

# Automatisierter Fahrbetrieb – Entwicklung und Absicherung durch Umgebungssimulation

Erprobte Methoden aus dem Gaming-Bereich bilden die Grundlage für die Erzeugung synthetischer Sensordaten einer Vielzahl unterschiedlicher optischer Sensorsysteme. Diese simulierten Daten können über den gesamten Entwicklungszyklus hinweg genutzt werden und leisten einen Beitrag, hochautomatisierte Fahrfunktionen in die Schienenfahrzeuge der Zukunft zu bringen.



## 1. Motivation

Die Entwicklung und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen für Schienenfahrzeuge (Automatic Train Operation, kurz: ATO) stellt eine neue und komplexe Herausforderung für Zughersteller und Sensor-Systemlieferanten dar. Virtuelle Entwicklungsmethoden aus der Automobilindustrie können hierbei in frühen Entwicklungsstadien eingesetzt werden, um effiziente und sichere Systeme in den Schienenverkehr zu bringen. Im Folgenden wird ein aus dem Automobilbereich abgeleiteter Ansatz aufgezeigt.

Wie können Sensorik und Perzeptionssysteme automatisierter Fahrfunktionen für Züge ausgelegt und in einer realitäts-

nahen 3D-Umgebung auf Basis etablierter Technologien aus der Gaming-Industrie abgesichert werden? Um eine möglichst hohe Sicherheit für künftige ATO-Systeme in Zügen zu erreichen, sollten reale Tests massiv und komplementär durch Simulationen unterstützt werden [1]. Statistische Aussagen, wie beispielsweise eine Million gefahrene Kilometer, sind keine Garantie für umfassend aufgezeichnete Messdaten. Zudem sind Fahrten nicht reproduzier- und kontrollierbar und können nicht ohne Risiken für Mensch, Maschine und Strecke durchgeführt werden. Die Sicherheit und Testbarkeit kann auf dedizierten Teststrecken zwar überprüft und verbessert werden, die Zahl der dort möglichen Testszenarien bleibt aber limitiert und ist



### Sebastian Wolter, M.Sc.

Lead Ingenieur bei der ITK Engineering GmbH in Frankfurt, Abteilung Data Driven Software  
sebastian.wolter@itk-engineering.de

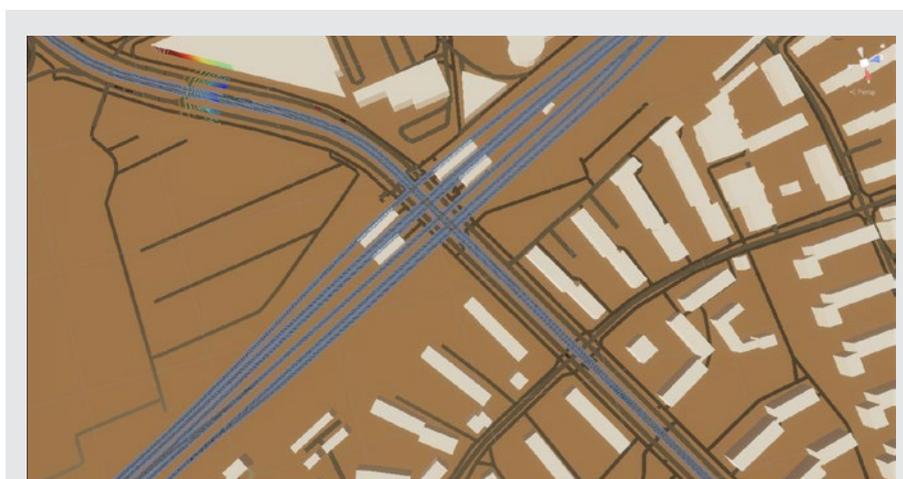


### Christopher Walkowiak, M.Eng.

Gruppenleiter bei der ITK Engineering GmbH in Frankfurt, Abteilung Data Driven Software  
christopher.walkowiak@itk-engineering.de

mit erheblichem Aufwand verbunden. Darüber hinaus erlauben aufgezeichnete Daten von Multi-Sensor-Systemen keine Regressionstests und kein Schließen der Regelungsschleife (Closed-Loop-Test) bei Veränderung des zu testenden Systems.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bietet die Virtualisierung von Zug, Sensor und Umgebung in einer Simulation eine kostenreduzierte Lösung mit einer guten Skalierbarkeit. Eine Simulationsumgebung mit stets verfügbaren Informationen zu Objekten bzw. ihren Eigenschaften, sogenannte Ground-Truth-Daten, erlaubt die virtuelle Auslegung und Tests auf verschiedenen System- und Softwareebenen. Dies geschieht bereits in frühen Entwicklungsstadien oder auch während der Systemlebenszeit. Der Zugriff auf die Ground-Truth-Informationen innerhalb der Simulation bietet zudem die Möglich-



1: Import von GIS-Daten für initiale Streckenerstellung

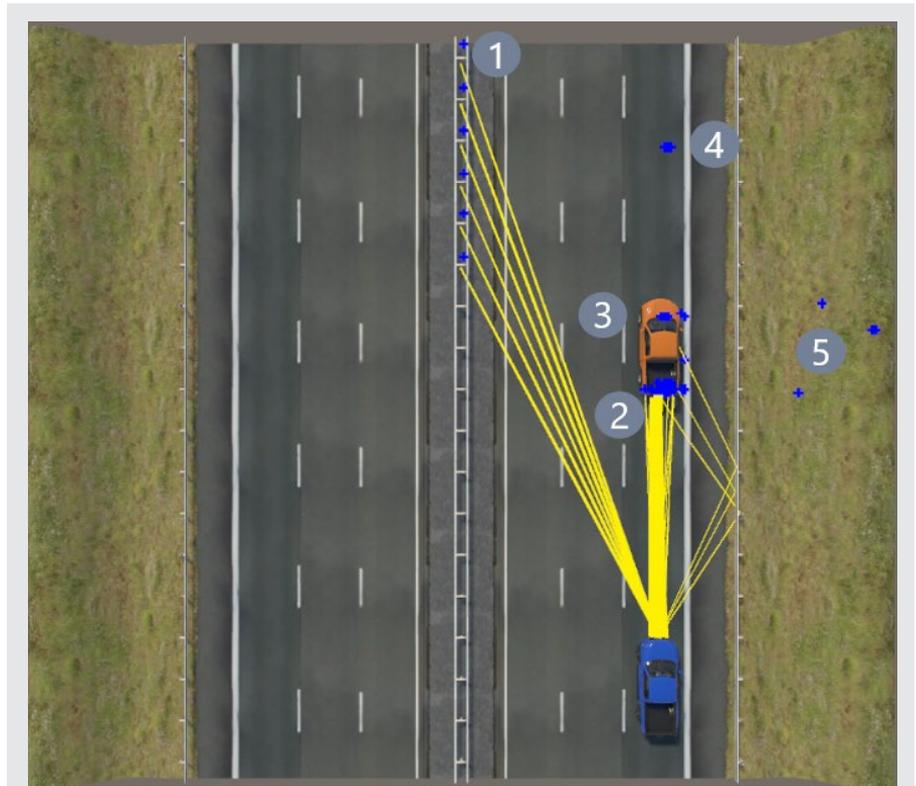
Quelle: ITK Engineering GmbH

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ITK Engineering GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

keit, die generierten Daten vollständig und automatisiert zu labeln. Nötig sind hierfür eine hochdetaillierte 3D-Entwicklungsumgebung, definierte Test-Szenarien sowie die Modellierung der virtuellen Sensorik. Auf dieser Basis können synthetische Sensordaten generiert werden. Dies ist ein erprobtes Vorgehen in der Automobilindustrie, insbesondere im Bereich assistiertes und hochautomatisiertes Fahren.

Ein digitaler Zwilling des Schienenfahrzeuges wird dabei in der virtuellen 3D-Umgebung mit kritischen Situationen konfrontiert. Um synthetische Daten zu generieren, bewegt sich ein Schienenfahrzeug, basierend auf einem zusätzlichen Dynamikmodell, in der hochauflösenden virtuellen Umgebung und interagiert mit anderen dynamischen und statischen 3D-Objekten wie Straßenfahrzeugen, Fußgängern, Fahrradfahrern und anderen denkbaren Verkehrsteilnehmern. Hierzu muss zunächst eine 3D-Szene erstellt und das Verhalten der anderen sich dynamisch bewegenden Objekte modelliert werden. Digitale Geodaten (GIS) der Strecke, beispielsweise im GeoJSON-, OpenRailwayMap- oder OSM-Format, können hierzu die Szenenbasis bilden. Ein Import dieser Daten erlaubt eine schnelle prototypische Generierung von Streckenabschnitten verschiedener Größenordnungen (vgl. Bild 1).

Für die Verarbeitung von virtuellen Kameradaten ist die Beleuchtungsdarstellung essenziell und muss physikalischen Prinzipien folgen. Für die Sensormodelle sind daher detaillierte Geometriemodelle und Materialeigenschaften (z.B. von Fahrzeugen, Gleisbett, Oberleitungen, Schilder, Asphalt oder Bahnsteigen) nötig. Ergänzen könnten die virtuelle Umgebung zum Beispiel Partikelmodelle für Staub, Schnee, Nebel oder auch Regen, um deren Einfluss auf die Objekterkennung (Perzeption) zu untersuchen. Die verwendeten Sensormodelle sollen sowohl realitätsnah als auch schnell berechenbar, möglichst echtzeitfähig sein. Dies ist nötig, um sie effizient in Software- und insbesondere in Hardware-in-the-Loop-Testumgebungen (SiL/HiL) einsetzen zu können. Für beide Varianten gilt, je realitätsnäher die Eingabedaten der virtuellen Sensorik, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass das System auch in der realen Umgebung ebenso wie in der Simulation agiert. Für das Entwickeln und Testen von Funktionen sollte vorab das Vorhandensein der Effekte des Sensormodells nachgewiesen werden, die auch in den funktionalen Anforderungen an das System beschrieben



**2:** (1) Reflexion an Leitplankenpfosten (2) Reflexionen am hinteren Teil des Fahrzeugs (3) Reflexion am vorderen Teil des Fahrzeugs (4) Mehrfach-Reflexion (5) Geister-Ziel / Spiegel-Reflexion an Leitplanke (Strahlwege in Gelb, Locations in Blau)

werden. Dies kann teilweise durch die Betrachtung einzelner, für die Funktion wichtiger Effekte erfolgen. Zur virtuellen Freigabe sicherheitsrelevanter Systeme muss jedoch die Simulationsumgebung einer umfangreichen Qualifizierung unterzogen werden. Das bedeutet, die Güte der erzeugten Sensor- und Simulationsdaten muss anhand von Kennwerten aus Richtlinien in verschiedenen Szenarien mit den Parametern des realen Systems nachgewiesen werden. Dies ist ein aufwendiges, jedoch erprobtes Vorgehen, um die Vergleichbarkeit der Simulation mit der Realität nachzuweisen. Elektronische Bremssysteme im Pkw werden zum Beispiel seit mehr als einem Jahrzehnt auf diese Weise von den Fahrzeugherstellern getestet und damit für die Straße freigegeben. Der modulare Ansatz der vorgestellten Simulationsumgebung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine solche Qualifikation [2].

## 2. Realitätsnahe Absicherung dank Gaming-Technologien

Um die Absicherung von Sensorsystemen in einem geometrisch realitätsnahen Umfeld umzusetzen, werden etablierte Tech-

nologien aus der Gaming-Industrie herangezogen. Eine Game-Engine<sup>1)</sup> bildet die Basis der 3D-Darstellung. Zu den großen Stärken dieser Methodik gehört die Visualisierung von tausenden hochauflösenden 3D-Inhalten. Der integrierte 3D-Editor und die Kompatibilität zu verschiedensten Dateiformaten erlauben einen zur CAD-Entwicklung nahtlosen Aufbau von 3D-Szenen und die Integration von 3D-Modellen per „Drag&Drop“ aus verschiedenen Quellen<sup>2)</sup>. Auch die Positionierung und Parametrierung mehrerer virtueller Kameras ist gegeben. Zur möglichst fotorealistischen Bilddarstellung wird Physically-Based Rendering [3] eingesetzt. Dies ist die Näherung der real auftretenden optischen Effekte in der 3D Darstellung durch die Berechnung von angepassten Formeln aus der Physik. In jüngerer Zeit wird zudem verstärkt auf das Raytracing-Verfahren zur Steigerung der grafischen Qualität gesetzt. Über nachgelagerte, sogenannte Post-Processing Effekte können unter anderem Linsen-Verformungen und Tiefenschärfe integriert werden. Aber auch spezielle, für Computer-Vision

1) Unity3D oder Unreal Engine

2) Sogenannte Asset Marketplaces



3: RBG-Daten der Frontkamera einer Straßenbahn. Szene mit einer Person im Gleis  
Quelle: ITK Engineering GmbH

Algorithmen wichtige Effekte können durch weiteres nachgelagertes Shader-Programmieren sehr schnell berechnet werden. Dabei nutzt man die hohe Anzahl der auf den Grafikkarten fest verbauten, parallelen Recheneinheiten. Diese „Shadereinheiten“ können durch eine spezielle Programmiersprache Aufgaben auf vielen Eingabedaten sehr effizient ausführen. Für die realistische Simulation von Kameradaten ist damit eine gute Basis geschaffen [4].

Im Vergleich zur Kamera benötigen andere Sensortypen wie LIDAR, Ultraschall und Radar eine separate Sensormodellierung. Die in der Game-Engine bereits eingebaute Physik-Simulation kann schon bei einer einfachen Sensormodellierung unterstützen, um beispielsweise einfache Distanzsensoren zu modellieren. Auf der Basis der integrierten Physik lassen sich auch einfache phänomenologische Modelle aufbauen, welche die Ground-Truth-Daten mit offensichtlichen Phänomenen, wie zum Beispiel der Verschattung, verbinden. Diese phänomenologischen Modelle sind schnell berechenbar. Objekte werden hierbei durch einfache Bounding-Boxes angenähert, ohne deren tatsächliche 3D-Geometrie zu berücksichtigen. Statische Objekte werden nur vereinfacht oder müssen gar nicht erst berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite sind sehr genaue physikalische FEM-Modelle zur Wellenausbreitung in der Regel nicht echtzeitfähig und werden für dynamische und komplexe Umgebungen selten eingesetzt, da sie einen hohen Speicherbedarf für die räumliche Diskretisierung beanspruchen. FEM-Modelle dienen dabei der Betrachtung von lokal eingegrenzten Phänomenen.

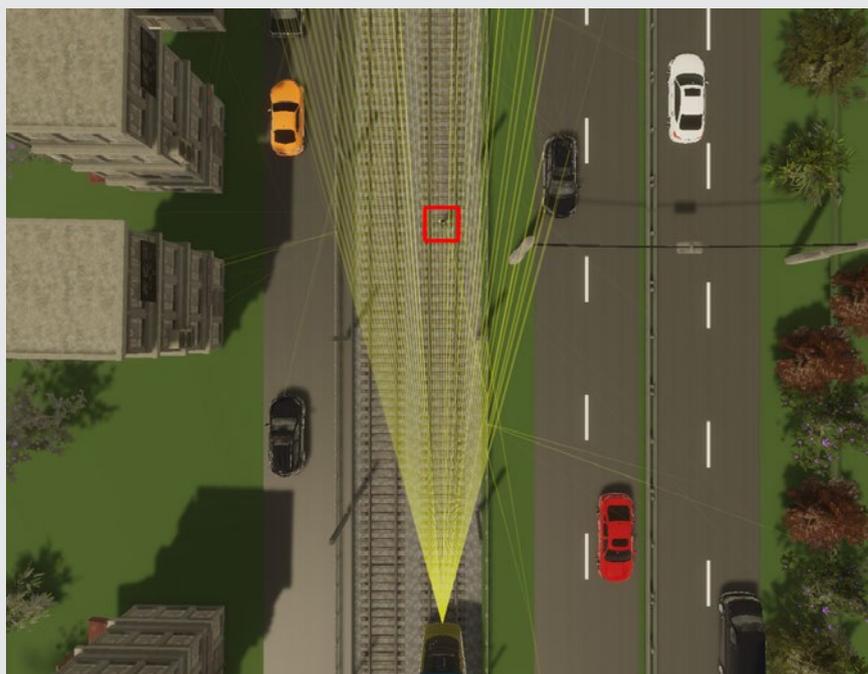
### 3. Raytracing: Echtzeitfähige und konsistente Multi-Sensor-Datengenerierung

Einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit bieten physikalische Modelle auf Basis von Raytracing. Dieses Verfahren erlaubt es, in Echtzeit eine Ausbreitung der elektromagnetischen Welle durch eine Vielzahl von Strahlen in der Szene nachzuverfolgen. Dadurch kann die Ausbreitung der Welle im Raum genähert werden. Die Strahlen werden von den vir-

tuellen Sensoren in die simulierte 3D-Welt „geschossen“, diese interagieren dann mit Oberflächen durch Reflexion, Streuung, Transmission oder Absorption. Durch ein physikalisches Modell werden mit jedem Strahlweg noch weitere Größen<sup>3)</sup> mitgeführt und während der Simulation aktualisiert. Dies wird so lange fortgeführt, bis der Strahl auf einen Empfangssensor trifft. Dort werden die empfangenen Strahlendaten dann zusammengeführt, über Post-Processing-Module weiterverarbeitet und beispielsweise über externe Interfaces an nachgelagerte Teilnehmer der Signalverarbeitungskette übergeben. Der Fokus liegt hier auf der Rohdatengenerierung. Nachgelagert kann mit diesen Daten eine beliebige Perzeptions-Algorithmik bedient werden.

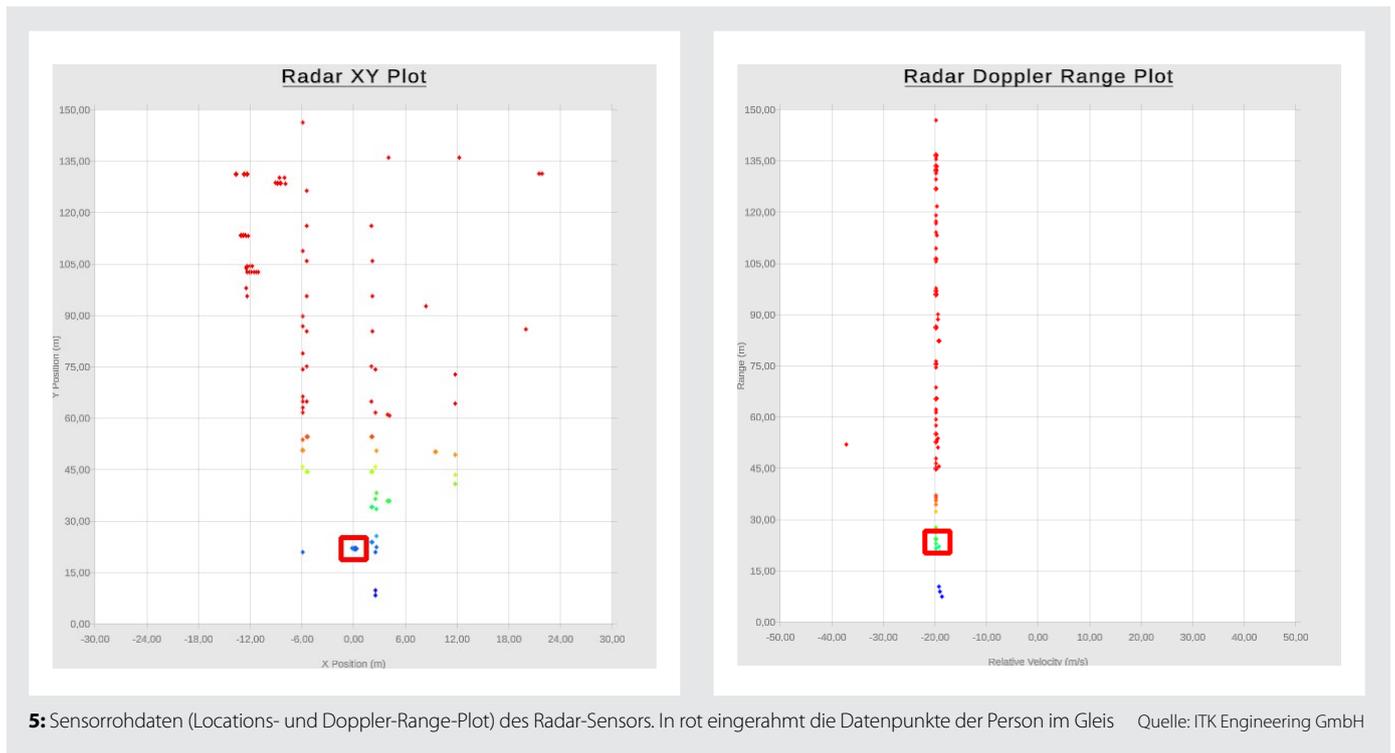
Um eine Echtzeitfähigkeit zu erreichen, werden dabei Game-Engine, Raytracing und Post-Processing durch Parallelisierung der Berechnungen auf Grafikkarten stark beschleunigt. Dieser Ansatz profitiert sowohl von jährlichen Neuerungen im Bereich Grafikkarte als auch im Hinblick auf visuelle Effekte und von den Leistungssteigerungen der Game-Engine Software.

3) Zum Beispiel relative Dopplergeschwindigkeit, Intensität oder Schalldruck



4: Anwendung von Raytracing für die Berechnung von Sensorrohdaten für einen virtuellen Radar- und Lidar-Sensor. In rot eingrahmt ist die Person im Gleis  
Quelle: ITK Engineering GmbH

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ITK Engineering GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH



#### 4. Physikalisches Sensormodell am Beispiel Automotive Radar

Wendet man nun das Raytracing-Verfahren zur Rohdatengenerierung eines Radarsignals an, so werden die Radarwellen als tausende Strahlen approximiert und vom Sensor basierend auf dem Sensor Sichtfeld in die 3D-Szene geschossen (Bild 2). Die am Radarsensor empfangene Leistung hängt hierbei unter anderem von der Antennencharakteristik des modellierten Sensors ab. Der Energieverlust durch die kugelförmige Ausbreitung wird durch die Laufzeit der unterschiedlichen Strahlwege berücksichtigt. Der Inzidenzwinkel (Einfallswinkel) und die Frequenz der Trägerwelle spielen für die Material-Interaktion eine große Rolle. Auch umgebungs- und atmosphärische Parameter sowie Polarisierungseffekte werden abgebildet. Für die Mehrwegeausbreitungen wird die komplette verfügbare 3D-Geometrie herangezogen. Potenzielle Geisterziele durch Reflexionen über Boden, Leitplanke oder Wände ergeben sich automatisch aus dem verwendeten Verfahren, was einen großen Vorteil gegenüber phänomenologischen Modellen darstellt (Hybrid-Modelle aus phänomenologischen und physikalischen Raytracing-Methoden sind hier auch möglich). Die relative Dopplergeschwindigkeit wird auch auf Mikrodoppler-Ebene aufgelöst. Das bedeutet, dass bei

sich bewegenden Objekten je nach Interaktionspunkt unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten entstehen.

Zum Beispiel hat ein Fahrzeugreifen am oberen Punkt die doppelte Fahrzeuggeschwindigkeit, am Bodenkontaktpunkt die Geschwindigkeit 0. Ein anderes Beispiel sind Fußgänger, welche durch ihre Arm- und Beinbewegungen unterschiedliche Geschwindigkeiten als die reine Körperbewegungsgeschwindigkeit erzeugen. Dies ist wichtig für die Klassifizierung und Bewegungsschätzung der Objekte und muss daher im Simulator abgebildet werden. Auch Mehrfach-Reflexionen, also das mehrfache Durchlaufen des gleichen Strahlwegs an ein und demselben Objekt, werden durch das Raytracing-Verfahren direkt aufgelöst. Die Modellierung dieser Effekte ist essenziell für die Erzeugung von realitätsnahen Radarsensordaten.

#### 5. Sensorsimulationen über die gesamte Entwicklung hinweg

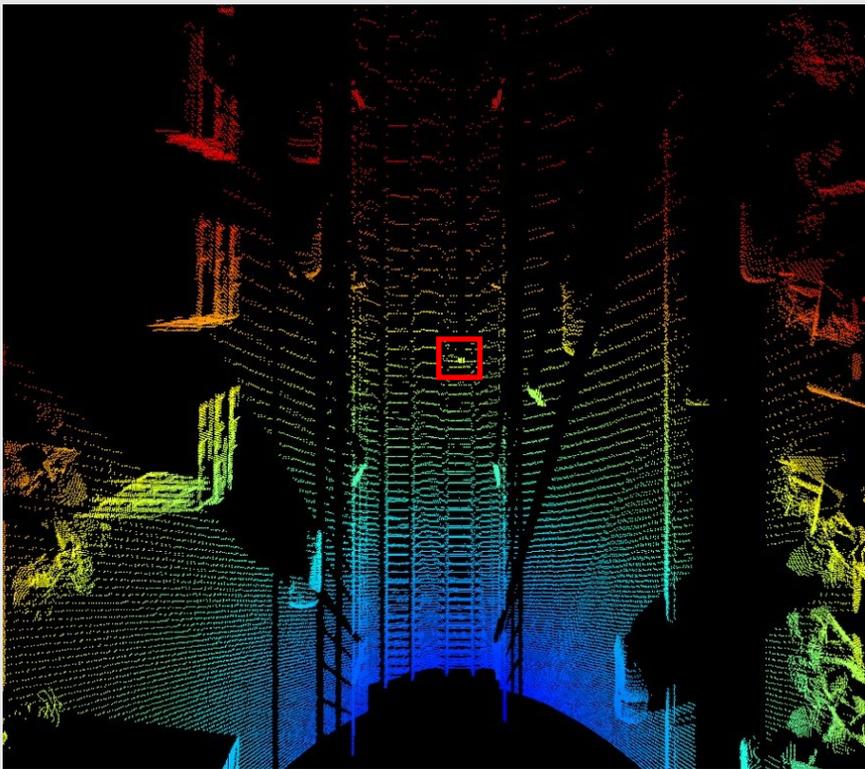
Entlang des gesamten Entwicklungszyklus kann das beschriebene Simulationsverfahren Anwendung finden. Bereits in der Designphase kann Raytracing zu einer sehr frühen Evaluation verschiedener Einbaupositionen eingesetzt werden.

Frühzeitig können Probleme beim Einbau erkannt und günstige Positionen,

beispielsweise für einen Retrofit, ermittelt werden. Multi-Sensor-basierte Rangierassistenten oder Kollisionswarnungseinrichtungen des zukünftigen Schienenfahrzeuges können damit ausgelegt werden. Mehrere Sensoren können schnell ausprobiert und umplatziert werden, um eine stetige Sichtbarkeit von Objekten rund um das Schienenfahrzeug zu gewährleisten. Da ein Mix aus unterschiedlicher Sensorik sowie Sensortechnologien auch für Schienenfahrzeuge einen großen Mehrwert bedeuten kann, wird ihr Einsatz derzeit ausgiebig diskutiert und erprobt. Die Anwendung kann auch bei der Ermittlung eines optimalen Sensorik-Layouts unterstützen.

Zudem werden während der Algorithmen-Entwicklung immer wieder Daten benötigt, bevor reale Messungen eingefahren und gelabelt werden können. Beispielsweise können hier für die Entwicklung einer Objekterkennung von Fahrzeugen, Radfahrern und Fußgängern Mikrodoppler-Sensordaten an der Schnittstelle zur Perzeptions-Algorithmik zur Verfügung gestellt werden. Auch für die Entwicklung von Sensor-Fusions-Algorithmen lassen sich damit konsistente Daten simulieren, welche normalerweise von den Multi-Sensor-Systemen mit hoher Datenrate erzeugt werden.

In der Phase der Validierung und Absicherung liefert eine solche Simulation Daten für Testmethoden wie Model-in-



**6:** Punktwolken Daten des virtuellen Lidar-Sensors. In rot eingrahmt die Datenpunkte der Person im Gleis  
 Quelle: ITK Engineering GmbH

the-Loop (MiL), SiL, und HiL auf verschiedenen Ebenen. Für Funktionstests können Ground-Truth und Objektdaten verwendet werden. Eine Objekterkennung benötigt Pixeldaten oder Punktwolken. Andere Perzeptions-Algorithmik benötigt Locations- und Feature-Daten bis hin zu Signaldaten für bestimmte Sensortypen. Darüber hinaus erlaubt die Simulation auch eine automatisierte Veränderung der Testszenarien. Hiermit kann eine effiziente Identifikation, gegebenenfalls auch durch mathematische Optimierung von Parametern, von bisher unbekanntem Edge- oder Worst-Case-Szenarien erfolgen. Eine Vielzahl von anforderungsbasierten Test-Szenarien kann prozedural erstellt werden.

**5.1. Beispiel: Simulation Straßenbahn mit Person im Gleis**

Im oben gezeigten Simulationsbeispiel einer Straßenbahn (Bilder 3-6) ist eine Person im Gleis simuliert worden. Die Straßenbahn bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 20 m/s frontal auf diese Person zu; sie befindet sich etwa in 22m Entfernung. Sehr einfach können in der Simulation sämtliche statischen und

dynamischen Parameter der 3D-Objekte variiert werden. Hiermit können die Auswirkungen auf die Detektionen des virtuellen Radar- und Lidar-Sensors untersucht werden. Der Radar XY-Plot zeigt relativ zum Sensor die Streuzentren (Locations). Im Doppler-Range-Plot erkennt man die Relativgeschwindigkeiten zu den jeweiligen Streuzentren. Alle statischen Reflexionen sind hier in einer vertikalen Linie bei etwa 20 m/s zu erkennen. In rot eingrahmt sind die Datenpunkte des Fußgängers hervorgehoben. Die strahlenbasierten Modelle der Sensoren erlauben also die genaue Betrachtung und anschließende Weiterverarbeitung der Sensorrohdaten von Radar und Lidar. Diese Daten beeinflussen maßgeblich eine Perzeptions-Algorithmik beziehungsweise deren Erkennungsfähigkeit, zum Beispiel für zukünftig verwendete Systeme in Straßenbahnen, die der Warnung vor Kollisionen mit Hindernissen im Gleisbereich dienen.

**6. Fazit**

Durch die Methoden aus der Computergrafik lassen sich individuelle Simulationsumgebungen für Sensor-basierte Soft-

ware-Systeme erstellen. Die realitätsnahe 3D-Umgebung kann dabei zur Erstellung von Rapid-Prototypes mit qualitativen, synthetisch generierten Sensordaten genutzt werden. Physikalische Sensormodelle auf Game-Engine-Basis füllen dabei eine „Simulations-Lücke“ in der Entwicklung und Absicherung. Diese Lücke existiert derzeit in den klassischen Werkzeugen der Entwicklung zwischen numerischen Verfahren und den phänomenologischen Modellen. Die Zulieferer von Sensoren, die Systemanbieter mit Software und Processing-Hardware sowie die Zugerhersteller profitieren direkt von der beschleunigten Entwicklung von Gaming Hardware und Software. Ergänzend zu den notwendig bleibenden realen Tests mit Schienenfahrzeugen könnten so bereits in einem frühen Entwicklungsstadium skalierbare Tests virtuell durchgeführt werden. Die Robustheit und Sicherheit automatisierter Fahrfunktionen kann viel schneller hergestellt werden als auf klassischem Entwicklungsweg. ●

**Literatur**

[1] M. Dr. Dirk Leinhos DB Systemtechnik GmbH, L. Dr. Holger Flatt Fraunhofer IOSB-INA und L. Prof. Dr. Stefan Witte Technische Hochschule OWL, „Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 31 (2022) Projektnummer 2021-21-D-1202, Sensorik als technische Voraussetzung für ATO-Funktionen. Seite 227“, Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Nr. 31, p. 227, 2022.  
 [2] C. G. Dr. Housseem Abdellatif, „Einsatz der Simulation für die Homologation automatisierter Fahrfunktionen,“ ATZ Elektronik, Nr. 12, pp. 62-65, 12/2019.  
 [3] J. W. G. H. Matt Pharr, Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, Morgan Kaufmann, 2016.  
 [4] N. I. E. F. P. e. a. Mayer, „What Makes Good Synthetic Training Data for Learning Disparity and Optical Flow Estimation?,“ Int J Comput Vis 126, p. 942-960, 2018.  
 [5] T. B. J. K. Ming-Yu Liu, „Unsupervised Image-to-Image Translation Networks“ NIPS Spotlight 2017, arXiv:1703.00848 2017.

**Summary**

**Automated driving - development and validation through environment simulation**

Proven methods from the gaming sector form the basis for generating synthetic sensor data from a variety of different optical sensor systems. This simulated data can be used throughout the entire development cycle and contributes to bringing highly automated driving functions to the rail vehicles of the future.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ITK Engineering GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH