

Az autonóm járművek forgalmi hatásai: a jármű- és forgalomirányítás kihívásai

Dr. Tettamanti Tamás – Dr. Varga István

adjunktus

docens és dékán

BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

e-mail: tettamanti@mail.bme.hu, ivarga@mail.bme.hu

Az autonóm járművek fejlesztése nemcsak az autógyártóknak jelent óriási feladatot, hanem a közlekedésmérnökök számára is új kihívásokat támaszt. Amikor az autonóm járművek nagy arányban jelennek majd meg a közúton, az eddig alkalmazott forgalommodellezési és közlekedési irányítási módszerek is módosításra szorulnak. Továbbá fontos kiemelni a mikroszkopikus forgalomszimuláció alkalmazási lehetőségeit a vezető nélküli járművek fejlesztési és tesztelési folyamataiban, amelyeknek új feladatait tekintjük át közlekedésmérnöki szemszögből.

Kulcsszavak: autonóm járművek, forgalomszimulálás, Vehicle-in-the-Loop (ViL) szimuláció

DOI 10.24228/KTSZ.2019.1.4

1. BEVEZETŐ

Az autonóm jármű definíció szerint képes a környezetének az érzékelésre és emberi beavatkozás nélküli közlekedésre. Az autonóm vagy magasan automatizált járműveket a Society of Automotive Engineers (SAE) szervezet hat különböző kategóriára osztja a hagyományos járműtől (minden vezetési funkciót a vezető lát el) a teljesen önvezető járműig (0-5 között) [1]. A közeljövő automatizált járművei nagymértékben átforgalmazzák a tradicionális közlekedési rendszereinket: alkalmazásukkal optimális közlekedési kapacitáskihasználás és biztonságosabb közlekedés érhető el. Jóllehet a vezető nélküli autók térnyeréséhez még szá-

mos (főleg jogi) akadály leküzdésére van szükség [2], várható hatások vizsgálatát mielőbb érdemes elkezdni. Az autonóm járműtechnológiák legfontosabb előnyeit a biztonságosabb és energiahatékony közlekedés, az átlagos utazási idő csökkenése, a személyre szabott szolgáltatások, ill. általában az utazási színvonal javulása jelentik [3].

A piacutatók különböző szcenáriókat ismeretnek az autonóm járművek penetrációjával kapcsolatban. Ugyanakkor még a legpessimistább jövőkép szerint is legkésőbb 2050 környékére várható az autonóm járművek széles körű elterjedése [4]. Továbbá fontos kiemelni,

hogy önmagában a magasan automatizált autók (SAE 4. szintje) is hatalmas szerepet játszhatnak egy jobb és hatékonyabb közlekedés megteremtésében.

A számos várható pozitív hatás közül a közlekedésmérnököket leginkább a jövő forgalomirányítási kérdései foglalkoztatják, hiszen a forgalmi dugók ma már a mindennapjaink részét képezik. A klasszikus forgalomszervezési és forgalomirányítási módszerek mellett az autonóm járművek jelenthetnek megoldást a torlódások mérséklésére vagy akár elkerülésére. A megfelelő intézkedések foganatosítása előtt azonban szükséges megismerni az automatizált járművek forgalomra gyakorolt várható hatásait. Az automatizáltság növekedése ugyanis kihatással lesz a forgalom lefolyására is. A járművek az infrastruktúrával és egymással is képesek lesznek kommunikálni, több információval rendelkeznek majd, pontosabbá válik az adott sebesség tartása, ill. várhatóan először megnő, majd csökken az átlagos követési távolság. A valós forgalomban bekövetkező változásokat virtuálisan, forgalomszimulációkkal lehet első körben vizsgálni.

A forgalomszimulációk egy másik vonatkozása pedig, hogy egyre nagyobb szerepet játszanak az autonóm járműtechnológiák fejlesztési, tesztelési, ill. validálási folyamataiban. Ezért szükséges a forgalomszimulációs réteg és a járműszimulátorok megfelelő integrálása.

A 2. fejezetben az autonóm járművek városi makroszkopikus fundamentális diagramra vonatkozó hatását vizsgáljuk meg SUMO mikroszimulációs programmal. A 3. fejezetben egy SUMO-val megvalósított szimulációs keretrendszer mutatunk be autonóm jármű tesztelés vonatkozásában. A 4. fejezetben az eredményeket összegezzük.

2. A MAKROSZKOPIKUS FUNDAMENTÁLIS DIAGRAM MEGVÁLTOZÁSA

Az autonóm járművek megjelenésével a szakmai gyakorlatban alkalmazott forgalmi modellek jelentősen megváltoznak. Fontos vizsgálni,

hogyan e „kevert” járműforgalom a modellek milyen módosításával írható le a legjobban - különös tekintettel az irányítási szempontokra. Ehhez a SUMO forgalomszimulációs szoftverrel végeztünk vizsgálatokat [5]. Jelen kutatás tárgya a - városi forgalomra is alkalmazható [8], [9] - makroszkopikus fundamentális diagram (MFD) megváltozásának analízise volt különböző penetrációs ráták mellett.

Az MFD a $Q(jm/h)$ forgalomnagyság, a $\rho(jm/km)$ forgalomsűrűség, ill. a $V(km/h)$ térbeli átlagsebesség közötti kapcsolatokat írja le [5] az áramlási folytonossági törvényből kölcsönzött alapegyenletnek megfelelően:

$$Q(\rho) = \rho \cdot V(\rho).$$

Az MFD hálózati vagy útszakasz szinten is értelmezhető. A teljes közlekedési hálózatra vonatkozó fundamentális diagram a hálózat áteresztő képességét modellezi:

$$Q_N(\rho_a),$$

ahol Q_N a hálózaton áthaladt járművek száma óránként, valamint ρ_a az átlagos forgalomsűrűség a hálózaton. ρ_a definíció szerint az alábbi formulával számítható:

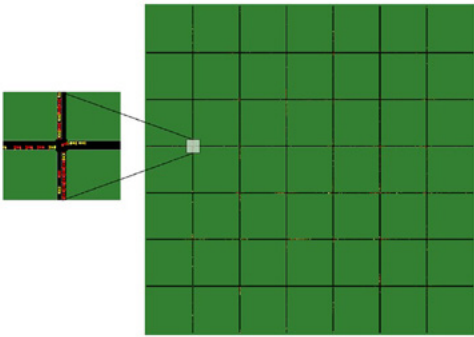
$$\rho_a = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i},$$

ahol l_i az i -edik hálózati útszakasz hossza, n pedig az útszakaszok száma [5], [6].

Az autonóm járművek hatásának vizsgálatát egy mesterségesen generált rácsszerkezetű közlekedési hálózaton vizsgáltuk (1. ábra).

A rácsszerkezetű hálózat 36 kereszteződést tartalmazott és egységesen 300 méteres, kétirányú útszakaszokból állt. A csomópontokban forgalomfüggő jelzőlámpás irányítást szimuláltunk. A járművek dinamikusan választottak útvonalat a szimulációk során. A SUMO járműkövetési modelljének (Krauss modell [11]) alapbeállításait a jövőbeli autonóm járművek várható tulajdonságaihoz igazítottuk:

1. ábra: Rácsszerkezetű közlekedési hálózat SUMO-ban megvalósítva



Mingap: a sorban álló járművek közötti minimális távolság (m).

Accel: a járművek gyorsulási képessége (m/s^2).

Decel: a járművek lassulási képessége (m/s^2).

Emergency Decel: a járművek maximális lassulási képessége (m/s^2).

Sigma: a járművezető tökéletlensége (0 és 1 közötti érték).

Tau: a járművezető által elérni kívánt minimális követési idő (s) – kvázi a reakció idő.

A hagyományos, ill. az autonóm járművekre alkalmazott modellparamétereket az 1. táblázat tartalmazza ([12] és [13] alapján meghatározva).

1. táblázat: A szimulációban alkalmazott SUMO járműkövetési modellparaméterek

Jármű típus	Mingap (m)	Accel ($\frac{m}{s^2}$)	Decel ($\frac{m}{s^2}$)	Emergency Decel ($\frac{m}{s^2}$)	Sigma	Tau (s)
hagyományos	1.5	3.5	4.5	8	0.5	0.9
autonóm	0.5	3.8	4.5	8	0	0.6

2. táblázat: Szimulációs

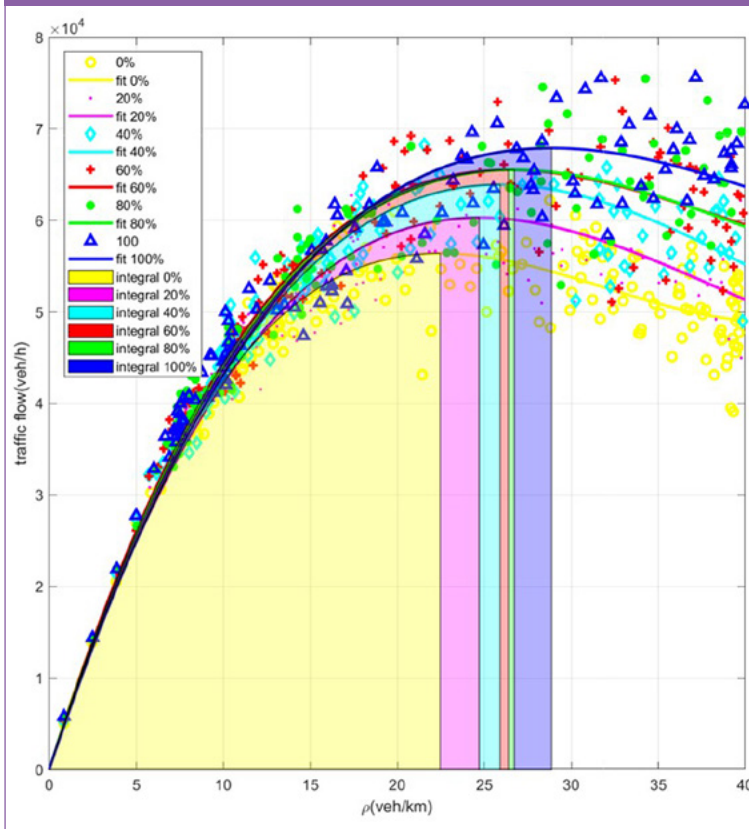
Penetráció	0%	20%	40%	60%	80%	100%
A polinom illesztés determinációs együtthatója (R^2)	0.8237	0.7418	0.8412	0.8982	0.8269	0.8542
A stabil tart. területének változása (%)	0	16.7	29.2	36.3	37.7	54.3
$\rho_{crit} \left(\frac{jm}{km} \right)$	22.47	24.72	25.91	26.39	26.73	28.87
$Q_{max} \left(\frac{jm}{h} \right)$	56399	60313	63909	65529	65535	67916

A SUMO szimulációk eredményei alapján harmadfokú polinom illesztést végeztünk a hat különböző esetre. A kapott MFD-k illesztési jóságát, ill. a görbék főbb paramétereinek megváltozását a 2. táblázat tartalmazza.

A szimulációs eredményeket grafikusán a 2. ábra mutatja. Az ábrán jelzett %-os értékek (0-20-40-60-80-100) a szimulált autonóm járművek részarányát jelzik. Az „integral” elnevezésű felületekkel pedig az egyes MFD-k stabil tartományának kiterjedését szemléltetjük.

Az eredményeket áttekintve megállapítható, hogy az MFD paraméterek a forgalmi teljesítmények tekintetében folyamatosan javulnak a penetrációs ráta növelésével párhuzamosan.

2. ábra: A különböző penetrációkkal kapott fundamentális görbék



3. MIKROSKOPIKUS FORGALOMSZIMULÁCIÓ ALKALMAZÁSA AZ AUTONÓM JÁRMŰVEK FEJLESZTÉSE ÉS TESZTELÉSE SORÁN

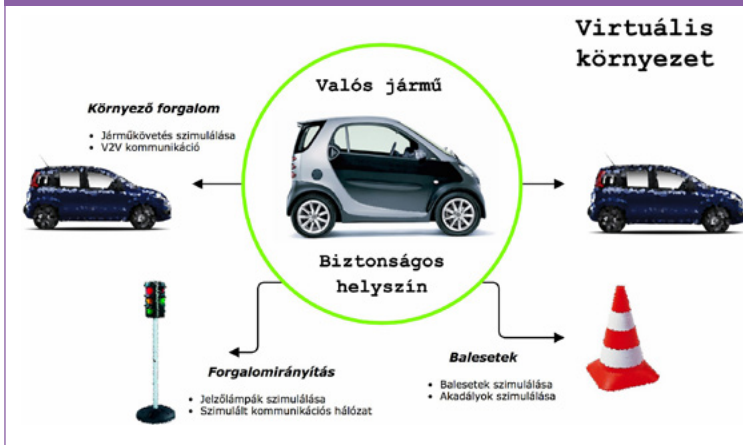
Elsőként fontos megkülönböztetni a járművekre fókuszáló kutatásokat a teljes közlekedési rendszerre vonatkozó fejlesztésektől. Míg az előbbi során alapvetően a jármű – mint „individuum” – fejlesztéséről beszélünk, addig az utóbbi során a teljes közlekedési rendszer (jármű, infrastruktúra és felhasználók) tökéletesítését célozzuk meg. Az autóipar természetesen rohamtempóban végzi a járműves fejlesztéseket, amihez nagyon részletes járműmodelleket, ill. járműviselkedést szimuláló programokat alkalmaznak. Ezek a programok azonban korlátozottan képesek csak forgalmi

situációk modellezésére. A komplex közlekedési rendszer modellezését a másik oldalról a közlekedésmérnöki szakma végzi tipikusan mikroszkopikus forgalomszimulációs szoftverekkel. Ezen szoftverek már képesek a teljes forgalom részletes szimulációjára, ugyanakkor elhanyagolt járműmodellezést tartalmaznak. A két szimulációs vizsgálati módszertan között tehát jelenleg korlátozott az átjárás. A probléma feloldására - a „Hardware-in-the-Loop” módszerhez hasonlóan - az úgynevezett "Vehicle-in-the-Loop" (ViL) szimulációs keretrendszer fejlesztése a megoldás. Ennek lényege egy olyan környezet megteremtése, amelyben egy realiztikus működésű mikroszkopikus

forgalomszimulációs szoftver képes egy vagy több valós autonóm tesztjárművet valós időben szimulálni, miközben a többi jármű teljesen virtuális forgalomként kerül megvalósításra. Az így kialakítandó rendszerben lehetséges valós járművek és azok autonóm funkcióinak/képességeinek tesztelése úgy, hogy a jármű valós dinamikája megjelenik a szimulátorban, de a körülötte megjelenő forgalom virtuálisan generált. Mindez lehetővé teszi, hogy költséghatékonyan és biztonságosan lehessen tesztelni, pl. egy nagy üres területen. A koncepciót a 3. ábra szemlélteti.

A koncepció megvalósítását a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar autonóm teszt-autójával (Smart Fortwo) végeztük. A ViL keretrendszerben a SUMO forgalomszimulátort alkalmaztuk, amely esetében lehetőség van

3. ábra: A Vehicle-in-the-Loop (ViL) szimulációs koncepció



vázlatát és felépítését a 4. ábra mutatja be.

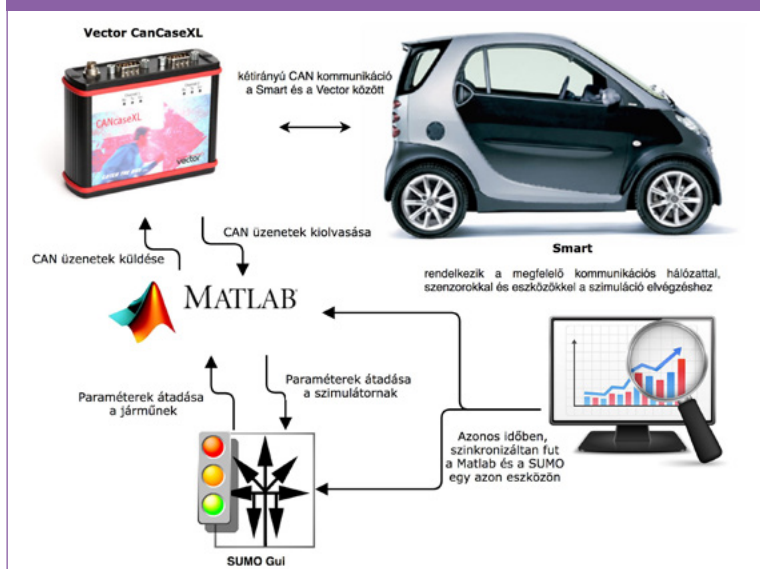
Az autonóm funkciók tesztelésére kifejlesztett ViL rendszer első tesztjét a BME St épületének parkolójában végeztük, amely során egy egyszerű vészfékezési feladatot hajtottunk végre. Ezt szemlélteti az 5. ábra.

A forgalomszimulátorban egy virtuális jármű is meghatározásra került, amelynek útvonala

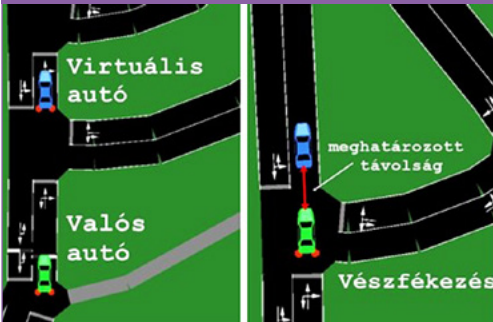
az abban definiált járművel és környezettel kapcsolatban minden információt külső (pl. Matlab) szoftverből elérni, illetve fordított irányban a Matlab szoftverből is lehetséges információt átadni a forgalomszimulátor számára az ún. TraCI interfészen keresztül [10]. A keretrendszerben a forgalomszimulátor személyi számítógépen fut, hogy demo szinten is követhető legyen. Ezért ebben az esetben a szimulációt futtató számítógép közvetlenül az autonóm jármű kommunikációs hálózatához kapcsolódik a Vector CANCaseXL eszközön keresztül (ez az eszköz egy újabb csomópontként csatlakozik a CAN hálózatra és azon minden jelenlévő üzenetet lát, illetve bármilyen azonosítójú üzenet kiküldhető a hálózatra rajta keresztül). A Vector CANCaseXL eszköz kompatibilis a Matlabbal, így a kommunikációs csatorna megvalósulhat a SUMO szimulátor és az autonóm jármű között. A keretrendszer elvi

megegyezett a Smart útvonalával, de indulása korábbra volt időzítve a Smarthoz képest. A teszt lényege az volt, hogy a valós jármű (Smart) a meghatározott útvonalon nagyobb sebességgel haladt, mint az előtte lévő virtuális jármű. Ebből kifolyólag a Smart utolérte a szimulált autót, és egy előre meghatározott biztonsági távolságérték elérésekor vészfékezéssel megállt. A valós mérés környezetét a 6. ábra mutatja be.

4. ábra: A ViL szimulációs keretrendszer



5. ábra: A ViL rendszer első tesztje



A kifejlesztett szoftveres környezet célja az is, hogy a most kiépülő zalaegerszegi autonóm tesztpályán [14] közvetlenül alkalmazható legyen. A tesztpálya forgalmi eseményei így tetszőlegesen szimulálhatók majd a ViL keretrendszerben. A rendszer első továbbfejlesztéseként jelenleg a 3D-s megjelenítésen dolgozunk Unity 3D szoftverrel.

6. ábra: A valós mérés környezetének bemutatása



4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az autonóm járművek és intelligens infrastruktúra adta lehetőségek óriási távlatokat nyitnak meg a műszaki tudomány és a gyakorlat számára. Az új technológiák alkalmazhatóságának alapja azonban a megfelelő működés, amelyet a mérnöki fejlesztések során folyamatos teszteléssel és validációval érnek el. Ehhez pedig szükséges a közlekedésmérnöki szempontból is megalapozottan végzett forgalommodellelés és forgalomszimuláció.

A forgalomszimulációs szoftvereken keresztül lehetőség nyílik arra, hogy megfelelő becslést adjunk az autonóm járművek forgalomra gyakorolt hatásáról. Másrészt az önvezető járművek valós-idejű tesztelési folyamataiban a forgalomszimulációs szoftverek közvetlenül felhasználhatók realizáltikus forgalmi környezet kialakításához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú (Bolyai) Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A dolgozat elkészítésével kapcsolatos további köszönetnyilvánítás: EFOP-3.6.2-16-2017-00002: Autonóm járműrendszerek kutatása a zalaegerszegi autonóm tesztpályához kapcsolódóan.



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SAE International (2016): Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016_201609, http://standards.sae.org/j3016_201401
- [2] Zöldy M. (2019): Legal Barriers of Utilization of Autonomous Vehicles as Part of Green Mobility. In: Burnete N., Varga B. (eds) Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018). AMMA2018 2018. Proceedings in Automotive Engineering. Springer, Cham
- [3] Fagnant, D.J., Kockelman, K.M. (2015): Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 77, 167-181., DOI: <http://doi.org/gc4n5r>

- [4] Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B., Correia, G. (2017): Development of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050, *European Journal of Transport and Infrastructure Research, EJTIR*, 17(1), 63-85. ISSN: 1567-7141, <http://tlo.tbm.tudelft.nl/ejtir>
- [5] Williams, J. C., Mahmassani, H. S., Iani, S. and Herman, R. (1987): Urban traffic network flow models, *Transportation Research Record* 1112, 78-88
- [6] Csikós, A., Tettamanti, T. and Varga, I. (2015): Macroscopic modeling and control of emission in urban road traffic networks, *Transport* 30(2), 152-161. DOI: <http://doi.org/cxmb>
- [7] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L. (2012): Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5 (3&4):128-138
- [8] Geroliminis N., Daganzo C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological* 2008, 42(9):759-770. DOI: <http://doi.org/dzfcbb>
- [9] Luspay T., Tettamanti T., Varga I.: *Forgalomirányítás, Közúti járműforgalom modellezése és irányítása* (2011): ISBN 978-963-279-665-9, Typotex Kiadó, Budapest
- [10] Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M. Hellbrück, H., Fischer, S. and Hubaux, J.-P. (2008): TraCI: an interface for coupling road traffic and network simulators. In *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium (CNS '08)*. ACM, New York, NY, USA, 155-163. DOI: <http://doi.org/c44qw8>
- [11] Krauss S. (1998): *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Ph.D. thesis, Universität zu Köln
- [12] Kudarauskas, N. (2007): Analysis of emergency braking of a vehicle, *Transport* 22(3), 154-159.
- [13] Atkins Ltd. (2016): Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (cavs) on traffic flow, Technical report, Department for Transport
- [14] Szalay Zs., Nyerges A., Hamar Z., Hesz M. (2017): Technical specification methodology for an automotive proving ground dedicated to connected and automated vehicles, *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.* 45:(3) pp. 168-174. DOI: <http://doi.org/cxk3>



The effect of autonomous vehicles: new challenges of vehicle and traffic control

Development of autonomous vehicles is an enormous project for car manufacturers, but also a big challenge for traffic engineers. When driverless cars start circulating on public roads with high proportion, the traditional traffic modeling and control methods need thorough revision. Microscopic traffic models (and simulators) must be capable of appropriately capturing the dynamics of autonomous driving. Similarly, the characteristic values of the macroscopic fundamental diagram and its shape will significantly alter. In addition, the microscopic traffic simulation becomes important in the process of autonomous vehicle development and testing, especially in the "Vehicle-in-the-Loop" test environment



Wirkung autonomer Fahrzeuge: neue Herausforderungen der Fahrzeug- und Verkehrssteuerung

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge ist ein enormes Projekt für Automobilhersteller, aber auch eine große Herausforderung für Verkehrsingenieure. Wenn fahrerlose Autos auf öffentlichen Straßen bei hohem Verkehrsaufkommen fahren, müssen die traditionellen Verkehrsmodellierungs- und -steuerungsmethoden gründlich überarbeitet werden. Mikroskopische Verkehrsmodelle (und Simulatoren) müssen in der Lage sein, die Dynamik des autonomen Fahrens angemessen zu erfassen. In ähnlicher Weise werden sich die charakteristischen Werte des makroskopischen Fundamentaldiagramms und seine Form signifikant verändern. Darüber hinaus wird die mikroskopische Verkehrssimulation im Prozess der autonomen Fahrzeugentwicklung und -prüfung, insbesondere in der „Vehicle-in-the-Loop“ Testumgebung, wichtig.