

1 Flotten selbstfahrender Elektrotaxis - Eine Szenarioanalyse

Dr. Alexander Hars (Inventivio GmbH, email: ahars@inventivio.com)

1.1 Rascher Fortschritt bei autonomen Fahrzeugtechnologien

Noch vor wenigen Jahren wurden Fahrzeuge, die selbständig und ohne menschlichen Eingriff am normalen Straßenverkehr teilnehmen können als Visionen einer fernen Zukunft angesehen. Inzwischen reißen die Erfolgsmeldungen und Ankündigungen nicht ab: Google ist mit seinen autonomen Fahrzeugen bereits mehr als eine Millionen Kilometer im Testbetrieb gefahren und will die Einsatzreife dieser Fahrzeuge bis spätestens 2018 erreichen. Nissan plant, die ersten voll-autonomen Fahrzeugmodell ab 2020 anzubieten. Für Continental ist autonomes Fahren ein Kernelement seiner strategischen Ausrichtung; ab 2020 sollen die ersten Systeme autonomes Fahren ermöglichen; bis 2025 sollen sie ohne jede Aufsicht durch den Fahrer fahren können. Auch Mercedes erwartet die ersten autonomen Fahrzeuge ab 2020. Volvo plant für 2017 einen Flottenversuch mit autonomen Fahrzeugen in Göteborg. In Milton Keynes (Großbritannien) sollen bis 2017 100 autonome Elektrofahrzeuge Personen zwischen Hauptbahnhof und Innenstadt befördern.

Selbstverständlich sind diese Ankündigungen mit Vorsicht zu genießen. Sie zeigen aber, dass selbstfahrende Fahrzeuge nicht mehr als Vision betrachtet werden, sondern dass sie bereits in wenigen Jahren Realität werden könnten. Die Technologie hat erhebliche Vorteile und großen gesellschaftlichen Nutzen: Sie wird Verkehrsunfälle erheblich reduzieren, die Verkehrsinfrastruktur weniger belasten, Staus verringern, Personen ohne Führerschein - z.B. Behinderten und Alten - individuelle motorisierte Mobilität ermöglichen, Logistikkosten senken sowie der Wirtschaft zahlreiche Impulse für neue Geschäftsmodelle geben.



Die Technologie könnte jedoch auch zu erheblichen Umwälzungen führen, bei denen neue Industriezweige entstehen und manche alte Branchen vergehen. Besonders groß könnten die Veränderungen in dem Industriezweig sein, von

dem diese Veränderungen ausgehen - der Autoindustrie. Bisher sind sich die meisten Experten einig, dass es einige Jahrzehnte dauern wird, bis selbstfahrende Fahrzeuge einen wesentlichen Teil des Fahrzeugbestandes erreichen werden. Allerdings beruht diese Einschätzung auf einer Extrapolation der aktuellen Situation und verstellt den Blick darauf, dass die Entwicklung auch ganz anders verlaufen könnte. Ziel dieses Artikels ist es, die impliziten Annahmen die diesem Konsens-Szenario zu Grunde liegen, herauszuarbeiten, kritisch zu beleuchten und alternative Entwicklungspfade herauszuarbeiten.

Im folgenden wird daher auf ein bewährtes Instrumentarium zur Vorbereitung auf mögliche künftige Entwicklungen zurückgegriffen: Die Szenarioanalyse. Bei dieser Methode werden denkbare künftige Entwicklungen in Form unterschiedlicher, prägnanter Szenarien herausgearbeitet. Dabei ist nicht so entscheidend ob die Zukunft exakt dem einen oder dem anderen Szenario gleichen wird. Wichtiger ist, dass die Szenarien unterschiedliche Entwicklungen und mögliche Zusammenhänge deutlich machen, die helfen können, Veränderungen zu erkennen, zu verstehen und sich auf sie einzustellen. Oft können bereits kleine Maßnahmen in der Gegenwart dazu führen, dass eine Organisation viel besser für alternative künftige Entwicklungen aufgestellt ist.

Im nächsten Abschnitt wird daher zunächst das Konsens-Szenario der inkrementellen Entwicklung und Einführung autonomer Technologien im Fahrzeug analysiert. Danach wird ein grundlegend anderes Szenario betrachtet, bei dem die Technologie sich rascher und nach einem ganz anderen Muster ausbreitet. Schließlich vergleichen wir beide Szenarien und diskutieren die Folgen für die Automobilindustrie.

1.2 Evolution von Fahrerassistenzsystemen

Seit mehr als 100 Jahren hat sich die Automobilindustrie als Innovationsmotor bewährt. Alle Teile des Fahrzeuges wurden immer wieder verändert und optimiert. Gurte, Airbags, Antiblockiersysteme sind nur einige Beispiele für Innovationen, die zunächst in Oberklasse-Fahrzeugen eingeführt wurden, bis sie nach und nach in allen Fahrzeugen zum Standard wurden. Dieser Diffusionsprozess ist häufig untersucht worden, kann durchaus 20 bis 40 Jahre in Anspruch nehmen, und liegt auch vielen Planungsprozessen der Automobilindustrie zugrunde.

Die Ausbreitung autonomer Fahrzeugtechnologien könnte ebenfalls nach diesem Muster ablaufen. Bereits heute finden sich Assistenzsysteme, die das Einparken erleichtern, eine Notbremsung durchführen oder in Staus teilautonom fahren

können in Fahrzeugen der Oberklasse; ein Teil dieser Funktionen ist auch bereits in Fahrzeugen der Mittelklasse verfügbar. In den nächsten Jahren könnte die Anzahl von Assistenzsystemen weiter wachsen. Ein Autopilot könnte zunächst auf der Autobahn die Fahraufgabe bei günstigen Bedingungen für längere Strecken übernehmen - wobei dem Fahrer zunächst noch eine Überwachungsfunktion bliebe. Später könnte dieses Assistenzsystem dann vollständig ohne Rückgriff auf den Fahrer operieren. Nach und nach würde die Leistungsfähigkeit derartiger Assistenzsysteme wachsen, bis sie schliesslich auch innerstädtisch und in allen Verkehrssituationen eingesetzt werden könnten.

Selbstverständlich würde der Zeitraum, in dem sich diese Innovationen in allen Fahrzeugen durchsetzen würden, einige Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Aufgrund kleiner Stückzahlen in der Oberklasse wäre die Technologie in den ersten Jahren noch recht teuer; mit wachsenden Stückzahlen würden auch die Kosten für Sensoren, Elektronik und Software deutlich fallen.

Auch wenn dieses Szenario auf den ersten Blick überzeugen mag, so werden bei näherem Hinsehen doch erhebliche Schwachpunkte in den Annahmen deutlich:

1) Inkrementelle Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme

Wie wir an andere Stelle detaillierter ausgeführt haben¹ ist die Vorstellung, dass sich Fahrerassistenzsysteme graduell zu immer höherer Autonomie weiterentwickeln können wirklichkeitsfremd: Alle bisherigen Fahrerassistenzsysteme werden nur fallweise für kurze Zeiträume aktiv (Einparken, Notbremsung, Spurhaltewarnung und -korrektur usw.). Zwischen diesen Systemen und Assistenzsystemen, die die Fahraufgabe kontinuierlich übernehmen gibt es große Hürden. Denn alle kontinuierlich eingesetzten Systeme müssen auch ohne menschlichen Eingriffe fehlerfrei arbeiten und auch seltene, ungewöhnliche Extremsituationen korrekt bewältigen.

Aufgrund der recht begrenzten Sensorreichweite und -auflösung ist es z.B. extrem schwierig, einen gestürzten Motorradfahrer, der in einer Kurve auf der Autobahn liegt, zu erkennen und dann richtig zu reagieren. Die Schwierigkeit liegt dabei nicht nur darin, solche Fälle korrekt zu erkennen; auch Fehlerkennungen, bei denen z.B. ein Zweig auf der Autobahn als liegender Motorradfahrer klassifiziert wird, dürfen nicht auftreten, da eine Vollbremsung für einen Zweig schwerwiegende Auffahrunfälle durch die nachfolgenden Fahrzeuge zur Folge haben könnte.

Jede systematische Risikoanalyse wird zeigen, wie komplex manche Situationen auch auf der vermeintlich so abgegrenzten Autobahn sein können. Fußgänger

und Radfahrer findet man dort z.B. selten aber immer wieder und die Autopiloten müssen daher damit entsprechend umgehen können. Es ist daher kaum möglich ein Auto erst einmal mit einem eingeschränkt leistungsfähigen Autopilot/Fahrerassistenzsystem fahren zu lassen und dann nach und nach die Fähigkeiten zu erweitern! Der Autopilot kann erst dann aktiviert werden, wenn wirklich gewährleistet ist, dass er allen Standard- aber auch allen ungewöhnlichen, seltenen Situationen gewachsen ist!

2) Graduelle Diffusion der Technologie

Die Vorstellung, dass sich autonome Technologien in einem jahrzehntelangen Prozess nach und nach in allen Fahrzeugen verbreiten, beruht auf den Erfahrungen mit vielen anderen Innovationen. Der Prozess dauerte jeweils so lange, weil die Neuerungen kaum einen Einfluss auf den Ersatzzeitpunkt für ein Altfahrzeug hatten: Die Anzahl an Personen, die ihr Altfahrzeug vorzeitig abstießen, weil sie unbedingt ein neues Fahrzeug mit einer bestimmten Innovation (elektrische Fensterheber, Antiblockiersystem, Airbag) haben wollten, war sehr klein. Den bisherigen Innovationen in der Automobilindustrie wurden von den Alteigentümern daher kein besonders hoher Zusatznutzen eingeräumt, der Anreiz zu einem vorzeitigen Umstieg auf ein neues Modell hätte sein können.

Diese Situation ändert sich, wenn Fahrzeuge völlig autonom fahren. Solche Autos können den Fahrer von einer sehr zeitintensiven Aufgabe entlasten. Bei einer durchschnittlichen Unterwegszeit von ca. 60 Minuten pro Tag verbringt der Fahrer das Äquivalent von 45 Arbeitstagen pro Jahr am Steuer! Viele Personen (und Unternehmen) werden die Möglichkeit, über mehr von der doch sehr begrenzten Ressource Zeit verfügen zu können, sehr hoch bewerten. Selbst für Personen, die eine zusätzliche Stunde produktiver Zeit bzw. Freizeit, nur mit einem Wert von z.B. 10 Euro bewerten, rechnet sich das vorzeitige Ersetzen eines Altfahrzeugs sehr schnell: Können im Jahresdurchschnitt 45 Minuten pro Tag an Zeit gewonnen werden, so ergibt sich daraus ein jährlicher Zusatznutzen von 2700 Euro: Dies steigert den Anreiz, das alte Fahrzeug zum Restwert zu verkaufen und durch ein neues Fahrzeug mit der Fähigkeit, autonom zu fahren, zu ersetzen. Hinzu kommt die höhere Sicherheit und niedriger Unfallrate der Fahrzeuge, wodurch die Versicherungsbeiträge sinken. Diese deutlichen Vorteile erhöhen die Nachfrage: Für viele Käufer wird die Technologie zu einem entscheidenden Kaufkriterium, sodass sie rascher aus dem Premium-Markt in die Mittelklassewagen vordringen wird, als dies bisher bei automobilen Innovationen der Fall war. Der klare und täglich erfahrbare Zusatznutzen voll-autonomes Fahren wird dafür sorgen, dass sich diese Technologie viel rascher durchsetzen wird als die anderen automobilen Innovationen.

1.3 **Selbstfahrende Elektrotaxis: Revolution im Nahverkehr**

Bei autonomen Fahrzeugen besteht die grundlegende Neuerung in der Fähigkeit völlig unabhängig von Menschen - auch leer - zu fahren. Die knappe Ressource des Fahrers stellt keinen Engpass mehr dar. Ganz neue Formen von straßengebundener Mobilität werden nun möglich. In diesem zweiten Szenario gehen wir daher von dem Grundgedanken der Entkopplung von Fahrzeug und Mensch aus. Anstatt wie im ersten Szenario, einen möglichen Entwicklungspfad zu verfolgen, gehen wir nun umgekehrt vor: Wir nehmen zunächst an, dass alle technologischen Probleme des autonomen Fahrens gelöst sind und sich die Technologie durchgesetzt hat. Dann beschreiben wir ein Szenario, das in sich stabil ist und in dem Mobilität unter Ausnutzung der autonomen Funktionalität völlig neu gestaltet ist.

Erst im Anschluss analysieren wir die Entwicklungspfade, die zu diesem Szenario führen könnten. Durch diese Vorgehensweise sind wir nicht gezwungen, mehr oder weniger realistische Annahmen über schwer vorhersehbare Einzelentwicklungen zu treffen. Anstelle dessen spiegelt unser Vorgehen die Gedankenwelt vorauschauender, langfristig denkender Investoren wieder. Das Szenario wird zeigen, dass autonome Technologien auch Neueinsteigern erhebliche Chancen bieten, um sich eine führende Position auf dem Markt für individuelle Mobilität zu sichern.

1.3.1 **Grundzüge autonomer Fahrzeugflotten**

Wir betrachten nun ein Szenario, bei dem alle Probleme des autonomen Fahrens gelöst sind. Die Algorithmen haben sich bewährt und können auch mit seltenen und sehr komplexen Situationen gut umgehen; die Fahrzeuge machen deutlich weniger Fehler als der durchschnittliche menschliche Fahrer. Die Sensoren sind ausgereift; auch die Kosten für Sensoren und Rechnerleistung sind stark gefallen. Die Rechtssysteme sind inzwischen so angepasst worden, dass autonome Fahrzeuge auch leer fahren dürfen.

In allen Städten und mittel- bis stark bevölkerten Regionen haben sich neue Mobilitätsdienstleister etabliert, die Flotten autonomer Fahrzeuge betreiben. Ein Anruf bzw. eine Reservierung per Smartphone genügt und innerhalb kürzester Zeit erscheint ein selbstfahrendes Fahrzeug, das den Kunden zu seinem Ziel befördert, ihn dort absetzt und danach für den nächsten Kunden bereitsteht. Die Suche nach einem Parkplatz gehört der Vergangenheit an. Ein Führerschein ist nicht länger Voraussetzung für individuelle Mobilität; auch Behinderte, Ältere

und Junge können diese Form der Mobilität nutzen. Eltern spielen nicht mehr Taxifahrer für Ihre Kinder. Durch die bessere Auslastung und nutzungsoptimierte Auslegung der Fahrzeuge sind die Kosten dieser Mobilitätsdienstleistungen - wie wir weiter unten zeigen werden - niedriger als bei selbstgenutzten Fahrzeugen. Viele Haushalte verzichten daher auf ein eigenes Fahrzeug.

Der Betrieb von autonomen Fahrzeugflotten hat sich zu einem vollwertigen Industriezweig mit eigenen Strukturen, Prozessen und Methoden entwickelt, die im Wettbewerb immer weiter optimiert werden. Die Aufgabe einer Fahrzeugflotte ist es, die Nachfrage nach Mobilität optimal zu bedienen. Dazu ist es notwendig, den Mobilitätsbedarfe in einer Region in seiner zeitlichen und örtlichen Struktur vorherzusagen, die optimale Flottengröße und Zusammensetzung des Fahrzeugpools zu ermitteln, sowie Mobilitätsprodukte zu entwickeln, die den Bedürfnissen der Menschen und den Eigenschaften individueller Mobilitätsbedarfe am besten gerecht werden.

Ein Beispiel für die zeitliche Varianz der Mobilitätsbedarfe ist die im Tagesablauf stark schwankende Nachfrage. Die größte Nachfrage gibt es zu den Stoßzeiten am Morgen; sie sind der wichtigste Faktor für die Bestimmung der Flottengröße. Erfahrung bezüglich der Nachfrage zu Stoßzeiten, gute Vorhersagealgorithmen, die auch örtliche Besonderheiten und Ereignisse berücksichtigen sowie die Kenntnisse der Bewegungsverläufe sind wichtig, um eine verlässliche Dienstleistung mit guten Reaktionszeiten zu gewährleisten.

Flottenbetreiber haben Angebote und Preisstrukturen entwickelt, die unterschiedliche Präferenzen ihrer Kunden berücksichtigt. Die Fahrzeuge sind in den Stoßzeiten etwas teurer. Nach Mitternacht sind die Preise am günstigsten. Zu allen Zeiten hat der Kunde auch die Möglichkeit kostengünstiger zu fahren, wenn er bezüglich des Abfahrtszeitpunktes flexibel ist oder wenn er zulässt, dass das Fahrzeugs unterwegs noch andere Personen aufnimmt bzw. absetzt.

Die Flotten sind aufgrund ihrer Kostenstruktur, Flexibilität (sie können dem Kunden für jeden Mobilitätsbedarf (Nah/Fernverkehr, Einzel- oder Gruppenfahrt, Transporte) ein passendes Fahrzeug bereitstellen) und Entlastung des Kunden bezüglich aller Verwaltungsaspekte des eigenen Autos (Kauf, Reparatur, Parkplatz, Wartung, usw.) rasch gewachsen. Ein großer, wachsender Teil der individuellen Mobilität wird über diese Flotten abgewickelt.

Diese Entwicklung hat nicht nur Vorteile. Da bei den Flotten Netzwerkeffekte greifen besteht die Gefahr, dass sich hier natürliche Monopole entwickeln. Staatliche Aufsicht sorgt daher dafür, dass Unternehmen miteinander konkurrieren, überwacht die Preissetzung und verhindert Auswüchse, die sich in mono-

polartigen Strukturen ergeben könnten. Das Roaming (z.B. die Nutzung fremder Fahrzeugflotten in anderen Städten) ist klar geregelt; es gibt auch gesetzliche Regelungen bezüglich der Kundenrechte, die z.B. jedermann Zugang zu diesen Mobilitätsangeboten garantieren und die den Datenschutz sicherstellen sollen.

1.3.2 Flotten für Ann Arbor, Singapur und Austin

Der Erfolg des zweiten Szenarios hängt entscheidend davon ab, dass Flotten autonomer Fahrzeuge individuelle Mobilität zu deutlich niedrigeren Kosten zur Verfügung stellen können als dies bei selbstgenutzten Fahrzeugen möglich ist. Daher müssen wir die möglichen Einsparungseffekte näher analysieren. Verschiedene Autoren haben Teilaspekte dieses Problems bereits untersucht. Eine Kernfrage besteht darin, wie viele Fahrzeuge benötigt werden, um den Mobilitätsbedarf einer bestimmten Region zu decken.

Am Earth Institute der University of Columbia wurde 2013 eine Studie veröffentlicht, die am Beispiel der amerikanischen Stadt Ann Arbor untersuchte, wie sich autonome Fahrzeugflotten im Nahverkehr auswirken würden.² Die Stadt verfügte 2009 über ca. 285.000 Einwohner und ca. 200.000 PKWs. Davon wurden 120.000 vorwiegend für örtliche Fahrten mit einer Gesamttagesstrecke von weniger als 110 km eingesetzt. Pro Tag wurden in Ann Arbor ca. 528.000 lokale Fahrten mit einer mittleren Weglänge von 9,3 km sowie 1,4 Insassen pro Fahrzeug durchgeführt. Eine Simulation der Fahrzeugbewegungen ergab, dass eine Flotte von 18.000 Fahrzeugen ausreichen würde um selbst bei Stoßzeiten alle lokalen Mobilitätsbedarfe abzudecken und jedem Kunden innerhalb von 60 Sekunden ein Fahrzeug zur Verfügung zu stellen. Auch geringere Flottengrößen wären möglich, wobei sich dann die Wartezeiten erhöhen würden. Der Fahrzeugbestand sank dadurch um einen Faktor von fast sieben, was erhebliche Auswirkungen auf die Mobilitätskosten je Fahrzeug-Kilometer hätte: Bei einer Flotte von 18.000 Fahrzeugen würden die Vollkosten von 0,29 Euro je km um 31% auf 0,20 Euro je km fallen. Bei dieser Berechnung orientierten sich die Autoren an den Kostenerhebungen des amerikanischen Automobilclubs für 2012. Sie betrachteten zusätzlich den Fall, dass die Fahrzeugflotte aus einem Mix von vorwiegend kleinen ultra-leichten Elektrofahrzeugen sowie einigen Mittelklassefahrzeugen besteht. Dadurch würden die Kosten weiter auf auf 0,07 Euro je km sinken.³ Ihre Annahmen bezüglich der Anschaffungskosten und des Leergewichts der Elektrofahrzeuge von weniger als 500kg sind jedoch sehr optimistisch.

Eine weitere Studie⁴ untersuchte am Beispiel von Singapur, wie eine Flotte selbstfahrender Fahrzeuge ausgelegt sein müsste, um den gesamten

Mobilitätsbedarf aller Einwohner abzudecken. Die Autoren berechneten auf der Basis der Verkehrsstatistik von Singapur für 2008, dass 300.000 Fahrzeuge ausreichend wären, um persönliche Mobilität mit gerade noch akzeptablen Wartezeiten zu ermöglichen. Im Gegensatz zu der Columbia Studie berücksichtigten sie dabei die typischen Bewegungsprofile im Tagesablauf. Dadurch, dass z.B. morgens ein viel höherer Bedarf für Fahrten in die Stadt hinein besteht als für Fahrten aus der Stadt heraus, ergeben sich zusätzliche Leerfahrten, wenn Fahrzeuge wieder aus der Innenstadt in die Peripherie zurückfahren müssen, um die nächsten Kunden aufzunehmen. Die Autoren ermittelten einen Leerfahrtenfaktor von 1,37. Die Flottenfahrzeuge müssen für jeden Transportkilometer noch zusätzlich 370m leer zurücklegen.

Allerdings geht die Studie vereinfachend davon aus, dass Personen immer nur einzeln befördert werden. Gerade in Mega-Cities gibt es jedoch ein hohes Maß in gleichgerichteten Bewegungsmustern sodass hier die Anzahl der Fahrzeuge deutlich zu hoch eingeschätzt werden. Darüber hinaus ist es wenig sinnvoll, die Flottengröße mit dem tatsächlichen Fahrzeugbestand in Singapur zu vergleichen. Aufgrund des gut ausgebauten öffentlichen Nahverkehrs, hatte Singapur im Jahr 2008 bei 4,8 Mio Einwohnern nur eine sehr kleine Flotte von 476.634 Privatautos⁵; das entspricht einem Verhältnis von 1 PKW je 10 Einwohnern. Zum Vergleich: in den USA waren im Jahr 2008 bei 307 Millionen Einwohnern⁶ fast 197 Millionen PKWs⁷ registriert; auf drei Einwohner kommen dort zwei PKWs. Die Studie schätzt ebenfalls die Mobilitätskosten pro Kilometer für Singapur sowie für eine amerikanische Stadt. Sie kommt zum Ergebnis, dass ein herkömmliches privat genutztes Fahrzeug in den USA im Jahr 2013 etwa 0,39 Euro⁸ pro km an Kosten verursachte (inklusive Parkkosten). Eine autonome Fahrzeugflotte könnte dieselbe Mobilität zu Kosten von 0,33 Euro pro km anbieten. Die Kosten für die Fahrzeugflotte sind zwar um 13% niedriger. Der geringe Unterschied lässt sich aber darauf zurückführen, dass die Autoren annehmen, dass Flottenfahrzeuge nur eine sehr kurze Lebensdauer von 2,5 Jahren besitzen, keine Funktionsoptimierung der Fahrzeuge betrachten und die Zusatzkosten für die autonomen Technologien mit 11,000 Euro pro Fahrzeug relativ hoch ansetzen.

Eine weitere Studie wurde an der University of Texas durchgeführt.⁹ Sie nutzte das für Austin verfügbare regionale Mobilitätsmodell um die Bedingungen für eine autonome Fahrzeugflotte in einem Gebiet von 20 x 39 km im Zentrum des Großraum zu analysieren. Dem Planungsmodell wurden etwa 57,000 repräsentative Mobilitätsbedarfe für einen Werktag entnommen, was etwa 1,3 Prozent der gesamten lokalen Mobilitätsbedarfe entspricht, und die Bewegungen der Fahrzeugflotte berechnet. In einem ersten Schritt wurde zunächst die Flottengröße ermittelt: 2.217 Fahrzeuge würden dazu ausreichen. Jedes Flottenfahrzeug könnte

damit etwa 8,5 Privatfahrzeuge ersetzen. Dann wurden die Fahrzeugbewegungen simuliert. Die durchschnittlichen Wartezeiten betragen weniger als 50 Sekunden; selbst zu Spitzenzeiten lagen sie noch unter 2 Minuten. 99,5% der Kunden mussten weniger als 10 Minuten warten. Die kurzen Wartezeiten wurden auch dadurch erreicht, dass leere Fahrzeuge bedarfsgerecht positioniert wurden. Der Leerfahrtenfaktor betrug 18,5%, ohne die bedarfsgerechte Anpassung der Fahrzeugpositionen wäre er um 3% niedriger. Die mittlere Weglänge betrug 7,7km, die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug 44 km/h. Rechnet man die Flottengröße auf den gesamten Mobilitätsbedarf in der Zentralregion hoch, so werden etwa 170.000 Fahrzeuge benötigt.

1.3.3 Kostenstrukturen: Durchbruch für Elektromobilität

Die drei Studien zeigen das Potential von Flotten selbstfahrender Fahrzeuge, Mobilität zu niedrigeren Kosten und mit raschen Reaktionszeiten zur Verfügung zu stellen. Die ökonomischen Zusammenhänge werden allerdings nur sehr vereinfacht betrachtet. Im folgenden betrachten wir daher die verschiedenen Faktoren, die die Rentabilität dieser Fahrzeugflotten steigern:

1.3.3.1 Optimierung der Lebensdauer

Die betriebswirtschaftliche Nutzungsdauer eines Investitionsgutes ergibt sich durch den Vergleich der Reparatur- und Wartungskosten mit den Kosten für eine Ersetzung - wobei u.U technischer Fortschritt zu berücksichtigen ist. Bei einem Fahrzeug sind die einzelnen Komponenten sehr unterschiedlichen Alterungsprozessen unterworfen. Während die Karosserie nur sehr geringem Verschleiß ausgesetzt ist, müssen Reifen¹⁰ relativ häufig ausgewechselt werden. Die Lebensdauer verschiedener Antriebe unterscheidet sich stark. Verbrennungsmotoren altern sehr viel stärker als Elektromotoren und sind technisch viel komplexer. Im einfachsten Fall werden Elektrofahrzeuge über Radnabenmotoren angetrieben, in denen ein einstufiges Getriebe bereits eingebaut ist und die sogar die Bremsfunktion mit übernehmen können. Ein Verbrennungsmotor besteht demgegenüber aus viel mehr Komponenten. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren sind Elektromotoren fast verschleißfrei. Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten Komponenten eines Fahrzeugs mit ihren typischen Kostenanteilen¹¹ (ohne Endmontage) und Schätzwerten für die Lebensdauer sowie Schätzwerten für den Antrieb bei Elektromobilen. Nimmt man einen für Zweisitzer eher hohen Anschaffungspreis von 12.000 Euro je Fahrzeug sowie eine Lebensfahrleistung der Privatfahrzeuge von 250.000km bzw. eine jährliche Fahrleistung der Flottenfahrzeuge von

80.000km an - was einer eher geringen Auslastung von unter 25% entspricht, und rechnet 2.000 Euro für die autonome Steuerung hinzu, so ergeben sich die in der letzten Spalte angezeigten Baugruppenkosten in Euro-Cent je km.

Tabelle 1.1 Lebensdauer und Kostenanteile von Fahrzeugkomponenten

Baugruppe	Kosten €	Lebensdauer	Flottenauto Ct/km	Privatauto Ct/km
Karosserie	3.240	20-30 Jahre	0,20 .. 0,13	1,30
Außenausstattung	1.320	10 Jahre	0,17	0,53
Reifen	360	60.000km	0,60	0,60
Elektrik	1.680	15 Jahre	0,14	0,67
Innenausstattung	2.760	4 Jahre	0,86	1,10
Autonome Steuerung	2.000	10 Jahre	0,25	0,80
Antriebsstrang				
- Verbrennungsmotor	2.640	250.000km	1,11	1,11
- Elektromotor	2.400	2.000.000km	0,09	0,96
- Batterie (2014)	10.000	200.000km	5,00	5,00
- Batterie (2017)	5.000	500.000km	1,00	2,50

Die Tabelle zeigt, dass wesentliche Einsparungen möglich sind, wenn die Nutzungsdauer sich an den langlebigen Baugruppen orientiert und Baugruppen mit kürzerer Lebensdauer regelmäßig ausgewechselt bzw. erneuert werden. Die relativ kurze Lebensdauer der Innenausstattung bezieht sich auf den nutzungsintensiven Einsatz im Flottenbetrieb, bei der das Interieur häufiger erneuert werden muss (Manche Innenkomponenten, wie die Türen haben eine längere Lebensdauer). Ein Elektroantrieb wirkt sich sehr positiv auf die Kostenstruktur aus; ein kritischer Faktor ist jedoch die Batterielebensdauer. Bei einem Batteriepreis von 431 Euro pro kWh¹² und einer Kapazität von 24kWh (wie im Nissan Leaf) und einer Lebensdauer von 200,000 km betragen die reinen Batteriekosten 5,0 Cent pro km und übersteigen damit deutlich die Energiekosten. Die Anzahl der Ladezyklen wird zu einem entscheidenden Attribut: wenn die Anzahl der Ladezyklen auf 10.000 gesteigert werden kann, was in Experimenten mit aktu-

eller Chemie bereits gelungen ist¹³, so könnte die Reichweite der Batterien auf 1 Mio km gesteigert und ihre Kosten auf 1,0 Cent pro km gesenkt werden.

Tabelle 1.2 Kosten von privaten- und autonomen Flottenfahrzeugen

Kostenart	Privatauto		Flottenauto		
	Mittel Golf VII	Micro Toyota iQ	Benzin Toyota iQ	Elektro (2014)	Elektro (2017)
Baugruppen	9,6	6,1	3,3	7,3	3,3
Kraftstoff	9,2	7,9	7,9	3,5	3,5
Finanzierung	5,5	4,7	0,9	1,5	1,2
Wartung	3,2	2,0	1,1	0,8	0,8
Versicherung	1,7	2,1	1,1	1,1	1,1
Steuern, Gebühren	0,3	0,2	0,8	0,8	0,8
Summe	29,4	22,9	15,0	14,9	10,6

Die nächste Tabelle fügt die verschiedenen Kostenarten zusammen. Spalten 3 und 4 zeigen die Kosten je Kilometer für zwei unterschiedliche Klassen privat genutzter PKWs auf der Basis einer Lebensdauer von 250.000km und einer Jahresleistung von 20.000km für einen Wagen der Mittelklasse (VW Golf) bzw. 15.000 für einen Kleinstwagen (Toyota iQ). Die Werte orientieren sich an den Kostendaten des ADAC.¹⁴ Für die Benzinkosten wurden 1.55 Euro pro Liter Super angesetzt. Für die Stromkosten wurde der für Flotten von mehreren hundert Elektrofahrzeugen relevante EU-Durchschnittspreis für Großverbraucher von 0,1322 Euro je kWh angesetzt.¹⁵ Verluste beim Ladevorgang wurden über einen Wirkungsgrad von 80% berücksichtigt.

Die letzten drei Spalten zeigen die Kosten für Flottenautos. Um die Vergleichbarkeit zu erleichtern wurde angenommen, dass als Benzinfahrzeug ebenfalls der Toyota iQ eingesetzt wird. Durch die höhere Laufleistung sinken die Baugruppenkosten je Kilometer deutlich – was auch Auswirkungen auf Finanzierung und Wartung hat. Nur bei den Elektrofahrzeugen (2014) schlagen die derzeit noch hohen Batteriekosten verbunden mit geringer Zyklenzahl sehr stark zu Buche. Die Rechnung zeigt, dass beim derzeitigen Stand der Technik Batteriefahrzeuge selbst im Nahverkehr Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren kaum überlegen

sind (insbesondere wenn statt des Benziners ein Dieselfahrzeug für den Flottenbetrieb eingesetzt würde). Das ändert sich erst bei deutlich niedrigeren Batteriekosten verbunden und höherer Zyklfestigkeit (Elektro 2017).

Ohne Zweifel beruhen die Daten auf einer groben Analyse und einer ganzen Reihe von Annahmen. Erhebliche Unsicherheiten gibt es bei der Veranschlagung der Wartungskosten im Flottenbetrieb (über die Abschreibung und den Ersatz der Baugruppenkosten hinaus). Sie sind relativ vorsichtig mit etwa einem Drittel der Baugruppenkosten angesetzt. Auch die Versicherungskosten lassen sich nur schwer abschätzen; es ist zu erwarten, dass die Kosten deutlicher sinken als die hier angenommene Halbierung der Kosten pro km im Vergleich zu den aktuellen Versicherungskosten im Privatauto, denn es ist kaum vorstellbar dass autonome Fahrzeuge zugelassen werden könnten, die weniger als um einen Faktor 4 sicherer wären. Ein Leerfahrtenfaktor wurde nicht angesetzt weil dieses Phänomen auch heute bereits in Form unproduktiver Fahrten existiert (Parkplatzsuche, Wege zum Abholen bzw. nach dem Absetzen von Personen). Darüber hinaus wurden Optimierungsmöglichkeiten bei der Fahrzeuggestaltung nicht berücksichtigt. Durch Standardisierung sowie Verzicht auf Größe, Ausstattungsvarianten, Reichweite und Höchstgeschwindigkeit könnten die Kosten weiter deutlich gesenkt werden.

Insgesamt zeigt die Rechnung, dass autonome Fahrzeugflotten die Mobilitätskosten im Nahverkehr um einen Faktor 2 bis 3 erheblich senken könnten.

1.3.3.2 Funktionsoptimierung

Aktuelle PKWs sind Universalfahrzeuge, die für viele unterschiedliche Nutzungsszenarien eingesetzt werden können: Für die tägliche Fahrt zur Arbeit, für Fern- und Urlaubsfahrten, für den Transport von Gepäck und sperriger Gegenstände, für Fahrten in der Stadt und auf der Autobahn usw. Die dabei notwendigen Kompromisse führen dazu, dass unsere Fahrzeuge für die meisten Fahrten völlig überdimensioniert sind. Die durchschnittliche Anzahl der Personen in einem Fahrzeug liegt weit unter 2, doch 4 bis 5 Sitzplätze sind die Regel.

Die Betreiber von Fahrzeugflotten werden solche kostentreibenden Ineffizienzen vermeiden. Sie können die Zusammensetzung ihrer Flotte exakt auf die Mobilitätsbedarfe ausrichten und jedem Kunden ein Fahrzeug senden, das seinen spezifischen Anforderungen entspricht. Da die meisten Fahrten im Nahverkehr erfolgen und die Fahrzeuge dort vorwiegend mit ein bis zwei Personen belegt sind, können sie die Anzahl der Sitze und damit Größe und Gewicht deutlich verringern. Der Einsatz im Nahverkehr reduziert auch die erforderliche

Höchstgeschwindigkeit und Motorenleistung.

Wahrscheinlich wird das typische Flottenfahrzeug ein Zweisitzer sein. Wenn die autonome Technologie so weit vorangeschritten ist, dass kein menschliches Eingreifen mehr erforderlich ist, und auf Lenkrad, Gaspedal und Bremse verzichtet werden kann, könnten die Sitze raumsparend einander gegenüber angeordnet werden. Der gemeinsame Fußraum befände sich in der Mitte und kann gleichzeitig zum Abstellen von Gepäck verwendet werden. Aller Wahrscheinlichkeit wird dann nur noch eine Tür auf der rechten Seite benötigt werden. Die Maße der Zweisitzer könnten weniger als 3,0 x 1,1 x 1,7 Metern (Länge, Breite, Höhe) betragen. Es ist schwer vorherzusehen, inwieweit sich Einsitzer durchsetzen werden. Sie wären wahrscheinlich besonders für die Kurzstrecke geeignet und könnten dort Mobilität durch ihr geringes Gewicht und ihren niedrigen Reichweitenbedarf außerordentlich kostengünstig zur Verfügung stellen.

Selbstverständlich werden die Fahrzeugflotten auch über einen kleineren Anteil von Fahrzeugen mit mehr Sitzen sowie über Fahrzeuge mit größerer Reichweite verfügen. Insgesamt sinkt das Durchschnittsgewicht je Fahrzeug und verringert so die Anschaffungs- und Betriebskosten erheblich. Allein durch die Funktionsoptimierung der Fahrzeuge dürften sich eine Ersparnis von 15 bis 25 Prozent der Gesamtkosten je Kilometer erzielen lassen.

1.3.3.3 Elektrifizierung und energetische Effizienz

In beiden vorangegangenen Abschnitten spielte der Wechsel zu elektrischen Antrieben bereits eine Rolle. Zwar zeigte sich bei der Betrachtung der Lebensdauer bereits dass elektrische Antriebe deutlich besser abschneiden als Verbrennungsmotoren; allerdings erweist sich die Batterie als Kostentreiber der nur bei erheblichen Verbesserungen in der Anzahl der möglichen Ladezyklen sowie einer Halbierung der Anschaffungskosten wettbewerbsfähig wird.

Elektrische Antriebe haben jedoch weitere Vorteile, die bisher nicht berücksichtigt worden sind. Der Antriebsstrang kann viel kompakter ausgelegt werden; das Getriebe wird einstufig ausgelegt; auf eine Kupplung kann verzichtet werden. Elektromotoren können sogar in die Räder integriert werden und dort auch Bremsfunktionen übernehmen. Dadurch sinkt die Komplexität des Fahrzeugs erheblich und konstruktive Freiräume entstehen. Der einfachere Aufbau und geringere Platzbedarf des Antriebs erleichtert die Wartung.

1.3.3.4 Nachfrageoptimierung

Die Mobilitätskosten je km hängen entscheidend von der Fahrzeugauslastung ab.

Die Flottengröße wird wesentlich durch die Spitzenbelastung zu Stoßzeiten bestimmt. Eine Möglichkeit, die Flotte bei gegebenen Mobilitätsbedarfen zu verkleinern besteht darin, einen Teil der Mobilitätsbedarfe aus den Stoßzeiten heraus zu verlagern, indem den Kunde entsprechende Anreize z.B. über die Preisstruktur gegeben werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Nachfrage zu bündeln und mit einer Fahrt die Mobilitätsbedarfe mehrerer Kunden gleichzeitig abzudecken. Da das System ähnlich gerichtete Mobilitätsbedarfe kennt, kann es Zu- und Ausstiege auf dem Weg optimal organisieren und die Verzögerung für den Einzelnen gering halten. Es ist auch denkbar, dass zu Stoßzeiten für bestimmte Strecken Kleinbusse eingesetzt werden. Hier gibt es vielfältige Möglichkeiten, die sich kostenreduzierend für das Gesamtsystem auswirken und die wir heute kaum erahnen können.

1.3.3.5 Neue Geschäftsmodelle

Im Tagesverlauf schwanken die Mobilitätsbedarfe sehr stark. Zwischen 0 Uhr und 5 Uhr morgens wird fast keine Mobilität nachgefragt. Die Flottenanbieter werden daher bestrebt sein, komplementäre Nutzungsmöglichkeiten zu finden, um die Fahrzeuge in Zeiten geringerer Mobilitätsbedarfe besser auszulasten. So ist es durchaus denkbar, dass die Fahrzeuge nachts und außerhalb der Stoßzeiten Aufgaben der Güterverteilung wahrnehmen. Der dabei erzielte Deckungsbeitrag ermöglicht wiederum die weitere Senkung der Gesamtkosten je Personen-km.

1.3.4 Autonome Mobilität für den Fernverkehr

Im Nahverkehr spielen die Gesamtkosten der Fahrt für den Kunden eine relativ geringe Rolle. Er ist dort nicht sehr preissensitiv und wird kein großes Interesse für Vorschläge aufbringen, Kosten, die ohnehin nur im Cent- oder niedrigen Eurobereich liegen, über Mitfahrer und möglicherweise kleine Umwege weiter zu verringern.

Bei größeren Entfernungen ändert sich diese Einstellung, da die Gesamtkosten zum einen durch die Entfernung und zum anderen durch die Auslegung des Fahrzeugs für höhere Geschwindigkeiten und Reichweiten rasch wachsen. Dadurch steigt der Anreiz, sich die Kosten mindestens für einen Teil der Strecke mit anderen zu teilen. Da das Flottenmanagementsystem die Mobilitätsbedarfe seiner Kunden kennt, ist es leicht möglich, die Bedarfe zusammenzufassen, zeitlich aufeinander abzustimmen und dann die Kunden einem selbstfahrenden Bus zuzuführen, der einen Teil der Strecke extrem kostengünstig bewältigt. Die Reise kann dabei optimal und ohne große Wartezeiten organisiert werden: Zunächst

holt ein lokales Nahverkehrsfahrzeug den Kunden ab und bringt ihn in exakter zeitlicher Abstimmung zum Abfahrtsort des Busses. Am Zielort angekommen erwartet ihn ein weiteres Nahverkehrsfahrzeug mit dem er die letzte Strecke zurücklegt.

Durch diese Bündelung der Mobilitätsbedarfe und optimale Gestaltung des Übergangs zwischen Individual- und öffentlichem Verkehr werden die Kosten im Fernverkehr im Vergleich zu Fahrten mit dem eigenen PKW prozentual stärker sinken als im Nahverkehr. Gleichzeitig sinkt die Umweltbelastung durch den Fernverkehr erheblich.

1.3.5 Entwicklungspfade für autonome Fahrzeugflotten

Beim inkrementellen Szenario ergab sich, dass der entsprechende Entwicklungspfad mit großen Fragezeichen versehen werden muss, da autonome Technologien einen großen Sprung machen müssen, bevor sie auf beliebigen Straßen eingesetzt werden können.

Müssten diese Einwände nicht auch für das Flottenszenario gelten? Interessanterweise verhält es sich hier genau umgekehrt: während Assistenzsysteme universell einsetzbar sein müssen (auf allen Straßen bzw. zumindest auf allen Autobahnen) und daher mit aller Komplexität in diesen Umgebungen umgehen können müssen, können lokal agierende Flotten genau dort eingesetzt werden, wo die Bedingungen am einfachsten sind und sich dann nach und nach Bereiche aussuchen, die etwas komplizierter sind.

Dieser Prozess hat bereits begonnen. In England wird in einem Pilotprojekt eine Flotte von 100 autonomen Elektromobilen entwickelt, die Personen zwischen dem Bahnhof und der Innenstadt von Milton Keynes befördern werden. Ab 2015 sollen die erste Fahrzeuge verfügbar sein und sich im teilautonomen Betrieb bei niedriger Geschwindigkeit zwischen den beiden Punkten bewegen. Zunächst werden sich die Fahrzeuge nur auf abgetrennten Spuren bewegen. Bis 2017 sollen sich die Fahrzeuge auch ohne Sicherheitszaun auf Fußwegen autonom bewegen können, Straßen überqueren können und zusätzliche Ziele im Ort anfahren können. Dieses Projekt zeigt sehr gut, wie autonome Funktionen unter zunächst sorgfältig einfach gehaltenen Bedingungen produktiv eingesetzt werden können, um dann nach und nach ihre Leistungsfähigkeit und ihren Einsatzbereich auszuweiten.

In vielen Städten gibt es Bereiche in denen ähnliche Anwendungen möglich sind

und ein entsprechendes System nach und nach aufgebaut werden könnte. Anstelle der Kleinfahrzeuge könnten auch zunächst Kleinbusse verwendet werden, die Punkt-zu-Punkt Verbindungen ermöglichen. Die Busse könnten zum Teil auf eigenen völlig abgetrennten Spuren fahren, und sich zum Teil auf Straßenabschnitten bewegen, in denen keine Radfahrer und Fußgänger zugelassen sind. Erst später würde das System dann auf Abschnitte mit höherer Komplexität und weiteren Verkehrsteilnehmern erweitert werden. Solche Projekte haben den Vorteil, dass man sich die am besten geeigneten Anwendungsbereiche gezielt heraussuchen kann.

1.4 Ausblick

Die Zukunft entwickelt sich meist anders als erwartet. In diesem Beitrag haben wir gezeigt, dass das Konsenszenario, das von einer inkrementellen Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen hin zu vollautonomen Fahrzeugen ausgeht, wesentliche Schwächen besitzt. Wir haben auch gezeigt, dass Flotten autonomer Fahrzeuge erhebliche Vorteile besitzen und einen realistischeren Entwicklungspfad darstellen könnten. Sicher wird die Zukunft Elemente beider Szenarien und darüber hinaus noch einige Überraschungen beinhalten.

Die Szenarien zeigen deutlich, dass Einzelne und Unternehmen stark von der autonomen Fahrzeugtechnologie profitieren werden. Für den Einzelnen ist der Gewinn persönlicher Zeit (neben einem Zuwachs von Sicherheit und möglicher Kostensenkungen) ein wichtiger Vorteil. Für Unternehmen ergeben sich aus neuen Geschäftsmodellen enorme Chancen und Anreize. Die Dynamik dieser technischen Entwicklung sollte man nicht unterschätzen, sondern sich rechtzeitig auf die tiefgreifenden Veränderungen einstellen.

¹ Hars, A. (2014): Supervising autonomous cars on autopilot: A hazardous idea. Inventivio Innovation Briefs, [URL](#).

² Burns, L.D.; Jordan, C.W. and Scarborough, B.A. (2013): Transforming personal mobility, [URL](#).

³ Im Original sind die Werte in USD/mile angegeben. Zur Umrechnung wurde der Dollar-Referenz Kurs für 2012 verwendet.

⁴ Spiesser, K. Treleaven, K., Zhang, R. et al. (2014): Toward a systematic

approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems. In: Meyer, G.; Beikers, S.: Road vehicle automation, [URL](#).

⁵ Land Transport Authority, Statistics in Brief (2009), [URL](#).

⁶ 304,093,966 residents. Quelle: US Census Bureau. National intercensal estimates (2000-2010), 2014, [URL](#).

⁷ 196,762,927 Light duty vehicles. Quelle: Bureau of Transportation Statistics, Table 1-111: Number of US-aircraft, vehicles, vessels and other conveyances,(2014), [URL](#).

⁸ Im Original: 0,52 USD, umgerechnet zu einem Kurs von 1,3281 USD/Euro im Jahr 2013.

⁹ Fagnant, D, Kockelmann, K. (2014): Development and application of a network-based shared automated vehicle model in Austin, Texas, [URL](#).

¹⁰ Burnham, A.; Wang, M.; Wu, Y.: Development and applications of GREET 2.7 - The transportation vehicle-cycle model. Argonne National Laboratory Report ANL/ESD/06-5 (2006), S. 28.

¹¹ Kostenanteile nach McKinsey (2012): The future of the north american auto industry, p. 21.

¹² Hensley, R.; Newmann, J.; Rogers, M.; Shahinian, M.: Battery technology charges ahead. McKinsey report, 7/2012, p.4, [URL](#). Die Preise sind in USD und wurden zum Jahreskurs 2011 umgerechnet.

¹³ Wilka, M.D.: Untersuchungen von Polarisierungseffekten an Lithium-Ionen Batterien. Dissertation, Ulm, 2013, S. 138, [URL](#).

¹⁴ ADAC (2014): Autodaten und Autokosten. [URL](#)

¹⁵ Eurostat (2014): Electricity prices for industrial consumers with all taxes and levies included, Table nrg_pc_204, Band ID, EU 28 for 2013S1.