

ABSCHLUSSBERICHT DES BMBF-GEFÖRDERTEN VERBUND-  
PROJEKTS IM RAHMEN DER LEITINNOVATION SERVICEROBOTIK

# ASSISTENZROBOTER IN LABOREN VON LIFE-SCIENCE- UNTERNEHMEN



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



FORSCHUNGSPROGRAMM »LEITINNOVATION SERVICEROBOTIK«

# LISA-ABSCHLUSSBERICHT – ASSISTENZROBOTER IN LABOREN VON LIFE-SCIENCE-UNTERNEHMEN

Koordiniert vom:



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
im Karlsruher Institut für Technologie

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBWF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PB2170 bis 02PB2177) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektkonsortium:



Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF; Universität Osnabrück, Institut für Informatik, AG Wissensbasierte Systeme; Jenoptik Optical Systems GmbH; Sympalog Voice Solutions GmbH; SCHUNK GmbH & Co. KG; Götting KG, [project:syntropy] GmbH; KeyNeurotek AG

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	8
2. Projektziel .....	9
3. Überblick über das Robotersystem LiSA .....	11
4. Randbedingungen, Einsatzszenarien, Arbeitsumfeld .....	12
4.1. Randbedingungen.....	13
4.2. Einsatzszenarien .....	14
4.3. Arbeitsumfeld .....	16
5. Entwicklungen im Rahmen des LiSA-Projektes .....	19
5.1. Mobile Plattform.....	19
5.2. Navigation .....	30
5.3. Manipulator .....	41
5.4. Kamerasystem zur Objekterkennung und -manipulation.....	51
5.5. Multimodale Interaktion: Spracheingabe und -ausgabe.....	61
5.6. Multimodale Interaktion: Grafisches User-Interface .....	66
5.7. Softwarearchitektur .....	73
5.8. Sicherheitskomponenten: Künstliche Haut.....	80
5.9. Systemintegration.....	93
6. Versuche im Labor mit LiSA.....	94
7. Zusammenfassung.....	97
8. Veranstaltungen .....	98
9. Veröffentlichungen.....	99
10. Anhang .....	101



## Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Formeln

Abbildung 1: Arbeitsschwerpunkte .....	11
Abbildung 2: Aufbau des LiSA-Roboters .....	12
Abbildung 3: 6-Well-Multischale für den Einsatz in Bio-Laboren .....	17
Abbildung 4: Demonstrator bei der Ablage einer Multischale .....	18
Abbildung 5: Fluoreszenz-Reader FLUOstar OPTIMA .....	19
Abbildung 6: LiSA-Roboter im „Rohbau“ .....	20
Abbildung 7: fertig eingebauter Fahr- und Lenkantrieb.....	21
Abbildung 8: Netzteile der Laptops und Stromversorgung weiterer Komponenten.	22
Abbildung 9: LiSAs Antriebskonzept.....	23
Abbildung 10: Beispiele für Bewegungsrichtungen.....	23
Abbildung 11: Bedienelemente der Plattform .....	24
Abbildung 12: Schaltkasten mit SPS und Sicherheitsschaltgeräten .....	25
Abbildung 13: Laserscanner und Schaltleisten.....	29
Abbildung 14: Lokalisierung mit 3D-Sensordaten.....	32
Abbildung 15: Schematische Darstellung des VRS Verfahrens.....	35
Abbildung 16: Spezielle Tür- bzw. Zielmanöver können.....	37
Abbildung 17: Integration von verbotenen Zonen .....	41
Abbildung 18: Manipulator des LiSA-Roboters .....	42
Abbildung 19: LiSA an einer Tischübergabestation .....	43
Abbildung 20: Typische Handlingobjekte.....	43
Abbildung 21: KUKA LBR .....	44
Abbildung 22: Katana .....	44
Abbildung 23: SCHUNK LBR.....	44
Abbildung 24: Freiheitsgrade der SCARA Kinematik.....	46
Abbildung 25: Arbeitsraum der SCARA Kinematik .....	46
Abbildung 26: Greifer mit Barcodescanner und Kameraüberwachung .....	47
Abbildung 27: Prototyp der taktilen Haut mit Messwertvisualisierung.....	47
Abbildung 28: SCHUNK Leichtbaumodul PRL80 .....	47
Abbildung 29: PowerCube - Elektronik .....	47
Abbildung 30: Topologie der Antriebs-Subsysteme.....	49
Abbildung 31: Manipulatorbewegung .....	50
Abbildung 32: Anordnung der Kamerasysteme auf der mobilen Plattform .....	52
Abbildung 33: Stereo-Kamerasystem zur Objekterkennung .....	53
Abbildung 34: Objektsegmentierung auf der Übergabefläche .....	54
Abbildung 35: Bestimmung des minimal umschließenden Rechtecks.....	55
Abbildung 36: Klassifikation von Deckel und Schale .....	56
Abbildung 37: Erkennung von Multischalen.....	57
Abbildung 38: Bestimmung von 3D-Messwerten .....	58
Abbildung 39: Stereo-Kamerasystem am Manipulator .....	59
Abbildung 40: Erkennung menschlicher Interaktion bzw. Bewegung .....	60
Abbildung 41: Bildfolgenanalyse in IR-Bildern .....	60
Abbildung 42: Hardware und drahtlose Kommunikation .....	61
Abbildung 43: Software-Architektur für die multimodale Interaktion .....	62
Abbildung 44: GUI zur Konfiguration des Dialogmanagers .....	63
Abbildung 45: Simultane multimodale Interaktion mit dem LiSA-Roboter.....	66
Abbildung 46: Schema Multimodalität .....	67
Abbildung 47: Übersicht – Aufbau GUI.....	68
Abbildung 48: Ansichten interaktive Karte .....	69
Abbildung 49: Buttonliste .....	70



Abbildung 50: Log-Fenster .....	71
Abbildung 51: Auftragsliste .....	72
Abbildung 52: Status-Fenster .....	72
Abbildung 53: Modularisierung des Softwaresystems .....	73
Abbildung 54: Definition des Datentyps für Nachrichten.....	76
Abbildung 55: Kommunikation zwischen Modulen.....	76
Abbildung 56: Beispiel für die Kommunikation zwischen LiSABase-Modulen .....	79
Abbildung 57: Aufteilung der Softwaremodule auf die verwendeten Rechner. ....	80
Abbildung 58: Iterativer Prozess zum Erreichen der Sicherheit gemäß EN 1050.....	81
Abbildung 59: Grenzen und bestimmungsgemäße Verwendung.....	82
Abbildung 60: Auszug aus der Risikoanalyse.....	83
Abbildung 61: Komponenten des Sicherheitssystems.....	84
Abbildung 62: Verknüpfung der Sicherheitskreise .....	85
Abbildung 63: Prototyp eines 8x8 Messaufnehmers.....	87
Abbildung 64: Messdatenvisualisierung .....	88
Abbildung 65: geometrieadaptierte Sensorelemente (Beispiele).....	89
Abbildung 66: Systemeinbindung der Sensorcontroller .....	90
Abbildung 67: Schematischer Aufbau der künstlichen Haut .....	91
Abbildung 68: elektrische und mechanische Anbindung .....	91
Abbildung 69: verschiedene Abstandsgewirke .....	92
Abbildung 70: Druck-/Widerstandskennlinien der Sensorelemente .....	93
Abbildung 71 LiSA bei Versuchen im Labor der KeyNeurotek AG .....	97
Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Kameramodule. ....	52
Tabelle 2: Liste der Nachrichten-Typen.....	77
Tabelle 3: Beispiele für Nachrichten-Subtypen.....	78
Formel 1: Mittelwertfreie und normierte Kreuzkorrelationsfunktion.....	57



## 1. Einleitung

Waren Roboter lange Zeit hinter Stahlzäune verbannt, so werden sie heute zunehmend als Serviceroboter oder Assistenzsysteme in direkter Nähe zum Menschen ohne Schutzeinrichtungen eingesetzt. Dabei sind die Einsatzfelder schon längst nicht mehr nur auf industrielle Anwendungen beschränkt. Anwendungen in der Laborautomatisierung, in der Medizintechnik und im privaten Haushalt machen Roboter zu universell einsetzbaren Werkzeugen.

Neue Strategien in der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter lassen die Grenzen der Arbeitsräume dabei verschwimmen. Arbeiten Mensch und Roboter Hand in Hand und können sich sogar berühren, dann verlieren Taktzeit- und Bewegungsoptimierung an Bedeutung. Stattdessen rücken hinsichtlich des Robotersystems die Sicherheit bei der direkten Mensch-Roboter-Interaktion, kognitive Fähigkeiten und die multimodale Interaktion mit dem Menschen in den Mittelpunkt des Interesses. In dem vom BMBF im Rahmen der Leitinnovation Servicerobotik geförderten Projekt LiSA wurden die neuesten Erkenntnisse aus der Roboterforschung, Sensorik und Informatik aufgegriffen und in einem Demonstrationssystem fusioniert. Schwerpunktthemen waren dabei die Sicherheit mobiler Systeme und Manipulatoren, die Navigation in dynamischen Umgebungen, die optische Objekterkennung sowie die multimodale Interaktion.

Der LiSA-Roboter ist für den Einsatz in Laborumgebungen konzipiert und berücksichtigt alle Teilsysteme, die für ein komplettes Robotersystem in solchen Umgebungen im späteren Einsatz erforderlich sind. Die besondere Herausforderung in dem Projekt bestand zudem darin, alle Teilsysteme in einem Demonstrator zu vereinigen. Das Konsortium des Verbundprojektes LiSA besteht aus acht Partnern aus Forschung und Industrie, die ihre Kompetenzen aus verschiedenen Bereichen in das Projekt einbrachten und neue Systeme und Komponenten entwickelten. Die Projektpartner waren:



Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb  
und -automatisierung IFF, Magdeburg



Universität Osnabrück, Institut für  
Informatik, AG Wissensbasierte  
Systeme, Osnabrück



Jenoptik Optical Systems GmbH,  
Jena



Sympalog Voice Solutions GmbH,  
Erlangen



SCHUNK GmbH & Co. KG,  
Lauffen/Neckar



Götting KG, Lehrte



[project:syntropy] GmbH, Magdeburg



KeyNeurotek AG, Magdeburg

## 1. Projektziel

Zielsetzung des Projektes war die Entwicklung, der Aufbau und die Erprobung eines mobilen, alltagstauglichen Assistenzroboters, der in Laboren von Life-Science-Unternehmen mit Labormitarbeitern interagiert und Routineaufgaben, Transportaufgaben und die Bestückung von Stationen selbständig übernimmt. Das Ziel des LiSA-Projektes wurde bewusst vor dem Hintergrund dieses anwendungsnahen Szenarios gewählt. Für die Akzeptanz eines Assistenzroboters, der sich die Arbeitsumgebung mit menschlichem Laborpersonal teilt und mit diesem interagiert, sind die Flexibilität, die intuitive Bedienbarkeit und die Sicherheit entscheidend. Diese Aspekte standen daher von Beginn an im Vordergrund des Projektes.

Die Motivation für das anwendungsnahes Szenario wird im Folgenden aufgeführt: In der biotechnologischen und pharmazeutischen Forschung muss heute noch ein überwiegender Anteil der Arbeiten manuell durchgeführt werden. Hierzu gehören

insbesondere die Versuchsvorbereitung und die Bestückung bestimmter Stationen wie z. B. Inkubatoren, Mikroskope, Autoklaven und Pipettierstationen. Diese Stationen automatisieren einzelne Schritte komplexer Versuchsabläufe. Eine klassische Automatisierung bzw. Verkettung von Stationen durch Roboter, Taktstationen oder Rundschalttische ist in der Regel bei forschenden Firmen nicht zweckmäßig, denn anders als in produzierenden Unternehmen benötigen die Labormitarbeiter die Geräte und Stationen für ständig neue Versuche mit unterschiedlichen Versuchsabläufen. Durch den Einsatz von Assistenzsystemen können die Stationen hingegen flexibel verkettet werden. Es entstehen „virtuelle“ Produktionsstraßen mit dem vollen Funktionserhalt für den normalen Laborbetrieb. Neue Stationen (Messgeräte etc.) lassen sich problemlos in den Ablauf integrieren, ohne dass hierfür ein Umbau oder eine aufwändige Erweiterung einer stationären Automatisierungsstation durchgeführt werden muss. Durch die häufige Arbeit mit gefährlichen Stoffen sind die Labormitarbeiter zudem einem stetigen Gesundheitsrisiko ausgesetzt. Hier können Assistenzsysteme einen effektiven Beitrag zur Prävention von Erkrankungen leisten, indem sie zukünftig Transportaufträge und Arbeiten in Sicherheitszonen und Kühlräumen übernehmen. Darüber hinaus kann die Kontaminationsgefahr der Proben durch den Einsatz von Assistenzrobotern minimiert und die Sterilität verbessert werden.

Für die Entwicklung des LiSA-Roboters in dem oben aufgeführten Einsatzszenario zeichneten sich folgende zentrale Entwicklungsschwerpunkte ab:

- Entwicklung und Aufbau einer mobilen Plattform
- Navigation in dynamischer Umgebung, flexibler Einsatz bei sich ändernden Laborausstattungen
- Bestimmung der Aufnahme- und Ablagepositionen und der handzuhabenden Objekte, sensorgeführte Bewegung des Manipulators
- Sicherheitsanforderungen und -module, Integration in Manipulator (gemeinsamer Arbeitsraum Mensch-Assistenzsystem)
- Interaktion Mensch ↔ Assistenzsystem (grafisch, Sprache)

Die wesentlichen Arbeitsschwerpunkte sowie deren Zuordnung zu den einzelnen Verbundpartnern sind in Abbildung 1 dargestellt.

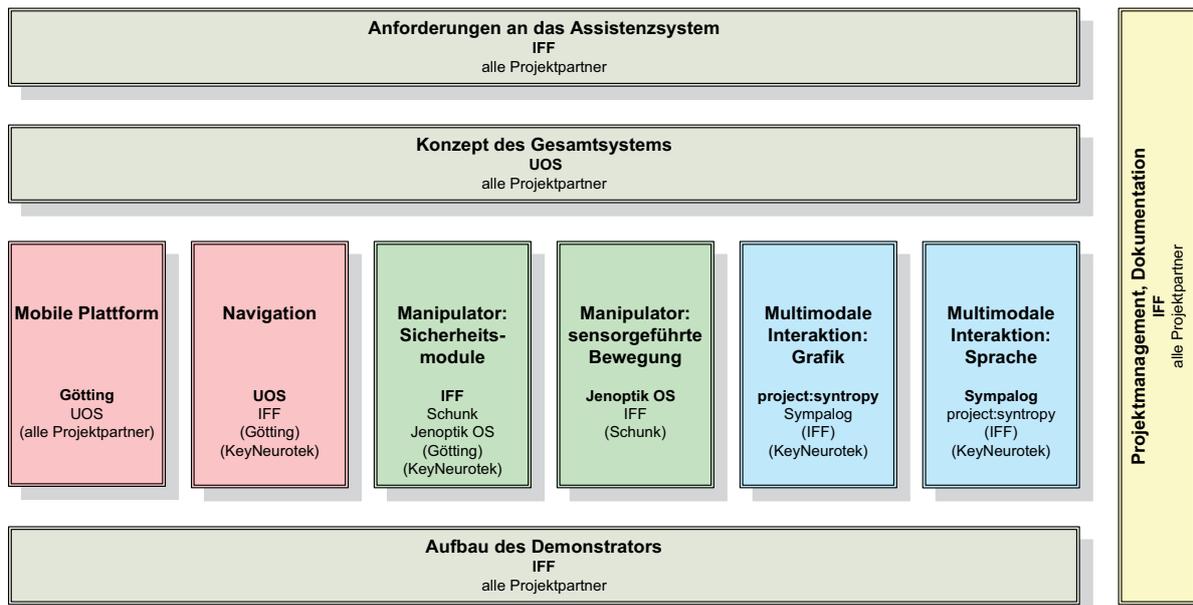
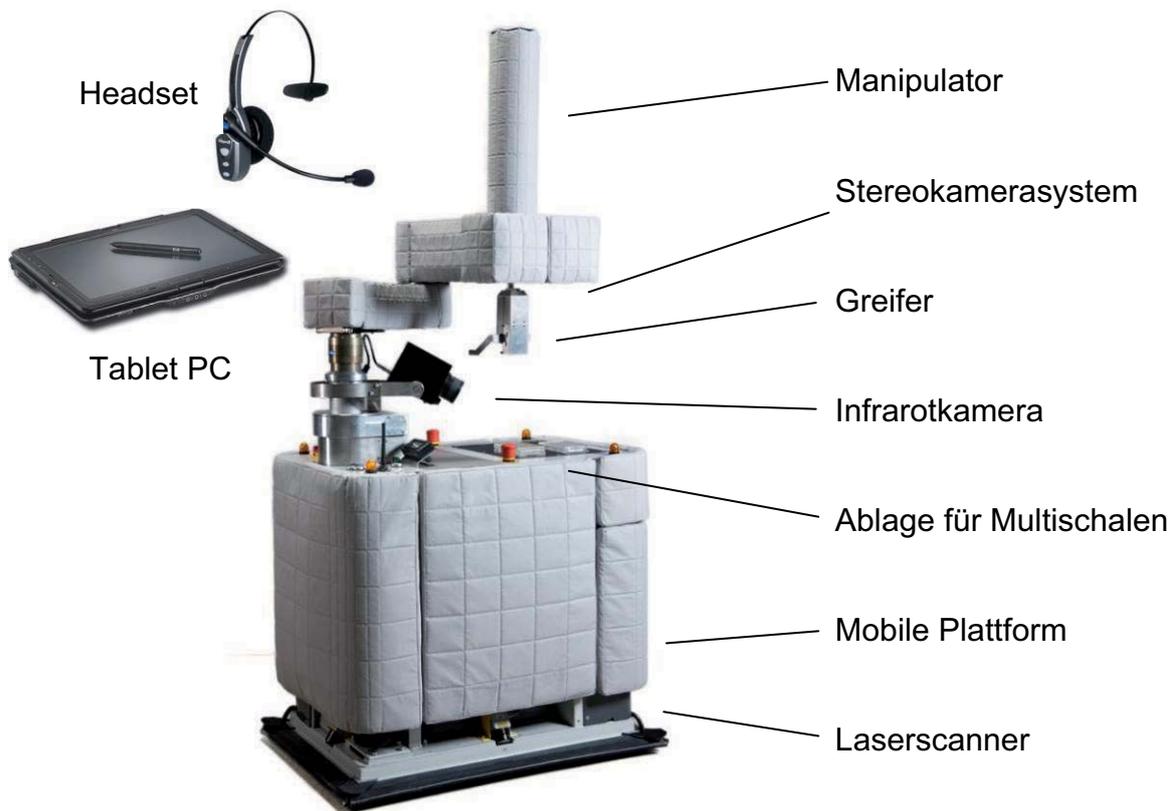


Abbildung 1: Arbeitsschwerpunkte

### 3. Überblick über das Robotersystem LiSA

Im Rahmen der drei Jahre und vier Monate Laufzeit des LiSA-Projektes wurde ein vollständiger Demonstrator für den Einsatz als Assistenzsystem in einem Labor eines Life-Science-Unternehmens aufgebaut.

Das komplette Robotersystem ist in Abbildung 2 dargestellt. Die mobile Plattform ist mit einem omnidirektionalen Antrieb ausgestattet und ist somit in der Lage, selbst in den oftmals beengten Verhältnissen eines Labors zuverlässig zu navigieren. Dies ermöglicht es dem Roboter beispielsweise seitlich an Tische heranzufahren, ohne aufwändige Rangiermanöver ausführen zu müssen, sowie die Durchfahrt von Türen. Die Plattform ist mit sechs Laserscannern ausgestattet, die sowohl zur Lokalisierung als auch zur 3D-Hinderniserkennung und -vermeidung verwendet werden. Zwei horizontal angebrachte SICK S300-Scanner liefern ein 360°-Sichtfeld um den Roboter. Vier schräg nach oben gerichtete Hokuyo-Scanner bilden einen Schutztrichter um den Roboter, um Objekte zu detektieren, die sich über der Sichtebene der SICK-Scanner befinden.



**Abbildung 2: Aufbau des LiSA-Roboters**

Der Manipulator wurde als SCARA-Kinematik mit vier Freiheitsgraden realisiert. Ein Zwei-Finger-Greifer ermöglicht die Handhabung von standardisierten Objekten im Life-Science-Bereich (Multischalen). Für die Objekterkennung ist in den Manipulator ein Stereokamerasystem integriert. Die Greifvorgänge werden außerdem von einer IR-Kamera überwacht, um menschliche Interaktion zu detektieren.

Sowohl die mobile Plattform als auch der Manipulator sind mit einer im Rahmen des Projektes entwickelten taktilen Haut verkleidet. Diese dient zur Kollisionserkennung und polstert gleichzeitig Stöße ab. Zur Bedienung des Roboters werden ein Tablet-PC für die Displayein- und -ausgabe sowie ein Bluetooth-Headset für die Sprachein- und -ausgabe verwendet, über die die multimodale Interaktion erfolgt.

#### **4. Randbedingungen, Einsatzszenarien, Arbeitsumfeld**

Zusammen mit der KeyNeurotek AG als potentiellendem Endanwender wurden die Randbedingungen für den Einsatz des Assistenzsystems untersucht und festgelegt. Dabei wurden sowohl die Abmessungen des Arbeitsumfeldes als auch funktionale

Anforderungen und Einsatzszenarien betrachtet. Die wesentlichen Festlegungen werden im Folgenden kurz dargestellt.

#### 4.1. Randbedingungen

Die Labore der KeyNeurotek AG stellen ein typisches Arbeitsumfeld für den Assistenzroboter LiSA dar. Daher wurden sowohl konstruktive als auch funktionale Randbedingungen auf die Gegebenheiten und Anforderungen der KeyNeurotek AG ausgelegt. Einige wichtige Festlegungen sind:

- Tischhöhe: ca. 0,85 m
- Türbreite: mindestens 0,75 m
- Anzahl der gleichzeitig zu transportierenden Multischalen: 4 bis 6
- Betriebsstunden: 8 h
- Statische und dynamische Hindernisse erkennen, ihnen ausweichen bzw. Roboter stoppen
- Deckel von Multischalen abnehmen und auch wieder aufsetzen (notwendig bei der Bestückung von Messgeräten)
- Arbeitsraum des Manipulators: Pick-and-Place-Aufgaben auf ebenen Flächen, Multischalen können sich ungeordnet im Bereich der Übergabefläche befinden
- Reichweite des Manipulators: 70 cm (um bis zur Mitte eines Labortisches greifen zu können)
- Übergabepositionen: mindestens auf Tischhöhe (85 cm), max. 35 cm darüber, Größe ca. 50 x 30 cm
- Direkter Kontakt zwischen Mensch und Roboter muss erlaubt und sicher realisiert sein.
- Die Bedienung der wesentlichen Funktionen mittels der Modalitäten „Sprache“ und „Display“ soll unabhängig voneinander, aber auch in stetiger Kombination möglich sein.
- Bediener und Roboter können sich in unterschiedlichen Räumen befinden.
- Fehlerzustände werden dem Benutzer zeitnah sowohl visuell als auch sprachlich präsentiert und unterbrechen ggf. den aktuellen Dialog. Danach kann der Dialog an diesem Punkt wieder aufgenommen werden.

## 4.2. Einsatzszenarien

Für den Einsatz des Assistenzsystems wurden verschiedene Szenarien definiert. Neben Standardabläufen wurden dabei auch mögliche Fehler und deren Behandlung betrachtet. Die Szenarien dienen der Anforderungsanalyse und späteren Verifikation der Projektergebnisse. Einige Szenarien werden hier beispielhaft dargestellt.

### 4.2.1. Standard-Szenario: Transport von Multischalen

Das Standard-Szenario stellt den Transport einer Multischale vom Inkubator zum Fluoreszenz-Reader sowie die Durchführung einer Messung und den Rücktransport zum Inkubator dar.

- A.1. Bediener erteilt einen neuen Auftrag: „LiSA, führe bitte mit Probe X eine Fluoreszenz-Messung durch.“
- A.2. LiSA: „Wo befindet sich die Multischale?“
- A.3. Bediener: „Im Inkubator R211.“
- A.4. LiSA fährt zum Inkubator in Raum 211.
- A.5. LiSA nimmt Probe X (Multischale) aus der Übergabestation des Inkubators.
- A.6. LiSA legt Probe X auf der Ablage des Roboters ab.
- A.7. LiSA fährt über den Flur zu Raum 206.
- A.8. LiSA erreicht den Fluoreszenz-Reader.
- A.9. LiSA öffnet den Probeneinzug des Fluoreszenz-Readers (über Software-Schnittstelle).
- A.10. LiSA nimmt Probe X von der Ablage des Roboters.
- A.11. LiSA legt Probe X in den Probeneinzug des Fluoreszenz-Readers.
- A.12. LiSA nimmt den Deckel von der Multischale und legt ihn ab.
- A.13. LiSA schließt den Probeneinzug des Fluoreszenz-Readers (über Software-Schnittstelle).
- A.14. LiSA startet die Messung (über Software-Schnittstelle). (Der Vorgang kann mehrere Minuten dauern. In dieser Zeit kann LiSA weitere Aufgaben ausführen.)
- A.15. Die Messung ist beendet; der Probeneinzug des Fluoreszenz-Readers öffnet sich und fährt heraus.

- A.16. LiSA nimmt den Deckel von der Ablage und setzt ihn auf die Multischale.
- A.17. LiSA nimmt Probe X aus dem Probeneinzug des Fluoreszenz-Readers.
- A.18. LiSA legt Probe X auf der Ablage des Roboters ab.
- A.19. LiSA schließt die Schublade des Fluoreszenz-Readers (über Software-Schnittstelle).
- A.20. LiSA fährt zum Inkubator in Raum 211.
- A.21. LiSA nimmt Probe X von der Ablage des Roboters.
- A.22. LiSA legt Probe X in die Übergabestation des Inkubators.
- A.23. LiSA: „*Auftrag ausgeführt.*“

#### **4.2.2. Fehler-Szenario: Hindernis auf dem Fahrweg**

Beim Ausführen eines Fahrauftrags (z. B. Aktion A.4) befindet sich ein Hindernis im Weg. Dieses Hindernis kann ein Gegenstand, eine Person oder eine geschlossene Tür sein.

- B.1. LiSA erkennt das Hindernis entweder durch Kollision oder durch Abstandssensoren. (Eine Kollision soll nicht auftreten. Falls doch eine Kollision stattfindet, muss LiSA sofort anhalten!)
- B.2. LiSA versucht einen Weg um das Hindernis herum zu fahren bzw. einen alternativen Weg zum Ziel zu finden, z. B. zweiter Laboreingang. (Bei Erfolg wird der normale Ablauf fortgesetzt.)
- B.3. LiSA fordert per Sprachanfrage beim Bediener Unterstützung an.
- B.4. Bediener räumt den Weg frei und betätigt die Taste „Auftrag fortsetzen“ auf dem Display bzw. gibt den Sprachbefehl zum weitermachen.
- B.5. LiSA führt den normalen Ablauf fort.

#### **4.2.3. Fehler-Szenario: Objekt ist nicht vorhanden**

Ein Objekt, das gehandhabt werden soll, ist nicht vorhanden (z. B. die Multischale in Schritt A.5 befindet sich nicht in der Übergabestation des Inkubators).

- C.1. LiSA informiert den Bediener: „*Das Objekt ist nicht vorhanden.*“

#### **4.2.4. Fehler-Szenario: Hand im Bereich des Greifers oder Person im Schwenkbereich des Manipulators**

Im Arbeitsbereich des Manipulators befindet sich ein Mensch. Es besteht Verletzungsgefahr.

- D.1. LiSA erkennt die Gefahr und stoppt.
- D.2. LiSA bittet darum, den Arbeitsbereich freizugeben.
- D.3. Wenn der Arbeitsbereich wieder frei ist, setzt LiSA die Arbeit fort.
- D.4. Es kommt zu einer Kollision. Der Benutzer muss die Fortsetzung der Arbeit bestätigen.

### **4.3. Arbeitsumfeld**

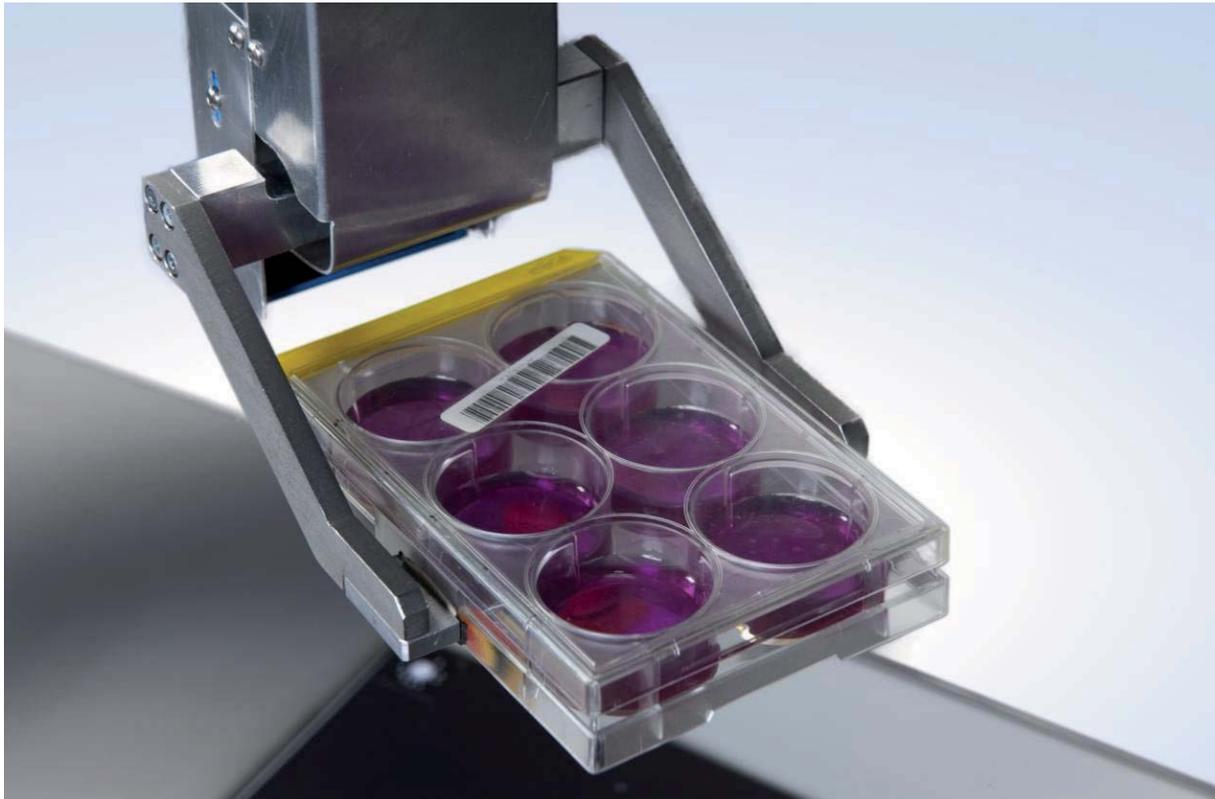
Ausgehend von den zuvor definierten Szenarien wurden die Objekte und Laborgeräte festgelegt, die für das Assistenzsystem LiSA relevant sind. Außerdem wurde die Gestaltung der Ablage- und Aufnahmepositionen festgelegt. Einen entsprechenden Überblick bieten die folgenden Abschnitte.

#### **4.3.1. Laborobjekte**

Primäre Objekte, die vom Assistenzsystem gehandhabt werden, sind Multischalen (Mikrotiterplatten) mit Deckel. In Abbildung 3 ist eine 6-Well-Multischale im Greifer des Manipulators zu sehen. Neben diesen kommen auch 96-Well-Multischalen zum Einsatz.

Die Multischalen besitzen eine standardisierte Grundfläche von 86 mm x 128 mm und eine Höhe von 22 mm (6-Well) bzw. 18 mm (96 Well).

Die Deckel der Multischalen müssen vom Assistenzsystem abgenommen und aufgesetzt werden können, da dies für die Durchführung von Experimenten notwendig ist.



**Abbildung 3: 6-Well-Multischale für den Einsatz in Bio-Laboren im Greifer des LiSA-Manipulators.  
Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF**

#### **4.3.2. Tisch-Übergaben**

Auf den Labortischen werden markierte Bereiche eingerichtet, in denen Multischalen vom LiSA-Roboter aufgenommen und abgelegt werden. Hier kann auch ein Labormitarbeiter Proben ablegen, die für den Transport durch LiSA vorgesehen sind.

Position und Orientierung der Multischalen ist dabei beliebig. Die Objekte dürfen allerdings nicht übereinander gestapelt sein und müssen ausreichenden Abstand haben, um mit dem Manipulator gegriffen werden zu können.

Die Übergabeflächen sind in mattem schwarz gehalten, damit sich die transparenten Multischalen gut erkennen lassen. An den Ecken/Rändern wurden Markierungen angebracht, die sowohl zur Identifizierung der Übergabefläche als auch zur Unterstützung der Bildverarbeitung dienen. Abbildung 4 zeigt den LiSA-Demonstrator bei der Ablage einer Multischale an einer solchen Übergabestation. Auf dem Assistenzroboter ist ebenfalls eine solche Fläche markiert. Sie dient zur Ablage der Multischalen während des Transports.



**Abbildung 4: Demonstrator bei der Ablage einer Multischale. Die schwarzen Übergabeflächen auf Tischen dienen zum Austausch von Objekten zwischen Mensch und Roboter.  
Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF**

### **4.3.3. Fluoreszenz-Reader**

Zur Untersuchung von biologischen Proben existiert eine Vielzahl von Laborgeräten, um biologische, chemische oder physikalische Eigenschaften zu messen. Viele dieser Geräte – sogenannte Plate Readers – wurden für die Verwendung von Mikrotiterplatten entwickelt, um einen hohen Durchsatz von Proben zu ermöglichen. Ein Plate Reader besitzt eine Schublade für den Probeneinzug und lässt sich über eine Softwareschnittstelle bedienen.

Für das LiSA-Projekt wurde beispielhaft ein Fluoreszenz-Reader vom Typ FLUOstar OPTIMA von BMG LABTECH gewählt, wie er bei der KeyNeurotek AG vorhanden ist (siehe Abbildung 5). Für die Entwicklung des LiSA-Demonstrators wurde ein realitätsnaher Nachbau des Probeneinzugs angefertigt, um das Bestücken und Entnehmen von Multischalen zu testen.



Abbildung 5: Fluoreszenz-Reader FLUOstar OPTIMA (links) und geöffneter Probeneinzug (rechts)  
Fotos: Fraunhofer IFF

## 5. Entwicklungen im Rahmen des LiSA-Projektes

Nachfolgend werden die Anforderungen sowie Lösungsansätze und Konzepte von LiSA beschrieben. Diese sind:

- Systemarchitektur (**UOS**, IFF)
- Entwicklung und Aufbau einer mobilen Plattform (**Götting**, UOS, IFF)
- Navigation in dynamischer Umgebung, flexibler Einsatz bei sich ändernden Laborausstattungen (**UOS**, IFF, Götting)
- Entwicklung des Manipulators, sensorgeführte Bewegung des Manipulators, Integration der Sicherheitsmodule in Manipulator (**IFF**, SCHUNK, Jenoptik)
- Bestimmung der Aufnahme- und Ablagepositionen und der handzuhabenden Objekte (**Jenoptik**, IFF)
- Multimodale Interaktion (Sprache) (**Sympalog**, project:syntropy, IFF)
- Multimodale Interaktion (Grafik) (**project:syntropy**, Sympalog, IFF)

### 5.1. Mobile Plattform

#### 5.1.1. Anforderungen

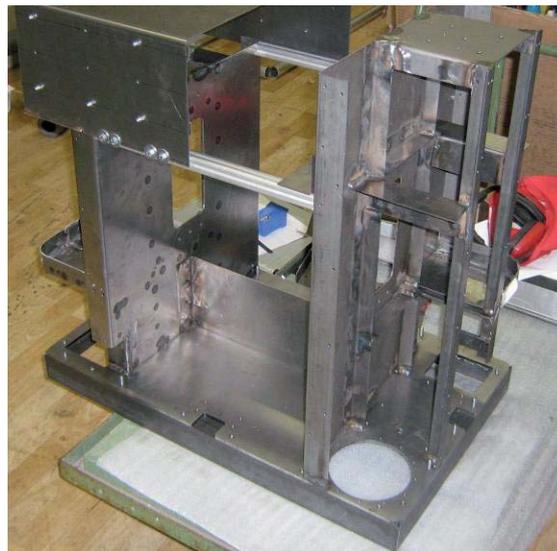
Im folgenden Abschnitt wird die Konstruktion, der Aufbau und die Steuerungstechnik der mobilen Plattform mit den verbauten Sicherheitseinrichtungen beschrieben.

Es erwies sich als problematisch, die unterschiedlichen Vorgaben der Partner zu berücksichtigen. Dieses gilt insbesondere für die Anforderungen im Personenschutz. So benötigt der Roboterarm eine stabile Plattform, d. h. prinzipiell eine breite Abstützung auf dem Boden. Dieses Ziel widerspricht der Forderung, dass das Fahrzeug

auch in schmalen Gängen unterwegs sein soll, also, dass das Fahrzeug selbst schmal gebaut wird. Die Stabilität ist nicht nur im Stand bei den Aktionen des Roboters zu gewährleisten, sondern auch während der Fahrt bzw. beim Bremsen des Fahrzeugs.

Auch das Ziel einer möglichst hohen Fahrgeschwindigkeit widerspricht im Besonderen den Sicherheitsanforderungen. Der Bremsweg verlängert sich im Quadrat zur Geschwindigkeit, ebenso hängt die Krafteinwirkung auf ein Hindernis direkt vom Quadrat der Geschwindigkeit ab.

Eine andere Forderung ist, den Einbauraum für die Rechner bereitzustellen und eine ausreichende elektrische Energie durch entsprechend große Akkumulatoren zur Verfügung zu stellen. Akkumulatoren mit der entsprechenden Energie sind folglich schwer und erfordern wiederum starke und somit auch schwere Antriebe. Das Gewicht des Fahrzeugs wiederum erhöht das Schadenspotential beim Aufprall auf ein Hindernis.



**Abbildung 6: LiSA-Roboter im „Rohbau“  
Foto: Götting KG**

Als Schnittstelle zum Fahrzeug kommt eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zum Einsatz. Die SPS steuert alle Aktoren zur Bewegung der Plattform an und liest die Daten der Sensoren ein.

Die Kommunikation mit dem Navigationssystem erfolgt über Ethernet.

### 5.1.2. Konstruktive Details

Um bei 500 mm Breite eine ausreichende Standfestigkeit beim Fahren und Manipulieren zu gewährleisten, müssen die Räder möglichst weit außen an der Plattform angebracht werden. Für die Baugröße konnten keine geeigneten Radnabenantriebe gefunden werden. Daher werden die Antriebsräder über Zahnriemen bewegt. Der Antriebsmotor wird beim Lenken mitgedreht und musste hochkant eingebaut werden, um beim Lenken innerhalb der Fahrzeuggeometrie zu bleiben. Wegen des Gewichts von 200 kg muss der Motor über eine ausreichende Leistung verfügen. Schaltleisten, Motor und Bremsen sind so ausgelegt, dass das Fahrzeug bei 0,3 m/s rechtzeitig zum Stehen kommt.

Das Antriebsrad wird über ein großes Lager und Zahnrad, durch das der Zahnriemen für den Antrieb verläuft, gehalten und gelenkt.

Es wurden Motoren mit interner Regelelektronik gewählt. Die Soll-Geschwindigkeit der Fahr- und Lenkmotoren wird über ein analoges Steuersignal (0-10 V) vorgegeben. Die Drehrichtung, Freigabe und Haltebremse werden über Digitalsignale angesteuert. Diese Bremse kann auch als Betriebsbremse zum Einsatz kommen. Alle Motoren haben einen Encoder als Rückkopplung für die Geschwindigkeits- und Lenkregelung. Bei der Lenkung ist ein zusätzliches Null-Impulssignal zur Justierung vorhanden.

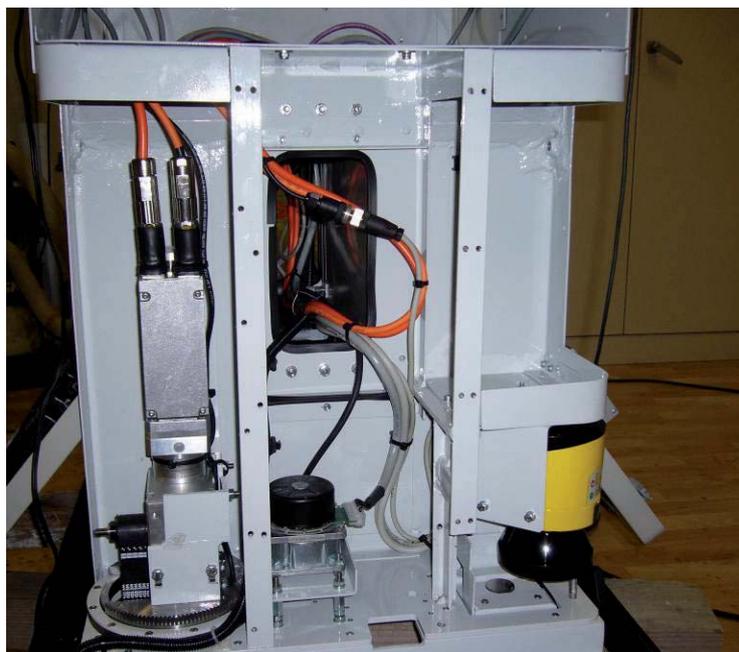
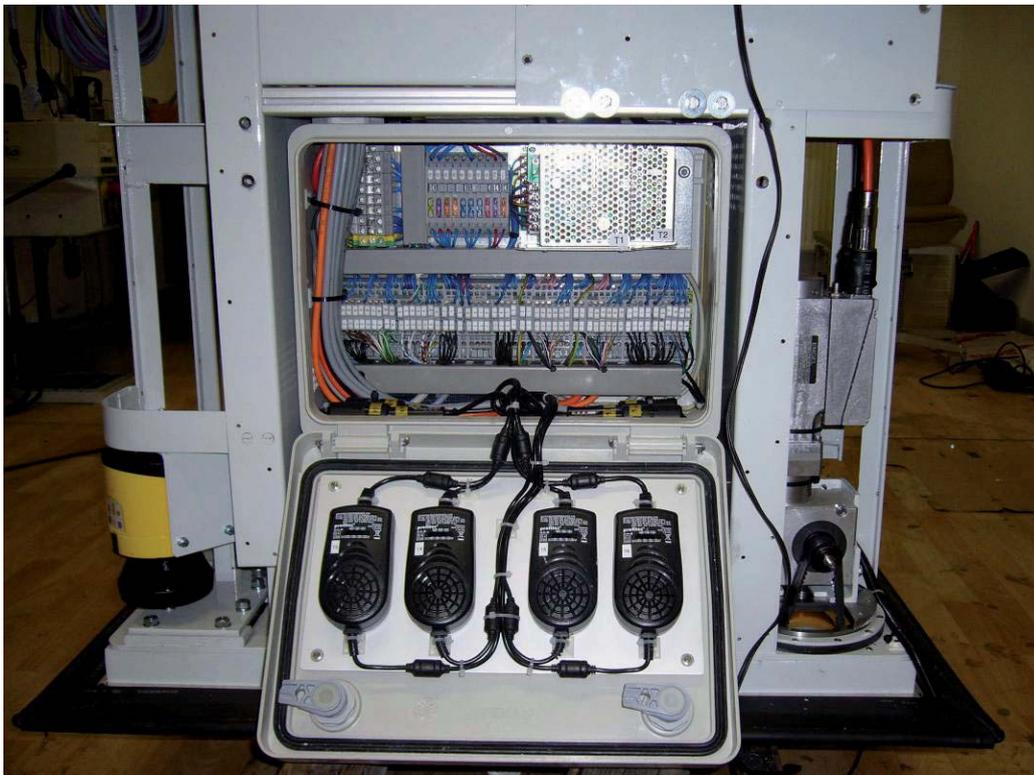


Abbildung 7: fertig eingebauter Fahr- und Lenkantrieb  
Foto: Götting KG

Die SICK-Laserscanner sind in zwei gegenüberliegende Ecken integriert. Außerdem befinden sich zusätzlich an allen vier Seiten Hokuyo-Laserscanner, die aus etwa 100 mm Höhe in einem Winkel von 60° nach oben „sehen“.

Für die Laptops sind drei Einschübe vorhanden, an deren Rückseite jeweils die Anschlüsse für Stromversorgung und die Schnittstellen zu finden sind.



**Abbildung 8: Netzteile der Laptops und Stromversorgung weiterer Komponenten**  
**Foto: Götting KG**

### **5.1.3. Das Antriebskonzept**

Obwohl LiSA relativ groß ist (LxBxH 900 x 600 x 1500 mm), ist sie sehr beweglich und kann sich sicher in engen Gängen bewegen. Durch die Allradlenkung ist die Plattform auch in der Lage, direkt an Arbeitstische und Geräte heranzufahren. Um problemlos Absätze in Türbereichen überqueren zu können, sind möglichst große Raddurchmesser erforderlich.

Auf Grund dieser Anforderungen wurde ein omnidirektionales Antriebssystem gewählt. Es besteht aus zwei diagonal angeordneten, eigenständig zu lenkenden Antrieben. Dieses Konzept erlaubt höchste Beweglichkeit, einschließlich Querfahrt und Wenden auf der Stelle. An den beiden anderen Ecken befinden sich passive Lenkrollen zur Abstützung. Der Nachteil dieser Konstruktion ist das relativ hohe

Gewicht (durch zwei gelenkte und angetriebene Räder) und die Kosten. Fahr-Lenk-Antriebe sind in der erforderlichen kleinen Baugröße nicht verfügbar. Aus diesem Grund ist eine Sonderkonstruktion aus Fahrmotor und separatem Lenkmotor erforderlich.

Durch das hohe Gewicht der Plattform waren starke und schwere Antriebsmotoren notwendig. Entsprechend groß fallen die Akkus aus, um eine akzeptable Einsatzzeit realisieren zu können, was das Gewicht weiter erhöht.

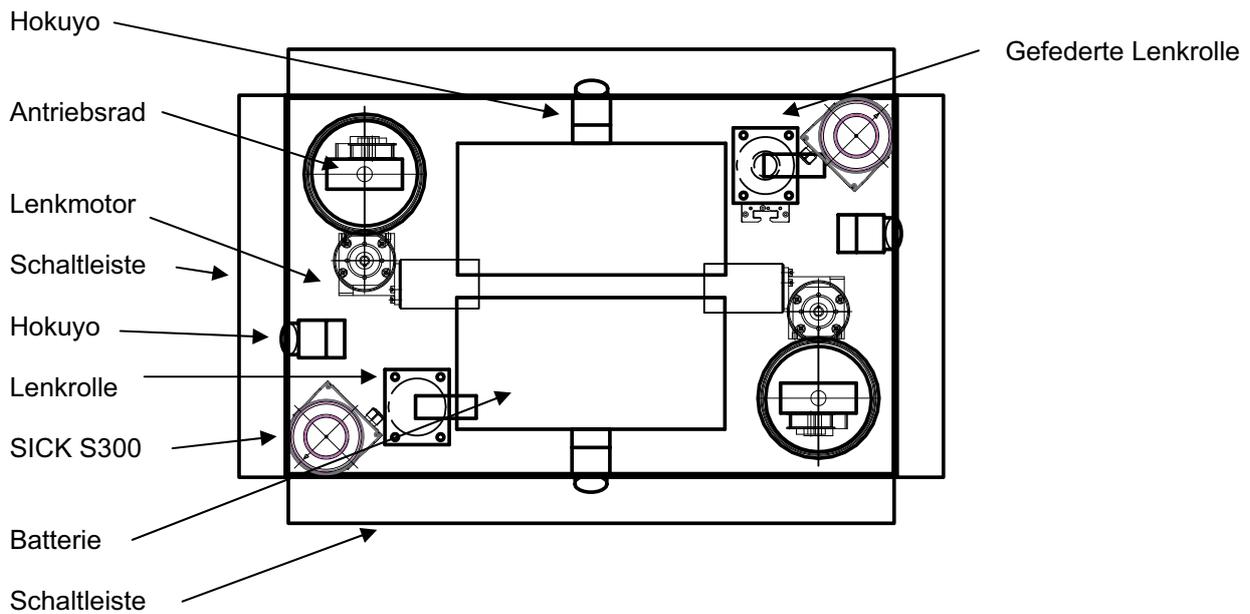


Abbildung 9: LiSAs Antriebskonzept

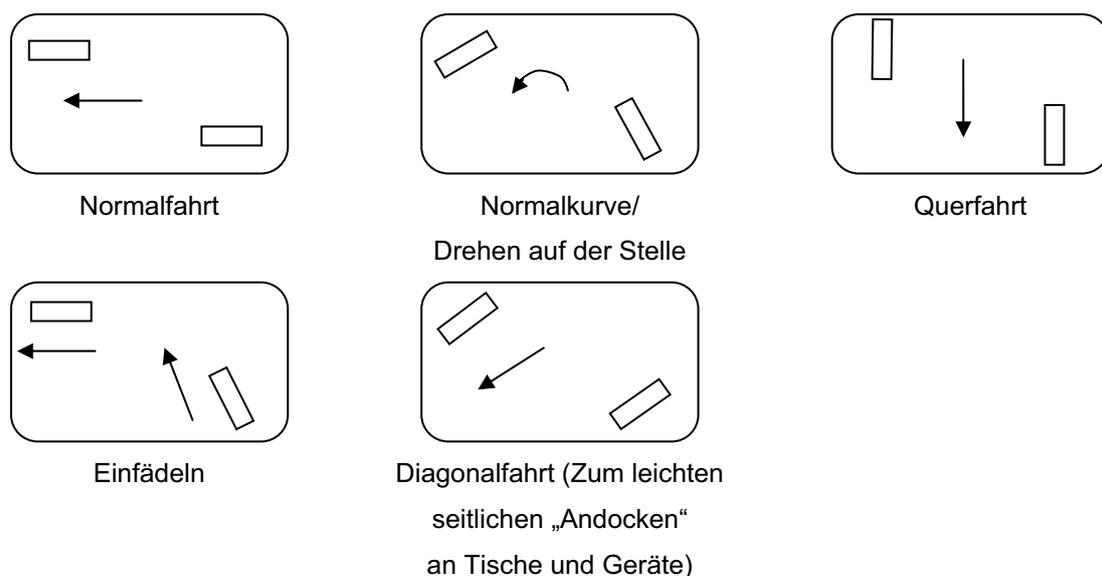


Abbildung 10: Beispiele für Bewegungsrichtungen

#### 5.1.4. Fahrzeugsteuerung

Die Fahrzeugsteuerung übernimmt eine speicherprogrammierbare Steuerung der Firma WAGO. Durch diesen Rechner werden die Daten sämtlicher Sensoren eingelesen und verarbeitet. Als Ergebnis werden die Sollwerte der Aktoren entsprechend eingeregelt.

Die Sollwerte für die Steuerung der Mobilen Plattform erhält die SPS vom Navigationsrechner. Weiterhin werden die Signale der Bedienelemente eingelesen und verarbeitet.

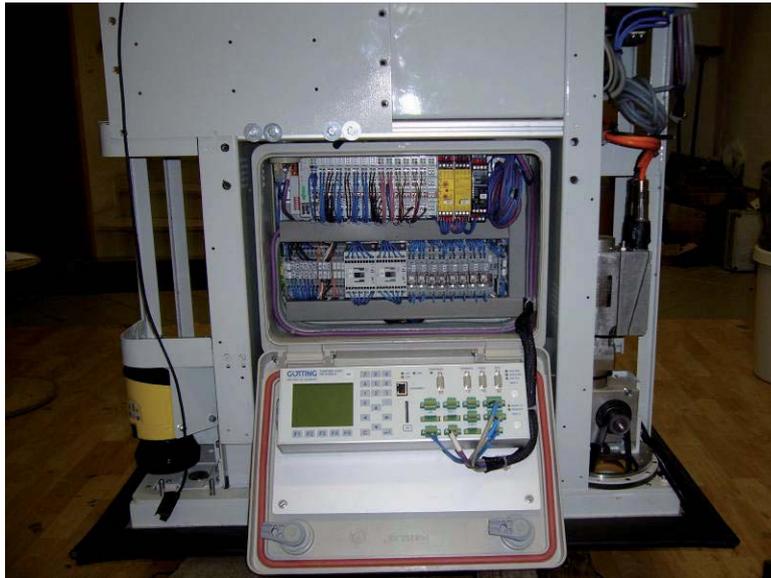
Für den Bergebetrieb bzw. Betrieb außerhalb der bekannten Umgebung wurde eine einfache Handbedienung integriert. Es sind folgende Bewegungen möglich:

- Geradeaus vorwärts/rückwärts
- Drehen auf der Stelle
- Lenken im Passgang  
(an beide Antriebe wird der gleiche Lenkwinkel eingestellt)



**Abbildung 11: Bedienelemente der Plattform**  
Foto: Götting KG

Auf komplizierte Fahrmanöver wurde im Handbetrieb bewusst verzichtet, da sonst bei falsch eingestellten Lenkwinkeln und Antriebsgeschwindigkeiten „selbstzerstörerische“ Wirkungen an den Antrieben auftreten können.



**Abbildung 12: Schaltkasten mit SPS und Sicherheitsschaltgeräten**  
**Foto: Götting KG**

Auch das Umschalten der Überwachungsfelder der beiden SICK-Laserscanner und die Reaktion auf eine eventuelle Verletzung der Warnfelder wird von der SPS übernommen.

Fehlermeldungen der einzelnen Hardwarekomponenten werden eingelesen und zur weiteren Verarbeitung an den Navigationsrechner gesendet.

#### **5.1.5. Ladekonzept für die Akkus**

Für die erforderliche Spannung von 24 V werden zwei Blei-Gel-Akkus à 12 V möglichst tief und mittig verbaut.

Es wird mit einem Durchschnittsverbrauch von 500 Watt ohne und 650 Watt mit PCs gerechnet. Daraus folgt, dass die Plattform pro Tag vier Stunden betrieben werden kann und die Akkus der PCs nicht über die Akkus der Plattform gespeist werden sollten.

Erst wenn einer der Laptops externe Energie benötigt, werden die Netzteile zum Laden eingeschaltet.

Durch dieses Vorgehen wird vermieden, dass LiSA eventuell mit leeren Akkus liegen bleibt, obwohl die PCs voll geladen sind.

Werden die Blei-Gel-Akkus am Netz geladen, sind auch die in die Plattform integrierten Netzteile der Laptops aktiv.

Andere Akkus (NiCd oder NiMH) mit vergleichbarer Lebensdauer und Kapazität sind nicht wesentlich leichter, teilweise sogar schwerer.

Optionale Ladekonzepte:

- **Austausch der Akkus:**  
Nach 4 Stunden werden die Akkus der Plattform und der Laptops ausgetauscht. Dies erfordert einen doppelten Akkusatz und konstruktive Maßnahmen zum schnellen Wechsel der Akkus. Damit ist ein 24-Stunden-Betrieb möglich.
- **Zwischenladung über Ladekontakte:**  
Dieses Konzept erfordert Ladekontakte an der Plattform und im Boden und auch geeignete kleinere Akkus. Als Folge ist eine reduzierte Lebenszeit der Batterien zu erwarten und es sind zum Laden längere Pausen zwischen den Aufträgen erforderlich.

#### **5.1.6. Allgemeines Gefahrenpotential**

Worin unterscheidet sich die mobile Plattform von den üblichen bisherigen Robotern und was sind die besonderen Gefahren?

- LiSA lernt ihre Umgebung selbst und sucht sich ihren Weg auch bei sich ändernden Umgebungen selbstständig. Damit kann LiSA an jeder beliebigen Stelle im freigegebenen Laborbereich auftauchen.
- Mit rund 200 kg Gewicht und den entsprechenden Abmaßen ist LiSA kein „Spielzeug“ und stellt ein ernsthaftes Gefährdungspotential dar.
- LiSA bewegt sich zusammen mit Labormitarbeitern in relativ engen Gängen.
- Mit 0,8 m/s (etwa 3 km/h) bewegt sich LiSA innerhalb eines Labors zwischen Menschen nicht gerade langsam. Bei mehr als 0,3 m/s gehen die Richtlinien der Berufsgenossenschaft von einem erhöhten Gefahrenpotential aus.
- Durch die enorme Beweglichkeit von LiSA sind ungewöhnliche Bewegungsabläufe möglich.
- LiSA durchfährt enge Türbereiche. Hier können Menschen eingeklemmt werden.
- LiSA fährt dicht an Tische heran. Hier können Schubladen geöffnet sein. Es muss also der gesamte Raum um das Fahrzeug abgesichert werden.
- LiSA ist relativ hoch und schmal und kann quer schnell fahren. Bei einer Notbremsung in Querfahrt oder schneller Kurvenfahrt könnte LiSA umkippen.
- LiSA transportiert Schalen, deren Inhalt ggf. gesundheitsschädlich sein kann.
- Der Roboterarm kann aus der abgesicherten Kontur herausragen.

Darüber hinaus ergeben sich Gefahren aus dem Handling des Roboterarms, die jedoch separat betrachtet werden.

#### **5.1.7. Zielsetzung sicherer Roboter**

Ein wesentlicher Aspekt von LiSA war es, einen Roboter zu bauen, der trotz relativ hoher Masse und Geschwindigkeit gefahrlos gemeinsam mit Menschen auf engem Raum interagieren kann. Dabei sollte LiSA die neuesten Sicherheitsanforderungen erfüllen.

Folgende Sicherheitseinrichtungen sind vorhanden:

- Zwei Not-Aus-Taster an zwei gegenüberliegenden Seiten der Plattform
- Schaltleisten an allen Fahrzeugseiten etwa 100 mm über dem Boden
- Zwei SICK-Laserscanner PLS S300 zur Überwachung von je zwei Fahrzeugseiten, Scanhöhe 150 mm:  
Eine Verletzung der Warnfelder führt zum Abbremsen, eine Verletzung der Schutzfelder zur Notbremsung. Die Felder werden geschwindigkeitsabhängig umgeschaltet. Bei Geschwindigkeiten unter 0,3 m/s deckt das Schutzfeld nur den Bereich der Schaltleisten ab, um einen Betrieb auf engstem Raum zu erlauben. Bei Verletzung des Schutzfeldes erfolgt die Notbremsung direkt und nicht über einen PC. Warnfeldauswertung und Geschwindigkeitsreduzierung erfolgt über die SPS.
- Vier Hokuyo Laserscanner zur Raumüberwachung:  
Werden Hindernisse im Fahrweg erkannt, erfolgt eine Geschwindigkeitsreduzierung bzw. eine Notbremsung über den Navigationsrechner.
- Watchdog für die Überwachung des Navigationsrechners:  
Antwortet der Navigationsrechner nicht, wird das Fahrzeug angehalten.
- Weitere Sensoren am Manipulator:  
Der Manipulator wird bei Gefahr sofort gestoppt.
- Es erfolgen weitere Überwachungen auf Defekte und Plausibilität:  
Je nach möglichem Gefährdungspotential wird eine Notbremsung, ein Stopp oder eine Meldung ausgelöst. Ein Endschalter überwacht die Ruheposition des Manipulators. Nur wenn sich der Greifarm in dieser Position befindet, darf gefahren werden.
- Optische Signalgeber (Blinker) für die Fahrtrichtungsanzeige

- Akustisches Warnsignal (Hupe)
- Weiterhin sind ein Stopp- und ein Start-Taster vorgesehen, um den Ablauf ohne Notbremsung im Bedarfsfall anzuhalten.

#### **Wie kann dies erreicht werden:**

- Ein wesentliches Merkmal von LiSA ist eine Schaltfläche rundum. Diese besteht aus einer „Schaumstoffhaut“, die mit Sensoren versehen ist. Diese „Haut“ umgibt LiSA fast vollständig. Sie verhindert ernsthafte Verletzungen, dämpft einen Aufprall, ermöglicht einem Menschen sich noch aus dem Gefahrenbereich zu entfernen und löst gleichzeitig eine Notbremsung aus.
- Zusätzlich sind bewährte Sicherheitskomponenten eingebaut. Zwei über Eck eingebaute Laserscanner als Personenschutz mit SIL2 nach EN61496-4. Damit wird LiSA rundum (360°) in etwa 150 mm Höhe überwacht. Gleichzeitig liefern diese Sensoren die Daten für die Orientierung von LiSA. Hiermit werden stehende oder liegende Personen erkannt und die Geschwindigkeit erst reduziert und dann eine Notbremsung ausgelöst.
- Rundum Schaltleisten mit 40 mm Schaltweg. Diese sind so ausgelegt, dass bei Geschwindigkeiten unter 0,3 m/s der Roboter zum Stehen kommt, ohne eine Person zu verletzen. Sicherheitskategorie: Typ 3 (DIN EN 12978)
- Vier weitere Laserscanner, an jeder Seite von LiSA, die schräg nach oben „blicken“. Hiermit sollen Hindernisse oberhalb des Personenschutzes (offene Schubladen und vorgestreckte Extremitäten) erkannt werden. Auch von diesen Sensoren werden räumliche Daten zur Navigation ermittelt.
- Durch eine möglichst breite Spur und einen tiefen Schwerpunkt, z. B. die tiefe Anordnung der Batterien, wird eine ausreichende Standsicherheit erreicht. Nach Abschluss der Konstruktion erfolgten erneut eine Schwerpunktberechnung und Kippversuche.
- Ein Fahren wird nur zugelassen, wenn sich der Roboterarm in Grundposition befindet.



**Abbildung 13: Laserscanner und Schaltleisten**  
Foto: Götting KG

### **Anmerkungen zur Konstruktion**

#### ▪ **Schutzfelder der Laserscanner und die Hauptfahrtrichtung**

Die Laserscanner als Personenschutzeinrichtung weisen üblicherweise keinen Winkeleingang auf und die Felder sind nur geschwindigkeitsabhängig zu schalten. Wegen der Beweglichkeit von LiSA hat dies zur Folge, dass die Felder in alle Richtungen gleich groß sein müssten. Auf Grund der schmalen Gänge sind damit höhere Geschwindigkeiten kaum möglich.

Lösung: Die Felder für 0,8 m/s werden über einen Eingang am Laserscanner nur dann freigegeben, wenn sich beide Antriebsräder in Hauptfahrtrichtung befinden (ca.  $\pm 5^\circ$ ). Damit können die Felder schmaler gehalten werden. Die volle Geschwindigkeit soll LiSA nur auf langen geraden Gängen fahren.

#### ▪ **Messgenauigkeit der Laserscanner**

Die Messgenauigkeit der Laserscanner wird mit etwa  $\pm 50$  mm angegeben. Dies führt bei Türdurchfahrten, dichtem Heranfahren an Tische und Geräte und in engen Gassen zu unnötigen Störungen durch Falschauslösungen oder einen ungenügend abgesicherten Bereich.

Lösung: In engen Bereichen werden die Schutzfelder so klein gewählt, dass es zu keinen Fehlauslösungen mehr kommt. Die Geschwindigkeit wird auf 0,3 m/s begrenzt und der Personenschutz wird durch die Schaltleisten übernommen. Vom Laserscanner wird nur das Warnfeld ausgewertet, um hierüber die Geschwindigkeit zu reduzieren.

- **Anhalteweg**

Um einen möglichst kleinen Anhalteweg realisieren zu können, sind verhältnismäßig starke Bremsen eingebaut. Dies ermöglicht kleine Schutzfelder und damit auch höhere Geschwindigkeiten in engen Bereichen.

- **Weitere Sicherheitskomponenten**

Zusätzlich erhält LiSA noch zwei Not-Aus-Taster, optische Fahrtrichtungsanzeiger bzw. optische Signalgeber, akustische Signalgeber sowie Start- und Stopptaster. Zum Bergen bei Störungen oder in unklaren/unsicheren Situationen gibt es eine einfache Handbedienung.

## 5.2. Navigation

In diesem Kapitel werden die Themen beschrieben, deren Zusammenspiel die autonome Navigation des LiSA-Roboters in einer bekannten Umgebung ermöglichen. Es gibt drei klassische Teildisziplinen der Navigation: Lokalisierung, Hindernisvermeidung und Pfadplanung. Die Lokalisierung versucht, anhand von Sensordaten die Position des Roboters in dem a priori bekannten Umgebungsmodell zu finden. Es ist anschaulich klar, dass der LiSA-Roboter nur dann sinnvoll agieren kann, wenn er weiß, wo er sich befindet. Die zweite Disziplin ist die Hindernisvermeidung. Diese übernimmt die lokale Bewegungsplanung des Roboters, um anhand der Sensordaten Kollisionen mit Objekten im Roboterumfeld zu vermeiden. Die dritte Disziplin ist die Pfadplanung. Diese übernimmt die globale Bewegungsplanung des Roboters in der bekannten Umgebung. Sie bestimmt anhand des Umgebungsmodells den Pfad, über den der Roboter von Punkt A nach Punkt B gelangt. Im Rahmen des LiSA-Projekts wurde mit dem Wavefront Algorithmus [11, Kap.8.2.3] ein Standard-Pfadplaner eingesetzt, der folglich hier nicht näher beschrieben wird.

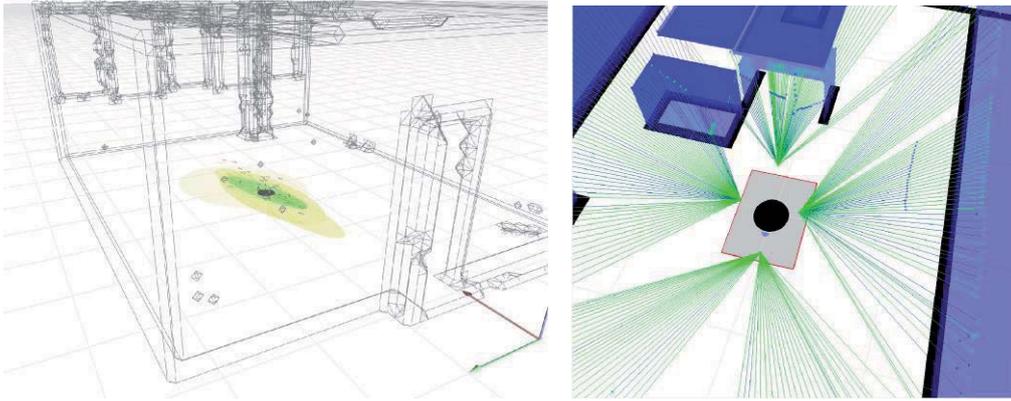
Zusätzlich zu diesen Verfahren wird bei der autonomen Navigation des LiSA-Roboters ein Zonenkonzept verwendet, das Semantik in der Umgebung des Roboters verankert. Das ist notwendig, um spezielle Fahrmanöver in Tür- bzw. Zielbereichen durchzuführen. Die folgenden Unterabschnitte behandeln folglich Lokalisierung, Hindernisvermeidung und das Zonenkonzept. Außer diesen Themen ist die omnidirektionale Kinematik des LiSA-Roboters relevant für die Navigation. Sie ist im vorangehenden Abschnitt zur Roboterplattform beschrieben. Im Kontext der Arbeiten

zur Navigation wurde ein mathematisches Modell dieser Kinematik formuliert, welches die Kinematik auf eine Fahrrad-Kinematik mit zwei Freiheitsgraden zurückführt. Anhand dieses Modells werden für Kombinationen aus Bewegungsrichtung, Bewegungsgeschwindigkeit, Rotationsrichtung und Rotationsgeschwindigkeit die entsprechenden Radstellungen und Geschwindigkeiten bestimmt. Diese wiederum bilden die Schnittstelle zur SPS des Roboters, die die Regelung auf die vorgegebenen Geschwindigkeiten übernimmt. Details dieses Kinematikmodells sollen hier jedoch nicht dargestellt werden. Eine ausführliche Darstellung dieses Punktes wie der anderen in diesem Abschnitt angesprochenen gibt [14].

Sämtliche Implementierungen zur Navigation des LiSA-Roboters wurden in dem Framework Player [10] durchgeführt. Ferner wurde die Simulationsumgebung USARSim [15] verwendet, in der die mobile Basis des LiSA-Roboters simuliert wurde (inklusive Kinematik und Sensorik).

### **5.2.1. Lokalisierung**

Lokalisierung beschreibt in der mobilen Robotik das Problem für den Roboter, den Ort zu bestimmen, an dem er sich befindet, also seine Position in einem festen, globalen Koordinatensystem. Der LiSA-Roboter geht von einem bekannten Umgebungsmodell aus, das sich jedoch während des Betriebs ändern darf. Somit muss kein Kartierungsproblem (bzw. kombiniertes Lokalisierungs- und Kartierungsproblem, engl. SLAM [12, Kap.37]) sondern nur ein Lokalisierungsproblem gelöst werden. Das zur Lokalisierung benötigte Umgebungsmodell wurde im Vorfeld des Einsatzes des LiSA-Roboters erstellt. Hierzu wurden die Einsatzorte an der Universität Osnabrück, beim Fraunhofer IFF und bei der KeyNeurotek AG dreidimensional kartiert, und ein polygonales Umgebungsmodell wurde erstellt.



**Abbildung 14: Lokalisierung mit 3D-Sensordaten unter Verwendung eines 3D-Umgebungsmodells und eines effizienten 3D-Ray-Tracing-Verfahrens.**

Der LiSA-Roboter verwendet ein Monte-Carlo-Verfahren (Partikelfilter [12, Kap.4]) zur Lokalisierung. Das sind probabilistische Verfahren nach Stand der Technik, welche die unvermeidlichen Unsicherheiten in den Sensordaten berücksichtigen. Sie sind selbst bei fehlender Initialposition in der Lage, den Roboter global in der Karte zu lokalisieren. Die verwendete Implementierung war bereits im Player Framework vorhanden. Sie verarbeitet jedoch nur 2D-Sensordaten. Da im Projekt LiSA ein Schwerpunkt auf der sicheren Mensch-Roboter-Interaktion liegt, benutzt der LiSA-Roboter eine 3D-Sensorkonfiguration. Um die daraus resultierende reichere Umgebungsinformation der Sensordaten nutzen zu können, wurde ein effizientes Verfahren entwickelt, das die Monte-Carlo-Lokalisierung mit 3D-Sensordaten kombiniert.

Eine der größten Schwierigkeiten beim Arbeiten mit 3D-Daten in der Robotik ist die Rechenkomplexität in Kombination mit der Forderung, den Roboter in Echtzeit zu steuern. Diese Schwierigkeit wurde in der entwickelten Implementierung durch Verwendung eines BSP-Baums (*Binary Space Partition Tree* [9, 14]) zur Repräsentation des 3D-Umgebungsmodells gelöst. Diese effiziente Datenstruktur ermöglicht es, den zur Lokalisierung benötigten Abgleich der Sensordaten mit einem 3D-Umgebungsmodell ebenso effizient durchzuführen wie vergleichbare Verfahren in 2D. Da dieser Abgleich unabhängig vom verwendeten Lokalisierungsverfahren ist, liefert das entwickelte Verfahren einen Beitrag, um beliebige 2D-Lokalisierungsverfahren auf 3D zu erweitern.

### 5.2.2. Hindernisvermeidung

Hindernisvermeidung [12, Kap.35] bezeichnet die zielgerichtete, lokale Bewegungsplanung des Roboters, um Kollisionen mit statischen und dynamischen Hindernissen in seiner Umgebung zu vermeiden. Anhand von Sensordaten wird die optimale Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Roboters ermittelt. Unterschiedliche Verfahren lassen sich danach beurteilen, ob sie rein geometrisch sind, die Kinematik und/oder die Dynamik des Systems berücksichtigen. Es gibt Ansätze, die Hindernisvermeidung als inkrementelle Pfadplanung oder Pfaddeformierung zu realisieren. Diese Verfahren sind Kombinationen aus lokaler und globaler Pfadplanung, die inkrementell neue Umgebungsinformationen in die globale Pfadplanung integrieren. Dagegen berechnen lokale Verfahren die optimale Kombination aus Translations- und Rotationsgeschwindigkeit auf Grundlage der aktuellen Sensordaten und einer bekannten Zielpose („Pose“ umschreibt die Position und Ausrichtung des Roboters).

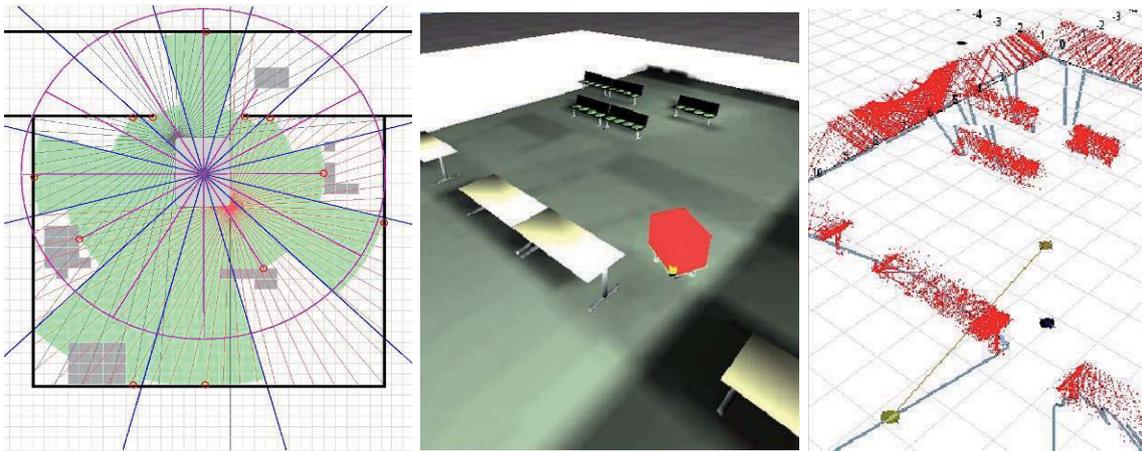
In unstrukturierten, dynamischen Umgebungen reicht es nicht aus, Hindernisvermeidung ausschließlich auf eine horizontale Ebene, etwa die Messebene eines Laserscanners, zu beziehen. So liegen zum Beispiel Tischkanten außerhalb der üblichen Abtastebene von 2D-Hindernisvermeidung und werden folglich nicht erkannt. Des Weiteren bilden Objekte wie die Sitzfläche eines Stuhls oder eine ausgezogene Schublade gefährliche, da für den Roboter in 2D im Normalfall unsichtbare Hindernisse.

Es gibt grundsätzlich zwei Herangehensweisen, Hindernisvermeidung in allen drei Dimensionen über den gesamten Roboterkörper sicherzustellen: Zum einen werden Verfahren verwendet, die im dreidimensionalen Raum rechnen und für den Roboter beliebige Bewegungen eines starren Körpers im 3D-Raum zulassen, seine Posen also sechsdimensional beschreiben (drei Translations-, drei Rotations-Freiheitsgrade). Problematisch bei dieser Klasse von Hindernisvermeidungsalgorithmen ist die Rechenkomplexität, die durch die Berücksichtigung aller drei Raumdimensionen bzw. aller sechs Posedimensionen entsteht. Da die Bewegung des LiSA-Roboters auf die Bewegung in der Ebene beschränkt ist (mit drei Posedimensionen: Translation auf der Ebene und Rotation um die Vertikalachse), wird ein anderer Ansatz (*Virtual Range Scans*, VRS [13]) verwendet, der die dreidimensionale Information der

Umgebung in einem virtuellen zweidimensionalen Datensatz kodiert. Dieser virtuelle Datensatz wird als Eingabe für klassische 2D-Hindernisvermeidungsalgorithmen verwendet.

Voraussetzung für 3D-Hindernisvermeidung ist eine Sensorkonfiguration, die die gesamte umschließende Hülle des Roboters abdeckt. Die Fusion mehrerer Sensoren ist notwendig, da ein einzelner Sensor nicht in der Lage ist, die Umgebung des LiSA-Roboters in allen drei Dimensionen über die gesamte Roboterhülle zu erfassen. Dies wird beim LiSA-Roboter durch eine Sensorkonfiguration von sechs Laserscannern erreicht. Im Folgenden wird das Verfahren VRS vorgestellt, das beliebig viele Abstandssensoren in einem virtuellen zweidimensionalen Datensatz fusioniert. Das Verfahren verwendet ein Hindernisgedächtnis und berücksichtigt zusätzlich Dynamik in der Umgebung des Roboters.

Grundidee in VRS ist es, Daten beliebig vieler unterschiedlicher Abstandssensoren, die in beliebiger Pose am Roboter angebracht sind, in einem virtuellen 2D-Datensatz zu kodieren. Zur Bestimmung der Abstandswerte des VRS wird für jeden der realen Abstandssensoren, die im VRS fusioniert werden, eine Rotationsmatrix spezifiziert, die die Orientierung des Sensors im Roboterkoordinatensystem definiert. Zusammen mit dem Versatz des Sensors zu dessen Ursprung lassen sich über diese Matrix die Sensordaten vom Sensorkoordinatensystem auf 3D-Punkte im Roboterkoordinatensystem abbilden. Das ist die einzige Voraussetzung für die Sensordaten, die mit dem VRS-Konzept integriert werden. Somit lassen sich alle Sensoren, deren Daten sich auf Punkte im dreidimensionalen Raum abbilden lassen, nahtlos mit dem VRS integrieren. Um die ermittelten 3D-Punkte in einem 2D-Datensatz kodieren zu können, werden sie auf die horizontale Ebene projiziert, auf der sich der LiSA-Roboter bewegt (Fußbodenebene). Diese Ebene wird ausgehend vom Ursprung des roboterzentrischen Koordinatensystems in polare Segmente aufgeteilt, deren Winkel die Auflösung des VRS definiert. Nun werden für jedes Segment alle Hindernispunkte betrachtet, die in dieses Segment projiziert werden. Der Abstandswert des virtuellen Laserscanners für das polare Segment bestimmt sich durch den minimalen euklidischen Abstand aller Hindernispunkte vom Ursprung. Es wird der minimale Abstand aller Hindernispunkte verwendet, damit immer das dichteste Hindernis und somit dasjenige mit dem größten Gefahrenpotenzial im VRS abgebildet ist.



**Abbildung 15: Links: Schematische Darstellung des VRS-Verfahrens [13]; Erklärung im Text. Mitte und Rechts: Experiment zur 3D-Hindernisvermeidung in der Simulationsumgebung USARSim: Einzig aufgrund der wahrgenommenen 3D-Messpunkte (rot) steuert die Hindernisvermeidung den LiSA-Roboter um den Tisch herum, von dem im 2D-Schnitt nur die Beine sichtbar sind.**

Ein Problem vieler Sensorkonfigurationen (einschließlich der des LiSA-Roboters) bei der Hindernisvermeidung ist, dass Hindernisse oft nur kurzzeitig in den Sensordaten auftauchen, da viele Abstandssensoren nur in einer Ebene (Laserscanner) oder gar in einer einzigen Richtung messen. Aus diesem Grund wurde das VRS-Verfahren auf dem LiSA-Roboter mit einem „Hindernisgedächtnis“ ausgestattet, das protokolliert, wo Hindernisse im Arbeitsumfeld des Roboters detektiert wurden. Realisiert wird das Hindernisgedächtnis durch eine 2D-Rasterkarte, in welche die projizierten 3D-Hindernispunkte anhand der aktuellen Roboterpose eingetragen werden. Um VRS mit integriertem Hindernisgedächtnis zu verwenden, werden zunächst alle Hindernispunkte der direkt integrierten Abstandssensoren auf die polaren VRS-Segmente abgebildet. Zusätzlich wird, wie in Abbildung 15 (links) zu sehen, für jedes polare Segment (blau) ein Raytracing-Verfahren (magenta) auf der Rasterkarte angewendet. Dieses bestimmt mit Hilfe des Bresenham-Algorithmus ausgehend von der aktuellen Roboterpose die Entfernung des ersten belegten Rasters für das jeweilige polare Segment. Da die Hinderniskarte die Information über Hindernisse im 3D-Umfeld des Roboters enthält, führt dieses Verfahren dazu, dass der zweidimensionale VRS-Datensatz die 3D-Information über Hindernisse im Umfeld des LiSA-Roboters abbildet.

Das Verwenden einer globalen Hinderniskarte führt zu mehreren neuen Problemen, die gelöst werden müssen. Das schwerwiegendste ist, wie mit belegten Rasterzellen

der Rasterkarte umgegangen wird und wann diese wieder freigegeben werden. Werden belegte Zellen für immer als belegt angenommen, führt dies dazu, dass Zellen, die früher durch Sensorfehlmessungen oder durch ungenaue Lokalisierung als belegt markiert werden, in der Umgebung des Roboters als blockiert in den VRS-Daten auftauchen, obwohl sie tatsächlich frei sind und nie belegt waren. Werden belegte Rasterzellen hingegen sofort wieder freigegeben, nachdem sie außerhalb des Sichtfeldes der Sensoren sind, geht die Funktion der Rasterkarte als „Gedächtnis“ verloren.

Um dieses Problem zu lösen, wird die Zahl der in die Hinderniskarte integrierten 3D-Punkte minimiert, indem die Relevanz der Punkte für die Hindernisvermeidung betrachtet wird. Dies wird über unterschiedliche Filter realisiert:

- 3D-Hindernispunkte werden nur in die Rasterkarte übernommen, wenn sie eine geringere Entfernung zum Roboter haben als die Daten der direkt integrierten Abstandssensoren im entsprechenden polaren Segment.
- Es werden ausschließlich 3D-Hindernispunkte berücksichtigt, deren Entfernung zum Roboter unter einem definierten Schwellwert liegt.
- Die Höhe eines 3D-Hindernispunktes muss geringer als die Höhe des Roboters sein, um berücksichtigt zu werden.
- Punkte, die zu dynamischen Objekten gehören, werden nicht in die Hinderniskarte eingetragen.

Der letzte Filter ist wichtig, da Menschen im Umfeld des Roboters diesen sonst blockieren könnten, denn der LiSA-Roboter würde jede Trajektorie eines vorbeigehenden Menschen in sein Hindernisgedächtnis integrieren. Der Filter für dynamische Hindernisse wird mit einer Bewegungsdetektion aus Laserscannerdaten basierend auf einem Kalman-Filter nach Stand der Technik realisiert.

Es konnte in Experimenten gezeigt werden, dass der LiSA-Roboter durch das VRS-Verfahren in Verbindung mit klassischen 2D-Hindernisvermeidungsverfahren wie *Vector Field Histogram* oder *Nearness Diagram* in der Lage ist, sicher allen Hindernissen in seinem 3D-Umfeld auszuweichen.

### 5.2.3. Zonenbasiertes Fahrverhalten

Im Projekt LiSA wurde ein zonenbasiertes Verfahren verwendet, um dem Roboter zu ermöglichen, die aktuelle Umgebungssituation zu erkennen und seine lokalen Bewegungen danach zu modifizieren. Dieses Verfahren verwendet Polygone, denen unterschiedliche Kategorien zugeordnet werden, welche die Situation charakterisieren, wenn sich der Roboter in dem entsprechenden Gebiet befindet. Im LiSA-Projekt sind diese Zonen statisch und werden manuell definiert.

Das Zonenkonzept verschiebt das Problem der Perzeption der Umgebungssituationen auf das Problem der Selbstlokalisierung des Roboters: Objekte in der Umgebung des Roboters müssen nicht anhand der Sensordaten identifiziert werden, und der semantische Kontext des Roboters muss nicht auf die identifizierten Objekte zurückgeführt werden. Zum Beispiel muss der Roboter nicht erkennen, dass er sich in der Nähe eines Türdurchgangs befindet, sondern er muss sich in einer Position auf der Fußbodenebene lokalisieren (mit der üblichen kleinen Lokalisierungs-Ungenauigkeit) und entnimmt dann seiner Karte, dass diese Position in einer Türzone liegt. Mit Hilfe des Zonenkonzepts wurden spezielle Türdurchfahrts- bzw. Zielmanöver realisiert. Ferner können verbotene Bereiche festgelegt werden, in die der Roboter nicht hineinfahren darf. Im Folgenden werden das Türdurchfahrtsverhalten und das Verhalten im Bereich einer Übergabestation beispielhaft beschrieben; weiter beschreiben wir die Behandlung verbotener Bereiche.

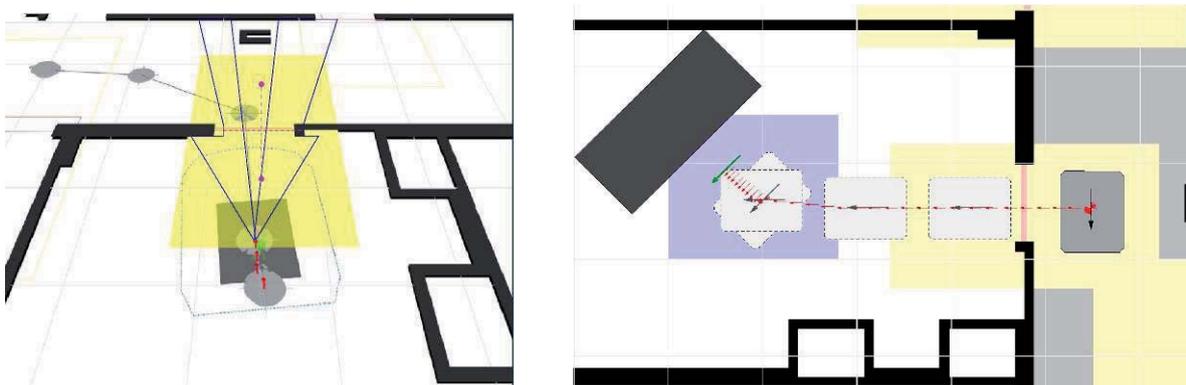


Abbildung 16: Spezielle Tür- bzw. Zielmanöver können durch Verankerung von Semantik in der Umgebung erreicht werden. Türzonen sind gelb markiert, Zielzonen blau. Weitere Erklärungen im Text.

**Türdurchfahrtsverhalten.** Ein spezielles Fahrverhalten zum Durchfahren einer Tür ist notwendig, da der LiSA-Roboter mit einer Breite von 60 cm bei einer Türbreite von 75 cm nur einen Sicherheitsabstand von maximal 7,5 cm zu beiden Seiten des Tür-

rahmens hat. Untersuchungen in der Simulationsumgebung wie mit dem realen Roboter haben ergeben, dass dieser minimale Sicherheitsabstand bei einfacher Anwendung der klassischen Hindernisvermeidungsverfahren (VFH und ND) zum Verkanten des LiSA-Roboters in der Tür bzw. zu einem oszillierendem Fahrverhalten im Türbereich führen kann. Das daraus resultierende Blockieren des Türdurchgangs ist aus Sicherheitsgründen nicht zu tolerieren, abgesehen davon, dass in dem Fall die Erfüllung des entsprechenden Transportauftrags für den LiSA-Roboter gefährdet ist.

Um eine sichere Türdurchfahrt zu gewährleisten, wird der LiSA-Roboter zunächst senkrecht zur Tür ausgerichtet und anschließend sicher durch diese geführt. Hierzu wird jede Tür in der Karte mit einer Türrahmenregion markiert; ferner wird ein Bereich von etwa 2 m um die Tür herum als Türregion definiert. Fährt der Roboter in eine solche Türregion hinein, wird zunächst geprüft, ob der verbleibende Pfad die zu der Türregion gehörenden Türrahmenregion schneidet. Ist dies der Fall, wird ein spezielles Türdurchfahrtverhalten gestartet. Dieses berechnet anhand der aktuellen Roboterpose und der Türrahmenregion die Koordinaten der rechten bzw. linken Seite des Türrahmens. Die ermittelte Position wird anhand der Laserdaten geprüft und gegebenenfalls aktualisiert. In der Mitte zwischen den Türrahmenkoordinaten wird eine Senkrechte auf die Türöffnung definiert. Auf dieser Senkrechten werden zwei Punkte im Abstand von 0,8m zum Türrahmen bestimmt. Diese Positionen bilden die Ausrichtungsposition des Roboters, die er einnimmt, um sich senkrecht vor der Tür zu positionieren, und den Zielpunkt, den der Roboter anfahren soll, nachdem er sich ausgerichtet hat. Die Orientierung, die der Roboter in beiden Positionen hat, ist senkrecht zur Türöffnung. Durch Anfahren der direkt vor dem Roboter liegenden Zielpose gelangt er sicher durch die Tür. Wird die Zielpose erreicht, wird das Türdurchfahrtverhalten beendet und die Kontrolle wieder an das Pfadfolgemodul übergeben.

**Verhalten im Bereich einer Übergabestation.** Ein spezielles Fahrverhalten zum Anfahren einer Arbeits- bzw. Übergabestation ist notwendig, da der befahrbare Bereich dort in aller Regel beengt ist. Zum einen muss der Roboter relativ dicht an der Arbeitsstation stehen, da die Manipulationsreichweite begrenzt ist. Das schließt eine Orientierungsausrichtung in der Zielposition aus, da der Roboter nicht genug Platz

hat, um auf der Stelle zu drehen: Folglich muss er sich der Arbeitsstation in der Ziel-ausrichtung durch reine Translationsbewegung nähern.

Um dieses Fahrverhalten zu erreichen, wird um jede Arbeitsstation eine Zielzone definiert. Das spezielle Zielfahrverhalten wird angestoßen, wenn der Roboter in eine solche Zielzone eintritt und der aktuelle Pfad in dieser Zielzone endet. Abbildung 16 (rechts) zeigt die verschiedenen Schritte des Anfahrens der Arbeitsstation. Der Roboter tritt in die Zielzone ein. Da sich die durch den grünen Pfeil symbolisierte Zielpose innerhalb der Zielzone befindet, wird das Zielfahrverhalten gestartet. Es wird eine Zwischenzielpose berechnet, die dieselbe Orientierung wie die Zielpose hat, jedoch weit genug von der Arbeitsstation entfernt ist, um sich in die Orientierung der Zielpose drehen zu können. Nachdem sich der Roboter zur Zielpose ausgerichtet hat, fährt er die Arbeitsstation parallel an. Das ist möglich durch die omnidirektionale Kinematik des LiSA-Roboters. Hat der Roboter die Zielpose erreicht, ist der Navigationsauftrag beendet und er beginnt mit der Manipulation an der Arbeitsstation. Hat er nach Ende der Manipulation einen neuen Fahrauftrag, fährt der Roboter erneut parallel die Zwischenzielposition an, um genügend Platz für eine Orientierungsänderung zu haben. Danach richtet er sich zum Pfad aus, und die Kontrolle wird wieder an das Pfadfolgemodul übergeben.

**Verbotene Bereiche.** Der LiSA-Roboter ist in seinem Arbeitsumfeld einer Reihe von Gefahren ausgesetzt, die an bestimmte Raumregionen gebunden sind. Zu diesen Objekten gehören z. B. Türen. So stellt eine geschlossene Tür eine potenzielle Gefahr dar, da der Roboter einer sich plötzlich öffnenden Tür möglicherweise nicht ausweichen kann. Neben Türen bilden absteigende Treppen eine Gefahr für den LiSA-Roboter, da die verwendete Sensorkonfiguration nicht dafür eingerichtet ist, unter der Scanebene der SICK-Laserscanner liegende Hindernisse oder Abstürze wahrzunehmen (vgl. Kapitel 5.1). Absteigende Treppen sind zwar im definierten Anwendungsszenario des Projekts LiSA ausgeschlossen; dennoch ist zu erwarten, dass sich Treppen oder flache Hindernisse in zukünftigen Szenarien im Arbeitsumfeld des Roboters befinden. Aus diesem Grund werden sie ebenfalls behandelt.

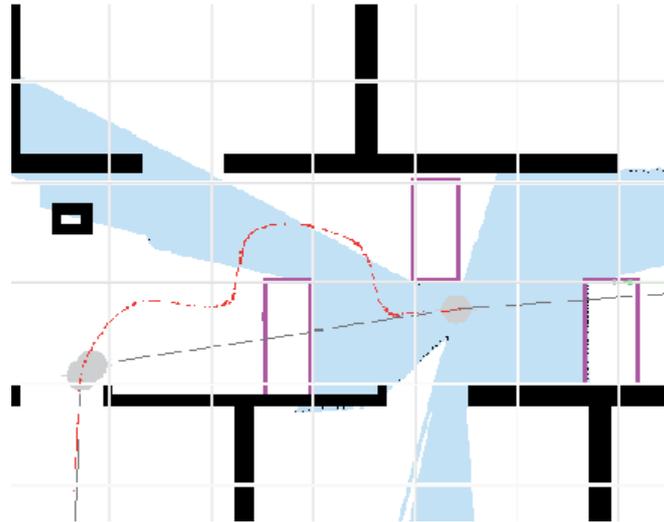
Um zu vermeiden, dass ein Roboter in einen als gefährlich eingestuften Bereich hineinfährt, muss er diese Bereiche zunächst identifizieren. Dies kann entweder

direkt geschehen, indem in den Sensordaten nach Merkmalen gesucht wird, die den Gefahrenbereich identifizieren; zum Beispiel können Türen in Kamera- oder Laserscannerdaten erkannt werden. Im realisierten Ansatz werden die Gefährdungsbereiche wiederum manuell durch Zonen entsprechender Klasse markiert. Potenziell problematisch an diesem Ansatz ist, dass das Wahrnehmen der Gefahrenbereiche mit der Unsicherheit der Lokalisierung behaftet ist. (Derselbe Effekt tritt bei der beschriebenen Erkennung von Türdurchfahrt- und Zielregionen auf; dort ist er jedoch weniger kritisch, da nicht so unmittelbar sicherheitsrelevant.) Dies schließt bei falscher Selbstlokalisierung des Roboters nicht aus, dass der Roboter z. B. in den Bereich einer absteigenden Treppe fährt. Auf der anderen Seite ist es jedoch oft aufgrund der Sensorkonfiguration oder der Beschaffenheit der Gefahrenbereiche nicht möglich, diese zuverlässig in den Sensordaten zu identifizieren, sodass die Sicherheit von Lokalisierungsverfahren nach Stand der Technik eine mindestens ebenso hohe Sicherheit erwarten lässt. Langfristig bietet sich hier an, aus Sicherheitsgründen sowohl ein Zonenkonzept als auch eine direkte Erkennung von Gefahrensituationen einzusetzen.

Die Gefahrenzonen lassen sich wiederum mit Hilfe des VRS-Konzepts in der Robotersteuerung berücksichtigen. Dazu werden die Gefahrenbereiche direkt in den Hindernisvermeidungsprozess integriert. Hierzu werden sie in die Rasterkarte eingefügt, die beim VRS-Verfahren als Hindernisgedächtnis dient. Die Gefahrenbereiche werden durch das Ray-Tracing-Verfahren auf der Hinderniskarte parallel zu den andern Sensoren in den VRS-Datensatz integriert. Dadurch sind die Gefahrenbereiche als virtuelle Hindernisse in den VRS-Daten vorhanden. Der Alterungsprozess, der auf der Hinderniskarte läuft, wird auf die Gefahrenbereiche nicht angewendet. Sie werden somit als statisch klassifiziert und automatisch in die globale Pfadplanung integriert.

Abbildung 17 zeigt das Ergebnis eines Experiments zur Vermeidung der Gefahrenbereiche. Die Abbildung zeigt den VRS-Datensatz (blau), der die Laserscanner integriert. Neben den Laserscannern werden die Gefahrenbereiche (magenta) über die Hinderniskarte des VRS integriert und sind somit im VRS-Datensatz als virtuelle Hindernisse vorhanden. Obwohl der globale Pfad (graue Linie) den Gefahrenbereich kreuzt, navigiert das Hindernisvermeidungsmodul, welches den VRS-

Datensatz verwendet, den Roboter darum herum (roter Pfad). Die Übernahme der Gefahrenbereiche in den globalen Pfadplaner wurde bei diesem Experiment abgeschaltet, um die lokale Pfadanpassung an die Gefahrenbereiche zu verdeutlichen.



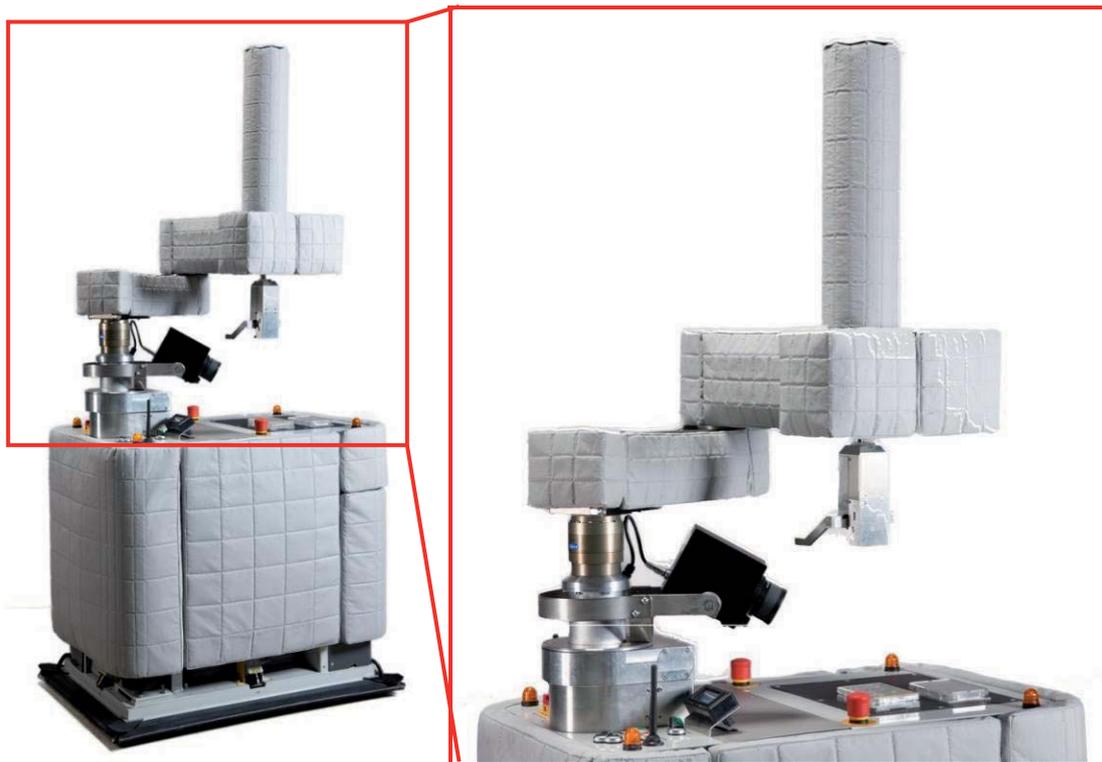
**Abbildung 17: Integration von verbotenen Zonen (magenta) in die Navigation des LiSA-Roboters. Erklärung im Text.**

### 5.3. Manipulator

Die Entwicklung eines mobilen Manipulators (Abbildung 18) war ebenso wie die Entwicklung der mobilen Plattform integraler Bestandteil des LiSA-Projektes. Seine Auslegung orientierte sich primär an den Einsatzbedingungen auf der mobilen Plattform. Daraus ergeben sich vor allem Forderungen hinsichtlich Gewicht und Energieaufnahme.

Obwohl im Rahmen des LiSA-Projektes zunächst nur Handhabungsobjekte mit geringer Masse verwendet werden sollten, wurde der Manipulator von Beginn an zukunftssicher für Handhabungsgewichte bis ca. 5 kg ausgelegt.

So kann der Manipulator auch in Szenarien eingesetzt werden, die über das im Rahmen des LiSA-Projektes propagierte Szenario hinaus gehen.



**Abbildung 18: Manipulator des LiSA-Roboters**  
Fotos: B. Liebl/Fraunhofer IFF

Neben den bereits erwähnten Forderungen, die aus dem mobilen Einsatz des Manipulators resultieren, ergaben sich weitergehende Forderungen, die den Arbeitsbereich, das Greifersystem, Systeme zur Objekterkennung, aber auch im großen Maße Sicherheitsaspekte umfassten.

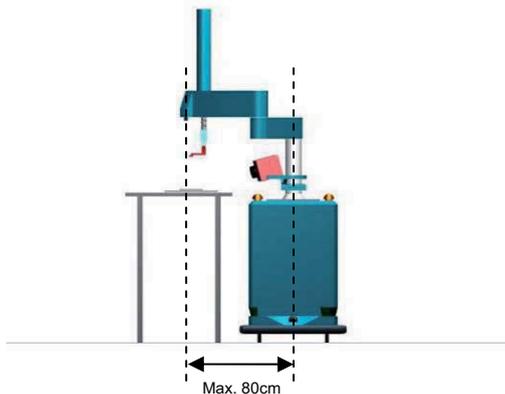
### **5.3.1. Anforderungen an den mobilen Manipulator**

Die notwendige Reichweite und die Achskonfiguration des Manipulators ergeben sich aus den geometrischen Gegebenheiten der mobilen Plattform, der Strategie beim Positionieren der mobilen Plattform an den Übergabestationen sowie den geometrischen Gegebenheiten der Übergabestationen. Im Rahmen des LiSA-Projektes wurden verschiedene Tisch- und Geräteübergabestationen definiert, an denen der LiSA-Roboter mit seinem Manipulator Handlungsaufgaben ausführen soll.

Tischübergabestationen stellen eine horizontale, räumlich begrenzte Fläche dar, innerhalb deren Begrenzung ein Handlingobjekt frei abgelegt werden kann. Auch die Geräteübergabestationen sind stets horizontal angeordnet, erfordern jedoch in der Regel einen Formschluss zwischen Handlingobjekt und Übergabestation. Die Höhe

der Übergabestationen beträgt 80 bis 100 cm. Alle Übergabestationen sind von mehreren Seiten zugänglich.

Die aus den geometrischen Gegebenheiten abgeleitete, maximal notwendige horizontale Reichweite des Manipulators beträgt 80 cm (Abbildung 19). Der erforderliche Bewegungsspielraum in vertikaler Richtung wurde auf 30 cm festgelegt.



**Abbildung 19: LiSA an einer Tischübergabestation - Abschätzung der notwendigen Reichweite**



**Abbildung 20: Typische Handlingobjekte  
Foto: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF**

Abbildung 20 zeigt die für das LiSA-Projekt relevanten Handlingobjekte, mit den Standardabmessungen von 128 x 85 x 22 mm und einem maximalen Gewicht von 200 g. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, soll eine zukunftssichere, konstruktive Auslegung des Manipulators erfolgen, sodass die Handhabung von Objekten bis 5 kg prinzipiell möglich ist.

Die Fähigkeit derartige Objekte zu handhaben, hängt jedoch neben der Auslegung des Roboterarmes auch vom eingesetzten Greifer ab. Im Rahmen des LiSA-Projektes sollte zunächst ein auf die relevanten Handhabungsobjekte abgestimmter Greifer zum Einsatz kommen, wodurch die maximale Handhabungskapazität entsprechend begrenzt wird.

Im Hinblick auf den mobilen Einsatz kommt dem Gewicht und der Stromaufnahme des Manipulators eine wichtige Rolle zu. Da sowohl die Stromaufnahme als auch das Gewicht des Manipulators direkten Einfluss auf die Standzeit der Akkumulatoren der mobilen Plattform haben, sollten beide Parameter möglichst niedrig gehalten werden. Das Gesamtgewicht des Manipulators wurde daher während der Konzeptionsphase auf ca. 20 kg beschränkt. Die Stromaufnahme des Manipulators wurde bei einer gegebenen Versorgungsspannung von 24 V auf 20 A limitiert. Die maximale Leistungsaufnahme des Manipulators sollte somit ca. 500 W nicht überschreiten.

Als weitere konstruktive Forderung sollte die Integrierbarkeit von Kamerasystemen zur Objekterkennung und Überwachung des Greifprozesses gegeben sein.

### 5.3.2. Stand der Technik und Motivation

Die Anforderungen an Roboterarme für den mobilen Einsatz unterscheiden sich grundlegend von Systemen für den stationären Einsatz. Zwar ist man bei einem mobilen Robotersystem in der Regel auch an präzisen, wiederholgenauen Bewegungen interessiert, systembedingt unterliegt man bei der Auswahl geeigneter Komponenten jedoch gewissen Zwängen, die - wie bereits dargelegt - besonders aus dem zulässigen Gewicht und der Energieaufnahme des Roboterarmes resultieren. Unter dieser Maßgabe scheidet die Mehrzahl der industriellen Robotersysteme bereits aus.

Zu Projektbeginn existierten drei Robotersysteme, die für den Einsatz auf einer mobilen Plattform geeignet erschienen. Der KUKA LBR (Abbildung 21) stellt dabei das fortschrittlichste der dargestellten Robotersysteme dar. Ausgestattet mit umfangreich instrumentierten Gelenken, ist der Roboter in der Lage auf ihn einwirkende Momente zu erfassen und als Steuerimpulse zu interpretieren. Diese einzigartige Fähigkeit wird durch einen sehr hohen Hardwareaufwand erzielt und spiegelt sich dementsprechend auch in den Anschaffungskosten wieder. Ein vergleichsweise großer Steuerschrank würde viel Bauraum auf der mobilen Plattform beanspruchen.



Abbildung 21: KUKA LBR  
Foto: KUKA AG



Abbildung 22: Katana  
Foto: Neuronics AG

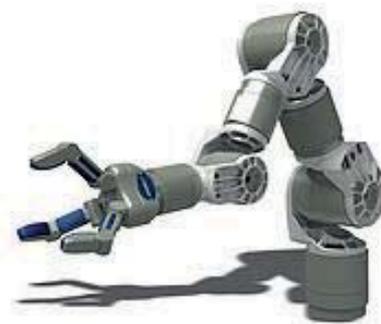


Abbildung 23: SCHUNK LBR  
Foto: SCHUNK GmbH & Co. KG

Der Katana-Roboter (Abbildung 22) ist bereits zertifiziert und damit für die direkte Interaktion mit dem Menschen zugelassen. Möglich wird dies durch geringe Interaktionskräfte von maximal 4 N. Die maximale Nutzlast des Roboters beträgt 400 g und wäre somit für das LiSA Szenario ausreichend. Die Steuerelektronik des

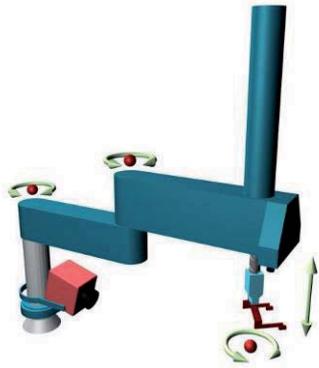
Roboters lässt sich platzsparend in den Fuß des Roboters integrieren. Der Arbeitsraum ist jedoch auf ca. 500 mm beschränkt, sodass die Anforderungen an den Arbeitsraum im Rahmen des LiSA-Projektes nicht erfüllt werden können.

Eine Alternative zu den beiden genannten Robotern stellt der Aufbau individueller Roboterkinematiken mit Hilfe der erfolgreichen PowerCube-Module der Firma Schunk dar. Als Beispiel für einen solchen Aufbau ist in Abbildung 23 der SCHUNK-Leichtbauroboter dargestellt. Die PowerCube-Familie umfasst verschiedene Gelenk- und Antriebsmodule in unterschiedlichen Leistungsklassen. Die Steuerelektronik ist direkt in die einzelnen Module integriert, so dass kein zusätzlicher Bauraum auf der mobilen Plattform für einen Schaltschrank benötigt wird. Die Gelenkmodule zeichnen sich zudem durch geringes Gewicht und optimierte Leistungsaufnahme aus. Durch individuell gestaltete Verbindungselemente zwischen den Gelenkmodulen lässt sich eine auf den jeweiligen Einsatzfall abgestimmte Kinematik aufbauen.

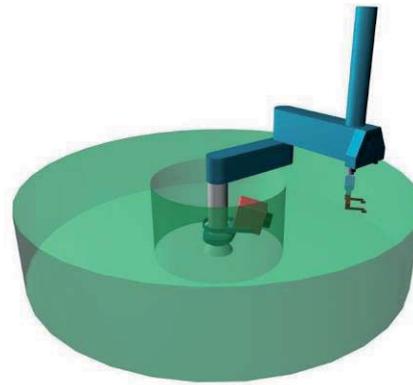
### **5.3.3. Konzeption - SCARA**

Auf Basis einer zu Entwicklungsbeginn durchgeführten Arbeitsraum- und Anforderungsanalyse wurde das Konzept für einen SCARA-Roboterarm entwickelt. Die Konzeption und Entwicklung des Manipulators gestaltete sich als iterativer Prozess, in dem vor allem die Ergebnisse einer entwicklungsbegleitend durchgeführten Risikobeurteilung gemäß EN 1050 wiederholt Konzeptanpassungen und Konstruktionsänderungen notwendig machten.

SCARA-Kinematiken kommen in der Regel in Pick-and-Place-Anwendungen zum Einsatz, bei denen hohe Anforderungen an die Bewegungsgeschwindigkeit gestellt werden. Diese steht zwar im LiSA-Projekt nicht im Vordergrund, dennoch weist eine SCARA-Kinematik in mobilen Anwendungen durch ihre im Vergleich zu einem 6-Achs-Roboter reduzierte Gelenkzahl deutliche Vorteile hinsichtlich Gewicht und Energieaufnahme auf.



**Abbildung 24:**  
Freiheitsgrade der SCARA-Kinematik



**Abbildung 25:**  
Arbeitsraum der SCARA-Kinematik

Wie in Abbildung 24 dargestellt, wurde die SCARA-Kinematik für den LiSA-Roboter als klassische R-R-T-R-Kinematik konzipiert. Die Achsen 1, 2 und 4 sind Rotationsachsen, während die Achse 3 als Linearachse ausgeführt wurde. Abbildung 25 zeigt den zylindrischen Arbeitsraum, der mit einer solchen Kinematik realisiert werden kann.

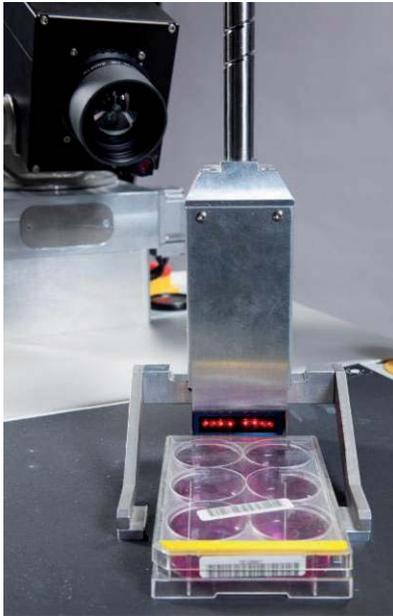
Im Fuß des Manipulators befindet sich ein zusätzlicher Rotationsantrieb. Dieser wird als fünfte Achse in die Steuerung des Roboterarmes eingebunden und ermöglicht die unabhängige Rotation eines Kamerasystems um den Fußpunkt des Roboterarmes. Die Ausrichtung des Kamerasystems wird in der Robotersteuerung mit der TCP-Position verknüpft und ermöglicht so eine ständige visuelle Überwachung des Arbeitspunktes.

Am Ende des zweiten Roboterarmsegmentes wird Bauraum für ein zusätzliches Stereokamerasystem vorgesehen. Die Blickachsen der Kameras werden parallel zu Achse 3 ausgerichtet, dadurch ist es möglich Greifprozesse zu beobachten und Objekte hinsichtlich ihrer Lage eindeutig zu charakterisieren. Weitergehende Informationen zur Funktionsweise der genannten Kamerasysteme finden sich in Kapitel 5.4

Der TCP des Manipulators wird mit einem elektrischen 2-Backengreifer bestückt. Dieser wird in seiner Auslegung an die typischen Handlingobjekte angepasst. Zusätzlich wird in den Greifer ein Barcodescanner integriert. Damit können auf den Handlingobjekten angebrachte Barcodes gelesen und die Objekte somit eindeutig identifiziert werden.

Zusätzlich zu verschiedenen konstruktiven Maßnahmen zur Risikominimierung soll der Manipulator mit einem taktilen Sensorsystem ausgestattet werden. Eine detail-

lierte Beschreibung dieses Sensorsystems und des Sicherheitskonzeptes findet sich in Kapitel 5.8



**Abbildung 26: Greifer mit Barcodescanner und Kameraüberwachung**  
Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF



**Abbildung 27: Prototyp der taktilen Haut mit Messwertvisualisierung**  
Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF

#### 5.3.4. Aufbau und Topologie

Der Aufbau des Roboterarmes erfolgte modular mit Antriebsmodulen des Projektpartners Schunk (Schunk PowerCube-Serie). Für die Achsen 1 und 2 kamen kommerziell verfügbare Antriebsmodule PRL80 (Abbildung 28) zum Einsatz. Diese Leichtbaumodule bieten ein besonders günstiges Verhältnis von Gewicht zu Traglast.



**Abbildung 28: SCHUNK-Leichtbaumodul PRL80**  
Foto: SCHUNK GmbH & Co. KG



**Abbildung 29: PowerCube-Elektronik**  
Foto: SCHUNK GmbH & Co. KG

Für die Achsen 3, 4 und 5 wurden individuell angepasste Lösungen auf Basis der Schunk-Antriebsmodule realisiert. Dazu wurde die in den PowerCubes eingesetzte Steuerelektronik (Abbildung 29) als Stand-Alone-Motorcontroller weiterentwickelt und mit separaten Antrieben kombiniert.

Alle Achsen verfügen somit über eine einheitliche elektronische Basis und weisen gegenüber der übergeordneten Steuerung ein identisches Systemverhalten auf. Die Systemintegration konnte dadurch deutlich vereinfacht werden.

Die Vernetzung der Subsysteme mit der übergeordneten Steuerung erfolgte via CAN-Bus (Abbildung 30). Separate Versorgungsspannungen für den Logik- und den Leistungsteil der Antriebselektronik ermöglichen das Stillsetzen der Antriebe im Fehlerfall (Not-Aus), bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung aller logischen und sensorischen Funktionen.

Die Zusatzkomponenten wie z. B. Kameras, Barcodescanner und die taktile Haut werden ebenfalls über die Logikspannung gespeist und stehen auch dann zur Verfügung, wenn die Energieversorgung für den Leistungsteil unterbrochen wurde. Die Datenübermittlung erfolgt via FireWire (Kameras) oder RS232 (Barcodescanner). Die taktile Haut ist zusätzlich in den Sicherheitskreis des LiSA-Roboters eingebunden und kann im Fehlerfall (z. B. Kollision des Roboterarmes mit einem Objekt) die Energieversorgung für den Leistungsteil unterbrechen.

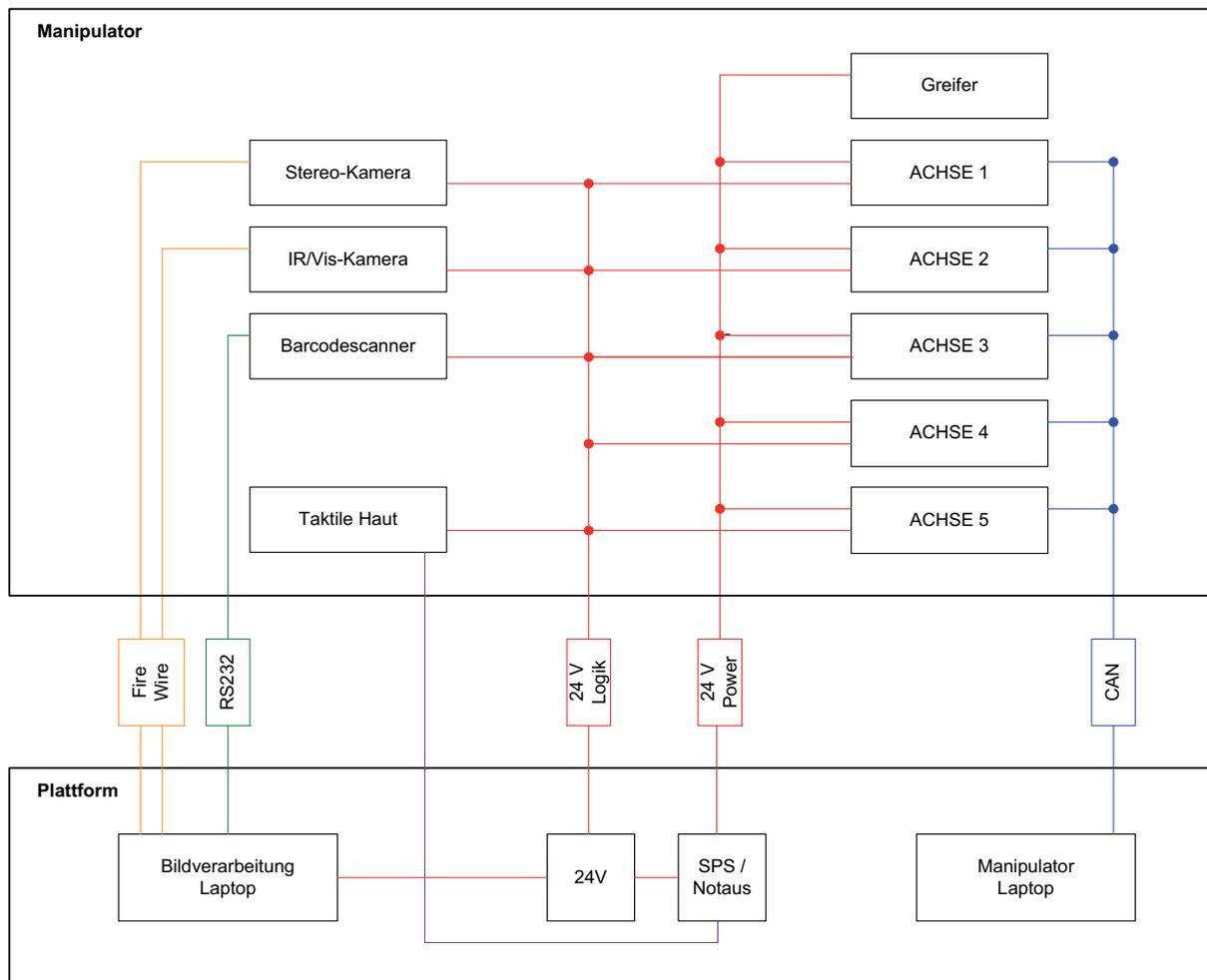


Abbildung 30: Topologie der Antriebs-Subsysteme

### 5.3.5. Steuerungskonzept

Über einen USB-CAN-Adapter werden die PowerCube-Module mit einem Notebook verbunden.

Bei der Bahnführung wurde eine Point-To-Point-Steuerung vermieden, da dabei die Bewegungen des Manipulators für den Menschen schwer einzuschätzen sind. Stattdessen wurde eine lineare Bahnführung umgesetzt, bei der die Bewegungsrichtung des Greifers konstant bleibt. Die Implementierung basiert dabei auf Standardverfahren: Mit Hilfe der invertierten Jacobi-Matrix werden die Gelenkgeschwindigkeiten ermittelt, die den Greifer in die gewünschte Richtung führen. Durch ständige Anpassung dieser Geschwindigkeiten fährt der Greifer auf einer linearen Bahn mit konstanter Geschwindigkeit zum Ziel. Gleichzeitig wird die Ausrichtung der IR-Kamera angepasst, so dass sie stets auf den Greifer gerichtet ist. Erkennt die Bildverarbeitung eine menschliche Interaktion, wird die aktuelle Bewegung gestoppt. Erst wenn

danach für eine Dauer von zwei Sekunden keine weitere Interaktion erkannt wird, setzt der Manipulator seine Bahn fort.

Während der Bewegung des Manipulators wird der Greifer an den oberen Anschlag gefahren und nach hinten geklappt. Dadurch wird zum einen das Kollisionsrisiko vermindert und zum anderen das Sichtfeld der Stereokameras freigegeben, um die nächste Ablage- bzw. Greifposition bestimmen zu können.



**Abbildung 31: Manipulatorbewegung**  
**Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF**

Um ein größtmögliches Maß an Sicherheit zu erreichen, wurde in den PowerCube-Modulen die Watchdog-Logik aktiviert. Empfangen sie für eine festgelegte Zeit kein Signal vom Steuerrechner, werden die Antriebe gestoppt, um im Fall eines Softwarefehlers eine Kollision zu vermeiden. Da es sich bei dem eingesetzten Betriebssystem (Windows XP) nicht um ein Echtzeitbetriebssystem handelt, können keine festen Ausführungszeiten garantiert werden. Wird der Steuerungsprozess von anderen Threads verdrängt, kann es vorkommen, dass der Watchdog nicht rechtzeitig bedient wird und die Module vorübergehend gestoppt werden. In der Praxis ist die Prozessorauslastung des Steuerrechners allerdings so gering, dass diese Situation nur in Ausnahmefällen auftritt.

## 5.4. Kamerasystem zur Objekterkennung und -manipulation

Das mobile Robotersystem LiSA bewegt sich autonom in einer Laborumgebung und wird durch die Navigation an die einzelnen Arbeitsstationen geführt, an denen Objekte, d. h. Multischalen, kameragestützt erkannt, gegriffen und abgelegt werden. Zur Erkennung der Arbeitsstation/Übergabestelle und der zu greifenden Objekte kommen jedoch keine stationären Kameras im Raum zum Einsatz, sondern Sensorensysteme auf dem Assistenzsystem selbst, wodurch es mobil und autark bleibt. Die Bestimmung der Aufnahme- und Ablagepositionen basiert dabei auf einem kombinierten 2D/3D-Kamerasystem samt Thermographiemodul, um den Manipulatorgreifer im Nahbereich präzise und sicher zur Zielposition zu führen. Unter Einbeziehung bekannter Geometrieinformation aus den CAD-Modellen der Übergabestellen werden die Multischalen im Kamerabild identifiziert, klassifiziert und deren räumliche Position und Orientierung bestimmt. Die ermittelten Daten werden an den Greifer übertragen, welcher daran anschließend die Objektmanipulationen durchführt.

### 5.4.1. Ausgangssituation

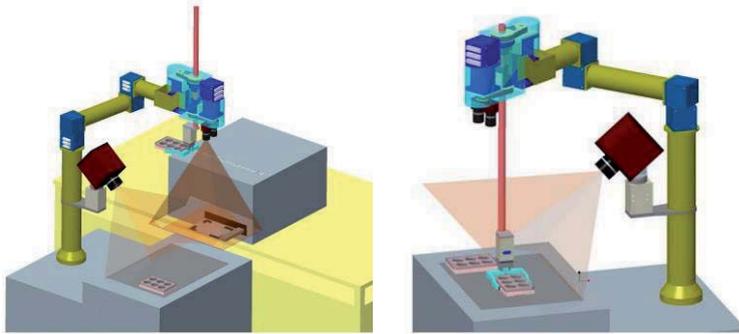
Die kameraunterstützte Führung des Manipulators setzt voraus, dass die durch die globale Navigation realisierte Bewegung der Plattform im Bereich der Zielposition bis auf wenige Zentimeter bzw. wenige Grad der Verdrehungen mit der Sollposition übereinstimmt. Dies ist erforderlich, da der Sichtbereich der Kameras und die Reichweite des Manipulators begrenzt sind.

Die Aufgaben des Kamerasystems beinhalten zusammenfassend:

- die Feinpositionierung über der Arbeitsfläche,
- Lokalisation und Klassifikation der Multischalen bzw. deren Deckel,
- Lokalisation von Ablagepositionen,
- Transformation in Greiferkoordinaten (Kalibrierung),
- Sensorführung und Tracking der Multischalen,
- Szenen-Überwachung und Erkennung menschlicher Interaktion im Bereich des Greifers mithilfe der IR-Kamera.

Die hohe Mobilität des Systems erfordert eine kompakte Sensorik und intelligente Anordnung auf der mobilen Plattform (siehe Abbildung 32) und eine ebenso mobile und kompakte Rechentechnik. Daher werden sowohl die Kameras als auch die Bild-

verarbeitungsalgorithmen über einen in der Plattform integrierten Laptop angesteuert.



**Abbildung 32: Anordnung der Kamerasysteme auf der mobilen Plattform und deren Sichtbereiche.**

#### 5.4.2. Das Kamerasystem

Das eingesetzte Kamerasystem besteht aus einem Stereoaufbau mit zwei Graustufen-Kameras (Abbildung 33a) und einer zusätzlichen Thermographiekamera (Abbildung 33b). Ersteres dient der echtzeitfähigen Erkennung von Übergabepositionen und Multischalen (Abbildung 33c) während das Thermographiemodul der Erkennung menschlicher Interaktion dient. Die wichtigsten technische Daten sind in Tabelle 1 gegeben.

	<b>Stereokameras</b>	<b>Thermographiekamera</b>
Typ	AVT-Guppy F-146B	Jenoptik IR-Modul (Eigenbau)
Auflösung	1392 x 1040 CCD	384 x 288 Mikro-Bolometer FPA
Maße	30 x 30 x 60 mm	148 x 105 x 120 mm
Schnittstelle	IEEE 1394a	IEEE 1394a

**Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Kameramodule.**

Die Graustufenkameras sind in einem Abstand von ca. 200 mm zueinander angeordnet und betrachten die Szene aus einer Distanz von ca. 500 mm bei einer Tiefenschärfe von 100 bis 150 mm. Durch eine zusätzliche winklige Anordnung entstehen überlagernde Sichtfelder, welche für die 3D-Messung auf Basis der optischen Triangulation erforderlich sind.

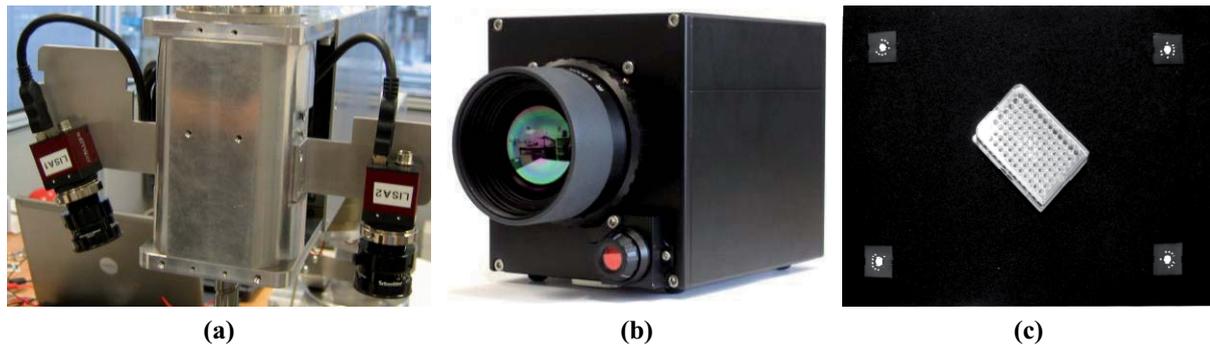


Abbildung 33: Stereo-Kamerasystem zur Objekterkennung (a), IR-Modul (b) und markierte Übergabeposition mit einer Multischale (c).  
Fotos: Fraunhofer IFF

Das Teilsystem zur Erkennung von Position und Lage der Multischalen besteht aus den zuvor genannten zwei AVT-Guppy-Firewire-Kameras, welche im photogrammetrischen Verbund zudem 3D-Messdaten der Multischalen generieren können. Bei der Anordnung der Kameras zueinander, war zu bedenken, dass der Sichtbereich der Kameras auf die Ablagefläche unter Umständen stark eingeschränkt ist, da die Orientierung der vordersten Manipulatorachse (sog. Tool-Center-Point, an dem das Kamerasystem befestigt ist) durch die zu vollführende Raumbewegung der anderen Achsen bedingt ist und damit nicht eindeutig ist.

Das IR-Modul ist zusätzlich auf einem Drehring befestigt, welcher sich automatisch in Richtung der aktuellen Greiferposition dreht, sodass sichergestellt ist, dass der Sichtbereich stets gleich dem Bereich der Manipulation ist. Die Autofokus-Funktion des Moduls ermöglicht zudem die adaptive Anpassung der Schärfe je nach Entfernung zwischen Greifer und Kamerasystem.

#### 5.4.3. Bildvorverarbeitung

Für den Einsatz der Bildverarbeitungsalgorithmen unter unbekanntem Einsatzverhältnissen in Laborumgebungen ist es erforderlich, die Einflüsse der Szenenbeleuchtung adaptiv zu korrigieren. Dies wurde auf Basis der kodierten Marker an den Übergabestationen erreicht. Die Umgebungsfarbe der Marker wird in Echtzeit bestimmt und die Segmentierungsalgorithmen entsprechend adaptiv parametrisiert. Eine weitere Vorverarbeitung der Kameraaufnahmen erfolgt durch integrierte Shading-Korrekturen und Glättungsalgorithmen.

#### 5.4.4. Objekt-Segmentierung

Nach der Erfassung der Szene besteht der nächste Schritt in der Bestimmung relevanter Objekte. Hier wurde eine adaptive Binarisierung entwickelt, welche dynamisch Vordergrund (Multischalen) von Hintergrund (Übergabestelle) unterscheidet. Hierfür werden die auf der Übergabefläche hinterlegten Marker genutzt (siehe Abbildung 34a). Diese können aufgrund ihres hohen Kontrastes und der kreisförmigen Ausprägung auch unter ungünstigen Lichtverhältnissen robust mit Kantenfiltern detektiert werden. Ihre Kodierung ermöglicht zudem eine Unterscheidung, wodurch zusätzlich die relative Lage der Übergabefläche zum Kamerasystem ermittelt wird. Anhand dieser definierten Verhältnisse wird im Umkreis eines Markers nach Hintergrundintensitäten gesucht. Diese dienen als Startwert für eine iterative Vordergrundsegmentierung.

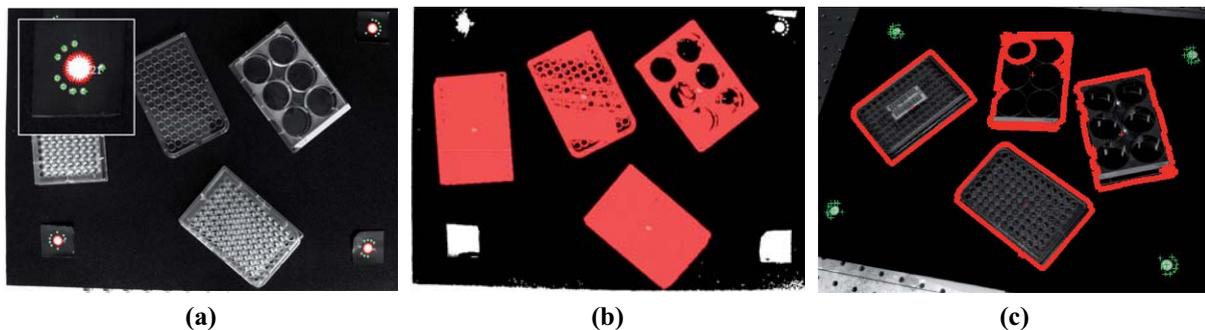


Abbildung 34: Objektsegmentierung auf der Übergabefläche. Marker-Identifikation (a), Objektsegmentierung (b) und Konturextraktion (c).  
Fotos: Fraunhofer IFF

Ein Regionenwachstumsalgorithmus erfasst zusammenhängende Bereiche und gliedert sie in Objekte (Abbildung 34b). Deren angrenzender Übergang zur Hintergrundintensität wird anschließend in Form einer sortierten Außenkontur extrahiert (Abbildung 34c).

Auf Basis der Modellinformation der Multischalen wird eine Plausibilitätsuntersuchung hinsichtlich der detektierten Formen durchgeführt. Im Ergebnis werden ausschließlich diejenigen Bild-Objekte identifiziert, welche dieselben geometrischen Merkmale aufweisen, wie die im Modell. Dieses definiert eine minimale und maximale Objektausdehnung. Anhand dieser Information ist es dem Algorithmus möglich, eine robuste Selektion durchzuführen und zu kleine, zu große oder unförmige und damit potentiell unnötige Objekte auszusortieren.

Für die exakte Lagebestimmung ist die extrahierte noch nicht präzise genug. Deren Form und Ausprägung ist noch durch Binarisierungs- und Segmentierungsartefakte gestört. Es ist daher erforderlich, eine feinere Suche auf der begrenzenden Außen-

kontur durchzuführen. Die initiale Begrenzung wird dafür zunächst durch einen Polygonzug beschrieben. Anhand dessen wird das minimal umschließende Rechteck durch die sogenannte „rotating caliper“-Methode ermittelt (Abbildung 35a). Die optimale und präzise neue Außenkontur wird nun durch Subpixelinterpolation senkrecht zu den Rechteckskanten bestimmt (Abbildung 35b, c).

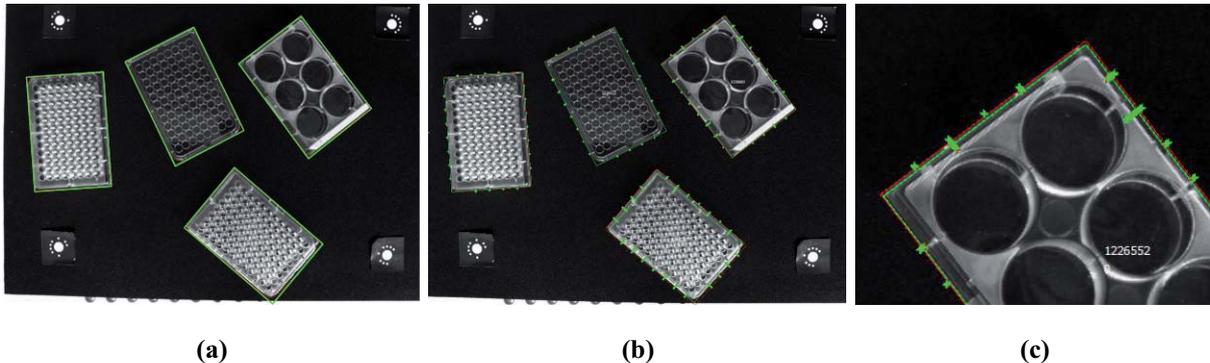


Abbildung 35: Bestimmung des minimal umschließenden Rechtecks (a) sowie Feinanpassung der Außenkonturkanten senkrecht zu den Rechteckskanten (b, c).

Fotos: Fraunhofer IFF

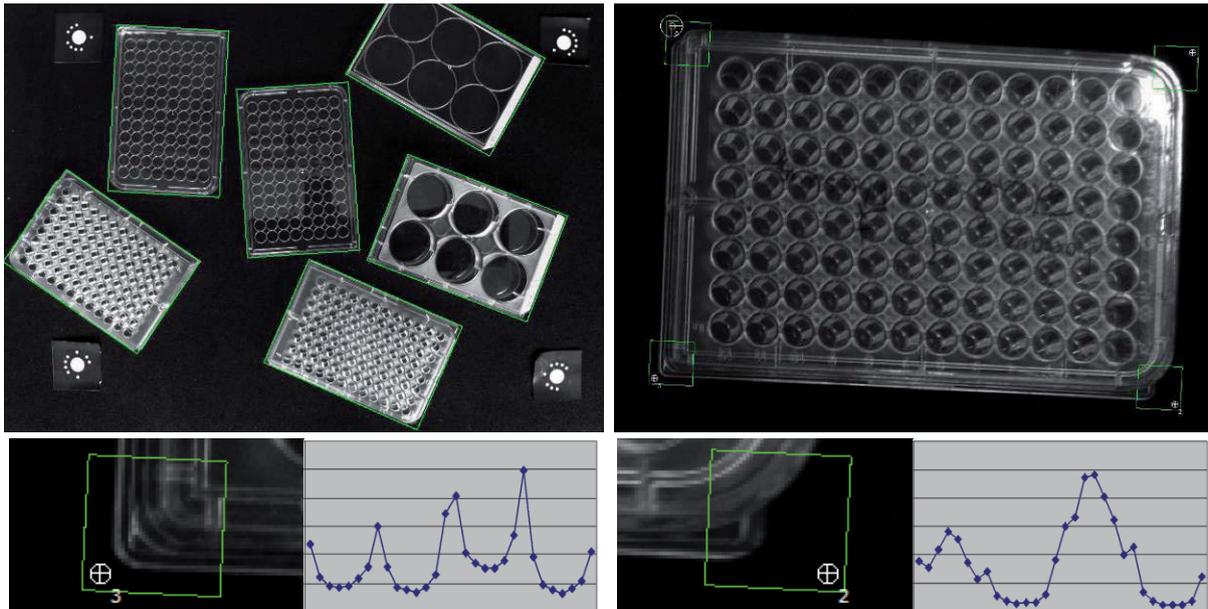
#### 5.4.5. Objekt-Klassifikation

Die Vielfalt der möglichen Objekte und -formen umfasst zunächst zwei verschiedene Typen von Multischalen (sog. 6-Well und 96-Well, s. Abbildung 36). Diese können jeweils mit oder ohne Deckel an der Übergabestelle liegen. Zudem umfasst das Manipulationsszenario das Abnehmen und Auflegen von Deckeln auf Schalen, usw. Daher werden die zuvor segmentierten Objekte und Formen klassifiziert. Bedingt durch geometrisch große Ähnlichkeit zwischen den Schalentypen (genormte Rechteckform) kann eine Unterscheidung lediglich anhand der Form der Ecken erfolgen. Der Form der Ecken kommt jedoch auch eine weitere und entscheidende Bedeutung zu, denn sie definiert ebenso die Orientierung von Schalen und Deckeln, da diese nicht symmetrisch sind und nur in einer bestimmten Orientierung aufeinander gelegt werden können.

Somit besteht die Hauptaufgabe der Klassifikation in der Identifikation und Unterscheidung der Schalenecken. Die zugehörigen Bildpositionen wurden bereits durch das minimal umschließende Rechteck geometrisch definiert. Zusätzlich wurde eine Methode entwickelt, welche den Verlauf der Kanten im Bereich einer Ecke analysiert. Dieser Bereich wird durch ein Quadrat beschrieben, in dem die Kanten und deren Richtungen ermittelt werden. Die resultierenden Gradienten werden nun in 30 Kategorien gerundet und in ein Histogramm eingetragen. Der Verlauf spiegelt dann die Verteilung der Richtungen wider und stellt eine Signatur dar. Je nach Deckel- und

Schalentyp sind verschiedene Kombinationen aus eher kantigen und eher runden Ecken möglich (siehe Abbildung 36 unten). Die Signaturen sind für die beiden vorkommenden Schalen-Typen eindeutig und ermöglichen eine robuste Unterscheidung von Form und Orientierung (>95%).

Die Gesamtgeschwindigkeit des Verfahrens von der Segmentierung bis zur Klassifizierung beträgt ca. 5 Bilder/Sekunde, womit die Schalen in Echtzeit erkannt und verfolgt werden können.



**Abbildung 36: Klassifikation von Deckel und Schale anhand der Form ihrer Ecken. Eine eher kantige Ecke (links unten) wird von einer eher runden (rechts unten) aufgrund der Verteilung ihrer Kantenrichtungen unterschieden.**

**Fotos: Fraunhofer IFF**

Die bisher diskutierten Methoden gehen davon aus, dass sich die Multischalen im festen Abstand zum Kamerasystem befinden und Multischalen nicht aufeinander stehen. Im realen Einsatz können Schalen jedoch gestapelt stehen, und Übergabepositionen haben verschiedene Geometrien und Höhen (z.B. Tisch, Fluoreszenzreaktor, etc., s. Abbildung 37). Es war daher erforderlich, eine 3D-Lagemessung zu entwickeln, um die Sensorführung auch unter diesen Bedingungen anwenden zu können.

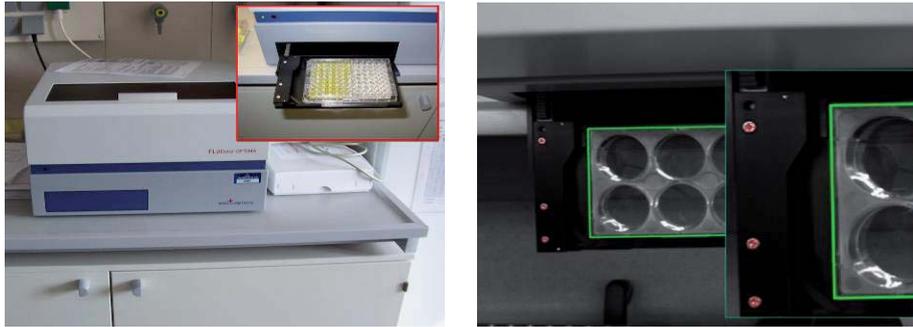


Abbildung 37: Erkennung von Multischalen in der Schublade eines Fluoreszenzreaders.  
Fotos: Fraunhofer IFF

#### 5.4.6. Höhen- und 3D-Lagemessung

Das Stereo-Kamerasystem wurde so ausgelegt, dass mit Hilfe des Prinzips der optischen Triangulation Entfernungsmessungen durchgeführt werden können. Es wurde ermittelt, dass zwei im Winkel von 20 Grad zueinander angeordnete Kameras mit einem Abstand von 200 mm die zuverlässigsten Ergebnisse liefern.

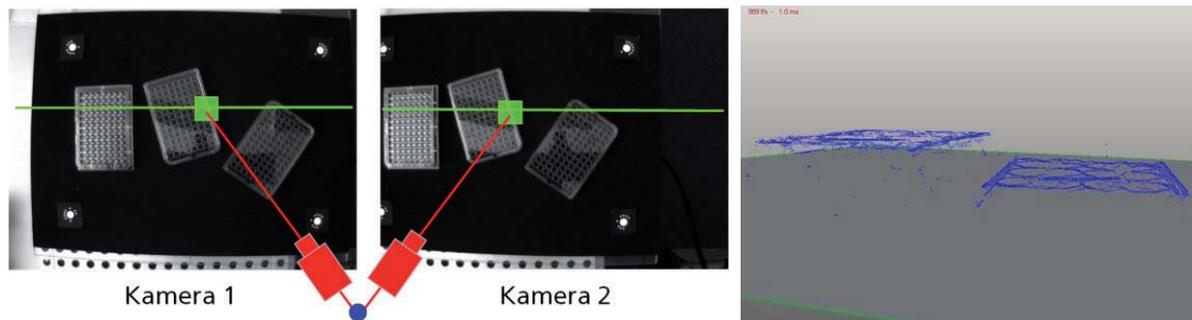
Als algorithmische Basis dient die zuvor durchgeführte (Kamera-)Kalibrierung, wobei sowohl die intrinsischen (z. B. Brennweite, Bildhauptpunktverschiebung) als auch die extrinsischen Kameraparameter (relative räumliche Lage) bestimmt wurden. Zusätzlich ist auch die Lage und Orientierung beider Kameras zueinander in einem gemeinsamen Koordinatensystem ermittelt worden.

Darauf aufbauend wurde ein Messverfahren eingesetzt, um 3D-Abstandswerte aus den beiden Kamerabildern zu ermitteln. Die Methode ermittelt den Messwert durch Triangulation zwischen drei Raumpunkten. Diese sind durch zwei korrelierende Pixelpositionen im linken bzw. rechten Kamerabild und einen Punkt im gemeinsamen Welt-Koordinatensystem gegeben (siehe Abbildung 38). Das Verfahren der sogenannten Stereophotogrammetrie nutzt die bekannte Ausrichtung der Kameras, um für eine Pixelposition im linken Bild eine korrelierende Pixelposition im rechten Bild zu detektieren:

$$\frac{\sum_{v=0}^{v_{\max}} \sum_{u=0}^{u_{\max}} \{r(u,v) - \bar{r}\} \cdot \{s(x_u, y_v) - \bar{s}\}}{\sqrt{\sum_{v=0}^{v_{\max}} \sum_{u=0}^{u_{\max}} \{r(u,v) - \bar{r}\}^2 \cdot \sum_{v=0}^{v_{\max}} \sum_{u=0}^{u_{\max}} \{s(x_u, y_v) - \bar{s}\}^2}}$$

Formel 1: Mittelwertfreie und normierte Kreuzkorrelationsfunktion zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Bildregionen.

Die Grundlage dafür ist die Epipolargeometrie, welche einem Punkt des einen Bildes eine eindeutige Kurve im anderen zuweist. Eine schnelle und zuverlässige Korrelation benötigt robuste Merkmale. Hier haben sich Objektkanten als am besten geeignet erwiesen.



**Abbildung 38: Bestimmung von 3D-Messwerten durch Stereo-Photogrammetrie (links) und Ergebnis einer Beispielmessung an Multischalen (rechts).  
Fotos: Fraunhofer IFF**

Die resultierenden Höhen-/Abstandswerte auf der Oberseite der Multischalen/-deckel dienen dann der Steuerung des Greifers in vertikaler Richtung, wobei diese zeitaufwändige Messung (ca. 200 Punkte/s) nur bei Bedarf ausgeführt wird.

#### **5.4.7. Kalibrierung Kamerasystem zu Greifer**

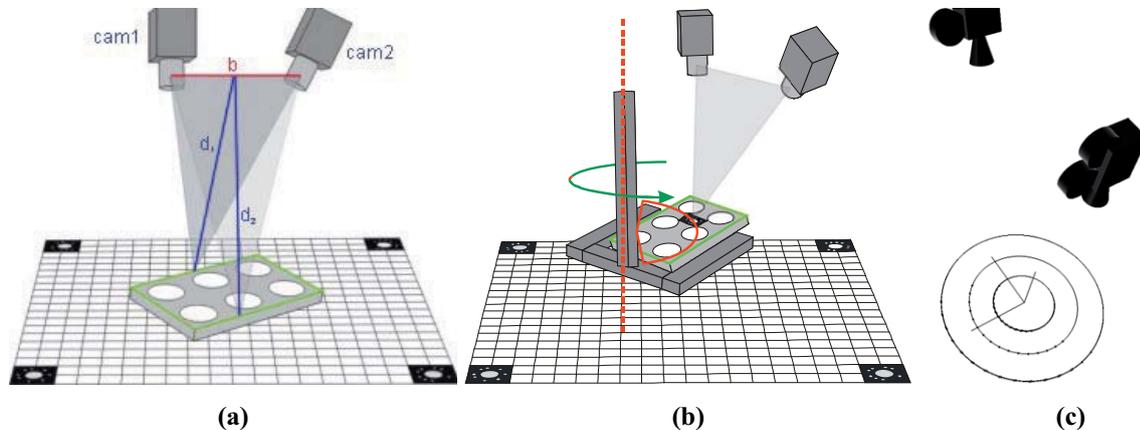
Nach der Erkennung der (bildbasierten) Merkmale der Multischalen (Lage, Orientierung, Höhe) ist es nun erforderlich, diese Daten in das Koordinatensystem des Manipulators zu transformieren, um ein korrektes Achszustellen und Greifen in Welt- bzw. Roboterkoordinaten zu ermöglichen. Dies wird durch einen Einmessschritt erreicht, wobei der Greifer eine Multischale mit Kodiermarken definiert bewegt (siehe Abbildung 39c). Dabei erfasst der entwickelte Algorithmus kontinuierlich die Lage der kodierten Marken und kann aus deren Bildpositionen und den realen, vorgegebenen Translations- und Rotationsparametern des Greifers eine Transformationsmatrix ableiten, welche im System hinterlegt wird. Anhand dieser einmalig zu bestimmenden Transformation kann jeder Bildpunkt des Kamerasystems (Pixelposition in einem der beiden Bilder) in Translations- und Rotationsparameter des Greifers (Weltkoordinaten) überführt werden.

Der grundlegende Einmessablauf ist wie folgt definiert:

1. Rotation der Multischale mit Markern in fester Höhe mit dem Greifer
2. 3D-Bestimmung der Marker durch Photogrammetrie
3. 3D-Kreiseinpassung in Markerpositionen liefert Ebene und Rotationsachse des Greifers
4. Bodenfläche mit Markern ist 3D-Referenzebene
5. Umrechnung 2D-Lage in 3D-Winkel

## 6. Projektion von 2D-Bild- in 3D-Referenzebene liefert Position

Die Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Rotationsachse senkrecht zur Bodenfläche ist, um Verzerrungsfehler durch die Projektionen zu vermeiden.



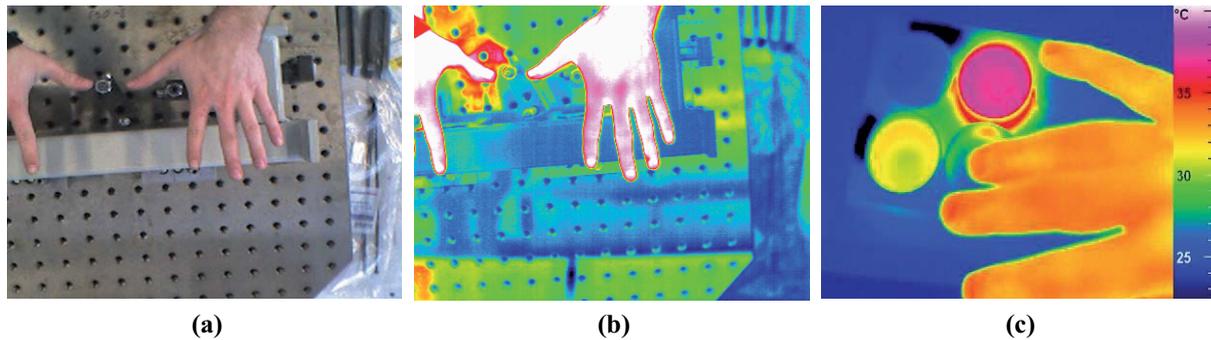
**Abbildung 39: Stereo-Kamerasystem am Manipulator zur Messung von 3D-Daten (a) und Einmessen zwischen Greifer und Kamerasystem durch definierte Rotationsbewegungen mit dem Greifer (b). Darstellung der zum Greifer eingemessenen Kameras in Roboterkoordinaten (c).**

### 5.4.8. Erkennung menschlicher Interaktion

Eine weitere Aufgabe des Kamerasystems besteht in der Überwachung des Arbeitsraumes vor dem Greifer. Im Sinne der Vermeidung von Verletzungen erkennt das Kamerasystem menschliche Interaktionen (s. Abbildung 40) und stoppt die Manipulation. Hierfür wird das IR-Modul eingesetzt, welches als modularer Prototyp von Jenoptik Optical Systems entwickelt wurde.

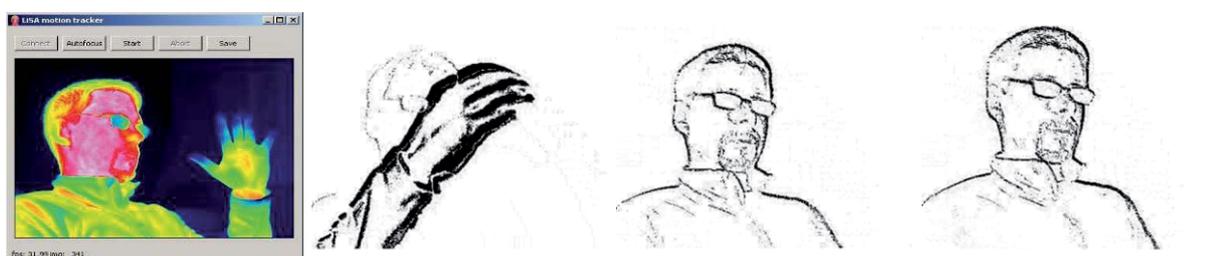
Das Modul ist drehbar an der Längsachse des Manipulatoraufbaus montiert. Es folgt adaptiv der Bewegungsrichtung der Greifers und überwacht in fester Neigung dessen Interaktion mit den Multischalen.

Durch den verbauten Autofokus-Mechanismus ist es zudem möglich, den Schärfen- und Erfassungsbereich optimal auf den Arbeitsbereich zu fokussieren. Daran anschließend wurde die Erkennungssoftware dahingehend optimiert, dass sie in Echtzeit die Bewegungen abhängig von der bewegten Objektgröße und Richtung detektiert und anzeigt.



**Abbildung 40: Erkennung menschlicher Interaktion bzw. Bewegung im Bereich des Greifers: Farbbild der Szene (a), farbkodiertes IR-Bild (b) und Temperaturskala (c).  
Fotos: Fraunhofer IFF**

Auf Grund der Vielzahl der möglichen Orientierungen (z. B. einer Hand) vor der Kamera wurde eine Algorithmik entwickelt, welche auf Basis einer Bildfolgenanalyse (menschliche) Bewegungen und deren Richtungen detektiert. Hierfür werden stets drei aufeinanderfolgende Bilder analysiert. Denn wenn zwei aufeinanderfolgende Bilder nicht identisch sind, muss es eine Bewegung gegeben haben, welche durch Differenzbildung zwischen beiden Bildern lokalisiert wird. Diese Differenz zeigt sich jedoch an zwei Positionen, d.h. dort wo ein Objekt vorher war, ist es nicht mehr, und dort wo es vorher nicht war, ist es nun. Daraus ergibt sich, dass Richtung und reales Ausmaß der Bewegung erst mit einem dritten Bild ermittelt werden können. Die Doppel-Differenzen zwischen den Bildpaaren (1, 2) und (2, 3) lassen dann auf Änderungen, d. h. Bewegungen, schließen (Abbildung 41). Anhand des Ausmaßes der Unterschiede wird entschieden, ob das System einen Stopp des Manipulators einleitet.



**Abbildung 41: Bildfolgenanalyse in IR-Bildern (a) am Beispiel von Differenzbildern einer Sequenz.**

Es wurde zudem untersucht, welche Temperaturen typisch für die menschliche Hand sind. Dabei wurde eine Spanne von 25 bis 35°C ermittelt, welche als Temperaturfilter genutzt wird, um relevante von nicht relevanten Temperaturänderungen bzw. Bewe-

gungen zu unterscheiden. Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgt in Echtzeit, d. h. mit ca. 40 Bildern/s.

### 5.5. Multimodale Interaktion: Spracheingabe und -ausgabe

Die Kommunikation zwischen LiSA und den Bedienern kann sowohl grafisch über ein Touchpad, als auch sprachlich über ein Mikrofon und Lautsprecher bzw. Ohrhörer (Kommunikation in beide Richtungen) erfolgen. Zu Beginn des Projektes wurde eine Reihe von Anforderungen an die multimodale Interaktion festgelegt, die für die Arbeiten an der Sprachein- und -ausgabekomponente maßgeblich waren.

Zwei gleichberechtigte Bediener sollen mit je einem Tablet und einem Headset mit LiSA interagieren können. Jede Modalität erlaubt dabei unabhängig von der anderen die Bedienung zumindest der wesentlichen Funktionen. Beide Modalitäten sind zudem eng verzahnt, d. h. eine Touchpad-Eingabe wirkt sich in der Regel auf die nächste Systemäußerung aus, eine Spracheingabe hat umgekehrt Einfluss auf die visuelle Darstellung. Bei der Frage nach einem Zielort kann z. B. die Karte des Labors erscheinen; die Beantwortung der Frage kann dann statt einer gesprochenen Eingabe auch durch Deuten auf den entsprechenden Punkt erfolgen. Bestimmte Eingaben können auch durch Kombination beider Modalitäten erfolgen, etwa „Bring doch mal die Probe von da nach da!“, mit entsprechenden Zeigegesten.

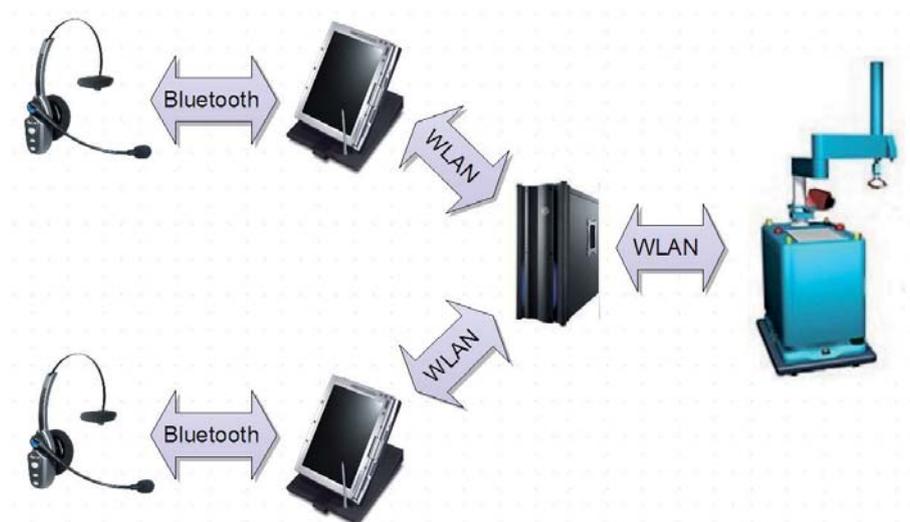


Abbildung 42: Hardware und drahtlose Kommunikation für die multimodale Interaktion

Der Bediener muss auch von seinem Arbeitsplatz aus mit dem Roboter interagieren können. Das bedeutet insbesondere, dass sich Roboter und Bediener zum Zeitpunkt

der Interaktion in unterschiedlichen Räumen befinden können. Die Ein- und Ausgabegeräte für die multimodale Interaktion sollten daher nicht auf dem Roboter befestigt sein.

Gerade weil sich der Bediener nicht in der Nähe des Roboters befindet, müssen ihm mögliche Fehlerzustände zeitnah sowohl visuell als auch sprachlich präsentiert werden. Hierfür muss nötigenfalls auch ein laufender Dialog zur Eingabe eines neuen Auftrages unterbrochen werden. Danach kann der Auftrags-Eingabedialog an diesem Punkt wieder aufgenommen werden.

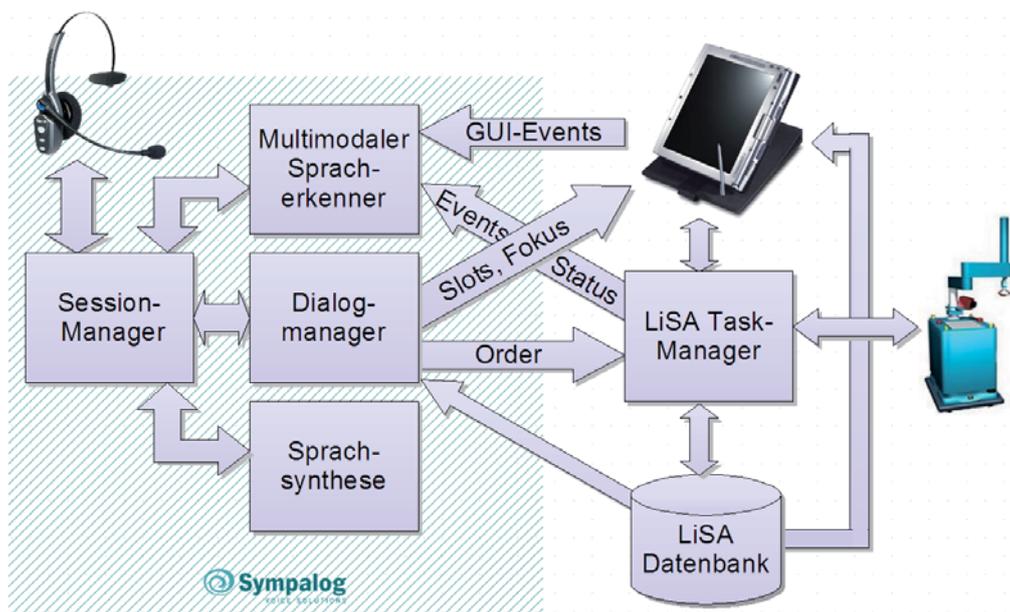


Abbildung 43: Software-Architektur für die multimodale Interaktion

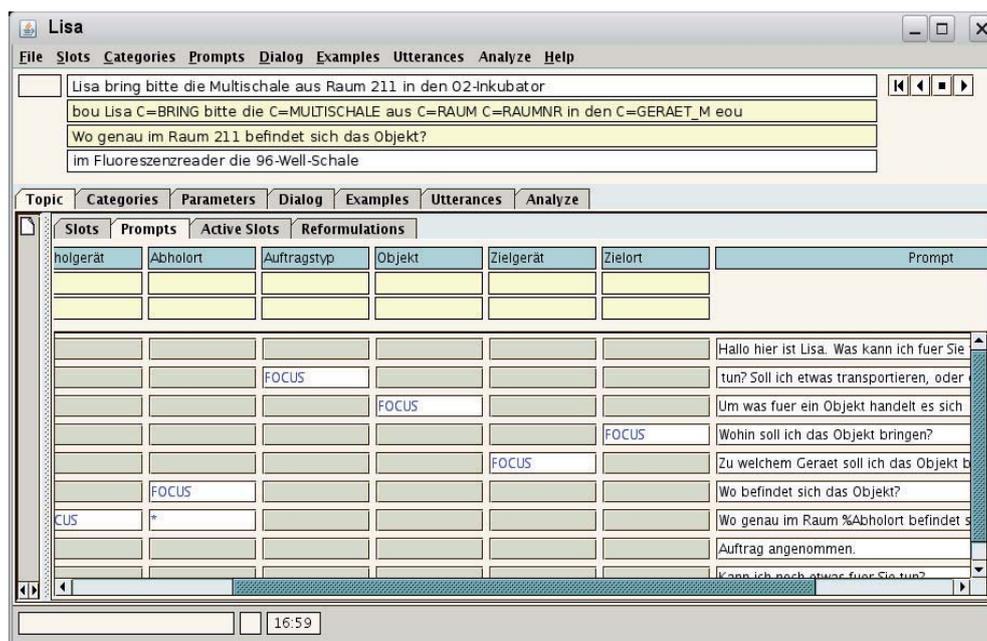
Zur Umsetzung dieser Anforderungen wurde als Hardware- und Kommunikationsarchitektur die Konfiguration realisiert, die in Abbildung 42 dargestellt ist. Pro Bediener gibt es jeweils ein Bluetooth-Headset und ein Tablet, das unter Windows Vista betrieben wird. Die Verbindung zwischen Headset und Tablet erfolgt drahtlos via Bluetooth. Die Verbindung zwischen jedem Tablet, einem stationären Server-PC und einem auf dem LiSA-Roboter befindlichen PC erfolgt über WLAN. Die Software für Visualisierung und Touchpad-Eingabe (GUI-Steuerungsmodul) läuft lokal auf dem Tablet.

Der stationäre Server-PC wird u. a. zum Betrieb der Systemkomponenten für die Sprachein- und -ausgabe eingesetzt. Im Einzelnen sind dies der multimodale Spracherkenner (eine im Rahmen des Projekts im Hinblick auf multimodale Interaktion erweiterte Version des Sympalog-Produkts SymRec), der Dialogmanager

(SymDialog), das Sprachsynthesemodul (SymTTS) und der Session-Manager (eine im Rahmen des Projekts entwickelte multimodale Version des Sympalog-Produkts SymCTM). Als Betriebssystem für diesen Server-PC wurde Linux ausgewählt. Auf dem Tablet läuft als Bestandteil der Sprachsteuerung lediglich ein sogenannter Audio-Endpoint von Sympalog. Dabei handelt es sich um ein Programm, dessen Aufgabe im Kern darin besteht, die Audio-Devices anzusprechen und die Audio-Daten zum Session-Manager (SymCTM) zu leiten (im Falle einer sprachlichen Benutzereingabe) bzw. von diesem entgegenzunehmen (im Falle einer Sprachausgabe des Systems). Der überwiegende Teil der Rechenkapazität des Tablets steht so für den grafischen Teil der Bedienschnittstelle zur Verfügung.

Der Dialogmanager SymDialog hat die Kontrolle über den Dialog, auch wenn die Eingabe des Bedieners über das Touchpad erfolgt. Er kommuniziert mit dem LiSA-Task-Manager (LTM). SymDialog übergibt dem LTM vollständig ausgefüllte Auftragsformulare (XML) und erhält vom LTM Statusmeldungen, Rückmeldungen (z. B. Auftragslisten) und Fehlerzustände. Weiterhin kommuniziert SymDialog mit dem GUI-Steuerungsmodul, um Touchscreen-Eingaben zu verarbeiten und die Visualisierung des aktuellen Dialogzustands zu ermöglichen.

Die Softwarearchitektur für die multimodale Interaktion ist in Abbildung 43 dargestellt. Die im schraffierten Teil der Abbildung dargestellten Module wurden von Sympalog realisiert.



**Abbildung 44:** GUI zur Konfiguration des Dialogmanagers, hier ein Ausschnitt aus der Entscheidungstabelle, die die jeweils folgende Systemäußerung bestimmt.

Der Dialogablauf wird in SymDialog nicht durch vorab definierte Ablaufpläne definiert, sondern durch die im jeweiligen Dialogzustand vorliegende Belegung sogenannter Slots (etwa: Formularfelder). In der LiSA-Dialogkonfiguration gibt es beispielsweise die Slots „Auftragstyp“, „Zielgerät“ und „Objekt“. Die Belegung der Slots kann auf drei Wegen erfolgen: Durch eine sprachliche Eingabe des Bedieners, über eine Touchscreen-Eingabe oder über den LTM.

Nach jedem Dialogschritt teilt der Dialogmanager den Inhalt aller Slots sowie den Fokus der nächsten Systemäußerung (z. B. „Nachfrage nach Objekttyp“ oder „Bestätigungsfrage für Zielort“) dem GUI-Steuerungsmodul mit. Das GUI-Steuerungsmodul leitet Eingabe-Events unmittelbar an SymDialog weiter (über eine Socket-Schnittstelle). Jedes Eingabe-Event setzt sich zusammen aus einem Objekt (z. B. Raum, Gerät, Aktions-Button etc.) und einem Zeitstempel.

Nach jedem Dialogschritt findet eine Interaktion zwischen SymDialog und dem LTM statt: Der LTM teilt darin ggf. Statusänderungen mit (z. B. Fehlerzustände). Ist der Auftrag komplett spezifiziert, leitet SymDialog das entsprechend gefüllte Auftragsformular (XML-Struktur) an den LTM weiter.

Das vom SymDialog intern verwaltete und mit jedem Dialogschritt an das GUI-Steuerungsmodul weitergeleitete Formular enthält u.a. folgende Slots:

- „Systemstatus“ (warte, aktiv, an\_ladestation, fehler)
- „Objekttyp“ (multischale, flasche)
- „Objekt“ (probe\_x123283, tür\_r211)
- „Auftragstyp“ (z. B. bring, fluoreszenzmessung)
- „Abholgerät“ (fluoreszenz-reader\_r211, inkubator\_344)
- „Zielgerät“ (fluoreszenz-reader\_r211, inkubator\_344)
- „Systemmeldung“ (auftrag\_ausgeführt, fehler\_XY).

Das Auftragsformular wird vom SymDialog aus den Slot-Werten generiert, z. B. (Auftragstyp: bring, Objekt: x123283, Abholstelle: fluoreszenz-reader\_r211, Ziel: inkubator\_344).

Im Folgenden ist ein kurzer Beispieldialog dargestellt, der die Möglichkeiten der LiSA-Bedienerschnittstelle veranschaulicht:

**Bediener:** LiSA, bitte bring die Multischale vom Fluoreszenzreader in Raum 211 zum O2-Inkubator in – ähm – in Raum 212!

**LiSA:** Vom Fluoreszenzreader in Raum 211 zum O2-Inkubator in Raum 212?

**Bediener:** Ja.

**LiSA:** Auftrag angenommen. Kann ich noch etwas für Sie tun?

**Bediener:** Und dann bring bitte die Probe von *hier* nach *da*!

[Benutzer berührt die Punkte auf der Karte]

In der ersten, spontansprachlichen Eingabe des Bedieners werden gleich fünf relevante Informationen genannt, die vom Spracherkenner in Text umgesetzt und vom Dialogmanager in den entsprechenden Slots abgelegt werden. Durch diese Äußerung ist der Auftrag bereits vollständig bestimmt, so dass keine Rückfrage notwendig ist. Nach einer Bestätigungsfrage, die vom Bediener mit „ja“ bestätigt wird, kann der Auftrag somit an den LiSA-Task-Manager weitergeleitet werden. Die folgende Äußerung des Bedieners ist eine simultane multimodale Eingabe: Die Wörter „hier“ und „da“ werden vom Bediener durch Berührungen auf der auf dem Touchscreen dargestellten Karte begleitet.

Zur schnellen Verarbeitung der isolierten Touchscreen-Eingaben und der gleichzeitigen Möglichkeit von simultanen multimodalen Eingaben ist es notwendig, die Verarbeitung der Touchscreen-Events eng an die Audio-Verarbeitung zu koppeln. Der Ablauf der Verarbeitung einer simultanen multimodalen Eingabe ist in Abbildung 45 dargestellt.

Erfolgt eine Touchscreen-Eingabe ohne gleichzeitige Spracheingabe, so wird diese ohne Zeitverzug über das multimodale Spracherkennungsmodul und den Session-Manager an den Dialogmanager weitergeleitet. Findet dagegen während der Touchscreen-Eingabe zeitgleich eine Spracheingabe statt, so werden die Touchscreen-Events bis zum Ende der sprachlichen Äußerung gesammelt und anschließend vom multimodalen Spracherkennungsmodul zu einer kombinierten Eingabe zusammengefasst, die so weiterverarbeitet werden kann wie eine reine Spracheingabe.

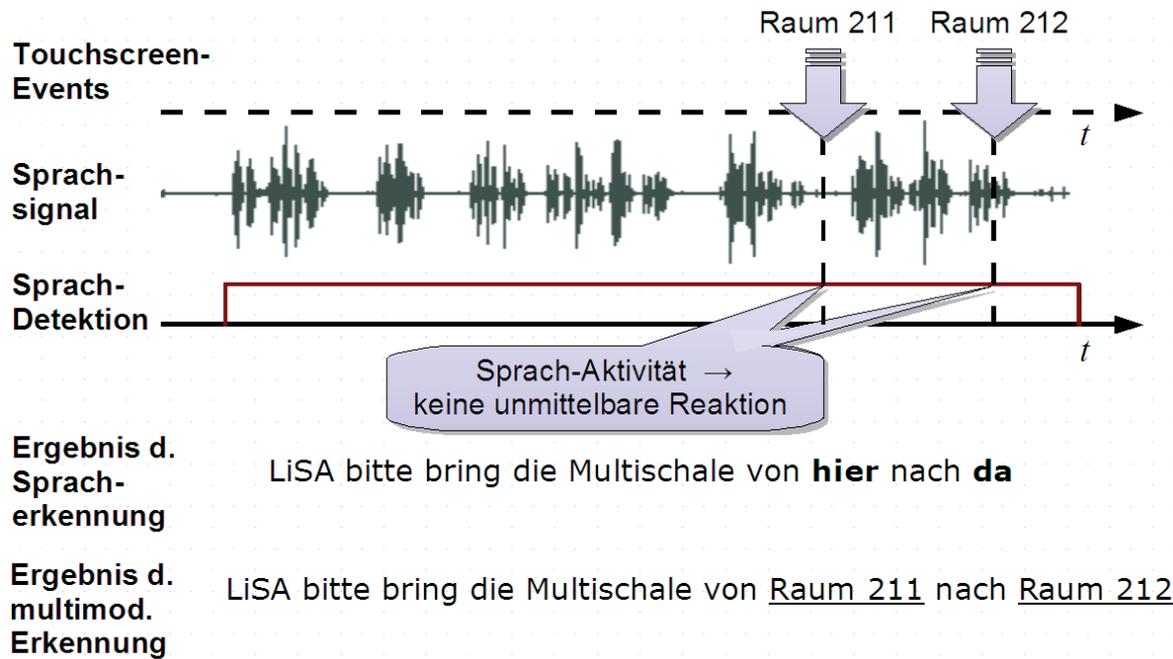


Abbildung 45: Simultane multimodale Interaktion mit dem LiSA-Roboter

## 5.6. Multimodale Interaktion: Grafisches User-Interface

Die zweite Komponente des multimodalen Interaktions-Konzeptes im LiSA-Projekt, neben der Sprach-Komponente, ist das graphische User-Interface. Um diese beiden Teilmodule zu einer funktionellen Einheit zu verknüpfen muss eine enge Anbindung an das Sprach-Modul erfolgen, wobei sich beide Teile gegenseitig beeinflussen. Über das GUI-Modul sollen hierbei ebenso Informationen vom System angezeigt als auch Eingaben vom Nutzer entgegengenommen werden. Der Nutzer soll die Möglichkeit haben, seinen normalen Tätigkeiten nachzugehen, daher ist es notwendig, dass die Bedien-Einheit mobil ist, sodass sich der Mitarbeiter mehr oder weniger frei im Labor bewegen kann, während er seine Aufträge für LiSA eingibt. Hierfür ist die Verwendung von hoch-mobiler Hardware mit Touchscreen erforderlich, damit der Nutzer nicht jedes Mal für eine Eingabe an einen festen Arbeitsplatz zurückkehren oder einen Laptop abstellen und aufklappen muss. Da derartig mobile Hardware auch eher kompakte Ausmaße vorweist, ist in besonderem Maße darauf zu achten, dass die Informationen klar strukturiert und übersichtlich dargestellt und dass die Interaktionsmöglichkeiten einfach und intuitiv gehalten werden. Eine mehrfach verschachtelte Menü-Struktur, bei der einfache Eingaben mehrere gezielte Klicks auf kleine Objekte benötigen, wäre an dieser Stelle nicht zweckmäßig.

### 5.6.1. Multimodalität

Der Begriff multimodale Interaktion bedeutet im einfachsten Sinn, dass mehrere verschiedene Modi für die Interaktion genutzt werden können. In dem umgesetzten Interaktions-Konzept wurde dieses minimale Verständnis von multimodal noch insofern erweitert, dass die beiden vorhandenen Eingabemodi jedes für sich, aber auch beide gemeinsam während eines Eingabeprozesses genutzt werden können. Hierbei sind sowohl die abwechselnde, äquivalente Nutzung (siehe Abbildung 46 – Variante 1) als auch eine gleichzeitige, sich gegenseitig ergänzende, Verwendung (siehe Abbildung 46 – Variante 2) möglich.

Die Kommunikation mit dem Benutzer wird insgesamt über einen Dialog-Manager im Modul SymDialog gesteuert, welcher die notwendigen Informationen für einen vollständigen Auftrag vom Nutzer sammelt und fehlende Angaben erfragt. Hierbei werden Eingaben, die über den Touch-Screen erfolgen, direkt vom GUI-Modul an das Dialog-Modul weitergeleitet und dort ebenso verarbeitet wie eine Spracheingabe. Das Dialog-Modul schickt regelmäßig seinen aktuellen Status an das graphische User-Interface welches dann so darauf reagiert, dass die vom Dialog erwarteten Eingaben schnell und intuitiv getätigt werden können.

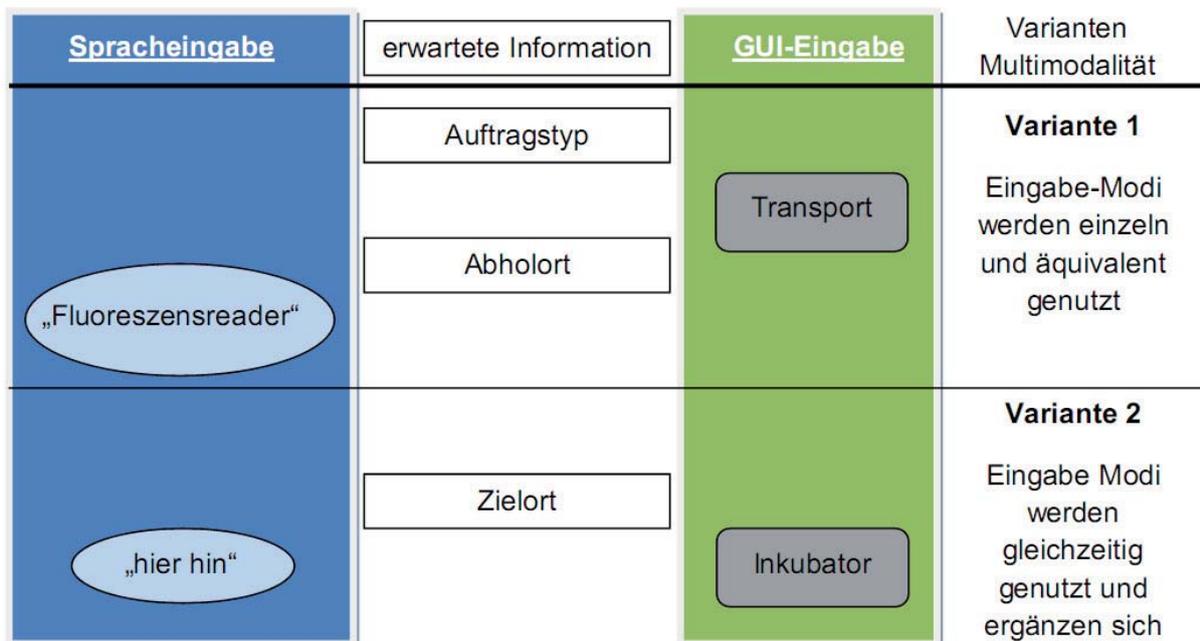


Abbildung 46: Schema Multimodalität

### 5.6.2. Hardware

Als Hardware wird ein Convertible-Notebook von Hewlett Packard (TX2050eg) verwendet, wobei Convertible bedeutet, dass das Display herumgedreht und über die Tastatur geklappt werden kann, sodass das Gerät wie ein Tablet-PC handhabbar ist. Das Display ist ein 12,1" WXGA Touchscreen (Auflösung: 1280 x 800) welches über einen dedizierten Graphik-Chipsatz (NVIDIA GeForce™ Go 6150) angesteuert wird und Touch-Eingaben durch Finger ebenso zulässt wie durch den vorhandenen Touch-Pen. Als weitere Merkmale verfügt das Gerät über einen internen Bluetooth-Adapter zum Anschluss des Headsets und einen integrierten WLAN-Anschluss für die Einbindung ins Netzwerk. Durch das geringe Gewicht von 1,92 kg und das recht handliche Format (Abmessungen: 22,40 cm (L) x 30,60 cm (B) x 3,13 cm (min. H) /3,87 cm (max. H) – also nur knapp größer als DIN-A4) eignet sich das Gerät auch dafür, längere Zeit von einem Bediener (z. B. Laborassistenten) bei sich getragen zu werden.

### 5.6.3. Aufbau der Graphischen Benutzeroberfläche

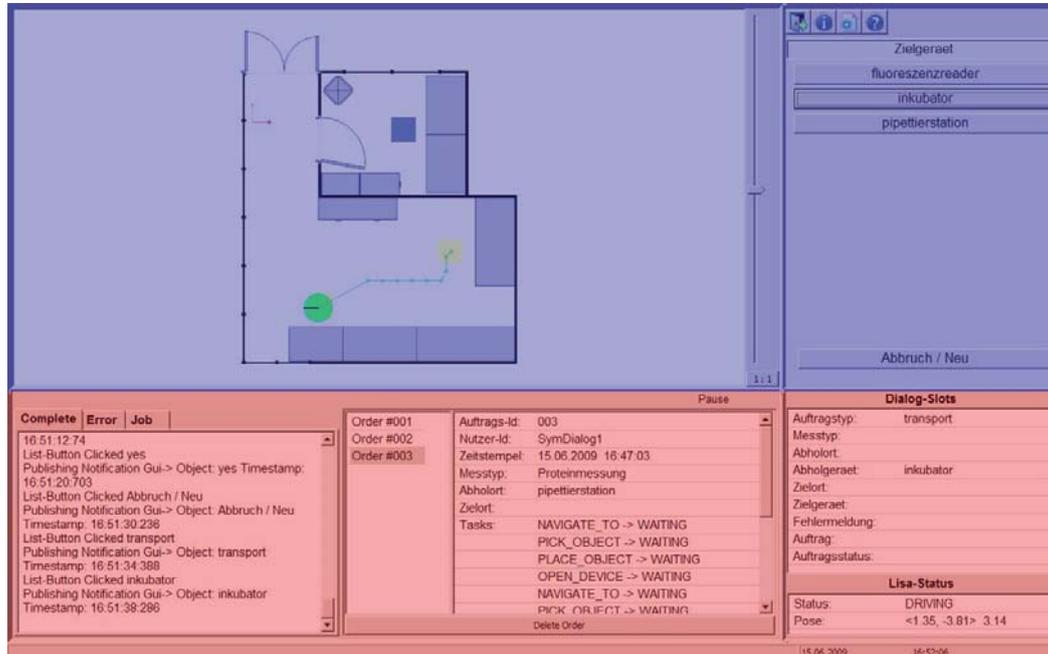


Abbildung 47: Übersicht – Aufbau GUI

Interaktionsbereich (blau) – Interaktive Karte (links), Buttonliste (rechts) - und Informationsbereich (rot)  
– Log-Fenster (links), Auftragsliste (Mitte), Status-Fenster (rechts)

Die graphische Benutzeroberfläche (GUI) ist in zwei große Komplexe unterteilt – den Interaktionsbereich (Abbildung 47 - blauer Bereich), bestehend aus einer interaktiven

Kartenansicht (links) und einer Buttonliste (rechts), und den Informationsbereich (Abbildung 47 - roter Bereich), welcher sich in das Log-Fenster (links), das Status-Fenster (rechts) und die Auftragsliste (Mitte) unterteilt.

#### 5.6.4. Interaktionsbereich

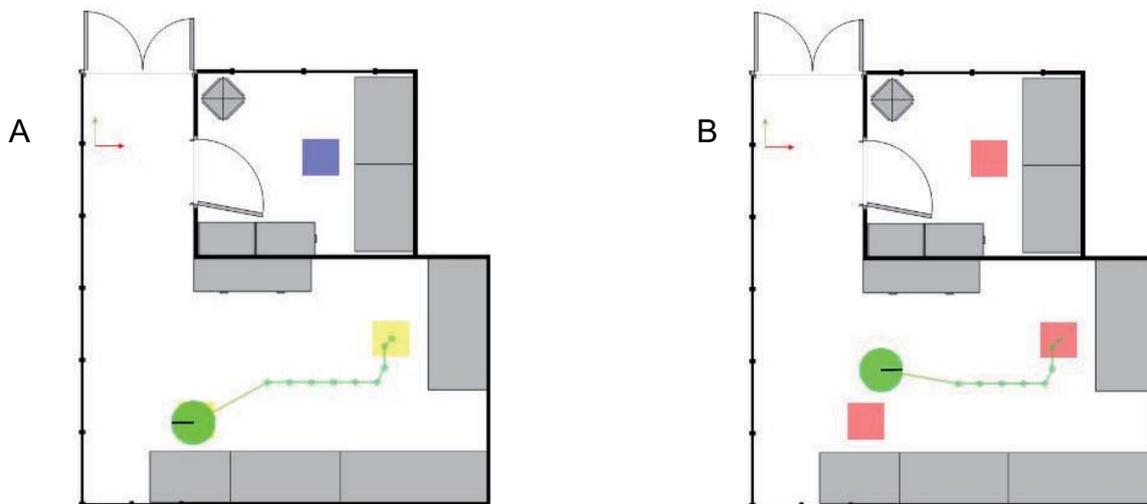


Abbildung 48: Ansichten interaktive Karte

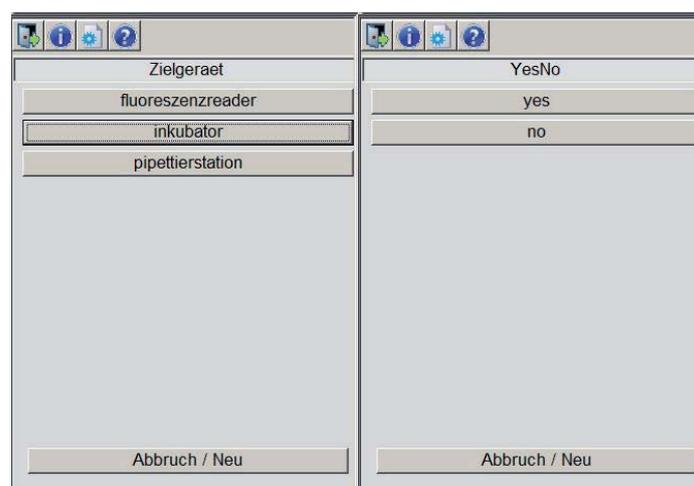
Die interaktive Karte zeigt eine schematische Aufsicht auf die statische Umgebung, in der LiSA sich bewegt. Hierfür war zunächst die Verwendung einer 3D-Engine vorgesehen, allerdings zeigte sich im Verlauf des Projektes, dass eine 3D-Ansicht in keinem Szenario wirklich notwendig oder tatsächlich hilfreich gewesen wäre. Da also nur die Aufsicht als Karte wirklich sinnvoll war, konnte die komplexe 3D-Darstellung zugunsten einer einfachen 2D-Ansicht aufgegeben werden. Dieser Schritt reduziert nicht nur den notwendigen Aufwand bei einem Ortswechsel von LiSA – es muss kein extra aufbereitetes 3D-Modell für die Engine bereitgestellt werden, sondern das einfache Anlegen einer Bild-Datei mit dem Grundriss der neuen Umgebung und Angaben zu Ausdehnung der Räumlichkeiten und Ursprung des genutzten Koordinatensystems genügen bereits. Weiterhin werden die Darstellungs- und somit die Reaktionsgeschwindigkeit des Systems erhöht, sowie der Energie-Bedarf und Wärmehausstoß des Grafik-Chips reduziert, da dieser nun keine komplexen 3D-Objekte verarbeiten muss.

Alle statischen Interaktions-Objekte, also Geräte und Räume, die dem System in dieser Umgebung bekannt sind, werden durch farbige Markierungen auf der Karte angezeigt, wobei die jeweilige Farbe vom derzeitigen Dialog-Status abhängt. Ist das

Objekt, welches durch diese Markierung repräsentiert wird, eine valide Eingabe für den aktuellen Dialog-Schritt, so wird gelbe Farbe verwendet (siehe Abbildung 48A - rechts), stellt es keine valide Eingabe dar, so wird es rot eingefärbt (siehe Abbildung 48B) und falls das Objekt bereits im vorhandenen Dialog benutzt wird, so wird dies durch blaue Farbe gekennzeichnet (siehe Abbildung 48A - oben). Diese farbigen Positionsmarkierungen können zur Eingabe von Orten oder Geräten an das System genutzt werden, da sie auf Berührung reagieren. Weiterhin werden die derzeitige Position und Orientierung des Roboters (grüner Kreis mit Richtungs-Markierung) sowie die aktuelle Wegplanung des Roboters (grüne Linie mit Wegpunkten) angezeigt.

Im Gegensatz zur interaktiven Karte, in der nur Orte und Geräte eingegeben werden können, bietet die Buttonliste eine vollständige Eingabe-Variante für jeden einzelnen Dialogschritt. Sämtliche Listenelemente haben die gleiche Größe und Form, welche so gewählt sind, dass sie sich speziell für einfache Click-Interaktion durch Touch-Pen bzw. Finger eignen. Welche Buttons aus dem vorhandenen Datensatz zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Liste angezeigt werden, ist direkt vom aktuellen Dialogschritt abhängig – alle möglichen Antworten für den aktuellen Dialogschritt werden als Buttons in der Liste dargestellt.

*Beispiel: Fragt der Dialog nach Zielgeräten, so werden die bekannten Geräte, welche als Zielgerät in Frage kommen in der Buttonliste angezeigt (siehe Abbildung 49 links), wird hingegen eine Bestätigung abgefragt – also eine Ja/Nein-Frage gestellt so erscheinen die Buttons „Yes“ und „No“ in der Liste (siehe Abbildung 49 rechts).*



**Abbildung 49: Buttonliste**  
Frage nach Zielgeräten (links); Entscheidungs-Frage (rechts)

### 5.6.5. Informationsbereich

Das Log-Fenster dient zur Ausgabe von Nachrichten an den Nutzer, wobei ebenso das Informieren über aktuelle Ereignisse als auch das Vorhalten von Informationen zum späteren Nachlesen möglich ist. Zur besseren Übersichtlichkeit werden Nachrichten über Fehler sowie Auftragsinformationen zusätzlich in je einem extra Log-Fenster angezeigt, zwischen denen per Reiter umgeschaltet werden kann (siehe Abbildung 50 oben). Für das Projekt LiSA wurden diese Nachrichten noch sehr technisch gehalten und darauf ausgelegt, Fehler im Programm möglichst schnell ausfindig machen zu können. Für einen späteren Einsatz als fertiges Produkt würden diese Ausgaben noch erheblich reduziert und für den Nutzer aufbereitet werden.

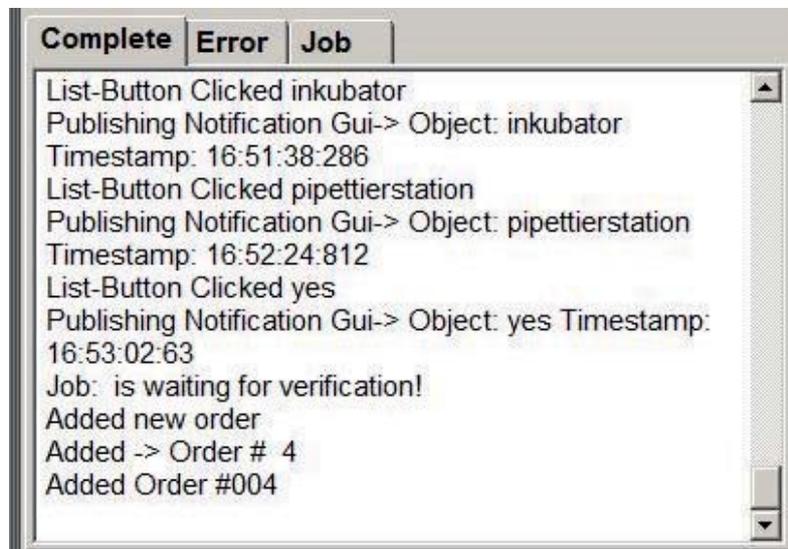


Abbildung 50: Log-Fenster

Die Auftragsliste besteht aus drei Einzelkomponenten. Die eigentliche Liste (Abbildung 51 links) zeigt eine Liste der aktuell im System vorhandenen Aufträge. Die Detailansicht (Abbildung 51 rechts) zeigt die Eigenschaften und Auftrags-Parameter des links selektierten Auftrags. Durch Betätigung des Delete-Order-Buttons (Abbildung 51 unten) kann der selektierte Auftrag aus dem System entfernt werden.

Order #001	Auftrags-Id: 003
Order #002	Nutzer-Id: SymDialog1
Order #003	Zeitstempel: 15.06.2009 16:47:03
Order #004	Messtyp: Proteinmessung
	Abholort: pipettierstation
	Zielort:
	Tasks: NAVIGATE_TO -> WAITING
	PICK_OBJECT -> WAITING
	PLACE_OBJECT -> WAITING
	OPEN_DEVICE -> WAITING
	NAVIGATE_TO -> WAITING
	PICK_OBJECT -> WAITING
Delete Order	

Abbildung 51: Auftragsliste

Das Status-Fenster (siehe Abbildung 52) zeigt im oberen Bereich den gegenwärtigen Zustand des Dialogs, indem die aktuellen Werte der einzelnen Dialog-Slots ausgeschrieben werden. Im unteren Bereich wird der derzeitige Zustand des LiSA-Roboters angezeigt, wobei sich dies bisher auf Position, Ausrichtung und Tätigkeit von LiSA beschränkt.

Dialog-Slots	
Auftragstyp:	transport
Messtyp:	
Abholort:	
Abholgeraet:	inkubator
Zielort:	
Zielgeraet:	pipettierstation
Fehlermeldung:	
Auftrag:	
Auftragsstatus:	
Lisa-Status	
Status:	DRIVING
Pose:	<1.35, -3.81> 3.14

Abbildung 52: Status-Fenster

## 5.7. Softwarearchitektur

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Teilprobleme sind die Voraussetzung für komplexere Abläufe, die der LiSA-Roboter zur Erfüllung einer Aufgabe ausführen muss. Um diese Abläufe zentral zu steuern und zu überwachen, ist eine komponentenbasierte, verteilte Softwarearchitektur notwendig. Diese Architektur stand nicht im Forschungsfokus des LiSA-Projektes, sondern wurde pragmatisch für diesen speziellen Einsatzfall entworfen und umgesetzt.

Anforderungen, die beim Design des verteilten Softwaresystems berücksichtigt wurden, sind u. a.:

- *Einheitliche Schnittstellen*, um die Kommunikation zwischen Modulen zu standardisieren und zu vereinfachen.
- *Plattformunabhängigkeit*, da bereits Vorarbeiten der Projektpartner auf unterschiedlichen Betriebssystemen existierten.
- *Transparenz*, um die Entwickler von Detailproblemen der Kommunikation zwischen den Modulen zu entlasten.
- *Erweiterbarkeit*, um flexibel auf neue Anforderungen reagieren zu können, die sich im Projektverlauf ergeben.
- *Integration vorhandener Software*, um Vorarbeiten der Projektpartner wiederverwenden zu können.

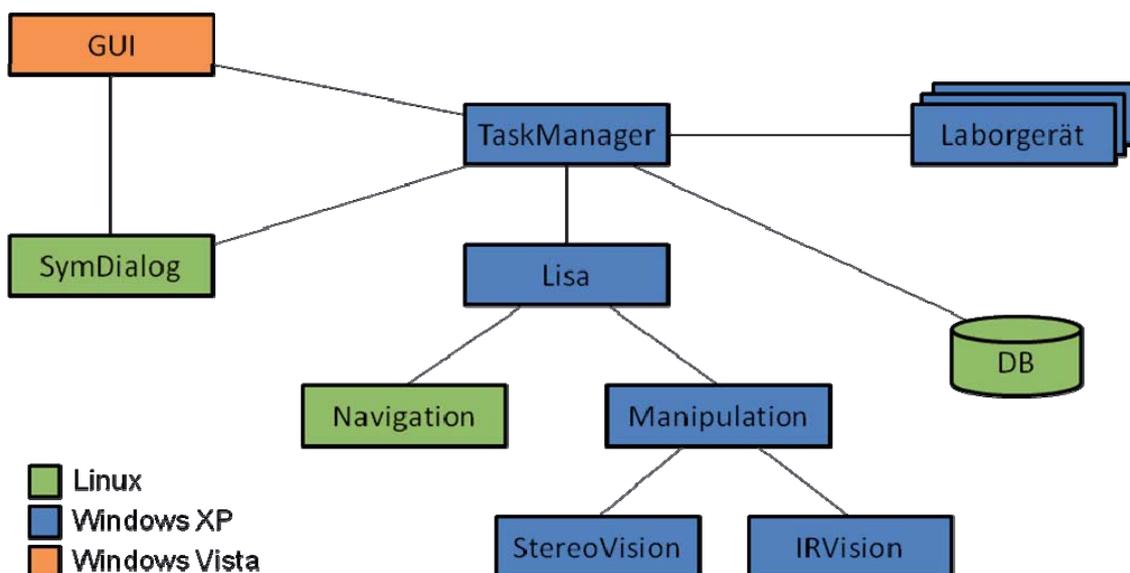


Abbildung 53: Modularisierung des Softwaresystems zur Steuerung des LiSA-Roboters.  
Die Farbe gibt das für das jeweilige Modul festgelegte Betriebssystem an.

### 5.7.1. Softwaremodule

Anhand der Analyse der Anforderungen an das Gesamtsystem wurde die in Abbildung 53 dargestellte Aufteilung in Module festgelegt. Die Farbe der Module gibt das jeweils festgelegte Betriebssystem an. Die Funktion der einzelnen Module wird im Folgenden kurz erläutert:

- **TaskManager:** Der TaskManager ist die zentrale Komponente des LiSA-Systems. Er erhält Aufträge, die vom Benutzer über SymDialog angelegt werden, zerlegt die Aufträge in Teilaufgaben (Tasks) und leitet diese an die entsprechenden ausführenden Module weiter. Er überwacht die Abarbeitung der Tasks und stößt ggf. die nächste Aufgabe an. Status- und Fehlernachrichten, die der TaskManager von anderen Modulen erhält, werden an SymDialog weitergeleitet.
- **SymDialog:** Dieses Modul bietet die Benutzerschnittstelle zur Sprachein- und -ausgabe. SymDialog kommuniziert mit dem TaskManager und übergibt diesem vollständig ausgefüllte Auftragsobjekte. Nach jedem Dialogschritt teilt SymDialog den Inhalt aller Slots sowie den Fokus der nächsten Systemäußerung (z. B. „Nachfrage nach Objekttyp“ oder „Bestätigungsfrage für Zielort“) dem GUI-Steuerungsmodul mit, um die Anzeige zu aktualisieren.
- **GUI:** Das GUI-Steuerungsmodul leitet Eingabe-Events an SymDialog weiter. Jedes Eingabe-Event setzt sich zusammen aus einem Objekt (z. B. Raum, Gerät, Aktions-Button etc.) und einem Zeitstempel. Außerdem erhält das GUI-Modul Nachrichten über den Systemzustand, um etwa die aktuelle Position des LiSA-Roboters in der Karte anzuzeigen.
- **Laborgerät:** Dieses Modul dient zur Ansteuerung von Laborgeräten wie etwa einem Fluoreszenzreader. Die Schnittstelle bietet die Möglichkeit, den Einzug des Gerätes zu öffnen bzw. zu schließen oder eine Messung zu starten.
- **LiSA:** Das Modul LiSA bildet die Schnittstelle zu allen auf dem Roboter installierten Softwarekomponenten, d. h. zu Navigation, Manipulation und den Bildverarbeitungsmodulen. Das LiSA-Modul erhält Tasks vom TaskManager und reicht diese an die zuständige Instanz der Navigation bzw. der Manipulation weiter. Dabei überwacht das LiSA-Modul den Zustand der entsprechenden Komponenten, um beispielsweise sicherzustellen, dass der Manipulator während der Fahrt in Parkposition ist. Fehler werden vom LiSA-Modul an den TaskManager weitergeleitet.

- **Navigation:** Das Modul Navigation kapselt alle Informationen ab, die die Navigation des LiSA-Roboters betreffen und mit nicht-Navigationsmodulen ausgetauscht werden. So nimmt das Modul Fahraufträge an und stellt Informationen über den aktuellen Zustand und die Position des Roboters zur Verfügung.
- **Manipulation:** Das Modul Manipulation vereinigt alle Schnittstellen, die für die Steuerung und Sicherheitsüberwachung von Manipulator-Arm und Greifer zuständig sind. Das Modul bekommt Tasks vom LiSA-Modul, spaltet diese in atomare Schritte auf und führt diese Schritte nacheinander aus.
- **StereoVision:** Dieses Modul ist für die Ansteuerung und Datenverarbeitung der Greiferkamera(s) zuständig. Es erkennt und vermisst in den Kamerabilddern die Lage von Objekten, die gegriffen werden sollen.
- **IRVision:** Dieses Modul ist für die Ansteuerung und Datenverarbeitung der IR-Kamera zuständig. Es erkennt, ob sich eine Person im Arbeitsbereich des Manipulators befindet. Ggf. wird dies dem Modul Manipulation mitgeteilt, das daraufhin die Bewegung des Arms stoppt.
- **DB:** Die Datenbank speichert die aktuellen Aufträge und den Stand ihrer Bearbeitung. Der Zugriff geschieht über den TaskManager. Darüber hinaus werden hier Daten über das Weltmodell abgelegt, wie etwa die Positionen von Laborgeräten.

Um den Datenfluss übersichtlich zu halten, werden Nachrichten zwischen den Modulen nur über die im Diagramm in Abbildung 53 eingezeichneten Kommunikationswege versendet.

### 5.7.2. Umsetzung

Zur Realisierung der Kommunikation wurde zunächst ein Datentyp *LiSNotification* definiert, wie in Abbildung 54 zu sehen. Neben Absender (*from*) und Empfänger (*to*) enthält die Klasse die Felder *type* und *subtype*, die die Art der Nachricht spezifizieren. Die Werte für *type* und einige Beispiele für *subtype* können Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 entnommen werden. Außerdem enthält *LiSNotification* einen Prioritätswert (*priority*), um beispielsweise Fehlnachrichten bevorzugt zu versenden, und einen optionalen Zeiger auf ein Datenelement. *ILiSData* ist dabei das obligatorische Interface für alle Datenelemente, die zusammen mit den Nachrichten versendet werden können. Die Streaming-Operatoren müssen eine Serialisierung bzw.

Deserialisierung des Datenobjektes implementieren. Beispiele für solche Datenklassen sind *Pose2D* (zur Repräsentation der Roboterposition) oder *Order* (ein Auftrag).



Abbildung 54: Definition des Datentyps für Nachrichten zwischen den Softwarekomponenten. Das Interface *LiSAData* wird von allen Datentypen implementiert, die zwischen Modulen verschickt werden.

Alle in Abschnitt 5.7.1 aufgeführten Softwaremodule werden von einer gemeinsamen Basisklasse *LiSABase* abgeleitet, die die Kommunikationsinfrastruktur bereitstellt. Jede Instanz beinhaltet dabei ein sogenanntes *Dispatcher*-Objekt, welches über TCP-Streamsockets Nachrichten an andere Module versendet bzw. von diesen empfängt, wie in Abbildung 55 skizziert. Die verwendeten IP-Adressen und Ports aller Module werden in festgelegter Form als XML-Konfigurationsdatei bei der Initialisierung angegeben.

Die *LiSABase*-Klasse definiert u. a. die folgenden Methoden:

- **publishNotification**: dient zum Senden einer Nachricht an eines (oder mehrere) Module. Die Nachricht wird in eine Message-Queue geschrieben und vom Dispatcher versendet. Der Aufruf kehrt sofort zurück.
- **requestNotification**: dient zum Senden einer Request-Nachricht (type REQ). Der Aufruf blockiert, bis der Empfänger mit einer Nachricht des Typs ACK bzw. NACK geantwortet hat.
- **processNotification**: In dieser Methode wird die nächste ankommende Nachricht behandelt. Die Methode muss von abgeleiteten Modulen überschrieben und in periodischen Abständen aufgerufen werden.

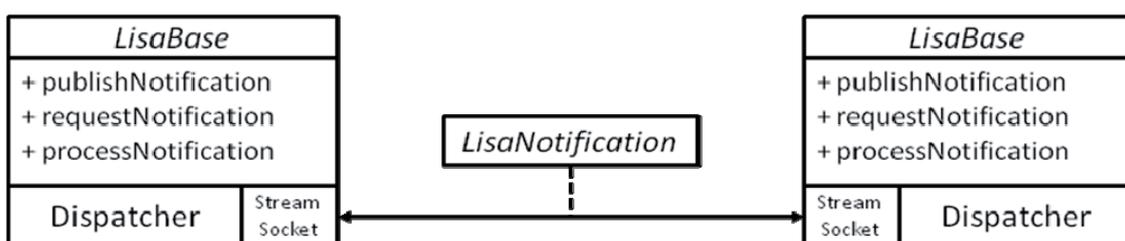


Abbildung 55: Kommunikation zwischen Modulen: Ein Dispatcher-Objekt versendet Nachrichten über TCP-Stream-Sockets zwischen den Modulen.

Alle am LiSA-System beteiligten Softwaremodule sind von *LiSABase* abgeleitet.

Type	Beschreibung
DATA	Senden von Daten nach dem Push-Prinzip.
CMD	Auslösen einer Aktion in einem anderen Modul.
REQ	Anfordern von Daten nach dem Pull-Prinzip bzw. Ausführen eines Befehls mit Warten auf Bestätigung. Vom Empfänger muss eine Antwort vom Typ <code>ACK</code> bzw. <code>NACK</code> mit dem gleichen Subtyp und den evtl. angeforderten Daten zurückgesendet werden.
ACK	Positive Antwort auf eine <code>REQ</code> -Nachricht.
NACK	Negative Antwort auf eine <code>REQ</code> -Nachricht.
FAILURE	Fehler-Nachricht. Der Subtyp beschreibt den Fehler genauer.
FAILURE_RESOLVED	Rücknahme eines Fehlers. Der Subtyp beschreibt den Fehler genauer.

Tabelle 2: Liste der Nachrichten-Typen.

type	subtype	Beschreibung
DATA	ORDER_ADDED	Wird vom TaskManager versendet, wenn ein neuer Auftrag erteilt wurde. Die GUI kann daraufhin die Auftragsliste aktualisieren.
	ORDER_DELETED	Wird vom TaskManager versendet, wenn ein Auftrag gelöscht wurde. Die GUI kann daraufhin die Auftragsliste aktualisieren.
	TASK_COMPLETED	Ein Teilauftrag wurde abgearbeitet. Der TaskManager kann den nächsten Task anstoßen und die GUI kann die Auftragsliste aktualisieren.
	ORDER_COMPLETED	Ein Auftrag wurde erledigt.
CMD	GUI_EVENT	Nachricht von der GUI an SymDialog, wenn eine Aktion ausgeführt wird.
	MOVE_MANIPULATOR	Der Manipulator wird auf eine bestimmte Position gefahren.
	STOP_MANIPULATOR	Der Manipulator wird angehalten.

REQ	ADD_ORDER	Hinzufügen eines neuen Auftrags. GUI bzw. SymDialog blockieren, bis der Auftrag angenommen bzw. abgelehnt ist.
ACK		
NACK	DELETE_ORDER	Löschen eines Auftrags.
	EXECUTE_TASK	Wird vom TaskManager an die ausführenden Module gesendet, um Teilaufträge auszuführen.
	GET_STATUS	Abfrage des Zustands eines anderen Moduls.
	CV_POSE	Abfrage der Objektpositionen von der Bildverarbeitung. Parameter werden als Datenobjekt mitgeschickt.
	FREE_CV_POSE	Abfrage einer freien Ablageposition von der Bildverarbeitung. Parameter werden als Datenobjekt mitgeschickt.
FAILURE	NO_PATH	Das Navigationsmodul konnte keinen Pfad zur aktuellen Zielposition berechnen.
FAILURE_RESOLVED	SICK_SAFETY_AREA	Das Schutzfeld der Sick-Laserscanner wurde ausgelöst und die Plattform angehalten.
	NO_OBJECT	Die Bildverarbeitung konnte das erwartete Objekt nicht erkennen.
	NO_FREE_POSITION	Die Bildverarbeitung konnte keine freie Ablageposition erkennen.

**Tabelle 3: Beispiele für Nachrichten-Subtypen.**

In Abbildung 56 ist ein Beispiel für die Kommunikation zwischen den Modulen zu sehen. Das Diagramm zeigt die Folge von Aufrufen zur Erfüllung eines einfachen Fahrauftrages. Über *SymDialog* wird ein Auftrag angelegt („*Fahre zum Fluoreszenzreader!*“). Das Auftragsobjekt wird an den *TaskManager* gesendet (REQ, ADD\_ORDER), der den Auftrag prüft und die Annahme bestätigt (ACK, ADD\_ORDER). Der *TaskManager* zerlegt das Auftragsobjekt in einzelne Tasks. In diesem Fall ist dies nur ein einziger Navigationsbefehl. Der Task wird über das *LiSA*-Modul an die *Navigation* gesendet (REQ, EXECUTE\_TASK). Wenn die Zielpose erreicht ist, teilt das *Navigation*-Modul

dies dem *LiSA*-Modul bzw. dem *TaskManager* mit (DATA, TASK\_COMPLETED), woraufhin der *TaskManager* den Auftrag als erfüllt erkennt und dies wiederum *SymDialog* mitteilt (DATA, ORDER\_COMPLETED).

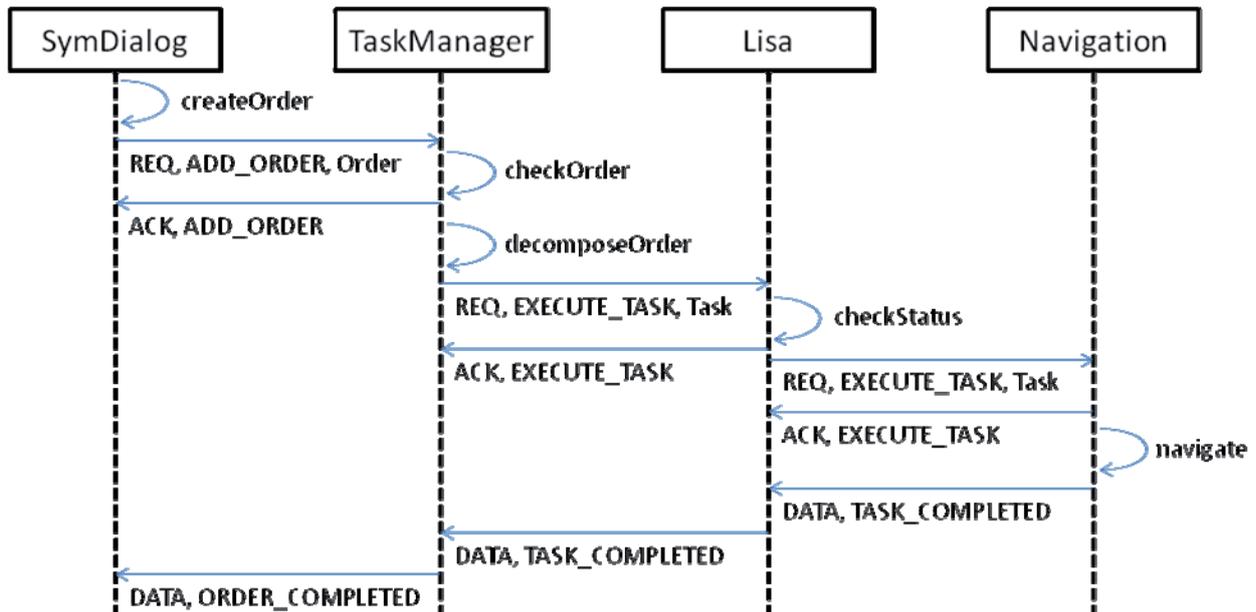


Abbildung 56: Beispiel für die Kommunikation zwischen LiSABase-Modulen. Es ist die erfolgreiche Abarbeitung eines einfachen Navigationsauftrags dargestellt („Fahre zum Fluoreszenzreader!“)

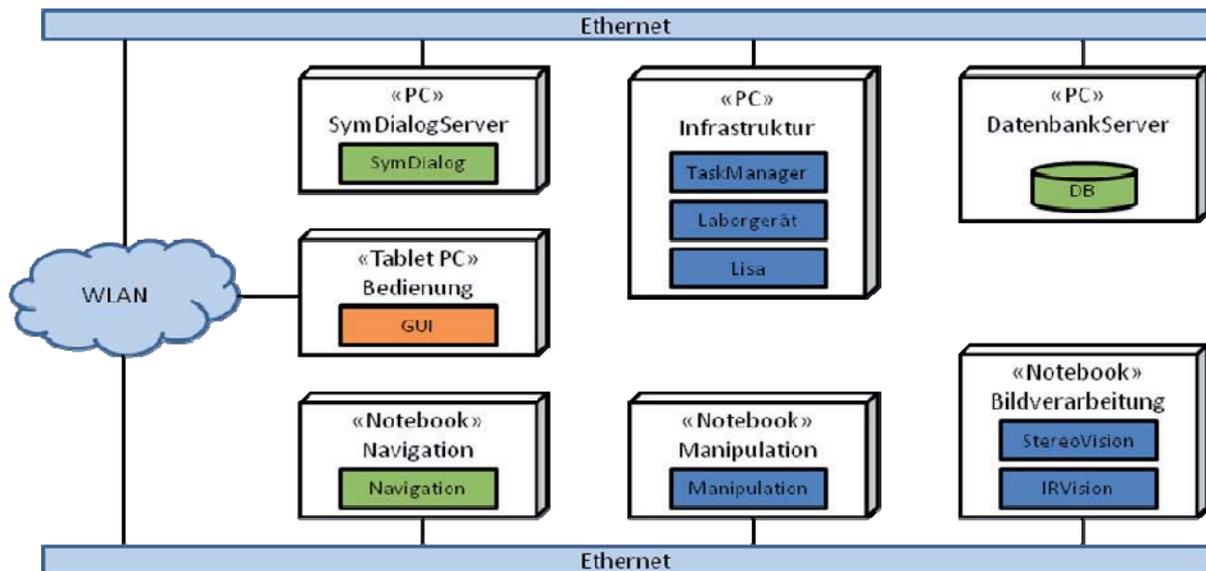
### 5.7.3. Verteilung

Am LiSA-Gesamtsystem sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt sieben Computer beteiligt, auf die die Softwaremodule verteilt sind. Die Aufteilung ist schematisch in Abbildung 57 dargestellt.

Im Labor-LAN befinden sich ein Linux-PC (openSUSE 11.0) für *SymDialog* und ein Windows-PC (Windows XP) für den *TaskManager*, das *LiSA*-Modul und die Steuerung des Fluoreszenzreaders. Als Datenbank wird ein MySQL-Server verwendet, der auf einem virtuellen Linux-PC installiert ist.

Auf dem LiSA-Roboter befinden sich drei Notebooks für die Navigation (Samsung P55, openSUSE 10.3), die Manipulation (Dell Latitude D510, Windows XP) und die Bildverarbeitung (Samsung P50, Windows XP), die untereinander über Ethernet verbunden sind.

Der tragbare Bedienrechner (HP TouchSmart tx2, Windows Vista), an dem auch das Headset für die Spracheingabe angeschlossen ist, ist über WLAN mit den anderen beiden Teilnetzen verbunden.



**Abbildung 57: Aufteilung der Softwaremodule auf die verwendeten Rechner.**  
 Der obere Ethernet-Strang repräsentiert die Netzwerkinfrastruktur des Labors.  
 Der untere Strang das Onboard-LAN des LiSA-Roboters. Die beiden Teilnetze sind untereinander  
 und mit dem tragbaren Bedienrechner über WLAN verbunden.

## 5.8. Sicherheitskomponenten: Künstliche Haut

Im Gegensatz zu klassischen Industrierobotern, die abgeschirmt durch massive Stahlzäune ihren Dienst verrichten, operiert der LiSA Roboter in der direkten Umgebung des Menschen.

Dabei bewegt er sich nicht nur im Arbeitsraum des Menschen, auch Berührungen zwischen Mensch und Roboter sind möglich. Die Sicherheit und der Schutz des Menschen standen daher von Projektbeginn an im Mittelpunkt des Interesses. Ausgangspunkt der Entwicklung war eine zu Projektbeginn durchgeführte Risikoanalyse, in der das Roboterkonzept und die vorgesehenen Einsatzszenarien, hinsichtlich des Gefahrenpotentials analysiert wurden. Die Risikoanalyse diente im weiteren Projektverlauf als Grundlage für den Entwurf des Sicherheitssystems und die Auswahl der Sicherheitskomponenten.

Bereits in dieser frühen Projektphase zeigte sich jedoch, dass besonders Risiken, die durch die Bewegung des Manipulators (Stoß, Quetschung, Scherung) entstehen, nur unzureichend mit etablierten Sicherheitskomponenten vermindert werden können.

Es wurde daher parallel zu den Arbeiten am LiSA-Roboter ein Sensorsystem zur großflächigen Kollisionserkennung entwickelt, welches geeignet ist, die existierende Lücke im Bereich der Sicherheitstechnologie zu schließen.

### 5.8.1. Ausgangssituation – Risikoanalyse

Die Risikoanalyse wurde gemäß der zu Projektbeginn noch gültigen Norm EN 1050 – „Sicherheit von Maschinen - Leitsätze zur Risikobeurteilung“ durchgeführt. Eine Anpassung an die EN ISO 14121-1 - „Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 1: Leitsätze“, welche die EN 1050 im Jahr 2008 abgelöst hat, wurde nicht vorgenommen.

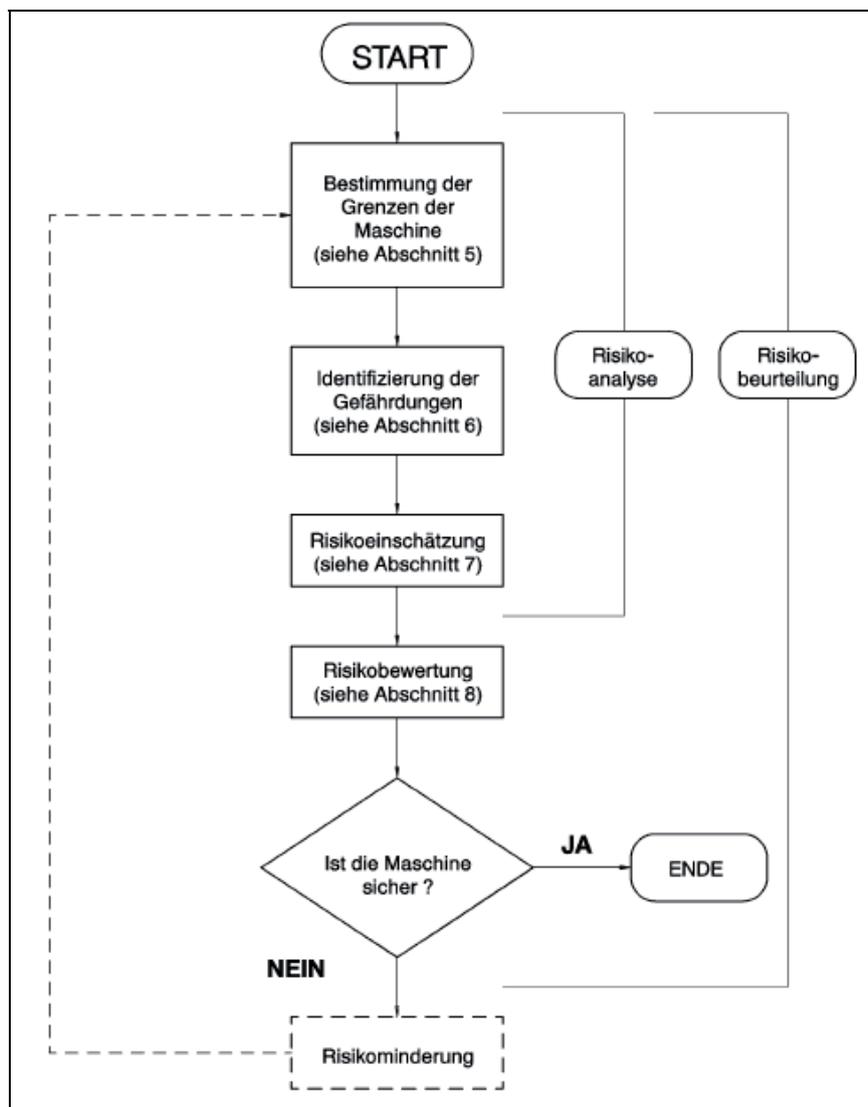


Abbildung 58: Iterativer Prozess zum Erreichen der Sicherheit gemäß DIN EN 1050 (Leitsätze zur Risikobeurteilung; S. 4)

Wie in Abbildung 58 dargestellt erfolgt die Risikoanalyse stets in Form eines iterativen Prozesses. Gemäß diesem Ablaufplan wurden auch im Rahmen des LiSA-Projektes zunächst die Grenzen und der bestimmungsgemäße Gebrauch des LiSA-Roboters festgelegt (Abbildung 59).

**„Grenzen und bestimmungsgemäße Verwendung des LiSA Roboters“**

Der autonome Laborroboter LiSA ist vorgesehen für die Durchführung von Logistikaufgaben in Laboren von Life-Science-Unternehmen. Der Einsatzbereich ist dabei beschränkt auf Biolabore der Stufe S1 (gentechnische Arbeiten, kein Risiko für Mensch und Umwelt) bzw. R1 (biologische Arbeitsstoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie eine Krankheit verursachen). Verlässt LiSA den zugelassenen Laborbereich, so ist mindestens eine Dekontamination von Greifer und Ablagefläche vorzusehen. In Laborbereichen mit höheren Sicherheitsstufen darf LiSA nicht operieren, diese dürfen von LiSA auch nicht durchfahren werden. Der Arbeitsraum in dem LiSA autonom operiert, muss LiSA bekannt sein (z.B. durch Teachin / erstellen der 3D Map während der Inbetriebnahmephase). Die Navigation erfolgt mit Hilfe von zertifizierten Laserscannern. Eine hardwareseitige Begrenzung des Arbeitsraumes ist nicht notwendig.

LiSA operiert weiterhin unabhängig von externer Stromversorgung. Hierfür ist LiSA mit internen Akkus ausgestattet.

LiSA erhält Transportaufträge von den Labormitarbeitern multimodal über Sprache oder Touchpadeingaben. Die Spracheingaben erfolgen über Headsets und für die Touchpadeingaben sind Tablet PCs bzw. ein an LiSA angebrachter Touchscreen vorgesehen. Die Kommunikation zwischen den Eingabegeräten und LiSA erfolgt via (W)LAN. Erhält LiSA mehrere Transportaufgaben, so werden diese mit Hilfe eines Taskplaners zeitoptimiert abgearbeitet.

Als Transportobjekte sind ausschließlich Mikrotiterplatten in den Standardabmessungen 13 cm x 8,5 cm x 1,5 cm zugelassen.

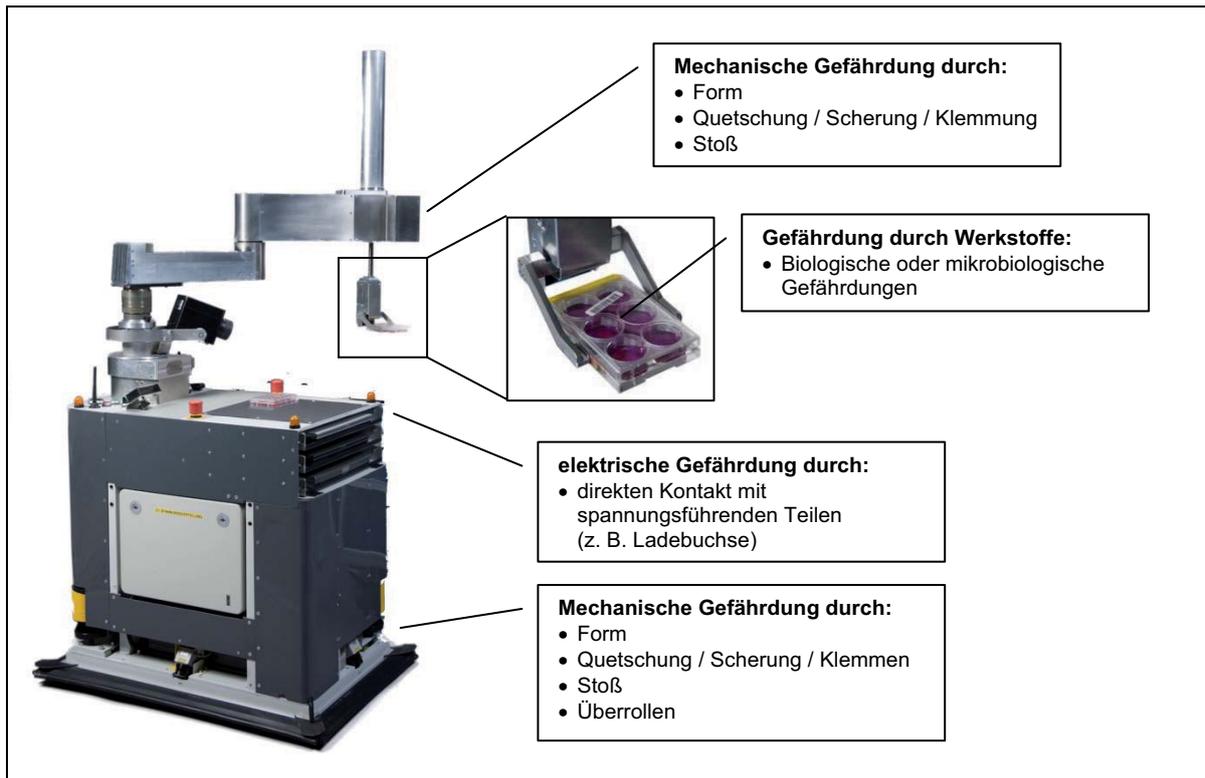
LiSA verfügt über die Betriebsarten Hand / Automatikbetrieb. Der Handbetrieb dient zum Verfahren von LiSA von Hand um z.B. Verklemmungen o.Ä. aufzulösen. Das Verfahren im Handbetrieb erfolgt mit reduzierter Geschwindigkeit und Bedarf der Betätigung eines 2 stufigen Zustimmungstasters.

Im Automatikbetrieb operiert LiSA vollständig autonom, Nutzereingaben dienen nur der Vorgabe von Transportaufträgen. Im Automatikbetrieb lassen sich die Betriebsmodi „Fahren“ und „Manipulieren“ unterscheiden.

Abbildung 59: Grenzen und bestimmungsgemäße Verwendung des LiSA Roboters

Darauf aufbauend erfolgte anschließend die Identifikation und Bewertung der durch die Bauart und das Betriebsverhalten bedingten Risiken des zu diesem Zeitpunkt konzipierten LiSA-Roboters. Die Risikoidentifikation erfolgte gemäß EN 1050, Anhang A.

Anschließend wurden die festgestellten Risiken bewertet und entsprechende Maßnahmen zur Risikominderung ergriffen. Diese Maßnahmen umfassten sowohl konstruktive Veränderungen als auch die Integration von Sicherheitssensorik in den Roboteraufbau.



**Abbildung 60: Auszug aus der Risikoanalyse**  
**Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF**

In Abbildung 60 sind beispielhaft einige Risiken dargestellt, die im Rahmen der Risikoanalyse ermittelt wurden. Den größten Risikofaktor stellt dabei die Roboterbewegung dar. Dies spiegelt sich auch in der Auslegung des Sicherheitssystems wider, dessen Schwerpunkt auf Sensorkomponenten liegt, die Kollisionen entweder vermeiden oder diese in ihrer Kraft begrenzen.

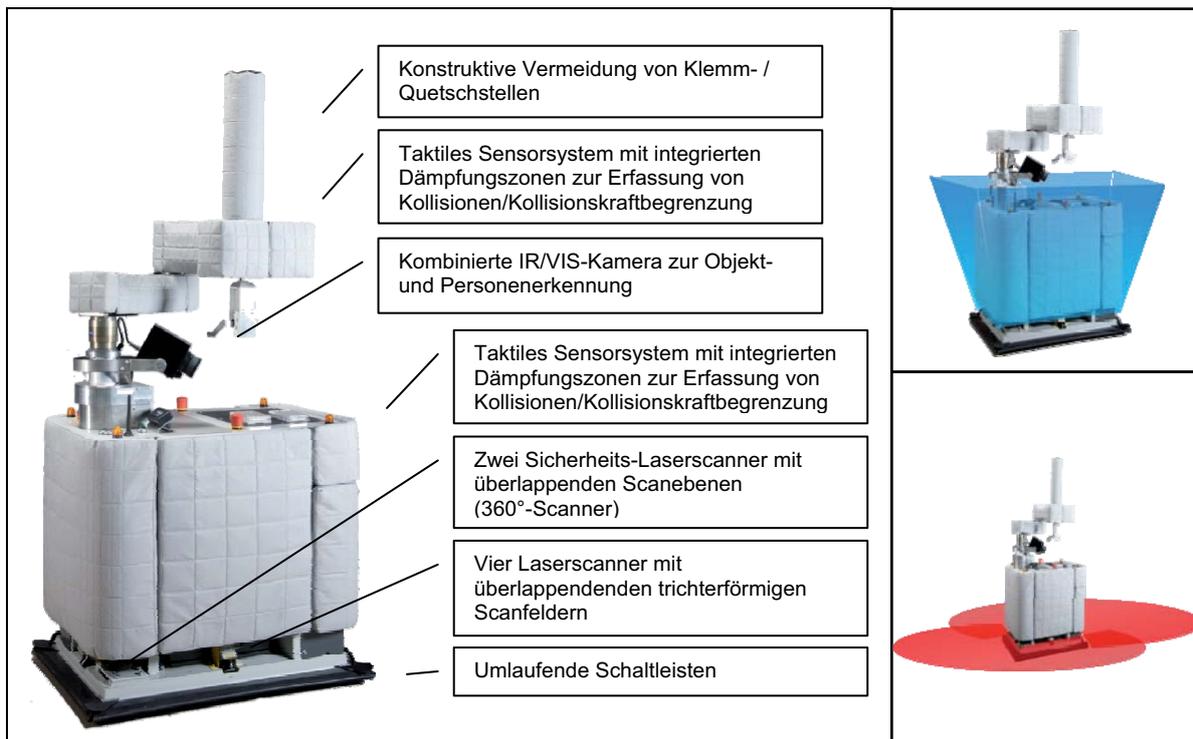
### 5.8.2. Sicherheitssystem

Abbildung 61 zeigt die wichtigsten Komponenten und Maßnahmen zur Absicherung des LiSA-Roboters. Das Sicherheitssystem ist in zwei Sicherheitskreise gegliedert. Sicherheitskreis 1 dient der Absicherung der mobilen Plattform. Auf Grund der hohen Masse und dem damit verbundenen Gefahrenpotential kommen hier in erster Instanz Laserscanner zum Einsatz, die die Annäherung an Objekte und Personen erkennen und die mobile Plattform ggf. stillsetzen. Für den unwahrscheinlichen Fall, dass diese Laserscanner versagen, verfügt die mobile Plattform zusätzlich über umlaufende Schaltleisten und ein vollflächig aufgebrachtes taktiles Sensorsystem, mit denen Berührungen erkannt und in Ihrer Kraft begrenzt werden können. Für den Sicherheitskreis 1 lässt sich folgende Sicherheitsstrategie ableiten:

*Annäherung erkennen → Annäherung bewerten → Roboter stillsetzen*

Der zweite Sicherheitskreis umfasst Sensorkomponenten, die zur Absicherung des Manipulators dienen. Hier wurde auf Grund der geringen Masse und Bewegungsgeschwindigkeit auf vorausschauende Sensorik verzichtet. Stattdessen wurde der Manipulator in seinen Bewegungsrichtungen mit einem taktilen Sensorsystem bedeckt. Die Sicherheitsstrategie für den Sicherheitskreis 2 lautet somit:

*Berührung erkennen → Berührung bewerten → Roboter stillsetzen*



**Abbildung 61: Komponenten des Sicherheitssystems, Scanfelder der Laserscanner**  
Fotos: B. Liebl/Fraunhofer IFF

In Abbildung 62 ist die logische Verknüpfung der beiden Sicherheitskreise dargestellt. Sicherheitskreis 1 umfasst neben den bereits genannten Laserscannern und Taktilensoren zusätzlich einen Schaltausgang der SPS und des Bahnreglers, somit können Fehlerzustände innerhalb der Steuerung ebenfalls die Bewegung der mobilen Plattform stoppen.

Zusätzlich ist der Sicherheitskreis 2 mittels UND Verknüpfung in den Sicherheitskreis 1 eingebunden, wodurch auch Fehlerzustände, die am Manipulator auftreten die Bewegung der mobilen Plattform unterbrechen.

Fehlerzustände der mobilen Plattform wirken sich hingegen nicht auf den Manipulator aus, da die Plattform während der Manipulatorbewegung still steht und beide Steuerungen voneinander unabhängig operieren.

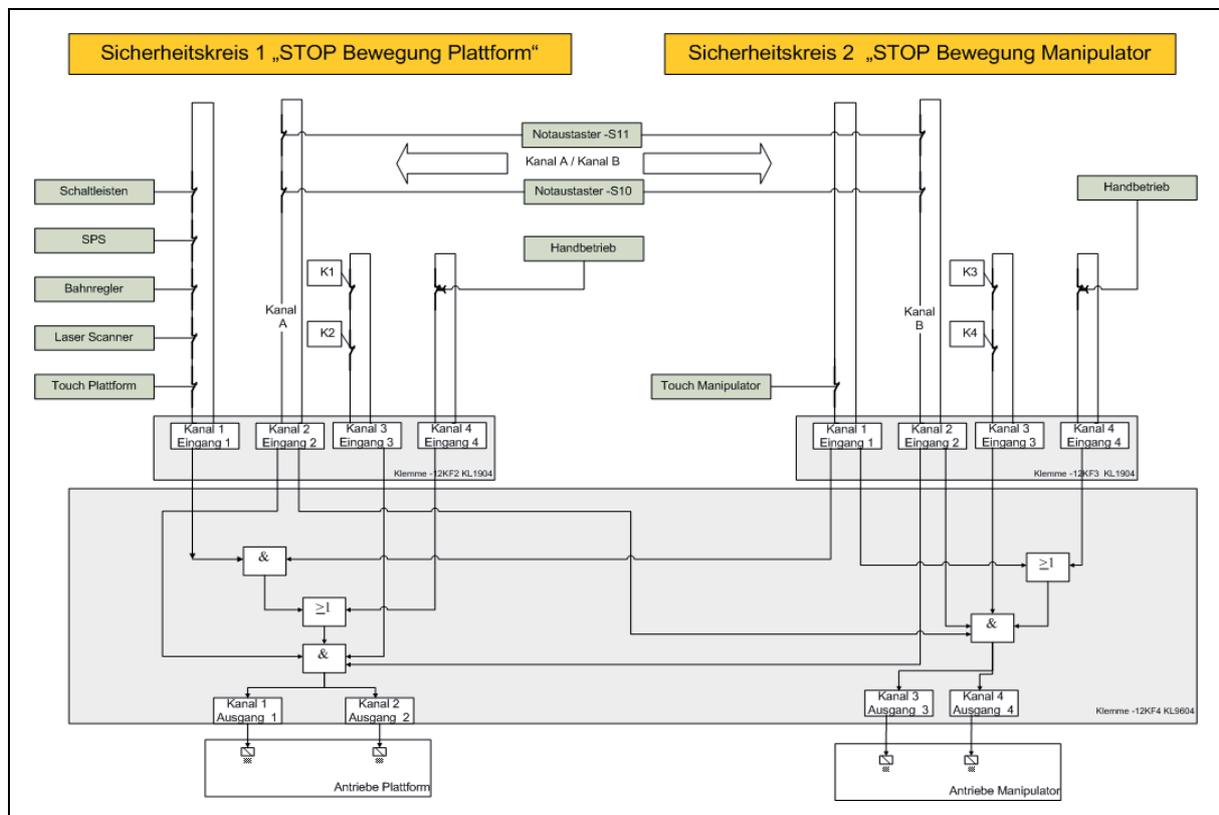


Abbildung 62: Verknüpfung der Sicherheitskreise

Als weitere Sicherheitseinrichtung verfügt der LiSA-Roboter über zwei auf der mobilen Plattform angebrachte Not-Aus-Taster, die auf beide Sicherheitskreise wirken. An den Ecken angebrachte Blinker dienen als Fahrtrichtungsanzeiger und Warnleuchten, um z. B. das Anfahren des Roboters zu signalisieren.

### 5.8.3. Die „künstliche Haut“ des LiSA-Roboters – Stand der Technik

Die Absicherung der Manipulatorbewegung stellte im Rahmen des LiSA-Projektes eine besondere Herausforderung dar. Da in klassischen Roboteranwendungen keine Interaktion zwischen Mensch und Roboter möglich ist, existierten zu Projektbeginn lediglich einige wenige Ansätze, die geeignet erschienen, großflächig Berührungen an Roboterstrukturen zu erfassen.

So ermöglicht der KUKA KR3-SI [1], ein 6-Achs-Roboter für geringe Handhabungsgewichte, bereits heute den sicheren Betrieb an der Seite des Menschen. Möglich wird dies durch Abstands- und Kollisionssensoren, die bei Annäherung zunächst die

Geschwindigkeit des Roboters reduzieren und bei einer Berührung einen Sicherheitshalt initiieren. Da die Interaktionskräfte nicht orts aufgelöst erfasst werden, sind aktive Ausweichstrategien oder die Verwendung des Sensorsystems als haptisches Interface nur bedingt möglich.

Im Gegensatz dazu bietet der DLR-Leichtbauarm [2] dank umfassend instrumentierter Gelenke die Möglichkeit, alle auf den Roboterarm einwirkenden Kräfte und Momente zu erfassen und auszuwerten. Der Roboter ist somit in der Lage, Kollisionen zu erkennen und Berührungen direkt in Bewegungsimpulse umzusetzen.

Diese einzigartige Fähigkeit erfordert jedoch neben komplexen Kontrollarchitekturen auch einen sehr hohen Hardware- bzw. Kostenaufwand.

Neben diesen komplexen Ansätzen zur Berührungserkennung und Absicherung eines Roboters in der direkten Mensch-Roboter-Interaktion zeichnet sich der Ansatz, einen Roboter mit einer druckempfindlichen Haut auszustatten, durch einfache Adaptierbarkeit, Vielseitigkeit und vergleichsweise geringe Kosten aus.

In der Literatur finden sich verschiedene Sensorsysteme zur flächigen, orts aufgelösten Druckerfassung. Diese zielen jedoch in der Regel auf Anwendungen im Medizin- und Komfortbereich ab und dienen der hoch aufgelösten Erfassung von Druckverteilungen [3-5]. Fehlende Möglichkeiten zur Selbstüberwachung und Integration von Dämpfungszonen, als auch Probleme bei der Anpassung an komplexe Geometrien schränken die Einsetzbarkeit dieser Sensorsysteme als Kollisionssensor jedoch stark ein.

Taktile Sensorsysteme, die speziell für den Einsatz im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion entwickelt wurden, beschränken sich meist auf die Bereitstellung haptischer Informationen zur Beeinflussung der Roboterbewegung [6, 7] oder zur Überwachung von Greifprozessen [8].

Es erschien somit nahe liegend, gerade unter Einbeziehung der Sicherheitsaspekte, einen neuartigen Lösungsansatz zur sicheren Kollisionserkennung zu erarbeiten.

#### **5.8.4. Die „künstliche Haut“ des LiSA-Roboters – Technologie**

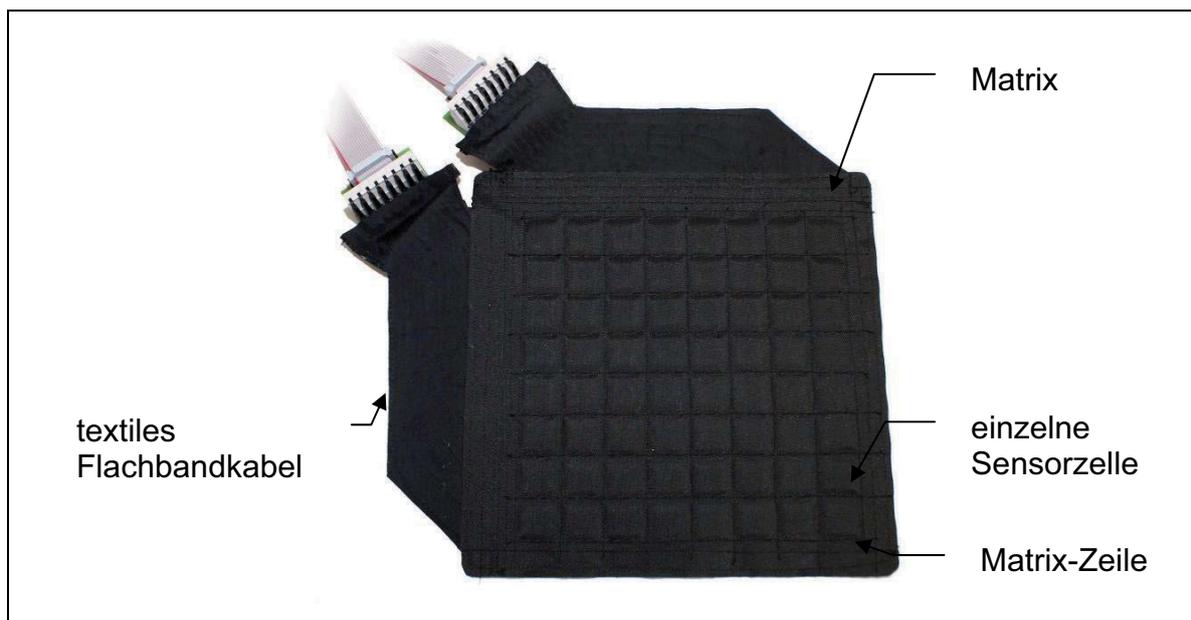
Im Vergleich zu klassischen Schaltleisten bzw. -matten, die lediglich signalisieren können, dass eine Berührung stattgefunden hat, liefert die künstliche Haut zusätzlich Informationen über den Ort der Berührung und die dabei auftretenden Kräfte. Durch intelligente Sensordatenverarbeitung können so Berührungen analysiert und zulässige von unzulässigen Berührungen unterschieden werden. Wird eine unzulässige

Berührung erkannt, so können nachfolgende Sicherheitskreise z. B. einen Sicherheitshalt oder eine aktive Ausweichbewegung einleiten. Aber auch die Überwachung von zulässigen Berührungen wie z. B. das Greifen von Objekten wird durch den Einsatz der künstlichen Haut möglich.

Dabei kann die künstliche Haut in Form und Messperformance der jeweiligen Applikation derart angepasst werden, dass selbst komplizierte Geometrien vollflächig bedeckt und entsprechend abgesichert werden können.

Die im Rahmen der Sensorentwicklung durchgeführten Arbeiten umfassten neben der Entwicklung eines geeigneten Messaufnehmers, auch die Auswerteelektronik, die Datenverarbeitung sowie die Einbindung der Sensordaten in die Robotersteuerung. Die mit dem geplanten Einsatz des Sensorsystems als Sicherheitssensor einhergehenden Forderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Diagnosefähigkeit haben die Entwicklungsarbeit dabei von Beginn an maßgeblich geprägt.

Das Herzstück des Sensorsystems bildet ein ca. 2 mm dicker, flexibler Messaufnehmer. Um eine möglichst hohe mechanische Zuverlässigkeit zu erreichen, wurde dieser auf einer vollständig textilen Basis realisiert. Statt klassischer Kabelspannen textile Leiterbahnen eine Sensormatrix aus flexiblen Sensorzellen auf. Die einzelnen Sensorzellen basieren auf variablen, druckabhängigen Widerständen und weisen im unbelasteten Zustand einen definierten Wert auf. Abweichungen von diesem Wert sind ein Maß für die auf den Sensor wirkende Kraft.



**Abbildung 63: Prototyp eines 8x8 Messaufnehmers**  
Foto: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF

Da somit auch im unbelasteten Zustand ein auswertbares Signal vorliegt, kann eine aktive Zustandsüberwachung der einzelnen Sensorzellen erfolgen. Es ist also möglich, den Ausfall einzelner Sensorzellen – etwa durch Kurzschluss oder Durchtrennung der textilen Leiterbahn – zu erkennen. Die damit erreichbare „Eigensicherheit“ des Sensorsystems ist eine wichtige Grundlage für seinen Einsatz als Sicherheits-sensor.

Der textile Aufbau des Sensorsystems erlaubt die Integration von applikationsspezifischen Dämpfungszonen. Diese aus speziellen energieabsorbierenden Materialien bestehenden Bereiche ermöglichen im Fall von unbeabsichtigten Berührungen das kontrollierte Abbremsen und Stoppen des Robotersystems ohne den Kollisionspartner mit hohen Kraftspitzen zu belasten. Maßgebliche Faktoren für die Auslegung dieser Dämpfungszonen sind dabei die Geschwindigkeit und Geometrie des Robotersystems, sowie die Reaktionszeit des Sicherheitskreises.

Um ein optimales Zusammenspiel zwischen der Geometrie des Robotersystems und der darauf installierten künstlichen Haut zu erreichen, wird das Sensorsystem auf den jeweiligen Einsatzfall maßgeschneidert. Dies betrifft neben den stoßdämpfenden Eigenschaften insbesondere die Form und Größe der einzelnen Sensorzellen und den Kraftmessbereich. Die Größe der einzelnen Sensorzellen lässt sich bis auf ca. 5 mm x 5 mm reduzieren. Dies entspricht somit auch der minimal erreichbaren Ortsauflösung. Unabhängig von der Größe der Einzelzellen ist das Sensorsystem in der Lage, Kräfte ab ca. 0,5 N/cm<sup>2</sup> zu erfassen.



**Abbildung 64: Messdatenvisualisierung**  
Foto: B. Liebl/Fraunhofer IFF

Zum Schutz gegenüber Umwelteinflüssen kann der Messaufnehmer zusätzlich mit einem robusten, ggf. wasserdichten Material eingehüllt werden und damit auch unter widrigen Umgebungsbedingungen zum Einsatz kommen.

Vervollständigt wird das Sensorsystem durch eine intelligente Datenerfassungshardware. Diese beinhaltet mikrocontrollerbasierte Schaltungen zur performanceoptimierten Abtastung der angeschlossenen Messaufnehmer.

Integrierte Analysealgorithmen erkennen schwellwertbasiert unzulässige Berührungen und liefern ein Schaltsignal zur Einbindung in den Sicherheitskreis des Robotersystems.

Die vollständigen Sensordaten der angeschlossenen Messaufnehmer stehen zusätzlich über schnelle Datenkommunikationsschnittstellen wie CAN oder USB zur Verfügung und können so zur Weiterverarbeitung in die Robotersteuerung eingebunden werden.

#### 5.8.5. Die „künstliche Haut“ des LiSA-Roboters – Auslegung

Der LiSA-Roboter wurde gemäß Abbildung 65 mit geometrieadaptierten Sensorelementen ausgestattet. Diese wurden so konzipiert, dass sie den Roboter in seinen Bewegungsrichtungen vollständig absichern.

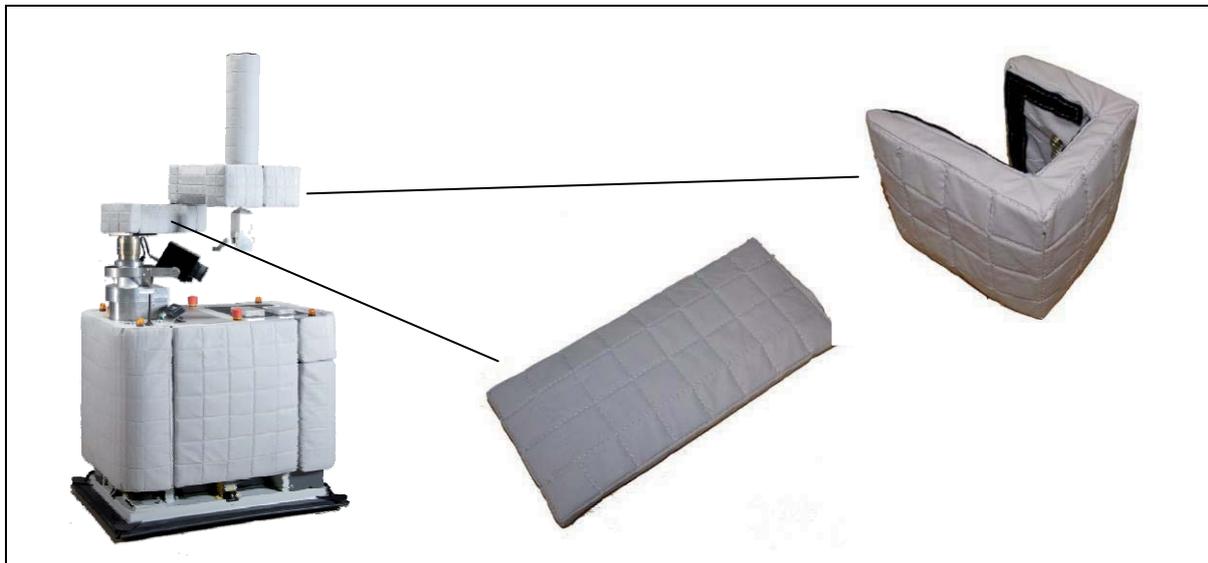
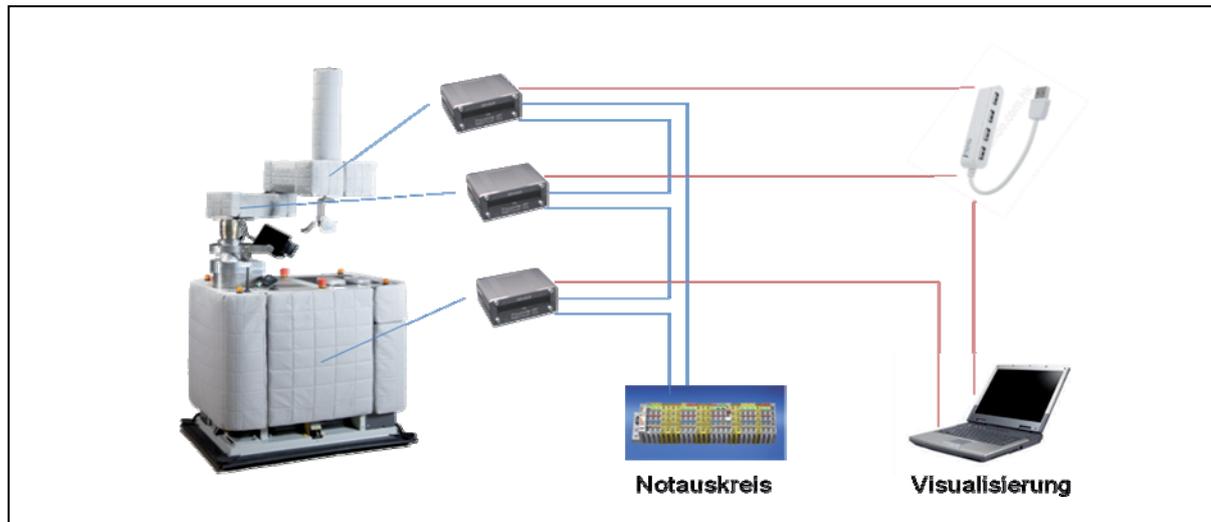


Abbildung 65: geometrieadaptierte Sensorelemente (Beispiele)  
Fotos: B. Liebl, M. Fritzsche/Fraunhofer IFF

Der LiSA-Roboter verfügt über 15 separate Sensorelemente. Davon befinden sich fünf auf der mobilen Plattform, vier auf dem unteren und sechs auf dem oberen

Manipulatorsegment. Wie in Abbildung 66 dargestellt, ist jedem Manipulatorsegment und der mobilen Plattform jeweils ein Sensorcontroller zugeordnet.



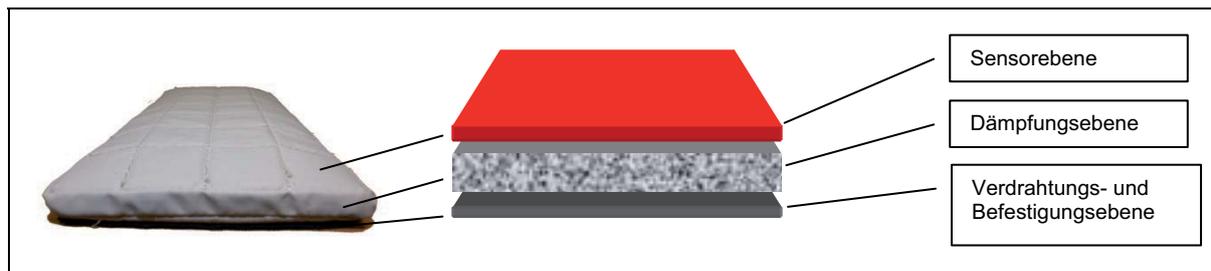
**Abbildung 66: Systemeinbindung der Sensorcontroller**  
Fotos: B. Liebl, M. Fritzsche/Fraunhofer IFF

Die Sensorcontroller ermöglichen den Anschluss mehrerer Sensorelemente und werden via USB-Bus mit einem übergeordneten Leitreechner vernetzt.

Dieser fusioniert die auflaufenden Sensordaten zu einem virtuellen Abbild und ermöglicht somit die Visualisierung des vollständigen Berührungszustandes von LiSA.

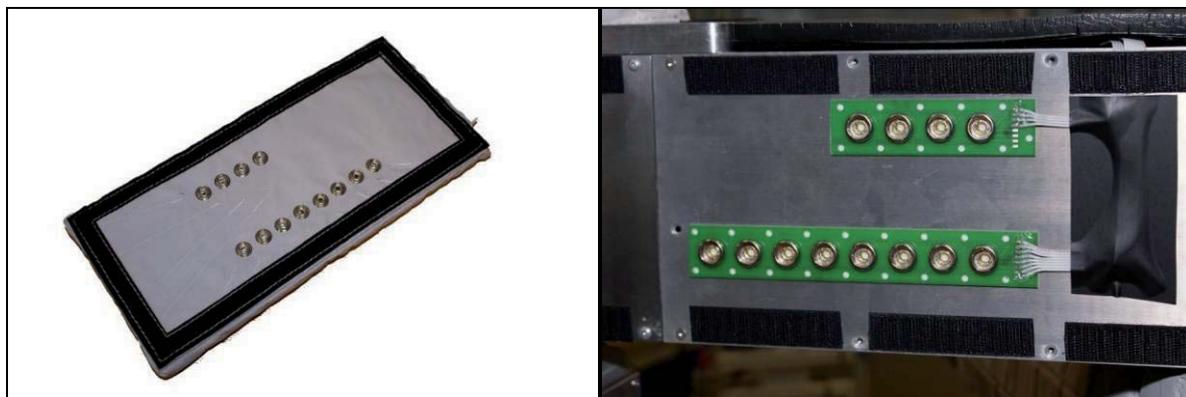
Die Schaltausgänge der Sensorcontroller werden mittels UND-Verknüpfung in den Sicherheitskreis des LiSA-Roboters eingebunden (Abbildung 66) und ermöglichen somit unabhängig von der Datenverarbeitung des Leitrechners das Stillsetzen von LiSA im Fall einer Kollision. Möglich wird dies durch auf den Sensorcontrollern implementierte „low-level“-Auswertelgorithmen, die schwellwertbasiert eine Überschreitung der zulässigen Interaktionskräfte detektieren und den Sicherheitskreis unterbrechen.

Der Aufbau der einzelnen Sensorelemente erfolgt gemäß Abbildung 67 in drei Schichten. Die oberste Schicht bildet der eigentliche, drucksensitive Messaufnehmer. Mit Hilfe eines umlaufenden Abstandstreifens ist dieser mit der unteren Verdrahtungs- und Befestigungsebene verbunden. In die so entstandene Tasche wird im Fertigungsprozess ein Dämpfungsmaterial als Zwischenschicht eingebracht.



**Abbildung 67: Schematischer Aufbau der künstlichen Haut**  
**Foto: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF**

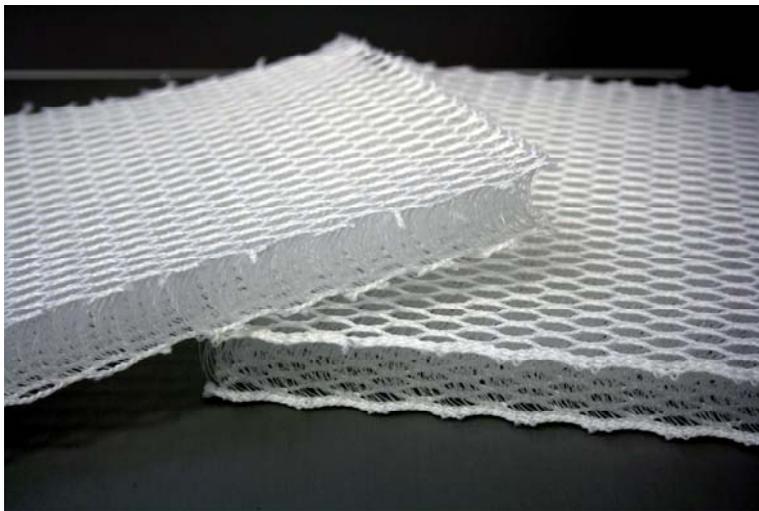
Die unterste Schicht bildet dabei sowohl die mechanische, als auch die elektrische Schnittstelle zwischen Sensorelement und Roboter. Die mechanische Befestigung der Sensorelemente erfolgt mit Hilfe von Klettbindern, die auf die Sensorelemente aufgenäht und an LiSA aufgeklebt sind. Um Sabotage oder das Versagen der Klettverbindung erkennen zu können, ist die elektrische Verbindung wie in Abbildung 68 dargestellt mit Hilfe von Druckknöpfen ausgeführt. „Fällt“ ein Sensorelement von LiSA ab, so geht nicht nur der mechanische, sondern auch der elektrische Kontakt verloren. Entsprechende Auswertelgorithmen in den Sensorcontrollern erkennen dies und setzen LiSA gegebenenfalls still.



**Abbildung 68: elektrische und mechanische Anbindung**  
**Fotos: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF**

In die Auslegung der Dämpfungsschicht fließen zwei gegensätzliche Forderungen ein. Zum einen muss sie in Ihrer Dicke und Flexibilität so dimensioniert sein, dass sie in der Lage ist, den Bremsweg des Roboterarmes aufzunehmen, ohne den Kollisionspartner mit hohen Kraftspitzen zu belasten. Zum anderen muss die Dämpfungsschicht eine ausreichende Steifigkeit mitbringen, um ein sicheres Ansprechen des Messaufnehmers zu gewährleisten.

Als Dämpfungsmaterial wurde im Rahmen des LiSA-Projektes ein Abstandsgewirke gemäß Abbildung 69 eingesetzt. Derartige Abstandsgewirke werden im Komfort- und Rehabilitationsbereich als Polstermaterialien eingesetzt. Sie bestehen aus zwei parallelen Schichten, die durch senkrecht dazu stehende Fasern auf Abstand gehalten werden. Die Dämpfungseigenschaften des Materials werden durch die Anzahl und Steifigkeit dieser Fasern beeinflusst. Im Vergleich zu Schaumstoff weist es bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften eine höhere Komprimierbarkeit und geringere thermische Isolationswirkung auf. Letzteres ist besonders bei der Verkleidung von Elektronik- und Antriebsbaugruppen von Vorteil, da Wärme im Vergleich zu Schaumstoff besser abgeführt werden kann.



**Abbildung 69: verschiedene Abstandsgewirke**  
**Foto: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF**

Am LiSA-Roboter wurden je nach Einbauort unterschiedlich dicke Dämpfungsschichten in die Sensorelemente integriert. Im Bereich des Manipulators kommt eine Dämpfungsschicht mit 20 mm Dicke zum Einsatz. Die Sensorelemente im Bereich der mobilen Plattform sind mit 40 mm dicken Dämpfungsschichten ausgestattet. Die Grundlage für die Auslegung der Dämpfungsschichten bilden die ermittelten Bremswege von Plattform und Manipulator.

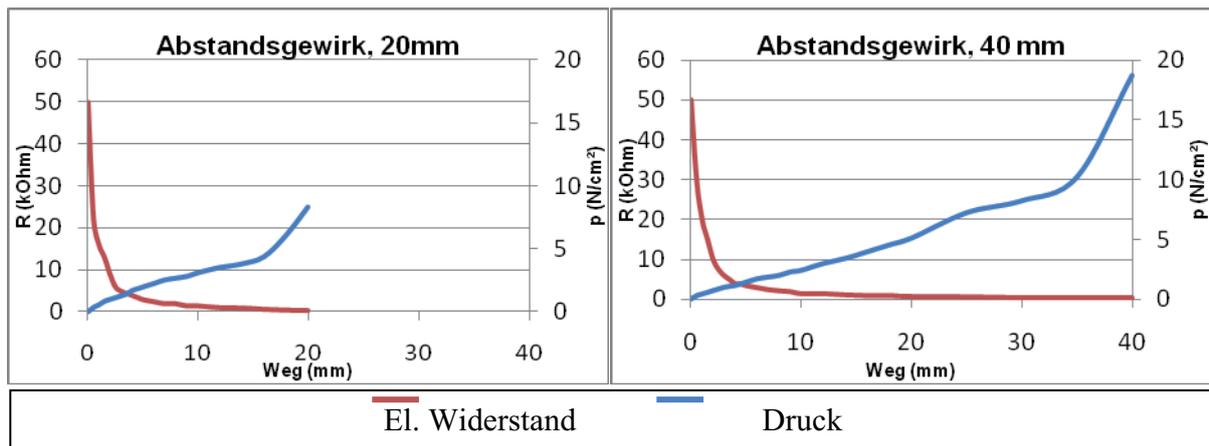


Abbildung 70: Druck-/Widerstandskennlinien der Sensorelemente mit Dämpfungsmaterial

In Abbildung 70 sind für beide Dämpfungsdicken der elektrische Widerstand des Sensorelementes sowie der Druck über dem Kompressionsweg aufgetragen. Gut sichtbar ist ein rasches Absinken des elektrischen Widerstandes, während der Druck langsam zunimmt. Die Kennlinie des Sensorelements wird dabei nur geringfügig von der Dicke des Dämpfungsmaterials beeinflusst.

Im Rahmen des LiSA-Projektes wurde festgelegt, dass Berührungen bei denen gilt:  $p > 1 \text{ N/cm}^2$  zum Stopp des Roboters führen sollen. Dementsprechend wurden die Schwellwerte in den Sensorcontrollern ausgelegt. Gemäß Abbildung 70 entspricht dies einem Schaltweg von 3 mm, um den sich der zur Verfügung stehende Bremsweg verringert.

Das gewünschte Systemverhalten konnte in umfassenden Tests experimentell bestätigt werden.

## 5.9. Systemintegration

Der Aufbau eines funktionstüchtigen Demonstrators für das beschriebene Szenario war ein zentrales Ziel des LiSA-Projektes. Deshalb spielte die Integration der zuvor beschriebenen Teilkomponenten eine wichtige Rolle.

Die Systemintegration wurde dabei in vier Phasen aufgeteilt:

1. Integration von mobiler Plattform und Navigationssoftware
2. Integration von Manipulation und Objekterkennung
3. Zusammenführung von mobiler Plattform und Manipulator
4. Anbindung von multimodaler Interaktion an den Demonstrator.

In allen Phasen wurden umfangreiche Tests durchgeführt und Anpassungen an Teilkomponenten vorgenommen. Für die Tests wurde im Labor für Mensch-Roboter-Interaktion (MRI-Labor) am Fraunhofer IFF eine Laborumgebung nachgestellt, die die wichtigsten Umgebungsparameter, wie Freiraum für die Navigation, Tischhöhen und Beleuchtungsbedingungen widerspiegelt.

**Phase 1** fand zunächst an der Universität Osnabrück statt. In dieser Phase wurde die Antriebssteuerung der mobilen Plattform an die endgültigen Schnittstellen angepasst und die in einer Simulation erstellte Navigationssoftware erfolgreich auf die reale Hardware übertragen. Anschließend wurde die Plattform nach Magdeburg gebracht und im Mensch-Roboter-Interaktions-Labor (MRI-Labor) in Betrieb genommen.

In **Phase 2** wurden die Kamerasysteme am Manipulator montiert und die Kalibrierung zwischen Greifer und Kamerasystem durchgeführt, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Bei den anschließenden Tests wurden die Bildverarbeitung an die realen Gegebenheiten adaptiert und die Abläufe zum Greifen und Ablegen von Objekten optimiert. Die Zusammenführung von mobiler Plattform und Manipulator erfolgte in **Phase 3**. Dies ermöglichte erstmals Versuche mit dem Gesamtsystem. Dazu wurde der in Abschnitt 5.7 beschriebene TaskManager in das System eingebunden und die Ablaufsteuerung implementiert. Nach anfänglichen Schwierigkeiten auf Hard- und Softwareebene konnten erfolgreich Transportaufträge ausgeführt werden.

In **Phase 4** wurde die multimodale Interaktion eingebunden, die bis dahin nur getrennt vom Gesamtsystem im Zusammenspiel mit dem TaskManager getestet wurde. Schwerpunkt war dabei die korrekte Weiterleitung von Fehlerzuständen zum Benutzer und die Interaktion zwischen Benutzer und System im Fehlerfall.

## 6. Versuche im Labor mit LiSA

Im Jahr 2009 wurde das Assistenzsystem LiSA mehrmals bei der KeyNeurotek AG in Magdeburg unter realen Laborbedingungen getestet. Dabei wurden im Rahmen unterschiedlicher Versuche zunächst die einzelnen Teilsysteme getestet und abschließend das Gesamtsystem evaluiert.

Beim ersten Termin standen der Test der autonomen Navigation und die Bildverarbeitung bzw. Manipulation im Vordergrund. Es wurden Wege zwischen verschiedenen Punkten im Labor und dem Verbindungsgang abgefahren, um die Lokalisierung, die Pfadplanung und das Zonenverhalten des Roboters zu überprüfen. Dabei wurde Optimierungsbedarf beim Durchfahren von Türen deutlich.

Die Objekterkennung funktionierte auch unter realen Beleuchtungsbedingungen zuverlässig. Ein Aufnehmen und Ablegen von Multischalen verschiedenen Typs war problemlos möglich.

Die Spracheingabe, die ebenfalls getestet wurde, wurde durch Nebengeräusche im Labor gestört. Durch die Verwendung eines hochwertigeren Headsets ließ sich dies jedoch im Nachgang leicht beheben.

Bei einem weiteren Termin wurde zunächst die optimierte Navigationssoftware mit dem überarbeiteten Türdurchfahrtsverhalten verifiziert. Der LiSA-Roboter konnte dabei zuverlässig autonom zwischen den Laboren navigieren.

Anschließend wurde das Gesamtszenario während des regulären Laborbetriebs erfolgreich getestet. Es wurden verschiedene Transportaufträge durch Labormitarbeiter der KeyNeurotek AG erteilt und vom LiSA-Roboter ausgeführt. Die Spracheingabe funktionierte auch unter schwierigen Bedingungen (Nebengeräusche durch Zentrifugen, Radiomusik, etc.) sehr zuverlässig. Die Erkennung und Handhabung der Multischalen funktionierte einwandfrei.

Durch die beschriebenen Versuche mit dem LiSA-Roboter unter realen Bedingungen konnte der alltagstaugliche Einsatz eines Assistenzroboters in einem Life-Science-Labor erfolgreich demonstriert werden.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Abbildung 71 a-d: LiSA bei Versuchen im Labor der KeyNeurotek AG in Magdeburg  
Fotos: M. Fritzsche/Fraunhofer IFF**

## **7. Zusammenfassung**

In dem vom BMBF im Rahmen der Leitinnovation Servicerobotik geförderten Verbundprojekt LiSA „Assistenzroboter in Laboren von Life-Science-Unternehmen“ wurde erfolgreich ein komplexes Servicerobotersystem exemplarisch für den Einsatz in Laboren von Life-Science-Unternehmen entwickelt und aufgebaut. Acht Verbundpartner aus Forschung und Industrie entwickelten neue Technologien und Systeme. Unter realen Bedingungen wurde das System umfangreich getestet und evaluiert. Schwerpunkte der Entwicklungen waren:

- Entwicklung und Aufbau einer mobilen Plattform
- Navigation in dynamischer Umgebung, flexibler Einsatz bei sich ändernden Laborausstattungen
- Bestimmung der Aufnahme- und Ablagepositionen und der handzuhabenden Objekte, sensorgeführte Bewegung des Manipulators
- Sicherheitsanforderungen und -module, Integration in Manipulator (gemeinsamer Arbeitsraum Mensch-Assistenzsystem)

- Interaktion Mensch ↔ Assistenzsystem (grafisch, Sprache)

Es konnte nachgewiesen werden, dass schon heute Assistenzroboter für anspruchsvolle Aufgaben im direkten Umfeld mit dem Menschen zum Einsatz kommen können. Der Einsatzfall war auf Labore von Life-Science-Umgebungen fokussiert, eine Übertragbarkeit auf eine Vielzahl anderer Einsatzbereiche ist natürlich möglich. Der Assistenzroboter LiSA zeichnet sich durch den ganzheitlichen Ansatz aus, es wurden neben der Navigation in engen, dynamischen Umgebungen, der Bildverarbeitung zur Objekterkennung und anderen Basistechnologien für autonome Roboter auch Themenbereiche, die über die reine Funktion des Assistenzsystems hinausgehen, wie die multimodale Interaktion und die Sicherheit berücksichtigt und umgesetzt. Das Assistenzsystem LiSA steht den Projektpartnern weiterhin für Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Verfügung.

## **8. Veranstaltungen**

Workshop „Robotertechnologien für den Einsatz in Alltagsumgebungen“,  
28. Juni 2007, Fraunhofer IFF, Magdeburg  
(im Rahmen der 10. IFF Wissenschaftstage 27.-29. Juni 2007 am Fraunhofer IFF)

Workshop zu den Themen Architektur und Sicherheit in der Servicerobotik  
mit den Verbundprojekten der „Leitinnovation Servicerobotik“,  
11. – 12. Oktober 2007, Fraunhofer IFF, Magdeburg

Präsentation des Projektes LiSA im Rahmen der Ausstellung der  
9. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2008,  
11. – 12. März 2008, Kongresszentrum Karlsruhe

Abschlusspräsentation des Verbundprojekts LiSA,  
17. Juni 2009, Fraunhofer IFF, Magdeburg  
(im Rahmen der 12. IFF-Wissenschaftstage 16.-18. Juni 2009 am Fraunhofer IFF)

## 9. Veröffentlichungen

- Albrecht, S.; Hertzberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Sprickerhof, J.; Stiene, S.: *Device Level Simulation of Kurt3D Rescue Robots*. In: Third International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster (SRMED 2006). CDROM Proceedings, Juni 2006.
- Borrmann, D.; Elseberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: *Globally consistent 3D mapping with scan matching*. In: Journal of Robotics and Autonomous Systems, 2007.
- Borrmann, D.; Elseberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: *The Efficient Extension of Globally Consistent Scan Matching to 6 DoF*. In: Proceedings of the 4th International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT '08), S. 29-36, Juni 2008.
- Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Schulenburg, E.; Teutsch, C.: *LiSA: ein Assistenzroboter für den Einsatz in Laborumgebungen zur sicheren Mensch-Roboter-Interaktion*. In: Robotik 2008, München, Juni 2008.
- Fritzsche, M.; Elkmann, N.: *Ein neuartiger textiler Sensor zur flächigen Druckerfassung*. In: Tagungsband des 8. Workshops Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin (Automed 2009), Berlin, März 2009.
- Fritzsche, M.; Schulenburg, E.; Elkmann, N.; Girstl, A.; Stiene, S.; Teutsch, C.: *Safe Human-Robot Interaction in a Life Science Environment*. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics (SSRR 2007), Rom, Italien, September 2007.
- Hertzberg, J.; Lingemann, K.; Lörken, C.; Nüchter, A.; Stiene, S.: *Does it help a robot navigate to call navigability an affordance?*. In: Towards Affordance-Based Robot Control. Proceedings of Dagstuhl Seminar 06231, Schloss Dagstuhl, 5. – 9. Juni 2006, Springer (LNAI vol. 4760), S. 16-26, 2008.
- Kunze, L.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: *Salient Visual Features to Help Close the Loop in 6D SLAM*. In: Proceedings of the ICVS Workshop on Computational Attention & Applications (WCAA '07), Bielefeld, März 2007.

Nüchter, A.; Lingemann, K.; Bormann, D.; Elseberg, J.; Böhm, J.: *Global Konsistente 3D-Kartierung mit Scanmatching*. In: Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Wichmann Verlag, S. 194-201, Februar 2007.

Schulenburg, E.; Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Girstl, A.; Stiene, S.; Teutsch, S.: *LiSA: A Robot Assistant for Life Sciences*. In: Proc. of the 30th Annual German Conference on AI (KI 2007), Osnabrück, September 2007.

Schulenburg, E.; Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Teutsch, C.: *A Mobile Service Robot for Life Science Laboratories*. 20. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (AMS 2007), Kaiserslautern, Oktober 2007.

Stiene, S.: *Multisensorfusion zur semantisch gestützten Navigation eines autonomen Assistenzroboters*. Dissertation, Universität Osnabrück, März 2009.

Stiene, S.; Hertzberg, J.: *Sicheres Navigieren in dynamischen Umgebungen mit 3D-Kollisionsvermeidung*. In: K. Berns, T. Luksch (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2007*. 20. Fachgespräch, Kaiserslautern, 18./19. Oktober 2007. Berlin (Springer) 2007, S. 68-74.

Stiene, S.; Hertzberg, J.: *Virtual Range Scan for Avoiding 3D Obstacles Using 2D Tools*. In: Proc. 14th Intl. Conf. Advanced Robotics (ICAR 2009), München, Juni 2009.

Stiene, S.; Lingemann, K.; Nüchter, A.; Hertzberg, J.: *Contour-based Object Detection in Range Images*. In: Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT '06), Juni 2006.

Stiene, S.; Nüchter, A.; Lingemann, K.; Hertzberg, J.: *An Experiment in Semantic Correction of Sensor Data*. In: Proc. Workshop on Semantic Information in Robotics at the IEEE International Conference Robotics and Automation (ICRA '07), Rom, Italien, April 2007.

Wiemann, T.; Nüchter, A.; Lingemann, K.; Stiene, S.; Hertzberg, J.: *Surface Reconstruction for 3D Robotic Mapping*. In: Proceedings of the Workshop on 3D-Mapping at the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '08), Nizza, Frankreich, September 2008.

## 10. Anhang

### Referenzen

- [1] MRK Systeme GmbH. Product description. [http://www.mrk-systeme.de/downloads/Prospekt\\_KR3\\_SI.pdf](http://www.mrk-systeme.de/downloads/Prospekt_KR3_SI.pdf). Accessed December 2008
- [2] De Luca, A.; Albu-Schäffer, A.; Haddadin, S.; Hirzinger, G.: *Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm*. In: Proceedings IROS 2006, S. 1623 - 1630, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 9.-15.10.2006.
- [3] <http://www.pressureprofile.com>
- [4] <http://www.tekscan.com>
- [5] <http://www.xsensor.com>
- [6] Woesch, T.: *Taktile Mensch-Maschine-Interaktion*. In: Robotik 2002 (=VDI-Berichte 1679), S. 275-280.
- [7] Woesch, T.; Feiten, W.: *Reactive Motion Control for Human-Robot Tactile Interaction*. In: Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002), Washington D.C., USA, 11.-15. Mai 2002, S. 3807-3812.
- [8] Weiss Robotics. Product description. [http://www.weiss-robotics.de/downloads/taktiler\\_sensorsystem.pdf](http://www.weiss-robotics.de/downloads/taktiler_sensorsystem.pdf). Accessed Februar 2008
- [9] Bikker, J.: *Real-Time Ray Tracing Through the Eyes of a Game Developer*. In: Proc. IEEE Symp. Interactive Ray Tracing (RT-07), September 2007, S.1–10. IEEE Press 2007.
- [10] Gerkey, B.; Vaughan, R.; Howard, A.: *The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems*. In: Proc. ICAR 2003, S.317–323, 2003.
- [11] LaValle, S. M.: *Planning Algorithms*. Cambridge Univ. Press, 2006.
- [12] Siciliano, B.; Khatib, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer 2008
- [13] Stiene, S.; Hertzberg, J.: *Virtual Range Scan for Avoiding 3D Obstacles Using 2D Tools*. Proc. 14th Intl. Conf. Advanced Robotics (ICAR-2009), München, Juni 2006.
- [14] Stiene, S.: *Multisensorfusion zur semantisch gestützten Navigation eines autonomen Assistenzroboters*. Dissertation, Fachbereich Mathematik/Informatik, Universität Osnabrück, März 2009.
- [15] USARSim. <http://sourceforge.net/projects/usarsim/>

# AUTOREN

**Andres, Sven**

[project: syntropy] GmbH  
Mozartstraße 5  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 5.6]*

**Bode, Christoph**

[project: syntropy] GmbH  
Mozartstraße 5  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 5.6]*

**Elkmann, Norbert, Dr. techn.**

Fraunhofer IFF  
Geschäftsfeld Robotersysteme  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 1, 2, 7]*

**Fritzsche, Markus**

Fraunhofer IFF  
Geschäftsfeld Robotersysteme  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 3, 4, 5.3, 5.8, 6]*

**Gallwitz, Florian, Dr.**

Sympalog Voice Solutions GmbH  
Karl-Zucker-Str. 10  
91052 Erlangen  
Deutschland  
*[Kapitel 5.5]*

**Götting, H.-H.**

Götting KG  
Celler Str. 5  
31275 Lehrte-Röddensen  
Deutschland  
*[Kapitel 5.1]*

**Hertzberg, Joachim, Prof. Dr.**

Universität Osnabrück  
Institut für Informatik  
Albrechtstraße 28  
49069 Osnabrück  
Deutschland  
*[Kapitel 5.2]*

**Pauer, Rico**

Götting KG  
Celler Str. 5  
31275 Lehrte-Röddensen  
Deutschland  
*[Kapitel 5.1]*

**Röhnert, Peter, Dr.**

KeyNeurotek AG  
ZENIT-Technology Park  
Leipziger Str. 44  
39120 Magdeburg  
Deutschland

**Schmidt, Steffen**

Jenoptik Optical  
Systems GmbH  
Göschwitzer Str. 25  
07745 Jena  
Deutschland  
*[Kapitel 5.4]*

**Schulenburg, Erik**

Fraunhofer IFF  
Geschäftsfeld Robotersysteme  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 3, 4, 5.7, 5.9, 6]*

**Stiene, Stefan**

Universität Osnabrück  
Institut für Informatik  
Albrechtstraße 28  
49069 Osnabrück  
Deutschland  
*[Kapitel 5.2]*

**Striggow, Frank, Dr.**

KeyNeurotek AG  
ZENIT-Technology Park  
Leipziger Str. 44  
39120 Magdeburg  
Deutschland

**Teutsch, Christian, Dr.**

Fraunhofer IFF  
Geschäftsfeld Mess- und  
Prüftechnik  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg  
Deutschland  
*[Kapitel 5.4]*

**Tschakarow, Roko**

Schunk GmbH & Co. KG  
Bahnhofstraße 134  
74348 Lauffen/Neckar  
Deutschland

# IMPRESSUM

Assistenzroboter in Laboren von Life-Science-Unternehmen  
Abschlussbericht des BMBF-geförderten Verbundprojekts  
im Rahmen der Leitinnovation Servicerobotik

Herausgeber:

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF  
Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk  
Wissenschaftliche Leitung: Dr. techn. Norbert Elkmann  
Sandtorstraße 22 | 39106 Magdeburg  
Telefon +49 391 4090-222 | Telefax +49 391 4090-250  
norbert.elkmann@iff.fraunhofer.de  
<http://www.rs.iff.fraunhofer.de>

Umschlaggestaltung: Bettina Rohrschneider, Fraunhofer IFF

Redaktion: Katja Ziepel, Fraunhofer IFF

Titelfoto: Markus Fritzsche, Fraunhofer IFF

Wir bedanken uns bei unseren Projektpartnern für die Freigabe der  
Veröffentlichungen in Text und Bild.

Fotos, Bilder, Grafiken: Soweit nicht anders angegeben,  
liegen alle Rechte bei den Autoren der einzelnen Beiträge.

Herstellung:

docupoint GmbH Magdeburg

Bibliografische Information der Deutschen

Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8396-0110-5

© by Fraunhofer Verlag, 2010

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 800469 | 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500 | Telefax +49 711 970-2508

[verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de) | <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Für den Inhalt der Vorträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich  
geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des  
Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des  
Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für  
Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die  
Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem  
Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im  
Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu  
betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder  
Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden  
ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder  
Aktualität übernehmen.