



In der Rubrik [FORSCHUNG.KOMPAKT] stellen wir aktuelle Forschungsergebnisse übersichtlich und frei zugänglich dar, die eine wissenschaftliche Begutachtung (»Peer Review«) durchlaufen haben. Die Originalfassung dieses Artikels wurde veröffentlicht unter B. Varga, D. Yang, M. Martin and S. Hohmann, "Cooperative Decision-Making in Shared Spaces: Making Urban Traffic Safer Through Human-Machine Cooperation," 2023 IEEE 21st Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), Pula, Croatia, 2023, und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10417908> (kein Open-Access)

[FORSCHUNG.KOMPAKT]

Balint Varga¹, Dongxu Yang¹, Manuel Martin², Sören Hohmann¹

Kooperative Entscheidungsfindung in öffentlichen Verkehrsräumen: Sicherheit im Stadtverkehr durch Mensch-Maschine-Kooperation



Mit steigender Anzahl automatisierter Fahrzeuge auf unseren Straßen ist es wichtiger denn je, dass diese Systeme vertrauenswürdig und sicher agieren. Besondere Herausforderungen ergeben sich auf städtischen Straßen, wo es häufig zu Interaktionen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgängern und Radfahrern) kommt. Dieser Artikel beschreibt ein neuartiges Konzept für die kooperative Entscheidungsfindung automatisierter Fahrzeuge. Diese berücksichtigt entsprechende Interaktionen, um eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zwischen Fahrzeug und Mensch zu ermöglichen. Grundlage ist ein neues Modell, das Interaktion und Prädiktion in einem Schritt berücksichtigt, was den Ansatz für Echtzeitanwendungen geeignet macht. In einer Simulationsumgebung konnte die Überlegenheit des Systems im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das System für die Anwendung in der realen Welt geeignet ist und einen wichtigen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten kann.

→ Kontakt

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Regelungssysteme (IRS), bal-int.varga2@kit.edu

² Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, manuel.martin@iosb.fraunhofer.de

Hochautomatisierte und autonome Fahrzeuge werden Teil unseres Alltags. Die Akzeptanz unserer Gesellschaft für diese Systeme hängt vom Vertrauen besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger – FG und Radfahrer) ab. Ihre Sicherheit ist eines der wichtigsten Anliegen. Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen erregen eine große öffentliche Aufmerksamkeit und erhöhen das Misstrauen gegenüber solchen Systemen. Daher wird er-

forscht, automatisierte Fahrzeuge mit geeigneten Kommunikationskanälen und Entscheidungsalgorithmen auszustatten, die mit schwierigeren Situationen umgehen können, z.B. städtische Szenarien, in denen Fahrzeuge langsam fahren und Fußgänger unerwartet die Straße überqueren können. Abb. 1 zeigt beispielhaft ein solches Szenario.

Bei niedrigen Geschwindigkeiten kann es zu einer Interaktion zwischen Fußgängern und automatisierten Fahrzeugen (Mensch-Maschine-Interaktion) kommen. Solche Mensch-Maschine-Interaktionen müssen entsprechend gehandhabt werden, um das Vertrauen in automatisierte Fahrzeuge zu erhöhen. Daher stellt dieser Artikel eine neuartige kooperative

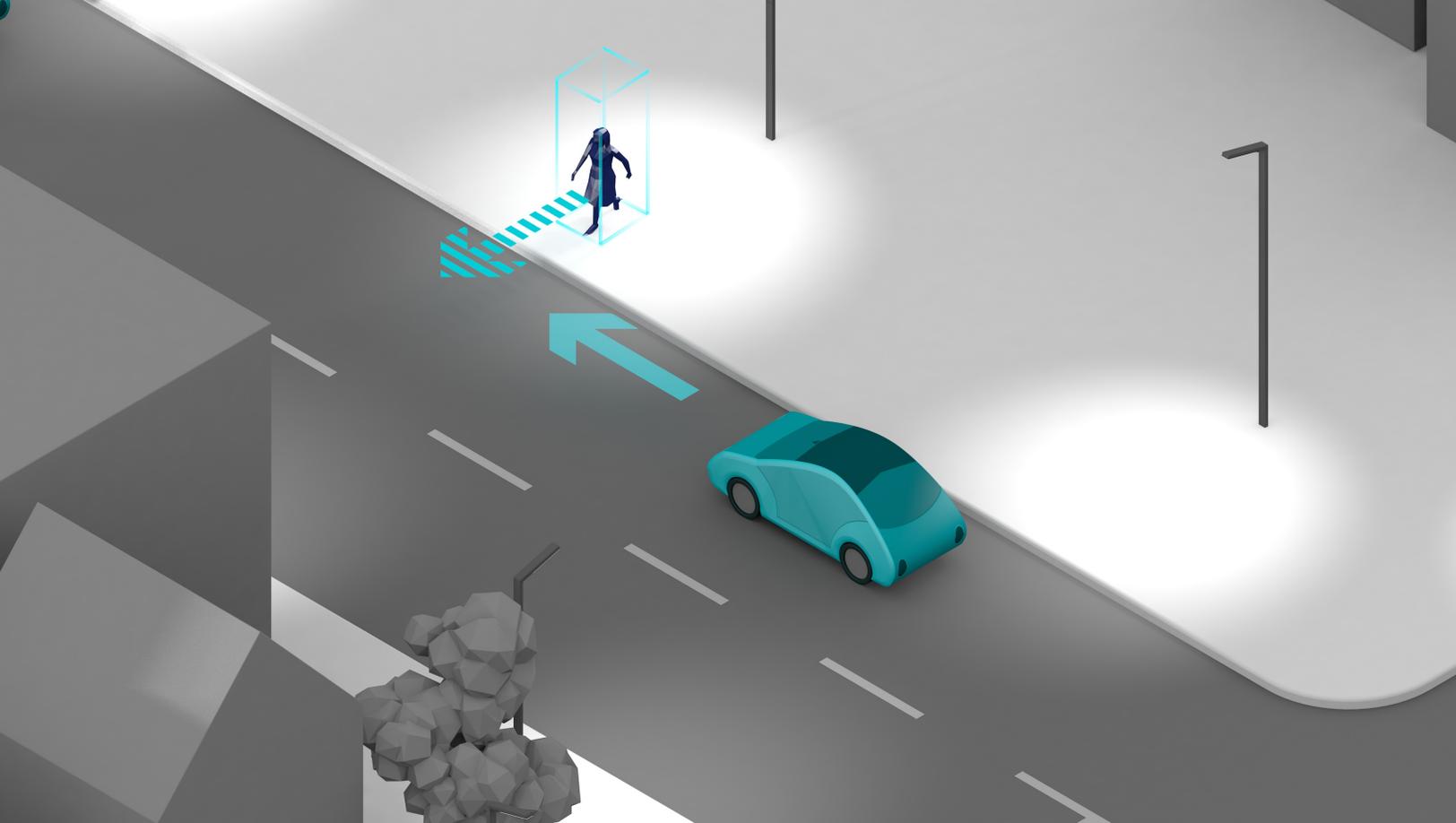


Abb. 1: Ein Beispielszenario, in dem eine Interaktion zwischen dem Fußgänger und dem automatisierten Fahrzeug stattfindet. Grafische Darstellung durch die version1 GmbH.

modellprädiktive Regelung (engl.: »model predicitive control« – MPC) für gemischte Verkehrsszenarien vor. Diese MPC ist in der Lage, eine kooperative Entscheidungsfindung zu vorherzusagen, die die *Vorhersage* von Fußgängerbewegungen ebenso wie die *Mensch-Maschine-Interaktion* gleichzeitig abbilden kann.

Ansätze aus der Literatur und die Forschungslücke

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über verschiedene Ansätze zum Lösen von Interaktionsproblemen zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgängern in gemischten Kreuzungsszenarien präsentiert. Diese Ansätze umfassen *regelbasierte* (engl.: »rule-based«) und *modellbasierte* (engl.: »model-based«) Konzepte sowie spieltheoretische Modelle. Regelbasierte Konzepte nutzen festgelegte Regeln, die auf Entfernungs- und Geschwindigkeitsdaten des Fahrzeugs und des Fußgängers basieren, um Entscheidungen in Fahrzeug-Fußgänger-Situationen zu treffen. Modellbasierte Konzepte verwenden Bewegungsmodelle von Fußgängern und Fahrzeugen, um Interaktionen zu modellieren und zu handhaben. Modellprädiktive Regelungen ermöglichen die Trajektorienplanung und -regelung basierend auf solchen Vorhersagemodellen des Fußgängers.

Spieltheoretische Ansätze bieten mathematische Modelle zur Analyse des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern. Alle diese Ansätze sind darauf ausgerichtet, die Sicherheit und Effizienz in gemischten Kreuzungsszenarien zu verbessern.



In der Literatur zu gemischten Interaktionsszenarien mit automatisierten Fahrzeugen fehlt ein Fußgängermodell, das sowohl die *Vorhersage* von Fußgängerbewegungen als auch die *Mensch-Maschine Interaktion* gleichzeitig abbilden kann und für Echtzeitanwendungen geeignet ist.«

Daher wird ein einfaches Modell benötigt, das solche Interaktionen charakterisiert und die gemeinsame Entscheidungsfindung zwischen Fußgängern und Fahrzeugen ermöglicht. Deswegen schließt dieser Forschungsbeitrag diese Forschungslücken durch die Einführung eines neuartigen Fußgängermodells, das Vorhersage und Kooperation explizit behandelt. Aus diesem Grund wird dies als *explizites Fußgängermodell* bezeichnet.

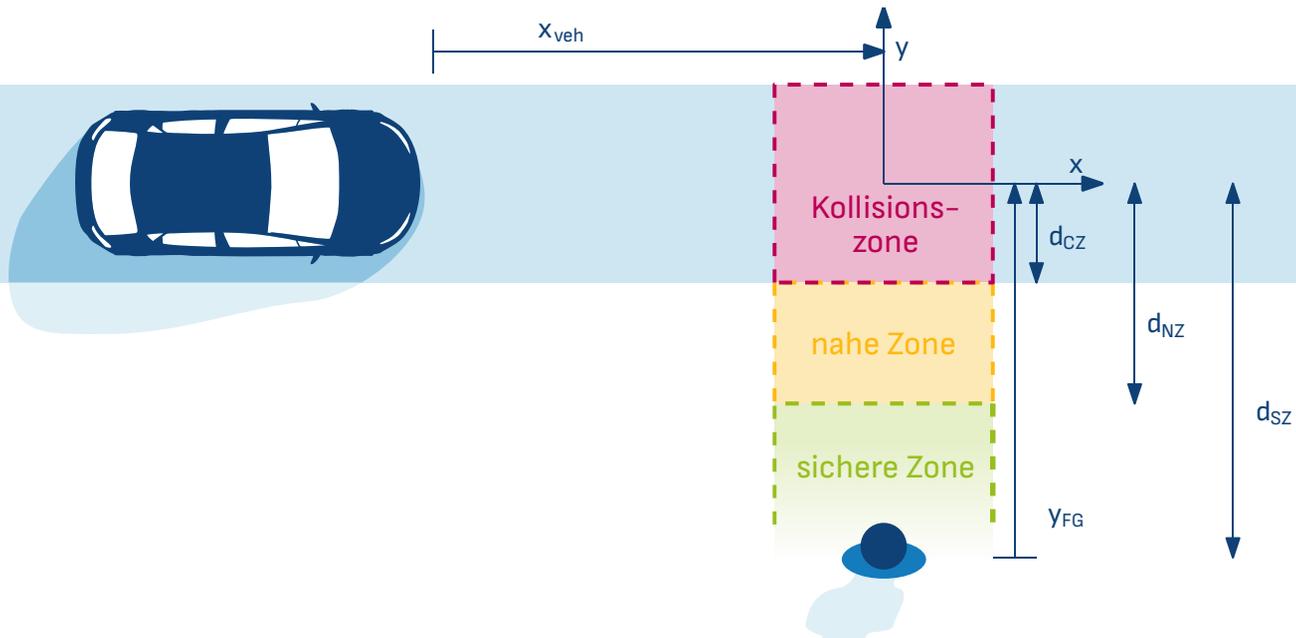


Abb. 2: Vogelperspektive des Szenarios mit den relevanten Abständen für die Entscheidungsfindung.

Das entwickelte Prädiktionsmodell

Die angepasste, modellbasierte kooperative Entscheidungsfindung wird im Folgenden vorgestellt. Für die Modellierung des Interaktionsszenarios wird angenommen, dass sich der Fußgänger nur in die positive y-Richtung und das automatisierte Fahrzeug nur in die positive x-Richtung bewegt, siehe Abb. 2. Man beachte, dass diese Annahmen die Anwendung der Konzepte nicht einschränken, da die Interaktion hauptsächlich in diesen beiden senkrechten Richtungen stattfindet. Außerdem wird die Bewegung des Fußgängers entlang der Straße (parallel zum automatisierten Fahrzeug) durch die Position und Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs berücksichtigt.

Für das explizite Bewegungsmodell wird angenommen, dass die Geschwindigkeitswahl des Fußgängers im nächsten Zeitschritt durch

$$\dot{y}_{FG}(i+1) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-TTC(i)}{s} + c\right)} \cdot \dot{y}_{FG}^{ref} \quad (1)$$

modelliert werden kann, wobei c ein Parameter ist, über den der Charakter des Fußgängers eingestellt werden kann, wie z.B. zurückhaltendes oder aggressiveres Verhalten. TTC ist die Zeit bis zur Kollision (engl.: »time to collision«). Die Ausgangsfunktion von (1) ist eine *sigmoidähnliche Funktion*¹ und liegt zwischen 0 und 1, was als Wahrscheinlichkeit für die Überquerung des Fußgängers interpretiert werden

¹ Als sigmoidähnliche Funktionen oder Sigmoidfunktionen bezeichnet man Funktionen, die von einer unteren Schranke allmählich und stetig ansteigen und dann hin zu einer oberen Schranke wieder allmählich ausklingen, sodass ein S-förmiger Verlauf entsteht.

kann. Je größer der TTC-Wert ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Fußgänger mit einer Referenzgeschwindigkeit gehen würde. Es muss also lediglich eine Referenzgeschwindigkeit des Fußgängers für das Modell bestimmt werden. Damit lässt sich die Verhandlung zwischen Fußgänger und Fahrzeug abzubilden.

Da (1) ein dynamisches Modell ist, wurde es in eine MPC eingesetzt. Dadurch kann das zukünftige Verhalten des Fahrzeugs sowie der Fußgänger bestimmt werden. Zusammenfassend: Mit diesem eindimensionalen Modell (1) lässt sich die Vorhersage von Fußgängerbewegungen und die Mensch-Maschine Interaktion gleichzeitig abbilden, was mit den Methoden aus dem Stand der Literatur nicht möglich war.

Ergebnisse und Diskussion

In der Arbeit Varga, Yang, Martin und Hohmann, 2023 wurde das Konzept erstmals in Simulationen verifiziert. In einer Simulationsumgebung wurde das Verfahren mit einem regelbasierten Regelungskonzept (*rule-based*) Varga, Yang und Hohmann, 2023 und mit einem impliziten MPC verglichen. Die rule-based-Regelung berechnet die optimale Geschwindigkeit des Fahrzeugs mithilfe eines Entscheidungsbaumes. Die implizite MPC teilt die Vorhersage der Fußgängerbewegungen und die Verhandlung in zwei Schritte: Erst wird die Fußgängerposition prädiziert, dann reagiert das Fahrzeug auf diese vorhergesagten Werte. Dieses Vorgehen ist üblich in den Arbeiten aus der Literatur.

Tab. 1: Bewertung der neuen entwickelten expliziten MPC mit bestehenden Ansätzen

Regelung	regelbasiert	implizite MPC	explizite MPC
J _{gesamt}	16,01 s	7,24 s	3,23 s
mittlere Rechenzeit	$1,5 \times 10^{-6}$ s	0,016 s	0,017 s

Für die Bewertung der Konzepte wird das Maß

$$J_{\text{gesamt}} = t_{\Sigma} + |a_{\text{max}}| \cdot \frac{s^3}{m} - \text{TTC}_{\text{min}} \quad (2)$$

verwendet, wobei t_{Σ} die benötigte Zeit für die Kreuzung und $|a_{\text{max}}|$ die maximale Beschleunigung ist. Die Untersuchung beinhaltet 100 Simulationen der Kreuzung, wobei unterschiedliche Startpunkte und Anfangsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen und Fußgängern berücksichtigt wurden. Die Simulationen wurden auf einem Standard-Notebook mit einem »AMD Ryzen 7 Pro 4750U«-Prozessor und 32 GB RAM durchgeführt.

Tab. 1 zeigt die Ergebnisse der Simulationen. Es ist zu sehen, dass die neu entwickelte explizite MPC bezüglich des definierten Maßes J_{gesamt} besser als beide Methoden aus der Literatur ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in diesem Artikel eine kooperative Entscheidungsfindung für automatisierte Fahrzeuge in gemischtem Straßenverkehr vorgestellt, welche sowohl die *Vorhersage* von Fußgängerbewegungen als auch die *Mensch-Maschine-Interaktion* gleichzeitig abbilden kann. Das Konzept wurde simulativ untersucht und seine Überlegenheit gegenüber den Methoden aus der Literatur gezeigt.

In Zukunft wird die entwickelte kooperative Entscheidungsfindung in einen Versuchsträger integriert, um Realversuche durchzuführen und das Gesamtsystem zu bewerten.

Außerdem ist geplant, weiteren Studien durchzuführen, in welchen die *Human-Factors* berücksichtigt und weitere Entwicklungs- und Forschungsschritte abgeleitet werden können. ■

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Forschungsinitiative *Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien* im Projekt »IntelligenTe Mensch-Technik Kommunikation im gemischten Verkehr« (INITIATIVE, Projektnummer 19A21008D) gefördert.

Literaturverweise

- Varga, Balint, Dongxu Yang und Sören Hohmann (2023). »Intention-Aware Decision-Making for Mixed Intersection Scenarios«. In: *2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, S. 000369–000374. DOI: 10.1109/SACI58269.2023.10158550.
- Varga, Balint, Dongxu Yang, Manuel Martin und Sören Hohmann (2023). »Cooperative Decision-Making in Shared Spaces: Making Urban Traffic Safer Through Human-Machine Cooperation«. In: *2023 IEEE 21st Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, S. 109–114. DOI: 10.1109/SISY60376.2023.10417908.

→ Die »time to collision«, TTC

Die Messgröße »time to collision«, TTC, auf Deutsch »Zeit bis zur Kollision« ist ein häufiges Maß zur Bestimmung der Kritikalität in Verkehrssituationen – und zwar nicht nur für solche, in denen es tatsächlich zu einem Zusammenstoß kommt.

Vielmehr kann die TTC zwischen zwei Verkehrsteilnehmern zu jedem Zeitpunkt berechnet werden, auch wenn ein Zusammenstoß letztlich vermieden wird. **Es ist stets die Zeit, die bis zur Kollision verbleiben würde, sofern keiner der beiden Verkehrsteilnehmer seine derzeitige Geschwindigkeit (und Bewegungsrichtung) ändert. Die Berechnung nimmt also an, dass sich die Situation gleichförmig weiterentwickelt.** In den allermeisten Fällen ist das selbstverständlich nicht der Fall, und die Menschen reagieren rechtzeitig.

Wenn zwei Verkehrsteilnehmer selbst bei unveränderter Weiterbewegung nicht kollidieren würden, kann die TTC auch den Wert »unendlich« annehmen. Hingegen kann selbst bei einer typischen, unkritischen Folgefahrt, wo das vorausfahrende Fahrzeug leicht abbremst, eine TTC berechnet werden. Sie erlaubt eine ungefähre Schätzung, wie lange das nachfolgende Fahrzeug Zeit hat, um die Kollision durch Bremsen zu vermeiden.

Somit spielt die TTC nicht nur bei tatsächlichen Unfällen eine Rolle (wo sie tatsächlich den Wert 0 annimmt), sondern wird bei der Kritikalitätsbewertung von Beinaheunfällen verwendet, und insbesondere auch in Fahrerassistenzsystemen, etwa bei Auffahrwarnsystemen (engl.: Forward Collision Warning, FCW) oder Notbremssystemen (engl.: automated emergency braking, AEB).