

# **Physikalische Sensorsimulation zur Verifikation und Validierung optischer Systeme**

## ***Physical Sensor Simulation for the Verification and Validation of Optical Systems***

Jörn Thieling und Jürgen Roßmann, RWTH Aachen, Aachen (Germany),  
thieling@mmi.rwth-aachen.de, rossmann@mmi.rwth-aachen.de

**Abstract:** Optical systems are a key technology for highly automated production processes including inline inspection systems and driverless transport systems. All of them require comprehensive verification and validation to ensure their functionality, safety and reliability. Often this can only be fully determined too late—i.e. after implementation in the production process. To allow early and continuous system tests we propose the use of Digital Twins and Hybrid Testbeds that combine simulated and real components as available or required. To this end, a scalable physical sensor simulation is required, that on the one hand enables a flexible configuration and simulation of optical systems within their operational environments, and on the other hand, generates physically reliable sensor data for realistic simulation results. This contribution addresses the resulting complexity and presents methods that handle this by means of modular and physical models of intrinsic sensor components as well as extrinsic sensor-environment interactions.

## **1 Einleitung**

Optische Systeme sind nicht nur die Schlüsseltechnologie zur Realisierung von Inline-Prüfsystemen, sondern auch der Wahrnehmungssinn von Fahrerlosen Transportsystemen. Damit leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur Kontrolle und Automatisierung des Produktionsprozesses und legen den Grundstein für eine Produktion von hochwertigen Produkten zu geringen Kosten und kurzen Produktionszeiten. Allerdings ist jede Messung von optischen Systemen aufgrund von einer Vielzahl von Einflussfaktoren inhärent unsicherheitsbehaftet und durch verschiedene Störgrößen und Limitierungen des Messprozesses verfälscht. Einflüsse können dabei sowohl extrinsischer als auch intrinsischer Natur sein. Aufgrund der Komplexität der verschiedenen, miteinander korrelierenden Einflussfaktoren ist die Verifikation und Validierung von optischen Systemen und der auf diesen basierenden Gesamtsystemen stets mit einem großen Aufwand verbunden, der vielzählige Tests am realen System und in einem realitätsnahen Einsatzumfeld erfordert. Häufig kann die funktionale Validierung des realen optischen Systems erst nach der

Implementierung in den Produktionsprozess vollständig ermittelt werden, was potenziell zu kostenintensiven Iterationen zur Behebung von Design- und Implementationsfehlern führt. In diesem Beitrag wird die simulationsbasierte Verifikation und Validierung von optischen Systemen fokussiert, wohingegen die Methoden zur Überprüfung der Gültigkeit der zugrundeliegenden Modelle und Simulationen in (Thieling und Roßmann 2021) behandelt wurden.

## 1.1 Verwandte Arbeiten

Um bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung von optischen Systemen einen Einblick in deren Funktionalität und Anwendbarkeit zu erlangen, bietet sich der ergänzende Einsatz von Simulationstechnik an. So liefert der aktuelle Stand der Technik verschiedenste Ansätze zur Simulation in Produktion und Logistik. Kommerzielle Beispiele für die industrielle Anwendung sind Tecnomatix Plant Simulation und FlexSim, welche prinzipiell Prozess- und Logistik-Simulationen ermöglichen aber den Sensoraspekt moderner Produktionsanlagen komplett vernachlässigen. Auch mit Blick auf robotische Anwendungen – bei denen Sensoren in Zeiten von intensiver Automation und autonomen Robotern unabdingbar sind – erlauben Systeme wie Microsoft Robotics Studio, Gazebo (Open Source Robotics Foundation 2021), Webots (Cyberbotics 2021) und USARSim (Carpin et al. 2007) nur in engen Grenzen eine detaillierte und validierte Simulation von Sensorsystemen und den zugehörigen komplexen Regelkreisen. Häufig basiert die Simulation optischer Sensoren auf Gaming Engines wie Unreal (Epic 2021), Unity (Unity 2021) oder CryEngine (Crytek 2021), welche alle zur Visualisierung von Computerspielen und Spezialeffekten entwickelt wurden. Dementsprechend sind diese Ansätze zwar echtzeitfähig und erscheinen physikalisch plausibel. Sie sind jedoch nicht physikalisch korrekt im Sinne einer ausreichend detaillierten und validierten Simulation optischer Systeme. Daher erlauben sie keine physikalisch belastbare Aussage zur Verifikation und Validierung von optischen Systemen.

Auch die Betrachtung aktueller Forschungsergebnisse in diesem Bereich liefert überwiegend Ansätze, die lediglich ein Teilproblem der Simulation optischer Systeme behandeln. So existieren beispielsweise Ansätze zur spezifischen Simulation einzelner Sensoren (Mohammadikaji et al. 2020; Elmadawi et al. 2019; Kolchaev et al. 2017; Hirsenkorn et al. 2017; Douchin et al. 2016; Liu 2013) als auch zur modell- und herstellerübergreifenden Simulation generischer Sensoren (Stolz und Nestlinger 2018; Velazquez et al. 2018; Hanke et al. 2015).

Der Nachteil nahezu aller dieser Ansätze ist der Verlust an Flexibilität oder Realitätsnähe. Entweder fokussieren sie sich auf die detaillierte Simulation eines herstellereinspezifischen Sensors und erlauben keine generische Modellierung weiterer Varianten oder sie unterstützen die Simulation zahlreicher Sensoren aber die hierbei generierten Ergebnisse sind realitätsfern aufgrund nicht-physikalischer Modelle.

## 1.2 Überblick

In unserem Beitrag stellen wir den Einsatz von Digitalen Zwillingen und Hybriden Testbeds vor. Diese modellieren und simulieren alle relevanten Komponenten und Einflussfaktoren des optischen Systems einschließlich seines geplanten Einsatzumfeldes. Durch Kombination von simulierten und realen Komponenten schaffen Hybride Testbeds nicht nur eine frühzeitige Möglichkeit zur funktionalen

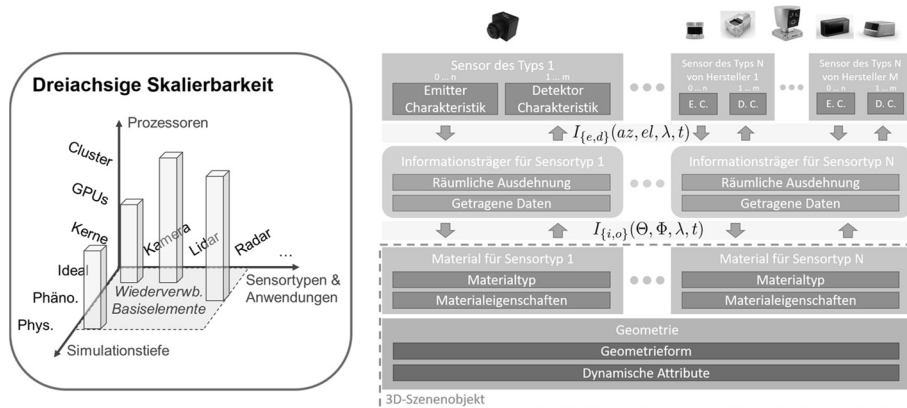
Validierung mittels simulierter Einsatzszenarien, sondern erlauben zugleich einen nahtlosen Transfer von einem ersten digitalen Prototyp zum finalen, realen System (Thieling und Roßmann 2020). In diesem Kontext umfassen Digitale Zwillinge – als 1:1-Replikat von realen Systemen in der digitalen Welt – alle relevanten Systemkomponenten einschließlich ihrer Funktionen und Schnittstellen und werden durch den Einsatz von 3D-Simulationen zum Leben erweckt.

Einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung dieser Digitalen Zwillinge und Hybriden Testbeds liefert die in diesem Beitrag behandelte physikalische Sensorsimulation. Diese modelliert und simuliert sowohl die Sensor-Umfeld Interaktion als auch die intrinsischen Sensorkomponenten und adressiert somit den größten und komplexesten Teil eines optischen Systems. Dazu liefern die folgenden Abschnitte einen Einblick in das übergeordnete Konzept der skalierbaren physikalischen Sensorsimulation (Abschnitt 2), behandeln die im Kontext von Produktion und Logistik besonders relevanten Einflüsse und Störgrößen anhand zugehöriger extrinsischer und intrinsischer Modelle (Abschnitt 3 und 4) und zeigen deren Anwendung in bereichsübergreifenden Einsatzszenarien (Abschnitt 5).

## **2 Skalierbare physikalische Sensorsimulation**

Zur Realisierung der hier vorgeschlagenen physikalischen Sensorsimulation wird das in (Thieling und Roßmann 2020) eingeleitete Konzept der Dreiaxigen Skalierbarkeit angewandt. Dieses verfolgt eine Skalierbarkeit von Modellen und Simulationsverfahren entlang der Dimensionen: Simulationstiefe, Sensortypen & Anwendungen und Prozessoren (vgl. Abbildung 1 links).

Grundlage hierfür ist, dass die notwendigen Sensor- und Fehlermodelle als wiederverwendbare Basiselemente implementiert werden, die sich allein durch Parametrieren und Konfigurieren auf ein spezifisches Sensorsystem münzen lassen. Realisiert wird dies durch die Verwendung von weitestgehend generischen und physikalischen Schnittstellen und Modellen (vgl. Abbildung 1 rechts), die sich allein anhand der vorliegenden Kenngrößen (Spezifikation des Sensorsystems) und/oder durch Verfahren zur Parameteridentifikation (auf Basis realer Referenzaufnahmen) passend zum spezifischen Verhalten konfigurieren lassen.



**Abbildung 1:** Konzept der Dreiachsigen Skalierbarkeit (links) und physikalische Architektur zur skalierbaren (multimodalen) Sensor-Umfeld Interaktion (rechts). Tiefergehende Erläuterungen finden sich in (Thieling und Roßmann 2020).

Mit Blick auf die Realisierung von Hybriden Testbeds – bestehend aus zum Teil simulierten und zum Teil realen Komponenten – ist eine weitere Grundlage die Skalierbarkeit über verfügbare Prozessoren. Diese erlaubt erst eine echtzeitfähige Simulation durch Parallelisierung des entstehenden Rechenaufwands über alle verfügbaren Rechenressourcen. Realisiert wird dies durch die im Kern parallelisierte Implementierung der wiederverwendbaren Basiselemente, die ihre Arbeitspakete als Funktionen über die sensorzentrischen Dimensionen Azimut, Elevation und Zeit beschreiben und so die Berechnungen auf tiefer Ebene voneinander entkoppeln. Im Detail wird hierbei der zur Simulation benötigte Rechenaufwand über tausende Kerne eines Grafikprozessors (GPU) und allen verfügbaren GPUs eines Servers parallelisiert, was die Generierung simulierter Sensordaten mit akzeptablen Rechenzeiten garantiert – ohne zwangsweise die Simulationstiefe zu reduzieren.

Stehen die für eine echtzeitfähige und zugleich physikalische Simulation benötigte Anzahl an Prozessoren nicht zur Verfügung oder liegen die Modelle nur als ideale oder phänomenologische Modelle vor, ist die letzte Achse der Skalierbarkeit von Interesse, die einen nahtlosen Übergang zwischen verschiedenen Simulationstiefen repräsentiert. Realisiert wird diese durch stets physikalische (d. h. simulationsverfahren-unabhängige) Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellen. Dies umfasst die in Abbildung 1 (rechts) gezeigten intensitätsbasierten Schnittstellen, die unabhängig vom sensorspezifischen Informationsträger die Interaktion auf Basis der emittierten und detektierten Intensitäten ( $I_e, I_d$ ) respektive der einfallenden und ausgehenden Intensitäten ( $I_i, I_o$ ) beschreiben – stets definiert über alle Raumwinkel ( $az, el$ ) bzw. ( $\Theta, \Phi$ ) und in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  und Zeit  $t$ .

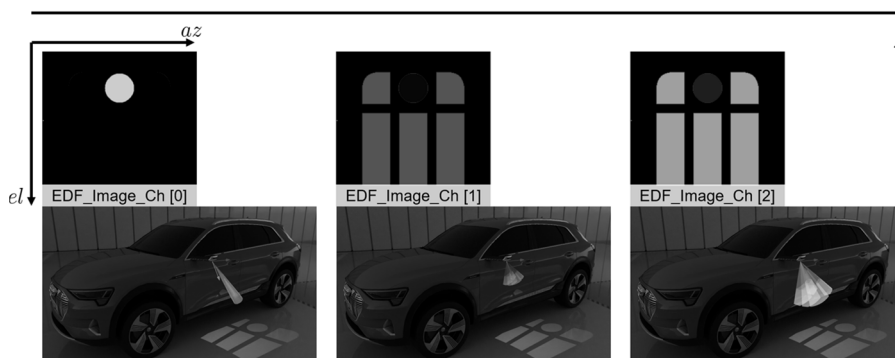
In den folgenden Abschnitten wird unter Berücksichtigung des hier eingeleiteten übergeordneten Konzepts die Modellierung und Simulation von ausgewählten physikalischen Effekten beleuchtet und dabei der Fokus auf jene Effekte gelegt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Verifikation und Validierung von optischen Systemen insbesondere im Bereich von Produktion und Logistik nehmen.

### 3 Simulation extrinsischer Einflüsse und Störgrößen

Mit Blick auf die extrinsischen Einflüsse und Störgrößen steht vor allem die Ausbreitung des Informationsträgers (z. B. Licht) und dessen Interaktion mit den Objekten der Szene im Fokus. Neben der Richtcharakteristik der relevanten Emitter und den Geometrieformen der umgebenden Objekte wird die Sensor-Umfeld Interaktion insbesondere von der materialspezifischen Streuung und der dynamischen Bewegung von Sensor und 3D-Szenenobjekten beeinflusst.

#### 3.1 Mehrwegeausbreitung des Informationsträgers

Für eine realitätsnahe Simulation der Mehrwegeausbreitung der Informationsträger (z. B. Licht) werden Emitter (z. B. Lichtquellen) unter anderem hinsichtlich ihrer Lage und Richtcharakteristik modelliert. Um beliebige Emitter zu unterstützen, lässt sich die Richtcharakteristik durch benutzerdefinierte Emissionsverteilungsfunktionen (EDFs) integrieren, die die ursprüngliche Intensität des Emitters in Abhängigkeit von dem Raumwinkel  $(az, el)$  und der Wellenlänge  $\lambda$  gewichtet und so deren Modellierung generalisiert (vgl. Abbildung 2).



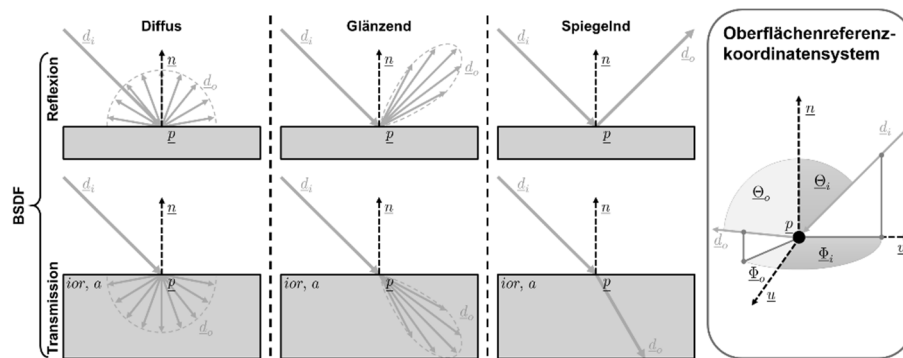
**Abbildung 2:** Benutzerdefinierte Emissionsverteilungsfunktion (EDF) mit drei Kanälen bestehend aus Rot, Grün und Blau des sichtbaren Lichtspektrums.

Sind die relevanten Emitter auf diese Weise entweder als Teil des Sensors (z. B. für aktive Lidar-Sensoren) oder als Teil der Szene (z. B. für passive Kameras) modelliert, wird die Ausbreitung des Informationsträgers durch die dreidimensionale Szene mittels Strahlen verfolgt. Da das direkte Umfeld eines Sensors den größten Einfluss auf die Sensordaten hat, erfolgt dies entgegengesetzt zur eigentlichen Ausbreitungsrichtung – also ausgehend vom Detektor durch die Szene bis zu den relevanten Emittlern.

#### 3.2 Materialspezifische Streuung

Besonders wichtig für eine realitätsnahe Simulation der Mehrwegeausbreitung ist die Modellierung der materialspezifischen Streuung. Zur Generalisierung der Materialmodelle werden diese neben dem material- und wellenlängenspezifischen Brechungsindex  $ior$  und Absorptionskoeffizienten  $a$  auf Oberflächenebene durch ihre Bidirektionale Streuungsverteilungsfunktion (BSDF) definiert (vgl. Abbildung 3).

Letztere beschreibt sowohl den reflektierten, als auch transmittierten Anteil der einfallenden Intensitäten in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  und ist definiert über alle Raumwinkel  $(\Theta, \Phi)$  des Oberflächenreferenzkoordinatensystems – bestehend aus Oberflächenpunkt  $\underline{p}$ , Normale  $\underline{n}$ , Tangente  $\underline{u}$  und Bitangente  $\underline{v}$ . Grundsätzlich sind hier parametrische Funktionen zur Definition und Kombination einer diffusen, glänzenden und spiegellenden Reflexion und/oder Transmission (vgl. Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Basiselemente einer Bidirektionalen Streuungsverteilungsfunktion (BSDF) links mit zugehörigem Oberflächenreferenzkoordinatensystem rechts.

So lassen sich durch Kombination wiederverwendbarer Basiselemente beliebige Oberflächenvariationen als Materialmodelle realisieren, die wiederum zur Umhüllung beliebiger (Teil-) Geometrien dienen (vgl. Abbildung 1 rechts) und so die Schnittstelle zwischen sensorspezifischen Informationsträgern und 3D-Szenenobjekten definieren.

### 3.3 Dynamische Bewegung von Sensor und Umfeld

Auch die dynamische Bewegung von Sensor und Umfeld nehmen einen entscheidenden Einfluss auf die einzelnen Messwerte (z. B. Punktwolke eines Lidars). So beeinflusst die Bewegung einzelner Objekte nicht nur deren Lage und führt zu einer ggf. verzerrten Wahrnehmung aus Sicht des Sensors, sondern verursacht ebenso eine Doppler-Verschiebung in der Frequenz des reflektierten Informationsträgers.

Um beide Effekte in der Simulation zu respektieren, wird bei der Sensor-Umfeld Interaktion während eines Simulationszeitschritts sowohl die Lage der Objekte, als auch deren Geschwindigkeitsvektoren ausgewertet. Dies betrifft zum einen die Bestimmung von Schnittpunkten zwischen Informationsträgern und Objekten der Szene und zum anderen die Berechnung der Frequenzverschiebung im Zuge der materialspezifischen Streuung. Die Simulation dieser Dopplerverschiebung ist insb. für die Simulation von Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)-Radar- und FMCW-Lidar-Sensoren relevant.

## 4 Simulation intrinsischer Einflüsse und Störgrößen

Mit Blick auf die intrinsischen Einflüsse und Störgrößen steht vor allem die Abtastung des Sensorsystems im Fokus, welche sich in erster Linie aus der Lage des Detektors und dem Design einer etwaigen Scan-Mechanik (z. B. bei Lidar-Sensoren) ergibt.

Neben dem nominalen Abtastmuster in Form einer Liste an Raumwinkeln ( $az, el$ ) definiert als Funktion der Zeit  $t$  wird die sensorspezifische Wahrnehmung u. a. von der Verzerrung, Tiefenschärfe und Verschmutzung des Linsensystems beeinflusst.

#### 4.1 Linsenverzerrung

Das wohl bekannteste Beispiel einer Linsenverzerrung findet sich im Kontext einer Kamera, welche im Gegensatz zu einem idealen Lochkamera-Modell stets mit einer mehr oder weniger stark verzerrten Abbildung auf den Detektor verbunden ist. Ursächlich ist stets die Brechung des Informationsträgers (z. B. Licht) am Übergang zwischen Luft und Linsenmaterial (z. B. Glas), deren Ausmaße durch die Wölbung der einzelnen Linsen kontrolliert wird.

Da Linsen nicht nur in Kameras, sondern auch in weiteren optischen Systemen Anwendung finden (z. B. Lidar oder Radar) werden zugehörige Linsenmodelle dahingehend generalisiert, dass sie auf Basis der im Sensorkoordinatensystem gegebenen nominalen Abtastrichtung  $\underline{d}$ , eine entsprechend verzerrte Abtastrichtung  $\underline{d}_d$  berechnen (vgl. Abbildung 4 links).

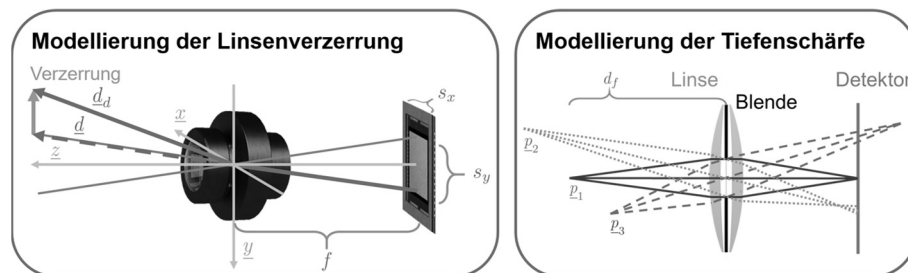


Abbildung 4: Modellierung der Linsenverzerrung (links) und Tiefenschärfe (rechts).

Grundlage hierfür bilden die Modelle von Brown-Conrady (1971) und Kannala (2006), die im Falle der Kamera, die Parameter des reinen Lochkamera-Modells (d. h. Brennweite  $f$  und Detektormaße  $s_x, s_y$ ) entsprechend erweitern. Dabei ist Kannala nicht auf eine Bildebene limitiert, sondern erlaubt die Modellierung von Verzerrungen, die zu einem Sichtfeld von mehr als 180 Grad führen und insbesondere für die Simulation von Weitwinkellinsen benötigt werden. Die hierzu benötigten intrinsischen Parameter lassen sich entweder dem Sensor-Design (der Spezifikation) entnehmen und/oder mittels realer Referenzexperimente bestimmen – entsprechende Kalibrierungsprozeduren liefern die zuvor referenzierten Quellen.

#### 4.2 Tiefenschärfe und Bewegungsunschärfe

Die eigentliche Funktion der Linse ist die Bündelung/Fokussierung von eingehenden Informationsträgern (z. B. Licht) auf einzelne Bereiche des Detektors. Dies erfordert eine endlich große Blendenöffnung, die den Eintritt einer messbaren Menge dieser erlaubt und bei der Abbildung von Objektpunkten der Szene zu mehreren möglichen Wegen durch das Linsensystem führt (vgl. Abbildung 4 rechts).

Um den hierdurch entstehenden Effekte der Tiefenschärfe zu modellieren, wird die Größe der Blendenöffnung sowie die Fokusdistanz  $d_f$  der Linse (Distanz zu dem im

Fokus liegenden Raumpunkt; hier  $p_1$ ) für ein parametrisches Modell verwendet. Dieses manipuliert die (verzerrte) Abtastrichtung  $\underline{d}_d$  dahingehend, dass der Ursprung des gedachten Strahls gleichverteilt innerhalb der Blendenöffnung verschoben und im Anschluss erneut auf den Fokuspunkt (definiert durch die Fokusbildung  $d_f$  entlang der ursprünglichen Abtastrichtung  $\underline{d}_d$ ) ausgerichtet wird. Durch Mittelung über mehrere Iterationen wird so die Flächenintegration approximiert und die Entstehung der Tiefenschärfe realitätsnah simuliert. Durch Berücksichtigung des Linsengehäuses als Teil der Szene wird hierbei zugleich die Vignettierung simuliert, die aus der zu den Rändern hin zunehmenden Verschattung des Detektors resultiert.

Ähnlich zur Tiefenschärfe ist die Bewegungsunschärfe. Zur Simulation dieser findet während eines Simulationsschritts, analog zur räumlichen Unterabtastung der Blendenöffnung, eine zeitliche Unterabtastung der Detektor-Integrationszeit statt. Dadurch führen auch in der Simulation schnelle Bewegungen zwischen Sensor und Umfeld, zu einer realitätsnah „verschmierten“ Abbildung eines Objekts auf mehrere Bereiche des Detektors (z. B. Kamerapixel).

### 4.3 Linsenverschmutzung

Schlussendlich ist auch die Simulation der Linsenverschmutzung relevant, um die Robustheit des Systems für durch Staub belastete Einsatzumgebungen zu validieren. Die Simulation erfolgt hier sehr ähnlich zu der einer Oberflächenverschmutzung – modelliert als Material. Diesmal kommt jedoch der Transmission des Materials (Schmutz auf Linsenoberfläche) eine besondere Bedeutung zu. Verschmutzungen der Linse äußern sich vor allem durch ein verschwommenes Abbild der Szene und durch weiche Kante der Verschmutzung selbst (vgl. Abbildung 5 oben rechts).

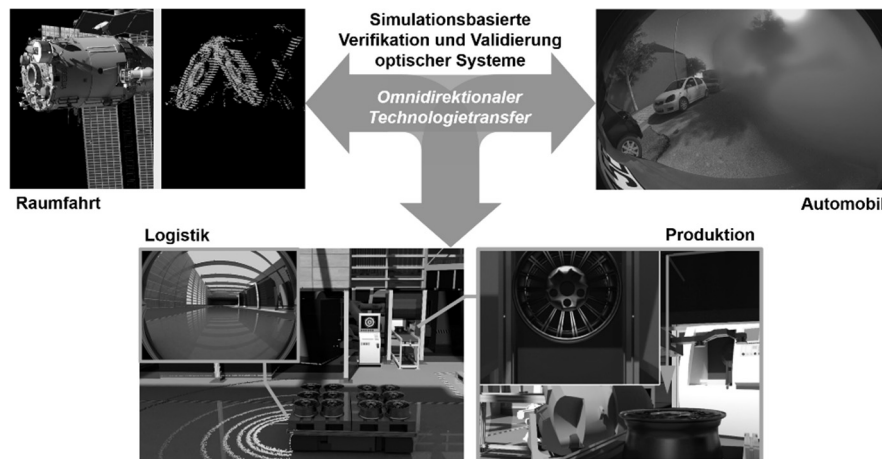
Während sich Erstere durch gewichtete Schichten von diffuser und glänzender Transmission in Form einer entsprechenden BSDF modellieren lassen (vgl. Abbildung 3), ist Letztere implizit durch die oben eingeführte Tiefenschärfe im Ergebnisbild enthalten. Das heißt, obgleich die Verschmutzung mit scharfer Kontur modelliert wird, ist deren Wahrnehmung vom Detektor durch die Tiefenschärfe entsprechend verschwommen.

## 5 Anwendungen

Durch die oben präsentierten Konzepte und Modelle zur skalierbaren, physikalischen Sensorsimulation eröffnen sich sensortypen- und anwendungsübergreifende Einsatzmöglichkeiten, die einen omnidirektionalen Technologietransfer erlauben. Im Fokus steht hier die simulationsbasierte Verifikation und Validierung von optischen Systemen als integrierter Bestandteil des entstehenden Gesamtsystems inklusive des geplanten Einsatzumfelds (vgl. Abbildung 5).

So zeigt Abbildung 5 die Ergebnisse der physikalischen Sensorsimulation für die simulationsbasierte Verifikation und Validierung einer Lidar-basierten Lageregelung beim Anflug an die Internationale Raumstation (ISS) mit der aufgrund der Bewegung verzogenen Lidar-Punktwolke (oben links) und einer Verschmutzungsdetektion für Kamera-basierte Fahrerassistenzsysteme (oben rechts). Schlussendlich liefert Abbildung 5 (unten) entsprechende Ergebnisse, die die aus der Raumfahrt stammenden und zur Absicherung von Fahrerassistenzsystemen transferierten Sensormodelle nun auch für die Produktion und Logistik präsentieren.





**Abbildung 5:** Verifikation und Validierung optischer Systeme und omnidirektionaler Technologietransfer zwischen den unterschiedlichen Anwendungsbereichen.

Dazu zeigt Abbildung 5 (unten rechts) ein simuliertes Inline-Prüfsystem (IPS), welches mittels Kamera etwaige Produktionsfehler mit Blick auf die Maßhaltigkeit der produzierten Felge prüft (simuliertes Kamerabild visualisiert als Bild im Bild). Die Simulation bietet hier die Möglichkeit unterschiedliche Hard- und Software-Konfigurationen (z. B. Sichtfeld und Verzerrung des Linsensystems, Auflösung und Integrationszeit des Detektors, Bildverarbeitungsalgorithmen und Neuronale Netze) systematisch zu evaluieren und schließlich das entstehende Gesamtsystem hinsichtlich Prüfmittelfähigkeit effizient und umfangreich zu validieren.

Ähnliches gilt für die simulationsbasierte Validierung des unten links abgebildeten Fahrerlosen Transportsystems (FTS), welches basierend auf den Sensordaten einer Weitwinkelkamera (visualisiert als Bild im Bild) und eines Multi-Layer Lidar-Sensors (visualisiert als farblich codierte 3D-Punktwolke) durch Produktionshallen navigiert und sich dabei an das dynamische Umfeld adaptiert (d. h. Hindernisse detektiert und umfährt). Hier erlaubt die Simulation eine effiziente Variation verschiedenster Szenarien (bestehend aus statischen und dynamischen Hindernissen), um eine funktionale Absicherung des entstehenden Gesamtsystems zu realisieren und so dessen Sicherheit im späteren Einsatz durch eine hohe Testabdeckung zu garantieren.

In allen Anwendungsfällen erlaubt die Simulation eine effiziente und systematische Verifikation und Validierung des entstehenden Gesamtsystems durch zielgerichtete Variation der System-Konfiguration und/oder des System-Umfelds. Die zur Beurteilung herangezogenen Metriken richten sich dabei stets nach der Funktion des betrachteten Systems (z. B. Genauigkeit des IPS und Kollisionsfreiheit des FTS). Unter Nutzung der durch die Simulationsdatenbank verfügbaren Ground-Truth Informationen (wie Geometrieformen, Materialeigenschaften und Geschwindigkeiten der Objekte) lässt sich ein jeweils passendes Fehlermaß berechnen, welches eine quantitative Beurteilung des Systemverhaltens erlaubt und so einen wesentlichen Mehrwert zu den sonst üblichen Tests in der realen Welt bietet.

Alle abgebildeten Anwendungen wurden gemäß der Dreiachsigen Skalierbarkeit durch wiederverwendbare Basiselemente in der gleichen Simulationsumgebung

realisiert und dazu alle oben skizzierten physikalischen Effekte modelliert. Zur Beurteilung und Sicherstellung einer akzeptablen Simulationsqualität/Realitätsnähe ist eine kontinuierliche Validierung der (Sensor-) Simulation selbst unerlässlich. Da die Anforderungen an die Simulationstiefe und der von ihr abgebildeten physikalischen Effekte stark von der betrachteten Anwendung (d. h. dem realen System) abhängt, bietet sich hier die in (Thieling und Roßmann 2021) vorgestellte Methodik an. Um ein angemessenes Verhältnis von Rechenzeit und Nutzen zu erzielen, werden Simulationskomponenten dabei so ausgelegt, dass diese so detailliert wie nötig, aber so trivial wie möglich sind. Zur Bestimmung der „richtigen“ Simulationstiefe liefert der zuvor referenzierte Beitrag ein geeignetes Verfahren.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir eine skalierbare, physikalische Sensorsimulation vorgestellt, die eine effiziente, simulationsbasierte Verifikation und Validierung optischer Systeme in ihrem geplanten Einsatzumfeld erlaubt. Dazu wurden sensortypen- und anwendungsübergreifende Konzepte und Modelle vorgestellt, die die Erzeugung belastbarer, physikalischer Simulationsergebnisse erlauben.

Diese adressieren sowohl die extrinsischen Einflüsse einer Sensor-Umfeld Interaktion einschließlich Mehrwegeausbreitung, materialspezifischer Streuung und dynamischer Abläufe, als auch die intrinsischen Einflüsse des Sensorsystems mit der behandelten Linsenverzerrung, Tiefenschärfe und Bewegungsunschärfe. Auch wurde die Modellierung und Simulation oberflächlicher Verschmutzungen der Objekte und des Linsensystems (abgebildet als Materialien) präsentiert, die zur Simulation von Imperfektionen eines realen Einsatzumfeldes dienen.

Schlussendlich erlauben die hier vorgestellten wiederverwendbaren Basiselemente eine flexible und modulare Modellierung zur Erzeugung der einleitend vorgestellten Digitalen Zwillinge in Hybriden Testbeds und ermöglichen so den nahtlosen Transfer von einem ersten digitalen Prototyp zum finalen realen System – wie in (Thieling und Roßmann 2020) vorgestellt wurde.

## Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Projektes ViTOS-II, gefördert vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Förderkennzeichen 50 RA 1810.

## Literatur

- Brown, D. C.: Close-range camera calibration. In: Photogrammetric Engineering Vol. 37, No. 8, 1971, S. 855–866.
- Carpin, S.; Lewis, M.; Wang, S.; Balakirsky, S.; Scrapper, C.: USARSim – a robot simulator for research and education. In: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, April 2002, S. 1400-1405.
- Crytek: CRYENGINE. <https://www.cryengine.com/>, letzter Zugriff: 08.04.2021.
- Cyberbotics: Webots. <https://www.cyberbotics.com/>, letzter Zugriff: 08.04.2021.

- Douchin, N.; Latger, J.; Cathala, T.; Marechal, R.: Simulating complex environments for the assessment of millimeter waves sensors. In: 2016 European Radar Conference (EuRAD), 2016, S. 13-16.
- Elmadawi, K.; Abdelrazek, M.; Elsobky, M.; Eraqi, H. M.; Zahran, M.: End-to-end sensor modeling for LiDAR Point Cloud. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, Oktober 2019, S. 1619-1624.
- Epic: Unreal Engine. <https://www.unrealengine.com/>, letzter Zugriff: 08.04.2021.
- Hanke, T.; Hirsenkorn, N.; Dehlink, B.; Rauch, A.; Rasshofer, R.; Biebl, E.: Generic architecture for simulation of ADAS sensors. In: 2015 16th International Radar Symposium (IRS), 2015, S. 125-130.
- Hirsenkorn, N.; Subkowski, P.; Hanke, T.; Schaermann, A.; Rauch, A.; Rasshofer, R.; Biebl, E.: A ray launching approach for modeling an FMCW radar system. In: 2017 18th International Radar Symposium (IRS), 2017, S. 1-10.
- Kannala, J.; Brandt, S.: A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 28, No. 8, August 2006, S. 1335–1340.
- Kolchaev, D. A.; Muratov, Y. R.; Nikiforov, M. B.; Orlov, S. V.: Real-time laser range-finder operation modeling. In: 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), IEEE, Juni 2017, S. 1-4.
- Liu, D.: Ray-Tracing Based Interactive Camera Simulation. In: MVA2013 IAPR International Conference on Machine Vision Applications, 2013, S. 383-386.
- Mohammadikaji, M.; Bergmann, S.; Beyerer, J.; Burke, J.; Dachsbacher, C.: Sensor-Realistic Simulations for Evaluation and Planning of Optical Measurement Systems with an Application to Laser Triangulation. In: IEEE Sensors Journal, Vol. 20, No. 10, Mai 2020, S. 5336-6349.
- Open Source Robotics Foundation: Gazebo – Robot Simulation. <http://gazebosim.org/>, letzter Zugriff 08.04.2021.
- Stolz, M.; Nestlinger, G.: Fast generic sensor models for testing highly automated vehicles in simulation. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 135, No. 4-5, August 2018, S. 365-369.
- Thieling, J.; Roßmann, J.: Scalable Sensor Models and Simulation Methods for Seamless Transitions within System Development: From First Digital Prototype to Final Real System. In: IEEE Systems Journal, 2020, S. 1-10.
- Thieling, J.; Roßmann, J.: Modulare Validierung simulierter Sensorsysteme für interagierende Digitale Zwillinge. In: Making Connected Mobility Work. Springer, 2021, S. 223-240.
- Unity: 3D development. <https://www.unity3d.com/>, letzter Zugriff: 08.04.2021.
- Velazquez, J. M. R.; Mailly, F.; Nouet, P.: A generic model for sensor simulation at system level. In: 2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP), 2018, S. 1-4.