

# Simulationsbasiertes Testen als Teil des Planung- und Betriebsprozesses autonomer Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr

*Lennart Asbach, Michael Ortgiese*

## **Autonome Systeme im öffentlichen Verkehr**

Aus der Automatisierung von Mobilitätssystemen auf der Straße und der Schiene ergeben sich neue Potenziale zur Weiterentwicklung der Struktur der zur Verfügung stehenden Beförderungsdienstleistungen. Die aktuelle Diskussion umfasst hierbei in der Regel drei Dimensionen: (1) die Automatisierung der Fahrzeuge, (2) die verstärkte Nutzung von bedarfsgesteuerten Angeboten und (3) den Einsatz neuer Fahrzeugkonzepte. Neue Angebote können, müssen aber nicht zwangsläufig die drei genannten Dimensionen gleichzeitig adressieren. Bei der Implementierung autonomer Angebote im öffentlichen Verkehr sollte beachtet werden, dass bekannte Projekte bislang nur den Einsatz von Forschungs- und Entwicklungsfahrzeugen auf einem sehr kleinen, speziell für die Projektsituation ausgewählten Streckenabschnitt zeigten.

Ein zukünftiger umfassender Einsatz autonomer Fahrzeuge erfordert Werkzeuge, die

- im Rahmen einer Vorplanung die Prüfung ermöglichen, welche Angebote des ÖV (von Linien- bis zu Bedarfsverkehren) autonom betrieben werden können.
- aufbauend auf der Vorplanung und den Fähigkeiten der Fahrzeuge, als Ergebnis eines Ausschreibungsprozesses zum Einsatz kommen, um die Genehmigung eines Betriebsbereichs zu unterstützen. Im Zuge der Genehmigung können spezielle Anforderungen an die Ausstattung des Betriebsbereichs gestellt werden, wie beispielsweise bauliche Maßnahmen oder die Vernetzung der Fahrzeuge mit der verkehrstechnischen Infrastruktur. Diese verkehrstechnische Infrastruktur wiederum kann auf die Absicherung einer autonomen Fahrt ausgelegt werden.
- im Betrieb ein aktives und integriertes Management von Fahrzeug und Betriebsbereich ermöglichen, sodass sich das Fahrzeug möglichst selten in den gesetzlich geforderten sicheren Zustand versetzt und ein Eingreifen der Technischen Aufsicht erforderlich macht.
- eine einfache Prüfung von neuer Software für die Fahrzeuge oder Infrastrukturkomponenten durchführen kann, um kurze Updatezyklen mit potenziellen Leistungssteigerungen im Betrieb umsetzen zu können.

## **Was ist neu?**

Die Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (AFGBV) trennt zwischen der Erteilung einer Betriebserlaubnis für autonome Fahrzeuge und der Genehmigung eines Betriebsbereichs, auf dem ein bestimmter Fahrzeugtyp verkehren darf. Beide Schritte werden in der Zulassung der Fahrzeuge zusammengeführt. Die Zulassung setzt das Bestehen einer Kfz-Haftpflichtversicherung voraus. Dieses Vorgehen entspricht dem heutigen Prozess bei konventionellen Fahrzeugen, die beim Vorliegen einer

Betriebserlaubnis eine Zulassung erhalten können. Neu ist die Genehmigung des Betriebsbereichs, die bei konventionellen Fahrzeugen in dieser Form nicht erforderlich ist. Diese Trennung scheint folgerichtig, wurde bislang jedoch bei den Diskussionen um die Validierung der Systeme von autonomen Fahrzeugen nicht konsequent bedacht. Die betrachteten Ansätze gingen vielmehr von einer gewissen Einheit von Fahrzeugeigenschaften und Eigenschaften des Betriebsbereichs aus. Diese Trennung ist aber eine unabdingbare Voraussetzung für einen offenen Beschaffungsprozess und somit für eine umfassende Einführung von autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr. Es stellen sich aber in der Konsequenz auch Fragen:

- Wie werden die Operational Design Domains (ODDs) ausgewählt, auf denen die Zulassung beruht?
- Wie können die technischen Fähigkeiten des Fahrzeugs unter Zuhilfenahme der ODDs im Rahmen des Prozesses der Betriebserlaubniserteilung beschrieben werden?
- Wie kann eine Angebotsplanung auf der Grundlage eines relativ abstrakten Wissens über die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeuges erfolgen?
- Wie kann ein Ausschreibungsprozess herstelleroffen durchgeführt werden?
- Wie kann der Prozess der Genehmigung von Betriebsbereichen für ein umfängliches Angebotsnetz erfolgen?
- Wie können Erfahrungen aus dem Betrieb in die Auswahl der ODD zur Erteilung der Betriebserlaubnis einfließen?

In der Fachwelt besteht weitgehende Einigkeit darüber, dass diese umfangreichen Fragestellungen größtenteils und effizient durch simulationsbasierte Ansätze beantwortet werden können. Reale Versuche sind nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Sie können jedoch zur Validierung von Simulationsmodellen eingesetzt werden.

### **Simulationsbasiertes Zertifizieren**

Für die Unterstützung der genannten Aufgaben können simulationsbasierte Verfahren eingesetzt werden, deren Effizienz insbesondere mit steigender Anzahl von autonomen Fahrzeugen auf den jeweiligen Betriebsbereichen steigt. Eine entsprechende Werkzeugkette liegt beispielsweise mit dem OSTAR Framework<sup>1</sup> des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vor. Die Simulation berücksichtigt sowohl die Fahrzeugeigenschaften mit der jeweils verbauten Hard- und Software sowie die Infrastruktureigenschaften. Die Kalibrierung, insbesondere der Sensormodelle der Fahrzeuge, erfolgt über hochdetaillierte Messungen, wie sie beispielsweise das Testfeld Niedersachsen ermöglicht.

Die Simulation basiert auf dem Aufbau eines digitalen Stadt- und Verkehrsmodells, das den gewünschten Betriebsbereich möglichst detailgetreu abbildet. Dies beinhaltet beispielsweise die geometrischen Eigenschaften sowie ein Verkehrs- und Wettermodell. Diese Eigenschaften können je nach Fragestellung variieren, um eine unnötige Komplexität des Modells zu vermeiden. Für den Aufbau sind, soweit wie möglich,

---

<sup>1</sup> <https://github.com/DLR-TS/OSTAR-Quickstart>

vorhandene Daten der Städte zu integrieren, beispielsweise hochgenaue Karten, 3D-Modelle, Katasterdaten. Dabei kann es sich sowohl um die Beschreibung des Bestands als auch um Planungsdaten handeln. Letztere sind insbesondere dann von Bedeutung, wenn Straßenräume umgestaltet und gleichzeitig auf den Einsatz von autonomen Fahrzeugen vorbereitet werden sollen.

Neben Testspezifikationen, Szenariendatenbanken und Berichtsgeneratoren stellt die Simulation dabei einen Baustein in einer Werkzeugkette dar. Für jede der zuvor genannten Fragen bietet die Werkzeugkette eine geeignete Simulationssoftware. Vor der eigentlichen Simulation müssen Anfangs- und Randbedingungen formal beschrieben und der Simulation zur Verfügung gestellt werden. Dabei benötigen die unterschiedlichen Simulationen durchaus ähnliche Eingangsdaten. Standardisierte Formate und Schnittstellen innerhalb der Werkzeugkette sind folglich von besonderer Bedeutung.

Je nach geplanter Verwendung der Simulationsergebnisse ist eine Validierung der beteiligten Module der Werkzeugkette notwendig. Insbesondere im Hinblick auf eine simulationsbasierte Zertifizierung, durch die Feld- und Prüfgeländetests zukünftig möglichst weniger notwendig sind, müssen Simulationen mit großer Sorgfalt durchgeführt werden, um belastbare und vertrauenswürdige Ergebnisse zu liefern.

Abbildung 1: Vergleich der Simulation mittlerer Detaillierung mit realer Situation auf Visualisierungsebene



### **Modellvalidierung mit Testfeldern**

Eine fundamentale Eigenschaft der vorgestellten Werkzeugkette ist die Validität ihrer Modelle. Während die verwendeten Modelle für erste Abschätzungen auch mit einfachen Kalibrierungen bereits nützliche Ergebnisse produzieren, müssen insbesondere für komplexere Fragestellungen rund um die Genehmigung besonders belastbare Ergebnisse erzielt werden. Dafür müssen die Modelle umfangreich validiert werden.

Ein wesentlicher Teil der Validierung ist dabei der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Realdaten, die beispielsweise über Testfelder erzeugt werden können. Die Daten können unter allen Wetter- und Lichtbedingungen erfasst werden; wichtig ist dabei jedoch deren von Tageszeit, Wetter und Lichtverhältnissen unabhängige Analyse. Für die Validierung wird ein Fahrzeug mit einem spezifischen Sensorsetup ausgerüstet und in der Regel ohne Automatisierung über das Testfeld bewegt. Die Testfahrten werden unter möglichst wechselnden Bedingungen durchgeführt, um entsprechend breite Messdaten zu erzeugen. Anschließend werden die Messfahrten in Form von verketteten Szenarien mit hoher Präzision in der Simulation nachgebildet. Dies beinhaltet sowohl die statischen Bedingungen wie Fahrbahn und sonstige Infrastruktur, als auch die dynamischen Parameter wie Licht, Wetter und die exakten Trajektorien des umgebenden Verkehrs. Mit dem Vergleich dieser Messwerte kann eine

grundlegende Validierung der jeweiligen Modelle, beispielsweise Sensoren oder Verkehr, durchgeführt werden. Diese Messungen sind auf vergleichbare Betriebsbereiche übertragbar. Sind Ausschnitte eines geplanten Betriebsbereichs nicht mit dem Testfeld vergleichbar, so müssen weitere Stichproben durch mobile Messstationen aufgenommen werden.

### **Simulationsbasiertes Testen in Planungs- und Betriebsprozessen des ÖV**

Im Rahmen der Gesamtheit der Planungs- und Betriebsprozesse im ÖV ist der zuvor beschriebene methodische Ansatz des simulationsbasierten Testens mehrmals zu durchlaufen. Die Einbindung der Werkzeugkette unterscheidet sich zwischen den Prozessschritten insbesondere durch die Untersuchungstiefe und die verfügbaren Sensor- und Fahrzeugmodelle. Die zu durchlaufenden Prozessschritte sind:

- Die Angebotsplanung, die das gesamte ÖV-Angebot festlegt. Hier kann eine erste Prüfung erfolgen, welche der Angebote perspektivisch autonom erbracht werden können.
- Der Ausschreibungsprozess, der für die Beschaffung von Fahrzeugen für die geplanten Angebote erforderlich ist, die zukünftig autonom betrieben werden.
- Die Genehmigung der Betriebsbereiche, auf denen die Fahrzeuge entsprechend der Angebotsplanung verkehren.
- Das Management der Betriebsbereiche, das auf kurzfristige und zumeist temporäre Veränderungen des Betriebsbereichs reagiert.
- Das Monitoring von Fahrzeugen und Betriebsbereichen.

### **Angebotsplanung, Ausstattung der Infrastruktur und Business Case**

Im Zuge der Angebotsplanung (Mobilitätsentwicklungspläne, Nahverkehrspläne, operative Fahr- und Dienstplanung der Verkehrsbetriebe) wird in Zukunft die Frage zu beantworten sein, welche Angebote mit autonomen Fahrzeugen erbracht werden können. Für die nachfolgenden Überlegungen wird davon ausgegangen, dass eine Bedarfsanalyse bereits vorliegt und die Auswirkungen unterschiedlicher Bedienformen des Angebots bereits untersucht wurden. Die benötigte Transportleistung wird folglich als Ausgangsgröße der Überlegungen genutzt. Basierend auf den möglicherweise bereits vorhandenen Straßennetzdaten können Einflüsse der Automatisierung mittels Simulation ermittelt werden. Dabei kann mit relativ geringer Detailtiefe der Eingangsdaten (Straßennetz beispielsweise auf Basis von Openstreetmap) und einem belastbaren mikroskopischen Verkehrsmodell für die jeweilige Umgebung bereits eine Analyse der Rückwirkungen auf den nicht-autonomen Verkehr durchgeführt werden. Innerhalb der gleichen Simulation können ebenfalls bereits besonders anspruchsvolle Knoten ermittelt werden, um zu entscheiden, ob sich diese für den autonomen Verkehr eignen. Ermittelte Einschränkungen der Infrastruktur können dann detaillierter untersucht werden. Dazu wird ein 3D-Modell der Umgebung erzeugt, beispielsweise basierend auf digitalen Planungsdaten/BIM, und dem Straßennetzwerk hinzugefügt. In dem Modell können geometrische Einschränkungen der Infrastruktur ermittelt und mögliche Lösungsstrategien evaluiert werden. Dazu ist noch kein ausgewähltes Sensorsetup beziehungsweise Fahrzeug notwendig. Simulationen mit derart generisch erzeugten Fahrzeugen können bereits erste Anforderungen konkretisieren. Daraus resultiert der notwendige Aufwand für

Anpassungen in Verbindung mit den notwendigen Investitionen für die Inbetriebnahme eines autonomen Verkehrsangebots.

Damit ist die wesentliche Grundlage für die Abschätzung eines Geschäftsmodells für das Betreiben eines autonomen Betriebs geschaffen. Natürlich können dabei auch strategische Investitionen oder Risiken einbezogen werden. Die Simulationen liefern eine zwar grobe, aber dennoch stichhaltige Grundlage für eine Kostenschätzung, wie beispielsweise notwendige Infrastrukturinvestitionen, Fahrzeugfunktionalitäten und potenzielle Betriebsbereiche.

### **Ausschreibungsprozess**

Auch die technischen Anforderungen der Ausschreibung können auf der Grundlage des simulationsbasierten Testens und der sich hieraus ergebenden Erkenntnisse spezifiziert werden. Im Ausschreibungsprozess muss demzufolge aber auch festgelegt werden, wie technische Fähigkeiten der autonomen Fahrzeuge bei der Bewertung der Angebote analysiert werden können. Auch hier bietet das simulationsbasierte Testen eine entsprechende Grundlage.

Vorausgesetzt, es werden keine Entwicklungen für spezielle Betriebsumgebungen innerhalb der Ausschreibung gefordert, sondern das optimale Standardfahrzeug für eben jene Betriebsumgebung gesucht, dann können Interoperabilitätstests zwischen Fahrzeug und Strecke bereits als Teil des Wettbewerbs von einer möglichst unabhängigen Stelle durchgeführt werden.

Dabei helfen konfigurierbare Sensormodelle oder vom Anbieter mitgelieferte Modelle seines Setups, bestehend aus Fahrzeug und Sensorik. Standardisierte Schnittstellen, beispielsweise die bewährten ASAM-Standards, sorgen dabei für eine möglichst einfache Integration in die Laborumgebung.

Sollte der Ausschreibungsprozess auf bestimmte Teile der Angebotsplanung fokussiert sein, so kann das Umgebungs- und Verkehrsmodell bereits in diesem Schritt detailliert werden. Je nach Anforderung der jeweiligen Ausschreibung kann alternativ auch mit einem Modell gearbeitet werden, das eine größere räumliche Ausdehnung und dafür einen geringeren Detailgrad besitzt.

### **Genehmigung der Betriebsbereiche**

Die höchste Detaillierungsstufe der Simulation kann für die Genehmigung von Betriebsbereichen genutzt werden. Die Werkzeugkette simuliert, wie sich die Sensorstrahlen Licht, Schall und Radar im Straßenraum ausbreiten und dabei Informationen über den untersuchten Bereich sammeln. Dabei werden unterschiedliche Technologien wie Kameras, Lidar und Radar eingesetzt, um den Straßenraum zu beleuchten oder abzubilden. Im Falle des Einsatzes von Kameras erfolgt ein Rendering des erzeugten Bildes. Beim Einsatz von Lidar- und Radar-Technologien erfolgt diese Abbildung des Straßenraums über ein Raytracing. Raytracing meint dabei die rechnerische Nachverfolgung eines Strahls, beispielsweise Licht beziehungsweise einer Welle. Gibt es keinen Schnittpunkt zwischen Strahl und Objekt, ist das Objekt für den Sender des Strahls nicht sichtbar. Die Entwicklung von Videospiele übertrug das Raytracing in die digitale Welt, sodass hier mittlerweile umfangreiche und leistungsfähige

Programmpakete zur Verfügung stehen, die auch Wetter und Reflexionseigenschaften belastbar abbilden können.

Der so ermittelte Sensor-View wird einem Modell übermittelt, das die Umfelderkennung durch den eigentlich eingesetzten Sensor berechnet. Kam es bei dem zuvor beschriebenen Arbeitsschritt noch insbesondere auf die generellen Eigenschaften der eingesetzten Technologie an, die sich oftmals aus physikalischen Bedingungen ergeben, so kommen hier herstellerspezifische Stärken und Schwächen zum Tragen. Als Ergebnis liefert die Simulation eine Möglichkeit zur Bewertung von Sensordaten für das autonome Fahren, sodass Empfehlung für ein passendes Sensorset abgeleitet werden können.

Bei autonomen Fahrzeugen werden die Sensordaten für die Manöverplanung und somit für die Ermittlung der zu fahrenden Trajektorien, wie räumlicher Fahrtverlauf und Geschwindigkeitsprofil, genutzt. Die Manöverplanung ist herstellerspezifisch und repräsentiert beispielsweise Zielsetzungen in den Bereichen Komfort und Sicherheit. Allen Ansätzen ist jedoch gemein, dass in der Manöverplanung nur berücksichtigt werden kann, was über die Sichtfelder und die Dateninterpretation der Sensorik bereitgestellt wird.

Die Manöverplanung wird von der eigentlichen Steuerung des Fahrzeugs umgesetzt. Diese weist in der Regel ähnliche Eigenschaften und Komponenten auf, wie Fahrzeuge, die noch klassisch von Menschen gesteuert werden. Auch in heutigen Fahrzeugen erfolgt die Steuerung weitestgehend elektronisch, wodurch beispielsweise Versuchsfahrzeuge mit Automatisierungsfunktionen ausgerüstet werden können. Bei der Steuerung selbst können noch weitere Effekte berücksichtigt werden, die sich aus der Fahrdynamik ergeben.

Der so simulierte Fahrtverlauf eines Fahrzeugs kann wieder an die Simulation des Umfeldes und des Verkehrsflusses übergeben werden. Es entsteht ein Kreislauf, der auch die Charakteristik der eingesetzten Automatisierungsfunktionen berücksichtigt.

### **Schlussfolgerungen**

Mit Werkzeugketten wie beispielsweise dem OSTAR Framework ist die Simulation eines autonomen Verkehrs in unterschiedlichen Detaillierungsstufen möglich. Durch die Validierung der genutzten Modelle werden besonders realitätsnahe Ergebnisse erzielt, die für die Ausrollung von autonomem Verkehr in Europa eine entscheidende Rolle spielen können. Die Simulationsergebnisse können dabei den vollständigen Prozess zur Beschaffung eines autonomen Systems begleiten und nennenswert beschleunigen. Anbieter des Systems können im Rahmen des Ausschreibungsprozesses simulationsgestützt bewertet werden. Die Planung von Infrastruktur kann mit Blick auf autonome Systeme bewertet und optimiert werden und es kann ein Prüfbericht als Zuarbeit für den Genehmigungsprozess erstellt werden. Abschließend können Auswirkungen von Erkenntnissen aus dem laufenden Betrieb evaluiert werden. Damit bieten derartige Werkzeuge eine integrierte und transparente Analysemöglichkeit unterschiedlicher Aspekte, welche die Entwicklung eines autonomen Systems erfolgreich machen. Insbesondere im Kontext des ÖV und die damit verbundenen, zumeist eingegrenzten Betriebsbereiche erscheint die Anwendung einer auf Simulationen basierenden Werkzeugkette zielführend.