

Autonomes Fahren aus Sicht der Bahntechnik

Prof. Dr.-Ing. Stefan Karch
Railway Design & Innovation AG

Klassischer Strassenverkehr

Bevor wir uns der Zukunft zuwenden, wollen wir kurz auf das Phänomen der „Massenmotorisierung“ zurückblicken: Zwischen 1950 und etwa 1980, also innerhalb von nur 30 Jahren, fand ein gewaltiger „Trendbruch“ statt – mit dem Ergebnis einer massiven Verschiebung der Verkehrsanteile vom Öffentlichen Verkehr (ÖV) zum Individualverkehr (IV). Der Fahrzeugbestand wuchs in dieser Zeit in einer zunächst geometrischen Reihe: 1-4-16-32 Millionen lauteten die Zahlen für den Pkw-Bestand in Deutschland 1950, 1960, 1970 und 1980. Also ein echter „Boom“, wenn auch damals diesen Begriff noch niemand kannte.

Anfangs sah es sogar so aus, als würde der ÖV vollständig vom IV ersetzt werden, wie es in den USA stellenweise auch geschehen ist. Hier in Europa ist es dazu jedoch nicht gekommen, weil

- die sogenannte Vollmotorisierung an den Kosten scheiterte,

- in Europa und speziell in der Schweiz nicht genügend Raum für den IV zur Verfügung stand, weder für den fließenden noch für den ruhenden Verkehr und

- die auf den ÖV angewiesenen Rest-Nutzergruppen am Ende des Booms immer noch zu gross waren.

Heute sprechen manche von einer bevorstehenden Revolution durch die „Mobilität 4.0“ (siehe Abbildung in der Mitte). Dieses Schlagwort beinhaltet neben dem autonomen Fahren (AF) die neuen Mobilitätskonzepte, die dank Digitalisierung und der Vernetzung aller Menschen untereinander möglich geworden sind. Dazu kommt das kurzfristige Reise-management, das nahezu in Echtzeit funktioniert und damit unmittelbar auf die aktuelle Situation reagieren kann.

Die Frage ist, ob der Hype um die Mobilität 4.0 auch tatsächlich in einen Boom mündet, wie ihn die Älteren von uns mit der Massenmotorisierung vor 50 Jahren bereits erlebt

haben. Und wie wird die Mobilität 4.0 den Strassenverkehr verändern, der ja heute bei weitem noch nicht so systematisiert ist wie die Eisenbahn?

Der Vergleich zeigt tatsächlich, dass das System Eisenbahn als höher entwickelt erscheint als der Strassenverkehr (siehe Abbildung unten):

- Während Spurführung und -haltung auf der Strasse bis heute manuell durch den Fahrer und über den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn sichergestellt werden, ist diese Funktion bei Bahnsystemen durch die Kontaktmechanik zwischen Rad und Schiene quasi natürlich automatisiert.
- Der klassische Strassenverkehr funktioniert überwiegend nach dem Prinzip „Sehen und gesehen werden“. Während einfache Bahnsysteme wie zum Beispiel Tram mit diesem Prinzip auch zurecht kommen, verfügen Vollbahnen heute über ausgeklügelte Sicherungssysteme. Sie gewährleisten nach über 100 Jahren Perfektionierung eine hervorragende Betriebssicherheit.

- Gestützt auf einen Fahrplan sorgt die zentrale Betriebssteuerung für eine hohe Auslastung der Infrastruktur auch im Regelbetrieb. Damit sind Bahnbetriebe sehr wirtschaftlich und wesentlich kostengünstiger als der Strassenverkehr, dessen Infrastruktur auf kurzzeitige, heute kaum regelbare Verkehrsspitzen ausgelegt sein muss.

Auto reloaded



- **Individuelles Reiseerlebnis;** Reisezeit wird nutzbare Zeit
- Autonome Fahrzeuge und erste Swarm-Car-Flotten
- Intelligentes Verkehrsmanagement verhindert Staus

Spend less, share more



- **Günstige Mobilitätskonzepte** als Norm
- Sharing aller Art (P2P, B2B/C), PKW-Besitz geht zurück
- Konzentration auf Kernleistung („No-frills“), z. B. Fernbus

Digitale Dominanz



- **App** bucht **intermodale** Reise via Kunden-Präferenzen
- Proaktive, dynamische Reise-(um-)buchung
- Verkehrs-/Kapazitätsmanagement intelligent und intermodal

P2P Peer-to-Peer, Car-Sharing unter Privatleuten
 B2B/C Online-Handel zwischen Unternehmen beziehungsweise zu Kunden
 Swarm-Car öffentliches autonomes Auto

„Als System wird allgemein eine Gesamtheit von Elementen bezeichnet, die miteinander verbunden sind und dadurch als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können, als strukturierte systematische Ganzheit!“.

	Strassenverkehr klassisch	Vollbahnsystem	Strassenverkehr „Mobilität 4.0“
Spurführung	Kontakt Reifen-Fahrbahn	Kontaktmechanik Rad-Schiene	?
Spurhaltung	Fahrer über manuelle Lenkung		
Routenwahl	Manuelle Lenkung, z. T. unterstützt durch Markierungen und LSA	festgelegte Fahrwege über Weichen	
Abstandsregelung	Fahren auf Sicht, z. T. Lichtsignalanlagen (LSA)	Fahren im Raumabstand (Block)	
Betriebsleitung	./.	Fahrdienstleitung	
Fahrtüberwachung	keine, z. T. Assistenten	Zugsicherung	
Fahrtplanung	individuell durch Nutzer	Fahrplan, nur mit Vorausplanung	
Zugbildung	max. 2 Anhänger	nahezu beliebig	
Kommunikation	Autoradio	selektiver Zugfunk	
kurzfristige Kapazitätsplanung	Stauwarnung, z. T. dyn. Navisystem	Slotvergabe über Betriebsleitung	

Systematisierungsgrad

hoch
mittel
niedrig
nicht vorhanden

1 Wikipedia 2017

Die Idee vom autonomen Fahren

Wie stellt sich heute die Idee des autonomen Fahrens (AF) aus Sicht der Bahntechnik dar? Der Gedanke, Autos automatisch fahren zu lassen, ist bereits mehr als 100 Jahre alt (siehe Abbildung rechts oben). Die Frage, warum gerade jetzt ein regelrechter Hype zu diesem Thema ausbricht, ist gar nicht so leicht zu beantworten. Es scheint aber weniger die erreichte Leistungsfähigkeit von Computern und Bildverarbeitung zu sein, sondern die Erfahrung mit den immer häufiger verfügbaren Fahrer-Assistenz-Systemen, die dann auf ein vollständiges AF projiziert wird.

Der Einstieg grosser Technologiekonzerne wie Google und Apple scheint die Phantasien der Beobachter zusätzlich zu beleben. Die Bilder, die Experten und auch Laien vom AF haben, unterscheiden sich besonders bezüglich

- der unterstellten Autonomiestufe (siehe Abbildung rechts in der Mitte),
- der damit möglichen Einsatzfelder des AF sowie
- dessen sinnvoller Integration in den klassischen Strassenverkehr.

Auch sollen mit dem AF verschiedene Ziele erreicht werden:

- Der Sicherheitsgewinn steht an erster Stelle. Hier wird mit einer Reduktion der Unfallhäufigkeit um bis zu 95 % gerechnet.¹

Oben: Schlagwort „Mobilität 4.0“ – ausgewählte Inhalte (Quelle: DB Mobility Logistics AG).

Unten: Vergleich der Systematisierung – aktueller Stand (Tabelle: S. Karch).

Planung der Interstate Highways der USA mit Einrichtung zum autonomen Fahren (Quelle: Seielstad, B.G., 1938).

- Es folgt der Komfort für den nun freigestellten Fahrer, der sich anderen Tätigkeiten oder sogar den Mitreisenden widmen kann.
- Dahinter liegt dann die erwartete bessere Ausnutzung des Strassenraums.

Weil mit dem AF die bisher gewohnte enge Bindung zwischen Fahrzeug und Fahrer in den Hintergrund tritt, sind verschiedene Anwendungsfälle des Autos denkbar. Diese werden im Fachjargon als „Use-Cases“ bezeichnet und decken verschiedene Einsatzgebiete ab (siehe Abbildung unten).²

Welcher dieser Use-Cases einmal relevant werden wird, ist noch offen. Doch haben die verschiedenen Zielgruppen wohl jeweils „ihren“ Use-Case vor Augen:

- Für die heutigen Autofahrer ist der „Autobahn-pilot“ am besten vorstellbar, da er doch lediglich eine Perfektionierung des aktuellen Fahrerassistenz darstellt. Seit der Deutsche Bundestag diesem Use-Case bereits im März 2017 einen juristischen Rahmen gegeben hat, scheint es hier nur noch die Zulassungsbarriere zu geben.³

- Das Valetparken (Begriff bisher „Parken hier durch einen beauftragten Dienstleister“) ist als Zusatzfunktion zu verstehen, die einen langsamen fahrerlosen Transfer zu näheren Parkflächen beinhaltet.

- Erst der „Vollautomat“ bietet das AF für alle Einsatzfelder an, verfügt aber immer noch über einen Fahrerplatz und könnte somit die Anpassung des Strassennetzes an das AF begleiten. Geeignet ist daher dieser Use-Case für das klassische, einem Fahrer fest zugeordnete Privatauto.

Am revolutionärsten klingt der Use-Case „Vehicle-on-Demand“ (VoD), weil damit die Ablösung des klassischen Strassenverkehrs möglich würde. Bei Bedarf pausenlos aktive autonom verkehrende, öffentliche Autos würden

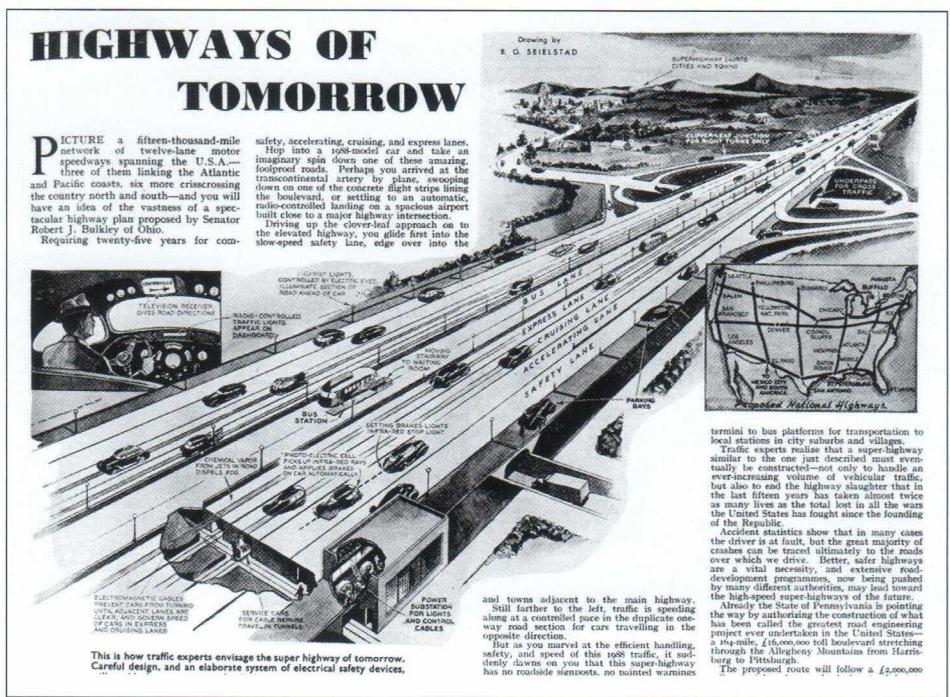
- die Kunden bei Bedarf abholen,
- zu ihrem Ziel bringen,
- danach selbsttätig zum nächsten Kunden fortfahren

und wären damit so vielseitig und nützlich wie der legendäre „Fliegende Teppich“. Mit dem damit möglichen weitgehenden Ersatz von Privatautos würde sich für den dann „modernen“ Strassenverkehr eine vollkommen neue organisatorische und wirtschaftliche Basis ergeben.

Zulassung und Sicherheit des autonomen Fahrens

Wenden wir uns jetzt der technischen Gestaltung des AF zu. Eisenbahningenieure haben meist mit komplexen Systemen zu tun, die sich dazu noch ständig verändern. Aus dieser Erfahrung sind sie es gewohnt, Entwicklungen bis zum Ende zu denken, um dann die wichtigen Fragen zu stellen, so auch für die bevorstehende Einführung des AF:

- Nach welchen Vorgaben werden autonome Fahrzeuge gestaltet und gebaut? Wie sieht die Spezifikation für das AF aus und wer formuliert sie?
- Ist diese Spezifikation unabhängig vom Strassennetz? Oder beinhaltet sie Festlegungen, die dann möglicherweise Rück-



wirkungen auf die Infrastruktur haben? Benötigt also nur das Fahrzeug eine Freigabe für das AF oder auch das entsprechende Strassennetz?

- Wie funktioniert der Übergang vom herkömmlichen Strassenverkehr zum AF? Mit getrennten Bereichen oder im Mischverkehr? Derzeit geht wohl die Mehrheit vom

Mischverkehr aus. Dann stellt sich aber die Frage nach den Rückwirkungen auf den vorhandenen Betrieb:

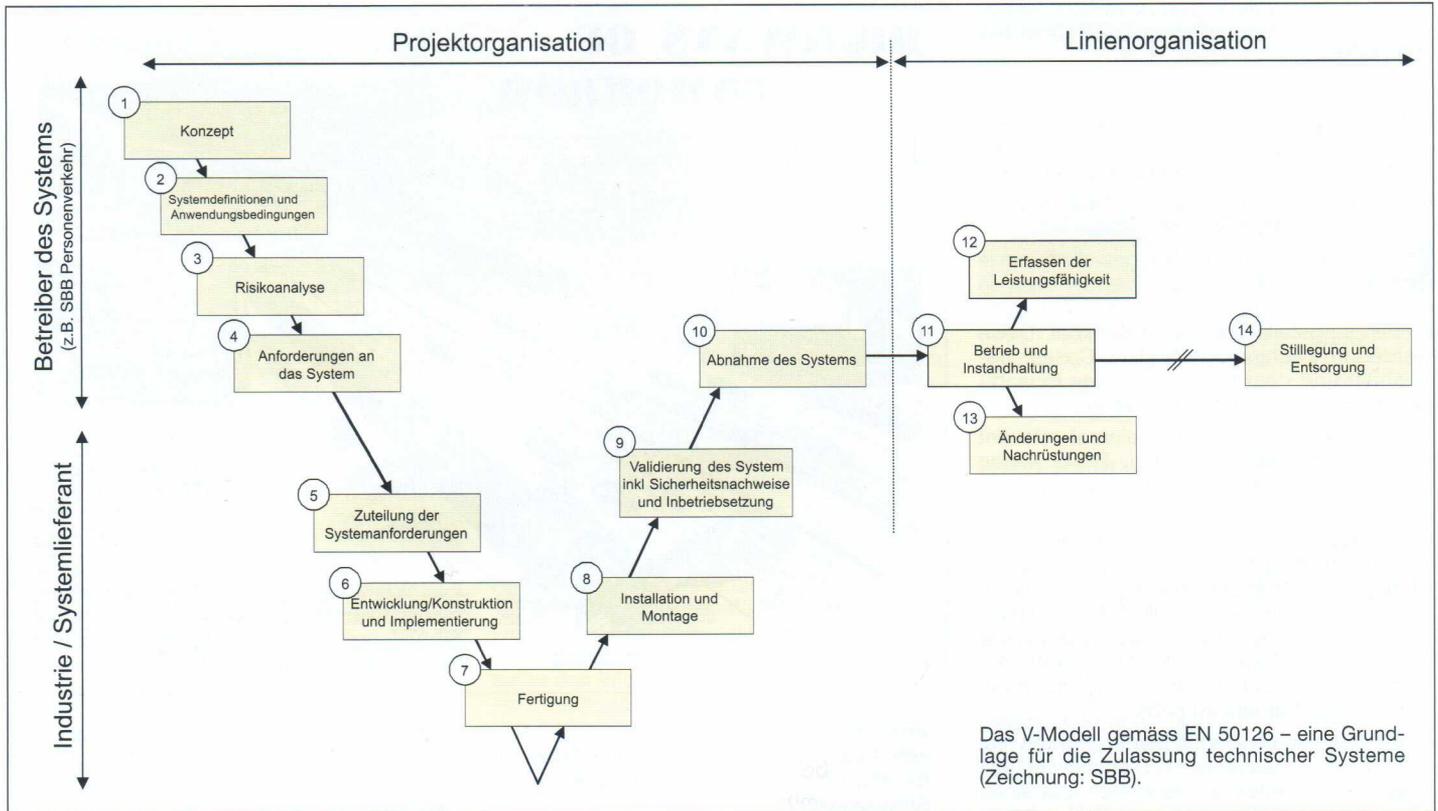
- Müssen hier Regeln angepasst werden? Wahrscheinlich ja. Wer stellt sonst zum Beispiel bei einer Panne eines autonomen Fahrzeugs das Warndreieck auf, wie es heute vorgeschrieben ist?

SAE-Stufe	Name	Beschreibung	Quer- und Längsführung	Umgebungsbeobachtung	Rückfallebene
Stufe 0	keine Automation	Der Fahrer fährt eigenständig, auch wenn unterstützende Systeme vorhanden sind.	Fahrer	Fahrer	keine
Stufe 1	Assistenzsysteme	Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs- oder Querverführung.	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer
Stufe 2	Teilautomatisierung	Ein oder mehrere Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs- und gleichzeitiger Querverführung.	System	Fahrer	Fahrer
Stufe 3	Bedingte Automatisierung	Autonomes Fahren mit der Erwartung, dass der Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen muss.	System	System	Fahrer
Stufe 4	Hochautomatisierung	Automatisierte Führung des Fahrzeugs mit der Erwartung, dass der Fahrer auf Anforderung zum Eingreifen reagiert. Ohne menschliche Reaktion steuert das Fahrzeug weiterhin autonom.	System	System	System
Stufe 5	Vollautomatisierung	Vollständig autonomes Fahren, bei dem die dynamische Fahraufgabe unter jeder Fahrbahn- und Umgebungsbedingung wie von einem menschlichen Fahrer durchgeführt wird. Fahrerloses Verkehren möglich.	System	System	System

Oben: Klassifizierung nach Automatiestufen (Tabelle: S. Karch nach Norm SAE J3016).

Use-Case	Autobahn-pilot mit Verfügbarkeits-fahrer	Autonomes Valet-Parken	Vollautomat mit Verfügbarkeits-fahrer	Vehicle-on-Demand (VoD)
Merkmal				
Maximale Geschwindigkeit	120 km/h	30 km/h	240 km/h	120 km/h
Fahrerplatz	ja	nein	ja	nein
Fahrerplatz	besetzt	unbesetzt	besetzt	nicht vorhanden
Strassentyp	nur Autobahn	Parkplatz, Parkhaus, Stadtstrassen	alle Strassen mit AF-Freigabe	mindestens ein komplettes Teilnetz (z. B. eine Stadt)
Rückfallebene	Verfügbarkeits-fahrer	keine	Verfügbarkeits-fahrer	Leitstelle

Rechts: Anwendungsfälle des autonomen Fahrens, sogenannte Use-Cases (Quelle: Maurer, 2015).



– Wie müssen autonome Fahrzeuge nach aussen gekennzeichnet werden? Denn ein fahrendes Auto ohne Fahrer, wie es auf abschüssigen Strassen ja schon zu beobachten war, ist heute immer noch ein Alarmierungsgrund!

- Müssen Nachschulungen der Verkehrsteilnehmer stattfinden? Bestimmt, aber vielleicht reicht hier ein Rundschreiben.
- Sind Nachrüstungen an den Bestandsfahrzeugen erforderlich? Die Antworten hierauf sind unterschiedlich und wohl von der erwarteten Dauer der Migration abhängig.

Aus Sicht des Bahntechnikers ist besonders die Zulassung des autonomen Fahrens sehr spannend. Überschaubare technische Systeme – wie in der Bahntechnik üblich – werden meist nach dem V-Modell, einem für die Software-Herstellung entwickelten Verfahren – zugelassen (siehe Abbildung oben). Voraussetzung hierfür ist eine Zusammenstellung der einzelnen Anforderungen (1 bis 7), die zunächst als Entwicklungsvorgaben dienen und später im Zulassungsverfahren nachgewiesen werden (10 bis 13). Sind alle Bedingungen erfüllt, kann die Betriebserlaubnis erteilt werden.

Dagegen wird es wohl unmöglich sein, alle Anforderungen für das Verhalten eines autonomen Fahrzeugs zusammenzustellen. Die Liste der Fahrsituationen, die zu beschreiben sind, ist nahezu unbegrenzt und könnte somit nicht abgeschlossen werden. Referenzfälle wären eine Alternative, wenn sie so gewählt werden könnten, dass sie nachweislich für alle anderen Verkehrssituationen repräsentativ sind. Dies setzt jedoch eine breite Datengrundlage voraus.

Ersatz für systematische Tests nach dem V-Modell könnten Felderprobungen sein, in denen das neue System weiträumig mit realen Anforderungen konfrontiert wird, dabei aber noch keine Sicherheitsverantwortung übernimmt. Ein solches Verfahren ist als „Schat-

tenbetrieb“ bereits aus der Bahntechnik bekannt und wurde hier beispielsweise vor der Einführung neuer Zugsicherungssysteme angewendet. So könnte die Bewährung des AF im täglichen Strassenverkehr geprüft werden, das heisst

- die Einhaltung aller Regeln des Strassenverkehrs im Normalbetrieb und vor allem
- das Erreichen des vorgegeben Sicherheitsniveaus auch in allen ausserordentlichen Verkehrssituationen.

Voraussetzungen für einen Sicherheitsnachweis durch einen Schattenbetrieb sind

- eine ausreichend grosse Anzahl von Fahrzeugen der Bestandsflotte, die über die komplette für das AF nötige Sensorik verfügen, sowie
- ein Strassennetz mit Verkehrsregeln, die für den künftigen Einsatzfall repräsentativ sein müssen.

Entsprechend hat Elon Musk im Herbst 2016 angekündigt, dass alle neuen Fahrzeuge der Marke Tesla demnächst mit voller AF-Sensorik ausgestattet und damit zum „Schattenmodus“ befähigt sein sollen.⁴ Danach werden alle im Betrieb erhobenen Sensordaten zur Weiterentwicklung der für die künftig autonome Steuerung erforderlichen Algorithmen verwendet, auch wenn diese beim manuellen Fahren gewonnen wurden.

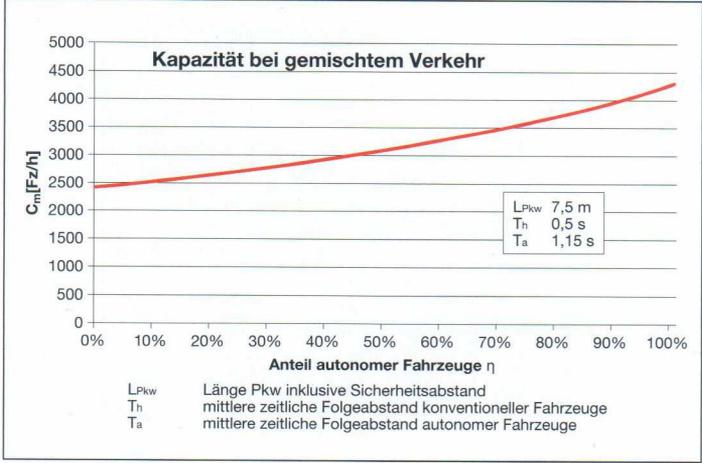
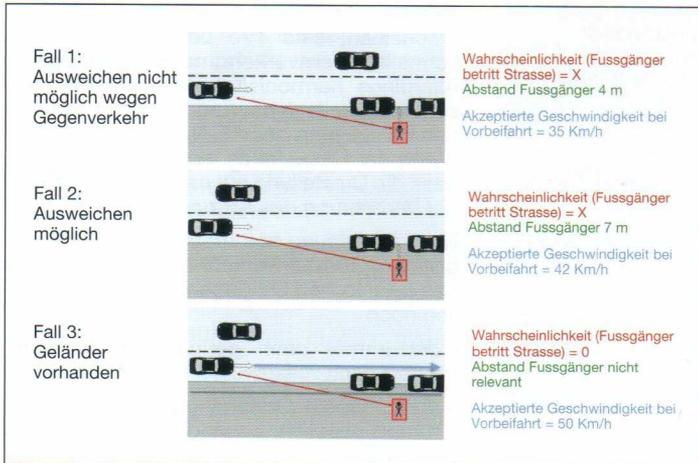
Das autonome Fahrzeug ist in der Lage, sein aktuelles Risiko in jeder Verkehrssituation zu bestimmen, durch eine angepasste Fahrgeschwindigkeit zu regulieren und damit ein vorgegebenes Sicherheitsziel ständig einzuhalten. Solche Sicherheitsziele liegen in der Luftfahrt und bei der Eisenbahn für die einzelnen Teilsysteme schon seit geraumer Zeit vor und bestimmen die Systemgestaltung massgeblich. In diesem Sinne gehorcht das autonome Fahrzeug einem von seinem Entwickler absichtlich gewählten Algorithmus, womit sein Verhalten vorhersehbar wird. Genau dies

ist im heutigen Strassenverkehr aufgrund des unkalkulierbaren Verhaltens der Fahrer und der verteilten Verantwortung bisher unmöglich.⁵

Wie funktioniert das Erreichen eines vorgegebenen, gleichbleibenden Risikoniveaus? In diesem kleinen Beispiel betritt ein Fussgänger „unvorhergesehen“ die innerörtliche Strasse (siehe Abbildung rechts oben). Ziel des hier gewählten Risikoniveaus sei das Überleben dieses Menschen. Also darf die Aufprallgeschwindigkeit nur so hoch sein, dass die Kollision für den Passanten wahrscheinlich überlebbar ist, also etwa 28 km/h.

Das autonome Fahrzeug beginnt mit einer Gefahrenbremsung erst dann, wenn der schon vorher identifizierte Fussgänger sich plötzlich Richtung Fahrbahn bewegt. Je grösser sein Abstand zum Fahrweg des Autos ist, desto mehr Bremsweg steht zur Verfügung, um die Zielgeschwindigkeit von 28 km/h noch zu erreichen. Das autonome Auto wird also bestrebt sein, durch Vergrösserung seines Abstands zum Fussgänger (Fall 2) die Geschwindigkeit risikoneutral erhöhen zu können. Fall 3 zeigt deutlich, dass das AF vom Zustand der Infrastruktur nicht unabhängig ist: Wird der Fussgänger durch ein Gelände am Betreten der Strasse gehindert, kann das Auto seine Geschwindigkeit ungefährlich noch weiter steigern. Nach den Regeln dieses Beispiels gilt umgekehrt: An unübersichtlichen Stellen ohne Absperrung und ohne Seitenabstand dürfte immer nur mit einer maximalen Geschwindigkeit von 28 km/h gefahren werden.

Die Festlegung des gesellschaftlich akzeptierten Risikos für das AF wird zu interessanten öffentlichen Diskussionen führen. Die Bandbreite, die zur Wahl steht, ist relativ gross. Die Risikoakzeptanz zwischen ÖV und IV variiert aktuell um den Faktor 10. Dementsprechend ist die Wahrscheinlichkeit, als Autoinsasse auf der Strasse ums Leben zu kommen, in der Schweiz 13mal höher, in Deutschland sogar



Einhaltung eines vorgegebenen Risikoniveaus in unterschiedlichen Verkehrssituationen. Ziel: Der Fussgänger soll überleben (Zeichnung: S. Karch).

Entwicklung der Kapazität bei gemischtem Verkehr auf Autobahnen (Quelle: B. Friedrich, 2015).

54mal höher als in der Eisenbahn.⁶ Auf der anderen Seite gibt es den Begriff „Vision Zero“, der einen Strassenverkehr ohne Verkehrstote beschreibt und inzwischen schon zur politischen Führungsgrösse geworden ist!⁷ Wie hoch darf das Risikoniveau im Strassenverkehr der Zukunft sein? Das Ergebnis dieser wichtigen gesellschaftlichen Diskussion ist in den Steueralgorithmen der autonomen Fahrzeuge zu berücksichtigen und wird deren Fahrgeschwindigkeiten direkt beeinflussen!

Betriebliche Effekte des autonomen Fahrens

Die Migration vom klassischen Strassenverkehr zum autonomen Fahren und ihre Auswirkung auf den Strassenbetrieb stehen hier im Vordergrund.

Bei kreuzungsfreiem Betrieb erlaubt das AF gegenüber dem konventionellen Betrieb eine Steigerung der Kapazitäten um bis zu 80 % (siehe Abbildung oben rechts). Wenn es dagegen Lichtsignalanlagen mit Sperrzeiten gibt, also vorzugsweise im Innenstadtbereich, beträgt die zu erwartende Steigerung nur 40 %. Beide Werte gelten für den ausschliesslichen Einsatz von autonomen Fahrzeugen; sie können also nur erreicht werden, wenn die Migration zum AF abgeschlossen ist und – ausser vielleicht Oldtimer – keine manuell gesteuerten Autos mehr im Verkehr sind.⁸

Der Weg bis dahin ist allerdings noch recht weit. Zwar werden bereits einzelne autonome Fahrzeuge im sogenannten „Laborbetrieb“ eingesetzt, natürlich immer mit Sicherheitsfahrer, mit denen die prinzipielle Eignung für das AF getestet und demonstriert wird, oft unter grosser Anteilnahme der Medien. Allerdings ist zu beachten, dass zur Anerkennung des erwähnten Schattenbetriebs zur Zulassung eine entsprechende Zahl an Fahrzeugen der Bestandsflotte auszurüsten ist, sicherlich mehrere Tausend. Je nach Zulassungsziel und -ergebnis muss zudem auch das Strassennetz genau erfasst, kartografiert und abschnittsweise für das AF freigegeben werden.

Das Zulassungsgebiet hängt zudem sowohl von der Vergleichbarkeit der Verkehrsregeln als auch von ihrer Befolgung im aktuellen Betrieb ab. Zum Beispiel unterscheidet sich das Verhalten der Verkehrsteilnehmer an einem

Fussgängerüberweg („Zebrastrifen“) in Zürich massiv von dem in Paris, obwohl die zugrundeliegenden Verkehrsregeln nahezu gleich sind! Wie bei der Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnnetzes muss also hier auch die Frage der Interoperabilität beantwortet werden.

Nicht zuletzt müssen noch die Verkehrsregeln an die Erfordernisse des AF angepasst werden. Das angestrebte Risikoniveau wird voraussichtlich auch zu Einschränkungen für das manuelle Fahren führen, vor allen Dingen durch die Begrenzung von Geschwindigkeiten.

Bald nach ihrer Betriebsaufnahme werden die autonomen Fahrzeuge sowohl einen direkten als auch einen indirekten Einfluss auf den Strassenverkehr haben:

- Sie werden aus Haftungsgründen und zur Einhaltung des erwähnten Risikoniveaus perfekte und damit auch besonders vorsichtige Verkehrsteilnehmer sein. So werden autonome Fahrzeuge nicht nur eine Vorbildfunktion ausüben, sondern durch ihre Fahrweise den manuellen Verkehr auch direkt beeinflussen.
- Autonome Fahrzeuge werden permanent alle intern und extern auftretenden Probleme an ihre Entwickler melden, allein schon aus Haftungsgründen. Damit können nicht nur die Strassen systematisch verbessert, sondern auch gefährdende Verkehrsteilnehmer automatisch identifiziert und angezeigt werden.

Im Rahmen der Migration zum AF sind auch technische, sogenannte Spin-off-Effekte auf den klassischen Strassenverkehr zu erwarten:

- Die Perfektionierung der Fahrassistenten wird auch ohne deren vollwertige AF-Zulassung fortschreiten. Hier ist bereits ein Graubereich entstanden, der gefährlich wird, wenn sich Fahrer zu sehr auf solche Systeme verlassen.
- Die Reduzierung der Geschwindigkeiten auch im manuellen Betrieb würde zur Angleichung an das AF führen und das abgestimmte Sicherheitsziel, wie zum Beispiel „Vision Zero“, schneller erreichen lassen.
- Besonders wertvoll für die optimale Ausnutzung des Strassenraums wäre die verbindliche Vorgabe von Routen, und zwar sowohl für die autonom geführten, als auch für die übrigen Fahrzeuge. Um Engpässe zu

vermeiden, können diese Routen inklusive freier „Slots“ (Lücken) dann vorausberechnet und vergeben werden. Das Motto lautet: Lieber eine Fahrt zehn Minuten später beginnen, als die gleiche Zeit im Stau zu verbringen. Denn Staus gehören sicherlich nicht mehr zu einem modernen Strassenverkehr!

Autonomes Fahren und Verkehrsmarkt

Die Einführung des autonomen Fahrens wird den Markt des Personenverkehrs je nach Nutzergruppe, die sich aus Autozugang und ÖV-Stammkundschaft definieren, unterschiedlich stark beeinflussen.

Die Frage, welche Nutzergruppen an welchen Use-Cases des AF besonderes Interesse haben werden, kann heute nur hypothetisch beantwortet werden (siehe Abbildung auf der nächsten Seite oben):

- Der AF-Assistent erhöht die Attraktivität des IV durch zeitweisen Entfall der Fahreraufgabe. Damit würden sich allenfalls Mitglieder der Gruppe II a für den vermehrten Einsatz des Autos entscheiden.
- Erst das autonom verkehrende Taxi (VoD) kann heutige ÖV-Nutzergruppen wirklich ansprechen und abwerben, weil es die klassischen Merkmale von ÖV und IV kombiniert: wettergeschützt und ohne Umsteigen von Tür zu Tür zu reisen, ohne dabei Fahreraufgaben übernehmen zu müssen. Die aktuell grösste Hürde, nämlich der Kauf eines Privatautos, entfällt.

IV und ÖV befinden sich seit Jahrzehnten im Wettbewerb. Hierbei ist der Zwang zur Erfüllung der aktiven Fahrerfunktion im Auto ein grosser Nachteil, aber gleichzeitig auch ein selten erwähnter Vorteil:

- Nachteile sind der Zwang zu Erwerb und Aufrechterhaltung der Fahrerkompetenz sowie der Aufwand an Lebenszeit zu deren Ausübung.
- Als Vorteil empfinden viele Menschen die aktive Teilnahme am „Erlebnisraum Strasse“.⁹ Ja, es gibt sie immer noch, die begeisterten Autofahrer! Das ist zwar irrational, gehört aber gerade deswegen zum Thema dieses Beitrags. Ob das AF bei diesem Teil der 100%-Autofahrer (Nutzergruppe II b) Akzeptanz findet, ist vollkommen offen. Denn mit Einführung des AF steht die ratio-

	Nutzergruppe	Auto	ÖV-Abo	Merkmale	Anforderungen	Use-Case AF
I y	Jugendliche unter 18	nein	ja regional	• „unfreiwillig“ ohne Pkw • nur ÖV-Nutzung und Mitfahrt...	• billig überall! hin! • Preis am wichtigsten.	VoD je nach Preis
I a	Nichtmobile Erwachsene	nein	nein	• einzelne ÖV-Fahrten, IV Mitnahme	• Restmobilität möglichst billig	VoD zu teuer?
I b	Mobile Erwachsene ohne eigenes Auto	nein	ja	• ohne Autozugang oder sogar Fahrerlaubnis • überwiegend ÖV-Nutzung, sonst noch Mitfahrt, Taxi, Carsharing...	• gutes ÖV-Angebot von Haus zu Haus in allen Relationen	VoD!
II a	Wahlfreie Verkehrs-Nutzer mit eigenem Auto	ja	ja	• verfügt über IV- und ÖV-Kenntnisse • überwiegend IV-Nutzung • rationale Verkehrsträgerwahl je nach Relation und Zeitlage, auch kombiniert • meist Pendler und Nutzer Fernverkehr. Traum der Verkehrsplaner!	• leistungsfähiges ÖV-Angebot • Fernverkehr und Ballungsraum • Preiswahrnehmung nach Grenzkosten	1. Autobahn-pilot? 2. VoD!
II b	100%-Autofahrer	ja	nein	• sieht Individualverkehr als Wert an sich • IV-Nutzung ist Bedingung für Mobilität! • keine ÖV-Kenntnisse • mittelfristig nicht offen für Verkehrsträger-Wettbewerb!	• Abgrenzungswunsch wegen Rauchen, Hygiene, sozialer Sicherheit... • Haus zu Haus ist MUSS • Freude am Fahren!	1. Autobahn pilot! 2. Voll-automat Anerkennung VoD als IV offen

Typische Nutzergruppen des Personenverkehrs (Tabelle: S. Karch).

E-Autos für den Nahverkehr als geeignet erscheinen, sind ihre Leistungen für den schnellen Fernverkehr noch ungenügend. Allerdings harmonisiert das mögliche Geschwindigkeitsniveau um 120 km/h gut mit den Fähigkeiten des AF. Nach dem aktuellen Stand der Dinge ist es recht wahrscheinlich, dass die Umstellung auf nachhaltige Antriebe der Verbreitung des AF zuvorkommt.

Nach Einführung des AF und der Elektromobilität im Strassenverkehr bleiben als Vorteile des klassischen ÖV gegenüber dem IV letztlich noch

- der immer noch geringere Platzbedarf, selbst nach vollständiger Umstellung auf AF,
- die grössere Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen, besonders durch Eis und Schnee,
- die höhere mögliche Systemgeschwindigkeit bis zu 300 km/h sowie, ganz wichtig,
- der geringere Leistungs- und Energiebedarf: das Verhältnis zwischen Bahn und Auto beträgt hier etwa 1:3, und zwar bezogen auf einen Sitzplatz!

Inwieweit der vierte Gesichtspunkt bei der Bereitstellung nachhaltiger Energie für den Verkehrssektor eine Rolle spielt, wird von deren Preisentwicklung abhängen.

Der wichtigste Punkt bei der Betrachtung der Wirkung des AF auf den Verkehrsmarkt ist die Preisberechnung: Die aktuellen wirtschaftlichen Probleme des ÖV sind weniger auf seine Systemgestaltung, sondern vielmehr auf eine zum IV unterschiedliche Preisberechnung zurückzuführen. Während alle Öffentlichen Verkehrsmittel ihre Preise auf Vollkostenbasis berechnen müssen, berücksichtigt der Autobesitzer nur seine Grenzkosten, weil er ja die Investition „Auto“ schon getätigt hat. Da sich der ÖV hier anpassen muss, um wettbewerbsfähig zu sein, entsteht ein „natürliches“ Defizit. Rabattkarten und Abonnemente mildern diesen Effekt nur geringfügig.

Voraussetzung für eine nur an Route und Verkehrszweck orientierte, freie Wahl des Verkehrsmittels wäre ein Vollkostenpreis ohne Rabatte für alle Verkehrsträger. Ein dafür erforderliches Verbot von Privateigentum an

nale Seite der Ortsveränderung im Vordergrund, werden die Handlungsfreiräume der Verkehrsteilnehmer reduziert und damit die Attraktivität des „Erlebnisraums Strasse“ zunehmend eingeschränkt. In gleicher Weise stellt sich die Frage, ob der Ersatz von Privatautos durch „öffentliche“ Autos (VoD) als echter Individualverkehr anerkannt werden wird.

Bei der vergleichenden Betrachtung von IV und ÖV im Zusammenhang mit Einführung des AF fallen weitere grundsätzliche Unterschiede auf. Die Ästhetik des Reisens im Auto ist im Vergleich zum Schienenverkehr beeinträchtigt, und zwar aus mehreren Gründen:

- Die geringe Sitzhöhe und der niedrige Fahr-gastraum verlangen eine spezielle Sitzposition und lassen ein Aufstehen während der Fahrt nicht zu. Genau um dieses Problem zu mildern, gibt es seit geraumer Zeit einen Trend zum Fahrzeugtyp SUV¹⁰.
- Der Fahrkomfort im Auto ist deutlich niedriger. Eine hohe Schwingungsbeanspruchung in vertikaler Richtung infolge Fahrbahnqualität und Federung sowie die ebenfalls deutlich höheren Kurvenbeschleunigungen lassen sich von vielen Menschen nur ertragen, wenn sie sich auf den Fahrprozess konzentrieren. Andernfalls droht hier Übelkeit.

Das Problem ist aber erkannt: Die Fahrzeughersteller untersuchen Konzepte wie neu-

artige Lenksysteme oder Einsatz der Neigetechnik nach Vorbild der Bahntechnik, um so die physische Beanspruchung der Insassen zu reduzieren.

Obwohl die Kapazität des Strassenverkehrs ausserorts dank AF prinzipiell verdoppelt werden kann, bleibt sie aber immer noch deutlich hinter den Werten der öffentlichen Verkehrsmittel zurück. Beispielsweise würde die Einführung autonomer Fahrzeuge den aktuellen Leistungsfaktor pro Fahrspur beziehungsweise Gleis zwischen S-Bahn und Strasse von 35 auf immer noch 20 vermindern, was die aktuelle Situation nicht grundlegend verändert: Während der IV sich eher für schwach besiedelte Gebiete („die Fläche“) eignet, findet der ÖV sein Hauptanwendungsgebiet weiterhin im Ballungsraum. Eventuell können die letzten Verastelungen der liniengeführten ÖV-Netze durch autonom geführte Fahrzeuge ersetzt werden.

Ein weiterer Punkt darf nicht ausser acht gelassen werden, auch wenn nicht direkt zum Thema des AF gehörig: Der bevorstehende Traktionswechsel im Strassenverkehr. Die Elektromobilität, im ÖV seit über 100 Jahren weitgehend umgesetzt, soll in den nächsten drei Jahrzehnten auf den Strassenverkehr ausgedehnt werden, um die Nachhaltigkeit bezüglich Klimaschutz auch hier zu gewährleisten. Während die heute angebotenen

	Strassenverkehr klassisch	Vollbahnsystem	Strassenverkehr „Mobilität 4.0“
Spurführung	Kontakt Reifen-Fahrbahn	Kontaktmechanik Rad-Schiene	Kontakt Reifen-Fahrbahn
Spurhaltung	Fahrer über manuelle Lenkung		automatische Steuerung
Routenwahl	Manuelle Lenkung, z. T. unterstützt durch Markierungen und LSA	festgelegte Fahrwege über Weichen	automatische Steuerung, unterstützt durch C2X
Abstandsregelung	Fahren auf Sicht, z. T. Lichtsignalanlagen (LSA)	Fahren im Raumabstand (Block)	
Betriebsleitung	./.	Fahrdienstleitung	ja, nur für Intervention
Fahrtüberwachung	keine, z. T. Assistenten	Zugsicherung	selbsttätig gemäss Risikoakzeptanz
Fahrtplanung	individuell durch Nutzer	Fahrplan, nur mit Vorausplanung	individuell durch Nutzer, durch C2X geteilt
Zugbildung	max. 2 Anhänger	nahezu beliebig	mit Platooning entspr. Zulassung
Kommunikation	Autoradio	selektiver Zugfunk	C2C und C2X
kurzfristige Kapazitätsplanung	Stauwarnung, z. T. dyn. Navisystem	Slotvergabe über Betriebsleitung	

C2C – Kommunikation zwischen Autos

C2X – Kommunikation zwischen Auto und Infrastruktur

Systematisierungsgrad
hoch
mittel
niedrig
nicht vorhanden

Vergleich der Systematisierung – Stand nach Einführung von „Mobilität 4.0“ (Tabelle: S. Karch).

individuellen Verkehrsmitteln wie Flugzeug, Yacht oder gar Auto ist in unserem Rechtssystem aber nicht abbildbar. Erst mit Einsatz eines „fliegenden Teppichs“, also dem öffentlichen Auto (VoD), würde dieser Weg legal geöffnet: Das Auto-Eigentum wird durch VoD-Leistungen ersetzt, die auf Vollkostenbasis abgerechnet werden. So würden alle Verkehrsträger auf gleicher Preisbasis operieren und wären dann auch ohne wirtschaftlichen Nachteil für den Nutzer frei kombinierbar.

Die Bahn als Vorbild für den modernen Strassenverkehr

Wir haben nun gesehen, dass der bisher eher ungeordnet ablaufende klassische Strassenverkehr dank Digitalisierung und Vernetzung zu einem vollwertigen Verkehrssystem heranreifen kann. Seine Systemelemente werden eng verknüpft sein und miteinander kommunizieren, also nicht nur die Fahrzeuge untereinander, sondern auch mit Infrastruktur und Betriebsleitung. Es wird eine zentrale Kapazitätssteuerung geben, und sogar die Zugbildung wird der Eisenbahn abgeschaut und im Strassengüterverkehr unter dem Begriff „Platooning“¹¹ umgesetzt. Damit erreicht die Systematisierung des Strassenverkehrs nun fast den Grad der Eisenbahn (siehe Abbildung links unten).

Was kann nun die Bahntechnik zur systematischen Entwicklung des modernen Strassenverkehrs beitragen? Vielleicht durch Beantwortung von Fragen, die uns bereits schon gestellt wurden:

- Wer wird als Systemführer ernannt? Wie ist die Aufgabenteilung zwischen Hersteller und Behörden?
- Wer kümmert sich herstellerübergreifend um die Systemgestaltung des modernen Strassenverkehrs? Wer sorgt für die Bildung eines verknüpften Gesamtsystems aus Technik und Betrieb? Hier geht es zum Beispiel um die Verbindung von Fahrzeug zu Infrastruktur („C2X“) oder auch von Fahrzeug zu Fahrzeug („C2C“) inklusive aller Dateninhalte und Protokolle.
- Wer lässt das autonome Fahren zunächst prinzipiell zu, aber auch für jede einzelne Anwendung? Wer gibt das Strassennetz für das AF jeweils frei, pauschal oder auch jedes einzelne Netzelement? Wer übernimmt die Sicherheitsverantwortung und die zugehörige Überwachung? Die Dieselkrise in Deutschland hat gezeigt, dass diese Frage nicht trivial ist.
- Wer sorgt für die Anpassung der Verkehrsvorschriften an die Anforderungen des AF? Wie wird der Dialog zwischen Systementwicklern und Verkehrsverwaltung geführt?
- Wer sorgt für die Anpassung des Bestandsystems an das AF, zum Beispiel durch Einbau von Datenrekordern in alle Altfahrzeuge sowie durch die Nachschulung des „Personals“, sprich der Autofahrer und der übrigen Verkehrsteilnehmer?
- Wer übernimmt die Funktion der Betriebsleitung, die sich um die Kapazitätsverteilung im Strassennetz oder auch die Intervention nach Havarien von autonomen Fahrzeugen kümmert?
- Und besonders wichtig, nicht nur in Europa, sondern weltweit: Wie werden die Fragen der Interoperabilität zwischen den Staaten koordiniert?

Die Bahntechnik kann hier deswegen als Vorbild dienen, weil sie bei der Beantwortung

dieser Fragen schon eine gewisse Erfahrung gesammelt hat: So sei als Beispiel das europäische Zugsicherungssystem ETCS genannt, für das in der Schweiz die SBB als Systemführer benannt wurden. Diese haben dann in enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr die Entwicklung des Systems mit den übrigen Beteiligten durchgeführt und gleichzeitig mit den europäischen Partnern koordiniert. Obwohl diese Aufgabe alles andere als einfach war und ist, konnten die jeweiligen Meilensteine zumeist pünktlich erreicht werden, zuletzt zum Beispiel die Eröffnung des Gotthard-Basistunnels (GBT) inklusive ETCS.

Aber auch innerhalb der Bahnen ist die Systemgestaltung aus einer Hand inklusive Koordination von Technik, Betrieb und Verkehr täglich geübte Praxis, alles ebenfalls unter strikter Sicherheitsorientierung. Auch hier sind die Erfolge bemerkenswert.

Aus Kundensicht kann damit die These durchaus lauten: „Autonomes Fahren macht die Strasse zur Bahn ohne Schienen!“, denn:

- Die Insassen müssen sich nicht mehr aktiv – sei es als Fahrer oder sogar „Mitfahrer“ – für ihre Beförderung einsetzen, sondern können ihre Zeit für anderes verwenden – wie in der Bahn.
- Wir gewinnen ein Verkehrssystem, das durch Algorithmen bestimmt wird und dessen Verhalten sich – von Störungen abgesehen – weitestgehend vorherberechnen lässt – wie bei der Bahn.
- Wir sind damit in der Lage, dem Strassenverkehr ein beliebiges Risikoniveau vorzugeben, unter Umständen auch die „Vision Zero“ – wie bei der Bahn.
- Der „Erlebnisraum Strasse“ wird zunehmend reduziert und nach vollständiger Umstellung auf das AF irgendwann ganz geschlossen. Die Nutzung des Strassenverkehrs folgt dann überwiegend rationalen Kriterien – wie bei der Bahn.

Ausblick

Die Einführung der zum Begriff „Mobilität 4.0.“ gehörenden Merkmale wie autonomes Fahren und das damit mögliche einem „Fliegenden Teppich“ vergleichbare Angebot führen voraussichtlich zur grössten Umgestaltung des Strassenverkehrs nach der Massenmotorisierung vor 50 Jahren.

Der Strassenverkehr verzichtet dafür auf seinen althergebrachten Bestandsschutz und wird sich einer neuen Bewertung unterziehen müssen. Danach wird er zum voll vernetzten System mit Kommunikation der Teilnehmer untereinander und mit der Betriebsleitung.

Der moderne Strassenverkehr kann sich damit in den Kreis durchdachter und abgestimmter Verkehrssysteme einreihen, der heute im wesentlichen aus der Eisenbahn und der Verkehrsflufflight gebildet wird.

Dank der Algorithmen, denen das AF unterliegt, wird der Strassenverkehr der Zukunft grösstenteils vorherbestimmt und kann daher mit strikter Sicherheitsorientierung ablaufen. Das Risikoniveau der anderen Verkehrssysteme ist somit grundsätzlich erreichbar.

Setzt sich das „öffentliche Auto“ (VoD) im Bereich des IV durch, indem sich der Besitz von Privatautos merkbar reduziert, wird die Preisberechnung auf Vollkostenbasis für alle Verkehrsträger zum Standard werden. Damit wird die kombinierte Nutzung von IV und klas-

sischem ÖV erleichtert. Mögliche Substitutionen durch autonome Fahrzeuge speziell in Randregionen werden durch die verbesserte Funktion des Gesamtsystems mehr als ausgeglichen werden.

Nach Entfall der aktuell noch vorhandenen Systembrüche wird die neu gewonnene Synergie zwischen modernem Strassenverkehr und öffentlichem Verkehr die Gestaltung eines nachhaltigen Verkehrssektors in Europa erheblich vereinfachen.

¹ Dudenhöffer, F.: „Das selbstfahrende Auto wird die Welt massiv verbessern. 95 Prozent der 1,2 Millionen Verkehrstoten jährlich sterben durch menschliches Verschulden. Autonomes Fahren kann diese Rate massiv reduzieren.“ Handelszeitung, 28.3.2017.

² Maurer, M., u. a.: Autonomes Fahren – Use-Cases des autonomen Fahrens, S. 9 ff. Berlin, 2015.

³ Deutscher Bundestag: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Strassenverkehrsgesetzes. Drucksache 18/11776 vom 29.3.2017.

⁴ „Nächstes Jahr fährt das Auto alleine nach New York“. FAZ vom 20.10.2016.

⁵ Schnieder, E.: Ziele der Verkehrssicherheit des Strassen- und Schienenverkehrs im rechtlichen und technischen Kontext, S. 9 f. Erlangen, 2017.

⁶ Zeilstra, P.: Sicherheit im öffentlichen Verkehr. Vortrag vom 23.8.2013.

⁷ Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, Zeilen 3651 bis 3660. Berlin, 7.2.2018.

⁸ Maurer, M., u. a.: Autonomes Fahren – Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge, S. 331 ff. Berlin, 2015.

⁹ Eigenzitat: „Erlebnisraum Strasse“ steht für Bewegung, aktive Mobilität, kurzfristige Handlungskompetenz bezüglich Sachwerten und Risiken, kurz: „Freude am Fahren“.

¹⁰ SUV: Abkürzung für englisch: sport utility vehicle, wird durch „Geländewagen“ nicht genau übersetzt.

¹¹ Platooning: Bezeichnung eines Systems, bei dem mehrere Fahrzeuge, speziell Lkw, hintereinander fahren können, wobei die Fernsteuerung der folgenden Fahrzeuge vom führenden übernommen wird.

Bereits erschienen:

Ekkehard Gärtner

Rekordfahrten auf Schienen 1825 bis 2015

Spitzengeschwindigkeiten auf Gleis, auf Luftkissen und mit Magnetschwebetechnik



152 Seiten, 235 Fotos, 49 Grafiken, 19 Tabellen, 21 x 28 cm, Katalogpreis Fr. 74.80 / EUR 49,80. Direktbezugspreis: Fr. 59.80 / EUR 49,80

Rekordfahrten bringen der Bahn und alternativen spurgeführten Fahrzeugen immer neue Geschwindigkeits-Höchstwerte.

Das Buch vermittelt einen umfassenden Überblick zu diesem Thema.

Bestellcode: GÄRTREKO

Minirex AG, Verlag und Versandbuchhandlung
Maihofstrasse 63, CH-6002 Luzern
Tel. +41 / (0)41 / 429 70 70
Fax +41 / (0)41 / 429 70 77
Mail: verkauf@minirex.ch
Internet: www.minirex.ch