

ATZ extra

Wenn Maschinen sehen lernen:
Mobile Arbeitsmaschinen
automatisieren bei
wechselnden Umweltbedingungen

Sonderdruck

aus ATZheavyduty 02|2019

Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Titelbild: © shutterstock | Bannafarsai_Stock



© fotolia.com | Piman Khrutmuang | Daniel Berkmann

Zuverlässige Objekt- erkennung für autonome mobile Arbeitsmaschinen

Die zuverlässige Erkennung von Personen und Objekten bei wechselnden Wetterverhältnissen und Umgebungsbedingungen stellt die Hersteller autonomer mobiler Arbeitsmaschinen vor große Herausforderungen. Der Normentwurf DIN EN 62998 für sicherheitsrelevante Sensoren im Außenbereich bietet hierbei Hilfestellungen an, ohne jedoch konkrete Verfahrensanweisungen zu geben. Die von ITK Engineering vorgestellte Lösung betrachtet die zu automatisierenden Abläufe als Ganzes und zeigt, wie eine zuverlässige Objekterkennung, unter Konkretisierung der Vorgaben der DIN EN 62998, normkonform entwickelt und abgesichert werden kann.

AUTOREN



Dr. Sebastian Jakobs
ist Expert Engineer für funktionale
Sicherheit bei der ITK Engineering
GmbH in Rülzheim.



Dipl.-Ing. (FH) Andreas Weber
ist Fachreferent Functional Safety
bei der ITK Engineering GmbH in
Rülzheim.



Dr. Dennis Stapp
ist Programm Manager für Testsys-
teme und Industrielle Automatisie-
rung bei der ITK Engineering GmbH
in Frankfurt am Main.

MOTIVATION

Fahrerlose Transportfahrzeuge im industriellen Bereich werden meist durch taktile oder berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen abgesichert, um so Personenschäden zu vermeiden. Da im Außenbereich mit wechselnden Wetterverhältnissen und schwierigen Umgebungsbedingungen zu rechnen ist, sind die für den Innenbereich entwickelten Systeme hierfür nicht geeignet. Um die Nutzung von autonomen Arbeitsmaschinen auch im Außenbereich zu ermöglichen, definiert die DIN EN 62998 wie die Eigenschaften eines Sensors unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen bewertet werden können, jedoch ohne konkrete Anweisungen zu geben. Im Folgenden wird das in der DIN EN 62998 definierte Vorgehen konkretisiert und in einen gesamtheitlichen Entwicklungsprozess integriert, der wiederum gezielt durch entwicklungsbegleitende Simulationen unterstützt wird.

ENTWICKLUNGSMETHODIK FÜR ZUVERLÄSSIGE OBJEKTERKENNUNG

Im Folgenden wird ein von ITK Engineering angewandtes Vorgehen vorgestellt, um die generischen Vorgaben der DIN EN 62998 unter Beachtung der

anwendungsspezifischen Anforderungen an ein solches System zu konkretisieren und umzusetzen, **BILD 1**. Im ersten Schritt erfolgt eine Analyse des Anwendungsfalls, um die Anforderungen an die Objekterkennung stellen zu können. Dieser Schritt ist entscheidend für die gesamte Entwicklung, da nur durch die Definition der abzusichernden Bereiche und der sicherheitsrelevanten Objekte eine Auswahl der nötigen Sensortechnologien erfolgen kann. Zur Erkennung von Objekten in großen Entfernungen können zum Beispiel Ultraschallsensoren die Anforderungen nicht vollständig als einzige Sensortechnologie erfüllen. Auch die Umgebungsbedingungen müssen hier bereits bei der Vorauswahl der Sensoren in Betracht gezogen werden: In sehr staubigen Bereichen ist die Nutzung von LiDAR(Light Detection And Ranging)-Sensoren nicht zielführend, und es sollte hier auf eine andere Technologie zurückgegriffen werden. Ebenfalls stellen Bodenunebenheiten, wie sie im Offhighway-Bereich häufig anzutreffen sind, große Herausforderungen an die Wahl der geeigneten Sensorik. Die geforderte Sicherheitseinstufung der Objekterkennung wird anhand einer Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung ermittelt, deren Erreichen am Ende der Entwicklung nachgewiesen werden muss.

Im zweiten Schritt erfolgt die Definition der Systemarchitektur und die prototypi-

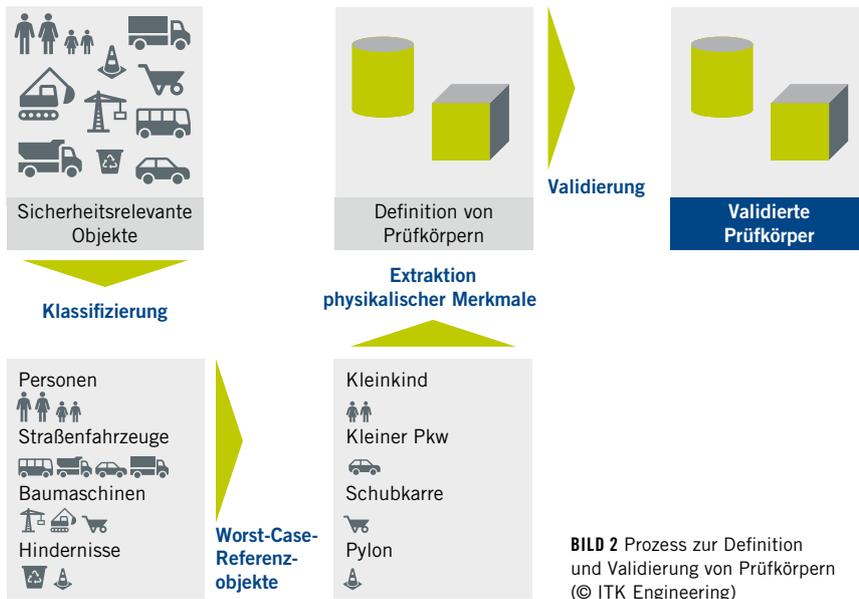
sche Umsetzung mit anschließender Untersuchung der Detektionsfähigkeit der Objekterkennung. Iterationen innerhalb dieses Schritts sind möglich, da sich bei der Untersuchung des Detektionsvermögens oder der Analyse systematischer und umweltbedingter Einflüsse eine nötige Anpassung der Architektur ergeben kann. Parallel dazu sollte die Betrachtung der funktionalen Sicherheit der Objekterkennung entsprechend der angewandten Norm(en) für funktionale Sicherheit erfolgen. Nachdem der Nachweis der Detektionsfähigkeit erbracht und die Umwelteinflüsse untersucht wurden, erfolgt im dritten Schritt die Hardware(HW)- und Software(SW)-Entwicklung sowie Integration auf der Zielplattform mit den anschließenden Tests und der Validierung der Systemfunktionen. An dieser Stelle erfolgt auch der Nachweis der erreichten Sicherheitsintegrität des Systems. Nach Integration in die Maschine muss schließlich noch eine Validierung auf Fahrzeugbeziehungsweise Maschinenebene durchgeführt werden, um so die Sicherheitsfunktion im Gesamtverbund nachweisen zu können.

DETEKTIONSFÄHIGKEIT DER SENSORIK

Ein zentraler Punkt der DIN EN 62998 ist der Nachweis der Detektionsfähigkeit



BILD 1 Entwicklungsprozess einer zuverlässigen Objekterkennung unter Beachtung des Anwendungsszenarios der Maschine (© ITK Engineering)



der Sensorik unter Berücksichtigung technologischer Eigenschaften sowie systematischer und umweltbedingter Störeinflüsse. Der Normentwurf stellt hierfür generische Anforderungen, ohne jedoch konkrete Schritte zu definieren, wie ein solcher Nachweis erfolgen kann. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie die Vorgaben konkret umgesetzt werden können und wie man die technologie-spezifischen Eigenschaften berücksichtigen kann.

DEFINITION UND VALIDIERUNG VON PRÜFKÖRPERN

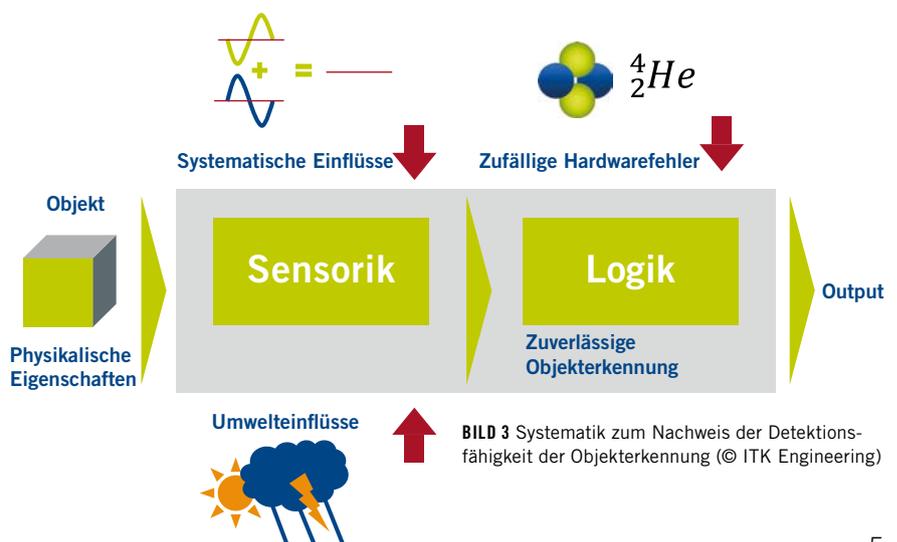
Um eine möglichst hohe Testabdeckung bei gleichzeitig vertretbarem Aufwand zu erreichen, muss eine systematische Auswahl an realen Testszenarien erfolgen. Wichtig hierbei ist, dass man die Testszenarien an das Anwendungsszenario der Maschine und an die genutzten Sensortechnologien anpasst. Hierbei kann es jedoch eine Vielzahl an sicherheitsrelevanten Objekten geben, für die das Detektionsvermögen nachgewiesen werden muss. Ein praktikabler Ansatz dafür ist, Sensor- und Anwendungsspezifische Prüfkörper zu definieren, mit denen der Nachweis erbracht werden kann. Hier bietet sich folgendes Vorgehen an, **BILD 2**:

1. Klassifizierung von Objekten mit ähnlichen Eigenschaften (zum Beispiel Personen, Fahrzeuge, Hindernisse, statische Objekte)

2. Auswahl eines Referenzobjekts für jede Objektklasse, das den Worst-Case der Detektion darstellt
 3. Extraktion charakteristischer physikalischer Eigenschaften (zum Beispiel Material, Geometrie, Reflexionseigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit), die für die Erkennung durch den jeweiligen Sensortyp relevant sind
 4. Definition eines Prüfkörpers für die jeweiligen Objektklassen auf Basis der Ergebnisse aus Punkt 3
 5. Validierung der Prüfkörper anhand des jeweiligen Referenzobjekts.
- Die genutzte(n) Sensortechnologie(n) und die Eigenschaften des jeweiligen Sensors spielen hierbei eine zentrale Rolle. Neben den geometrischen Eigen-

schaften der realen Objekte müssen die Prüfkörper die für die jeweilige Sensortechnologie relevanten Eigenschaften abbilden. Für LiDAR-Sensoren (Wellenlänge $\lambda = 900 \text{ nm}$) gilt, dass unter anderem diffus reflektierende Objekte mit nur 1,8 % Remission im relevanten Wellenlängenbereich erkannt werden müssen [1]. Für Radarsensoren sollten unter anderem die dielektrischen Eigenschaften sowie die Strukturabmessungen des Materials berücksichtigt werden. Liegen die Strukturabmessungen im Bereich der Wellenlänge der Strahlung, können Interferenzeffekte auftreten, die eine zuverlässige Erkennung des Objekts verhindern. Auf Basis der relevanten und sensorspezifischen Eigenschaften für die jeweiligen Objektklassen kann schließlich ein Prüfkörper aufgebaut werden. Durch die anschließende Validierung wird sichergestellt, dass die Erkennungswahrscheinlichkeit des Prüfkörpers nicht höher ausfällt als die des Worst-Case-Referenzobjekts.

Mithilfe der validierten Prüfkörper erfolgt eine systematische Untersuchung des Detektionsvermögens, **BILD 3**. Bei den Analysen müssen eventuelle Detektionslücken oder -verluste aufgedeckt und Maßnahmen zur Vermeidung oder Erkennung solcher ergriffen werden. Dabei ist die gesamte Verarbeitungskette zu untersuchen, damit auch Filtermaßnahmen in der Logik, zum Beispiel zur Vermeidung von Fehlerkennungen, betrachtet werden. Diese dürfen nicht dazu führen, dass real existierende Objekte fälschlicherweise gefiltert werden. Die physikalischen Prinzipien der jeweiligen Sensortechnologie sind hier-



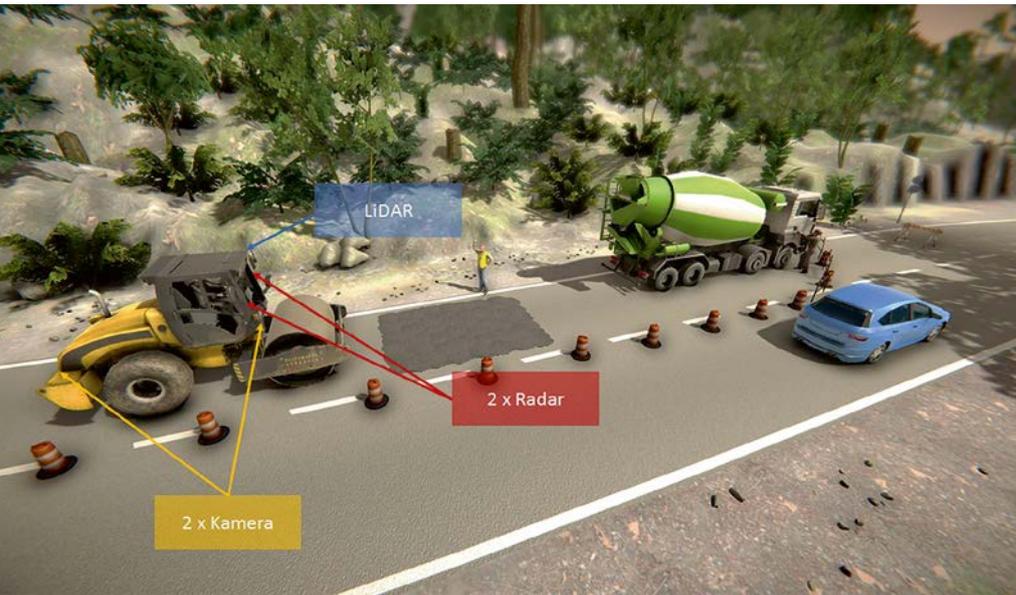


BILD 4 Umfeldsimulation mit Fahrzeugen und Sensorsystemen sowie Platzierung der Sensoren (© ITK Engineering | Unity Asset Store)

bei im Detail zu analysieren, um eine systematische Untersuchung durchführen zu können. Dazu gehören auch Umwelteinflüsse, die in der Lage sind, das Detektionsvermögen negativ zu beeinflussen. Hier sind klar definierte Grenzwerte (zum Beispiel Niederschlagsmenge) festzulegen, bis zu diesen das benötigte Detektionsvermögen der Sensorik sichergestellt werden kann. Auch auf die Verfügbarkeit der Objekterkennung muss während der Entwicklung geachtet werden: False positives sind

aus Sicht der funktionalen Sicherheit zwar vertretbar, für die Nutzung jedoch nicht hinnehmbar.

SYSTEMENTWICKLUNG UND EINBINDUNG IN DAS FAHRZEUG

Kann nach Abschluss der Untersuchungen die zuverlässige Erkennung der sicherheitsrelevanten Objekte bestätigt werden, wird das System entsprechend der angewandten Normen entwickelt und validiert. Anschließend erfolgt die

Integration der Objekterkennung in das Fahrzeug, woran sich Tests auf Fahrzeugebene anschließen müssen, um die Gesamtfunktion validieren zu können. Hierbei muss der Integrator sicherstellen, dass das System innerhalb der in der bestimmungsgemäßen Verwendung festgelegten Grenzwerte bezüglich Detektionsfähigkeit und Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen betrieben wird.

SENSORSIMULATION ZUR UNTERSTÜTZUNG DER ENTWICKLUNG

Neben der klassischen Entwicklungsmethodik empfiehlt die DIN EN 62998, beziehungsweise fordert ab einer gewissen Sicherheitseinstufung, die Durchführung von Simulationen. Die Untersuchung komplexer (Multi-)Sensorsysteme stellt besondere Anforderungen an die Umsetzung einer Simulation und erfordert spezielle Sensorsimulationsverfahren. Hierbei wird das Fahrzeug mit virtuellen Sensoren in einer dreidimensionalen Umwelt simuliert, **BILD 4**. Vergleichbar mit realen Sensoren generieren die virtuellen Sensoren für Objekte in ihrem Sichtfeld Sensordatenströme, die anschließend analysiert werden. Fahrzeuge, Personen und Objekte können sich dabei in der virtuellen Umgebung bewegen und mit dem Device unter Test interagieren. Im Fall bildgebender Sensoren, wie (Stereo-)Kameras, wird so ein Videostream aus dem lokalen Blickwinkel des Sensors

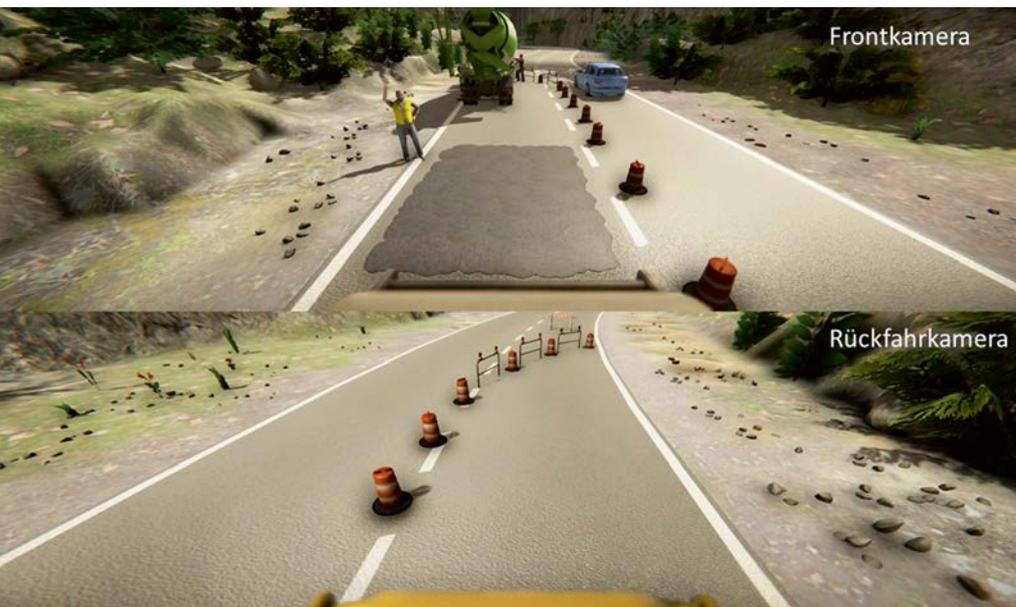


BILD 5 Kamerasimulation (© ITK Engineering | Unity Asset Store)

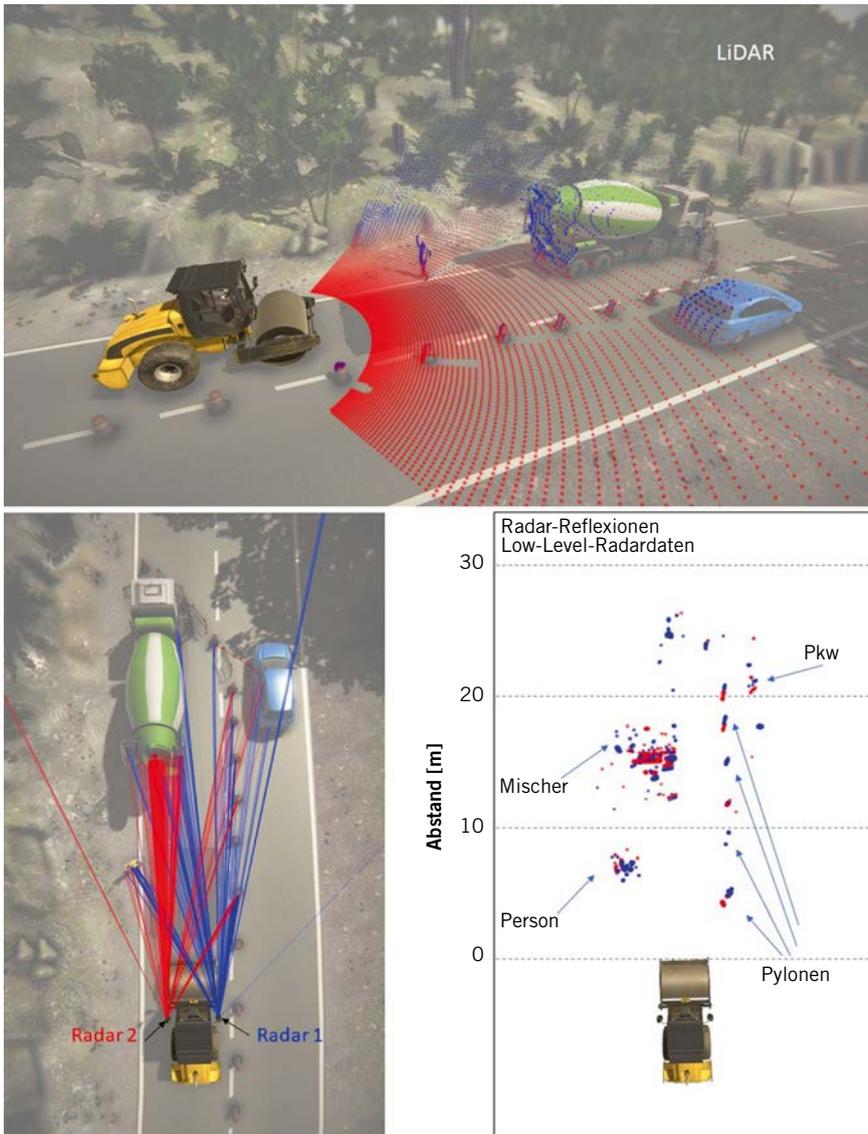


BILD 6 LiDAR-Simulation (oben), Radarsimulation (unten links), Visualisierung der Radarstrahlen, die zum Sensor zurückreflektiert werden (unten rechts) – rot dargestellt: Reflexe von Radar 2, blau dargestellt: Reflexe von Radar 1 (© ITK Engineering | Unity Asset Store)

generiert, **BILD 5**. Bei Wellen-basierten Sensoren (LiDAR, Radar, Ultraschall) wird das sogenannte Raytracing-Verfahren genutzt, **BILD 6**. Hierbei wird das emittierte Signal durch geometrische Strahlen abstrahiert und deren Ausbreitung in der 3-D-Umgebung berechnet bis sie über Reflexionen den Sensor wieder erreichen. Physikalische Modelle, unter anderem für Streuung, Brechung, Dämpfung und Absorption, leisten die Interpretation dieser detektierten Strahlen zu virtuellen Sensordaten (Intensität, Laufzeit etc.). Realitätsnaher Gestaltung und hoch-

auflösendem Rendering kommt in der Simulation ein besonderer Stellenwert zu, da sie maßgeblich auf die Aussagekraft der Daten wirken. Kommerzielle 3-D-Objektbibliotheken zur Szenengestaltung enthalten eine Vielzahl verschiedenster Objekte, deren Materialeigenschaften und Oberflächen weiterhin parametrisiert werden können. Dies ermöglicht auch komplexe Umgebungen wie Industriehallen oder Baustellen effizient abzubilden. Umwelteinflüsse wie Wetter, Lichtverhältnisse, Blendung oder Reflexion, die Sensoren stören und zu Fehldetektionen oder

Geisterzielen führen, können dabei gezielt herbeigeführt und in ihrer Auswirkung analysiert werden.

Die Simulation findet entwicklungsbegleitend Einsatz. In der Architekturdefinition wird die grundsätzliche Eignung von Sensortechnologien und ihrer möglichen Positionierung am Fahrzeug hinsichtlich Field of View verifiziert und mit den Anforderungen abgeglichen. Im Rahmen der Validierung werden virtuelle Versuche für den Nachweis der Detektionsfähigkeit zur Erkennung sicherheitsrelevanter Objekte (inklusive Personen) durchgeführt. Insofern Software-Sourcen vorliegen, beinhaltet dies auch Software-in-the-Loop (SiL)- oder Hardware-in-the-Loop (HiL)-Tests. Wenn alle Systemkomponenten als Software vorliegen, können so ganze Arbeitsabläufe im virtuellen Fahrzeugversuch getestet werden. Die Ergebnisse ermöglichen den Versuchsaufwand in der realen Prototypenvalidierung zu reduzieren und deren Testplanung durch virtuelle Vorversuche zu optimieren.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Automatisierung mobiler Arbeitsmaschinen stellt die Hersteller vor große Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf Absicherung und Personenschutz im Außenbereich. Unwegsames Gelände und Umwelteinflüsse führen dazu, dass Lösungen für den Innenbereich nicht genutzt werden können. Im Außenbereich muss die zuverlässige Erkennung von Personen und Objekten auch in Anwesenheit von solchen externen Einflüssen sichergestellt werden. Der beschriebene Entwicklungsprozess zeigt, wie die generischen Vorgaben der DIN EN 62998 berücksichtigt und konkret umgesetzt werden können. Darüber hinaus wird erläutert, wie eine entwicklungsbegleitende Virtualisierung und Sensorsimulation unterstützend genutzt werden kann, um eine normkonforme, auf den Anwendungsfall zugeschnittene Entwicklung einer zuverlässigen Objekterkennung für den Außenbereich zu ermöglichen.

LITERATURHINWEIS

[1] N. N.: Sicherheit von Maschinen – Berührungslös wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 3: Besondere Anforderungen an aktive optoelektronische diffuse Reflektion nutzende Schutzeinrichtungen (AOPDDR). DIN IEC 61496-3:2017



ITK Engineering

Seit der Firmengründung 1994 stehen wir für Stabilität, Sicherheit und Methodenexpertise. Damals wie heute bildet branchenübergreifendes Spezialwissen insbesondere im Bereich der Regelungstechnik und der modellbasierten Entwicklung die Basis, um unsere Kunden von der Idee bis zur Serienproduktion durchgängig und partnerschaftlich zu begleiten.

Unsere Kompetenzen umfassen u.a.:

- Softwareentwicklung
- Hardwareentwicklung
- Elektrik/Elektronik
- Systemintegration
- Software als Produkt
- Komplettlösungen
- Auftragsentwicklung
- Technische Beratung
- Schulungen
- Qualitätssicherung

Die Zufriedenheit all unserer Partner und ein respektvolles Miteinander prägen unsere Unternehmensphilosophie, in der vier Werte fest verankert sind: Lesen Sie gerne mehr darüber im Web.



V1.0.0_d_2019



ITK Engineering GmbH
Hauptsitz Rülzheim
Im Speyerer Tal 6
76761 Rülzheim
Tel.: + 49 (0)7272 7703-0
Fax: + 49 (0)7272 7703-100
info@itk-engineering.de

Gegründet 1994 –
heute hat ITK deutschland-
weit Niederlassungen und
ist international vertreten.



www.itk-engineering.de
www.itk-karriere.de

Folgen Sie uns auch auf:

