

© IPG Automotive

# Sensorsimulation für automatisierte Flurförderfahrzeuge

VERFASST VON



**Dr.-Ing. Sami Bilgic Istoc**  
ist Consultant & Business  
Development Manager bei IPG  
Automotive in Frankfurt.



**Henning Kemper**  
ist Specialist Editor bei  
IPG Automotive in Karlsruhe.

Flurförderfahrzeuge weisen aufgrund ihrer meist repetitiven Aufgaben ein hohes Automatisierungspotenzial auf. Für ihren Betrieb ist weder eine Straßenzulassung erforderlich, noch müssen Verkehrsteilnehmer im öffentlichen Straßenverkehr berücksichtigt werden. IPG Automotive gibt einen Überblick, welche Herausforderungen sich in diesem Umfeld für die Sensorsimulation ergeben und wie diese bewältigt werden können.

Flurförderfahrzeuge bewegen sich meist in abgeschlossenen, kontrollierten Bereichen innerhalb eines Betriebsgeländes. Ihre Aufgabe ist das Anheben und präzise Transportieren von schweren Lasten, wobei die zurückzulegenden Strecken meist verhältnismäßig kurz sind. Um ihre Effizienz und Sicherheit zu erhöhen, ist es möglich, diese Aufgaben zu automatisieren.

Durch verschiedene verbaute Sensoren können Flurförderfahrzeuge eigenständig navigieren, Hindernisse erkennen und Aufgaben ohne menschliches Zutun ausführen. Das geht jedoch mit einer erheblichen Steigerung der Komplexität hinsichtlich des Testens und der Absicherung der entsprechenden Funktionen einher, da diese sowohl untereinander als auch im Kontext des Gesamtfahrzeugs interagieren müssen. Eine

Betrachtung des Gesamtsystems in realistischen Szenarien ist also erforderlich.

## DIE ROLLE DER SIMULATION

Da die automatisierten Fahrfunktionen in einem breiten Spektrum unterschiedlicher Szenarien fehlerfrei funktionieren müssen, sind im Entwicklungsprozess sehr viele Tests notwendig. Allerdings ist eine vollständige Absicherung der Funktionen im realen Fahrversuch nur sehr eingeschränkt durchführbar. Die Anpassung bestehender Entwicklungsprozesse und auch die Etablierung neuer Entwicklungsansätze ist daher häufig unumgänglich.

Einen effizienten Lösungsansatz stellt der in der Fahrzeugentwicklung unverzichtbar gewordene virtuelle Fahrversuch dar. Bereits in sehr frühen Entwicklungsphasen ermöglicht die offene Integrations- und Testplattform CarMaker eine durchgängige Entwicklung und Erprobung von Fahrfunktionen in allen denkbaren Szenarien – bis hin zur Absicherung im Gesamtfahrzeug, **BILD 1**.

## UMGEBUNGSWAHRNEHMUNG FÜR AUTOMATISIERTE FLURFÖRDERFAHRZEUGE

Wie im öffentlichen Straßenverkehr stellt die zuverlässige Erfassung der Umgebung auch im Bereich des innerbetrieblichen Transports von Gütern eine der größten Herausforderungen dar. Die Umgebungswahrnehmung wird in diesem Kontext im Wesentlichen für

drei Aufgaben benötigt. Erstens muss sich das automatisierte Flurförderfahrzeug in seiner Umgebung lokalisieren, das heißt seine eigene Position in Relation zum verfügbaren Fahr- und Arbeitsraum erkennen. Zweitens muss das Fahrzeug die zu transportierenden Güter sowie deren Zielpositionen erfassen. Drittens ist es aus Sicherheitsgründen wichtig, dass Personen oder bewegliche Objekte im Fahr- und Arbeitsraum jederzeit erkannt werden. Unvorhergesehene Hindernisse dürfen unter keinen Umständen zu einer Fehlfunktion des Systems führen; eine Kollision mit Personen ist in jedem Fall zu vermeiden.

Je nach Sensortechnologie erfolgt die Umgebungserfassung in einer für die jeweilige Technologie typischen Weise, **BILD 2**. Um eine zuverlässige Wahrnehmung zu gewährleisten, kommt eine Kombination mehrerer Sensortypen zum Einsatz. Zur Erfassung des Nahbereichs werden üblicherweise Ultraschallsensoren verwendet. Sie sind kostengünstig in der Anschaffung und bereits seit Jahrzehnten im Serieneinsatz bewährt.

Ultraschallsensoren senden Schallpulse mit einer variablen Frequenz aus, die von der Umgebung reflektiert werden. Da die Sensoren im Verbund arbeiten und an verschiedenen Positionen des Fahrzeugs verbaut sind, ist eine Lokalisierung der Echos mittels Triangulation möglich. Allerdings kann es zu Fehlwahrnehmungen kommen, wenn Reflexionen des Untergrunds fälschlicherweise als Objekte wahrgenommen werden. Zudem können unzureichende Echos von Objekten aufgrund ihrer Geo-

metrie oder Oberflächenbeschaffenheit dazu führen, dass Objekte nicht erkannt werden.

Zur Erfassung des Nah- und mittleren Fernbereichs werden Lidarsensoren eingesetzt, **BILD 3**. Mithilfe eines ausgesendeten Laserstrahls tasten sie die Umgebung entweder entlang eines festen Öffnungswinkels oder rotierend um 360° ab. Durch eine Messung der Lichtlaufzeit des reflektierten Punkts wird die Entfernung zu diesem bestimmt. Das Ergebnis ist eine 3-D-Punktwolke, die zusätzliche Informationen über die Intensität der Reflexionen enthält. Die Punktwolke wird mehrmals pro Sekunde aktualisiert, sodass stets ein aktuelles Abbild der Umgebung zur Verfügung steht.

Als Ergänzung zu den genannten Systemen kommen häufig Kameras zum Einsatz. Sofern es sich dabei nicht um stereoskopische oder Time-of-Flight-Kameras handelt, enthalten die ausgegebenen Kamerabilder keine Tiefeninformationen. Andererseits bieten Kameras meist den Vorteil einer höheren Auflösung sowie zusätzlicher Farbinformationen, die bei der Klassifikation der Umgebung und der detektierten Objekte unterstützen. Erzielt wird dies durch das Training von KI-Algorithmen, wofür eine große Menge an Bilddaten aus möglichst vielen unterschiedlichen Szenarien erforderlich ist.

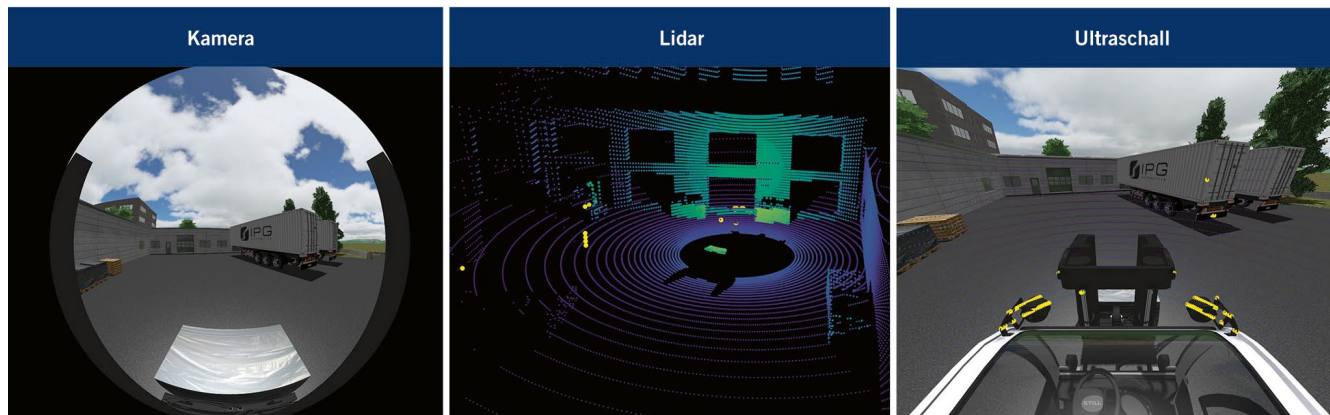
## DIE SENSORSIMULATION

In der Simulation ermöglichen Sensormodelle die Umgebungswahrnehmung.



**BILD 1** Darstellung eines automatisierten Gabelstaplers in dem 3-D-Visualisierungstool Movie NX (© IPG Automotive)





**BILD 2** Kamera-, Lidar- und Ultraschallsimulation für Gabelstapler (© IPG Automotive)

An diese Modelle werden vielfältige Anforderungen gestellt, die nur sehr schwer gleichzeitig zu erfüllen sind. Einerseits müssen sie performant sein, andererseits aber reale Sensoren physikalisch korrekt und vollständig abbilden.

Eine der größten Herausforderungen bei der Validierung von Steuergeräten automatisierter Flurförderfahrzeuge stellt die Sensorsimulation in Echtzeit dar. Die Fahrzeuge sind dafür mit einer Kombination aus mehreren Sensoren ausgerüstet, oftmals bestehend aus Lidar, Ultraschall und Kamera, seltener auch mit Radar. Die Sensorsysteme

arbeiten dabei im Verbund und ermöglichen damit die Umgebungswahrnehmung für das automatisierte Flurförderfahrzeug. Durch dieses Vorgehen werden die Nachteile einzelner Sensortypen kompensiert.

Bei Anwendungen im Innenbereich muss auch die Lokalisierung über die genannten Sensorsysteme erfolgen, da satellitengestützte Navigationssysteme dort prinzipbedingt nicht zur Verfügung stehen. Ein beispielhaftes etabliertes Verfahren ist der Simultaneous-Localization-and-Mapping(SLAM)-Algorithmus, der im Regelfall mit Lidarsensordaten arbeitet [1].

Für industrielle Anwendungen im Innenbereich ergeben sich weitere Herausforderungen. Ein typisches Problem stellen beispielsweise sogenannte Ghost-Targets dar, die an Trapezblechwänden auftreten können, **BILD 4**. Dabei wird der vom Sensor ausgesendete Lidarstrahl am Trapezblech mehrfach reflektiert, was zu einer längeren Laufzeit und damit zu einem scheinbar hinter der Wand befindlichen Ziel führt. Ein Algorithmus zur Detektion von Wänden kann durch diesen Effekt gestört werden. Deshalb ist es notwendig, diesen möglichen Fehlerfall zu berücksichtigen und in der Simulation nachzubilden.



**BILD 3** Automatisierter Gabelstapler mit simuliertem Lidarsensor: Die Punktwolke ist farbig nach Intensität der Reflexionen dargestellt (© IPG Automotive)

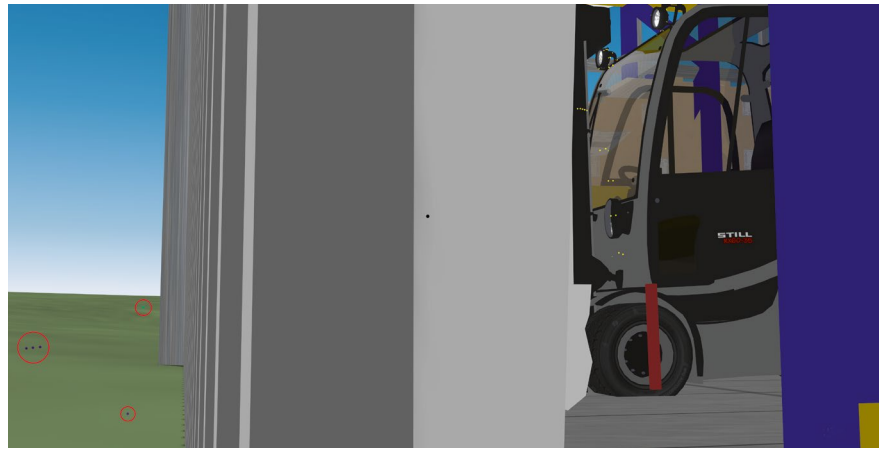
## SENSORMODELLE

Die physikalischen Sensormodelle von CarMaker basieren auf Raytracing-Algorithmen und ermöglichen die Simulation derartiger Phänomene. Sie bieten Zugriff auf die Sensorrohdaten (Raw Signal Interface, RSI), wodurch sowohl die Wahrnehmungsalgorithmen als auch die gesamte Signalkette bis hin zur Objektliste in der Simulationsumgebung abgebildet werden kann. Die Parametrierung erfolgt unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften der 3-D-Objekte sowie detaillierter physikalischer Effekte bei der Signalausbreitung.

Da die physikalischen Sensormodelle sehr rechenintensiv sind, werden sie auf der Grafikkarte des Host-PCs berechnet. Auf diese Weise lässt sich sicherstellen, dass die Simulation auch im Verbund mit realen Steuergeräten in harter Echtzeit abläuft. Typische Scan-beziehungsweise Samplingraten – etwa von 20 ms – sind problemlos realisierbar. Das virtuelle Fahrzeugmodell läuft gleichzeitig auf dem Echtzeitsystem mit einer Taktrate von 1 ms. Die virtuellen Sensoren können, wie im realen Fahrzeug, über den Restbus angebunden werden; damit ist auch ein Test der Buskommunikation möglich.

Neben den physikalischen verfügt CarMaker über ideale Sensormodelle, mit denen während der Simulation simultan Ground-Truth-Informationen generiert werden können. Dies ist insbesondere für das Training von Wahrnehmungsalgorithmen hilfreich, die auf sogenannte gelabelte Daten angewiesen sind. Die in der jeweiligen Situation zu erzielende Erkennung muss dem Algorithmus also während des Trainings mitgeteilt werden. So sind beispielsweise die Position und Geschwindigkeit einer Person während der Simulation jederzeit bekannt. Gleichzeitig erhält der Algorithmus die Daten des physikalischen Sensormodells zur Erkennung der Person und kann so die Treffergenauigkeit erhöhen. Die Sensordaten des idealisierten und des physikalischen Sensors stehen nach der Simulationsdurchführung weiterhin zur Verfügung, sodass eine nachträgliche Überprüfung und Nachvollziehbarkeit gewährleistet ist.

Darüber hinaus ist bei der Freigabe automatisierter Systeme ein Nachweis der funktionalen Sicherheit, etwa nach SOTIF, erforderlich [2]. Hersteller sicher-



**BILD 4** Ghost-Reflexionen hinter einer Trapezblechwand (© IPG Automotive)

heitsrelevanter Systeme müssen nachweisen, dass die Systeme nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entwickelt und getestet wurden und bestimmungsgemäß funktionieren. Dabei sind zahlreiche Testszenarien zu berücksichtigen, beispielsweise die Vermeidung einer Kollision mit einer Person.

CarMaker bietet die Möglichkeit, verschiedene 3-D-Szenarien mit unterschiedlichen Objekten aufzubauen und dabei die Materialeigenschaften sämtlicher Objekte physikalisch korrekt abzubilden. Die 3-D-Umgebung steht auch den Sensormodellen zur Verfügung. Da die Simulation stets deterministisch und reproduzierbar abläuft, lassen sich in kurzer Zeit eine Vielzahl von Tests unter frei konfigurierbaren Bedingungen durchführen und Fehlerquellen gezielt identifizieren. Damit wird eine vollständige Abdeckung der Szenarienkataloge erreicht.

Da die manuelle Erstellung von Szenarien sehr aufwendig ist, profitieren Simulationsumgebungen insbesondere im Kontext automatisierter Fahrzeuge von Methoden, die eine automatisierte Generierung von Szenarien ermöglichen. In CarMaker können Szenarien vollständig parametrisiert werden. Bezogen auf die Simulation von Innenraumszenarien bedeutet dies für die statische Umgebung, dass sich beispielsweise die Breite von Fahrwegen, die Größe oder Deckenhöhe von Hallen oder auch die Anordnung von Paletten automatisch variieren lassen.

Ebenso ist es mit CarMaker möglich, dynamische Objekte zu parametrieren. Soll beispielsweise eine Person in den

Fahrweg des Fahrzeugs treten, lässt sich die Geschwindigkeit oder die Laufrichtung der Person automatisch variieren. Dadurch entsteht ein sehr großer und zugleich reproduzierbarer Testraum. Die Simulation läuft dabei mindestens in Echtzeitgeschwindigkeit ab und kann gleichzeitig hochgradig parallelisiert ausgeführt werden. So lassen sich über Nacht tausende Szenarien testen, um am nächsten Tag weitere Verbesserungen der Wahrnehmungsalgorithmen vorzunehmen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung automatisierter Flurförderfahrzeuge bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich, beispielsweise den Test der Funktionen in einer Vielzahl von Szenarien und die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit. Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, stellen Simulationsmethoden eine geeignete Lösung dar. Mit CarMaker steht eine leistungsfähige Testplattform für alle Phasen des Entwicklungsprozesses von der Anforderungsanalyse bis hin zur Freigabe zur Verfügung.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Nuchter, A.: 3D Robotic Mapping – The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom. Berlin: Springer, 2009
- [2] ISO (Hrsg.): ISO/PAS 21448:2022, Road vehicles – Safety of the intended functionality. Online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21448:ed-1:v1:en>, aufgerufen: 14. August 2023



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:  
[www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide](http://www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide)