



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

WIRTSCHAFT.  
WACHSTUM.  
WOHLSTAND.

AUTONOMIK



Band 5

# Multimodale Sensorik – Konzepte der Umwelt- erkennung/-modellierung

Leitfaden für Hersteller und Anwender

## Impressum

### Herausgeber

Bundesministerium für  
Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
Öffentlichkeitsarbeit  
11019 Berlin  
www.bmwi.de

### Stand

Januar 2013

### Druck

Elch Graphics Digitale- und Printmedien GmbH und Co KG

### Gestaltung und Produktion

LoeschHundLiepold Kommunikation GmbH, Berlin

### Bildnachweis

Titel: © monjiro – Fotolia.com  
S. 19: rorarob  
S. 20: viEMA  
S. 21: RoboGasInspector  
S. 23: SaLsA

### Redaktion

Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK:  
Institut für Innovation und Technik  
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin  
LoeschHundLiepold Kommunikation GmbH, Berlin

### Text

Institut für Innovation und Technik  
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin



Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie ist mit dem Grundzertifikat zum Audit Beruf & Familie® als familienfreundlicher Arbeitgeber ausgezeichnet worden. Das Zertifikat wird von der Beruf & Familie gemeinnützige GmbH, einer Initiative der gemeinnützigen Hertie-Stiftung verliehen.

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Nicht zulässig ist die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben von Informationen oder Werbemitteln.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1. Einführung</b> .....	6
<b>2. Einordnung der Sensorik als Element autonomer Systeme</b> .....	7
<b>3. Wege zum Einsatz von Sensorik in autonomen Systemen</b> .....	9
3.1 Empfehlungen für Anwender .....	9
3.2 Empfehlungen für Hersteller .....	11
<b>4. Wertschöpfung im Autonomik-Markt der Zukunft</b> .....	14
<b>5. Strukturelle Herausforderungen des Marktes</b> .....	16
<b>6. Von der Sensorik zur Umgebungserkennung in ausgewählten Projekten</b> .....	17
6.1 DyCoNet .....	17
6.2 marion .....	17
6.3 rorarob .....	19
6.4 viEMA .....	20
6.5 RoboGasInspector .....	21
6.6 SaLsA .....	22
<b>Anhang</b> .....	24

---

# AUTONOMIK

„Autonomik – Autonome Systeme und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand“ ist ein Technologieprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Bei AUTONOMIK geht es um zukunftsweisende Ansätze für die Entwicklung einer neuen Generation von intelligenten Werkzeugen und Systemen, die eigenständig in der Lage sind, sich via Internet zu vernetzen, Situationen zu erkennen, sich wechselnden Einsatzbedingungen anzupassen und mit Nutzern zu interagieren. Insgesamt haben sich 14 Projektverbände, u. a. zu fahrerlosen Transportsystemen, robotischen Assistenten, autonomen Logistikprozessen und Klinikanwendungen für eine Förderung durch das BMWi qualifiziert. Die Projekte haben eine Laufzeit von durchschnittlich drei Jahren. Rund 100 Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen wirken an den Vorhaben mit. Das Projektbudget beträgt zusammen ca. 110 Mio. Euro. Die Projekte sind: AGILITA, AutASS, AutoBauLog, AutoPnP, DyCoNet, LUPO, marion, RAN, RoboGasInspector, rorarob, SaLsA, simKMU, smartOR, viEMA.

---

# Vorwort

## **Dr. C. Thomas Simmons** **Geschäftsführer AMA Fachverband**

Wie flexibel kann eine Maschine sein, die weder ihre eigenen Positionsparameter registriert noch ihre Werkstücke und andere relevante Informationen aus ihrer Umwelt? Leicht sieht man ein, dass im Bereich intelligenter Maschinen das Erfassen und Bewerten von Daten aus der äußeren und inneren Umwelt ebenso wichtig ist, wie für uns selber.

Gerade in der Entwicklung der sog. Industrie 4.0 nimmt daher die maschinelle Umwelterkennung eine Schlüsselrolle ein. Denn je autonomer eine technische Anwendung, desto mehr Informationen benötigt sie über ihre physikalische Umgebung.

Mit Umwelterkennung fundamental verknüpft ist die Verarbeitungslogik und die Sensorik bzw. Messtechnik. Für diese Gebiete bietet gerade die Industrie 4.0 besonders spannende Einsatzmöglichkeiten. Es verheißt innovationsgeladene Anwendungen und

beeindruckende Entwicklungen, so wie sie schon jetzt das Thema Automatisierung auf eine neue, sehr interessante Ebene heben. In der Sensorik beobachten wir dazu die Trends einer immer weiter voranschreitenden Miniaturisierung, erhöhter Zuverlässigkeit, steigender Eigenintelligenz und immer breiteren Einsatzbereichen. Darüber hinaus entstehen immer mehr moderne Sensoren für den mobilen Einsatz oder als integrierte Multisensoren mit fortgeschrittener, integrierter Signalaufbereitung.

Industrie 4.0 ist auf vielen Gebieten eine anspruchsvolle Aufgabe, die von allen Akteuren erhebliche Innovationskraft abfordert. Eines ist sicher: ein erheblicher Anteil ihrer Lösungen wird auf innovativ eingesetzter maschineller Umwelterkennung beruhen.

Der vorliegende Leitfaden zeigt Ihnen neueste Entwicklungen der Technologie der Umwelterkennung. Lassen Sie sich von den Ergebnissen anregen und zu eigenen Innovationen inspirieren!

# 1. Einführung

Das iPhone ist nur die Spitze des Eisbergs: Kaum ein Tag vergeht, an dem nicht neue Produkte auf den Markt kommen, die mit intelligenten Sensoren ausgestattet werden. Egal ob Automobil-, Unterhaltungsindustrie, Sicherheitstechnologie, Maschinen- und Anlagenbau, Life Science oder Luft- und Raumfahrt. In nahezu allen Branchen gelten Sensoren als Schlüsseltechnologie und sind die Grundlage für die Weiterentwicklung der Automatisierung und Flexibilisierung. Das macht sich auch in Zahlen bemerkbar. Die deutsche Branche für Sensorik und Messtechnik hält knapp 30 Prozent des Weltmarkts. Sie umfasst in Deutschland rund 800 Sensorhersteller, 85 Prozent davon sind KMU. Das Umsatzvolumen in Deutschland wächst jährlich um rund 2,7 Mrd. Euro. Der deutschsprachige Raum gilt deshalb nicht nur als Wiege der Branche, auch heute zählt Deutschland zu den führenden Global Playern in der Sensorik. Auch die Wachstumsprognosen sind enorm. Laut einer Studie von Intecho Consulting wird eine Steigerung des Volumens für den zivilen Sensorweltmarkt von 118,4 Mrd. Euro im Jahr 2011 auf 184,1 Mrd. Euro im Jahr 2016 prognostiziert. Insbesondere in der IKT soll der Bedarf an Sensorik bis dahin ansteigen. Dann betrüge der Anteil des Sensormarktes für Geräte, Systeme und Netze der IKT beachtliche 22,9 Prozent und läge damit knapp über dem heute dominierenden Markt für Fahr-, Flugzeuge und Schiffe.

Auch für (teil-) autonome Systeme und die unterschiedlichen Anwendungsszenarien „Autonomes Fahren“, „Autonome Assistenzsysteme in der Fertigung“, „Autonomes Überwachen, Inspizieren, Warten“ und „Autonome Systeme in der Logistik“ spielt Sensorik eine zentrale, funktionsbestimmende Rolle. Der nachhaltige wirtschaftliche Erfolg der Projekte hängt damit auch wesentlich von der eingesetzten Sensorik ab.

**DIE UMWELTERKENNUNG IST EINE ZENTRALE FUNKTIONALITÄT, UM DIE AUTONOMIE VON SYSTEMEN UND DEREN ZUVERLÄSSIGKEIT UND SICHERHEIT ZU GEWÄHRLEISTEN.**

Die Mechanismen zur Selbststeuerung solcher Systeme erfordern in hohem Maß sensorische Funktionen zur gefilterten Erfassung und Interpretation der eigenen Situation und Umgebung. Heutige Sensoren erfüllen die Anforderungen nicht. Sie erfassen unbewertet

alle Messdaten ihrer Umgebung. Das führt zu großen Datenmengen, aus denen unter Umständen nur eine Information benötigt wird. Darüber hinaus muss die Information nicht nur fehlerfrei, sondern auch noch schnell gefunden und weitergegeben werden. Für die nachfolgenden verarbeitenden Systeme eine fast unlösbare Aufgabe. Für komplexe Umgebungserkennungen, wie sie z. B. in den AUTONOMIK-Projekten DyCoNet und SaSa erforderlich sind, ist eine neue Qualität der Kooperation zwischen Sensor und Signalverarbeitung erforderlich. Zusammen mit weiterer, z. B. über das Internet erhaltene externe Information, wie GPS-Daten oder Kartenmaterial, wäre es möglich, dass sich das autonome System sicher in der Umgebung bewegt. Für praktische Anwendungen müssen neue Sensorsysteme darüber hinaus schnell und kosteneffizient realisierbar sein. Bei der Modellierung und Realisierung spielen Baukastenmodelle und modulare Konzepte eine wichtige Rolle.

Die Intensivierung des Dialogs zwischen Sensorhersteller, Systemintegratoren und Anwendern bei autonomen Systemen ist deshalb ein Muss. Vor diesem Hintergrund hat sich aus den Projekten des Technologieprogramms AUTONOMIK die Fachgruppe „Multimodale Sensorik – Konzepte zur Umgebungserkennung und -modellierung“ gebildet. Die erste Analyse durch die AUTONOMIK-Projekte sowie Sensorhersteller und den AMA Fachverband für Sensorik half Vor- und Nachteile eingesetzter Sensorkonzepte sowie bestehende Angebotslücken und technologische Herausforderungen zu identifizieren. Mit den Ergebnissen wurden vor allem Potenziale offen gelegt, die sowohl Unternehmen der Autonomik als auch Sensorherstellern nutzen können, um ihre Märkte mit gemeinsamen Innovationen weiter zu entwickeln.

Das „Internet der Dinge“ als Vision bedarf einer Ergänzung um die „Sensorik der Dinge“. Ohne Sensorik/Umwelterkennung können nur vorhandene Informationen genutzt werden – das würde das Internet der Dinge auf synthetische, vollständig als digitales Modell vorliegende Umgebungen begrenzen.

## 2. Einordnung der Sensorik als Element autonomer Systeme

Die Sensorik stellt ein wesentliches Grundelement autonomer technischer Systeme dar. Abbildung 1 zeigt die Grundstruktur solcher Systeme als Regelkreis. Die Anforderungen an die Sensorik sind unmittelbar von den Einsatzbedingungen abhängig, mit dem Wachstum an Bewegungsfreiheit wachsen die Anforderungen überproportional.

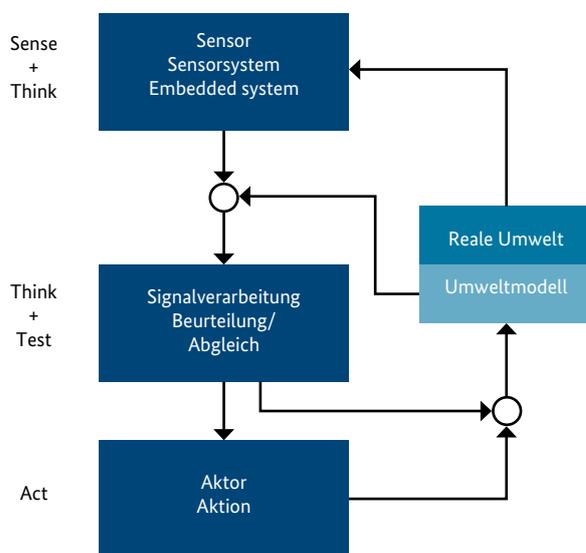


Abbildung 1: Allgemeiner Regelkreis autonomer Systeme

Die Sensorik ist die elementare Grundlage für die funktionale Sicherheit und die Informationssicherheit. Sie muss die Grundlagen für das sichere Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik / Roboter legen, Umwelt- und Prozessinformationen erfassen und komplexe Sachverhalte sicher erkennen helfen.

### Sensor /Messwertaufnehmer

Der Sensor ist dabei nur das erste Glied der Signalkette, das eine physikalische Größe in ein weiterverarbeitbares, meist elektrisches Signal umwandelt.

Der Messwert-Aufnehmer kann bereits eine Signalvorverarbeitung, eine Wandlung und weitere Funktionen umfassen. Sein Ausgangssignal ist

der Messwert (z. B. ein Temperaturwert, eine Richtungsangabe, eine Entfernung), der mit einer bestimmten Frequenz zur Verfügung gestellt wird. Messsysteme sind meist sehr komplexe Aufbauten aus mehreren Messwertaufnehmern, Sensoren zur Korrektur systematischer Abweichungen und mechatronischer Subsysteme. Von einem Messsystem spricht man beispielsweise bei der 3D-Vermessung einer Autokarosserie. Die Aufgabe „Umgebungs-erkennung“ ist in ihrer Komplexität durchaus einem Messsystem zuzuordnen, das selbst aber nur Subsystem ist.

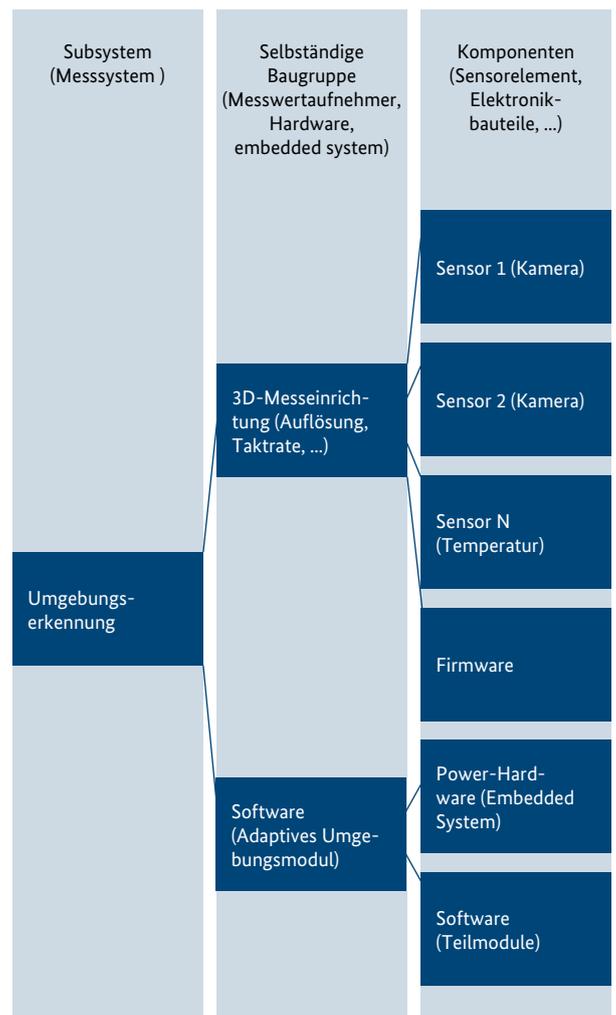


Abbildung 2: Sensor – Messwertaufnehmer – Messsystem

Während der Laufzeit der anspruchsvollen AUTONOMIK-Projekte wurden wesentliche Defizite im Bereich der Sensorik sichtbar. Diese Defizite liegen vor allem in der technischen Umsetzung der Umgebungserkennung. Heutige Sensoren erfassen unbewertet alle Messdaten ihrer Umgebung. Das führt zu großen Datenmengen, aus denen unter Umständen nur eine Information benötigt wird. Darüber hinaus muss die Information nicht nur fehlerfrei, sondern auch noch schnell gefunden und weitergegeben werden. Für die nachfolgenden, verarbeitenden Systeme ist das eine nahezu unlösbare Aufgabe. Für die komplexe Umgebungserkennung ist eine neue Qualität von Kooperation zwischen Sensor und Signalverarbeitung gefordert. Denkbar wäre z. B. ein in den Sensor integriertes Umgebungserkennungsmodul, das die geschickten Bilder interpretiert. Zusammen mit weiteren Informationen, z. B. GPS-Daten oder Kartenmaterial – wäre es möglich, dass sich das autonome System sicher in der Umgebung bewegt.

Die Analyse der unterschiedlichen Projekte des Technologieprogramms AUTONOMIK durch die Begleitforschung ergab dabei gemeinsame Anforderungen:

- Sensorsignale benötigen eine leistungsfähige (Vor-)Verarbeitung, die deutlich über die übliche, messtechnisch erforderliche Signalverarbeitung hinausgeht.
- Es ist eine kontextgerechte Echtzeitfähigkeit erforderlich, die die Handlungsfähigkeit des autonomen Systems nicht bremst.
- Die Sensoren müssen auch trotz widrigster Umgebungsbedingungen fehlerlos arbeiten können.

Dem stehen bei den laufenden bzw. abgeschlossenen Projekten einige Schwächen gegenüber:

- Die Projekte konzentrieren sich sehr stark auf ihre jeweilige Einsatzspezifik, generische Ansätze zur Senkung des heutigen hohen Engineering-Aufwands sind kaum erkennbar.
- In den laufenden Projekten sind Unternehmen bzw. Forschungseinrichtungen mit Kernkompetenzen in der Sensorik / Messtechnik kaum vertreten.
- Es werden vorwiegend Sensoren „off-the-shelf“ genutzt. Nur in einem Fall wurde im Rahmen des laufenden Projektes ein neuer, noch nicht verfügbarer Sensor eingesetzt. Dieses kann sich im Einzelfall als Hindernis bei der Vermarktung erweisen.
- Mengeneffekte können nicht ausgeschöpft werden; Sensoren sind gerade bei hoher Funktionskomplexität teuer. Bei späterer Vermarktung des autonomen Systems haben die Stückzahlen einen eminenten Einfluss auf den Preis.

Das Preis-Mengen-Gefüge ist ein wichtiger Schlüssel, um das Eigeninteresse der Sensorikindustrie an einem verstärkten Engagement in der Autonomik zu steigern. So werden die fahrerlosen Transportsysteme in ihrer heutigen Ausprägung mit hohem Engineering-Aufwand und begrenzten Stückzahlen nur bedingt als attraktiver Markt eingestuft. Hier kann die Konvergenz der Anwendungen mit den zu erwartenden höheren Stückzahlen attraktive Märkte schaffen; das gilt insbesondere vor dem Hintergrund der starken Position deutscher Unternehmen im Markt leistungsfähiger Sensoren für industrielle Anwendungen.

## 3. Wege zum Einsatz von Sensorik in autonomen Systemen

### 3.1 Empfehlungen für Anwender

Der heutige Stand der Technik lässt ein Plug-and-Play bei der Implementierung von Sensoren in autonome Systeme nur für einen sehr begrenzten Anwendungsbereich zu. Die Umgebungserkennung ist vielmehr Teil des Engineering-Prozesses für ein autonomes System (unabhängig davon, ob es ein Standalone-System ist oder ein Einsatzszenario mit mehreren, ggf. miteinander kooperierenden Systemen). Die folgende Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Ablauf, wie er heute bei der Realisierung autonomer Systeme realistisch ist.



Abbildung 3: Beispielhafte Abfolge der Entwicklung von autonomen Systemen beim aktuellen Stand der Technik

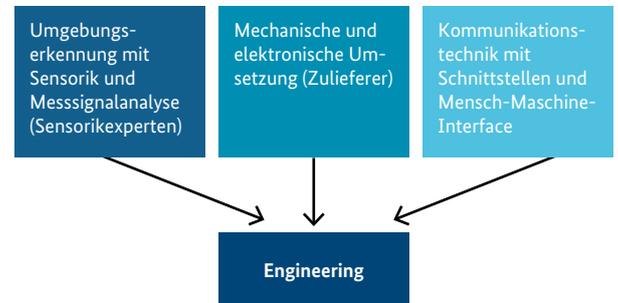


Abbildung 4: Hauptelemente des Engineerings autonomer Systeme – heute

#### 3.1.1 Sensorik-Kompetenz:

##### Anbieter – Intermediär/Systemintegrator

Beim gegenwärtigen Stand der Technik ist es nahezu unabdingbar, Spezialwissen zur Sensorik und zur Umgebungserkennung in der Definitions- und der Engineering-Phase von autonomen Systemen von Beginn an hinzuzuziehen (Abbildung 4).

Entwickeln KMU heute ein autonomes System und benötigen dazu eine bestimmte sensorische Fähigkeit, verfügen sie aber häufig weder über das erforderliche Inhouse-Spezialwissen zur Sensorik, noch stellen ihre in Entwicklung befindlichen Produkte einen so attraktiven Markt dar, dass eine proprietäre Sensorentwicklung für die Anbieter von Sensoren wirtschaftlich interessant ist. Sie müssen vielmehr aus der Vielzahl der an Markt befindlichen Sensoren unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen (Abbildung 5) die richtigen auswählen.

#### Aufbau eigener Sensorik-Kompetenz

Der Aufbau eigener Sensorik/Messtechnikkompetenz kann helfen, zumindest die Auswahl der Messverfahren sachkundig vorzunehmen und dann mit einem bereits vordefinierten Set an Anforderungen und Lösungskonzepten an die Hersteller von entsprechenden Sensoren/Messwertausnehmern/Messmodulen heranzutreten.

### Einbeziehung neutraler technischer Berater

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Einbeziehung eines neutralen technischen Beraters, der die Anforderungen sachkundig mit den Angeboten abgleicht und den Auswahl- und Entscheidungsprozess für die Sensoriklösungen moderiert. Auftragsentwicklungen können dann ggf. auch von einschlägigen F&E-Einrichtungen z. B. im Bereich der Fraunhofer-Institute oder durch ausgewiesene Applikationszentren erbracht werden.



Abbildung 5: Rahmenbedingungen bei der Auswahl von Sensoren (beispielhaft)

Unabhängig davon, welche Lösung ein Anbieter von autonomen Systemen favorisiert, sollten die Spezialisten von Beginn der Entwicklung an einbezogen werden, um spätere kostenintensive Redesigns sowohl bei Hardware wie auch bei Software und Kommunikationsinfrastruktur zu vermeiden. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Kenntnisse und das Zusammenspiel verschiedener Disziplinen wie optische Technologien, Elektronik (Hardware) und Software. Nur ein ideal abgestimmtes Set aus diesen Disziplinen kann anspruchsvolle Aufgaben der Umgebungserkennung lösen. Die dabei zu lösenden Aufgaben sind in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt.

Mittelfristig ist zu erwarten, dass verstärkt multimodale Sensoren, Messwertaufnehmer und Umwelterkennungsmodule am Markt angeboten werden, die ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten abdecken und vom Kunden einfach konfiguriert werden können – attraktive Preise durch hohe Stückzahlen machen die jeweils „überschüssigen“ messtechnischen und kognitiven Fähigkeiten tolerabel. Dieses ist jedoch aktuell (2013) noch ein Zukunftsszenario.

### 3.1.2 Prozessdesign: vom Bedarf bis zur Auswahl

#### a. Analyse des Einsatzfalls

Der Ausgangspunkt des Engineering ist eine Analyse des konkreten Einsatzfalls für die autonomen Systeme und die hierfür benötigten sensorischen Funktionalitäten. Hierbei entsteht ein Pflichtenheft zu den benötigten Fähigkeiten und Genauigkeitsanforderungen der Umwelterkennung wie auch zu den Randbedingungen, unter denen der Einsatz erfolgt. Eine besondere Herausforderung besteht in der Übersetzung der Anforderungen in messtechnische Parameter und die IT-Konfiguration.

#### b. Auswahl geeigneter Sensoren

Ausgehend von diesem Pflichtenheft erfolgt die Auswahl geeigneter Sensoren, Sensorkombinationen bzw. Messwertaufnehmer. Die Festlegung der genutzten Messverfahren entscheidet über Fähigkeiten und Kosten. Gerade Restriktionen im Kostenbereich können den Einsatz bestimmter leistungsfähiger Messverfahren unmöglich machen. Hier helfen kostengünstige, alternative Ansätze, beispielsweise viele verteilte, aber dafür ungenaue Sensoren oder Lösungen, die in regelmäßigen Abständen mit einer Referenz nachkalibriert werden können. Unternehmen der Sensorikbranche und branchenkundige Berater<sup>1</sup> bringen hierfür jahrzehntelange Applikationserfahrung mit, die weit über die eigentlichen messtechnischen Daten verschiedener Bautypen hinausgehen.

<sup>1</sup> vermittelt über den Fachverband AMA e.V. ([www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de))

### c. Integration in das Gesamtkonzept des autonomen Systems

Nach Auswahl des Sensors gilt es, diesen in das Gesamtkonzept des autonomen Systems zu integrieren. Dafür spielen die im Pflichtenheft verankerten Anforderungen eine wesentliche Rolle. Das betrifft insbesondere die Kommunikationsschnittstelle, welche im einfachsten Fall ein analoges Signal, aber zunehmend als digitales Bussystem verfügbar ist. Die Vielzahl digitaler Bussysteme und deren Stärken und Schwächen gerade im Echtzeitbetrieb oder in sicherheitskritischen Anwendungen bedürfen einer detaillierten Implementierungsstrategie.

### d. Test unter Einsatzbedingungen

Das Ergebnis des Entwicklungsprozesses muss sich einem Test unter Einsatzbedingungen unterziehen. Er zeigt, ob das Konzept zur Umgebungserkennung in der Praxis – auch unter ungünstigen Bedingungen – zuverlässig und sicher funktioniert. Häufig wird sich diesem ersten Test eine Korrekturschleife anschließen.

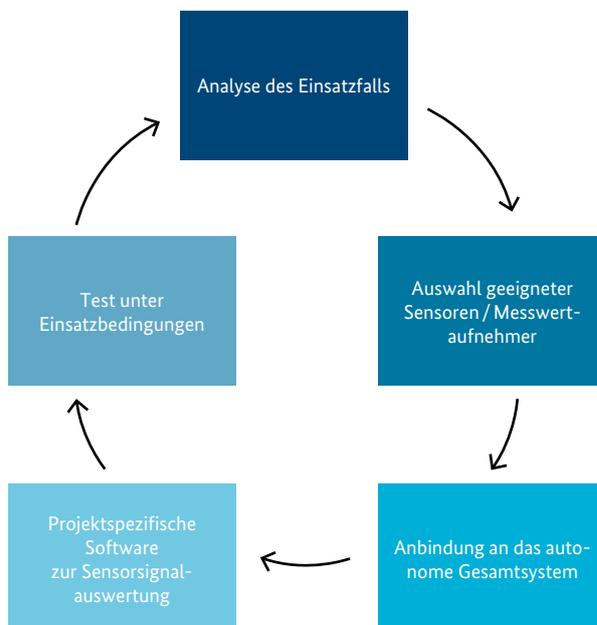


Abbildung 6: Typisches Aufgabenspektrum bei der Implementierung einer Umgebungserkennung

Die Integration von externen Kompetenzen tief in den Kern eines Entwicklungsprojektes ist auch eine Vertrauensfrage. Eine neutrale Entscheidungshilfe über geeignete Kooperationspartner ist der AMA Fachverband für Sensorik.

Die etwa 70 Institute unter den Mitgliedern des AMA-Fachverbandes sind potenzielle Kandidaten für die am Anfang des Kapitels beschriebene Rolle als technischer Berater / Intermediär. Über das Produktspektrum der Branche gibt das AMA Branchenverzeichnis Sensor- und Messtechnik 2011/12 detaillierte Auskunft. Mit dieser kontinuierlich vom Branchenverband gepflegten und weiterentwickelten Datenbank ist eine Übersicht über potenzielle Lieferanten und Dienstleister verfügbar. (AMA Fachverband für Sensorik e.V.)

Die Weiterentwicklung dieser Datenbank durch den Fachverband hin zu einem notariellen Broker-System könnte sicherlich die Bewältigung der Herausforderungen bei der Auswahl des richtigen Kooperationspartners für „Einsteiger“ unterstützen.

## 3.2 Empfehlungen für Hersteller

Neben den sensorischen Fähigkeiten ist die Einbindung in das autonome Gesamtkonzept, die Kommunikationsschnittstelle, eine wesentliche technische Herausforderung. Neben technischen Anforderungen spielen die rechtlichen Rahmenbedingungen (Sicherheit, Zulassung) eine Schlüsselrolle. Daraus ergeben sich nachfolgende Empfehlungen:

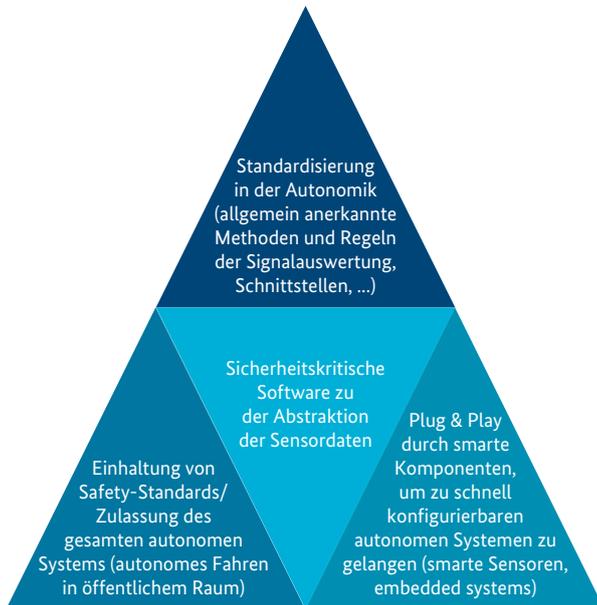


Abbildung 7: Sensorik in der Autonomik – übergeordnete Herausforderungen

### Plug-and-Play

Gegenwärtig werden Sensoren über standardisierte Schnittstellen an die Gesamtsysteme angeschlossen. Auf der Feldbusebene haben sich verschiedene Lösungen durchgesetzt (z. B. ProfiBus, CAN-Bus), die jedoch nicht die abstrakte Informationsebene berücksichtigen. Auf der darunter liegenden Sensorbusebene ist der IO-Link eine zukunftssträchtige Lösung, jedoch für größere Datenmengen bisher ungeeignet.

Eine wesentliche Voraussetzung ist die Fähigkeit zur aufwandsarmen Adaption generischer Sensoriklösungen. In diesem Zusammenhang stellt die dateneffiziente Beschreibung der Umgebung eine Herausforderung dar. Deshalb sollten Datenströme so kompakt wie möglich gehalten werden. Die Entwicklung einer Hochsprache erscheint sinnvoll, die auf einer höheren Abstraktionsebene die Kommunikation zwischen Sensor(en) und zentraler Steuerung übernimmt. Vorbilder hierfür können XML, der DIN/ISO-Code aus dem Werkzeugmaschinenbereich (DIN 66 025 bzw. ISO 6983) und der IO-Link sein. Das Ziel besteht hierbei primär in einer Verringerung des Engineeringauf-

wandes und der Möglichkeit, Sensoren verschiedener Anbieter ohne Anpassungsprogrammierung einzusetzen. Langfristiges Ziel ist die Wandlung des bisher als Projektmarkt einzustufenden Marktes für autonome Systeme hin zu einem Produktmarkt, in dem der Preis für die einzelnen autonomen Objekte primär über den Gesamtsystempreis entscheidet.

Zur Verringerung der Datenströme bedarf es also einer „intelligenten“ Signalverarbeitung, die innerhalb des Sensors über hohe Rechenleistungen verfügt, um komplexe Aufgaben wie die Umgebungsmodellbildung oder die Objekterkennung abzuwickeln. Ansätze für derartige Lösungen gibt es bereits, z. B. bei Fahrerassistenzsystemen in der Automobilbranche.

### Standardisierung

Standardisierung spielt als Mittel der Marktdurchdringung eine entscheidende Rolle. In der Messtechnik/Sensorik sind in diesen Prozessen bereits viele deutsche Akteure engagiert. Für die Autonomik kann auch die Mitwirkung der Endanwender hilfreich sein, die in diese Prozesse unbedingt einzubinden sind.

Die Standardisierung im Bereich der Sensorik für autonome Systeme sollte sich primär auf Fähigkeiten, keinesfalls auf Technologien (Messverfahren) beziehen. Dabei sollten auf der unteren Abstraktionsstufe solche Aspekte wie das Engineering sowie die Wartung unterstützt werden (z. B. Kommunikation eines standardisierten Fähigkeitsprofils; Selbstdiagnose), daneben ist die Abstraktion in intelligenten Sensoren ein interessanter Aspekt (z. B. 3D-Volumenmodell anstatt Datenstream mit 3D-Bildern). Für einfache Sensoren existiert bereits der standardisierte IO-Link (XML) als Beschreibungssprache. Dieses Prinzip erscheint auf komplexere Sensoren übertragbar (XML-basiert oder nach dem Vorbild der DIN 66025/ISO 6983). Künftig sind auch semantisch adressierbare Sensoren vorstellbar.

### Sicherheitskritische Software

Die Software zur Auswertung der gewonnenen Sensordaten spielt eine besondere Rolle. An dieser Stelle wird primär solche Software betrachtet, die aus gewonne-

nen Sensordaten eine Abstraktion vornimmt, weniger die im Sensor integrierte Software zur Umsetzung des Messverfahrens.

Software ist dabei dann sicherheitskritisch, wenn durch ihr Fehlverhalten Gefährdungen für die Umwelt – materielle und ökonomische Schäden oder sogar Beeinträchtigungen der Gesundheit von Menschen – entstehen können.

Ein Großteil der eingesetzten Software für autonome Systeme ist sicherheitskritisch, wie etwa für die Fähigkeit „Volumenschutz“. Um solche Gefährdungen weitgehend auszuschließen, ist für sicherheitskritische Anwendungen eine Absicherung der Funktionalität, d. h. der Nachweis eines ausreichenden Sicherheitsniveaus (funktionale Sicherheit), nötig. Dieser Nachweis folgt dabei in vielen Anwendungsbereichen vorgegebenen Normen und Standards, wie etwa der IEC61508, der DO187B oder der ISO26262. In vielen Gebieten, wie z. B. der Avionik oder der Medizintechnik, sind explizite Zulassungen, die den Nachweis eines hinreichenden Sicherheitsniveaus beinhalten, verpflichtend. In diesem Zusammenhang spielen Verfahren zur Qualitätssicherung (Tests, Analysetechniken, formale Beweisverfahren) eine wichtige Rolle.

#### Volumenschutz

Unter Volumenschutz versteht man die Überwachung des Raums vor einem autonom fahrenden/sich bewegenden Objekt, der im Falle des „Notaus“ zum sicheren Anhalten gebraucht wird, durch geeignete technische Mittel (sicherheitskritischer 3D-Bereich unter Berücksichtigung nichtkooperativer, sich bewegender Elemente). Die Begriff ist im Rahmen der Diskussion mit der FTS-Community gebraucht worden, ist aber nicht weit verbreitet.

#### Einhaltung von Safety-Standards / Zulassung

Ein Kernaspekt des Einsatzes autonomer Systeme sind die rechtlichen Herausforderungen im Hinblick auf die Sicherheit, d. h. Unfallvermeidung.

Frei zugängliche Bereiche („quasi-öffentlicher Raum“) wie Krankenhäuser, Flughafenterminals oder auch der Straßenverkehr, in denen mit nicht kooperativem Verhalten von Personen zu rechnen ist, stellen Anforderungen, die sich anders als in nicht frei zugänglichen Bereichen gegenwärtig nur durch geringe Bewegungsgeschwindigkeiten und unmittelbare Nothaltnöglichkeit beherrschen lassen.

Es gibt eine ganze Reihe von Anwendungen bzw. Fähigkeiten, in der Sicherheit (Safety) nicht so relevant ist, daher erscheint für unterschiedliche Anwendungen eine Aufteilung in zwei Gruppen sinnvoll:

- Sensoren, die Informationen zur Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit bereitstellen (Sicherheitssensoren)
- Sensoren zur zuverlässigen, umfassenden Umgebungserkennung (smarte Sensoren).

Komplexe autonome Systeme setzen für die erforderlichen Sicherheitsstandards neben einer funktional zuverlässigen Sensorik den Einsatz sicherheitskritischer Software voraus, wie dieses heute im Bereich der Bahnsignaltechnik oder in Flugzeugen geschieht. Die in diesen Segmenten gewonnenen Erfahrungen müssen für die Autonomik nutzbar gemacht werden.

# 4. Wertschöpfung im Autonomik-Markt der Zukunft

Für den nachhaltigen wirtschaftlichen Aufstieg der Autonomik und der damit verbundenen Produkte ist ein Wandel des Marktes erforderlich. Seine Zukunft liegt in einem Produktmarkt, bei dem der Endanwender oder der Systemintegrator (bei komplexen Einsatzfällen) geeignete, in weitem Maße parametrierbare Hardware-Teilsysteme erwerben kann, die sich weitgehend autonom auf ihre jeweilige Einsatzumgebung einstellen. Dieses senkt gleichzeitig die Wartungs- und Weiterentwicklungskosten; beispielsweise können bei einer notwendigen Erweiterung zusätzliche Teilsysteme ohne zusätzliches Engineering eingefügt werden. In großen Stückzahlen gefertigte, teilstandardisierte Hardware ermöglicht zusätzliche Mengeneffekte bei der Preisgestaltung. Die Weiterentwicklung der Sensorik hin zu einer qualifizierten Umgebungserkennung ist ein Schlüsselement, um den in Abbildung 8 gezeigten Marktmechanismus mit seinem hohen Entwicklungspotenzial zu erreichen.

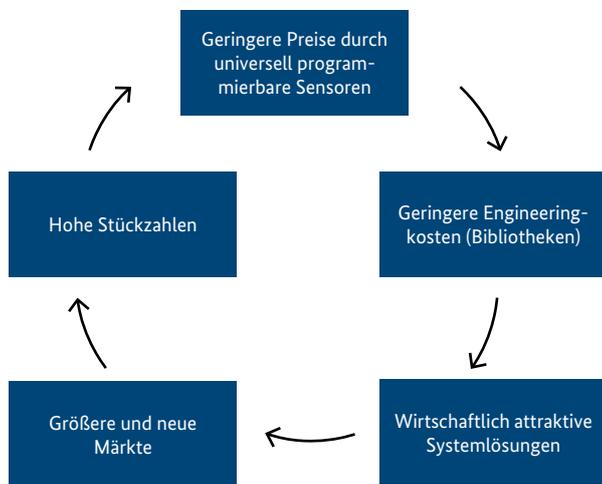


Abbildung 8: Soll-Zustand Autonomik-Markt 2020+

In den Anwendungsszenarien lassen sich verschiedene Gemeinsamkeiten erkennen, die mittelfristig im Komponenten- und Subsystembereich – dazu gehören auch die Umwelterkennung – zu größeren Stückzahlen führen dürften (Economies of Scale). Anpassungen an das konkrete Anwendungsszenario wird es dennoch geben. Beispielhaft dafür ist die erkennbare Konvergenz zwischen den klassischen Fahrerlosen Transportsystemen

und der Robotik hin zu einem mobilen, industriellen Assistenzkonzept. Dabei können auch Plattformkonzepte zum Tragen kommen. Dies kann für die stark durch deutsche Unternehmen dominierte Sensorindustrie zu attraktiveren Marktoptionen führen.



Abbildung 9: Wertschöpfungskette in der Autonomik 2020+

Zusammenfassend lassen sich die technologischen Herausforderungen an einem Beispiel erklären: heutige moderne Kraftfahrzeugmotoren wären ohne Sensoren undenkbar und ohne eine rasante Technologieentwicklung in der Sensorik unbezahlbar (Abbildung 10).



Abbildung 10: Massenmarkt Automotive für Messwertaufnehmer: Aufgabe gelöst

Eine vergleichbare Entwicklung steht der Umwelterkennung für die Autonomik bevor – die Herausforderung ist aber in Bezug auf Datengewinnung und -verarbeitung erheblich komplexer (Abbildung 11).

Die Entwicklung des Marktes von der Komponentenfertigung hin zu integrierten, intelligenten und leicht adaptierbaren Lösungen für unterschiedliche Anwendungen, wie sie die Autonomik verwendet, stellt ganz neue Herausforderungen an die Branche. Gleichzeitig eröffnet Autonomik vor allem aber neue Chancen, die starke Marktposition auch in der Zukunft halten und ausbauen zu können. Neben dem Geschäft mit klassischen Subkomponenten und Sensorelementen geht es um die Erschließung neuer Märkte für „intelligente“ Sensoren (smarte Komponenten/Objekte).



Abbildung 11: Mengenmarkt Autonomik für Umgebungserkennungssysteme: Aufgabe der Zukunft

Die Entwicklung autonomer Systeme und smarterer Objekte, die mit Fähigkeiten versehen sind, sich selbstständig via Internet zu vernetzen, sich wechselnden Situationen anzupassen und mit Nutzern zu interagieren, wird wesentlich durch leistungsfähige sensorische Funktionen mitbestimmt. Sensorhersteller müssen dazu verstärkt Kompetenzen in wichtigen Anwendungsbereichen und in der Informatik aufbauen. Die Intensivierung des Dialogs zwischen Sensorherstellern, Systemintegratoren und Anwendern bei autonomen Systemen ist vor diesem Hintergrund ein entscheidender Faktor für den zukünftigen Erfolg des Wirtschaftsstandorts Deutschland in diesem Bereich.

Die Sensorik stellt einen wesentlichen Aspekt des zukünftigen wirtschaftlichen Erfolgs der Autonomik dar. Der Handlungsbedarf erstreckt sich dabei weit über die zum gegenwärtigen Zeitpunkt (2012) laufenden geförderten Projekte hinaus und trägt in vielen Fällen einen stark generischen Charakter (Abbildung 12). Der zukünftige nachhaltige Erfolg und die wirtschaftlichen Potenziale für den Standort Deutschland lassen sich nur mit einer strategischen Herangehensweise an die aufgezeigten Herausforderungen erreichen. Die Sensorik stellt dabei eine Schlüsselzulieferindustrie dar.

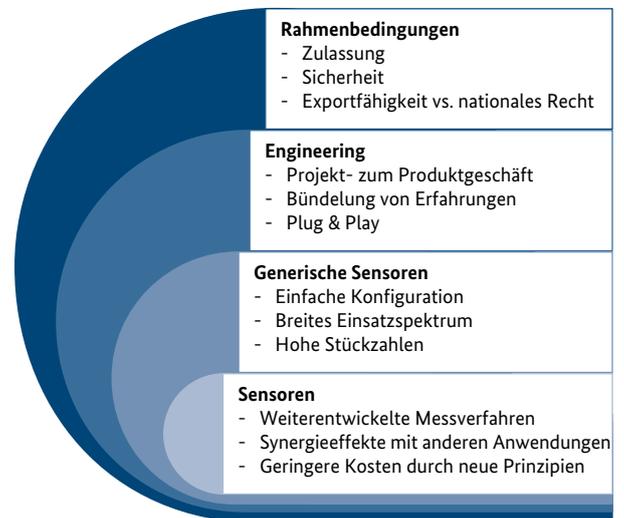


Abbildung 12: Sensorik für autonome Systeme - Handlungsebenen

Im Rahmen der Kurzstudie Umgebungserkennung (Künzel, 2012) wurden dafür fünf strategische Entwicklungsfelder für Sensoren abgeleitet und detailliert analysiert. (Abbildung 13). Die Reihenfolge der Darstellung dieser fünf Felder stellt dabei keinerlei Wertung dar.



Abbildung 13: Vom Sensor zur Umgebungserkennung Strategische Weiterentwicklungsfelder

Für den Markterfolg der Sensorik ist außerdem eine enge Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette unabdingbar. Dieses bedeutet insbesondere die Notwendigkeit der engeren Verknüpfung von Sensorikkompetenzen, Kompetenzen der Umgebungsmodellierung und Systemintegration. Aus der Sicht der Sensorikindustrie kann auf diesem Weg der Autonomikmarkt ein wachstumsträchtiges Segment werden, wenn die heute bestehenden Barrieren überwunden werden können.

## 5. Strukturelle Herausforderungen des Marktes

Der heutige Markt für autonome Systeme basiert überwiegend auf dem Projektgeschäft. Der Aufwand für die Anpassung der eingesetzten Hardware an das konkrete Einsatz-Szenario ist selbst bei ähnlichen Einsatzfällen erheblich. Dieses bedeutet, dass das Engineering einen erheblichen Anteil an den Kosten des Gesamtsystems darstellt. Hinzu kommen erfahrungsgemäß beträchtliche Wartungskosten bei proprietär erstellten Systemen. Allein dadurch werden autonomen Systemen (neben den rechtlichen und technischen Herausforderungen) heute viele preissensitive Einsatzfälle versperrt. Die begrenzten Stückzahlen und die große Variantenvielfalt treiben wiederum die Hardwarepreise zusätzlich in die Höhe. Ein Teufelskreis (Abbildung 14), der sich nicht allein durch die quantitative Verbesserung messtechnischer Parameter der eingesetzten Sensorik und eine verbesserte Informationsbasis für Systemintegratoren durchbrechen lässt.

Vielmehr besteht hier ein begründeter staatlicher Handlungsbedarf, um diese Situation nachhaltig zu verändern. Das Spektrum dieses Handlungsbedarfs reicht hier von der Förderung der kooperativen Zusammenarbeit, wie es im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) in den Modulen Kooperation (KOOP), Netzwerke (NEMO) durch das Ministerium für Wirtschaft und Technologie erfolgt, über die Unterstützung von Normungsprozessen bis hin zur direkten Adressierung der bestehenden technologischen und nichttechnologischen Herausforderungen im Rahmen einer gezielten Förderung.

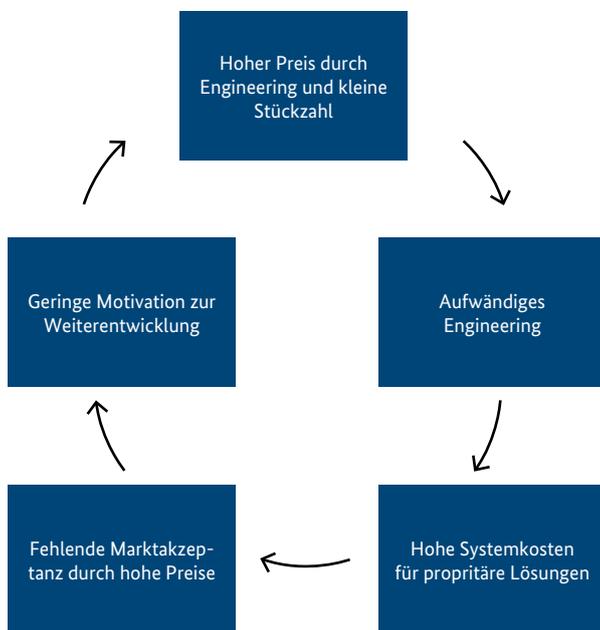


Abbildung 14: Ist-Zustand des Autonomik-Marktes

## 6. Von der Sensorik zur Umgebungserkennung in ausgewählten Projekten

In den nachfolgend beschriebenen AUTONOMIK-Projekten spielt die Weiterentwicklung der Sensorik/Umwelterkennung eine Schlüsselrolle für den nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg der Anwendungen. Ergänzt wird diese Darstellung durch eine tabellarische Übersicht der eingesetzten Sensoren im Anhang.

### 6.1 DyCoNet

Entwicklung energieautarker, intelligenter Netzwerke von Ladungsträgern in der Luftfrachtindustrie

→ Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 3, 21, 22

Ziel von DyCoNet ist es, allen an logistischen Prozessen der Luftfracht Beteiligten jederzeit aktuelle Logistikdaten überall auf der Welt zur Verfügung zu stellen. Es sollen völlig autonome Luftfrachtcontainer entwickelt werden, die ohne betriebliche Infrastruktur mit energieautarken Funkknoten ausgestattet sind und mit einem übergreifenden Unternehmensnetzwerk überall auf der Welt interagieren können.

#### Herausforderung:

Die umfassende Verfügbarkeit von Logistikdaten über die Unternehmensgrenzen hinaus und ein möglichst autonomer Materialfluss sind für den reibungslosen Ablauf von Distributionsprozessen von entscheidender Bedeutung. Für den Aufbau eines autonomen Materialflusses müssen Objekte, wie z.B. Transportbehälter, miteinander „sprechen“. Bisher wurden dazu vielfach Techniken wie RFID genutzt. Die Grenzen liegen dabei im Aufbau der Infrastrukturen (Reader, Middleware etc.) über die gesamte Wertschöpfungskette. Ohne diese Infrastrukturen sind die Objekte von ihrer Umwelt völlig abgeschnitten. Weiter ist die Abhängigkeit von Batterien zur Energieversorgung für den zu entwickelnden Luftfrachtcontainer eine zentrale Herausforderung. Der manuelle Prozess des Aufladens oder gar das Auswechseln ist zeit- und kostenintensiv, daher sind alternative Lösungsansätze zu verfolgen.

#### Sensor mit Zulassung für die Avionik

DyCoNet hat deshalb am Beispiel von Luftfrachtcontainern einen neuen Weg eingeschlagen. Das Projekt setzt für die grenzenlose Vernetzung der Objekte überall erreichbare und vorhandene Technologien wie GSM/UMTS und GPS ein. Bisher konnten Technologien wie GSM/UMTS und GPS für logistische Objekte, wie in diesem Fall die Luftfrachtcontainer, aufgrund ihrer aktiv sendenden GSM/UMTS-Komponenten in der Luftfahrt nicht eingesetzt werden. Internationale gesetzliche Vorschriften erlauben keine aktiv sendenden Funkkomponenten während der Flugphasen. Das für die Containerüberwachung eingesetzte Sensor- und Statusmodul zur Erkennung des Zustandes „Flugmodus“ hat die erforderliche Zertifizierungsfähigkeit erreicht. So ist keine Änderung an den bisherigen Prozessen und kein Aufbau neuer Hardware nötig.

Die in den Luftfrachtcontainern eingesetzten Funkknoten können darüber hinaus den Inhalt des Containers und den Container selbst überwachen (Beschädigungen des Containers, unzulässige Temperaturen etc.). So können Auftragnehmer ihren Kunden (Versendern) die Ladungsüberwachung als Mehrwert anbieten.

Die Sensorik ist in diesem Projekt ein wichtiges Teilelement. Bei den genutzten Sensoren handelt es sich um handelsübliche Produkte, die um eine Zulassung für die Avionik ergänzt werden. Besondere Anforderungen bestehen an die eingesetzten Sensoren hinsichtlich der Zuverlässigkeit und des minimalen Stromverbrauchs.

Für die Zukunft erscheint eine höhere Integration der Sensoren in die gesamte Elektronik und Kommunikation (smart system) wirtschaftlich potenzialträchtig und im Sinne der vorgenannten Anforderungen zusätzlich unterstützend, wenn entsprechende Stückzahlen am Markt nachgefragt werden.

### 6.2 marion

Mobile, autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten

→ Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 5, 8, 12, 14, 15

Ziel von marion ist die Automatisierung von Arbeitsprozessen in der Landwirtschaft und im innerbetrieblichen Transport mit autonomen Fahrzeugen. Kern des Projekts ist die Bewegungs- und Verfahrensplanung mobiler Maschinen als Grundlage für den autonomen Maschinenbetrieb. Intelligente Assistenzsysteme führen die Prozesse autonom durch und unterstützen die am Prozess beteiligten Menschen.

### Herausforderung:

Im Einsatzfeld Landwirtschaft wird Sensorik für drei Funktionen benötigt:

1. die Positionsbestimmung der autonomen Maschinen
2. die Erkennung eines Anhängers beim Beladen
3. die Umfeldüberwachung (zur Vermeidung von Kollisionen mit mobilen und immobilen Hindernissen und zur Ermittlung der Befahrbarkeit).

Auch im Bereich der Intralogistik bestehen hohe Anforderungen an die Sensorik, sowohl für den Fahrer unterstützende Assistenzsysteme als auch für vollautonome Transportroboter.

### Mit Eigenentwicklung zum Ziel

Zur Positionsbestimmung der autonomen Maschinen selbst wird aktuell GPS-RTK (Real Time Kinematics) in Verbindung mit Inertialmesssystemen sowie Beschleunigungssensoren genutzt. Die Positionsbestimmung ist essentiell für autonome Fahrzeuge. GPS-RTK ist die Schlüsseltechnologie für Positionsbestimmung im Outdoorbereich und daher unverzichtbar. Sie ist eine erprobte und weltweit verfügbare Standardtechnologie. Die Erkennung eines Anhängers beim Beladen umfasst die Erkennung der Kontur des Hängers und die Ermittlung des Füllstandes des Hängers. Hier kommt eine Stereoskopiekamera mit Bildauswertung zum Einsatz. Die Technologie ist eine wichtige Stützsensoren für kooperatives Arbeiten und bietet eine gute Entlastung der Fahrer. Sie ist eine Eigenentwicklung von CLAAS und stellt ein Alleinstellungsmerkmal im

Wettbewerb dar. Die Umfeldüberwachung dient vorrangig zur Vermeidung von Kollisionen mit mobilen und statischen Hindernissen und zur Ermittlung der Befahrbarkeit. Diese Funktion ist für eine weitreichendere Autonomisierung unverzichtbar. Allerdings ist aktuell noch keine geeignete Lösung verfügbar. Derzeitige Forschungsaktivitäten suchen nach Alternativen.

Die Sensorik ist im Projekt marion ein Schlüsselement, um die Entwicklungsziele in beiden Anwendungsszenarien zu erreichen. Nur mit geeigneter Sensorik und ausreichender Qualität der Sensordaten lässt sich eine verlässliche Bewertung der Umgebungssituation vornehmen, auf deren Basis Entscheidungen zur Anpassung des Fahrzeugverhaltens getroffen werden können.

In Bezug auf die Datengüte und Verlässlichkeit der Sensordaten, auch unter wechselnden Beleuchtungsverhältnissen, sind Laserscanner gegenwärtig der Maßstab. Zur Umgebungswahrnehmung (Bestimmung der Fahrzeugposition, Kollisionsvermeidung, Fahrbereiche, Szenenanalyse) werden folglich 2D- und 3D-Laserscanner eingesetzt. Allerdings sind diese Sensoren heute nur zu hohen Preisen am Markt verfügbar, so dass sie in preissensitiven Bereichen nicht wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Für die Lasthandlingprozesse (Lasterkennung, Regalerkennung) werden neben den Laserscannern noch 2D-time-of-flight-Kameras eingesetzt. Die seit einiger Zeit zur Verfügung stehenden 3D-time-of-flight-Kameras hingegen sind wirtschaftlich sehr viel attraktiver, zudem liefern diese statt 2D- sogar 3D-Daten der betrachteten Szenen. Die Verwendbarkeit dieser Sensorik wird im Projekt bis zum Laufzeitende überprüft. Das Projekt hat die Erfahrung gemacht, dass bei der weiteren Entwicklung der Sensorik neben einer hohen Zuverlässigkeit, weitem Einsatzbereich und geringen Kosten vor allem standardisierte Schnittstellen zur Systemintegration berücksichtigt werden sollten. Insbesondere die mögliche Sensorfusion sollte schon im Konzept eines Einzelsensors vorgesehen werden.



Interaktion zwischen Mensch und Maschine unter ergonomischen Aspekten.

### 6.3 rorarob

Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem

→ Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 6, 9

Ziel des Projekts rorarob ist die Entwicklung eines Roboterassistenzsystems zur Bearbeitung von Schweißaufgaben in der Rohr- und Rahmenfertigung. Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine unter ergonomischen und ökonomischen Aspekten ist ein wesentliches Ziel des Projekts.

#### Herausforderung:

Im Projekt rorarob werden die schweren Rohre und Rahmenkonstruktionen vom Roboter in eine für den Mitarbeiter günstige Position gebracht und dort positionsgenau gehalten, um nachfolgende Schweißprozesse zu ermöglichen. Mensch und Roboter arbeiten sozusagen Hand in Hand. Bisher ist eine direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik nicht zulässig.

Die Arbeitsräume werden strikt getrennt. rorarob hat eine Lösung entwickelt, die die direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in überschneidenden Arbeitsräumen ermöglicht. Die dafür notwendigen Sensoren müssen nicht nur die Geschwindigkeit und den Abstand messen, sondern benötigen auch eine gewisse Prognosefähigkeit.

rorarob setzt ein für Sicherheitsanwendungen zugelassenes handelsübliches Messsystem zur Überwachung des Arbeitsraums ein. Dieses optische Sensorsystem ermöglicht die Definition von räumlichen Sicherheitszonen, die im Falle einer Verletzung definierte Signale einer dazugehörigen Sicherheits-SPS schalten. Kombiniert mit sicheren Robotersteuerungen können verschiedene Sicherheitsfunktionen aktiviert werden. Der Mitarbeiter und die in diesem Fall sehr langsamen Roboter befinden sich innerhalb des virtuellen Zauns. Bei Eintritt eines weiteren Mitarbeiters in den Bereich würde das Assistenzsystem stoppen. Zudem wird der Prozessablauf geschützt, da der Mitarbeiter nicht eigenständig die Bauteile aus der Bereitstellung entnehmen soll.



Der Roboter legt ein Werkstück selbständig an einer vorgegebenen Position ab (viEMA).

So kann die Verletzung der äußeren Sicherheitszone die Geschwindigkeit des Roboters verlangsamen (Vorwarnzustand), das Verletzen der inneren Sicherheitszone kann einen „Not-Halt“ auslösen. Durch die Definition mehrerer Sicherheitszonen, die während des Programmablaufes umgeschaltet werden können, weist das System eine sehr hohe Flexibilität auf, was ein Alleinstellungsmerkmal darstellt.

Neben der hohen Flexibilität des Systems war die bereits bestehende Zulassung durch die Berufsgenossenschaften ausschlaggebend für die Wahl des Systems. Weiterentwicklungspotenzial für die Sensorik besteht bei dem eingesetzten System aus Sicht des Projektes in Bezug auf einen größeren erfassbaren Arbeitsraum und auf eine Zulassung zur Erkennung von Körperteilen (z. B. Finger). Im Projektverlauf wurden erste Gespräche zwischen dem Konsortium und der Entwicklungsabteilung des Sensorsystemherstellers geführt.

## 6.4 viEMA

Vernetzte, informationsbasierte Einlern- und Ausführungsstrategien für autonome Montagearbeitsabläufe  
 → Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 4, 13

viEMA hat ein skalierbares, roboter- und sensorgestütztes Montagekonzept entwickelt, das je nach Situation den Wechsel von Hand- auf Automatenmontage zulässt.

### Herausforderung:

Im Projekt mussten in Bezug auf die Sensorik zwei Teilprobleme gelöst werden: zum einen muss das Robotersystem in der Lage sein, Werkstücke selbständig zu erkennen, von einer Ablage zu greifen und in eine andere Ablage an einer vorgegebenen Position einzufügen. Außerdem ist die direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in überschneidenden Arbeitsräumen gefordert. Die dafür notwendigen Sensoren müssen nicht nur die Geschwindigkeit und den Abstand messen, sondern benötigen auch eine gewisse Prognosefähigkeit.



Der RoboGasInspector erkennt frühzeitig Gaslecks in technischen Anlagen

### Robuste Objekterkennung

Im Projekt viEMA wird in erster Linie kamerabasierte Sensorik zur Erfassung der Umwelt sowie zur Objekterkennung eingesetzt. Dabei stellen beide Funktionen zentrale Elemente des Vorhabens dar, bei denen die eingesetzte Sensorik (Messverfahren und Hardware) immer zusammen mit den eingesetzten Auswertungs-algorithmen (Software) betrachtet werden muss.

Wichtiges Ziel innerhalb des Projekts ist, ein hochflexibles System zu finden, das eine schnelle und einfache Anpassung an neue Szenarien auch durch fachfremde Bediener ermöglicht. Dazu werden für die Umweltmodellierung zur Kollisionsvermeidung und für eine einfache sowie gleichzeitig robuste Objekterkennung 3D-Messdaten benötigt. Ein neues auf Lasertriangulation basierendes Sensorkonzept ermöglicht die Gewinnung von Daten auch unter diesen Umständen. Das System ist unempfindlich gegen Fremdlicht, kostengünstig und sowohl für Umweltmodellierung als auch Objekterkennung geeignet. Vorteile des entwickelten Konzepts sind eine einfache Kalibrierung sowie die Möglichkeit, gleichzeitig sowohl 2D-Bildinformationen

als auch 3D-Messdaten während der Objekterkennung auszuwerten. Dies erlaubt vorhandenes Modellwissen zur Steigerung der Robustheit und der Performance einzusetzen.

Für die Konzeption zukünftiger leistungsfähiger und handhabbarer Sensorik ist die frühzeitige Integration von Modellwissen sowie die Berücksichtigung der speziellen Charakteristiken und Möglichkeiten der eingesetzten Auswertungsverfahren zu berücksichtigen.

## 6.5 RoboGasInspector

Simulationsgestützter Entwurf und Evaluation eines Mensch-Maschine-Systems mit autonomen mobilen Inspektionsrobotern zu IR-optischen Gasleck-Ferndetektion und -ortung in technischen Anlagen

→ Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 17, 23

Wie Roboter frühzeitig Gaslecks in technischen Anlagen finden, zeigt das Projekt RoboGasInspector. Dort wird ein innovatives Mensch Maschine System mit intelligenten, kooperierenden und mit Gasfernmessstechnik ausgestatteten Inspektionsrobotern entwickelt. So können Inspektionen von technischen Anlagen weitgehend autonom bewältigt werden.

### Herausforderung:

Die Herausforderung ist die weitgehend autonome, von mobilen Robotern durchgeführte Überwachung von Anlagen sowie die Detektion und Ortung von Lecks mit der gleichzeitigen Auswertung der gemessenen Daten und der Dokumentation der Inspektionen. Bisher ist diese Überwachung nur durch den Menschen (mit Messgeräten) möglich.

Bei RoboGasInspector wird Sensorik in zwei verschiedenen Einsatzfeldern genutzt. Einerseits werden Sensoren zur Selbstlokalisierung und Kollisionsvermeidung im Rahmen der autonomen Navigation der Roboterplattform eingesetzt. Dazu finden handelsübliche 2D-Laserscanner, ein MEMS-basiertes Trägheitsnavigationssystem sowie eine selbstentwickelte optische Odometrie Anwendung. Der Laserscanner ermöglicht

die Erstellung einer Grundrisskarte der Einsatzumgebung. Während des Einsatzes werden die Laser-, Odometrie- und Inertialdaten unter Verwendung der Karte mit probabilistischen Filterverfahren zu genauen Positionsschätzungen integriert. Das Gesamtsystem wird dadurch unempfindlicher gegen größere GPS-Ungenauigkeiten, wie sie in bebauten Bereichen häufig auftreten. Für den teleoperierten Betrieb kommt zusätzlich eine On-Board-Kamera zum Einsatz.

Darüber hinaus wird spezielle Sensorik für die Arbeits-, d. h. Inspektionsfunktionen des Robotersystems verwendet. Insbesondere werden infrarot-(IR-)optische, spektral messende Sensoren zur Gasfernmessung eingesetzt. Sehr empfindliche und hochauflösende Wärmebildkameras detektieren einen Flüssigkeitsaustritt oder eine Gasexpansion. Video-Bilder der On-Board-Kamera können mit Wärmebildern fusioniert werden. Abstandsmessungen eines Laserscanners werden zur Effizienzsteigerung der Gasmessung sowie auch zur Umrechnung integraler in mittlere Gaskonzentrationsmesswerte verwendet.

IR-optische Fernmessverfahren werden eingesetzt, weil sie insbesondere eine differenzierende Entwicklung von Arbeitsfunktionen gestatten: Inspektionen können aus sicherer / effizienzsteigernder Entfernung ausgeführt werden. Bereiche können einfacher gescannt werden. Im Mobilitätsbereich ist der Einsatz von Laserscannern zur kartenbasierten Positionsbestimmung und zur Kollisionsvermeidung Stand der Technik.

Eine zukünftige Verbesserung der Einsatzmöglichkeiten von autonomen Systemen könnte durch kostengünstige, schnelle und robuste 3D-Scanner erreicht werden. Diese könnten unterschiedliche, auch über das betrachtete Einsatzszenario der Autonomie- und Assistenzfunktionen hinausgehende, gute Marktperspektiven eröffnen. Weiterhin würde die Weiterentwicklung kostengünstiger, hochsensitiver und kompakter Gasmessgeräte für beliebige Gase das Potenzial für parametrierbare, kundenspezifische Überwachungslösungen bieten.

## 6.6 SaLsA

### Sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge im Außenbereich

→ Eingesetzte Sensoren: Tabelle 1, Spalte 2, 7, 16

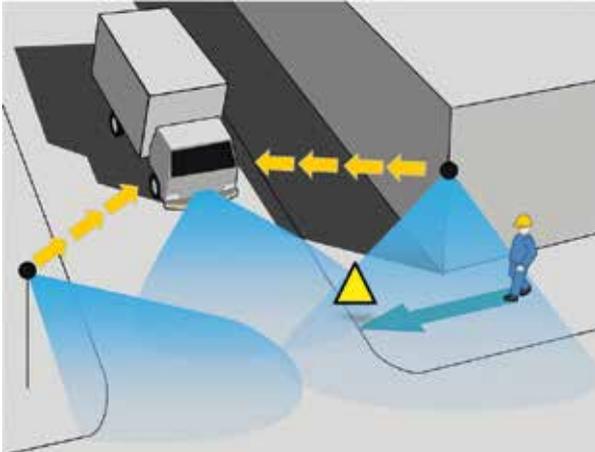
SaLsA zielt auf die Entwicklung eines Systems von autonomen Transportfahrzeugen, die sich erstmals sicher und schnell in einer gemeinsamen Arbeitsumgebung mit klassischen personengeführten Fahrzeugen und Fußgängern bewegen.

#### Herausforderung:

Der Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen im Außenbereich ist nur effizient, wenn die Fahrzeuge schneller fahren dürfen als im Innenbereich. Die Schnelligkeit bedingt jedoch eine schnelle Reaktion auf Gefahren. Potenzielle Gefahrensituationen erkennen können heißt, über ein Umgebungsbild zu verfügen, das über den Sichtbereich der Fahrzeuge hinausgeht. Das ist nur möglich, wenn Daten aus Fahrzeugsensoren und stationären Sensoren und weiteren Informationsquellen wie Kartendaten und Prozessinformationen miteinander intelligent verknüpft werden. Berührungslose Sensoren (z. B. Laserscanner) mit entsprechenden Schutzklassen für Outdooranlagen existieren derzeit nicht.

Die im Projekt SaLsA entwickelten Fahrerlosen Transportsysteme für Außenanwendungen haben neben der bewährten GPS-Technologie zur Navigation verschiedene Sensoren zur Umgebungserkennung. Stationäre sowie an den Fahrzeugen angebrachte Sensorik überwacht während der Fahrt immer eine ausreichende große Fläche vor dem Fahrzeug, so dass die Sicherheit für Personen und Sachwerte gegeben ist. Sobald Fahrerlose Transportfahrzeuge in gemeinsamen Bereichen mit Personen und personengeführten Fahrzeugen agieren, sind Sensoren zum Personenschutz obligatorisch.

Für Außenanwendungen werden bislang berührende Sensoren („Bumper“) mit geringer Detektionsreichweite eingesetzt, die auch nur geringe Fahrgeschwindigkeiten ermöglichen. Berührungslose Sensoren (z. B.



Stationäre und am Fahrzeug angebrachte Sensorik überwacht die Fahrt.

Laserscanner) mit entsprechenden Schutzklassen für Outdoor-Anlagen existieren derzeit nicht. Im Außenbereich, wo Strecken bis zu einigen Kilometern über ein Betriebsgelände führen können, sind jedoch höhere Geschwindigkeiten und damit geeignete Sicherheitsverfahren durch outdoortaugliche Sensorik eine Schlüsselkomponente zum wirtschaftlichen Erfolg.

SaLSa setzt deshalb am Fahrzeug eine Kombination verschiedener berührungsloser Sensortechnologien ein. Durch die Fusion unterschiedlicher Messverfahren soll die Zuverlässigkeit des Systems gesteigert werden. Dabei kommen am Markt erhältliche Produkte (z. B. Laserscanner, Stereo-Kamera) sowie eine neuentwickelte outdoortaugliche Mobil-Kamera zum Einsatz. In der Kamera wird ein für den Außenbereich besonders geeigneter 3D-PMD-Sensor eingesetzt. Eine externe leistungsfähige und skalierbare Beleuchtungseinheit dient der Ausleuchtung des Sichtfeldes mit dem für die Entfernungsmessung notwendigen modulierten Licht. Die Kamera berücksichtigt die Anforderungen an den industriellen Einsatz im Außenbereich.

Zur Erweiterung des herkömmlichen Sicherheitskonzepts für Fahrerlose Transportfahrzeuge setzt das Konzept von SaLSa zusätzlich externe, stationäre Sensorik zur vollständigen Überwachung des Betriebsgeländes ein. Diese Umgebungssensorik sendet ihre Daten an das Fahrzeug, das daraufhin seine Geschwindigkeit anpasst oder einen alternativen, weniger riskanten

Fahrweg wählt. Im einfachsten Fall erteilt die Umgebungssensorik eine Freigabe für schnellere Fahrt.

Zukünftige Sensorkonzepte werden diesen Trend der Datenfusion verstärkt aufgreifen. Idealerweise wird es für Fahrerlose Transportsysteme eine skalierbare oder modulare Sicherheitseinheit geben, die durch Fusion verschiedener Einzelsensoren ein intelligentes Bewegungsverhalten für das Fahrzeug bestimmt. Eine wichtige Neuerung wird zukünftig die Überwachung des dreidimensionalen Raums um das Fahrzeug herum sein. Die berührungslos arbeitenden Sensoren werden einen großen Bereich sicher überwachen können, so dass die Fahrgeschwindigkeit entsprechend gesteigert werden kann.

# Anhang

**Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Sensoren und Messwertaufnehmer**

Spalte Nr.	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
<b>Messgröße</b>	Geogr. Position	Geogr. Position	Geogr. Position	3D	3D	3D	3D-Entfernungsbild	3D	3D	3D	Differential-Multi-3D, 3a
<b>Messprinzip</b>	GPS / Glonass	Differential GPS	GPS	Stereo-triangulation mit Laserlinien	Stereo-Kamera	IR-Optische Triangulation	Time-of-flight	Time-of-flight/Scanner	Stereo-Kamera, redundant	Stereo-Kamera	IR-Photogrammetrie mit Retroreflektoren
<b>Messbereich</b>	entfällt	entfällt	entfällt	400 mm x 600 mm x 400 mm	1 m...5 m	X: $\leq 3,0$ m <sup>[2]</sup> Y: $\leq 2,2$ m <sup>[2]</sup> Z: 4,4 m	[1] 1m...10m (...140 m <sup>[1]</sup> )	$\leq 80$ m	[1] X: $\leq 9,8$ m <sup>[2]</sup> Y: $\leq 7,4$ m <sup>[2]</sup> Z: $\leq 7,5$ m	97 ° hor. Bildwinkel	[1] X: $\leq 4,22$ m <sup>[2]</sup> Y: $\leq 4,22$ m <sup>[2]</sup> 0,3 $\leq$ Z $\leq$ 4,1 m
<b>Auflösung:</b>	X, Y: $< 2$ cm Z: $\leq 2$ cm	1 mm	Ort: 1/1000' Zeit: 1 s	1 mm	k.A.	k.A.	64 x 16 Pixel lateral	10 mm	k.A.	648 x 488 Pixel	k.A.
<b>Messunsicherheit:</b>	k.A.	$\pm 3$ cm / $\pm 1$ cm (ohne/ mit Basisstation)	k.A.	1 mm	k.A.	$\leq 37$ $\mu$ m (1D) $\leq 60$ $\mu$ m (3D)	5...10 cm <sup>[3]</sup>	$\pm 35$ mm	$< 7$ mm	$< 0,5$ % ( $< 1$ m) $< 1,5$ % ( $< 20$ m)	$< 1$ mm $< 1^\circ$ (Z=60 cm)
<b>Zertifiziertes Sicherheitslevel:</b>	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	SIL2	NEIN	NEIN
<b>Max. erreichbare Messrate (s-1)</b>	20 Hz	20 Hz	1 Hz	0,5 Hz	$> 5$ Hz	1 kHz	$\leq 50$ Hz	75 Hz	4 Hz	48 Hz	110 Hz
<b>Als Teil eines Multisensor-konzeptes genutzt zusammen mit ... (anderes Messprinzip vermerken):</b>	JA	Odometrie	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	Mit Laser-scanner	Mit Laser-scanner	NEIN	Laser-scanner	NEIN
<b>Schnittstelle zur übergeordneten Steuerung:</b>	RS 485 propr., RS 232, CAN Ethernet	RS 422, RS 232	V.24	Ethernet	CAN-Bus (ISO 11898)	proprietär	Ethernet	RS 422	proprietär	IEEE 1394a	Ethernet
<b>Signalabstraktion auf Sensorebene</b>	(JA)	JA	(JA)	NEIN	JA	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA
<b>Adaptiver Sensor:</b>		NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN	JA	JA	JA	NEIN	NEIN
<b>Marktverfügbarer Sensor</b>	JA	JA	JA	JA	nur als Ausrüstungsteil	JA	NEIN	NEIN	JA	JA	JA
<b>Beschreibung auf Seite</b>	AutoBau-Log	SaLSA	DyCoNet	viEMA	marion	rorarob	SaLSA	Marion	rorarob	robogas	AutoBauLog

2 Messraum in der Form eines liegenden Pyramidenstumpfs

3 Abhängig vom Abstand zum Messgerät

4 objektabhängig

5 Systematische Abweichung

[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]
3D	2D	2D	2D	2D-Entfernung	2D	Drehwinkel	Drehwinkel	Neigung	3D-Beschleunigung	Temperatur	Gaskonzentration CH <sub>4</sub>
IR-Projektion + RGB-Bild	Laserscanner	Laserscanner	Laserscanner	Laserscanner	Lidar time-of-flight	Optischer Inkrementgeber	Drehpotentiometer	Seismische Masse	Seismische Masse	Halbleiter	Laserabsorptionsspektroskopie
0,8...3,5 m[1]	≤ 30 m Kreissegment 270 °	≤ 10 m Kreissegment 180 °	≤ 30 m / Kreissegment 270 ° bzw. ≤ 49 m / Kreissegment 190 °	0,5mm.. 50 m Kreissegment 270 °	≤ 80 m Kreissegment: 190 °	0..359,9 °	0..325 °	0..10 % 0..20 %	± 2 g / ± 8 g	-40...+ 62,5 °C	0... 99,999 ppm*m
k.A.	0,5 °	0,25 ° / 0,5 ° / 1 °	0,25 ° / 0,5 °	0,25 °...0,5 °	0,167 ° ... 1 °	128 Teile/360 °	k.A.	Typ. ± 0,025 % Max: ± 0,00625 %	56 Teile/g 14 Teile/g	< 0,2 K	1 ppm*m
k.A.	k.A.	± 15 mm	± 24 mm bzw. ± 48 mm	± 30 mm <sup>5</sup> ± 12 mm <sup>6</sup>	± 25 mm...± 50 mm[4][2] ± 6 mm...± 14 mm [2] [5]	k.A.	> 2 %	k.A.	± 10 %	0,5 ...2,5 K	5 ppm*m (≤ 15 m) 10 ppm*m (15..30 m)
NEIN	SIL 2	NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
30 Hz	Ca. 10 Hz	75 Hz	10...150 Hz	25 Hz/50 Hz	100 Hz	3.000 U min <sup>-1</sup>	Analog	20 Hz	500 kHz	0,1 / 1 Hz <sup>7</sup>	10 Hz
Selbst Multi-sensor	NEIN	NEIN	NEIN	3D-Kamera	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	Thermografie-kamera
USB	Proprietär, RS-232	Proprietär, RS-232	Proprietär, RS-422	RS 232, Ethernet	Ethernet, USB	Rechteck, „-Kanal, 90° phasenverschoben	Ohmsche Meßbrücke	CAN IECnnnn; RS-485 propr.	SPI, I <sup>2</sup> C	ISO/IEC 14543-3-10	RS 232
NEIN	JA	NEIN	NEIN	JA	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	
NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA	NEIN	NEIN	k.A.	(JA)	JA	NEIN
(JA)	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	(JA)	JA
Marion	viEMA	Marion	Marion	SaLSA	RoboGas-Inspector	AutoBauLog	AutoBauLog	AutoBauLog	DyCoNet	DyCoNet <sup>8</sup>	RoboGas-Inspector

6 Statistische Abweichung

7 Energieoptimal/max. Taktrate

8 Im Rahmen des Projektes modifiziert

# Literaturverzeichnis

AMA Fachverband für Sensorik e.V. (kein Datum).

Branchenverzeichnis Sensor- und Messtechnik.

Abgerufen am 13.06.2012 von <http://www.ama-sensorik.de/site/de/281/branchenverzeichnis.html>

Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2012).

Bundesbericht Forschung und Innovation 2012. Berlin, Bonn.

Bundesregierung. (14.06.2012). Industrie 4.0.

Abgerufen am 14.06.2012 von <http://www.hightech-strategie.de/de/2676.php>

Forschungsunion im Stifterverband für die deutsche Wissenschaft. (2012).

Bericht der Promotorengruppe Kommunikation – Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Berlin.

<http://www.competence-site.de/Frost-and-Sullivan-Global-Top-10-Hot-Technologies-to-Invest>. (kein Datum).

Abgerufen am 22.09.2010

[http://www.elektroniknet.de/messen-testen/news/article/86235/0/\\_Der\\_Sensorik-Markt\\_ist\\_viel\\_groesser\\_als\\_gedacht\\_/](http://www.elektroniknet.de/messen-testen/news/article/86235/0/_Der_Sensorik-Markt_ist_viel_groesser_als_gedacht_/). (kein Datum). Abgerufen am 07.03.2012

Künzel, M. (2012). Multimodale Sensorik - Konzepte zur Umwelterkennung und -modellierung

(Kurzstudie im Auftrag des BMWi). Berlin.

ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. (2009).

Nationale Roadmap Embedded Systems. Frankfurt.



