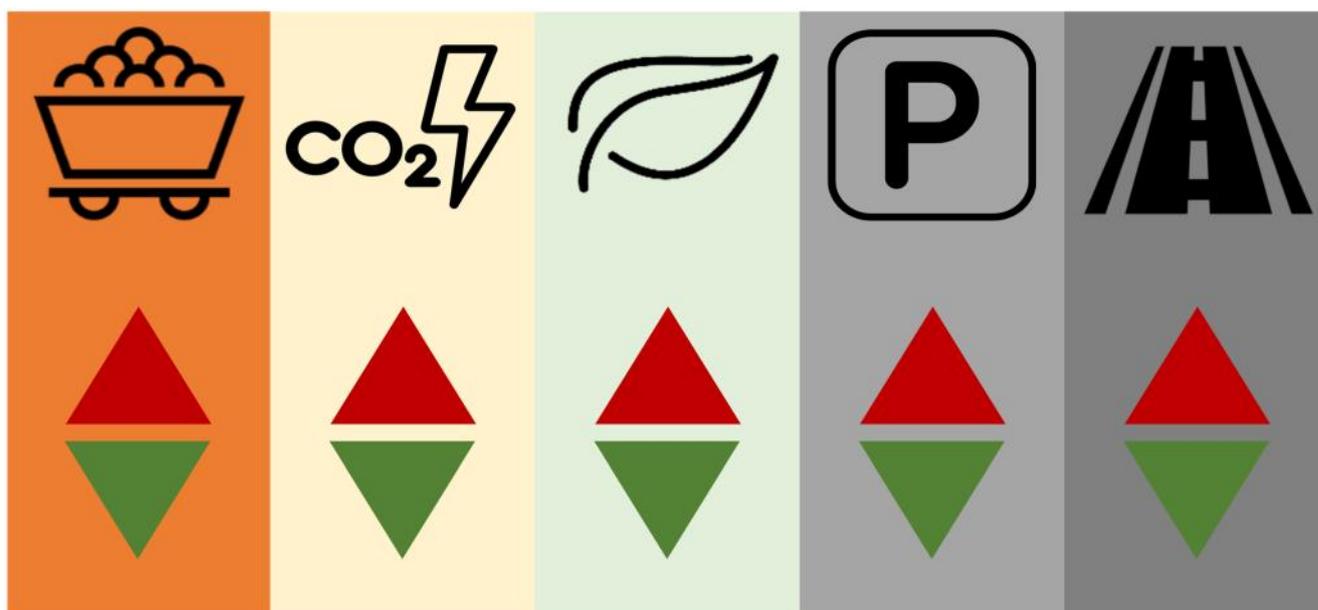


# Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz

Schlussbericht Modul 3e «Ressourcen, Umwelt, Klima»  
Definitive Fassung vom 9. April 2018



**Projektbegleitgruppe**

bestehend aus Vertreterinnen und Vertreter von

Städteverband / Organisation Kommunale Infrastruktur  
Kanton Zürich (AWEL)

**Projektteam**

Dr. Peter de Haan  
Remo Fischer

EBP Schweiz AG  
Mühlebachstrasse 11  
8032 Zürich  
Schweiz  
Telefon +41 44 395 16 16  
info@ebp.ch  
www.ebp.ch

Druck: 9. April 2018  
aFn\_3e\_C+R\_Ressourcen\_Umwelt\_Klima\_v10\_FAP.docx  
Projektnummer: 216184.00

## Zusammenfassung

Die Auswirkungen der Automatisierung von Strassenfahrzeugen in Bezug auf Ressourcen, Umwelt und Klima sind potenziell gross. Es lassen sich fünf verschiedene Auswirkungsdimensionen unterscheiden:

- **Energiebedarf/Treibhausgas-Emissionen** sowie **Übrige Umweltwirkungen (Lärm, Abgase)**: Emissionen sind von der Fahrleistung sowie der Antriebsform abhängig. Auf Erstgenanntes haben vor allem Ride Sharing und verringerte Fahrzeuggewichte einen massgebenden positiven Einfluss. Als Risiko erweisen sich die Nutzung der Reisezeit sowie Leerfahrten. Bei der Antriebsform sind weitere Chancen durch Elektromobilität zu erwarten, sofern die Effekte im Fahrzeugbetrieb nicht durch die Stromerzeugung oder Fahrzeugherstellung (über-)kompensiert werden.
- **Ressourcen**: Der Umfang der in den Fahrzeugen gebundenen Ressourcen ist von der Gesamtflottengrösse abhängig. Ride Sharing sowie Car Sharing können die Gesamtflotte deutlich reduzieren. Der Hebel «Aktive Sicherheit» weist weitere Chancen durch die Reduktion des Einzelfahrzeuggewichts auf.
- **Flächenbedarf für Parkierung**: Parkierungsflächen können durch vermehrtes Ride Sharing und Car Sharing reduziert werden.
- **Flächenbedarf für den rollenden Verkehr**: Der Flächenbedarf von Strassen kann verringert werden, wenn Ride Sharing intensiver betrieben wird. Die Kapazitäts- und Verflüssigungswirkung automatisierter Fahrzeuge können einen geringeren Flächenbedarf lokal bewirken, allerdings sind Netzeffekte genauer zu betrachten (Verlagerung von Engpässen). Die Nutzung der Reisezeiten sowie Leerfahrten stellen ein Risiko dar.

Über alle Auswirkungsdimensionen global betrachtet stellt *Ride Sharing* die grösste Chance für Ressourcen, Umwelt und Klima dar. Mit einer erhöhten Auslastung der Fahrzeuge können sowohl Verkehrs- und Fahrleistung verringert werden, als auch der Fahrzeugbestand reduziert werden. Bedingung für den Markterfolg von Ride Sharing ist allerdings, dass der MIV allgemein verteuert und die Parkplätze verknappte oder verteuert würden. Ohne solche regulatorischen Begleitmassnahmen sind die ökonomischen Anreize für Ride Sharing zu gering, zumal mit dem Fahrer beim automatisierten Fahrer der grösste «Kostenblock» wegfallen wird.

Das grösste Risiko geht vom Hebel *Nutzung der Reisezeiten* aus. Dabei steigt die Attraktivität des MIV (zulasten der anderen Verkehrsmittel) deutlich. Verkehrs- und Fahrleistung nehmen zu, mit entsprechenden Folgen für Umwelt und Klima. Auch durch *Leerfahrten* ist eine deutliche Erhöhung der Fahrleistung infolge der Automatisierung absehbar. Um diesen Risiken zu begegnen, müsste der MIV allgemein verteuert werden (Internalisierung externer Kosten, inkl. Flächeninanspruchnahme), vorzugsweise mit einer orts- und zeitscharf differenzierten Bepreisung.



# Inhaltsverzeichnis

---

1.	Einleitung	7
1.1	Kontext und Ziele	7
1.2	Fragestellungen	7
1.3	Vorgehen und Struktur	7

---

2.	Hebel	8
2.1	Neue Nutzergruppen	8
2.2	Nutzung der Reisezeit	8
2.3	Ride Sharing (Pooling)	8
2.4	Leerfahrten	9
2.5	Car Sharing	9
2.6	Verflüssigung des Verkehrs	9
2.7	Automatisierte Fahrweise	10
2.8	Aktive Sicherheit	10

---

3.	Auswirkungen	11
3.1	Auswirkungsdimensionen	11
3.2	Auswirkungsbeschreibung	12
3.2.1	Neue Nutzergruppen	12
3.2.2	Nutzung der Reisezeit	13
3.2.3	Ride Sharing (Pooling)	14
3.2.4	Leerfahrten	15
3.2.5	Car Sharing	16
3.2.6	Verflüssigung	16
3.2.7	Automatisierte Fahrweise	17
3.2.8	Aktive Sicherheit	18

---

4.	Einschätzung der Relevanz	20
4.1	Vergleich der Auswirkungen	20
4.2	Fazit	20
4.3	Weitere Einschätzungen	21

## Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BfS	Bundesamt für Statistik
CH	Schweiz
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
FVV	Fuss- und Veloverkehr
Fz	Fahrzeug
Fzkm	Fahrzeugkilometer (Fahrleistung)
LV	Langsamverkehr
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MZMV	Mikrozensus Mobilität und Verkehr
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pers	Person(en)
Perskm	Personenkilometer (Verkehrsleistung)
SAE	Society of Automotive Engineers

# 1. Einleitung

## 1.1 Kontext und Ziele

Das automatisierte Fahren ist primär eine Verkehrsfrage, hat aber Auswirkungen auf zahlreiche Dimensionen – unter anderem auf Ressourcen, Umwelt und Klima. Dabei ist aufzuzeigen, welche Zielbeiträge automatisierte Fahrzeuge zur Energie- und Ressourcenwende, zum Flächenbedarf des Verkehrs und zum Umweltschutz aufweisen. Neben den Chancen sind auch die Risiken zu benennen.

Das Hauptziel des Vertiefungsmoduls 3e ist die qualitative Beschreibung der Auswirkungen der automatisierten Strassenfahrzeuge auf den Ressourcenbedarf, den Flächenbedarf, die Emissionen und das Klima.

## 1.2 Fragestellungen

Die folgenden Themen werden im Vertiefungsmodul 3e untersucht:

- [1] Semi-quantitative Abschätzung der Effekte im MIV auf den **Treibstoff- und Energieverbrauch** sowie den **CO<sub>2</sub>-Ausstoss**.
- [2] Qualitative Einschätzung zum Bestand der Fahrzeugflotte und der darin gebundenen Ressourcen («**graue Energie**»).
- [3] Qualitative Einschätzungen von **Flächenverbrauch** für Verkehrswege und Fahrzeug-Abstellplätze (in Koordination mit dem Modul 3d «Städte und Agglomerationen»).
- [4] Qualitative Einschätzung der Effekte des automatisierten Fahrens im **Güterverkehr** hinsichtlich Ressourcen, Klima und Umwelt (Inputs Modul 3f).
- [5] Schlussfolgerungen bzgl. **Klima- und Umweltziele**.

## 1.3 Vorgehen und Struktur

Im Vertiefungsmodul werden drei Teilschritte vorgenommen, nach denen auch der Bericht aufgebaut ist:

- **Definition der Hebel:** Die Eigenschaften des automatisierten Fahrens werden auf wenige Hebel reduziert, die für Ressourcen, Umwelt und Klima massgebend sind.
- **Beschrieb der Auswirkungen** sowie der Auswirkungsdimensionen: Je nach Ausgestaltung der Hebel unterscheiden sich die Auswirkungen auf Ressourcen, Umwelt und Klima deutlich. Hierzu werden sowohl qualitative als auch semi-quantitative Einschätzungen vorgenommen.
- **Einschätzung Relevanz der Hebel:** Auf Basis der Auswirkungen werden Aussagen zur Relevanz der definierten Hebel vorgenommen.

## 2. Hebel

Als «Hebel» werden diejenigen Eigenschaften des automatisierten Fahrens bezeichnet, deren Ausprägung – gemäss Einschätzung der Autoren – besonders grosse Auswirkungen auf Ressourcen, Umwelt und Klima aufweisen. So wurden insgesamt acht Hebel identifiziert, die im Folgenden beschrieben werden.

### 2.1 Neue Nutzergruppen

Ab Level 5 (SAE) des automatisierten Fahrens wird keine Person mit Führerausweis mehr benötigt. Niemand muss das System mehr überwachen. Vollautomatisierte, selbstfahrende Fahrzeuge können die Mobilität von Personen ohne Führerausweis verbessern. Dazu gehören Jugendliche, Betagte oder körperlich Behinderte. Dies führt zu einer erhöhten Verkehrsnachfrage im MIV (inkl. Sammel- und Verteilverkehrs, SVV), teilweise zulasten des klassischen ÖV und des LV.

### 2.2 Nutzung der Reisezeit

Ab Level 3 (SAE) des automatisierten Fahrens muss der Fahrer das System, welches die Längs- und Querführung des Fahrzeugs übernimmt, nicht mehr dauerhaft überwachen. Daher kann er sich an Bord des Fahrzeugs anderen Aktivitäten widmen, beispielsweise dem Arbeiten. Die Reisezeit wird damit anderweitig nutzbar und ist für den einzelnen Verkehrsteilnehmenden nicht mehr gleich wertvoll wie beim menschlichen Fahren. Dies führt zu einer Reduktion der Reisezeitkosten.

### 2.3 Ride Sharing (Pooling)

Unter Ride Sharing (Pooling) wird die Bündelung von Fahrten unterschiedlicher Verkehrsteilnehmenden in einem Fahrzeug verstanden. Faktisch wird im öffentlichen Verkehr bereits seit langem Ride Sharing betrieben, das Wort ist allerdings durch private Formen geprägt (Fahrgemeinschaften in privat gehaltenen Fahrzeugen). Gegenüber dem Car Sharing werden die Fahrzeuge parallel und nicht seriell benutzt, d.h. sie haben einen höheren Auslastungsgrad sowie leichte Umwege für das Zu- oder Aussteigenlassen weiterer Mitfahrer.

Ride Sharing ist heute eine Nischenanwendung. Infolge der Automatisierung fällt mit dem Fahrzeuglenker künftig der grösste «Kostenblock» weg, so dass Autofahren deutlich günstiger wird als heute. Der ökonomische Anreiz für Ride Sharing nimmt somit ab – und Ride Sharing würde auch künftig nur eine Nischenanwendung bleiben. Damit die oft propagierten neue Angebote im Übergangsbereich von MIV und ÖV (Sammeltaxis), welche durch den Entfall des Fahrzeuglenkers Fahrtenwünsche sehr kostengünstig bündeln können, einen grösseren Marktanteil erringen, braucht es entsprechende regulatorischen Eingriffe: Die allgemeine Verteuerung der Mobilität und die Verteuerung bzw. Verknappung der Parkplätze. Unter diese Voraussetzung ist das Potenzial von Ride Sharing sehr gross und könnte in einem Extremszenario den Privatbesitz von Personenwagen weitgehend ablösen.

Für die Abschätzung der Auswirkungen des Ride Sharing sind auch die betrieblich bedingten Leerfahrten innerhalb von Ride-Sharing-Systemen zu zählen.

## 2.4 Leerfahrten

Sind Fahrzeuge vollautomatisiert unterwegs, muss kein Fahrer mehr an Bord sein. Vor allem bei der privaten Nutzung dürften so durch das Bringen und Abholen von Personen und Waren viele Leerfahrten entstehen. So wird es beispielsweise technisch möglich sein, dass Fahrzeuge Mitglieder eines Haushalts nacheinander zur Arbeit/Schule bringen und dazwischen Leerfahrten ausführen. Auch das Abholen von Lebensmitteln und Gütern ist denkbar. Ebenso kann bei einem Mangel an Parkplätzen – zum Beispiel beim Bahnhof – das eigene Fahrzeug wieder leer an den Ausgangsort zurückkehren, um später wieder leer zum Bahnhof zu fahren für den Nachhause-Transport. Der MIV erfährt durch diese Möglichkeiten einen deutlichen Attraktivitätsgewinn. Nicht zu den Leerfahrten gezählt werden hier die betrieblich bedingten Leerfahrten innerhalb von Ride-Sharing- und Car-Sharing-Systemen.

## 2.5 Car Sharing

Car Sharing bezeichnet die gemeinschaftliche, serielle Nutzung eines oder mehrerer Autos. Heute ergänzt Car Sharing vor allem das ÖV-Angebot (insbesondere bei der Bahn). Beim Car Sharing muss gegenüber dem Taxi das Fahrzeug selber gefahren werden. Mit vollautomatisierten Fahrzeugen verschwindet durch den Entfall des Fahrers aber dieser Unterschied. Automatisierte Taxis werden dem Car Sharing zugeordnet und weisen ein grosses Potenzial infolge der Automatisierung auf. Falls man davon ausgeht, dass das heutige Car Sharing bereits ein grosser Teil des Marktpotenzials für ÖV-gebundenes Car Sharing abdeckt, wird das künftige automatisierte Car Sharing nicht mehr hauptsächlich in Zusammenhang mit dem ÖV zum Einsatz kommen, sondern zunehmend für unabhängige (nicht-intermodale) Fahrten genutzt werden.

Bei heutigen Car-Sharing-Systemen wird davon ausgegangen, dass sie den Kauf eines eigenen Autos hinauszögern oder vermeiden und somit der ÖV einen grösseren Teil am Modalsplit einnimmt. Bei künftigen Car-Sharing-Systemen wird davon ausgegangen, dass sie das Autofahren wesentlich attraktiver machen, sei dies als temporärer Zusatzwagen oder wenn kein eigener Parkplatz dauerhaft zur Verfügung steht – entsprechend wird bei künftigen Car-Sharing-Systemen zwar eine erhöhte Fahrleistung der Autos erreicht, aber keine Reduktion der Personenkilometer im MIV.

Für die Abschätzung der Auswirkungen des Car Sharing sind auch die betrieblich bedingten Leerfahrten innerhalb von Car-Sharing-Systemen zu zählen

## 2.6 Verflüssigung des Verkehrs

Durch die Automatisierung können Kapazitätssteigerungen der bestehenden Infrastruktur entstehen, sofern automatisierte Fahrzeuge geringere Folge-

zeitlücken einhalten (u.a. durch Entfall der menschlichen Reaktionszeit). Zudem ist auch eine Stabilitätssteigerung des Verkehrsflusses infolge Harmonisierung der Fahrzeugbewegungen zu erwarten. Auch ohne Kommunikation der Fahrzeuge untereinander oder mit der Verkehrsinfrastruktur könnte somit – ohne Mehrverkehr – eine Verflüssigung des Verkehrsstroms erreicht werden. Die Verflüssigung würde nochmals stärker bei einer Vernetzung der Fahrzeuge untereinander. Würden die Fahrzeuge zusätzlich über eine Verkehrssteuerungsebene grossräumig gelenkt, würde eine starke Verflüssigung ermöglicht. Die Verflüssigung führt zu einer besseren Ausnutzung der bestehenden Strassenkapazitäten. Bei entsprechender Nachfrage kann dies zu Mehrverkehr führen. Die Verflüssigung ist lokal flächenneutral, kann aber – falls es zu Mehrverkehr kommt – zu einer Verschiebung von Flaschenhälsen und einem entsprechenden Ausbaubedarf andernorts führen.

## 2.7 Automatisierte Fahrweise

Die Drive-by-wire-Fahrweise automatisierter und hochautomatisierter Fahrzeuge führt – im Vergleich zu menschlichen Fahrern – zu einem ruhigeren Fahrstil und geglätteten Geschwindigkeitsprofilen der zurückgelegten Fahrten. Mit höheren SAE-Automatisierungs-Levels nimmt dieser Effekt zu. Dies führt zu einem leicht erhöhten mittleren Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren sowie zu weniger abrupten Bremsvorgängen mit leicht erhöhten Rekopulationspotenzialen.

## 2.8 Aktive Sicherheit

In den weiterführenden Zuständen des automatisierten Fahrens wird angenommen, dass sich (mindestens) durch die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation Fahrzeuge so koordinieren können, dass Unfälle fast gänzlich vermieden werden können (höhere aktive Sicherheit). Somit müssen Fahrzeuge nicht mehr konstruktiv auf Unfallsicherheit ausgelegt werden (passive Sicherheit/Crashsicherheit wie Knautschzonen). Sie können also leichter gebaut werden. Durch eine allgemeine wohlstandsbedingte weitere Zunahme der mittleren Fahrzeuggrösse und des mittleren Fahrzeuggewichts könnte dies überkompensiert werden. Die verstärkte Besteuerung von Autos aufgrund ihrer Grösse oder ihres Gewichts würde entsprechend helfen, die technisch mögliche leichtere Konstruktion von sehr sicheren automatischen Autos auch tatsächlich am Markt umzusetzen. Wir gehen bei der Abschätzung der Auswirkungen von einer gleichbleibenden Aufteilung der Verkehrsflächen aus (keine Zunahme von Mischverkehrszonen). Leichtere Fahrzeuge ermöglichen tendenziell die schnellere Marktpenetration von elektrischen Antrieben; elektrisch angetriebene Fahrzeuge wiederum weisen eine geringere Umweltbelastung auf.

### 3. Auswirkungen

Die Auswirkungen der acht Hebel in Bezug auf Ressourcen, Umwelt und Klima werden im Folgenden qualitativ beschrieben und mit Abschätzungen qualitativ (Ressourcen, Umwelt, Flächenbedarf) bzw. semi-quantitativ (CO<sub>2</sub> und Energie) eingeordnet (Grössenordnung). Die Auswirkungen beziehen sich auf die Zustände 5 und 6 (gemäss Grundlagenstudie) mit hohem Anteil bzw. fast vollständiger Flottendurchdringung automatisierter Fahrzeuge. Bei den Abschätzungen wird dementsprechend von einem Durchdringungsgrad vollautomatisierter Fahrzeuge (Level 4 bzw. 5) von 100% ausgegangen.

Die Hebel sind gemäss Abschnitt 2 definiert. Weitere Rebound-Effekte (Kompensation der energetischen Effizienzsteigerungen) werden in dieser Betrachtung vernachlässigt.

#### 3.1 Auswirkungsdimensionen

Die Auswirkungen der Hebel werden auf Basis von fünf Indikatoren erörtert. Diese decken verschiedene Dimensionen ab und sind gemäss Tabelle 1 festgelegt.

	<p>Unter <b>Ressourcen</b> werden die materiellen Güter verstanden, die nötig sind, um die Verkehrsleistung zu erbringen. Dabei sind vor allem die in Fahrzeugen gebundenen Material-Ressourcen gemeint (ohne energetische Ressourcen und ohne Verkehrsflächen).</p>
	<p>Der <b>Energiebedarf</b> umfasst die für die Fortbewegung eingesetzte Energie (Bewegen, Beschleunigen, Bremsen) sowie die für die Produktion der Fahrzeuge benötigte Energie (graue Energie). Direkt davon abhängig sind die <b>Treibhausgas-Emissionen</b> (Bsp. Kohlenstoffdioxid).</p>
	<p>Zu den <b>übrigen Umweltwirkungen</b> werden der erzeugte Lärm und die Abgase aus dem Betrieb der Fahrzeuge gezählt (Bsp. Verbrennungsabgase wie Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid, Stickoxide), sowie aus der Produktion und Entsorgung von Fahrzeugen und Infrastruktur.</p>
	<p>Die für das Abstellen der Fahrzeuge (ruhender Verkehr) notwendigen Areale werden unter der Auswirkungsdimension <b>Flächenbedarf für die Parkierung</b> beschrieben.</p>
	<p>Unter «<b>Strassen</b>» wird der Flächenbedarf für den rollenden Verkehr verstanden, hierzu gehören Fahrspuren (inkl. Sicherheitszuschläge) oder Verkehrsknoten. Die Auswirkungsdimension Strassen ist zudem ein Indikator für die Zerschneidung von Landschaften.</p>

Tabelle 1: Auswirkungsdimensionen

### 3.2 Auswirkungsbeschreibung

#### 3.2.1 Neue Nutzergruppen

**Direkte Auswirkung:** Wenn Nutzergruppen ohne Führerausweis dank voll-automatisierten Fahrzeugen neu einen selbstständigen Zugang zum MIV haben, führt dies zu einer Erhöhung der Pro-Kopf-Personenkilometer dieser Personengruppen, ohne dass es zu grösseren Rückgängen im ÖV oder LV käme. Die Pro-Kopf-Personenkilometer erreichen dennoch nicht das Niveau der restlichen Bevölkerung (weniger lange Fahrten und weniger regelmässige Pendelbewegungen). Punktuell kann es zu Rückgängen bei den Service- und Begleitfahrten bisheriger Begleitpersonen kommen. Es wird zu einer Erhöhung des Fahrzeugbestandes kommen, denkbar ist, dass wohlhabende Familien ihren Kindern je eigene vollautomatisierte Kleinfahrzeuge erwerben.

**Indirekte Auswirkung:** Die erhöhte Fahr- und Verkehrsleistung im MIV geht mit den entsprechenden Emissionen (Abgase; Lärm) einher; da es sich hauptsächlich um Kurzstreckenmobilität handelt, könnten verstärkt Elektroautos zum Einsatz kommen. Die zusätzlichen Fahrzeuge benötigen mehr Parkplätze; der Mehrverkehr wird sich vor allem auf Nebenverkehrsstrassen und zum grösseren Teil ausserhalb der Stosszeiten abwickeln, so dass sich der Bedarf nach neuer Strasseninfrastruktur unterdurchschnittlich erhöht, punktuell aber Ausbauten bedingen kann (Aus- und Einsteigebedarfe bei Schulen und Freizeiteinrichtungen; reservierte Kurzzeitparkplätze bei Bahnhöfen für Betagte und körperlich Behinderte).

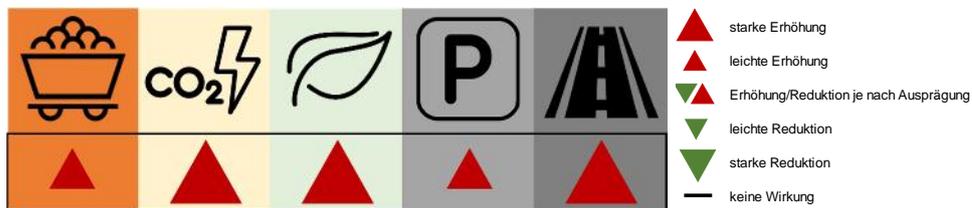


Abbildung 1: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Neue Nutzergruppen»

<b>Abschätzung Auswirkungen «Neue Nutzergruppen»:</b>	
57'272 Mio. Fzkm	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015), welche entfällt auf 6.2 Mio. Personen per 31.12.2016, 98% der 18- bis 74-Jährigen), ca. 79% mit Führerausweis; Pro-Kopf-Verkehrsleistung ca. 9'294 Fzkm/cap
+496'800 Jugendliche 12–17 Jahre:	30% der Pro-Kopf-Fzkm
+530'700 Betagte 75–84 Jahre:	20% der Pro-Kopf-Fzkm
+124'000 (ca.) körperlich Behinderte:	10% der Pro-Kopf-Fzkm
4.4% Zunahme	Annahme infolge neue Nutzergruppen
<b>+ 2'522 Mio. Fzkm</b>	Erhöhung der Fahrleistung
14'000 km/a	Annahme Jahresfahrleistung Einzelfahrzeug
<b>+ 0.18 Mio. PKW</b>	Vergleich: 4.5 Mio. PKW in CH (BfS, 2017)
145 g/km CO <sub>2</sub>	Emission Mittelklassewagen
<b>+ 0.36 Mio. t CO<sub>2</sub></b>	Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub>	Grenzwert Euro 6
<b>+ 68 t NO<sub>x</sub></b>	Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

### 3.2.2 Nutzung der Reisezeit

**Direkte Auswirkung:** Die Folge von reduzierten Reisezeitkosten im MIV (bei unveränderten Budgets der Verkehrsteilnehmenden) sind Reinvestitionen der Reisezeitgewinne in erhöhte Reisezeiten. Es werden weiter entfernt gelegene Ziele angefahren oder häufiger der MIV benutzt. Die direkte Auswirkung ist also eine erhöhte Verkehrsleistung (in Personenkilometer) sowie eine erhöhte Fahrleistung (Fahrzeugkilometer). Im ÖV und im Fuss-/Veloverkehr werden keine Reduktionen der Reisezeitkosten erreicht, deshalb verschiebt sich der Modal Split zusätzlich zugunsten des MIV.

**Indirekte Auswirkung:** Aufgrund der erhöhten Fahr- und Verkehrsleistung werden mehr Abgase und mehr Lärm erzeugt. Um die Fahrleistung zu erbringen, muss das Angebot ausgebaut werden. Es sind mehr Strassen notwendig. Zudem wird eine grössere Fahrzeugflotte benötigt, was mehr gebundene Ressourcen in Fahrzeugen zur Folge hat. Weiter müssen mehr Parkplätze für die grössere Flotte erstellt werden.

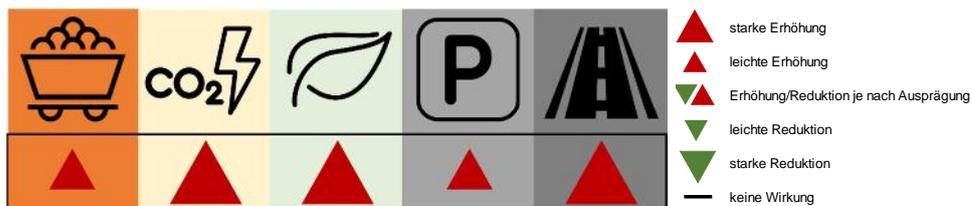


Abbildung 2: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Nutzung der Reisezeit»

Abschätzung Auswirkungen «Nutzung der Reisezeit»:	
57'272 Mio. Fzkm 40% Zunahme <b>+ 22'909 Mio. Fzkm</b>	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015) Annahme bzgl. Reinvestition reduzierte Reisezeitkosten und Modal Shift Erhöhung der Fahrleistung
14'000 km/a <b>+ 1.64 Mio. PKW</b>	Annahme Jahresfahrleistung Einzelfahrzeug Vergleich: 4.5 Mio. PKW in CH (BfS, 2017)
145 g/km CO <sub>2</sub> <b>+ 3.32 Mio. t CO<sub>2</sub></b>	Emission Mittelklassewagen Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub> <b>+ 1375 t NO<sub>x</sub></b>	Grenzwert Euro 6 Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

### 3.2.3 Ride Sharing (Pooling)

**Direkte Auswirkung:** Bei einem umfassendes Ride Sharing Angebot dürften Leerfahrten nicht vermieden werden können. Durch eine Betriebsoptimierung kann aber trotzdem von einer besseren Auslastung der Fahrzeuge ausgegangen werden. Der durchschnittliche Besetzungsgrad wird erhöht. Unter der Annahme von wirksamen regulatorischen Massnahmen (allgemeine Verteuerung der individuellen motorisierten Mobilität, und Verteuerung oder Verknappung der Parkplätze; siehe Kapitel 2.3) kann dank Ride Sharing die gleiche Verkehrsleistung (Personenkilometer) kann mit einer geringeren Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) erbracht werden.

**Indirekte Auswirkung:** Aufgrund der reduzierten Fahrleistung kann die Gesamtflotte verringert werden, was auch den Ressourcen- und Energiebedarf senkt. Für die geringere Anzahl an Fahrzeugen (bei gleicher Verkehrsleistung) nehmen die Emissionen ab. Durch eine bessere Nutzung der Fahrzeuge sind diese häufiger unterwegs, was die Anzahl der benötigten Parkplätze reduziert. Mit einer geringeren Fahrleistung sinkt zudem der Flächenbedarf für den rollenden Verkehr.



Abbildung 3: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Ride Sharing»

Abschätzung Auswirkungen «Ride Sharing»:	
57'272 Mio. Fzkm 1.68 Pers/Fz	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015) mittlerer Besetzungsgrad (BfS, 2015)
2.15 Pers/Fz <b>-12'404 Mio. Fzkm</b>	Annahme erhöhter Besetzungsgrad
14'000 km/a <b>-0.89 Mio. PKW</b>	Annahme Jahresfahrleistung Einzelfahrzeug Vergleich: 4.5 Mio. PKW in CH (BfS, 2017)
145 g/km CO <sub>2</sub> <b>-1.80 Mio. t CO<sub>2</sub></b>	Emission Mittelklassewagen Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub> <b>-744 t NO<sub>x</sub></b>	Grenzwert Euro 6 Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

### 3.2.4 Leerfahrten

**Direkte Auswirkung:** Durch die Leerfahrten wird der durchschnittliche Besetzungsgrad verringert. Bei gleichbleibender Verkehrsleistung (Personenkilometer) wird eine erhöhte Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) bewirkt.

**Indirekte Auswirkung:** Es sind zwei Effekte auszumachen:

- 1) Aufgrund der erhöhten Fahrleistung wird die Gesamtflotte vergrößert, was auch den Ressourcen- und Energiebedarf erhöht. Bei erhöhten Fahrleistungen steigen auch die Emissionen an. Zudem sind mehr Strassenflächen nötig.
- 2) Sind Leerfahrten möglich, können aber auch automatisierte Taxis bzw. automatisierte Sammeltaxis (allgemein: *Shared Services*) Fahrten durchführen. Folge davon ist ein erhöhter Modal Split dieser Angebote (siehe Wirkungen Ride Sharing und Car Sharing).

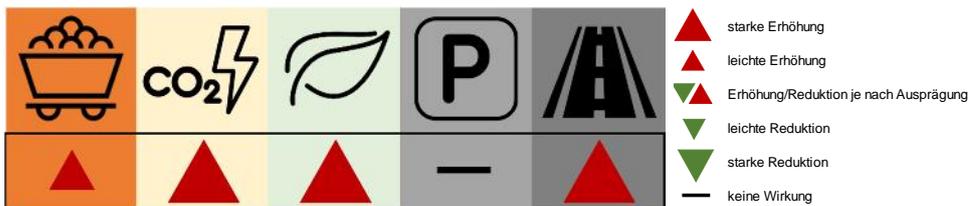


Abbildung 4: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Leerfahrten»



(und damit die Zuverlässigkeit) der Strassenzustände. Sind Strassenabschnitte zeitweise hoch ausgelastet und werden an der Kapazitätsgrenze betrieben, kommt es bei einer Kapazitätserhöhung (infolge der Automatisierung) zu einem neuen Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage. Dabei kann es zu Mehrverkehr kommen. Dieser kann entweder nur zeitlich begrenzt und durch zeitliche Verlagerungswirkungen auftreten, wenn zum Beispiel die Spitze schmaler wird. Die Kapazitätswirkung kann aber auch gesamthaft zu Mehrverkehr (d.h. zu einer erhöhten Fahrleistung mit entsprechenden Emissionen) führen, und/oder zu einer Rückverlagerung vom ÖV zum MIV. Angesichts der prognostizierten Zunahme der Staustunden wird hier illustrativ angenommen, dass die MIV-Fahrleistung um 3% zunehmen könnte.

**Indirekte Auswirkung:** Eine flüssigere Fahrweise führt auch zu einer höheren mittleren Energieeffizienz und geringeren Abgaswerten des Fahrzeugs, was im nächsten Abschnitt (Hebel «automatisierte Fahrweise» berücksichtigt wird.



Abbildung 6: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Verflüssigung»

<b>Abschätzung Auswirkungen «Verflüssigung» (Mehrverkehr):</b>	
57'272 Mio. Fzkm	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015)
3.0% Zunahme <b>+1'718 Mio. Fzkm</b>	Annahme infolge neue Nutzergruppen Erhöhung der Fahrleistung
14'000 km/a <b>+0.12 Mio. PKW</b>	Annahme Jahresfahrleistung Einzelfahrzeug Vergleich: 4.5 Mio. PKW in CH (BfS, 2017)
145 g/km CO <sub>2</sub> <b>+0.25 Mio. t CO<sub>2</sub></b>	Emission Mittelklassewagen Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub> <b>+ 103 t NO<sub>x</sub></b>	Grenzwert Euro 6 Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

### 3.2.7 Automatisierte Fahrweise

**Direkte Auswirkung:** Der Wegfall des Einflusses der Fahrweise menschlicher Fahrer führt zu einer Glättung der Geschwindigkeitsprofile. Dies führt zu einer höheren Energieeffizienz vollautomatisierter Fahrzeuge. Auch der Wegfall menschlicher Reaktionszeiten führt zu geringeren (negativen wie positiven) Beschleunigungen, was sich positiv auf die Energieeffizienz auswirkt. Da die Lärm- und Luftschadstoff-Emissionen überproportional mit der Fahrdynamik ansteigen, sind auch die entsprechenden Reduktionen infolge automatisierter Fahrweise grösser als die energetischen Effekte.

**Indirekte Auswirkung:** Eine flüssigere Fahrweise kann auf zeitweise ausgelasteten Strassenabschnitten zu einer höheren Strassenkapazität führen, was an anderer Stelle (Hebel «Verflüssigung» berücksichtigt wird.

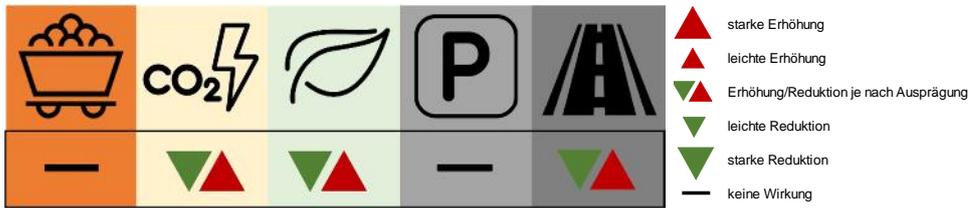


Abbildung 7: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «Automatisierte Fahrweise»

**Abschätzung Auswirkungen «Automatisierte Fahrweise» (Effizienz):**

57'272 Mio. Fzkm 10%	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015) Annahme: Anteil hohe Kapazitätsauslastung
145 g/km CO <sub>2</sub> 200 g/km CO <sub>2</sub> -0.315 Mio. t CO <sub>2</sub>	Emission Mittelklassewagen (flüssiger Verkehr) Emission Mittelklassewagen (hohe Auslastung) Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub> 120 mg/km NO <sub>x</sub> -344 t NO <sub>x</sub>	Grenzwert Euro 6 (flüssiger Verkehr) Annahme Emission (hohe Auslastung) Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

### 3.2.8 Aktive Sicherheit

**Direkte Auswirkung:** Bei der (fast) vollständigen Vermeidung von Unfällen können Fahrzeuge durch die nicht mehr notwendige Crashesicherheit leichter gebaut werden (aktive statt passive Sicherheit). Infolge Rückkopplung (für leichtere Fahrzeuge reichen dann auch ein leichterer Motor, leichtere Bremsysteme, usw.) können Fahrzeuge mit gleichem Volumen der Fahrgastzelle und gleichem resultierendem Sicherheitsniveau ca. 25% leichter gebaut werden. Bedingung für diese angenommene Auswirkung ist, dass das technische Leichtbaupotenzial am Markt genutzt wird, was – je nach Trends am Automarkt – eine verstärkte gewichtsbasierte Besteuerung von Fahrzeugen erfordert.

**Indirekte Auswirkung:** Leichtere Fahrzeuge reduzieren den Einsatz von Ressourcen und Energie in der Produktion. Zudem können der Energieeinsatz und die Emissionen im Betrieb verringert werden.

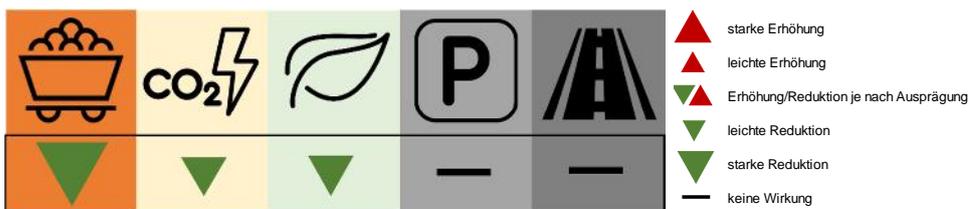


Abbildung 8: Qualitative Einschätzung der Auswirkungen des Hebels «aktive Sicherheit»

**Abschätzung Auswirkungen «Aktive Sicherheit»:**

57'272 Mio. Fzkm	CH-Fahrleistung MIV (BfS, 2015)
1'450 kg	Durchschnittliches Fahrzeuggewicht (BFE, 2010)
25%	Mögliche Gewichtsreduktion bei gleicher Sicherheit
145 g/km CO <sub>2</sub>	Emission Mittelklassewagen
123 g/km CO <sub>2</sub>	nach Gewichtsreduktion (–15% Verbrauch)
<b>–1.24 Mio. t CO<sub>2</sub></b>	Vergleich: 38.5 Mio. t CO <sub>2</sub> in CH (BAFU, 2015)
60 mg/km NO <sub>x</sub>	Grenzwert Euro 6
54 mg/km NO <sub>x</sub>	nach Gewichtsreduktion (–10%)
<b>–344 t NO<sub>x</sub></b>	Vergleich: 63'671 t NO <sub>x</sub> in CH (BAFU, 2015)

## 4. Einschätzung der Relevanz

### 4.1 Vergleich der Auswirkungen

Eine Übersicht der qualitativen Einschätzung zu den Auswirkungen der sechs Hebel auf die fünf definierten Indikatoren (Ressourcen, Energiebedarf/Treibhausgase, übrige Umweltwirkungen, Flächenbedarf Parkierung, Flächenbedarf Strassen) ist in Abbildung 9 dargestellt. Dabei wird die Grösse der Wirkungssymbole grob skaliert anhand der semi-quantitativen Wirkungsabschätzungen für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> in Kapitel 3.

					
Neue Nutzergruppen	▲	▲	▲	▲	▲
Reisezeit	▲	▲	▲	▲	▲
Ride Sharing	▼	▼	▼	▼	▼
Leerfahrten	▲	▲	▲	—	▲
Car Sharing	▼	—	—	▼	—
Verflüssigung	—	▲	▲	—	▲
Autom. Fahrweise	—	▼	▼	—	—
Aktive Sicherheit	▼	▼	▼	—	—

	starke Erhöhung
	leichte Erhöhung
	Erhöhung/Reduktion je nach Ausprägung
	leichte Reduktion
	starke Reduktion
	keine Wirkung

Abbildung 9: Übersicht der Auswirkungen der sechs Hebel

### 4.2 Fazit

Automatisierte Strassenfahrzeuge weisen bedeutende Auswirkungen in Bezug auf Ressourcen, Umwelt und Klima auf. Die wichtigsten Hebel für die fünf verschiedenen Auswirkungsdimensionen sind:

- **Ressourcen:** Der Umfang der in den Fahrzeugen gebundenen Ressourcen ist von der Gesamtflottengrösse abhängig. Ride Sharing sowie Car Sharing können die Gesamtflotte deutlich reduzieren. Der Hebel «Aktive Sicherheit» weist weitere Chancen durch die Reduktion des Einzelfahrzeuggewichts auf.

- **Energiebedarf/Treibhausgas-Emissionen** sowie **Übrige Umweltwirkungen (Lärm, Abgase)**: Emissionen sind von der Fahrleistung sowie der Antriebsform abhängig. Auf Erstgenanntes haben vor allem Ride Sharing und verringerte Fahrzeuggewichte einen massgebenden positiven Einfluss. Als Risiko erweisen sich die Nutzung der Reisezeit sowie Leerfahrten. Bei der Antriebsform sind weitere Chancen durch Elektromobilität zu erwarten, sofern die Effekte im Fahrzeugbetrieb nicht durch die Stromerzeugung oder Fahrzeugherstellung (über-)kompensiert werden.
- **Flächenbedarf für Parkierung**: Parkierungsflächen können durch vermehrtes Ride Sharing und Car Sharing reduziert werden.
- **Flächenbedarf für den rollenden Verkehr**: Der Flächenbedarf von Strassen kann verringert werden, wenn Ride Sharing intensiver betrieben wird. Die Kapazitäts- und Verflüssigungswirkung automatisierter Fahrzeuge können einen geringeren Flächenbedarf lokal bewirken, allerdings sind Netzeffekte genauer zu betrachten (Verlagerung von Engpässen). Die Nutzung der Reisezeiten sowie Leerfahrten stellen ein Risiko dar.

Über alle Auswirkungsdimensionen global betrachtet stellt *Ride Sharing* die grösste Chance für Ressourcen, Umwelt und Klima dar. Mit einer erhöhten Auslastung der Fahrzeuge können sowohl Verkehrs- und Fahrleistung verringert werden, als auch der Fahrzeugbestand reduziert werden.

Das grösste Risiko geht vom Hebel *Nutzung der Reisezeiten* aus. Dabei steigt die Attraktivität des MIV (zulasten der anderen Verkehrsmittel) deutlich. Verkehrs- und Fahrleistung nehmen zu, mit entsprechenden Folgen für Umwelt und Klima. Auch durch *Leerfahrten* ist eine deutliche Erhöhung der Fahrleistung infolge der Automatisierung absehbar.

#### 4.3 Weitere Einschätzungen

Das automatisierte Fahren macht namentlich den motorisierten Individualverkehr komfortabler, günstiger und zeiteffizienter – womit alle drei Faktoren, welche als die Haupttreiber der Mobilitätsnachfrage gelten, angesprochen werden.

**Klima-, Energie- und Umweltziele.** Beim automatisierten Fahren sind die potenziell negativen Auswirkungen (die «Risiken») zahlreicher als die potenziell positiven (die «Chancen»). Entsprechend ist festzuhalten, dass das automatisierte Fahren nur dann einen positiven Einfluss auf die Erreichung der Klima-, Energie- und Umweltziele zeigen wird, wenn stark regulierend eingegriffen wird, um die Chancen (namentlich des Ride Sharing, sekundär des Car Sharing) zu realisieren und die Risiken (namentlich die Fahrleistungszunahme durch die Möglichkeit, die Unterwegszeit produktiver zu nutzen) einzudämmen.

**Güterverkehr.** Die hier aufgezeigten Hebel sind teilweise auch beim Güterverkehr relevant – der Wegfall eines Fahrers könnte in der Feinverteilung zu geringerer Auslastungsgrade und einer Zunahme der Fahrzeugkilometer führen. In Zukunft könnte vertieft werden, welche Hebel auch für den Güterverkehr gültig sind, und ob sie die gleiche Relevanz aufweisen.w