mechanische Gefährdungen	Quetschen beim Bewegen des Armes (gegen externe Strukturen)	2	3	1	6	Betriebsanweisung: Aufpassen, Sicherheitsabstand einhalten, reduzierte Armeschwindigkeit Lang: Laserscannerschutzfeld (dyn.) mit reduzierter Geschwindigkeit im Warnbereich und Stopp im Schutzbereich	
Mechanische Gefährdungen	Quetschen bei Bewegung der Plattform	2	3	1	6	PL0 Laserscanner mit Schutzfeldern	
Mechanische Gefährdungen	Werfen/Schleudern gegriffener Kisten	2	2	2	8	Betriebsanweisung: Sicherheitsabstände, Arbeitsbereiche, technische Aufsicht Technisch: beschränkte Beschleunigung der Armbewegungen	
Mechanische Gefährdungen, Thermische Gefährdungen	Werfen/Schleudern gegriffener Flaschen Vollgut-Glasflasche unter Druck (CO <sub>2</sub> ) springt/exploidiert	2	2	2	8	Betriebsanweisung: Sicherheitsabstände, Arbeitsbereiche, technische Aufsicht, Schnittschutzhandschuhe, Schutzbrille Technisch: beschränkte Beschleunigung der Armbewegungen, Getrennte Arbeitsbereiche und verschiedene Betriebsmodi (Pause)	Gefahr explodierender Flaschen besteht auch bei manuellen Tätigkeiten -> Maßnahme: Schutzbrille

Abbildung 13: Ausschnitt aus der Sicherheitsanalyse des Luka-Beverage-Roboters für die beiden Einsatzszenarien.

**Ergebnis:** Alle Projektergebnisse der Partner wurden erfolgreich in den gemeinsamen Demonstrator Luka-Beverage integriert und in Betrieb genommen. Die Robotersteuerung wurde für die Handgriffe in beiden Anwendungsfällen erfolgreich umgesetzt. Zudem konnte anhand der Sicherheitsanalyse und der resultierenden Maßnahmen ein sicherer Einsatz des Roboters in beiden Einsatzumgebungen gewährleistet werden.

## AP5: Anwendertests

Bei jedem Anwender wurde im November 2021 ein Anwendertest vor Ort mit dem Luka-Beverage Robotersystem durchgeführt. Zuvor wurden die Testeinsätze des Roboters in mehrwöchigen Integrations- und Inbetriebnahmesprints im Labor bei Mojin vorbereitet.

Der Test zum Anwendungsfall „Getränkekistenpalettierung in der Leergutannahme“ beim Anwendungspartner aktiv-markt Manfred Gebauer GmbH wurde im Leergutannahme- und -kommissionierungsbereich der Filiale Filderstadt-Bonlanden durchgeführt. Der Roboter konnte erfolgreich Leergutkisten aus einem eingeschränkten Typenbereich erkennen, lokalisieren und aufgreifen (s. Abbildung 14). Die Kisten wurden erfolgreich in der untersten Palettenlage im gewünschten Palettiermuster abgestellt (s. Abbildung 14). Aufgrund der in AP 1 diskutierten, derzeit noch bestehenden Einschränkungen am Greifer konnte das Stapeln weiterer Lagen noch nicht beim Endanwender getestet werden.

Für den Anwendungsfall „Mischkistenerstellung und Mischpalettierung“ konnte das Luka-Beverage-System in einer Werkhalle beim Partner Ensinger Mineral-Heilquellen GmbH getestet werden. Hierbei erhielt der Roboter Zugriff auf eine größere Zahl an sortenreinen Quellpaletten mit verschiedenen Getränkeprodukten. Aus diesen wurden zuverlässig jeweils einzelne Flaschen mit dem Greifer entnommen und in mitgeführte, anfangs leere Kisten gemischt einsortiert (s. Abbildung 15). Das Palettieren der kommissionierten Mischkisten auf die Zielpalette konnte aufgrund der Gewichtslimitierungen des verwendeten Arms nicht getestet werden, sollte sich aber vergleichbar wie das Palettieren der Leergutkisten im Markt darstellen.



Abbildung 14: Anwendertest zur „Getränkekistenpalettierung in der Leergutannahme“ bei GEB.

Es konnte eine Taktzeit von rund 30 Sekunden pro Handlingvorgang (Aufnahme Kiste/Ablage auf Palette) erzielt werden, obwohl die Arm- und Greiferbewegungen aus Sicherheitsgründen verlangsamt waren und keine Optimierung auf Taktzeit durchgeführt wurde. Damit ergab sich eine Gesamtzeit von ca. 80 Sekunden für die Verbringung einer Leergutkiste vom Band auf die Palette. Bei Gebauer kommen im Durchschnitt 60 bis 80 Kisten pro Stunde am Band an, so dass der Roboter die Grundlast mit einer Taktzeit von 15 Sekunden pro Handlingvorgang bewältigen kann (eine mittlere Strecke zur Zielpalette von 15 Metern vorausgesetzt). Die Spitzenlast (bis zu 160 Kisten pro Stunde) kann er somit zwar nicht abdecken; diese ist aber nur während kurzer Zeitfenster pro Woche zu erwarten und kann durch eine temporäre Unterstützung durch Mitarbeiter abgedeckt werden.

Eine wirtschaftliche Anwendung ist aus Sicht des Anwenders Gebauer dann darstellbar, wenn der Roboter zusätzlich zur Verräumung der Leerkisten auch noch die leeren Einzelflaschen in Kisten stellt und ggf. in der Nachtschicht das Vollgut auf die Verkaufsfläche bringen kann. Dazu ist aber zwingend eine Nutzlast von 20 kg erforderlich.

Auch im Anwendungsfall bei Ensinger ist das Handling von Vollgut Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung.



Abbildung 15: Anwendertest zur „Mischkistenerstellung und Mischpalettierung“ bei ENS.

**Ergebnis:** die Anwendertests erfolgten weitgehend erfolgreich in den geplanten Szenarien bei den Anwendern vor Ort in den jeweiligen Zielumgebungen. Die ersten Analysen zeichnen eine positive Verwertungsperspektive und die Anwendbarkeit der Roboterlösung für die jeweiligen Handhabungsaufgaben.

## AP6: Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit, Verwertung, Anforderungsmanagement

Das **Projektmanagement** erfolgte nach Plan durch regelmäßige gemeinsame Arbeitstermine (z.B. Kick-off, Anforderungsanalyse, Analyse und Auswahl der Szenarien, Sicherheitsbetrachtung, Absprachen, Status-Besprechungen, Integrationstermine, Testtermine) sowie durch den Kontakt zum Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (Kommunikation, Abrechnung, Steckbrief, Projektvorstellung, Abschlusstreffen).

Das **Anforderungsmanagement** konnte durch die detaillierte Analyse von 6 Anwendungsfällen bei GEB (s. Abbildung 16) und ENS (s. Abbildung 18) bezüglich Prozessen und Randbedingungen, technischer Umsetzung sowie Demonstrationmöglichkeiten und durch die demokratische Auswahl von 2 Demonstrationsszenarien (GEB: Getränkekastenpalettierung in der Leergutannahme (s. Abbildung 17), ENS: Gemischte Kisten zusammenstellen und palettieren (s. Abbildung 19)) aus den 6 analysierten Anwendungsfällen erfolgreich abgeschlossen werden. Entscheidend für die Auswahl der zwei Demonstrationsszenarien waren Kriterien wie die technische Machbarkeit, geschätzte Zeit bis zur Marktreife, Demonstrierbarkeit, Erhöhung der Prozesssicherheit, Einsparpotential sowie die subjektive Relevanz.

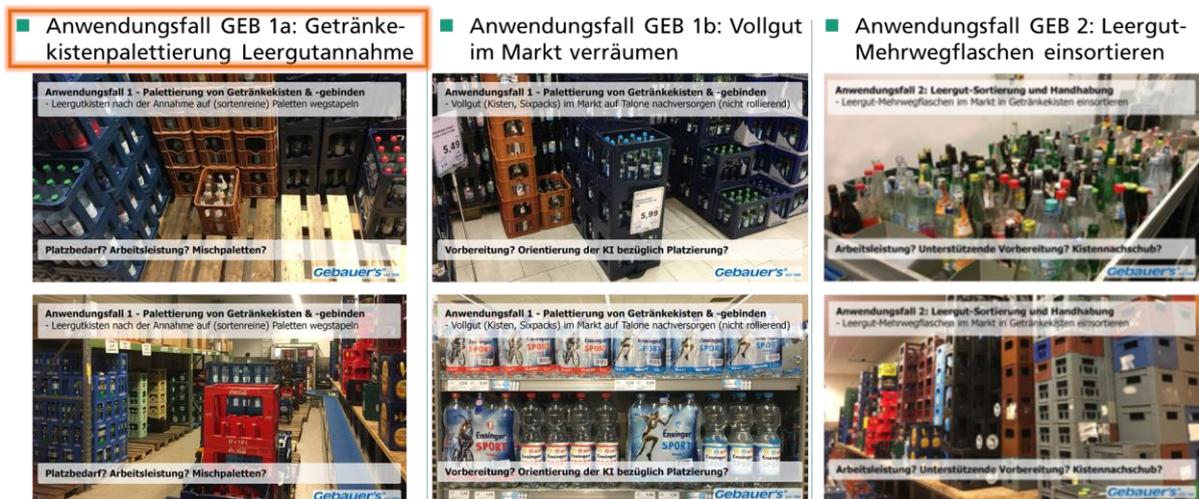


Abbildung 16: Anwendungsfälle im Markt (GEB)

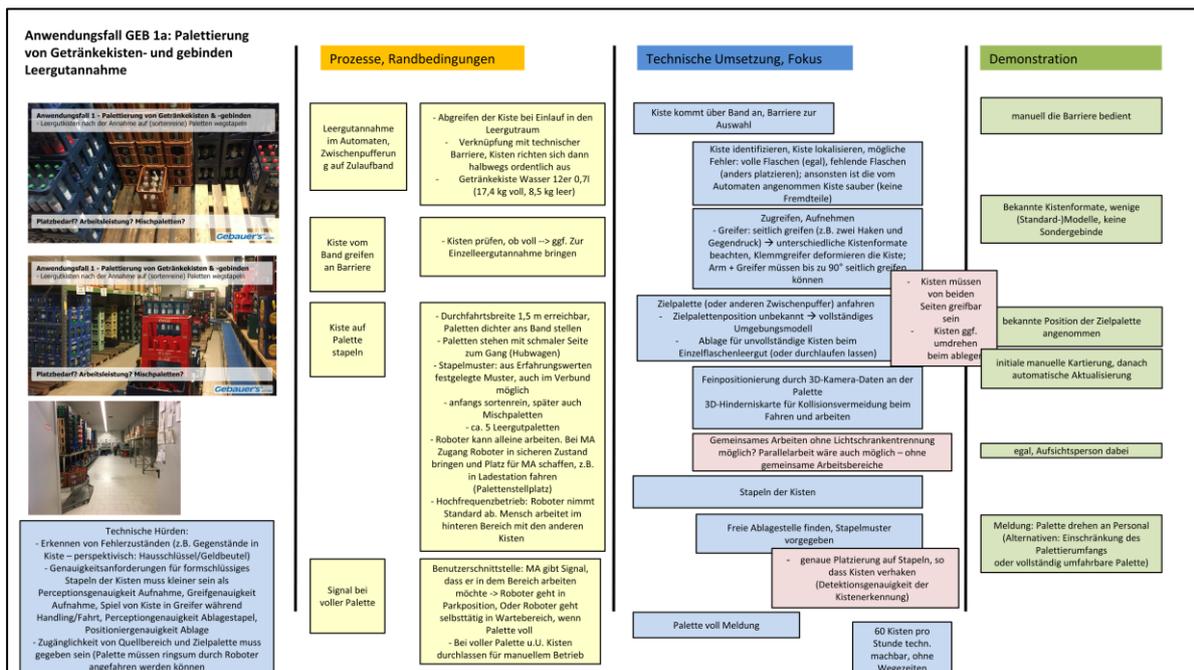


Abbildung 17: Technische Analyse des Anwendungsfalles „Getränkekistenpalettierung in der Leergutannahme“ im Markt (GEB)

■ Anwendungsfall ENS 1a: Palettierung von Getränkebinden



■ Anwendungsfall ENS 1b: Palette mit gemischten Kisten erstellen



■ Anwendungsfall ENS 2: Leergut-Sortierung und Handhabung

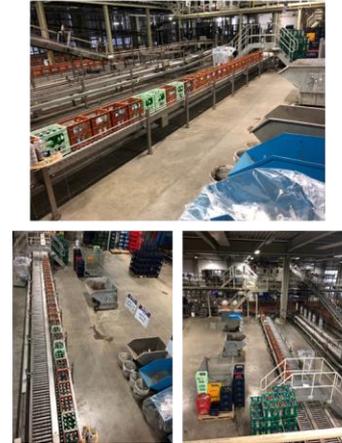


Abbildung 18: Anwendungsfälle beim Hersteller (ENS)

Anwendungsfall ENS 1b: Palette mit gemischten Kisten erstellen



Prozesse, Randbedingungen

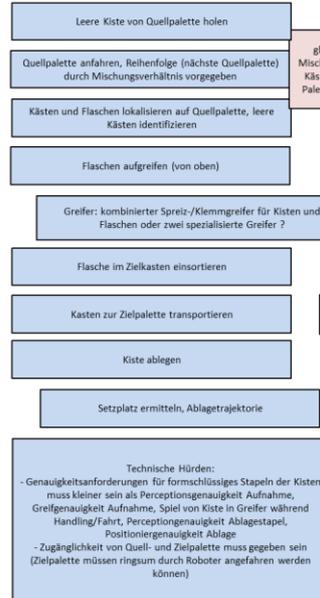
Flaschen aus sortenreinen Kisten entnehmen und in Mischkisten einsortieren

Mischkisten palettieren

- Roboter referenziert sich zur Palette und lokalisiert Kisten und Flaschen
- sortenreine Kisten stehen auf Palette
  - leere Kisten stehen bereit, Wiederverwendung der sortenreinen Kisten
  - 0,5 l und 1,0 l Flaschen
- planbar, kann asynchron durchgeführt werden oder über längeren Zeitraum (soll aber langfristig in den synchronen Regelbetrieb übergehen -> Platzeffizienz)
- eine Zielpalette: Format Düsseldorf (halbe), Mutterpaletten sind Europaletten,
- Mitarbeiter bringen neue Paletten und nehmen fertige Palette mit
  - Platzverhältnisse: 2-3 Boxen nebeneinander (8 x 10 m) oder nachts mit mehr Platz (20 x 80 m)
  - bis zu 9 1,0 l Sorten (Paletten) oder bis zu 11 bei 0,5 l Sorten
  - nur PET Flaschen im Moment
- Durchsatz 125 Euro-Paletten in der Woche, wie viele Mischkisten pro h und MA, 25 Paletten x 40 Kisten = 125 Kisten pro h (?)
  - externer DL 6-8 MA
- keinerlei feste Installation, von Palette zu Palette arbeiten
- schwarze Kisten immer gleich in der Gestaltung
  - Deckel auf Flaschen haben verschieden Farben
  - festes Packmuster

- Kisten sollen pfleglich behandelt werden, kleine Kratzer sind ok, keine scharfkantigen Elemente
- Hochstreben an den Kisten sind relativ robust

Technische Umsetzung, Fokus



Demonstration

- Optionen:
1. Leere Kiste mit dem Roboter mitführen und an den Quellpaletten befüllen, manuell vom Roboter nehmen (bei den großen Kisten)
  2. (Leere Kiste auf Zielpalette stellen und dann die Flaschen reinsteppen)
- Manueller Prozess: Die Kiste wandert über ein Förderband, je Station ein MA sortiert eine Flasche ein

Abbildung 19: Technische Analyse des Anwendungsfalles „Mischkistenerstellung und Mischpalettierung“ beim Hersteller (ENS)

Die Tätigkeiten zur **Öffentlichkeitsarbeit** und **Ergebnisverwertung** sind unten in gesonderten Kapiteln im Detail erläutert.

**Ergebnis:** alle vorgesehenen Tätigkeiten konnten planmäßig durchgeführt werden. Die Anforderungen wurden zweckmäßig für die spätere Kommerzialisierbarkeit analysiert. Das Projekt ist in der Öffentlichkeit bekannt. Der Verwertungsplan benennt klare weitere Schritte auf dem Weg zur Kommerzialisierung des Luka-Beverage-Systems.

## Meilensteine

Im Berichtszeitraum wurden die ersten beiden Meilensteine MS1 und MS2 mit den nachfolgend beschriebenen Inhalten jeweils mit leichter zeitlicher Verzögerung von 4 Wochen erfolgreich erreicht. Daraus ergaben sich auf den weiteren Projektverlauf keine Einflüsse, da für die letzte Arbeitsperiode ein entsprechender Zeitpuffer von Anfang an eingeplant war. Dementsprechend konnte MS3 erfolgreich mit dem Projekt abgeschlossen werden.

**MS1** (Monat 5): Roboterhardware vollständig und einsatzbereit, Sicherheitskonzept vorhanden (AP1+4), Vorversionen der Methoden für Objekterkennung, Handhabung und Navigation integriert (AP2+3, AP4)

Arbeitspakete (AP)	Projektpartner					Σ	2021												
	IPA	NODE	Mojin	ENS	GEB		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 Roboterhardware	0,5		<u>5</u>			5,5													
2 Objekterk., Handhabung	<u>10,5</u>		1			11,5													
3 Visuelle Navigation	1	<u>10</u>				11													
4 Integration, Inbetriebn.	1,25	1,25	<u>4,5</u>	0,5	0,5	8													
5 Anwendertests	0,75	0,25	1	<u>1,6</u>	1,6	5,2													
6 Projektmanagement	<u>1</u>	0,5	0,5	0,5	0,5	3													
<b>Summe PM</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>44,2</b>													
(AP-Leiter unterstrichen)		<b>Projekt-Meilensteine</b>																	

**MS2** (Monat 9): Methoden für Objekterkennung, Handhabung und Navigation (AP2+3) einsatzbereit und integriert, Robotersteuerung für Anwendungsfälle umgesetzt (AP4)

**MS3** (Monat 12): Projektabschluss (AP6), vollintegrierte und operable Roboterlösung (AP1-4), in beiden Anwendungsszenarien getestet und bewertet (AP5).

## Übersicht über die Projektziele und deren Erreichung

Das Projekt verfolgte das Hauptziel, einen kompakten, universellen, mobilen und flexiblen Handhabungsassistenten für die Getränkelogistik zu entwickeln. Dafür wurden insbesondere folgende Teilziele formuliert, welche hier gegen den Erreichungsgrad abgeglichen werden.

### Ziel 1: Optimierung der Roboterhardware für die Zielanwendung, insbesondere die Auslegung und Konstruktion eines geeigneten Greifsystems für Getränkekisten, -gebilde und -flaschen.

Erreichungsgrad: Größtenteils.

Der Kombinationsgreifer für die Aufnahme von Kisten und Flaschen wurde funktional erfolgreich umgesetzt, hat jedoch noch die Limitierung, dass stabile Griffe und beliebige Kistengrößen nur nach manueller Nachjustierung möglich sind.

Als zielführende Lösung ist hier eine zweite Iteration der Greiferkonstruktion notwendig, die mit verbesserter Sensorik und zusätzlicher Aktorik die automatische Einstellung des Greifers auf das jeweilige Kistenmodell zulässt und Flaschen noch sanfter absetzen kann.

### Ziel 2: Sicherheitsbetrachtung und -konzeption der Roboterlösung zur Sicherstellung der Einsatzbarkeit bei den Endanwendern.

Erreichungsgrad: Erreicht.

Anmerkung: Die Sicherheitsbetrachtung setzt voraus, dass kein enger kollaborativer Betrieb von Mitarbeitern mit dem Roboter vorgesehen ist. Diese Annahme ist zweckmäßig und in der praktischen Anwendung keine Einschränkung.

**Ziel 3: Weiterentwicklung bestehender Bildverarbeitungsalgorithmen für die Erkennung und Lokalisierung (Lageschätzung) der Zielobjekte der Anwendung in unstrukturierter Umgebung, Generalisierungsfähigkeit auf neue Produkte.**

Erreichungsgrad: Größtenteils.

Zwar sind die KI-Komponenten zur Bildverarbeitung vollständig umgesetzt worden, jedoch konnte die Präzision der Kisten- und Flaschenlokalisierungsmethoden aufgrund der Einschränkungen am Greifer noch nicht im realen Prozess verifiziert werden. Damit sind abschließende Aussagen zur Robustheit und Generalisierungsfähigkeit noch nicht ermittelt und konnten nur anhand von Auswertungen auf den Bilddaten abgeschätzt werden.

Es sind also alle Methoden umgesetzt, aber es fehlt noch eine ausführliche Evaluierung unter Realbedingungen in den Einsatzumgebungen sowie die Optimierungen eventuell noch auftretender Schwachstellen.

**Ziel 4: Entwicklung eines auf das Greifsystem zugeschnittenen Greifplaners und Armbewegungsplaners zur sicheren und kollisionsfreien Aufnahme und Handhabung der Zielobjekte.**

Erreichungsgrad: Erreicht.

**Ziel 5: Entwicklung von Methoden für das sensorgeführte Palettieren oder Stapeln von Getränkekisten oder -gebunden in unstrukturierten Umgebungen.**

Erreichungsgrad: Teilweise.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass das Palettieren der unteren Lage mit regelmäßigem Muster möglich ist und dabei nach qualitativer Auswertung eine gute Präzision erreicht wird. Das Stapeln weiterer Lagen oberhalb der ersten Lage war aufgrund der aktuellen Einschränkungen am Greifer jedoch noch nicht robust möglich, da die Präzision für diese hochgenaue Tätigkeit noch nicht ausreichte.

Auch hier wird der Prozess des Stapelns aller Voraussicht nach durch die Verbesserungen in einer zweiten Entwicklungsiteration des Greifers mit verbesserter Sensorik und Aktorik darstellbar sein. Zielführend könnte entweder ein sensitives Stapeln mit Messung der Kontaktkräfte beim Absetzen sein und/oder eine spezielle Bewegung zum sicheren Einrasten der Getränkekiste in die darunterliegende.

**Ziel 6: Entwicklung von visuellen Lokalisierungs- und Navigationskomponenten zur Orientierung und Navigation des Roboters in unstrukturierten, dynamisch veränderlichen Umgebungen.**

Erreichungsgrad: Größtenteils.

Einige Funktionsmodule erhielten nach den Praxistests nochmals ein Update. Für diese Module steht ein finaler Test auf dem Luka-Beverage-Roboter in der Zielumgebung noch aus, die Ergebnisse auf einem Testroboter von NODE in einer Laborumgebung waren aber bereits vielversprechend.

Eine Verifikation der finalen Version der neuen Module auf dem Luka-Roboter in der Zielumgebung ist für 2022 eingeplant, ggf. mit kleineren Optimierungen.

**Ziel 7: Inbetriebnahme und Integration der Roboterlösung in die lokale Einsatzumgebung der Endanwender.**

Erreichungsgrad: Erreicht.

Die Auswertung zeigt, dass fast alle Projektziele erreicht oder nahezu vollständig erreicht werden konnten. Die größte noch ausstehende Folgethematik ist eine zweite Entwicklungsstufe des Greifers, um vollautomatisch alle Prozesse für alle Zielobjekte in der gewünschten Präzision ausführen zu können. Im Zusammenhang mit dieser Aktualisierung sind auch nochmals alle Funktionskomponenten in der Zielanwendung final zu prüfen und ggf. zu optimieren. Grundsätzlich sind die umgesetzten funktionalen Module, insbesondere die lernbasierten KI-Funktionen, auf einen sehr guten Entwicklungsstand vorangeschritten, der die Vorhersage einer grundsätzlichen Umsetzbarkeit der Zielanwendungen zulässt. Ebenso wurden die KI-Module von allen Partnern so konzipiert und umgesetzt, dass sie durch ihre Generalisierungsfähigkeit oder einfache Erweiterbarkeit in der Anwendungspraxis letztlich wirtschaftlich und ohne große Aufwände oder Schulungshürden einsetzbar sind.

## Transfer- und Verwertungsperspektiven

Im Projekt wurden verschiedene, vielversprechende Lösungen erarbeitet. Neben der Verwertung des Robotersystems für die beabsichtigten Einsatzzwecke gibt es darüber hinaus Möglichkeiten, einzelne Teilentwicklungen zusätzlich für weitere Einsatzgebiete zu verwerten.

### Verwertungsperspektiven und Verwertungsplan für die Gesamtlösung

Mojin beabsichtigt, das Robotersystem zur Lösung der betrachteten Anwendungsfälle hinsichtlich der Nutzlast weiterzuentwickeln, so dass eine wirtschaftliche Lösung auf Basis der im Projekt erreichten Ergebnisse im Markt angeboten werden kann.

Die Kosten des im Projekt genutzten Demonstrators sind jedoch noch zu hoch für einen kommerziellen Einsatz. Um die Kosten zu senken, ist der Ersatz des Industrieroboters durch eine Eigenkinematik (Konzept „O20“) mit Kugelgelenk erforderlich (s. Abbildung 20).

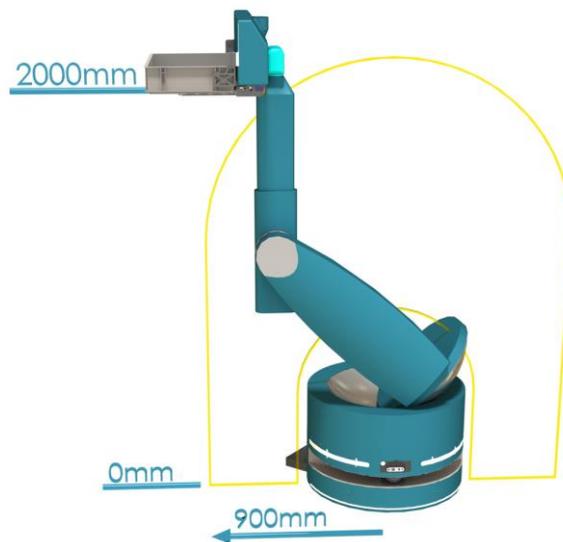


Abbildung 20:  
Konzept für eine  
kostengünstige  
Armkinematik mit  
hoher Nutzlast

Im Austausch mit den Endanwendern wurde weiterhin herausgestellt, dass Leasing statt Verkauf eine wirtschaftliche Anwendung erleichtert und Leasingraten ab 1.500 € / Monat auch im knapp kalkulierenden Handel sehr gut vorstellbar sind.

Die Beiträge von NODE und IPA können per Lizenz eingesetzt werden. Für den durch MojIn entwickelten Kombinationsgreifer für Kisten und Flaschen wird demnächst ein Patent erteilt (laufende Anmeldung zum Europäischen Patent unter EP21199751.5). Eine Übertragbarkeit auf ähnliche Anwendungsfälle wie z.B. die Handhabung von Kleinladungsträgern ist wirtschaftlich nach Projektende gut möglich.

Für die Weiterentwicklung der Luka-Beverage-Lösung in Richtung Marktreife für die betrachteten Anwendungsfälle wird in Absprache mit dem Fördergeldgeber gerade ein Antrag auf Anschlussförderung z.B. im Förderprogramm Invest-BW vorbereitet.

## Verwertungsperspektiven und Verwertungsplan für ausgewählte Teilsysteme

Neben dem Gesamtsystem wurden im Projekt auch verschiedene innovative Teilsysteme entwickelt, die nach Projektende wie folgt verwertet werden. Insbesondere findet bereits eine aktive Kundenakquise auf Basis der im Projekt entwickelten Technologien statt.

### **Navigations- und Lokalisierungsmodule**

Die neu entwickelten Module zur visuellen Lokalisierung und Navigation erweitern das Portfolio der NODE.EDGE Navigationslösung in erheblicher Weise und sorgen dafür, dass das Angebot von NODE für seine Kunden noch attraktiver und umfassender ist. Die Integration der Projektergebnisse in das Hauptprodukt von NODE ermöglicht es, den technischen Vorsprung gegenüber anderen Marktteilnehmern auszubauen und so größere Kundenkreise zu erschließen. Insbesondere kann NODE seine Produktpalette nun mit Hilfe der vollumfänglichen Nutzung von 3D-Sensorik entscheidend erweitern und gegenüber klassischen Laserscannerbasierten Lösungen Vorteile ins Feld führen wie erhöhte Lokalisierungsgenauigkeit durch mehr visuelle Merkmale, bessere Kollisionsvermeidung vor allem gegenüber herausragenden Hindernissen oberhalb der Laserscannerebene sowie das semantische Verständnis von dynamischen Objekten wie Kisten oder Personen im Kartierungs- und Lokalisierungsprozess, welches den Ausschluss von veränderlichen Objekten aus der Karte zulässt und somit eine deutlich zuverlässigere und zielgerichtete Kartierung und Lokalisierung gewährleistet.

Ein weiteres Teilsystem aus dem Projekt sind die erheblich erweiterten Simulationsmodule, welche NODE zukünftig zum internen Testen der Software sowie zum Trainieren von lernbasierten Algorithmen verwendet wird. Durch diese neue Funktionalität kann NODE schnellere Entwicklungszyklen fahren und bessere Qualitätsaussagen erreichen. Es wird Bestrebungen geben, Teile der Ergebnisse wieder open-source zur Verfügung zu stellen oder in einem Co-Development mit anderen Firmen zu nutzen.

### **Bildverarbeitungsmodule**

Schon während der Projektlaufzeit wurde eine Synergie zum Projekt DeepPicking genutzt und die dort entstandenen Simulationswerkzeuge zur Erzeugung von 3D-Trainingsdaten für die Lokalisierung von Gebinden auf Paletten wurden für Luka-Beverage angepasst, um auch zielgerichtet Getränkeboxen, Flaschen und Flaschengebilde zum Training der Boxenlokalisierung zu erzeugen. Durch die Synergie konnten die Werkzeuge zum Vorteil beider Projekte über das geplante Maß hinaus verbessert und erweitert werden. Diese Verbesserungen werden weiterhin auch im Projekt DeepPicking genutzt und stehen in Zukunft auch in Kundenprojekten für die Erzeugung kundenspezifischer Trainingsdaten für Kommissionier- und Greifprozesse bereit.

Ebenso konnten Erkenntnisse bei der Entwicklung des Verfahrens zur Getränkeboxen-Lokalisierung für die weitergehende Optimierung eines ähnlichen Ansatzes zur modellfreien Gebindelokalisierung beim Depalettieren genutzt werden, so dass auch dieser bezüglich der Technologiereife verbessert werden konnte und voraussichtlich in naher Zukunft an Industriekunden lizenziert werden kann.

In Zukunft sollen die Simulationswerkzeuge auch in einem neuen Forschungsprojekt Sim4Dexterity weiter ausgebaut und z.B. um einen synthetischen Objektgenerator für vielfältigste Einzelhandelsobjekte erweitert werden.

Des Weiteren ist die Nutzung der entwickelten Simulationswerkzeuge zur Erforschung und Entwicklung neuer KI-Methoden zur Objekterkennung und Handhabung vorgesehen.

In Luka-Beverage wurden zu den Praxistests schon vorbereitende Datenaufnahmen für weitere Problemstellungen (z.B. Leergut-Einzelflaschenannahme) durchgeführt. Hiermit soll bei geeigneter Anschlussfinanzierung oder durch studentische Projekte im Rahmen der Lehrtätigkeit an der Universität Stuttgart nach Projektende eine weitere technologische Exploration von Lösungen zu den in Luka-Beverage analysierten Anwendungsfällen erfolgen.

## Weitere Verwertungsmaßnahmen

Über die technischen und kommerziellen Verwertungsmaßnahmen hinaus fanden und finden die Projektergebnisse weitere Verwertungswege in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. In den Lehrveranstaltungen des Fraunhofer IPA an der Universität Stuttgart werden die entwickelten Methoden gelehrt und mit Videos veranschaulicht. Darüber hinaus können Studenten Entwicklungsprojekte zu verschiedenen Technologiethematen u.a. auch aus Luka-Beverage in Laborprojekten als Semesterthema wählen. Die betreffenden Lehrveranstaltungen sind:

- Robotersysteme: Anwendungen aus der Servicerobotik (Videos, technische Ansätze und Lösungen)
- Laborprojekt Servicerobotik (neue Projektarbeitsthemen mit Bezug zu Luka-Beverage)
- Laborprojekt Bildverarbeitung für Robotik (neue Projektarbeitsthemen mit Bezug zu Luka-Beverage)

Darüber hinaus wurden während der Projektlaufzeit folgende studentische Arbeiten seitens NODE und Fraunhofer IPA betreut:

- An Implementation of a Visual SLAM System using a RGB-D Camera
- VISUAL SLAM – Entwicklung eines FRONT-ENDS Mithilfe von RGB- und Tiefendaten für ein Mobiles Robotersystem
- Segmentierung von Punktwolken für LT-vSLAM - Aufbau und Vergleich mit Simulation
- Bildverarbeitungsmethoden für die Lokalisierung von Flaschen und Getränkeboxen

## Zusammenarbeit im Konsortium

Die Zusammenarbeit aller Partner kann generell in allen Belangen als sehr gut, eng und offen beschrieben werden. Es wurden regelmäßige Treffen zur Abstimmung im Konsortium bezüglich der relevanten Themen durchgeführt (z.B. Anforderungsanalyse, Analyse und Auswahl der Szenarien, Sicherheitsbetrachtung, Komponentenauswahl, Integration, Planung der Anwendertests, Auswertung), sowie zur gemeinsamen Planung der Arbeiten. Auch die Integrationsprints zur Umsetzung der Anwenderszenarien führten die technischen Partner gemeinsam durch. Hierbei integrierten alle Partner unter der Leitung von Mojin ihre Komponenten in den gemeinsamen Demonstrator im Labor bei Mojin anhand abgestimmter, generischer Schnittstellen. Zwar dominierte oft die virtuelle Zusammenarbeit, die Arbeitstreffen zur Integration sowie die Anwendertests konnten aber auch in Präsenz stattfinden.

Die Abhaltung regelmäßiger Statustreffen sorgte für einen synchronisierten Projektablauf und wurde auch zur gegenseitigen Präsentation und Erläuterung der Ansätze und Lösungen, und somit zum Wissenstransfer genutzt. Konkrete Technologietransferoptionen sind bereits in der Vorbereitung, u.a. wird NODE die Simulationsumgebung Unity auch Mojin bereitstellen, das 3D-Kollisionsmodell der Arbeitsumgebung von NODE ist übergreifend bei Mojin und IPA nutzbar und es wird der Transfer des Moduls für die visuelle Odometrie von NODE und Mojin diskutiert.

## Herausforderungen im Projektverlauf

Im Folgenden sind verschiedene Herausforderungen geschildert, welche sich im Projekt speziell bei der Entwicklung der KI-Methoden ergeben haben.

Beim Einsatz von Methoden des statistischen Machine Learnings ist die ausreichende Verfügbarkeit an Trainingsdaten eine generelle und vorab erwartete Herausforderung. Dabei steht die Generalisierungsfähigkeit der Lösungen, z.B. der Objekterkennung hinsichtlich verschiedener Kisten- oder Flaschenmodelle oder die Erkennung genereller dynamischer Hindernisse bei der Navigation, im Fokus, damit verschiedenste Modelle unter verschiedensten Umgebungsbedingungen zuverlässig erkannt werden können. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Vielfalt und Menge an Trainingsdaten und Umgebungsbedingungen wurden die KI-Lösungen im Projekt mit Daten aus realistischen Simulationen trainiert und großflächig evaluiert (s. AP2+3). Die simulierten Daten sind in beliebiger Menge verfügbar, leicht variierbar und können automatisch annotiert werden. Zusätzlich wurden z.B. bei der Hinderniserkennung der Navigation (allgemeine bewegliche Objekte, Kisten, Kartons und Personen) sowie bei der Kistenlokalisierung für das Greifen generische Ansätze (allgemeine Kisten- und Gebindeerkennung) anstelle spezifischer Lösungen erarbeitet, so dass dadurch weniger spezifische Trainingsdaten notwendig sind. Da nur wenige Hersteller 3D-Modelle ihrer Getränkeboxen bereitstellen konnten, genügte es bei der verwendeten allgemeineren Methode schon, das Training mit fiktiven, künstlich erzeugten und deutlich vereinfachten Gebinde- oder Kistenmodellen durchzuführen, welche echten Kisten nur grob ähnlich sind.

Eine weitere Herausforderung für die spätere Einsetzbarkeit ist die einfache Nutzbarkeit für den Endanwender, was vor allem die Skalierbarkeit der KI-Methoden betrifft, z.B. die Erweiterbarkeit auf neue Kisten- und Flaschenmodelle ohne Experten. Als Lösungsweg setzten wir einerseits eine generische Gebindelokalisierung (generalisiert intrinsisch, kein Auswendiglernen bestimmter Kistenmodelle) ein. Andererseits basiert die Klassifizierung des jeweiligen Kistenmodells auf einem Template-Matching-Ansatz, welcher einzig anhand von Beispielbildern des jeweiligen Kistenmodells und ohne neuerliches Training einsetzbar ist. Somit kann auch ein Endanwender dem System neue Kistenmodelle anhand weniger Beispielbilder, die z.B. mit dem Smartphone aufgenommen wurden, beibringen.

Eine Dritte Herausforderung, insbesondere für die Navigationskomponenten, war die Wahl einer geeigneten Simulationsumgebung. Abweichend vom bisher angedachten Gazebo-Simulator wurde durch NODE eine Unity-Simulation erstellt, welche eine verbesserte visuelle Realitätstreue aufweist und die Dynamik der Umgebung deutlich performanter simuliert.

## Öffentlichkeitsarbeit

Das Konsortium hat sich über verschiedenste Aktivitäten wie folgt um eine weitreichende Öffentlichkeitsarbeit gekümmert.

### Webseiten und Youtube

- Es wurde eine Projektwebseite erstellt, auf welcher auch der Abschlussbericht verfügbar ist: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/luka-beverage.html>
- Eintragung des Projektes auf der KI-Landkarte der Plattform Lernende Systeme: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/ki-landkarte.html>
- Veröffentlichung des Projektabschlussvideos auf Youtube: <https://youtu.be/WOXm7LifWjs>

### Vorträge

- Vortrag auf der in der Branche bedeutsamen EHI Robotics4Retail Konferenz (6. Oktober 2021): „Luka Beverage – Kommissionierung von Flaschen und Kisten im Getränkehandel“

### Veranstaltungen

Aufgrund der geltenden Maßnahmen im Projektjahr wurde von der Durchführung größerer, öffentlicher Veranstaltungen abgesehen. Je nach Lage ist eine Beteiligung an der 70-Jahr-Feier bei Projektpartner Ensinger am 7. Mai 2022 (inkl. Geschäftspartner) angedacht.

### Presse und Medien

Über das Projekt Luka-Beverage wurde in der Tagespresse und sowie in Fachmagazinen berichtet:

- Pressemitteilung: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/neue-ki-anwendungen-fuer-den-baden-wuerttembergischen-mittelstand.html>
- SCIO-Webseite: <https://www.scio-automation.com/de/update/autonome-getraenkelogistik-mit-cobot-luka-beverage>
- NODE-Webseite: <https://node-robotics.com/newsroom-luka-beverage/>
- Informations Dienst Wissenschaft: „Neue KI-Anwendungen für den baden-württembergischen Mittelstand.“ <https://idw-online.de/de/news764488> (08.03.2021)
- Informations Dienst Wissenschaft: „New AI applications for SMEs in Baden-Württemberg.“ <https://idw-online.de/de/news765389> (22.03.2021)
- Womag Online: „Neue KI-Anwendungen für den baden-württembergischen Mittelstand.“ [https://www.wotech-technical-media.de/womag/onlineartikel/OA-2021/03-Ma-erz21/090321\\_Neue-KI-Anwendungen.php](https://www.wotech-technical-media.de/womag/onlineartikel/OA-2021/03-Ma-erz21/090321_Neue-KI-Anwendungen.php) (11.03.2021)
- All-Electronics: „Fraunhofer IPA entwickelt 3 preisgekrönte KI-Anwendungen für die Industrie.“ <https://www.all-electronics.de/markt/fraunhofer-ipa-entwickelt-3-preisgekreonte-ki-anwendungen-fuer-die-industrie.html> (17.03.2021)
- Automationspraxis: „Scio: Mobiler Cobot schleppt Getränkeboxen.“ <https://automationspraxis.industrie.de/ki/scio-mobiler-cobot-schleppt-getraenkekisten/> (22.03.2021)
- me-Magazin: „Kistenschleppen adé.“ <https://me-magazin.com/antriebstechnik-digitalisierung/kistenschleppen-ade/> (12.04.2021)
- „Künstliche Intelligenz made auf den Fildern“, Stuttgarter Nachrichten (17.03.2021)
- Projektsteckbrief für das Ministerium
- „Mobiler Serviceroboter für die Getränkeboxen“, Der Lebensmittelbrief (Ausgabe Juli/August 2021)
- Luka-Beverage Eintrag auf dem EHI Robotics4Retail Poster (Oktober 2021)
- „Die Roboter rollen“, Lebensmittelzeitung (Ausgabe 49, 10.12.2021)
- Technische Logistik (in Vorbereitung, geplant für ca. Frühjahr 2022)