

Virtuelles Radar für die Eisenbahn von morgen – Tests automatisierter Züge in virtuellen Umgebungen

Virtual radar for the railway of tomorrow – testing automated trains in a virtual environment

Arsalan Haider | Arne Jacobs | Markus Ziegler | Yaoying Wang | Mathew E. Augustine | Ruben Schilling | Christian Pfeiffer | Thomas Zeh

Dieser Beitrag stellt eine Methode zur Entwicklung und Validierung eines virtuellen Radarsensormodells vor, das für die Simulation des automatisierten Zugbetriebs im Rahmen der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) konzipiert ist. Das Modell generiert realistische Sensordaten in einer digitalen Umgebung und unterstützt die Bewertung und zukünftige Validierung von radarbasierten Objekterkennungssystemen, die in automatisierten Zügen zum Einsatz kommen. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des virtuellen Sensors sicherzustellen, wurde eine erste Validierung unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Es wurde ein statischer Testaufbau verwendet, bei dem ein Radar-Tripelspiegel als Referenz für den Vergleich von realen und simulierten Sensordaten diente. Durch den Einsatz von Simulationen anstelle von physischen Tests auf Gleisen können komplexe Eisenbahnzenarien flexibler, kostengünstiger und ohne Sicherheitsrisiken bewertet werden. Dies beschleunigt den Entwicklungsprozess und reduziert die Abhängigkeit von zeitaufwendigen Feldversuchen.

1 Einleitung

Die Nachfrage nach zuverlässigen, effizienten und sicheren Transportmitteln wächst rasant, insbesondere in städtischen Gebieten [1]. Automatisierte Züge (AT) gelten als Schlüsseltechnologie, um diesen Anforderungen gerecht zu werden, indem sie menschliche Fehler reduzieren und die Betriebseffizienz verbessern. AT können dazu beitragen, öffentliche Verkehrssysteme zu optimieren und einen zuverlässigeren Service zu gewährleisten [2]. Um sicher zu navigieren und Entscheidungen zu treffen, sind diese Züge auf eine Vielzahl von Sensoren angewiesen [3, 4]. Unter diesen spielen Radarsensoren (Radio Detection and Ranging) eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu Kameras oder LiDAR-Sensoren (Light Detection and Ranging) können Radarsensoren auch unter schwierigen Wetterbedingungen wie Nebel, Regen oder Schnee zuverlässige Daten liefern [5]. Dies macht sie besonders wertvoll für die Gewährleistung eines sicheren Betriebs in allen Umgebungen. Das Testen und Validieren dieser Sensorsysteme direkt an realen Zügen ist jedoch komplex, teuer und zeitaufwendig [3]. Jeder Test auf realen Gleisen ist mit logistischen Herausforderungen und Sicherheitsgenehmigungen verbunden. Aus diesem Grund gewinnen simulationsbasierte Tests zunehmend an Bedeutung. Simulationen ermöglichen es zu testen, wie Objektdetektionssysteme (ODS) automatisierter Züge auf verschiedene Situationen reagieren, ohne dass jedes Mal ein Zug auf die Gleise geschickt werden muss. Damit Simulationen jedoch sinnvoll sind, müssen sie realistische Sensordaten liefern [6]. Dieser Beitrag stellt eine Methode zur Entwicklung und Validierung eines vir-

This article presents a method for developing and validating a virtual radar sensor model designed to simulate automated train operations as part of the Digitale Schiene Deutschland (DSD) sector initiative. The model generates realistic sensor data in a digital environment and supports the evaluation and future validation of radar-based object detection systems used in automated trains. An initial validation has been carried out under controlled laboratory conditions so as to ensure the accuracy and reliability of the virtual sensor. A static test setup was used in which a radar corner reflector served as a reference target for comparing the real and simulated sensor data. The use of simulation instead of physical testing on tracks means that complex railway scenarios can be evaluated more flexibly, cost-effectively and without any safety risks. This accelerates the development process and reduces the reliance on time consuming field trials.

1 Introduction

The demand for reliable, efficient and safe transportation is growing rapidly, particularly in urban areas [1]. Automated trains (AT) are considered a key technology for meeting these needs. AT can help optimise public transport systems and ensure more reliable service by reducing human error and improving operating efficiency [2]. These trains rely on a variety of sensors to navigate safely and make decisions [3, 4]. Radio detection and ranging (radar) sensors play a crucial role among them. Unlike cameras or light detection and ranging (LiDAR), radar can provide robust data even under challenging weather conditions such as fog, rain or snow [5]. This makes it especially valuable for ensuring safe operations in all environments. However, testing and validating these sensor systems directly on real trains is complex, expensive and time-consuming [3]. Every test on real tracks involves logistical challenges and safety approvals. This is why simulation-based testing is becoming more important. Simulations enable engineers to test how object detection systems (ODS) on automated trains respond to various situations without requiring a train to be sent onto the tracks every time. However, if simulations are to be useful, they should provide realistic sensor data [6]. This article introduces a method used to develop and validate a virtual radar sensor model as part of the DSD sector initiative. The goal is to create realistic radar data in a digital environment, thereby allowing the ODS to be reliably tested and improved without the need for any physical field trials.

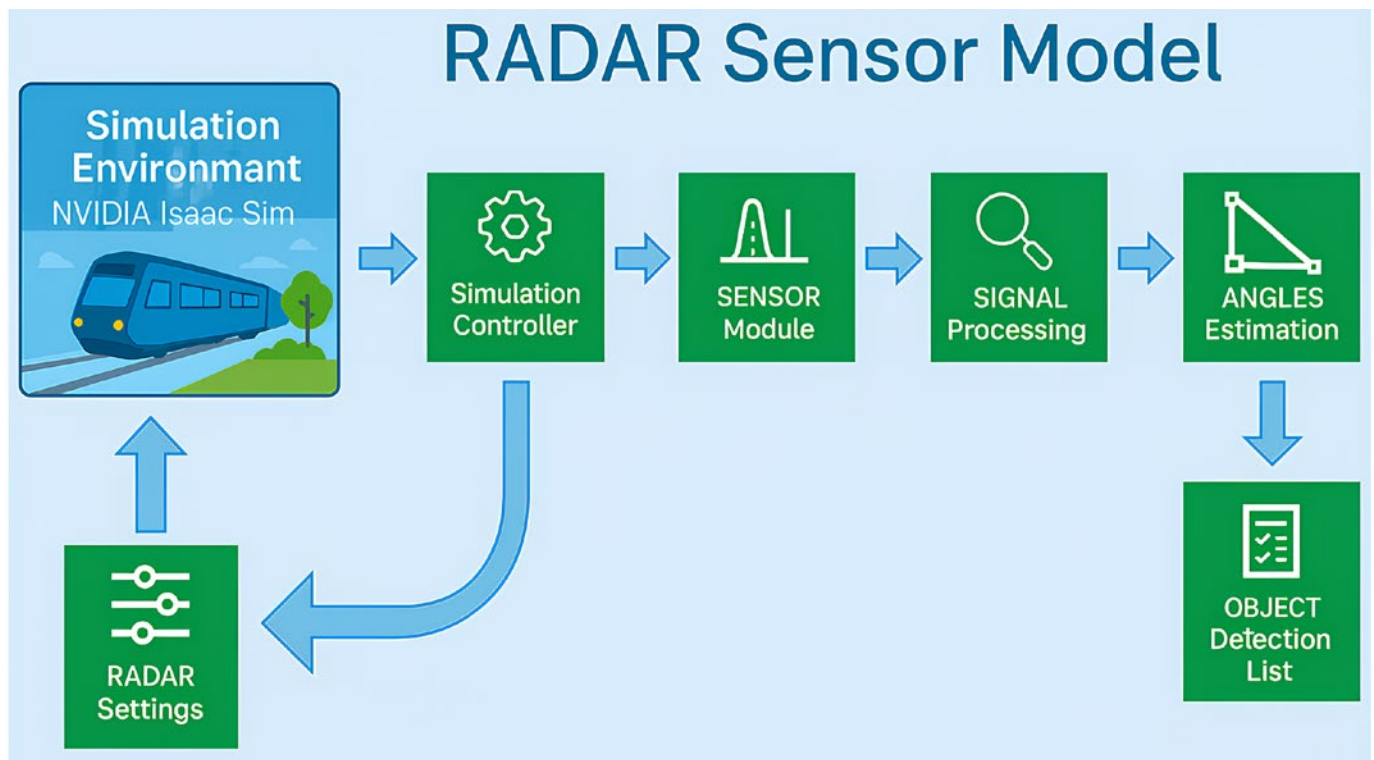


Bild 1: Co-Simulations-Framework für das vorgestellte 4D-Radarsensormodell

Fig. 1: The co-simulation framework for the presented 4D radar sensor model

tuellen Radarsensormodells im Rahmen der Sektorinitiative DSD vor. Das Ziel ist es, realistische Radardaten in einer digitalen Umgebung zu erstellen, damit ODS zuverlässig getestet und verbessert werden können, ohne dass physische Feldversuche erforderlich sind.

2 Entwurf des Radarsensormodells

Bild 1 zeigt, wie das virtuelle Radarsensormodell in einer auf NVIDIA Isaac Sim basierenden Simulationsumgebung verwendet wird. Diese Umgebung ermöglicht eine realistische Simulation dessen, wie ein an einem Zug montierter Radarsensor Objekte in seiner Umgebung erkennt. Zu diesem Zweck verwendet das Modell Raytracing, eine Methode, die simuliert, wie Radarwellen von verschiedenen Materialien und Oberflächen in unterschiedlichen Winkeln reflektiert werden.

Die Art und Weise, wie eine Oberfläche Radarsignale reflektiert, hängt von ihrer Textur und ihrem Material ab. Diese Reflexionsstärke wird als Radarquerschnitt (Radar Cross Section, RCS) bezeichnet. Diese Oberflächeneigenschaften können mithilfe der in Isaac Sim integrierten Materialeinstellungen angepasst werden. Der Radarsensor selbst wird über eine Einstellungsdatei konfiguriert. Sobald die Simulation startet, sendet das System ideale Raytracing-Daten (Entfernung, Geschwindigkeit, RCS, Azimut- und Höhenwinkel) an den virtuellen Sensor. Das Herzstück des Modells ist der Simulationcontroller, der die digitale Umgebung mit dem Sensormodul verbindet. Es berücksichtigt auch übliche Unvollkommenheiten wie Rauschen, sodass die Daten so aussehen, als stammten sie von einem echten Sensor. Anschließend wird das Signal mithilfe der schnellen Fourier-Transformation (FFT) analysiert, um die Entfernung von Objekten und deren Geschwindigkeit zu berechnen. Diese Informationen bilden eine 3D-Karte, auf der Objekte als Frequenzspitzen erscheinen. Das Modell bestimmt auch den Winkel jedes Objekts von Seite zu Seite (Azimut) und von oben nach unten (Höhenwinkel).

2 The radar sensor model design

Fig. 1 shows how the virtual radar sensor model is used within a simulation setup based on the NVIDIA Isaac Sim. This environment enables the realistic simulation of how a radar sensor mounted on a train detects objects in its surroundings. In order to achieve this, the model employs ray tracing, a method that simulates how radar waves bounce off different materials and surfaces at various angles.

The way a surface reflects radar signals depends on its texture and material and this reflection strength is known as the radar cross section (RCS). These surface properties can be adjusted using the material settings built into the Isaac Sim. The radar sensor itself is configured by means of a settings file. Once the simulation starts, the system sends ideal ray tracing data (the distance, speed, RCS, azimuth and elevation angles) to the virtual sensor. At the model's core there is a simulation controller that connects the digital environment to the sensor module. The sensor model utilises a 2D virtual antenna array to generate a realistic radar signal. It also incorporates common imperfections, such as noise, thereby making the data seem like it originated from a real sensor. Next, the signal is analysed using Fast Fourier Transforms (FFT) so as to calculate the distance of any objects and their speed. This information forms a 3D map, where objects appear as frequency peaks. The model also determines the angle of each object from side to side (the azimuth) and up and down (the elevation). Since one object can reflect the radar signal in multiple directions, a clustering step groups these reflections together, so that each object is only counted once. At the end, the radar model provides a realistic detection list, including the distance, speed, direction, RCS and signal-to-noise ratio (SNR). This helps test and improve automated train systems without the need for any physical prototypes, thereby saving time and costs. Fig. 2 shows an example of a simulated train scene with radar detections.

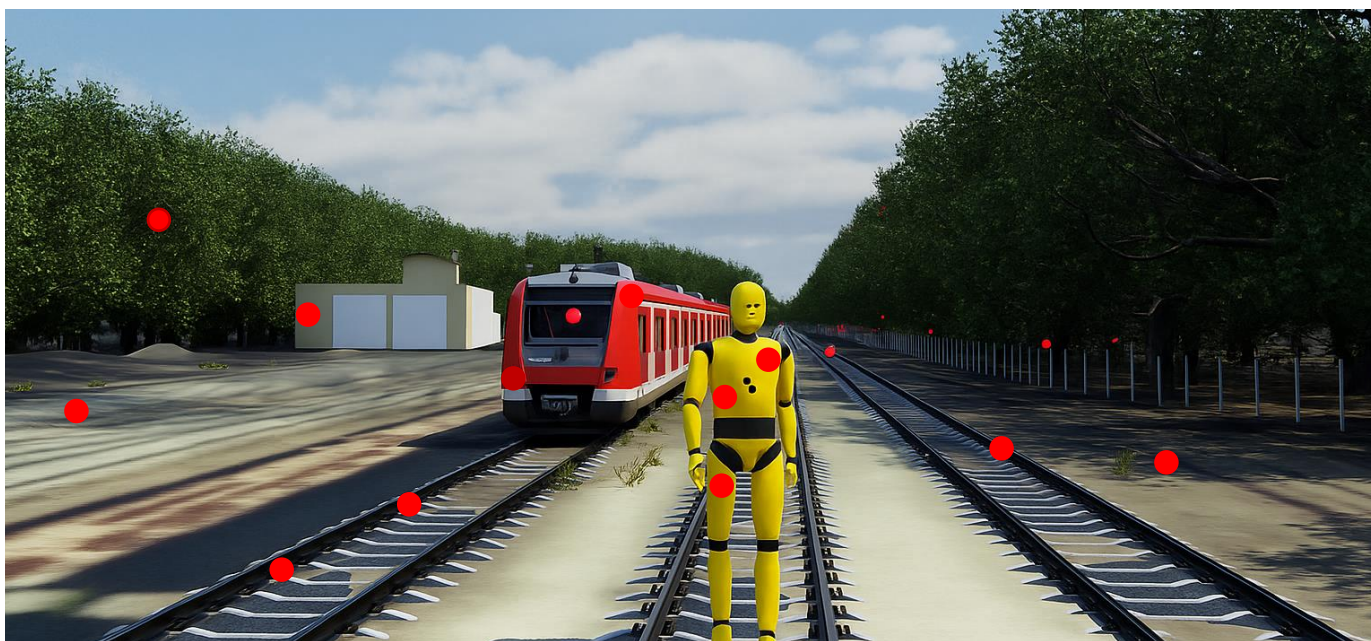


Bild 2: Eine beispielhafte statische Szene aus der Simulation mit Radarerkennung. Die roten Punkte zeigen die virtuellen Radarerkennung in der Szene.

Fig. 2: An example of a static simulation train scene featuring radar detections. The red points indicate the virtual radar detections in the scene.

Da ein Objekt das Radarsignal in mehrere Richtungen reflektieren kann, werden diese Reflexionen in einem Clustering-Schritt zusammengefasst, sodass jedes Objekt nur einmal gezählt wird. Am Ende liefert das Radarmodell eine realistische Liste von Detektionen, einschließlich Entfernung, Geschwindigkeit, Richtung, RCS und Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Dies hilft beim Testen und Verbessern automatisierter Zugsysteme, ohne dass physische Prototypen erforderlich sind, was Zeit und Kosten spart. Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine simulierte Szene mit Radardetektionen.

3 Validierung des Sensormodells: Labortestergebnisse

Um sicherzustellen, dass das virtuelle Radarsensormodell korrekt funktioniert, wurde ein einfacher Test in einer kontrollierten Laborumgebung durchgeführt. Ein spezielles Testobjekt, ein sogenannter Tripelspiegel, der Radarwellen zuverlässig reflektiert, wurde 4,2 m vor einem echten Radarsensor in einer Radarabsorberkammer platziert, die Außensignale blockiert (Bild 3, links). Durch den

3 Validating the sensor model: the laboratory test results

In order to ensure that the virtual radar sensor model behaved realistically, a simple test was first conducted in a controlled laboratory environment to collect real-world data for comparison. In this setup, a highly reflective test object known as a corner reflector was placed exactly 4.2 m in front of a real radar sensor in a radar absorber chamber designed to block any external signals. The measurements were carried out in a radar anechoic chamber in order to eliminate any unwanted reflections and interference. This ensured that only the intended signals from the test object were captured, as shown in fig. 3, left. The distance between the sensor and the corner reflector remained constant during the test. However, the sensor itself was slowly rotated left and right to measure how the object's RCS changed at different azimuth angles. The elevation angle was kept constant to focus solely on any horizontal variations. The same setup was then replicated in a virtual simulation environment for comparison, as illustrated in fig. 3, right. No anechoic chamber is required in



Bild 3: Links: statischer Messaufbau zur Erfassung realer Radardaten in einer Radarabsorberkammer. Rechts: virtuelle Zugszene in NVIDIA Isaac Sim mit einem auf dem Zug montierten Radarsensor und einem Tripelspiegel als Testobjekt

Fig. 3: Left: A static measurement setup for capturing real radar data in a radar absorber chamber. Right: A virtual train scene in the NVIDIA Isaac Sim with a radar sensor mounted on the train and a corner reflector as the test object

statischen Messaufbau zur Erfassung realer Radardaten werden so unerwünschte Reflexionen und Störungen unterdrückt, sodass ausschließlich die Signale des Testobjekts aufgezeichnet werden. Während des Tests blieb der Abstand zwischen dem Sensor und dem Tripelspiegel konstant. Der Sensor selbst wurde jedoch langsam nach links und rechts gedreht, um zu messen, wie sich der RCS des Objekts bei verschiedenen Azimutwinkeln veränderte. Die gleiche Anordnung wurde zum Vergleich in einer virtuellen Umgebung nachgebildet (Bild 3, rechts). Es wurde eine virtuelle Zugscene in NVIDIA Isaac Sim erzeugt, mit einem auf dem Zug montierten Radarsensor und einem Tripelspiegel als Testobjekt, der ein starkes, klares Signal liefert. In der Simulation ist keine Absorberkammer nötig, da keine unerwünschten Reflexionen oder Störungen auftreten. Da keine zusätzlichen Sensoren zur Verfügung standen, um die genauen Winkel in der realen Anordnung zu messen, wurden die Winkelwerte des realen Radarsensors als Referenzwerte verwendet. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Bild 4 dargestellt. Die Ergebnisse des virtuellen und des realen Sensors lagen sehr nahe beieinander:

- Der Unterschied in der RCS betrug weniger als 0,7 dBm²
- Die Differenz der Abstände betrug weniger als 2 cm
- Die Abweichungen bei Azimut und Höhenwinkel lagen jeweils unter 1°.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das virtuelle Sensormodell unter den Testbedingungen sehr genau ist. Da der Tripelspiegel stillstand, betrug die relative Geschwindigkeit zwischen Sensor und Objekt null, sodass die Geschwindigkeit nicht in den Vergleich einbezogen wurde. Da sich auch die Entfernung nicht änderte, wurde das SNR hier nicht bewertet. Bild 4 (a) zeigt, wie genau der detektierte RCS von virtuellem und realem Radar übereinstimmen – mit nur 3,1 % durchschnittlicher Abweichung. Bild 4 (b) vergleicht die gemessenen Entfernungen, die nahezu identisch waren – mit nur 0,7 % Unterschied. Bild 4 (c) zeigt die Abweichung bei der Erkennung der horizontalen Richtung (Azimut) mit einem geringen durchschnittlichen Fehler von 2,7 %. Bild 4 (d) zeigt die Abweichung in vertikaler Richtung (Höhenwinkel)

the simulation, as there are no unwanted reflections or interference. Since no additional equipment was available to accurately measure the actual azimuth angles, the azimuth values from the real radar sensor were used as a reference for the simulation. The comparison results, shown in fig. 4, demonstrate that the values from the virtual and real sensors are very close:

- The difference in the RCS is less than 0.7 dBm²
- The difference in the distance was less than 2 cm
- The angular deviations (azimuth and elevation) were each below 1°.

These results indicate that the virtual radar sensor model closely matches the real sensor under controlled, static test conditions. Since the corner reflector remained stationary, there was no relative motion between the sensor and the object and thus no speed-related measurements were included in the comparison. Additionally, the SNR was also not evaluated in this particular test, because the distance to the object remained constant.

Fig. 4 (a) shows how closely the virtual and real radar matched in detecting the RCS, with only a 3.1 % average difference. Fig. 4 (b) compares the measured distances, which were almost identical with just a 0.7 % difference. Fig. 4 (c) displays the difference in detecting the horizontal direction (azimuth) with a small average error of 2.7 %. Fig. 4 (d) shows the difference in the vertical direction (elevation) with an average error of 4.8 %. These results confirm that the virtual sensor performs very similarly to a real one under static test conditions.

4 Conclusion and outlook

In this work, we have presented a detailed virtual radar sensor model for testing automated train systems in a simulated environment. The model incorporates realistic antenna behaviour and signal processing, mirroring the functionality of a real radar sensor. It provides key information, such as the distance, speed, direction, RCS and SNR

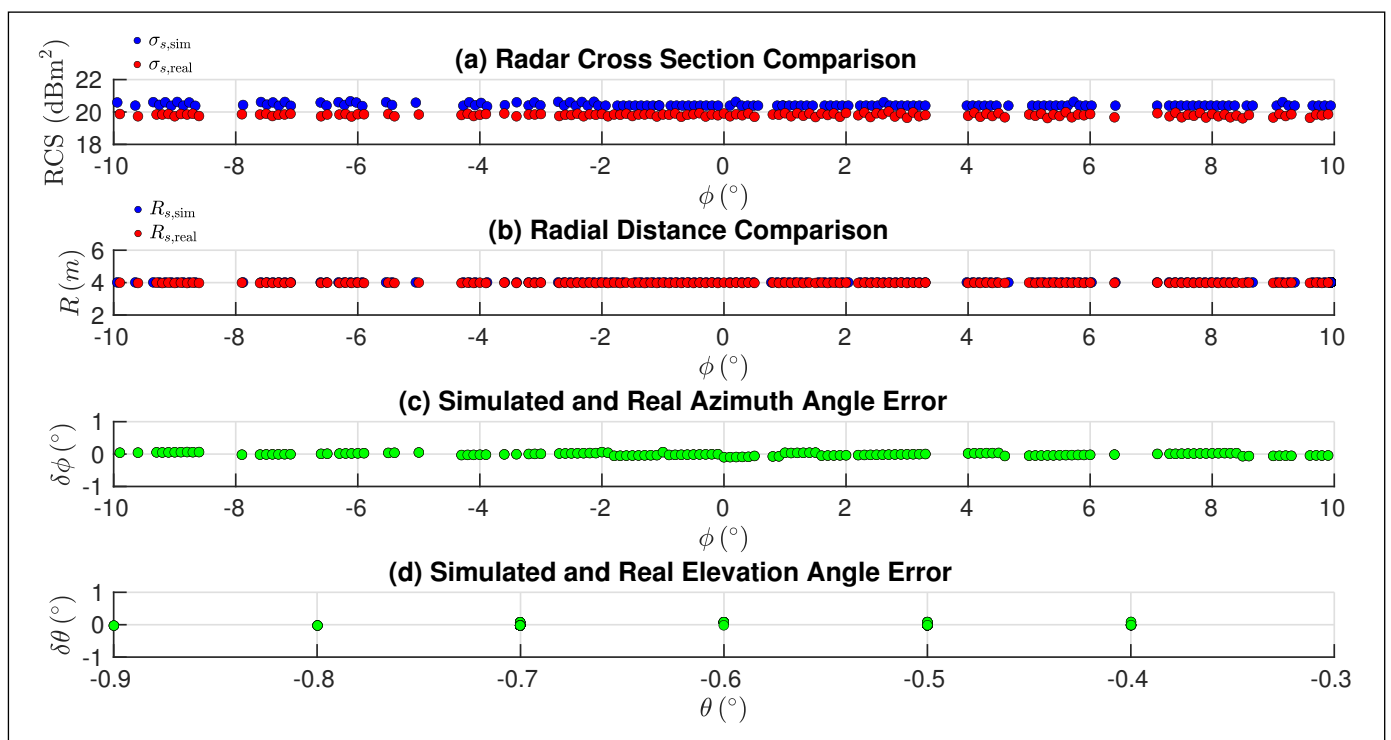


Bild 4: Vergleich zwischen dem virtuellen Radarsensor und realen Messungen

Fig. 4: A comparison of the virtual radar sensor and real-world measurements

mit einem durchschnittlichen Fehler von 4,8 %. Diese Ergebnisse bestätigen, dass sich der virtuelle Sensor unter Testbedingungen sehr ähnlich wie ein realer Sensor verhält.

4 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein detailliertes, virtuelles Radarsensormodell vorgestellt, das zur Erprobung automatisierter Zugsysteme in einer simulierten Umgebung dient. Das Modell bildet das Verhalten von Antennen und die Signalverarbeitung realitätsnah ab und orientiert sich an einem echten Radarsensor. Es liefert wichtige Informationen wie Abstand, Geschwindigkeit, Richtung, RCS und SNR der erkannten Objekte. Im Vergleich mit realen Messdaten unter kontrollierten Bedingungen zeigte das virtuelle Sensormodell eine hohe Genauigkeit, mit nur geringen Abweichungen bei Abstand, Winkel und Reflexionsstärke. Dies bestätigt die zuverlässige Funktion des Modells in statischen Testszenarien. Erste Ergebnisse liefern bereits wertvolle Erkenntnisse und zeigen, dass das Modell gut auf die kommenden Schritte vorbereitet ist. In der nächsten Phase könnte das Modell um zusätzliche Effekte wie Phasenrauschen erweitert werden, da diese in realen Sensoren eine Rolle spielen. Außerdem könnten dynamische Tests durchgeführt werden, bei denen sich sowohl der Zug als auch die Objekte bewegen und überprüft wird, wie gut das virtuelle Modell unter realistischeren Bedingungen funktioniert. Die DSD sendet damit wichtige Impulse in den Sektor und schafft die Grundlage für eine zukünftige Entwicklung serienreifer Sensorikprodukte durch die Industrie. ■

of the detected objects. When compared with real-world measurements under controlled conditions, the virtual sensor yielded very accurate results, with only minor differences in the distance, angle and reflection strength. This confirms that the model works well in static test scenarios. Early results have already provided valuable insights, showing that the model is well-prepared for these future steps. In the next phase, the model could be expanded to include additional effects such as phase noise, as it concerns the performance of real radar sensors. Dynamic tests will be planned, in which both the train and the objects are in motion. The aim is to check how well the virtual model works under more realistic conditions. The DSD initiative is thus sending important impulses to the sector and is laying the foundation for the future development of market-ready sensor products by the industry. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Guo, K.; Zhou, J.; Zhang, X.; Sun, D.; Wang, Z.; Zhao, L.: „Analysis on Operational Safety and Efficiency of FAO System in Urban Rail Transit,” in *Comput. Mater. Contin.*, vol. 77, no. 3, pp. 3677–3696, 2023. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.038660>
- [2] Liu, F.; Xun, J.: „An Automatic Train Operation Based Real-Time Rescheduling Model for High-Speed Railway” in *Mathematics*, MDPI, vol. 11, no. 21, pp. 4546, 2023
- [3] Ziegler, M.; Mhasawade, V.; Köppel, M.; Neumaier, P.; Eiselein, V.: „A Comprehensive Framework for Evaluating Vision-Based On-Board Rail Track Detection,” 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, AK, USA, 2023, pp. 1–8. doi: 10.1109/IV55152.2023.10186659
- [4] Digitale Schiene Deutschland, „Fully automated, driverless driving: A response to the shortage of skilled labour in the rail industry,” May 2024. [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/news/2024/Fullyautomateddriving>
- [5] Haider, A. et al.: „Modeling and Simulation of Automotive FMCW RADAR Sensor for Environmental Perception,” in *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, pp. 433–455, 2025. doi: 10.1109/OJITS.2025.3554452
- [6] Haider, A. et al.: „Modeling of Motion Distortion Effect of Scanning LiDAR Sensors for Simulation-Based Testing,” in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13020–13036, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3355066

AUTOREN | AUTHORS

Arsalan Haider

Experte für Sensorsimulation (Radar) / *Sensor Simulation Expert (Radar)*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF-Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: arsalan.haider@deutschebahn.com

Arne Jacobs

Produktverantwortlicher Sensorsimulation / *Sensor Simulation Product Owner*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: arne.jacobs@deutschebahn.com

Markus Ziegler

Experte für Sensorsimulation (LiDAR) / *Sensor Simulation Expert (LiDAR)*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: markus-franz.ziegler@deutschebahn.com

Yaoying Wang

Expertin für Sensorsimulation (Kamera) / *Sensor Simulation Expert (Camera)*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: yaoying.wang@deutschebahn.com

Mathew E. Augustine

Experte für Sensorsimulation (LiDAR) / *Sensor Simulation Expert (LiDAR)*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: mathew-emmanuel.augustine@deutschebahn.com

Ruben Schilling

Senior Experte / Gruppenleiter Umfeldwahrnehmung / *Lead Perception*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: ruben.schilling@deutschebahn.com

Christian Pfeiffer

Systementwicklung vollautomatisches Fahren / *System Development for Fully Automated Driving*
Digitale Schiene Deutschland (DSD)
DB InfraGO AG
Adresse / Address: EUREF Campus 17, Gasometer, D-10829 Berlin
E-Mail: christian.cr.pfeiffer@deutschebahn.com

Thomas Zeh

Professor für Elektrotechnik / *Professor for Faculty of Electrical Engineering*
Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten
Adresse / Address: Bahnhofstraße 61, D-87435 Kempten (Allgäu)
E-Mail: thomas.zeh@hs-kempten.de