



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Optimierung des Entwicklungsprozesses von Scheinwerfersystemen durch mechanische Nachbildung der Fahrdynamik

Optimization of the development process of headlamp systems by mechanical reproduction of vehicle dynamics

Mirko Waldner, M.Sc., TU Dortmund, Institut für Roboterforschung, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik 44221 Dortmund, Deutschland, mirko.waldner@tu-dortmund.de

Maximilian Krämer, M.Sc., TU Dortmund, Institut für Roboterforschung, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik 44221 Dortmund, Deutschland, maximilian.kraemer@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, TU Dortmund, Institut für Roboterforschung, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik 44221 Dortmund, Deutschland, torsten.bertram@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Die Verifikation und Validierung von Matrix-Scheinwerfersystemen in nächtlichen Testfahrten ist mit großem Aufwand verbunden. Durch die vorgestellte Methode der nachgebildeten Testfahrt können Untersuchungen zum Einfluss der Fahrdynamik auf die Güte der Lichtverteilung zu jeder Zeit im Labor oder Lichtkanal durchgeführt werden. Dies optimiert den Entwicklungsprozess, da Fehler schneller und früher gefunden werden können. In diesem Beitrag werden die Komponenten des Testszenarios für die neue Methode vorgestellt und die neuen Möglichkeiten aufgezeigt. Im Gegensatz zur realen Testfahrt können auch künstliche Strecken mit dem realen Scheinwerfer getestet werden, wodurch reproduzierbare und vergleichbare Untersuchungen möglich sind. Außerdem wird die Steuerung der Mechanik zur Nachbildung ausgehend von einer Simulation vorgestellt und die Güte der Nachbildung durch einen Vergleich mit einer realen Testfahrt evaluiert.

Abstract

The verification and validation of matrix headlamp systems in night-time test drives involves a great deal of effort. The presented method of stationary test drives allows investigations on the influence of vehicle dynamics on the quality of light distribution to be carried out at any time in the laboratory or light channel. This optimizes the development process as errors can be found faster and earlier. In this contribution the components of the test scenario for the new method are presented and the new possibilities are shown. In contrast to real test drive, artificial tracks can also be tested with real headlamps, making reproducible and comparable investigations possible. In addition, the control strategy of the mechanical system is presented and evaluated.

1 Einleitung

Aktuelle Scheinwerfersysteme bestehen aus einer Vielzahl an Modulen und Lichtquellen, deren Lichtverteilungen in Superposition die Ausleuchtung des Vorfeldes des Egofahrzeuges ergeben. Lichtfunktion wie das blendfreie Fernlicht passen die Ausleuchtung adaptiv an die aktuelle Umfeldsituation an, indem die einzelnen Elemente der Lichtmatrix individuell gesteuert werden [1]. Damit können, wie in **Bild 1** gezeigt, andere Verkehrsteilnehmer selektiv ausgeblendet, der übrige Teil der Umgebung aber weiterhin mit Fernlicht beleuchtet werden. Dies vergrößert den ausgeleuchteten Bereich, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu behindern. Zur Realisierung dieser Lichtfunktion wird aus dem sensorisch erfassten Umfeld und der eigenen Fahrdynamik die optimale Ansteuerung der einzelnen Lichtmodule berechnet. Entwicklungsziele für derartige Lichtfunktionen sind eine vollständige Sicherstellung der Funktionalität und die Erzeugung einer „subjektiv quantitativ schönen“ Lichtverteilung, indem die einzelnen Module optimal zusammenarbeiten.

Der zukünftige Trend geht zu einer Erhöhung der Scheinwerferauflösung, der Anzahl der verwendeten Technologien und Module, um damit z.B. Symbole auf die Straße vor



Abbildung 1 Vergrößerung des Wahrnehmungsbereiches (der Fußgänger ist zu erkennen) durch blendfreies Fernlicht (unten) im Vergleich zu konventionellem Abblendlicht (oben) [2].

dem Egofahrzeug zu projizieren, was wiederum immer höhere Anforderungen an die Systementwickler stellt [3, 4]. Gleichzeitig zum geforderten Grad der Adaption an die aktuelle Verkehrssituation steigt auch die Anzahl von Designparametern und damit möglichen Fehlerquellen bei der Entwicklung. Dies erhöht die Dauer der benötigten Testfahrten, die nur bei entsprechenden Lichtverhältnissen und Witterungen durchgeführt werden können.

Der bisherige Entwicklungsablauf aus Simulation, Prototypenfertigung und Erprobung in realen Nachtfahrten wird um die Komponente der stationären Testfahrt erweitert. Der Ansatz ist hierbei, den Scheinwerfer im Lichtlabor nach simulierter oder gemessener Fahrdynamik dyna-

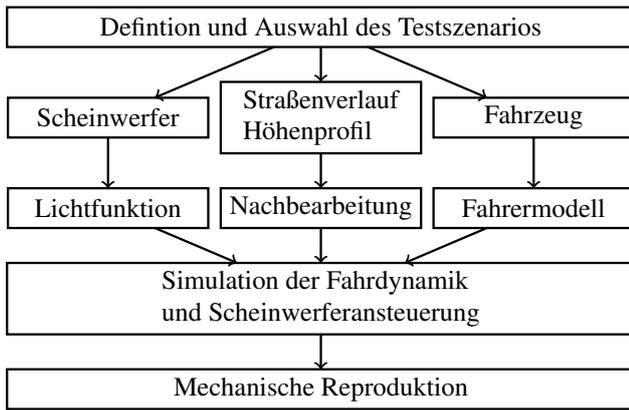


Abbildung 2 Ablauf der stationären Testfahrt

misch mechanisch zu positionieren und auszurichten. Es gibt Ansätze wie [5, 6], bei dem einzelne Zustandsgrößen der Fahrdynamik mechanisch nachgebildet werden und der Scheinwerfer aus einer Simulation heraus angesteuert wird. In [5] wird die Neigung der Karosserie zur Validierung der Leuchtweitenregulierung nachgestellt. Die Ausrichtung des Scheinwerfers wird in [6] über die Messung der Lage des Schrittmotors des Kurvenlichtes erfasst, das Scheinwerfersystem wird aber selber nicht bewegt. Dieser Ansatz ist durch digitales Kurvenlicht und Leuchtweitenregulierung bereits veraltet, da die Lichtverteilung digital bewegt wird. Durch die Verwendung einer mechanischen Aktuierung mit allen Freiheitsgraden der Karosserie lassen sich als technische Neuerung alle relevanten Zustandsgrößen der Fahrdynamik nachbilden und die Veränderungen der Lichtverteilung visuell bewerten.

Mit der Aktuierung sind Untersuchungen zum Einfluss der veränderten Ausrichtung der Scheinwerfer auf die Güte der Lichtverteilung zu jeder Zeit am realen Scheinwerfer möglich, welcher dafür noch keine Straßenzulassung oder -tauglichkeit haben muss. Prototypen können damit in einem frühen Stadium der Entwicklung real getestet werden, um damit Designfehler schneller finden zu können. Durch die Verwendung einer Simulation als Quelle der Fahrdynamik ist eine Parametervariation im Testszenario möglich, die über eine Veränderung der Signale, wie z.B. andere Objekte im Lichtkegel, an das Scheinwerfersteuergerät hinausgeht. Dies ermöglicht eine Untersuchung von Szenarien, die sich in der Realität nur mit großem Aufwand erzeugen lassen. Die Methode verlängert außerdem die gefahrene Testdistanz und ermöglicht die gezielte Reproduktion und Analyse kritischer Szenarien.

Der Ablauf der Methode bestehend aus Auswahl des Testszenarios, Simulation aller Komponenten und abschließender mechanischer Reproduktion ist in **Bild 2** gezeigt und wird in diesem Beitrag erläutert. In Abschnitt 2 werden die wesentlichen Komponenten eines Testszenarios für hochauflösende Matrixscheinwerfer vorgestellt und welche Komponenten sich mit der vorgestellten Methode abbilden bzw. untersuchen lassen. In Abschnitt 3 wird der Aufbau und die Regelung der Mechanik erläutert und abschließend die Methode in Abschnitt 4 im Vergleich zu einer realen Testfahrt evaluiert.

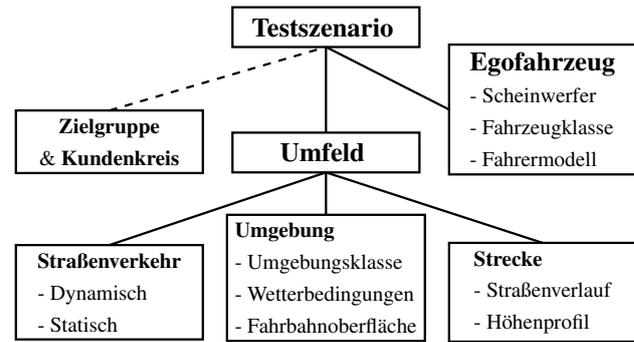


Abbildung 3 Bestandteile eines Testszenarios.

2 Auswahl des Testszenarios

Um Verifikationen und Validierungen mit einer stationären Testfahrt durchführen zu können, werden im ersten Schritt die Komponenten des Testszenarios definiert. Ein Testszenario für Matrixscheinwerfer besteht aus zwei Hauptkomponenten, die zum einen die Parameter des Egofahrzeuges und zum anderen die Definition des Umfeldes umfassen. Die Struktur eines Szenarios ist eine Erweiterung von [1, 7] auf die neuen Möglichkeiten und als Gesamtübersicht in **Bild 3** abgebildet. Der Kundenkreis ist der Vollständigkeit halber aufgeführt, er wird in diesem Beitrag aber nicht näher behandelt.

Die Mechanik zur Nachbildung von Testfahrten kann sowohl nach aufgezeichneten Daten von realen Testfahrten als auch nach einer Simulation bewegt werden. Im ersten Fall ist die Nachbildung eine reine Reproduktion und der Großteil der Komponenten des Szenarios ist nach der Durchführung der realen Testfahrt festgelegt. Beispielsweise bestimmt die Auswahl des Testfahrzeuges die Fahrzeugklasse und das Verhalten des Testfahrers das Fahrermodell. Die Verwendung einer Simulation ermöglicht eine umfangreiche Parametervariation, welche im Folgenden genauer erläutert wird.

2.1 Erstellung des Straßennetzwerkes

Das Umfeld des Egofahrzeuges setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen. Die Bestandteile sind alle zum Straßenverkehr gehörende Objekte, die Umgebung und Beschaffenheit der Strecke und der Streckenverlauf. In diesem Beitrag wird nur das Straßennetzwerk betrachtet, welches sich entweder aus realen Verläufen erstellen oder künstlich anwendungsorientiert erzeugen lässt. Streckenverläufe bestehen aus einem zweidimensionalen ebenen Straßenverlauf und einem Höhenprofil. Je nach Bezugsart liegen entweder beide Komponenten zusammen vor oder müssen aus verschiedenen Quellen zusammengesetzt werden.

Die erste Datenquelle sind Positionsmessungen während einer realen Testfahrt, die von im Egofahrzeug verbauter Sensorik ermittelt werden. Das verwendete Messsystem ist üblicherweise ein Global-Positioning-System (GPS), dessen Daten zur Erhöhung der Genauigkeit unter Auswertung der Messung anderer physikalischer Größen, wie z.B. Beschleunigung und Erdmagnetfeld, gefiltert werden. Der Standard-Filter für den online Betrieb ist ein Erweitertes Kalman-Filter (EKF), welches entsprechend der System-

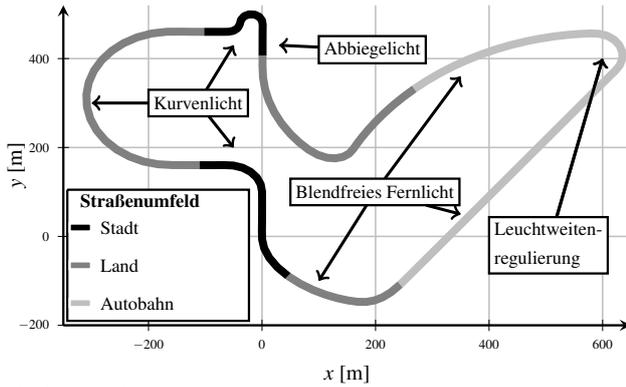


Abbildung 4 Synthetischer Testkurs zur Evaluation verschiedener Lichtfunktionen mit Umgebungsklassen nach [10, 11].

genauigkeit parametrisiert werden muss, um ein Messrauschen kompensieren zu können. Das Unscented Kalman-Filter (UKF) benötigt eine erhöhte Rechenzeit, berücksichtigt aber Nichtlinearitäten im Vergleich zum EKF direkt und eignet sich deswegen zur offline Verarbeitung [8]. Bei einer realen Testfahrt liegen alle Daten zur Streckenerstellung nach der Datenaufnahme vor, allerdings kann das Höhenprofil unbrauchbar sein, obwohl der Streckenverlauf genau genug ist. Unbrauchbarkeit bedeutet eine Treppenbildung der Steigungen, welche sich nicht durch nachträgliche Tiefpassfilter kompensieren lässt. In diesem Fall muss das Höhenprofil aus einer anderen Quellen bezogen werden.

Das Standardvorgehen bei der Erstellung von Strecken nach realem Vorbild ist zuerst eine dreidimensionale Höhenverteilung zu generieren und anschließend die Straßenverläufe auf diese Oberfläche zu mappen [9]. Dadurch können Datenbanken für die Straßenverläufe wie OpenStreet-Map verwendet werden, die Höhendaten nicht enthalten. Durch die Verwendung von künstlichen Streckenverläufen können Lichtfunktionen selektiv getestet und kritische Situationen gezielt nachgestellt werden. **Bild 4** zeigt einen beispielhaften künstlichen Rundkurs, der aus verschiedenen Testfällen besteht. Der Kurs besteht aus Kurven mit unterschiedlichen Radien, die zum Testen der Funktionalität von Kurvenlicht dienen. Die Strecke verfügt außerdem über mehrere Geraden, auf denen das Blendfreie Fernlicht bis in die maximale Reichweite abgesichert werden kann. Die Bremsvorgänge vor Kurven mit geringem Radius und die anschließenden Beschleunigungen ermöglichen einen Test der Leuchtweitenregulierung, da in einer solchen Situation die Karosserie stark nickt. Die Kurven mit kleinem Radius stellen auch Abbiegevorgänge nach, um damit die Auslösung von Abbiegelicht zu erproben. Der vorgestellte Kurs lässt sich innerhalb weniger Minuten durchfahren und dabei wird eine Vielzahl von Lichtfunktionen definiert getestet.

Auf dem Kurs können außerdem andere Verkehrsteilnehmer platziert werden, an welche dann die Lichtverteilung vom Steuergerät adaptiv angepasst werden kann [1]. Das Design der virtuellen Teststrecke ist in Abhängigkeit des Testfalls festzulegen und die Methode der nachgebildeten Testfahrt ermöglicht den Test realer Scheinwerfer ausgehend von virtuellen Szenarien.

2.2 Definition des Egofahrzeuges

Das Egofahrzeug besteht aus den Bereichen Scheinwerfer, Fahrzeug und Fahrer. Die Mechanik bildet den Verlauf der dreidimensionalen Trajektorien der Scheinwerferanbaupunkte an der Karosserie nach. Diese Verläufe liegen in der Regel nach einer Datenaufnahme während einer realen Testfahrt nicht vor, sondern müssen aus den Messdaten errechnet werden. Verfügt die Karosserie über Sensoren, welche die Ausrichtung bzw. die Drehbewegung der Karosserie messen, können die Trajektorien über eine Koordinatentransformationen ausgehend von dem Einbaupunkt des Sensors berechnet werden. Alle folgenden Koordinatensysteme sind Rechtssysteme mit der Z-Achse als positive Höhenangabe. Das Karosseriekordinatensystem \mathcal{K} , mit X-Achse positiv in Fahrtrichtung, ist an die Position des Fahrzeuges und die Bewegung der Karosserie gekoppelt, welche den Radstand l und die Spurweite e hat. Der Initialzustand des Ursprungs ist auf Höhe des Mittelpunktes der Reifen mit dem Radius r und fahrzeugfest. Mit Anbau- lage des Scheinwerfers $\mathbf{p}_H = (x_H \ y_H \ z_H)^T$ relativ zur Karosserieebene durch den Ursprung ergibt sich die Transformation aus \mathcal{K} ins Scheinwerferkoordinatensystem \mathcal{H} als Translation ${}_{\mathcal{K}}\mathbf{t}^H \in \mathbb{R}^3$:

$${}_{\mathcal{K}}\mathbf{t}^H = -\mathbf{p}_H. \quad (1)$$

Das Straßenkoordinatensystem \mathcal{R} bewegt sich mit dem Fahrzeug mit, sodass die Translation ${}_{\mathcal{R}}\mathbf{t}^K \in \mathbb{R}^3$ in X und Y immer 0 ist. Die Z-Komponente der Translation ist vom Hub h des Fahrzeuges abhängig. Der aktuelle Hub kann über eine Mittlung der Z-Komponente der relativen Auslenkung des Fahrwerks $\Delta \mathbf{h} \in \mathbb{R}^4$ zum Initialzustand $\mathbf{h}_0 \in \mathbb{R}^4$ aller vier Reifen vorne rechts (VR), vorne links (VL), hinten rechts (HR) und hinten links (HL) berechnet werden:

$${}_{\mathcal{R}}\mathbf{t}^K = -\left(0 \ 0 \ r + \frac{1}{4} \sum_{i \in \{\text{VR, VL, HR, HL}\}} \Delta h_i\right)^T. \quad (2)$$

Die Rotation ${}_{\mathcal{R}}\mathbf{R}^K(\theta, \phi, \psi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ist abhängig von der aktuellen Fahrdynamik. Der relative Nick- θ , Roll- ϕ und Gierwinkel ψ zwischen Karosserie und Fahrbahnoberfläche kann während einer Testfahrt direkt sensorisch gemessen oder aus der relativen Auslenkung $\Delta \mathbf{h}$ berechnet werden [12]:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2} \left(\text{atan} \left(\frac{\Delta h_{\text{HR}} - \Delta h_{\text{VR}}}{l} \right) + \text{atan} \left(\frac{\Delta h_{\text{HL}} - \Delta h_{\text{VL}}}{l} \right) \right), \\ \phi &= \frac{1}{2} \left(\text{atan} \left(\frac{\Delta h_{\text{VR}} - \Delta h_{\text{VL}}}{e} \right) + \text{atan} \left(\frac{\Delta h_{\text{HR}} - \Delta h_{\text{HL}}}{e} \right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Der Gierwinkel wird als $\psi = 0$ angenommen. Ist die Karosserie im Startzustand durch z.B. unsymmetrische Beladung geneigt, kann die Ursprungsneigung durch Auswertung der Messung der Erdbeschleunigung in allen drei Achsen des Beschleunigungssensors bestimmt werden und wird als Offset addiert. \mathbf{h}_0 muss vor der Testfahrt ebenfalls gemessen werden. Die Gleichungen 1, 2 und 3 ergeben die Transformation von \mathcal{R} nach \mathcal{H} als ${}_{\mathcal{R}}\mathbf{T}^H(\Delta \mathbf{h}) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, welche von der aktuellen Fahrdynamik abhängig ist.

Wenn in der verwendeten Simualtionsumgebung nur die absoluten Winkel zwischen Karosserie und ortsfestem

Weltkoordinatensystem vorliegen, müssen diese korrigiert werden, damit die Mechanik nicht die Steigung der Straße mit nachbildet. Aus den Kontaktpunkten $\mathbf{p}_{R,i} \in \mathbb{R}^3$ aller vier Reifen VR, VL, HR und HL mit der Fahrbahnoberfläche kann die Straßenausrichtung berechnet werden, indem die Straße unter dem Fahrzeug als Ebene angenommen wird. Die Nick- θ_R und Rollwinkel ϕ_R berechnen sich aus den Z-Komponenten z_i der Kontaktpunkte $\mathbf{p}_{R,i}$:

$$\begin{aligned}\theta_R &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{atan} \left(\frac{z_{HR} - z_{VR}}{l} \right) + \operatorname{atan} \left(\frac{z_{HL} - \Delta h_{VL}}{l} \right) \right), \\ \phi_R &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{atan} \left(\frac{z_{VR} - z_{VL}}{e} \right) + \operatorname{atan} \left(\frac{z_{HR} - z_{HL}}{e} \right) \right).\end{aligned}\quad (4)$$

und werden von den absoluten Winkeln zwischen Weltkoordinaten- und Karosseriekordinatensystem subtrahiert.

Die Fahrzeugparameter können entweder nach Fahrzeugmodellen oder Fahrzeugklassen festgelegt werden. Klassen zur Anwendung auf Scheinwerfersysteme werden über die Kriterien Vertikaldynamik und Geschwindigkeit ausgewählt.

Zur automatischen Steuerung des Egofahrzeuges können entweder PID-Regler oder optimale Regler wie [13, 14] verwendet werden. Den Reglern werden Geschwindigkeitsprofile vorgeben, um die entsprechenden Umgebungen mit realistischem Verhalten zu durchfahren. Die Sollgrößen für die Geschwindigkeiten können beispielsweise aus den Herleitungen von Abgastestzyklen in [11] entnommen werden, da die gleichen Umgebungsklassen wie für Adaptive Front Lighting System (AFS) [10] verwendet werden.

3 Mechanische Nachbildung der Fahrdynamik

Die mechanische Nachbildung der Scheinwerferbewegung erfolgt über ein Aktuatorssystem mit n nicht-redundanten Freiheitsgraden. Hierbei gilt $n \geq m$ für eine Anzahl m an benötigten Freiheitsgraden der zu untersuchenden Scheinwerferbewegung. Das Koordinatensystem \mathcal{W} bildet den Ursprung des Arbeitsraums und kann frei gewählt werden. Das Straßenkoordinatensystem \mathcal{R} wird über die Transformation ${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}^{\mathcal{R}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ relativ zum Arbeitsraum definiert. Auf diese Weise kann die Straßenlage und damit die Ausgangslage des Scheinwerfers verändert werden, wie es beispielsweise zur Anpassung an Laborgegebenheiten und Ausmaßen des Bewegungssystem notwendig sein kann. Ebenfalls relativ zum Arbeitsraum ist das Endeffektorkoordinatensystem \mathcal{E} über die direkte Kinematik ${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}^{\mathcal{E}}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ definiert. Hierbei beschreibt $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ den Vektor der generalisierten Gelenkkoordinaten $q_i \in \mathbb{R}$ für $i = 1, 2, \dots, n$. Relativ zum Endeffektorkoordinatensystem \mathcal{E} befindet sich das Scheinwerferkoordinatensystem \mathcal{H} , welches über die Transformation ${}_{\mathcal{E}}\mathbf{T}^{\mathcal{H}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ an die Ausmaße einer Haltevorrichtung angepasst wird.

Zur Nachbildung der Scheinwerferbewegung werden die benötigten generalisierten Geschwindigkeiten \dot{q}_i über den Inverse-Kinematik-Algorithmus von [15] berechnet. Der Algorithmus ermöglicht eine Folgeregelung von Trajekto-

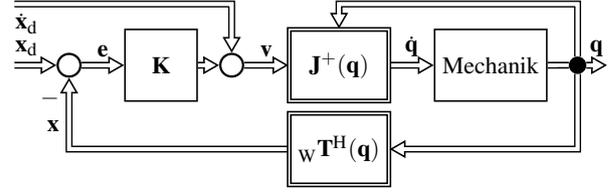


Abbildung 5 Strukturbild des Inverse-Kinematik-Algorithmus zur Folgeregelung von Arbeitsraumtrajektorien $\mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d$ auf Basis generalisierter Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$ [15].

rien im Arbeitsraum auf Basis der inversen differentiellen Kinematik:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+(\mathbf{q})\mathbf{v}. \quad (5)$$

Dabei beschreibt die Pseudo-Inverse der geometrischen Jacobimatrix $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$ für eine Konfiguration \mathbf{q} den linearen Zusammenhang zwischen $\dot{\mathbf{q}}$ und der zugehörigen Geschwindigkeit \mathbf{v} im Arbeitsraum. Die Zeitargumente werden aus Übersichtsgründen nicht explizit angegeben. Weiterführende Informationen zur inversen differentiellen Kinematik sind in [15] zu finden. **Bild 5** zeigt den strukturellen Aufbau der Regelung. Die Eingangsgröße ist die Soll-Trajektorie \mathbf{x}_d des Scheinwerfers:

$$\mathbf{x}_d = (\mathbf{p}_d \quad \mathbf{Q}_d)^T. \quad (6)$$

Hierbei beschreibt $\mathbf{p}_d \in \mathbb{R}^3$ die Position und das Einheitsquaternion $\mathbf{Q}_d \in \mathbb{R}^4$ die Orientierung. Die Soll-Trajektorie lässt sich über die Verkettung ${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}_d^{\mathcal{H}}(\Delta\mathbf{h})$ von Koordinatentransformationen ermitteln:

$${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}_d^{\mathcal{H}}(\Delta\mathbf{h}) = {}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}_{\mathcal{R}}^{\mathcal{R}} \mathbf{T}^{\mathcal{H}}(\Delta\mathbf{h}). \quad (7)$$

Die Transformation ${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}^{\mathcal{H}}(\mathbf{q})$ zur Berechnung der Ist-Trajektorie \mathbf{x} wird analog gebildet:

$${}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}^{\mathcal{H}}(\mathbf{q}) = {}_{\mathcal{W}}\mathbf{T}^{\mathcal{E}}(\mathbf{q}) {}_{\mathcal{E}}\mathbf{T}^{\mathcal{H}}(\Delta\mathbf{h}). \quad (8)$$

Während die Translation direkt übernommen werden kann, wird die Rotation von ihrer Darstellung als Rotationsmatrix in Einheitsquaternionen umgerechnet [15]. Zur Verbesserung der Folgeregelung wird eine Vorsteuerung der Scheinwerfergeschwindigkeit $\dot{\mathbf{x}}_d$ verwendet:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = (\dot{\mathbf{p}}_d \quad \omega_d)^T. \quad (9)$$

Die Geschwindigkeiten für Translation und Rotation werden dabei über jeweils einen Differenzenquotienten angenähert:

$$\dot{\mathbf{p}}_d \approx \frac{\mathbf{p}_d(t_k) - \mathbf{p}_d(t_{k-1})}{\Delta T} \quad \text{und} \quad \omega_d \approx \mathbf{r} \frac{\theta}{\Delta T}. \quad (10)$$

Hierbei entspricht (\mathbf{r}, θ) der Achse-Winkel Beschreibung der Differenzrotation $\Delta\mathbf{Q}_d(t_k)$:

$$\Delta\mathbf{Q}_d(t_k) = \mathbf{Q}_d(t_k) \star \mathbf{Q}_d^{-1}(t_{k-1}), \quad (11)$$

für $k = 1, 2, \dots$ und \star als dem Multiplikationsoperator für Quaternionen.

Die Regelabweichung \mathbf{e} wird für die Translation und Orientierung getrennt betrachtet:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_p \\ \mathbf{e}_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_d - \mathbf{p} \\ (\mathbf{Q}_d \star \mathbf{Q}^{-1})_{\mathcal{E}} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Über den Operator $(\cdot)_\varepsilon$ wird der vektorielle Teil des Quaternions extrahiert. Während über (5) und (9) mit $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{x}}_d$ bereits eine Steuerung der Scheinwerfergeschwindigkeit möglich ist, wird über die Interpretation der Regelabweichung als Arbeitsraumgeschwindigkeit ebenfalls eine Positionsregelung realisiert:

$$\mathbf{v} = \mathbf{K} \mathbf{e} + \dot{\mathbf{x}}_d, \quad (13)$$

mit $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ als eine positiv-definite Verstärkungsmatrix. Auf diese Weise wird die aktuelle Sollgeschwindigkeit $\dot{\mathbf{x}}_d$ direkt auf die Stellgröße beaufschlagt und zusätzlich über den Proportionalregler der Fehler \mathbf{e} reduziert. Basierend auf dieser Betrachtung und der nur lokalen Gültigkeit von $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$, ist es sinnvoll die Stellgröße \mathbf{v} im Betrag zu beschränken [16]:

$$\mathbf{v}' = \begin{cases} \mathbf{v} & \|\mathbf{v}\| \leq d \\ d \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} & \text{sonst} \end{cases} \quad (14)$$

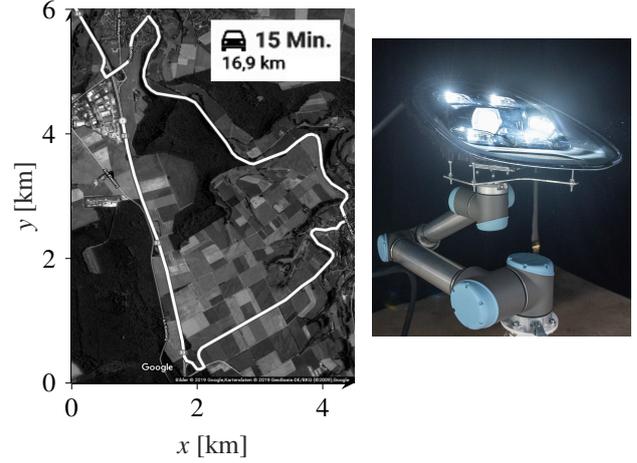
Hierbei ist $d \in \mathbb{R}^+$ ein empirischer Schwellwert in der Größenordnung der Länge eines Armkörpers [16]. Nach Anwendung von (5) ergeben sich die gesuchten generalisierten Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$. Zur Vermeidung von Singularitäten bei der Invertierung in (5), werden die Singulärwerte $\sigma_i^+ = \frac{1}{\sigma_i} \in \mathbb{R}$ von $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$ zu Null gesetzt, falls die korrespondierenden Singulärwerte $\sigma_i \in \mathbb{R}$ für $i = 1, 2, \dots, n$ von $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ einen Schwellwert σ_{\min} unterschreiten [17]. Anders als beim *Damped-Least-Squares* wird so die Dämpfung individuell für den betroffenen Singulärwert durchgeführt.

4 Evaluation

Im Folgenden wird die Güte der Nachbildung der Fahrtdynamik durch Vergleich mit einer realen Testfahrt durchgeführt. Die Testfahrt fand tagsüber südlich von Paderborn, NRW, Deutschland auf dem im **Bild 6a** gezeigten Kurs statt. Der Versuchsträger ist eine Limousine der Oberklasse, welche mit einem Matrix-Scheinwerfer der Firma HELLA GmbH & Co. KGaA ausgerüstet ist. Aus den Messdaten wurde gemäß Abschnitt 2 das Straßennetzwerk rekonstruiert. Da die fahrzeuginternen Sensoren zu ungenau waren, wurde als Quelle des Straßenverlaufes Google Maps und als Höhendaten das digitale Geländemodell (DGM) der Geobasis NRW [18] verwendet. Für die Teststrecke wies diese Kombination der verwendeten Daten die höchste Genauigkeit auf, welche durch Auswertung der gemessenen differenziellen GPS-Daten auf einem Testkurs in Dortmund und eines Fahrtenvideos verifiziert wurde.

Als Mehrkörpermodell zur Fahrdynamiksimulation werden die Automotive Simulation Modells (ASM) der Firma dSpace verwendet. Die Fahrzeugparameter wurden auf Basis der Standardklasse und öffentlich zugänglich Fahrzeugdaten bestimmt und sind demnach nicht vollständig auf das Zielfahrzeug optimiert. Das Modell repräsentiert nur die Fahrzeug-Klasse und weicht vom Versuchsträger ab.

Die verwendete Mechanik ist ein UR10 Roboter der Firma Universal Robots, auf den ein Scheinwerfer wie in **Bild 6b** montiert ist. Der Roboter kann mit seinen 6 Freiheitsgraden alle Bewegungen der Fahrzeugkarosserie nachbilden.



(a) Verlauf der Teststrecke

(b) Montierter Matrix-LED-Scheinwerfer auf einem Industrieroboter.

Abbildung 6 Bestandteile des Evaluationsszenarios

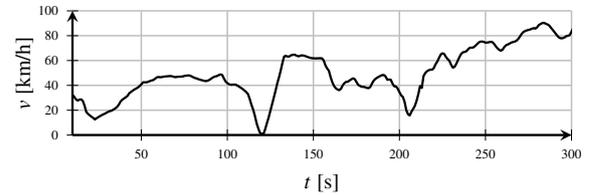


Abbildung 7 Geschwindigkeitsprofil der Testfahrt.

Für den Test wurde ein länglicher Lichtkanal als Montageplatz angenommen. Deswegen wird der Gierwinkel zu Null gesetzt und nur die Bewegung im Hub h relativ zur Fahrbahnoberfläche und der Nick- θ sowie Rollwinkel ϕ untersucht. Gefahren wurde das in **Bild 7** gezeigte Geschwindigkeitsprofil. Die Zustandsgrößen der Karosserie sind ohne Berücksichtigung der Anbaulage des Scheinwerfers in den **Bildern 8, 9 und 10** dargestellt. In allen Bildern kann die Mechanik den Vorgaben aus der Simulation mit minimalem Fehler in Position $< \pm 1$ mm und verallgemeinerter Orientierung $< \pm 0.1^\circ$ folgen. Damit ist eine Nachbildung der Fahrdynamik nahezu fehlerfrei durch die Mechanik möglich.

Bei der Simulation der Fahrdynamik ergeben sich Unterschiede zur Realität, welche nicht durch die Modellstruktur zu begründen sind. Die Hubbewegung der realen Testfahrt wurde aus aufgezeichneten Fahrwerksdaten unter der Annahme eines starren Reifens berechnet, wodurch Messungenauigkeiten entstehen. Dies und die Parametrisierung des Modells führen zu einem maximalen Fehler im Hub von $< \pm 10$ mm. Der Nick- und Rollwinkel wurden aus derselben Quelle rekonstruiert und weisen die maximalen Abweichungen zwischen Realität und Simulation von $\pm 0,2^\circ$ und $\pm 0,8^\circ$ auf. Die Abweichungen des Rollwinkels werden maßgeblich vom Fahrzeugregler der Simulation hervorgerufen. Der laterale Regler schaltet abhängig vom Straßenverlauf zwischen den Methoden von [13] und [14], was zu schwingungsähnlichen Lenkeingriffen führt, welche das schwingungsähnliche Verhalten des Rollwinkels und damit auch die maximalen Abweichungen herbeiführen.

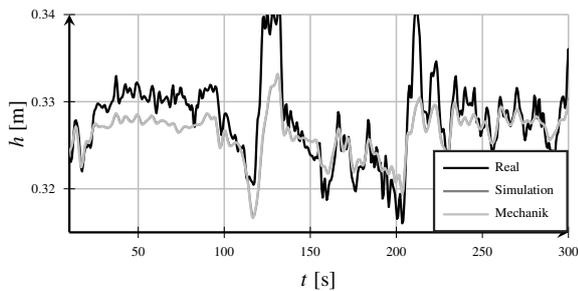


Abbildung 8 Vergleich des gefilterten Karosserie-Hubs.

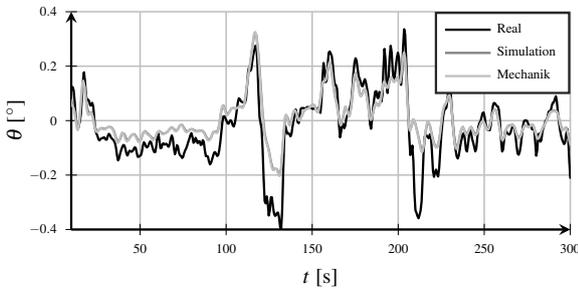


Abbildung 9 Vergleich der gefilterten Karosserie-Nickwinkel.

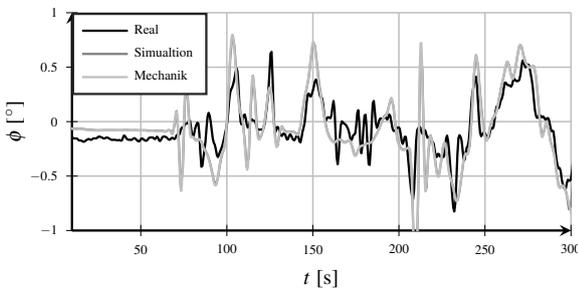


Abbildung 10 Vergleich der gefilterten Karosserie-Rollwinkel.

Die Mechanik kann die Fahrdynamik eines Kraftfahrzeuges realitätsnah dynamisch wiedergeben und damit Testfahrten nachbilden. Auf einer ausreichend großen Projektionsfläche können durch die Fahrdynamik hervorgerufene Veränderungen im Lichtbild qualitativ vom Betrachter bewertet und die Güte von Lichtfunktionen bestimmt werden.

5 Zusammenfassung

Die Methode der nachgestellten Testfahrt kann als neuer Ansatz für die Scheinwerferentwicklung und -optimierung verwendet werden, da die Fahrdynamik stationär realitätsnah nachgebildet werden und deren Einfluss auf die subjektive Güte der Lichtverteilung qualitativ bestimmbar ist. Durch die Verwendung einer Simulation als Datenquelle können nun erstmals reale Scheinwerfer ausgehend von virtuellen Szenarien getestet werden, was die Möglichkeiten zur Fehlerdiagnose im Entwicklungsprozess erweitert. In weiteren Arbeiten wird die Analyse auf die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ausgeweitet. Damit wird untersucht, ob alle relevanten Anregungen für den Scheinwerfer nachgebildet werden können.

Danksagung

Wir danken der Firma Hella GmbH & Co. KGaA für die Unterstützung und die Bereitstellung der Daten der Testfahrt. Dieses Vorhaben wird aus Mitteln des Europäischen

Fonds für regionale Entwicklung (EVRE) unter dem Förderkennzeichen EVRE-0800850 gefördert.

6 Literatur

- [1] Hummel, B.: *Blendfreies LED-Fernlicht*. Audi Dissertationsreihe, Cuvillier Verlag, 2010.
- [2] Hella (Hrg.): *Erhöhte Sichtweite im Vergleich von konventionellem Abblendlicht und Blendfreiem Fernlicht*. https://www.hella.com/press/assets/images/content_global/Blendfreies_Fernlicht_Hella.jpg, Abgerufen 12.2018
- [3] Moisel, J.: *Requirements for future high resolution ADB modules*. 11th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2015, S. 161-170.
- [4] Kubitzka, B. und Wilks, C.: *Digitales Licht als Unterstützung für den Fahrer*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 4 2018, ISSN 2192-8800, S. 56-59.
- [5] Opfermann, A., Bertram, T., Baum, D. und Karas, P.: *A new hardware-in-the-loop platform for the evaluation of adaptive lighting systems*. Proceedings of the 17th World Congress IFAC 2008.
- [6] Hacibekir, T., et al.: *Adaptive headlight system design using hardware-in-the-loop simulation*. IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006.
- [7] Krahnstöver, A. Z.: *Licht führt!?*. AutoUni – Schriftenreihe, Springer Verlag, 2017.
- [8] Julier, S. J. und Uhlmann, J. K.: *Unscented Filtering and Nonlinear Estimation*. Proceedings of the IEEE, 92(3): S. 401–422, 2004.
- [9] Vaaraniemi, M., Treib, M. und Westermann, R.: *High-quality cartographic roads on high-resolution DEMs*. Journal of WSCG. 2011, vol. 19.
- [10] UNECE (Hrg.): *Regulation No. 48 Rev. 12*. UN Vehicle Regulations - 1958 Agreement, 2014.
- [11] Tutuianu, M., et al.: *Development of a World-wide World-wide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)*. In: UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG DHC subgroup, 2013.
- [12] Doumiati, M. et al.: *Vehicle Dynamics Estimation using Kalman Filtering*. ISTE, Wiley, 2012.
- [13] MacAdam, C.: *Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No.6, 1981.
- [14] Sharp, R.: *A Mathematical Model for Driver Steering Control with Design, Tuning and Performance Results* Vehicle System Dynamics 33, pp. 289-326, 2000.
- [15] Siciliano, B.: *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer, 2010.
- [16] Buss, S. und Kim, J.: *Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods*. Journal of Robotics and Automation, IEEE, 2004.
- [17] Oetomo, D. und Ang, M. H.: *Singularity robust algorithm in serial manipulators*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 25(1), pp. 122-134, 2009.
- [18] Geobasis NRW (Hrg.): *Digitale Geländemodelle (DGM)*. https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/gelaendemodelle/index.html, Zugriff am 12.2018.