



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Verkehr der Zukunft 2060: Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr

Transports du futur 2060: Le changement technologique et ses conséquences pour mobilité et transport

Transport of the future 2060: Technological change and its consequences for mobility and transport

EBP Schweiz AG
Dr. Peter de Haan
Dr. Ralph Straumann
Roberto Bianchetti
Adrian Stetter

Rapp Trans AG
Bernhard Oehry
Dr. Jörg Jermann

Forschungsprojekt SVI 2017/003 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

August 2020

1682

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Verkehr der Zukunft 2060: Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr

Transports du futur 2060: Le changement technologique et ses conséquences pour mobilité et transport

Transport of the future 2060: Technological change and its consequences for mobility and transport

EBP Schweiz AG
Dr. Peter de Haan
Dr. Ralph Straumann
Roberto Bianchetti
Adrian Stetter

Rapp Trans AG
Bernhard Oehry
Dr. Jörg Jermann

Forschungsprojekt SVI 2017/003 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

August 2020

1682

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Peter de Haan (EBP Schweiz AG)

Mitglieder

Roberto Bianchetti, Dr. Ralph Straumann, Adrian Stetter (EBP Schweiz AG)

Bernhard Oehry, Dr. Jörg Jermann (Rapp Trans AG)

Begleitkommission

Präsident

Daniel Kilcher (Bundesamt für Strassen)

Mitglieder

Prof. Dr. Kay Axhausen (ETH Zürich)

Dr. Jörg Beckmann (Mobilitätsakademie)

Marcel Buffat (UVEK)

Dr. Sabine Friedrich (KEEAS AG)

Klaus Kammer (Bundesamt für Umwelt)

Simon Kettner (Kanton Basel-Stadt)

Marta Kwiatkowski (Gottlieb Duttweiler Institut GDI)

Dr. Markus Liechti (Bundesamt für Verkehr)

Dr. Michael Löchl (Kanton Zürich, Amt für Verkehr)

Prof. Dr. Nicole Mathys (Bundesamt für Raumentwicklung)

Martin Ruesch (Rapp Trans AG)

Prof. Dr. Thomas Sauter-Servaes (ZHAW School of Engineering)

Christoph Schreyer (Bundesamt für Energie)

Markus Schwyn (Bundesamt für Statistik)

Michel Simon (S-ce consulting AG)

Paketleitung

Markus Maibach (INFRAS)

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	9
	Summary	13
	Résumé.....	19
1	Einleitung	25
1.1	Ausgangslage	25
1.2	Einbettung des Teilprojekts	25
1.3	Forschungsziele	26
1.4	Untersuchungsabgrenzung	26
2	Vorgehen und Definitionen.....	27
2.1	Übersicht zum Vorgehen	27
2.2	Abgrenzung und Klassifizierung von Technologien	28
2.3	Relevante Eigenschaften von Schlüsseltechnologien	30
2.4	Definition des Arbeitsbegriffs «Schlüsseltechnologie»	31
3	Aktuelle und absehbare Trends	35
3.1	Trends je Verkehrsträger.....	35
3.2	Elektrifizierung des Strassenverkehrs.....	40
3.3	Automatisierung bei Strassenfahrzeugen	41
3.4	Automatisierung im Schienenverkehr	43
3.5	Mobilitätsdienstleistungen und Digitalisierung	44
3.6	Vernetzte und intelligente Infrastruktur	47
4	Identifikation von Schlüsseltechnologien.....	49
4.1	Analyse von «Weak Signals»	49
4.2	Liste möglicher relevanten Technologien	52
4.3	Identifikation der Schlüsseltechnologien	54
4.4	Steckbriefe zu den Schlüsseltechnologien	60
5	Diffusion der Schlüsseltechnologien	73
5.1	Trägheit des Verkehrssystems	73
5.1.1	Strassenfahrzeuge	73
5.1.2	Übrige Verkehrsträger	78
5.1.3	Infrastruktur.....	79
5.1.4	Überblick zur Trägheit im Verkehrssystem.....	80
5.2	Gegenseitige Abhängigkeiten der Schlüsseltechnologien	82
5.3	Synthese: Diffusionszeitraum und zeitliche Abfolge der 12 Schlüsseltechnologien	84
6	Wirkungen auf das Verkehrssystem	89
6.1	Vorgehensweise	89
6.2	Wirkung	89
6.2.1	Konvention Wirkung	90
6.2.2	Einwirkung / Auswirkung / Wechselwirkung	90
6.3	Verkehrssysteme	91
6.3.1	Entwicklung generisches Verkehrssystem	92
6.3.2	Verkehrssystem für Personen- und Güterverkehr	95
6.4	Wirkung Schlüsseltechnologien auf Verkehrssysteme	97
6.4.1	Detektion von Wirkungen	97
6.4.2	Schlüsseltechnologien mit direkten Wirkungen	98
6.4.3	Schlüsseltechnologien mit indirekten Wirkungen	99
6.5	Wirkungsmodelle nach Schlüsseltechnologien	101

6.5.1	Automatisierte Strassenfahrzeuge	102
6.5.2	Neue Verkehrssysteme/-infrastrukturen	104
6.5.3	Augmented / Virtual Reality	105
6.5.4	Automatisierte Luftfahrzeuge	106
6.5.5	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	107
6.5.6	Fazit Wirkungsmodelle	108
6.6	Intensität der Wirkungen.....	108
6.6.1	Intensitäten beim Angebot.....	109
6.6.2	Intensitäten bei der Nachfrage.....	112
7	Der technologische Wandel in drei Szenarien	115
7.1	Überblick über die drei Szenarien	115
7.2	Schlüsseltechnologie-Sets für die Szenarien	116
8	Schlussfolgerungen	121
	Anhänge	125
	Abkürzungsverzeichnis	144
	Literaturverzeichnis	145
	Projektabschluss.....	148
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	151
	SVI-Publikationsliste	152

Zusammenfassung

Teilprojekt «Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr»

Das Gesamtprojekt «Verkehr der Zukunft 2060» will eine visionäre Sicht auf die langfristige Entwicklung des Verkehrs erarbeiten. Das vorliegende Teilprojekt fokussiert dabei auf die technologischen Aspekte dieser Entwicklung:

- Welche sind die relevanten technologischen Entwicklungen bis zum Jahr 2060? Durch welche Trends werden sie angetrieben, wie hängen sie voneinander ab?
- Wie lässt sich diese technologische Entwicklung in einem kompakten Set an Schlüsseltechnologien illustrativ und griffig darstellen?
- Welche Auswirkungen haben die verschiedenen Technologien auf Verkehrsangebot und -nachfrage im Personen- und Güterverkehr?
- Wie könnten sich die Schlüsseltechnologien in den drei langfristigen Entwicklungsszenarien des Gesamtprojekts manifestieren?

Forschungsmethode und der Arbeitsbegriff «Schlüsseltechnologie»

Der technologische Wandel und sein Einfluss auf den Verkehr 2060 soll durch ein *kompaktes Set an Schlüsseltechnologien* gefasst werden. Es muss hinreichend vollständig sein, um einerseits gegenseitige Abhängigkeiten von Technologien abzubilden, andererseits deren Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage.

Der Begriff «Schlüsseltechnologie» wird spezifisch für die vorliegende Studie wie folgt definiert: «Eine Schlüsseltechnologie definiert sich über ihren *massgeblichen Einfluss auf den künftigen Verkehr und ihren systemischen Nutzen.*» Heute bereits etablierte Schlüsseltechnologien werden nicht betrachtet.

Schlüsseltechnologien prägen die relevante Mobilitätseigenschaften: Zeit, Kosten, Komfort, sowie systemische Aspekte. Sie *ermöglichen es, Verkehr schneller, günstiger, komfortabler oder systemisch effizienter* anzubieten und abzuwickeln.

Trends in Digitalisierung und Automatisierung

Der stetige technische Fortschritt hat die einzelnen Autos, Lastwagen und Züge schneller, effizienter und preisgünstiger gemacht. Bis 2060 wird die *Digitalisierung des Verkehrssystems als Ganzes optimieren*, d.h. zeitlich und räumlich gleichmässiger und damit effizienter machen. Dies benötigt Verkehrsdaten in Echtzeit und Übertragungstechnologien der nächsten Generation, und damit eine *digitale Infrastruktur als Teil eines intelligenten Transportsystems*.

Die *Echtzeitdaten* erlauben auch intermodale Mobilitätsplattformen und neue Geschäftsmodelle («pay as you drive», «mobility as a service»). Die Mobilität der Zukunft wird enorme Datenmengen generieren *zum Zustand von Fahrzeugen, Verkehr und Infrastruktur*. Neue Fahrzeuge werden zum Datenaustausch (mit anderen Fahrzeugen, der Infrastruktur und dem Verkehrssystem) verpflichtet und tauschen umfangreiche Daten mit dem Autohersteller aus. Hochaufgelöste Verkehrsdaten ermöglichen ein Verkehrsmanagement über grössere Räume und die gezielte Weiterentwicklung des Verkehrssystems. Sie stellen auch die Grundlage für künftige zeit- und gebietsabhängige Strassen- und ÖV-Tarife (Mobility Pricing) dar.

Die *Automatisierung der Strassenfahrzeuge* ändert den Verkehr tiefgreifend. Für das Jahr 2060 sind im Personen- und Güterverkehr vollautomatisierte, selbstfahrende Fahrzeuge denkbar. Deren Vernetzung ist zwingend für positive Systemeffekte (erhöhte Strassenkapazität dank geringeren Fahrzeugabständen und gleichmässiger, auf andere Verkehrsteilnehmer abgestimmte Fahrweise). Erst nach der Phase des Mischverkehrs (nicht-automatisierte und automatisierte/vernetzte Fahrzeuge zur gleichen Zeit) werden sich diese Effekte gänzlich manifestieren. Auch vollautomatisierte Sammeltaxis, welche die Grenzen zwischen Individual- und öffentlichem Verkehr verwischen, werden möglich.

Auf der *Schiene* erlauben Digitalisierung und Automatisierung die verbesserte Kundeninteraktion, Effizienzsteigerungen beim Personal- und Rollmaterialeinsatz sowie im Fahrbe-

trieb. Nach dem automatischen Zugbetrieb wird später der fahrerlose (aber begleitete) Zugbetrieb denkbar. Der gänzlich unbemannte Betrieb ist auf isolierten Linien möglich, im Fern- und Regionalverkehr aber noch nicht absehbar.

Trends je Verkehrsträger im Inland und im Ausland

Das Gesamtprojekt «Verkehr der Zukunft 2060» fokussiert auf das Mobilitätssystem innerhalb der Landesgrenzen. 2015 waren noch 55% der Personenkilometer der Schweizer Bevölkerung im Inland. Hier liegt der Fokus auf *Strassen- und Schienenverkehr zur flächen- und kosteneffizienten Bewältigung des täglichen Verkehrsaufkommens* und auf die optimale Nutzung der Infrastruktur. Reisezeiten und Reisebudgets verlagern sich ins Ausland, wo der Fokus auf *höhere Reisegeschwindigkeiten und höherwertigere Dienstleistungen* liegt. *In einigen Jahren wird das Flugzeug das Hauptverkehrsmittel* der Schweizer sein, auch Kreuzfahrten (oft mit Anreise per Flugzeug) nehmen weiter zu. Die für das Mobilitätsverhalten relevanten Technologien sind im Inland und im Ausland unterschiedlich, die beiden Verkehrssysteme spezialisieren sich zusehends auf Teilaspekte der Verkehrsnachfrage.

Batteriezellen werden günstiger, die *Elektrifizierung der Strassenfahrzeuge* wird bei immer mehr Fahrzeugsegmenten wirtschaftlich, während die Reichweiten steigen. Zuerst wird sich die Elektrifizierung bei Kleinwagen durchsetzen, für grössere Fahrzeuge erlaubt die Hybridisierung Effizienzgewinne. Bei Lieferwagen, ÖV-Bussen und schwere Nutzfahrzeuge im lokalen Einsatz erfolgt die Elektrifizierung schneller als bei den Personenwagen und motorisierten Zweirädern, weil die Gesamtkosten rationaler betrachtet werden und die erforderlichen Tagesreichweiten gut bekannt sind. Kostenberechnung und klarer definierte Einsatzprofilen. Die Elektrifizierung hat für sich betrachtet nur geringe verkehrliche Auswirkungen. Allerdings können neue Kategorien von Kleinstfahrzeugen (Weiterentwicklung heutiger Segways) entstehen. Und die parallele Elektrifizierung und Automatisierung wird die Attraktivität des Personenwagen steigern.

Wegen der hohen Lebensdauern der Infrastruktur ist der *Schienenverkehr* stark pfadabhängig. Die weitere Zunahme des Personenverkehrs führt zur Überlastung einzelner ÖV-Knoten sowie deren strassenseitigen Anbindung.

Beim *Schiffsverkehr* führt der weiter zunehmende Komfort zu einem hohen Stromverbrauch der Kreuzfahrtschiffe. Der hohe Energiebedarf erschwert den Wechsel auf erneuerbare Energieträger. Emissionsvorschriften werden den Wechsel auf schwefelärmere Treibstoffe herbeiführen.

Auf den *Luftverkehr* entfallen global 13% der CO₂-Emissionen des Verkehrs, trotz grösseren und effizienteren Flugzeugen führt das jährlich Verkehrswachstum von 3–5% zu einer Zunahme der CO₂-Emissionen um 2-4%. Die ersten Elektroflugzeuge werden erprobt, welche Kurzstreckenflüge gegenüber dem Hochgeschwindigkeitszüge attraktiver machen könnten. Das weitere Wachstum des Flugverkehrs könnte zu einer Ausdifferenzierung in ein Premium- und ein Massensegment führen.

Identifikation des Sets der Schlüsseltechnologien

Methodisch wurde zuerst eine «long list» von Technologien mittels Literatur- und Internetrecherche, Experteninterviews und die Analyse relevanter Trends zusammengestellt und in Expertenworkshops verifiziert. Aus der «long list» wurde in mehreren Schritten das Set der Schlüsseltechnologien destilliert. Die Haupt-Wirkungsfelder von Technologien wurden identifiziert und jede Technologie entsprechend eingestuft. Die Abhängigkeiten von Technologien untereinander wurden analysiert. In mehreren Workshops mit internen und externen Experten sowie Mitgliedern der Begleitkommission wurden Technologien diskutiert und priorisiert. Basierend auf Expertenwissen, Erkenntnissen aus Experteninterviews und einem Delphiverfahren wurden schliesslich zwölf Schlüsseltechnologien ausgewählt.

Die ausgewählten zwölf Schlüsseltechnologien

Es wird unterschieden zwischen «main technologies» (Haupt-Schlüsseltechnologien), welche direkte Auswirkungen auf das Verkehrsangebot haben, und «enabling technologies» (unterstützende Schlüsseltechnologie), welche dafür Grundlage und Voraussetzung bilden. Die sechs «main technologies» *beeinflussen direkt* die Hauptparameter einer jeden Mobilitätsdienstleistung (*Zeit, Kosten, Komfort*):

- *Automatisierte Strassenfahrzeuge*: Erlauben neue ÖV-Angebote, die bessere Erschliessung von Randgebieten und die Verkehrsteilnahme von Jugendlichen, Betagten und körperliche Behinderten. Risiko einer Verkehrszunahme.
- *Additive Fertigungsverfahren* (inkl. 3D-Druck): Ermöglichen dezentrale und zeitnahe Produktion, was effizientere Logistik erlaubt, sowie die Herstellung bisher kaum realisierbarer Formen.
- *Automatisierte Luftfahrzeuge* (inkl. Drohnen): Neue, hochwertige Verkehrsform, ohne Substitution herkömmlicher Verkehrsträger. In Städten aus Sicherheits- und Platzgründen womöglich Konzentration auf einzelne festgelegte Knoten.
- *Nachhaltige Antriebsenergie*: Geringe direkte Einflüsse auf das Verkehrsgeschehen; sichern die Mobilität auch unter verstärkter Energie- und Klimapolitik. Bei systemgerechter Umsetzung ist Mobilität Teil der Lösung für die Energiewende.
- *Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur*: Ausbau der Verkehrsinfrastruktur durch Ausdifferenzierung neuer Systeme (Hochgeschwindigkeitstransportsysteme, Güter-Röhrensysteme, intermodale Behälter).
- *Virtual & Augmented Reality*: Kann die physische Verkehrsnachfrage substituieren, aber auch intermodale Wegeketten einfacher und komfortabler machen.

Zusätzlich gibt es sechs «*enabling technologies*», welche die Voraussetzung bilden für die «*main technologies*»; sie *beeinflussen die systemischen Parameter* (Umwelt, Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer, Kapazität) und haben indirekte Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage: *Batterietechnologien, Robotik, Vernetzung, Künstliche Intelligenz, Revolutionäre User Devices, Blockchain*. Für jede Schlüsseltechnologie liegen Steckbriefe mit folgenden Elementen vor:

- Chancen und Risiken
- Treiber und Hindernisse
- Einflüsse auf den Verkehr (Reisezeit, Kosten, Sicherheit und Komfort; Umweltbelastung; Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer)
- Ungefährer Zeitverlauf bis zur Erlangung der Marktreife.

Diffusion der Schlüsseltechnologien

Für den technologischen Wandel ist der Zeitverlauf der Marktpenetration der einzelnen Technologien entscheidend. Dabei wird unterschieden zwischen Marktreife (im Sinne der Verfügbarkeit) und Marktdurchdringung (im Sinne des Marktanteils einer bestimmten Technologie an den neu in Verkehr gesetzten Fahrzeugen). Weil der Zeithorizont 2060 sich herkömmlicher Methoden entzieht, wurden verschiedene Analysen und Modelle, sowie Techniken der Zukunftsforschung eingesetzt, um ein aussagekräftiges Bild der möglichen Zeitverläufe der Technologien zu erhalten.

Welche Technologien künftig zur Verfügung stehen, hängt nicht vom heutigen Zustand ab: Der technologische Wandel und damit die Marktreife ist im Wesentlichen exogen zum Schweizer Verkehrssystem. Der effektive Einsatz und damit der Marktanteil hängt aber von den Eigenschaften der einzelnen Märkten und von ihrer Regulierung ab.

Insbesondere führen die technische Lebensdauer und Bestandesumwälzung von Fahrzeugen zu spezifischen Trägheiten: Die Marktdurchdringung wird bei den Digitalisierungs- und IT-Technologien am schnellsten gehen. Auf der Ebene der Transportmittel wird die Marktdurchdringung bei den Bussen, Nutzfahrzeugen und Personenwagen am schnellsten geschehen, während bei Flugzeugen und Zügen auf Modelle, welche heute neu beschafft werden, auch noch im Jahr 2060 relevante Verkehrsanteile entfallen werden.

Aus den Lebensdauern und der Bestandesumwälzung lassen sich exemplarische Markteindringungsszenarien berechnen. Wie lange dauert beispielsweise die Phase des «Mischverkehrs» zwischen nicht-automatisierten Fahrzeugen und automatisierten/vernetzten Fahrzeugen? Dazu kann man indikativ betrachten wie lange es dauert, bis nach dem Markteintritt 90% des Fahrzeugbestands einer neuen Technologie entsprechen:

- Personenwagen: Zwischen 26 Jahre und 41 Jahre (für eine schnelle bzw. eine langsame Marktdiffusion);
- Busse, Lieferwagen und LKW: Zwischen 23 und 38 Jahre für eine schnelle bzw. eine langsame Marktdiffusion).

Wirkungen auf das Verkehrssystem

Die Auswirkungen des technologischen Wandels, repräsentiert durch die Schlüsseltechnologien, auf das Verkehrssystem betreffen vor allem das Angebot und indirekt die Nachfrage; und erst nachgelagert die benötigten Ressourcen und die Raumstruktur. Zwischen Personen- und Güterverkehr treten Unterschiede auf, auch wenn die zugrundeliegenden Technologien stark verwandt sein können. Es ist erforderlich, für jede Schlüsseltechnologie ein Wirkungsmodell zu erarbeiten.

Fünf Schlüsseltechnologien wirken direkt auf Angebot und Nachfrage und stellen in diesem Kontext relevanten Schlüsseltechnologien dar. Die weitreichendsten Auswirkungen auf das Verkehrssystem bewirken *automatisierte Strassenfahrzeuge*, mit möglichen negativen Folgen auf die Raumstruktur (Zersiedelung), während *Neue Verkehrssysteme* die Verdichtung von Siedlungsräumen unterstützen. *Virtual & Augmented Reality* erweist sich als einzige Schlüsseltechnologie, welche Verkehr gänzlich zu substituieren vermag.

Im Güterverkehr besitzen die Schlüsseltechnologien *Vernetzung*, *Künstliche Intelligenz* und *Blockchain* ebenso wie *Neue Verkehrssysteme* das Potenzial, Logistikabläufe zu verstetigen und damit gesamte Prozessketten umzuwälzen. *Additive Fertigungsverfahren* unterwandern bestehende Abfolgen von Herstellung, Transport und Fertigung und bewirken Veränderungen in der gesamten Wertschöpfungskette. *Automatisierte Luftfahrzeuge* führen zu einer zuverlässigen Abwicklung kleinteiliger Sendungsgrößen (Bsp. Pakete) und entlasten den Landverkehr.

Alternative Antriebsenergien stellen zwar eine Haupt-Schlüsseltechnologie dar, der Einfluss ist aber stark von der Ausgestaltung durch den Regulator abhängig. Auch bei einem zunehmenden Einsatz sehr effizienter Strassenfahrzeuge und erneuerbarer Energien würden die Energiekosten etwa gleich bedeutend sein wie heute und Verkehrsangebot und -nachfrage wenig beeinflussen.

Der technologische Wandel in drei Szenarien

Das Gesamtprojekt «Verkehr der Zukunft 2060» verwendet – für alle Teilprojekte identisch – *drei mögliche, kohärente Zukunftsbilder zum Schweizer Mobilitätssystem*. Der technologische Wandel ist exogen zum Schweizer Mobilitätssystem, d.h. alle Technologien stehen immer «zur Verfügung». Welche Ausprägung sie annehmen und wozu sie Anwendung finden, kann sehr unterschiedlich sein. Für die drei Zukunftsbilder wurden mit einem expertenbasierten Delphi-Verfahren kohärente Kombinationen der Ausprägungen der Schlüsseltechnologien ausgearbeitet. Je nach Szenario kommen die Haupt-Schlüsseltechnologien für andere Mobilitätsdienstleistungen zur Anwendung. Geht die Entwicklung stark in Richtung individueller Mobilitätsservices, kommen automatisierte Fahrzeuge als privat gehaltene Alleinfahrzeuge zum Einsatz. Werden hingegen kollektive Mobilitätsservices betont, können die gleichen Technologien für automatisierte Sammeltaxis eingesetzt werden. Verkehrsreduzierende Schlüsseltechnologien (additive Fertigungsverfahren und 3D-Druck sowie Virtual und Augmented Reality) spielen eine grössere Rolle, je mehr sich das gesamte Verkehrssystem in Richtung kollektiver Mobilitätsservices entwickelt, um räumliche, energetische und gesamtwirtschaftliche Effizienz zu erzielen.

Schlussfolgerungen

Die *technologischen Potenziale sind sehr gross*. Im Wesentlichen wird durch den Regulator bestimmt, ob Schlüsseltechnologien zur Realisierung der Chancen – und das Minimieren der Risiken – für den Verkehr der Zukunft zum Einsatz kommen. Im Verbund eingesetzt, können die Schlüsseltechnologien eine zeitliche und räumliche Verteilung des Verkehrs ermöglichen, die Kapazitäten erhöhen und die steigende Verkehrsnachfrage effizient bewältigen. Auch erlauben die Schlüsseltechnologien – im Verbund eingesetzt – eine weitere starke Erhöhung der Effizienz des Verkehrs im Hinblick auf Energie, Klima und Flächeninanspruchnahme.

Es gibt aber keine Schlüsseltechnologie, welche bei heutiger Regulierung sich rein von sich aus durchsetzen und diese Effekte bewirken würde. *Ohne* eine auf das ganze Mobilitätssystem ausgerichtete *Regulierung* werden sich vor allem jene Schlüsseltechnologien manifestieren, welche die direktesten (für den Einzelnen relevanten) Aspekte des Verkehrs beeinflussen, und die Mobilität schneller, günstiger und komfortabler machen (*individuelle statt systemische Optimierung*).

Summary

Sub-project “Technological change and its consequences for mobility and transportation”

The aim of the main project “Transport of the future 2060” is to arrive at a vision for the long-term development of transportation. This sub-project focuses on the technological aspects of this project, namely:

- What are the relevant technological developments that can be expected between now and 2060? What trends will drive these developments, and how will the technologies be interdependent?
- How can the overall technological development be illustrated in a visually effective way, focusing on a compact set of key technologies?
- What effects will the various technologies have on supply and demand in private and freight transportation?
- How might the key technologies manifest themselves in the three long-term development scenarios?

Research methods and the term “key technology”

The aim is to illustrate the technology transformation and its influence on Transport 2060 by distilling it down into a *compact set of key technologies*. This set must be sufficiently comprehensive to show the mutual dependencies of the various technologies on the one hand, as well as their effects on supply and demand in transportation on the other.

The term “key technology” is defined specifically for the purposes of this study as follows: “A key technology is defined by its *significant influence on future transportation and its systemic benefit*”. Already-established key technologies (such as electric vehicles) are not covered by this study. Key technologies shape the pertinent mobility factors of time, cost, comfort, and systemic influences. They allow to offer and roll out *transportation that is faster, cheaper, more comfortable and more systemically efficient*.

Trends in digitization and automation

The continual progress of technology has made individual cars, heavy goods vehicles and trains faster, cheaper and more efficient. Digitization has the potential to *optimize the transport system as a whole* by 2060 — in other words, to achieve a more even, and thus more efficient, distribution both temporally and spatially. This requires traffic data in real time and the next generation of transmission technology (more powerful than 5G), resulting in a *digital infrastructure as an integral part of an intelligent transport system*.

Real-time data also allow for intermodal mobility platforms and new business models (e.g. “pay as you drive” and “mobility as a service”). The mobility of the future will generate vast volumes of data on *the status of vehicles, traffic and infrastructure*. New vehicles will be required to exchange data (with other vehicles, the infrastructure and the transport system) and will exchange a wide range of data with the car manufacturer. High-resolution traffic data enable traffic and transport management over wide areas as well as the specific enhancement of the transport system. They also form the basis for future time and area-based road and public transport prices (mobility pricing).

The *automation of road vehicles* will change transportation at a fundamental level. It is entirely conceivable that private and goods vehicles may be fully automated and self-driving by 2060, without the costs of a driver. The networking of these is imperative for achieving positive effects in the system (i.e. increased road capacity thanks to reduced headway between vehicles and smoothed driving behavior that responds to others on the road — and thus a higher level of active safety). It will not be until after the mixed-traffic phase (with non-automated and automated/networked vehicles at the same time) that these effects will be realized to their full potential. Even fully automated collective taxis, blurring the distinction between individual and public transport, will be possible.

In terms of the *railways*, digitization and automation allow improved customer interaction and increased efficiency when it comes to the deployment of staff and rolling stock, as well

as in terms of train operation. Following automatic train operation, driverless (but monitored) train operation will also be conceivable in the future. Fully unstaffed operation is a possibility for isolated lines, but not yet foreseeable for long-distance and regional transport.

Trends in individual modes of transport at home and abroad

The overall project “Transport of the future 2060” focuses on the mobility system within our national borders. In 2015, 55% of the person miles traveled by the Swiss population were still accounted for by domestic travel – but the figure was trending downwards. The focus here is on *road and rail travel for the purpose of optimizing daily traffic volumes in terms of spatial and cost efficiency*, and on optimal use of the infrastructure. Travel time and budgets are shifting abroad, where the focus is on *higher journey speed and better services*. A difference exists between the technologies that are relevant for mobility behavior at home and those abroad, and the two transport systems are visibly concentrated on sub-aspects of the transport demand.

Battery cells are reducing in price, and *electrification of road vehicles* is becoming economical for increasing numbers of vehicle types, while coverage is also increasing. Electrification will initially be implemented for small vehicles, and for larger vehicles, hybrids offer efficiency savings. In the case of delivery vehicles, public buses and heavy commercial vehicles for local use, electrification is taking place more rapidly than with passenger vehicles and motorized cycles as the overall costs are considered more rationally, the daily travel distances are known, and annual mileages are higher. Electrification per se has only a minimal effect on traffic, but new categories of mobility devices and mini-vehicles could emerge (for instance, in the evolution of today’s Segways). The parallel development of electrification and automation will increase the attractiveness of personal vehicles.

Because of the longevity of the infrastructure, *rail transport* is highly path-dependent (the timetabling is determined by the infrastructure and cannot be rapidly adjusted). The continued growth in passenger vehicles is resulting in excess pressure on certain public transport hubs and their respective road connections.

Shipping is seeing continual growth, although the high energy demands with this transport mode makes the switch to renewable energy sources difficult. The comforts of cruise-ship travel bring with them high levels of electricity consumption. Speed reductions for cargo ships can reduce their energy requirements.

Given the energy-intensive nature of *air travel*, which is experiencing a 3 to 5% growth year-on-year, the deployment of renewable energy is also problematical here. There remain unanswered questions relating to energy efficiency, safety, flight paths and landing areas when it comes to the use of drones for passenger or goods transportation in conurbations.

Identification of the set of key technologies

The methodology involved first drawing up a longlist of technologies based on literature and internet research, expert interviews and the analysis of relevant trends, which was then verified in workshops with experts. The longlist was then distilled down in stages to the set of key technologies. The primary spheres of activity of the technologies were identified and each technology was categorized accordingly. The interdependencies between the various technologies were also analyzed. The technologies were discussed and prioritized in a series of workshops with internal and external experts as well as members of the Advisory Commission. Twelve key technologies were finally selected on the basis of expert knowledge, insights from expert interviews and employment of the Delphi method.

The twelve selected key technologies

A distinction is made between “main technologies”, which have direct effects on transport provision, and “enabling technologies”, which form the foundation and prerequisites for the former. The six “*main technologies*” have a *direct influence* on the main parameters of any one mobility service (i.e. *time, cost and comfort*):

- *Automated road vehicles*: Enabling new public transport provision, better connections to outlying areas and use of transport by young people, the elderly and people with disabilities. Risk of increased traffic.

- *Additive manufacturing techniques* (incl. 3D printing): Enabling decentralized and rapid production, which allows for more efficient logistics and the manufacture of forms that were hitherto scarcely possible.
- *Automated aircraft* (incl. drones): New, sophisticated form of transport without substituting conventional modes. In cities, concentration on specific individual hubs for safety reasons and space issues.
- *Sustainable motor power*: Little direct influence on the traffic situation; securing mobility even in the face of more stringent energy and climate policies. If implemented systematically, mobility is part of the solution for the energy transformation.
- *New transport systems & infrastructure*: Development of transport infrastructure by means of differentiation of new systems (high-speed transport systems, goods pipeline systems, intermodal containers).
- *Virtual & augmented reality*: Can substitute demand for physical transport, but can also make intermodal routes simpler and more convenient.

In addition, there are six “*enabling technologies*” that are prerequisite for the “main technologies”; these *influence the system parameters* (environment, involvement of new transport users, capacity) and have indirect effects on transport supply and demand:

- *Battery technologies*: As the power density continues to increase and prices reduce, this allows for the electrification of additional mobility services.
- *Robotics*: Solutions for handling goods efficiently enable fully automated supply chains; robots and exoskeletons enable mobility-impaired persons to be mobile.
- *Networking*: The collection, combination and analysis of real-time data of all vehicles, infrastructure and persons enables forecasting of demand, traffic situation and pressure on infrastructure.
- *Artificial intelligence*: Flexible and adaptive traffic management that is capable of learning, and responsive availability (e.g. of automated and/or shared rides).
- *Revolutionary user devices*: With the next or next-but-one generation of mobile devices, we will remain fully informed at all times and in a way that is tailored and adaptive to individual needs.
- *Blockchain*: Allows forgery-proof, cross-provider tickets with no central agent, and simplifies price calculations for shared rides.

For each key technology there are fact sheets containing the following information:

- Opportunities and risks
- Drivers and obstacles
- Influence on traffic and transport (journey time, cost, safety and comfort; pressures on the environment; involvement of new transport users)
- Approximate time to readiness for market.

Diffusion of the key technologies

The length of time to market penetration for the individual technologies is critical for the technology transformation. A distinction is made here between readiness for market (in the sense of availability) and market penetration (in the sense of the market share of a particular technology in vehicles that are newly in circulation). The 2060 timeframe will see a move away from conventional methods, and so a number of different analyses and models were deployed alongside futures-research methodologies to construct a meaningful picture of the possible timelines of the relevant technologies.

What technologies will be available in the future does not depend on the current state of affairs: the technology transformation is largely exogenous to the Swiss transport system. Rather, their effective deployment and, thus, market share, is dependent on the characteristics of the individual markets and on their regulation.

In particular, the technological lifetime and fleet circulation of vehicles leads to inertia in certain areas, and market penetration will take place most rapidly in the case of digitization and IT technologies. When fast market penetration is combined with a significant technical change, this will have disruptive effects. The other elements of the transport system are less able to react as quickly, however. When it comes to the different modes of transport,

market penetration will take place most rapidly with buses, commercial vehicles and passenger vehicles, while the aircraft and train models that are coming into circulation today will still account for a significant share of the transportation picture in 2060.

Examples of market penetration scenarios can be calculated on the basis of vehicle lifetimes and fleet circulation. For instance, in terms of the question as to how long the phase of “mixed transport” (the parallel use of non-automated and automated/networked vehicles) will last, the indicative answer lies in how long it takes for 90% of the vehicle fleet to incorporate a new technology after it has been released on the market:

- Passenger vehicles: Between 26 and 41 years (for a rapid vs. slow market diffusion);
- Buses, delivery vehicles and HGVs: between 23 and 38 years (for a rapid vs. slow market diffusion).

Impacts on the transport system

The effects of the technology transformation, as represented by the key technologies, on the transport system will primarily relate to supply, and indirectly, to demand, followed by the required resources and spatial structure. Differences exist between passenger and goods transportation, even though the technologies behind the various forms of transport may be very similar. A separate impact model must therefore be constructed for each key technology. Five key technologies have a direct impact on supply and demand and are relevant in this context. The most far-reaching effects on the transport system are brought about by *automated road vehicles*, with potential negative consequences for spatial structure (overdevelopment), while *new transport systems* encourage the densification of urban areas. *Virtual & augmented reality* would appear to be the only key technology which can completely substitute physical transport.

In the case of goods transportation, the key technologies of *networking*, *artificial intelligence and blockchain*, in addition to *new transport systems*, have the potential to consolidate logistical processes and thus revolutionize entire process chains. *Additive manufacturing processes* are penetrating into existing manufacturing, transport and finishing processes and instigating change throughout the entire supply chain. *Automated aircraft* will result in the reliable processing of small-item shipping (e.g. parcels), thus taking pressure off land traffic.

While alternative motor power is one of the main key technologies, its impact is heavily dependent on structuring by the regulator. Even in the case of an increased use of highly energy-efficient road vehicles and renewable energy sources, the energy costs would be more or less as significant as they are today, and would have little impact on supply and demand when it comes to transportation.

The technology transformation in three scenarios

The main “Transport of the Future 2060” project employs *three possible coherent future scenarios for the Swiss mobility system* – identical for all three sub-projects. The technology transformation is exogenous to the Swiss mobility system; in other words, all of the technologies are always “available”. However, what form they take and for what purposes they are utilized can vary greatly. To formulate the three future scenarios, coherent combinations of the key technologies in their various manifestations were arrived at by means of the Delphi method, using experts at the center of the process. In each scenario, the main key technologies are used for different mobility services. In the scenario where developments are strongly headed in the direction of individual mobility services, automated vehicles in the form of privately-owned individual cars are utilized. On the other hand, where there is an emphasis on collective mobility services, the same technologies are deployed for automated collective taxis.

Key technologies that result in a reduction of traffic (additive manufacturing and 3D printing as well as virtual & augmented reality) play a greater role, the more the developments in the transport system as a whole are oriented towards collective mobility services with a view to achieving efficiency in terms of space, energy and overall economy.

Conclusions

The *potential of the technologies* is significant. For the most part, the regulator will determine whether key technologies are deployed to realize the opportunities – and minimize the risks – of the transport of the future. When utilized in combination, the key technologies can help to achieve a smoother temporal and spatial distribution of traffic, as well as increase capacities and meet the rising transportation demands efficiently. The key technologies, again, in combination, also allow for further substantial increases in the efficiency of transport in terms of energy, climate and use of space, as well as safety.

There are no key technologies, however, that would take hold under today's regulation and bring about these effects by themselves. *Without regulation* that is focused on the entire mobility system as a whole, the key technologies that will primarily manifest themselves will be those which have an influence on the direct aspects of transport – on those aspects that are relevant to the individual, and which make travel faster, cheaper and more comfortable; in other words, achieving *individual rather than system-oriented optimization*.

Résumé

Sous-projet « Le changement technologique et ses conséquences pour mobilité et transport »

Le projet global « Transports du futur 2060 » vise à développer une vision visionnaire du développement des transports sur le long terme. Le présent sous-projet s'attarde sur les aspects technologiques de ce développement :

- Quelles seront les évolutions technologiques majeures d'ici à 2060 ? Quelles sont les tendances qui les animent, dans quelle mesure sont-elles interdépendantes ?
- Comment refléter ce changement technologique de manière représentative et prégnante sous la forme d'un ensemble compact de technologies clés ?
- Quels sont les effets des différentes technologies sur l'offre et la demande de transport de personnes et de marchandises ?
- Comment les technologies clés peuvent-elles se manifester au travers des trois scénarios de développement à long terme du projet global ?

Méthode de recherche et concept opérationnel de « technologie clé »

La mutation technologique et son influence sur le développement des transports à l'horizon 2060 doivent être concrétisées par un *ensemble compact de technologies clés*. Celui-ci doit être suffisamment complet pour illustrer les interdépendances des technologies d'une part, et leurs effets sur l'offre et la demande de transport d'autre part.

Le concept de « technologie clé » est défini comme suit dans le cadre de la présente étude : « Une technologie clé se définit par son *influence significative sur l'avenir des transports et ses atouts systémiques*. » Ne sont pas prises en compte les technologies clés déjà établies à ce jour (par ex. les véhicules électriques).

Les technologies clés ont un impact sur les caractéristiques pertinentes de la mobilité : temps de transport, coûts, confort et aspects systémiques. Elles *permettent* d'offrir et de gérer des offres de transport *plus rapides, plus économiques, plus confortables ou plus performantes d'un point de vue systémique*.

Tendances sur le front de la numérisation et de l'automatisation

Les progrès techniques constants ont permis d'abaisser le coût individuel des voitures, des camions et des trains tout en les rendant plus rapides et plus efficaces. Le potentiel de la numérisation devrait permettre d'*optimiser l'ensemble du système de transport* d'ici à 2060, c'est-à-dire de le rendre plus homogène en termes de temps et d'espace, et donc plus performant. Pour cela, il faut des données de trafic en temps réel ainsi que des technologies de transmission de la prochaine génération (plus puissantes que la 5G) et, par conséquent, une *infrastructure numérique qui s'inscrit dans un système de transport intelligent*.

Les *données en temps réel* permettent également la mise en place de plateformes de mobilité intermodales et de nouveaux modèles économiques (« pay as you drive », « mobility as a service »). La mobilité de demain générera d'énormes volumes de données sur l'*état des véhicules, du trafic et des infrastructures*. Les nouveaux véhicules devront obligatoirement échanger leurs données (avec d'autres véhicules, avec l'infrastructure et avec le système de transport) et échanger des données détaillées avec le constructeur automobile concerné. Les données de trafic à haute résolution permettent une gestion du trafic sur des périmètres plus étendus et un développement ciblé du système de transport. Elles constituent également la base de la future tarification du transport sur route et des TP en fonction de l'horaire et du lieu (« Mobility Pricing »).

L'*automatisation des véhicules routiers* modifie radicalement le trafic. Pour l'année 2060, des véhicules automobiles entièrement automatisés sont envisageables pour le transport de personnes et de marchandises – sans aucun coût conducteur. Leur mise en réseau est impérative afin d'obtenir des effets positifs sur le système (hausse de la capacité routière grâce à un raccourcissement des distances entre les véhicules et à un mode de conduite

plus homogène et adapté aux autres usagers ; sécurité active accrue). Ces effets se manifesteront pleinement qu'après la phase de trafic mixte (présence simultanée de véhicules non automatisés et de véhicules automatisés/en réseau). Des taxis collectifs entièrement automatisés, lesquels estompent les frontières entre modes de transport individuels et transports publics, deviendront dès lors possibles également.

Sur le *rail*, la numérisation et l'automatisation permettent d'améliorer l'interaction avec les clients, d'accroître l'efficacité en matière d'affectation du personnel et du matériel roulant ainsi que d'exploitation. Après l'exploitation automatique des trains, la conduite des trains sans conducteur (mais accompagné) deviendra une option envisageable. Si la conduite sans aucun personnel à bord est d'ores et déjà possible sur des lignes isolées, elle n'est pas encore envisageable à ce jour dans le transport longue distance et le transport régional.

Tendances par mode de transport en Suisse et à l'étranger

Le projet global « Transports du futur 2060 » a pour axe principal le système de mobilité à l'intérieur des frontières nationales. En 2015, 55 % des passagers-kilomètres parcourus par la population suisse concernaient encore le territoire suisse, avec une tendance à la baisse. Le curseur est mis ici sur le *transport routier et ferroviaire pour une gestion efficace de l'espace et des coûts du trafic quotidien* et sur l'utilisation optimale de l'infrastructure. Les temps et les budgets de déplacement concernent de plus en plus des tronçons à l'étranger, où l'accent est mis sur des *vitesse de déplacement plus élevées et des prestations de services à plus forte valeur ajoutée*. Les technologies qui tiennent compte des comportements en matière de mobilité sont différentes en Suisse et à l'étranger, aussi les deux systèmes de transport se spécialisent-ils de plus en plus dans des segments spécifiques de la demande de transport.

Les batteries sont de moins en moins chères, l'*électrification des véhicules routiers* est de plus en plus économique dans un nombre sans cesse croissant de segments de véhicules ; dans le même temps, les autonomies augmentent. L'électrification va s'imposer dans un premier temps dans le segment des petites voitures, tandis que l'hybridation va permettre de dégager des gains d'efficacité sur le segment des véhicules de plus grandes tailles. Sur le front des véhicules de livraison, des autobus de transport public et des véhicules utilitaires lourds utilisés pour des trajets locaux, l'électrification est plus rapide que pour les voitures particulières et des deux-roues motorisés, car les coûts globaux sont pris en compte de manière plus rationnelle, les autonomies quotidiennes requises sont connues et les kilométrages annuels sont supérieurs. L'électrification en soi n'a qu'un faible impact sur le trafic, mais de nouvelles catégories de véhicules urbains de petite taille (par exemple, le développement des gyropodes électriques actuels de type « Segway ») peuvent émerger. L'électrification et l'automatisation simultanées vont augmenter l'attractivité de la voiture particulière.

En raison de la longue durée de vie de l'infrastructure, le *transport ferroviaire* est fortement dépendant du chemin emprunté (l'offre horaire est déterminée par l'infrastructure et n'est pas adaptable rapidement). La poursuite de la hausse du transport de personnes entraîne une surcharge de certains nœuds de transports publics et de leur raccordement au réseau routier.

Pour ce qui concerne le *transport par voies navigables*, en constante augmentation, la forte demande d'énergie rend difficile le passage aux sources d'énergie renouvelables. Le confort à bord des paquebots de croisière va de pair avec une forte consommation d'électricité. Les limitations de vitesse des cargos peuvent réduire la consommation d'énergie.

En dépit de l'augmentation de 3 à 5 % par an du *trafic aérien*, l'utilisation des énergies renouvelables s'avère difficile en raison des densités énergétiques requises. Le recours à des drones pour le transport de personnes ou de marchandises dans les agglomérations se heurte à des questions toujours sans réponses concernant l'efficacité énergétique, la sécurité, les routes aériennes et les sites d'atterrissage.

Identification de l'ensemble des technologies clés

Sur le plan méthodologique, une « long list » (longue liste) de technologies a d'abord été établie à l'aide de recherches bibliographiques et sur Internet, d'entretiens avec des experts et sur la base de l'analyse des tendances pertinentes, avant d'être vérifiée au sein d'ateliers d'experts. L'ensemble des technologies clés a été distillé en plusieurs étapes à partir de la « long list ». Les principaux champs d'action des technologies ont été identifiés et chaque technologie a été classée en conséquence. Les interdépendances entre les technologies ont été analysées. Dans le cadre de plusieurs ateliers avec des experts internes et externes ainsi que des membres de la commission d'accompagnement, les technologies ont été examinées et classées par ordre de priorité. Sur la base de connaissances d'experts, de conclusions tirées d'interviews d'experts et d'une procédure Delphi, douze technologies clés ont finalement été sélectionnées.

Les douze technologies clés sélectionnées

Une distinction est opérée entre les « main technologies » (technologies clés), lesquelles ont un impact direct sur l'offre de transport, et les « enabling technologies » (technologies habilitantes), qui en constituent la base et la condition préalable. Les six « *main technologies* » *influencent directement* les principaux paramètres de chaque service de mobilité (*temps, coût, confort*) :

- *Véhicules routiers automatisés* : ils permettent de nouvelles offres de transports publics, un meilleur raccordement des zones périphériques et l'utilisation des TP par le jeune public, les personnes âgées et les handicapés physiques. Risque d'augmentation du trafic.
- *Procédés de fabrication additifs* (y compris l'impression 3D) : ils permettent une production décentralisée et à court terme avec, à la clé, une logistique plus efficace, ainsi que la production de formes guère réalisables jusqu'à présent.
- *Aéronefs automatisés* (y compris les drones) : nouvelle forme de transport à fort valeur ajoutée, sans substitution des modes de transport conventionnels. Dans les villes, focalisation dans la mesure du possible sur des nœuds isolés déterminés pour des raisons de sécurité et de gain de place.
- *Énergie de propulsion alternative* : répercussions directes mineures sur le trafic ; mobilité sécurisée y compris dans le cadre de politiques énergétiques et climatiques renforcées. Dans le cas d'une mise en œuvre conforme au système, la mobilité fait partie intégrante de la solution pour le tournant énergétique.
- *Nouveaux systèmes et infrastructures de transport* : expansion de l'infrastructure de transport par une différenciation des nouveaux systèmes (systèmes de transport à grande vitesse, systèmes de transport de marchandises par tubes, conteneurs intermodaux).
- *Réalité virtuelle et augmentée* : peut se substituer à la demande de transport physique, mais aussi simplifier et accélérer les itinéraires intermodaux.

Il existe en outre six « *enabling technologies* », lesquels constituent une condition préalable aux « main technologies » ; ces technologies *influencent les paramètres systémiques* (environnement, intégration de nouveaux usagers, capacité) et ont des effets indirects sur l'offre et la demande de transport :

- *Technologies des batteries* : la hausse continue de la densité énergétique dans un contexte de baisse des prix permet l'électrification de services de mobilité supplémentaires.
- *Robotique* : des solutions pour un transbordement efficace des marchandises permettent d'utiliser des chaînes logistiques automatisées ; des robots et des exosquelettes assurent la mobilité des personnes à mobilité réduite.
- *Mise en réseau* : la collecte, la combinaison et l'évaluation des données en temps réel de l'ensemble des véhicules, des infrastructures et des personnes permettent de prédire la demande, le trafic et la sollicitation de l'infrastructure.
- *Intelligence artificielle* : le contrôle flexible, adaptatif et auto-apprenant du trafic et l'adaptation des offres (automatisées + partage de véhicules).
- *Équipements utilisateurs révolutionnaires* : la prochaine génération d'« appareils mobiles » (et celle d'après) permet de rester informé à tout moment et de manière exhaustive, personnalisée et adaptative.

- *Blockchain* : permet de créer des billets infalsifiables et inter-fournisseurs sans médiateurs, et simplifie la facturation des offres de partage de véhicules.

Chaque technologie clé dispose d'une fiche signalétique reprenant les éléments suivants :

- Opportunités et risques
- Moteurs et obstacles
- Répercussions sur le transport (durée de déplacement, coûts, sécurité et confort ; impact sur l'environnement ; intégration de nouveaux usagers)
- Délai approximatif avant la maturité commerciale.

Diffusion des technologies clés

Pour la mutation technologique, l'évolution dans le temps de la pénétration commerciale des différentes technologies est un facteur décisif. Une distinction est opérée en l'espèce entre la maturité commerciale (en termes de disponibilité) et la pénétration du marché (en termes de part de marché d'une technologie spécifiques par rapport à l'ensemble des véhicules neufs mis en circulation). Étant donné que l'horizon temporel 2060 échappe aux méthodes conventionnelles, diverses analyses et modèles ainsi qu'un certain nombre de techniques de prospective ont été utilisés pour obtenir un tableau éloquent de l'évolution possible des technologies au fil du temps.

Les technologies qui seront disponibles à l'avenir ne dépendent pas de la situation actuelle : la mutation technologique et, partant, la maturité commerciale sont essentiellement exogènes au système de transport suisse. Leur mise en œuvre effective et donc la part de marché qu'elles représentent dépendent toutefois des caractéristiques des différents marchés et de leurs réglementations respectives.

En particulier, la durée de vie technique et le renouvellement des flottes engendrent des inerties spécifiques : les technologies informatiques et de numérisation sont celles qui afficheront la pénétration de marché la plus rapide. Pour autant qu'elle s'accompagne d'un changement technique majeur, la pénétration rapide sur le marché engendre des effets disruptifs (les autres éléments du système de transport réagissent moins rapidement). Au niveau des moyens de transport, la pénétration du marché la plus rapide concernera les autobus, les véhicules utilitaires et les voitures particulières, tandis que les nouveaux avions et trains achetés aujourd'hui continueront de représenter une part importante du transport en 2060.

Des scénarios types de pénétration de marché peuvent être calculés à partir des durées de vie et de la rotation des stocks. Par exemple, combien de temps dure la phase de « trafic mixte » où cohabitent véhicules non automatisés et véhicules automatisés/en réseau ? En outre, il est possible d'évaluer à titre indicatif le temps nécessaire pour que le taux de remplacement du parc automobile existant par les nouvelles technologies atteigne 90 % à partir de leur entrée sur le marché :

- Voitures particulières : entre 26 et 41 ans (pour une diffusion rapide ou lente sur le marché) ;
- Autobus, véhicules de livraison et camions : entre 23 et 38 ans pour une diffusion rapide ou lente sur le marché).

Répercussions sur le système de transport

Les effets de la mutation technologique – représentés par les technologies clés – sur le système de transport affecte au premier chef l'offre et, indirectement, la demande et, seulement en aval, les ressources nécessaires et la structure spatiale. Des différences se font jour entre le transport de personnes et le transport de marchandises, bien que les technologies sous-jacentes puissent être étroitement liées. Il est nécessaire d'élaborer un modèle d'impact distinct pour chaque technologie clé.

Cinq technologies clés ont un impact direct sur l'offre et la demande et constituent à cet égard des technologies clés pertinentes. Les répercussions les plus prégnantes sur le système de transport sont causées par les *véhicules routiers automatisés*, avec des effets négatifs possibles sur la structure spatiale (mitage), tandis que les *nouveaux systèmes de transport* favorisent la densification des espaces urbains. La *réalité virtuelle et augmentée* s'avère être la seule technologie clé capable de se substituer entièrement au transport physique.

Dans le transport de marchandises, des technologies clés telles que la *mise en réseau*, l'*intelligence artificielle* et le *blockchain*, ainsi que les *nouveaux systèmes de transport* ont le potentiel pour consolider les processus logistiques et bouleverser ainsi les chaînes de processus entières. Les *processus de fabrication additifs* sapent les séquences de production, de transport et de fabrication existantes et entraînent des changements dans l'ensemble de la chaîne de valeur. Les *aéronefs automatisés* permettent de traiter avec efficacité les envois de petits formats (par ex. les colis) et de délester le transport terrestre.

Les énergies de propulsion alternatives représentent certes une technologie clé, mais leur influence dépend fortement des conditions cadres définies par le régulateur. Même en misant davantage sur les véhicules routiers à haut rendement énergétique et les énergies renouvelables, les coûts énergétiques se maintiendraient à des niveaux à peu près identiques à ceux d'aujourd'hui et auraient peu d'impact sur l'offre et la demande de transport.

Trois scénarios de mutation technologique

Le projet global « Transports du futur 2060 » repose – de manière identique pour tous les sous-projets – sur *trois modèles d'avenir possibles et cohérents pour le système de mobilité suisse*. La mutation technologique est exogène au système de mobilité suisse, c'est-à-dire que toutes les technologies demeurent « disponibles » à tout moment. Les modalités et les champs d'application de ces technologies peuvent varier considérablement. Pour les trois visions d'avenir, des combinaisons cohérentes des modalités des technologies clés ont été élaborées à l'aide d'une procédure Delphi basée sur la consultation d'experts. Selon le scénario, les principales technologies clés sont employées pour différents services de mobilité. Si la tendance va vers les services de mobilité individuelles, les véhicules automatisés seront utilisés comme véhicules privés individuels. En revanche, si l'accent est mis sur les services de mobilité collective, les mêmes technologies pourront être mises en œuvre pour les taxis collectifs automatisés.

Les technologies clés visant à la réduction du trafic (procédés de fabrication additifs et impression 3D, réalité virtuelle et augmentée) jouent un rôle croissant à mesure que l'ensemble du système de transport évolue vers des services de mobilité collective afin de dégager un modèle efficient en termes de gestion de l'espace, de consommation énergétique et d'économie globale.

Conclusions

Les *potentiels technologiques sont énormes*. Essentiellement, le régulateur détermine si les technologies clés seront utilisées pour mettre en œuvre les opportunités – et minimiser les risques – pour les transports de demain. Dans le transport combiné, les technologies clés peuvent permettre une répartition du trafic dans le temps et dans l'espace, engendrer une hausse de la capacité et apporter une réponse efficace à la demande croissante dans le domaine des transports. Dans le transport combiné, les technologies clés contribuent par ailleurs à une nouvelle amélioration sensible de l'efficacité des transports en termes de consommation d'énergie, de protection du climat, d'utilisation des surfaces et de sécurité.

Toutefois, il n'existe aucune technologie clé qui s'imposerait d'elle-même sur la base de la réglementation actuelle et qui engendrerait de tels effets. *Sans une réglementation axée sur l'ensemble du système de mobilité*, les technologies clés qui se manifesteront en particulier seront celles qui influenceront sur les aspects directs (pertinents pour l'utilisateur individuel) du transport et rendront la mobilité plus rapide, plus économique et plus confortable (*optimisation individuelle plutôt que systémique*).

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Dieses Projekt behandelt künftige Technologien und deren Auswirkungen auf das Verkehrssystem. Um Aussagen über den zukünftigen technologischen Wandel machen zu können, lohnt sich ein kurzer Blick in die Vergangenheit: Vor 50 Jahren waren alle Fortbewegungsmittel, welche unsere heutige Mobilität prägen, bereits vorhanden. Es gab schon Autos, Züge, Schiffe und Flugzeuge; ihre wesentlichsten Eigenschaften betreffend Flexibilität, Bündelung, Effizienz und Geschwindigkeit sind gleichgeblieben. Der Fortschritt manifestierte sich in diesem Zeitraum, indem die Verkehrsmittel schneller, sicherer, effizienter und billiger wurden. Aktuell gibt es in vielen Bereichen technologische Neuerungen, von welchen einschneidende und mobilitätsverändernde Fortschritte erwartet werden. Die fortschreitende Automatisierung und Vernetzung, welche heute schon in vielen Lebensbereichen beobachtet werden kann, wird auch den Verkehr durchdringen. Die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ermöglichen eine schier unendliche Anzahl neuer Produkte und Dienstleistungen, und können die Fahrzeuge wie auch die Infrastruktur betreffen. Werden die IKT den Verkehr der Zukunft nicht nur beschleunigen, sondern fundamental – tiefgreifender als bisherige Entwicklungen – verändern? Im vorliegenden Bericht geht es um diese und weitere Technologien, und was ihre Auswirkungen auf Angebot und Nachfrage im Verkehr sind.

1.2 Einbettung des Teilprojekts

Neben dem technologischen Wandel gibt es noch weitere wichtige Trends und Entwicklungen, welche den Verkehr der Zukunft verändern werden. Um die verschiedenen Aspekte berücksichtigen zu können, ist das Projekt «Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr» eines von sieben Teilprojekten, welche das übergeordnete Projekt «Verkehr der Zukunft 2060» ausmachen. Die sieben Teilprojekte liefern dabei aufeinander abgestimmten Bausteine um ein vollständiges und aussagekräftiges Zukunftsbild, respektive Szenario, zu zeichnen und wurden drei Kategorien untergeordnet (Abb. 1).

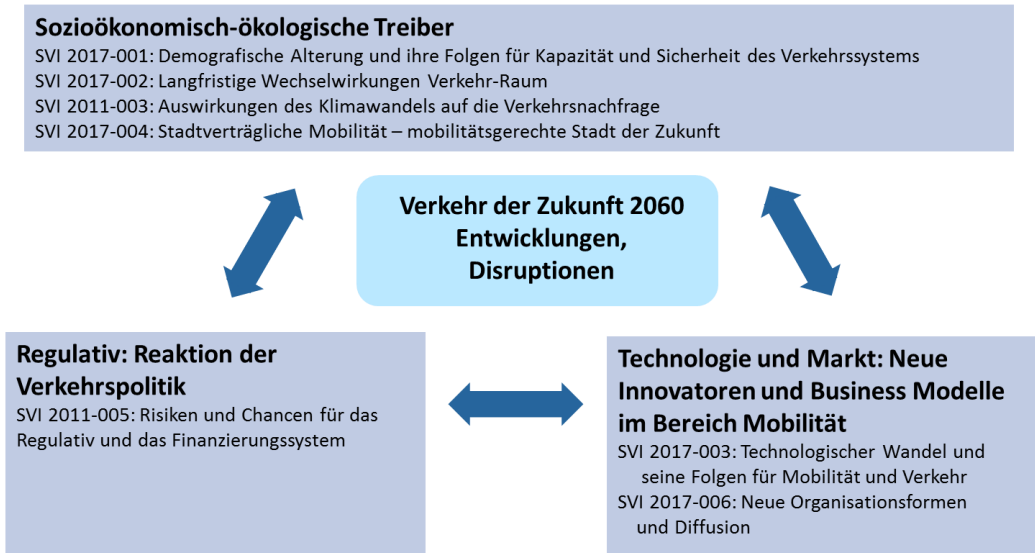


Abb. 1. Einbettung des Teilprojektes im Projekt «Verkehr der Zukunft 2060»

Die parallel laufenden Teilprojekte haben zum Ziel, drei gemeinsame Szenarien aufzubauen. Die Eckpunkte dieser drei Szenarien wurden zu Projektanfang durch die Paketleitung festgelegt. Die Teilprojekte sollen je für ihren Forschungsbereich die Einflüsse auf Verkehrssystem, Angebot und Nachfrage erarbeiten, im Austausch mit den anderen Teilpaketen und der Paketleitung die Eckpunkte der Szenarien präzisieren, und diese greifbar und konsistent machen.

1.3 Forschungsziele

Ziel des Gesamtprojektes «Verkehr der Zukunft 2060» ist, eine visionäre Sicht auf die langfristige Entwicklung des Verkehrs zu erarbeiten. Dieses Teilpaket («Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr») fokussiert dabei auf den rein technologischen Aspekt dieser Entwicklung. Der erwartete technologische Fortschritt wird über die gesamte Spannbreite des Verkehrssystems erforscht.

Folgende Forschungsfragen werden im Rahmen der Studie adressiert:

- Welche sind die relevanten technologischen Entwicklungen bis zum Jahr 2060?
- Welche Trends treiben diese Entwicklungen an?
- Welche Auswirkungen haben die verschiedenen Technologien auf Verkehrsangebot und -nachfrage im Personen- und Güterverkehr?
- Welche sind die Implikationen auf das Gesamtverkehrssystem (Ableitung der Schlüsseltechnologien-Sets zu drei langfristigen Entwicklungsszenarien)?

1.4 Untersuchungsabgrenzung

Zeitlich. Der untersuchte Zeitraum beinhaltet die Zukunft bis zum Jahr 2060. Alle in diesem Zeitraum möglicherweise auftauchenden Technologien sind von Belang. Natürlich nehmen die Unsicherheiten zu, je weiter in der Zukunft ein möglicher Zustand liegt. Das Projekt setzt eine Kombination aus verschiedenen Zukunftsforschungsmethoden ein.

Räumlich. Betreffend der Auswirkungen auf Angebot und Nachfrage wird in diesem Bericht nur jener Verkehr betrachtet, wie er auf dem Territorium der Schweiz stattfindet (Territorialprinzip). Dies ist zu unterscheiden vom Einwohnerprinzip, welches danach strebt, die Verkehre dem Verursacher zuzuordnen. Die Schweizer Wirtschaft fragt zum Beispiel auch Verkehrsdienstleistungen im Ausland nach (Transport von Importgütern), in geringerem Ausmass gibt es auch vom Ausland induzierten Verkehr innerhalb der Schweiz (Güterexport und Gütertransit). Die schweizerische Wohnbevölkerung investiert zudem einen immer grösseren Teil ihrer Reisezeit und ihres Reisebudgets in Auslandflüge, was das Verkehrswachstum innerhalb der Schweiz reduziert.

Inhaltlich. Im vorliegenden Bericht liegt der Fokus auf Technologien innerhalb und ausserhalb des Verkehrssektors, welche eine Wirkung auf das Mobilitätsangebot haben könnten, wenn sie umgesetzt würden. Solche Technologien können ihrerseits neue Mobilitätsangebote ermöglichen oder bestehende verbessern. Ob sich basierend auf einer neuen Technologie in der Zukunft tragfähige Mobilitätsangebote etablieren können, hängt von weiteren Rahmenbedingungen (u.a. Preise, Regulierung) ab, welche nicht Gegenstand dieses Berichts sind. – Nicht berücksichtigt werden Technologien des «Langsamverkehrs». Zwar können namentlich stationsungebundene Mietsysteme für (Elektro-)Velos und (Elektro-)Trotinetts durchaus verkehrliche Wirkungen auf andere Verkehrsträger entfalten und auch Fragen im Bereich der Infrastruktur (Verkehrsflächenanteile) aufwerfen, diese beschränken sich jedoch auf städtische Kerngebiete und beeinflussen die «grossen» Verkehrsträger und ihre Infrastrukturen nicht wesentlich.

2 Vorgehen und Definitionen

2.1 Übersicht zum Vorgehen

Zu Beginn des Projektes wurde zur Ermittlung der relevanten Technologien eine Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Diese Liste wurde durch interne Workshops mit Einbezug der Forschungsstelle sowie durch Workshops und Interviews mit externen Expertinnen und Experten verifiziert und erweitert. Das Resultat war eine abgesicherte Auswahl an Schlüsseltechnologien (für Definition von Schlüsseltechnologien siehe Kap. 2.4).

Der zweite Schritt betraf das Studium des Zeitverlaufs der identifizierten Technologien. In welchem Ausmass werden sich diese Technologien in Zukunft manifestieren, und wovon hängt dies ab? Der mit dem Jahr 2060 gewählte, lange Zeithorizont, entzieht sich herkömmlicher Methoden. Deshalb wurden verschiedene Analysen und Modelle, sowie Techniken der Zukunftsforschung eingesetzt, um ein möglichst aussagekräftiges Bild der möglichen Zeitverläufe der Technologien zu erhalten.

Im dritten und vierten Arbeitsschritt wurden die Auswirkungen auf das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage ausgearbeitet. In diesem Schritt wurde zwischen Personen- und Güterverkehr unterschieden, auch wenn die zugrundeliegenden Technologien stark verwandt sein können.

Im letzten Arbeitsschritt wurden in sich kohärente Kombinationen der Ausprägungen der Schlüsseltechnologien für drei Szenarien ausgearbeitet. Diese drei Szenarien sind für alle Teilprojekte des Gesamtforschungspaketes «Verkehr der Zukunft 2060» identisch.

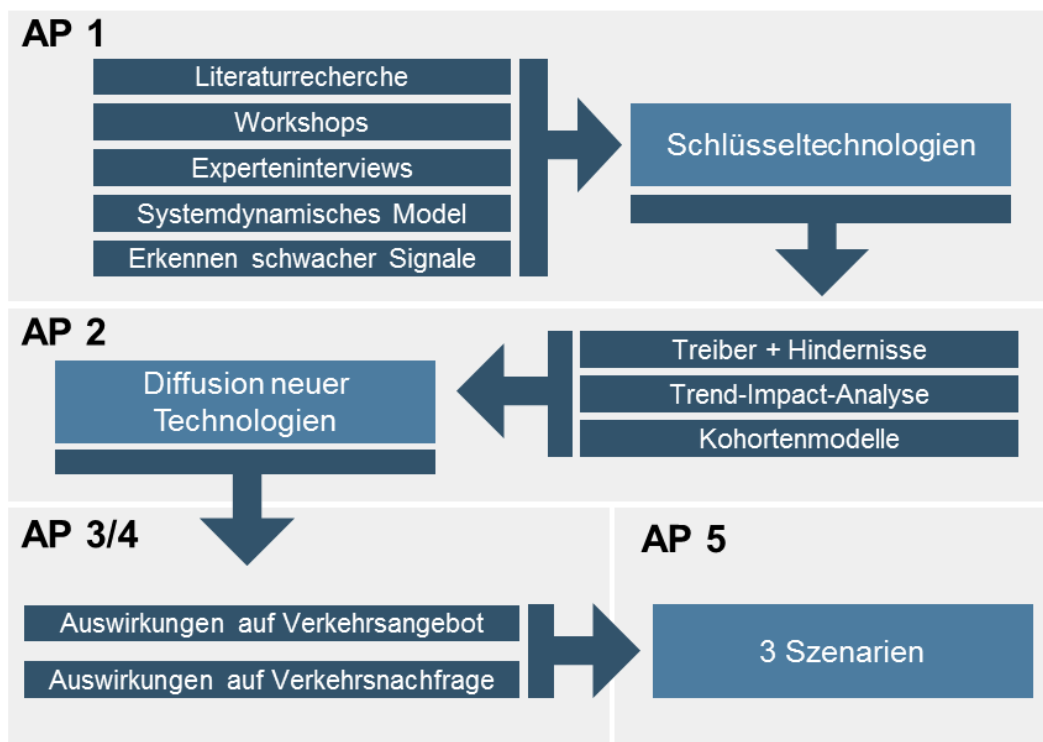


Abb. 2. Flowchart zum Ablauf des Projektes (eigene Darstellung)

2.2 Abgrenzung und Klassifizierung von Technologien

Auch wenn die Definition des Begriffs «Technologie» auf den ersten Blick trivial erscheinen mag, benötigt man eine klare Abgrenzung zwischen Technologien einerseits und Anwendungen, Produkten und Dienstleistungen andererseits. In *Abb. 3* (erarbeitet in internen Workshops) ist am Beispiel des automatisierten Fahrens die erste Problemstellung illustriert: eine Technologie steht selten alleine da; erst im Verbund mit weiteren Technologien, welche selber auch wieder nur auf Grund weiterer Technologien funktionieren, wird eine Anwendung oder ein Produkt ermöglicht. Für das automatisierte Fahren beispielsweise sind Sensoren, die Steuerung des Fahrzeuges und die Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umwelt massgebliche Treiber für das Funktionieren der Software – ohne diese unterstützenden Technologien («enabling technologies») kann die Software nicht funktionieren.

Im vorliegenden Bericht liegt der Fokus auf für bestimmte Anwendungen «ausschlaggebende» Technologien (in *Abb. 3* als Ebene «Main Technology» gekennzeichnet), um sich nicht im Übermass zu «kleiner» Technologien zu verlieren. Es ist wichtig anzumerken, dass, weil viele Technologien aufeinander aufbauen, gewisse Technologien für ein Produkt eine «Main Technology» darstellen, während sie möglicherweise für ein anderes Produkt nur unterstützend wirken. Weil ein Produkt ohne alle seine Enabling Technologies nicht funktionieren kann, können Schlüsseltechnologien, welche massgeblich das Entstehen einer Anwendung beeinflussen, auf beiden Ebenen liegen (Main oder Enabling Technology oder auch dazwischen). Technologien lassen sich meist für mehrere Anwendungen oder Dienstleistungen verwenden. Im vorliegenden Beispiel (*Abb. 3*) ist die Ortung in Echtzeit nicht nur für automatisiertes Fahren sehr wichtig, sondern findet auch viele andere Einsatzgebiete.

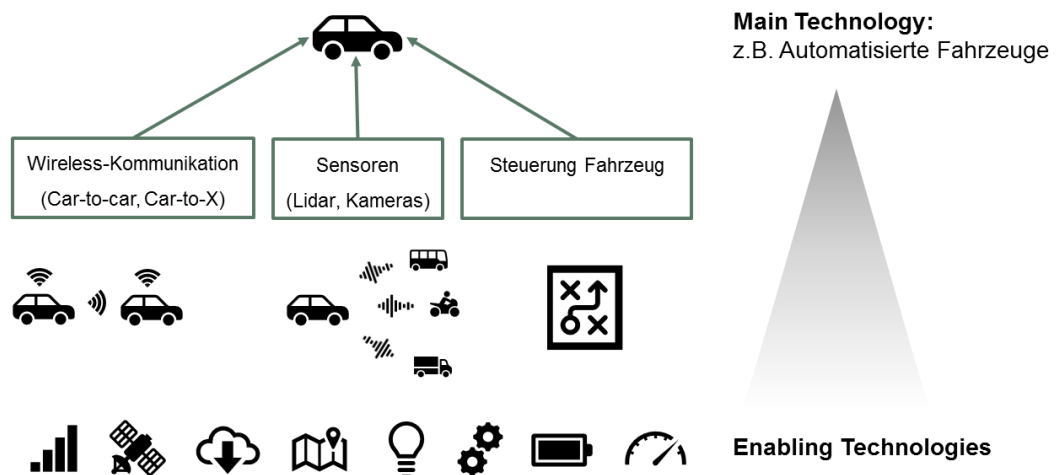


Abb. 3. Darstellung der verschiedenen Technologie-Ebenen (eigene Darstellung)

Die zweite Problemstellung betrifft die Unterscheidung zwischen einem Produkt/einer Dienstleistung und einer Technologie. Im Beispiel (*Abb. 4* – erarbeitet an internen Workshops) wird «Uber» – eine webbasierte Applikation zur Findung von Mitfahrern – analysiert und aufgezeigt, wo der Unterschied zwischen «Uber» (der Dienstleistung) und der dazu benötigten Technologien ist. Der in der Applikation enthaltene Algorithmus (welcher wiederum auf einer grossen Anzahl Enabling Technologies aufbaut) für das Zusammenführen von Fahrern und Mitfahrern könnte auch für andere Mitfahrtvermittlungsdienste eingesetzt werden. Hier zeigt sich der Unterschied zwischen Technologie und konkreter Anwendung in einem Produkt oder in einer Dienstleistung: Erst die mehrjährige Image-, Marketing-, Wachstums- und Finanzierungsstrategie differenzieren Uber von Mitkonkurrenten und haben Uber zum global bekanntesten Mitfahrtvermittler gemacht. Dies ist eine weitere Eigenschaft von Technologien, welche sich auf der Stufe der «Main Technologies» befinden: sie ermöglichen verschiedenste Anwendungen.

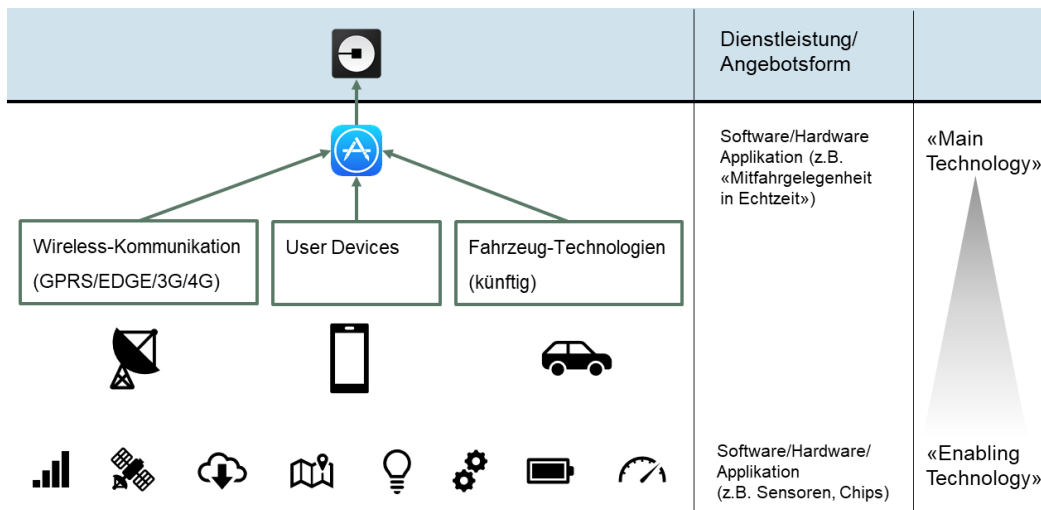


Abb. 4. Unterscheidung Anwendung und Technologie (eigene Darstellung).

Über die umfassende Literaturstudie und mehrere interne Workshops wurde eine möglichst komplette Technologien-Liste ausgearbeitet. Allfällige Schlüsseltechnologien wurden noch nicht definiert – im Gegenteil, man wollte unvoreingenommen so viele künftige Technologien zusammentragen wie möglich.

Im Rahmen interner Workshops und mit den Experten der Forschungsstellen wurde eine sinnvolle Unterteilung und Ordnung der Technologien erarbeitet. Eine erste Unterteilung gruppiert die Technologien nach ihrem Einsatzfeld:

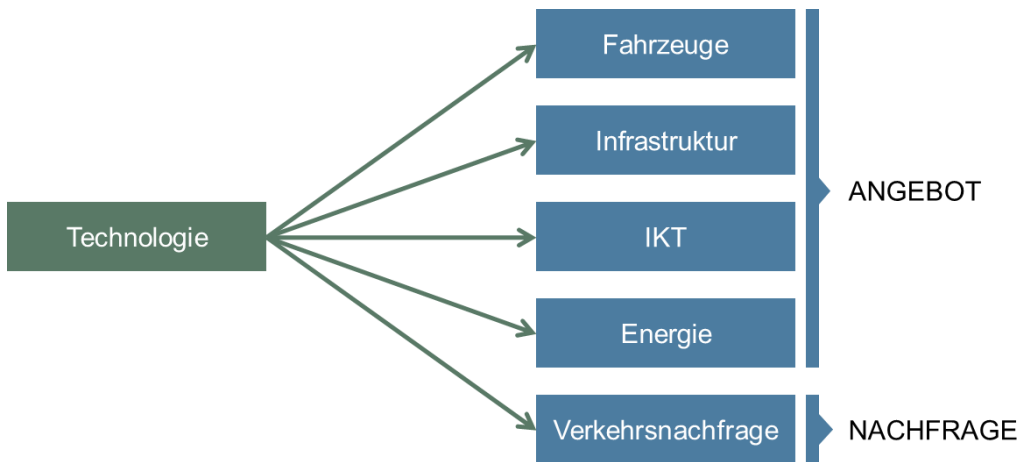


Abb. 5. Strukturierung der Technologien nach Einsatzfelder

Die definierten Einsatzfelder dienen der Gruppierung und Einordnung von Technologien. Sie sagen nichts über die Befindlichkeit in den Technologie-Ebenen (Abb. 3) aus; d.h. es können sich «Main Technologies» in jedem Einsatzfeld befinden.

Eine weitere Unterteilung in Technologien nach ihrem Einsatz im Personen- beziehungsweise im Güterverkehr wurde nicht weiterverfolgt, weil der grösste Teil der Technologien für beide Verkehre ihren Einsatz finden. Deshalb wurde diese Unterteilung nicht als sinnvoll erachtet.

2.3 Relevante Eigenschaften von Schlüsseltechnologien

Zur Identifikation von Schlüsseltechnologien soll zuerst verstanden werden, welche (für das Verkehrssystem relevante) Wirkungen Technologien haben können. Dazu wurden zwei existierende systemdynamische Modelle aus grösseren Verkehrsforschungsprojekten untersucht. Durch Änderungen an den Eingangsgrössen eines generischen, ein allgemeines Mobilitätssystem beschreibenden Modells wurden jene Eigenschaften identifiziert, welche grossen Einfluss auf das Mobilitätsangebot respektive die Nachfrage haben; sei es als Treiber oder als Hemmnis. Tendenziell wären dann jene Technologien, bei welchen diese Eigenschaften ausgeprägt vorliegen, als Schlüsseltechnologien zu betrachten. Im Folgenden beschreiben wir die Identifikation dieser Eigenschaften. In nachfolgenden Kapiteln werden wir dann bei infrage kommenden Technologien auswerten, in wie weit sie diese Eigenschaften aufweisen.

Ausgangspunkte sind einerseits das schweizerische systemdynamische Modell MODUM (Verkehr und Umwelt Wechselwirkungen Schweiz - Europa NFP41, 2000: MODUM Modell Umwelt – Mobilität) und andererseits das europäische systemdynamische Modell ASTRA (Assessment of Transport Strategies, <http://www.astra-model.eu>). Mit der Software Vensim Professional 7.0 wurde mit den Systemelementen aus MODUM, ergänzt um einige Elemente aus ASTRA, ein einfaches systemdynamisches Modell erstellt.

Das Modell bildet vereinfachte Wirkbeziehungen zwischen Angebot und Nachfrage sowie wichtiger Elemente des Mobilitätssystems ab. Im Interesse des Fokus auf den Einfluss von Technologien wurden nicht-technologischen Elemente von MODUM weggelassen. Dazu gehörten insbesondere soziale und politische Elemente wie z.B. das Mobilitätscurriculum, d.h. der bisherige Modalsplit einer Bevölkerungsgruppe. Dagegen wurden neue Elemente aufgenommen, die von Technologien beeinflussbar sind. Ein solches ist z.B. die Durchschnittsgeschwindigkeit von Tür zu Tür. Die Nachfrage wurde durch Fahrzeug-, Personen- und Tonnenkilometer dargestellt; das Angebot durch Angebot an Fahrzeugen, Mobilitätsdienstleistungen (siehe z.B. öffentlicher Verkehr) und Infrastruktur. Die Elemente wurden gruppiert nach Reisezeit, Kosten, und weiteren – deren Erarbeitung gehörte zur Erzielung qualitativer Erkenntnisse und wird im Folgenden beschrieben. Die Wirkbeziehungen stellen einseitige kausale Zusammenhänge zwischen zwei Elementen A und B dar. Sie sind entweder positiv (Erhöhung von A führt zu einer Erhöhung von B), oder negativ (Erhöhung von A führt zu Verringerung von B). Aus den Wirkbeziehungen über mehrere Elemente ergeben sich sogenannte Feedback-Loops. Diese sind entweder positiv, d.h. eine Veränderung eines Elements des Loops führt über Rückkopplungseffekte zu einer weiteren Verstärkung des Effekts auf Angebot oder Nachfrage; oder sie sind negativ, d.h. eine Veränderung eines Elements zieht Veränderungen mit abschwächender Wirkung nach sich, so dass das System im bestehenden Gleichgewicht verbleibt.

Das Modell erlaubt die Identifikation der relevanten Haupteigenschaften von Technologien. Die Ausprägungen dieser Haupteigenschaften (siehe nächstes Unterkapitel 2.4) bestimmen das Ausmass möglicher Einflüsse von Technologien auf Angebot und Nachfrage und ermöglichen Aussagen zur Bedeutung des Einflusses einer Technologie. Das systemdynamische Modell erlaubte keine quantitativen Aussagen. Wie bereits das Projekt MODUM feststellte, werden zur Charakterisierung der Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen quantitative Inputdaten benötigt. Ohne Daten zu den Wirkbeziehungen waren die beobachteten Sensitivitäten und Rückkopplungseffekte nicht quantitativ interpretierbar. Weil zwar relevanten Eigenschaften von Technologien im Modell identifiziert werden konnte, es sich aber als unmöglich erwies, die Technologien selber im Modell explizit abzubilden, konnten auch keine gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Schlüsseltechnologien abgeleitet werden.

Es lassen sich Eigenschaften von Technologien finden, welche die Einflüsse auf das Mobilitätssystem zuverlässig beschreiben und dadurch eine «Schlüsseltechnologie» ausmachen. Im Folgenden wird beschrieben, was die verkehrlichen Einflüsse «Reisezeit», «Kosten und Erträge» und «Sicherheit/ Reisekomfort» ausmacht. Es wird davon ausgegangen, dass substantielle Veränderungen in diesen drei Kategorien **direkt** auf die Nachfrage und damit auch das Angebot wirken:

- **Reisezeit und Transportzeit:** Die Reisezeit definiert sich über die Tür zu Tür Zeit. Daraus leitet sich die Durchschnittsgeschwindigkeit über alle verwendeten Modi inklusive der Umsteige- und Wartezeiten ab. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Anteil unproduktiver Zeit an der Fahrzeit. Unter unproduktiver Zeit wird die Zeit verstanden, die nicht für Arbeits- oder Freizeittätigkeiten genutzt werden kann. Die Einheiten sind jeweils h/ Pkm, respektive h/ Tkm. Die unproduktive Reisezeit kann unter der Annahme eines fixen Wertes in CHF/ h umgerechnet werden zu Nutzungskosten. Eine die Reisezeit vermindernde Massnahme ist die Bereitstellung von (multimodalen) Mobilitätsdienstleistungen mit minimaler Tür-zu-Tür-Reisezeit (z.B. gute Routenplaner).
- **Kosten und Erträge:** Kosten- bzw. Ertrags Elemente sind Nutzungskosten (beinhalten fixe und variable Kosten) zur Bereitstellung von Fahrzeugen, Mobilitätsdienstleistungen und Infrastruktur, sowie der Ertrag aus dem Verkauf von Fahrzeugen, Mobilitätsdienstleistungen und Abgaben. Die Einheiten sind jeweils CHF/ Pkm, respektive CHF/ Tkm.
- **Sicherheit und Planbarkeit, Reisekomfort:** Dies sind unterschiedliche Faktoren, die jeweils vieles beinhalten. Unter Sicherheit wird eine Minimierung verschiedener Risiken verstanden, insbesondere von Unfällen und Kriminalität (z.B. Überfälle in der Metro, Diebstahl von Bank- oder anderen Nutzerdaten). Darunter fällt zudem die Planbarkeit aufgrund einer garantierten Erbringung der versprochenen Leistung respektive eines gleichwertigen Ersatzes. Unter Komfort wird ein angenehmes, zuverlässiges und nutzerfreundliches Reiseerlebnis verstanden; von der Planung über den Zugang, die Buchung bis zur Reise und deren Verrechnung. Dazu gehört aber auch die notwendige Infrastruktur, eine nicht zu hohe Auslastung und Kontrolle der Belegung, um die Fahrt sitzend (oder liegend) zu verbringen und weitere Komfortansprüche, die zwar in keinem direkten Bezug zur Reise stehen, aber Anreize setzen zu deren Antritt. Dazu gehören Möglichkeiten zur Kommunikation und Vernetzung für private und berufliche Zwecke, Unterhaltung, Erholung, Übernachtung, Sport, Erfrischung, Einkauf und weiteres. Sicherheit und Reisekomfort sind dimensionslos.
- Es gibt weitere, **indirekte** Auswirkungen (**Umweltwirkungen, Einbindung neuer Verkehrsteilnehmenden** und **Verkehrskapazität** inkl. Modal-Split-Veränderungen), welche ebenfalls als für das Verkehrssystem relevante Einflüsse gelten. Bei den Umweltwirkungen ist zu unterscheiden zwischen jene Umweltwirkungen, deren Kosten internalisiert wurden (sie sind in den Kosten und Erträgen bereits abgebildet), und den übrigen Umweltwirkungen, deren Kosten von der Allgemeinheit inkl. zukünftigen Generationen getragen werden. Letztere wirken meist nicht direkt, sondern indirekt über Rückkopplungseffekte (z.B. über politische Vorgaben) auf Angebot und Nachfrage.

2.4 Definition des Arbeitsbegriffs «Schlüsseltechnologie»

Wann ist eine Main- oder Enabling-Technologie als Schlüsseltechnologie zu qualifizieren? Dazu wird keine (wohl auch nie beizubringende) globale Definition gesucht. Die verwendete Definition ist strikt projektbezogen und auf die hier anzuwendende Forschungsmethode ausgerichtet. Gemäss dem Forschungsansatz werden die Treiber und Hindernisse der Schlüsseltechnologien sowie ihre gegenseitigen Abhängigkeiten (Kapitel 5) untersucht sowie die Auswirkungen der Schlüsseltechnologien auf Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage (Kapitel 6). Entsprechend ist klar, dass die Liste der zu betrachtenden Schlüsseltechnologien hinreichend vollständig sein muss, um diese Auswirkungen in ihren wesentlichen Ausgestaltungen zu beschreiben.

Die hier verwendete Definition (erarbeitet an internen Workshops mit Experten aus Verkehr und Informatik) einer Schlüsseltechnologie lautet deshalb:

«Eine Schlüsseltechnologie definiert sich über ihren massgeblichen Einfluss auf den künftigen Verkehr und ihren systemischen Nutzen.»

Dieser Einfluss wird über verschiedene Kategorien charakterisiert (siehe Abb. 6). Je mehr positive oder theoretisch auch negative Effekte eine Technologie auf das Verkehrssystem

hat, desto eher ist diese Technologie als Schlüsseltechnologie zu betrachten. Die im weiteren verwendeten Einflüsse (Abb. 6) enthalten die drei zentralen direkten Einflüsse aus Kap. 2.3): «Reisezeit / Transportzeit», «Kosten und Erträge» und «Sicherheit, Reisekomfort, Planbarkeit». Bei mehreren internen sowie externen Workshops wurden zur Vervollständigung drei weitere, indirekte Einflüsse identifiziert: «Umweltbelastungen» (Belastungen durch Verkehr wie CO₂-Emissionen, Lärm-, Stickoxide-, Feinstaub-Emissionen, Flächenverbrauch usw.), «Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer / Gütertypen» und «Verkehrskapazität» (betrifft Auslastung und Flächennutzung). Mit systemischem Nutzen einer Schlüsseltechnologie wird der Beitrag zur Vernetzung, der Infrastrukturbezug und sowie das Einsatzpotenzial verstanden.

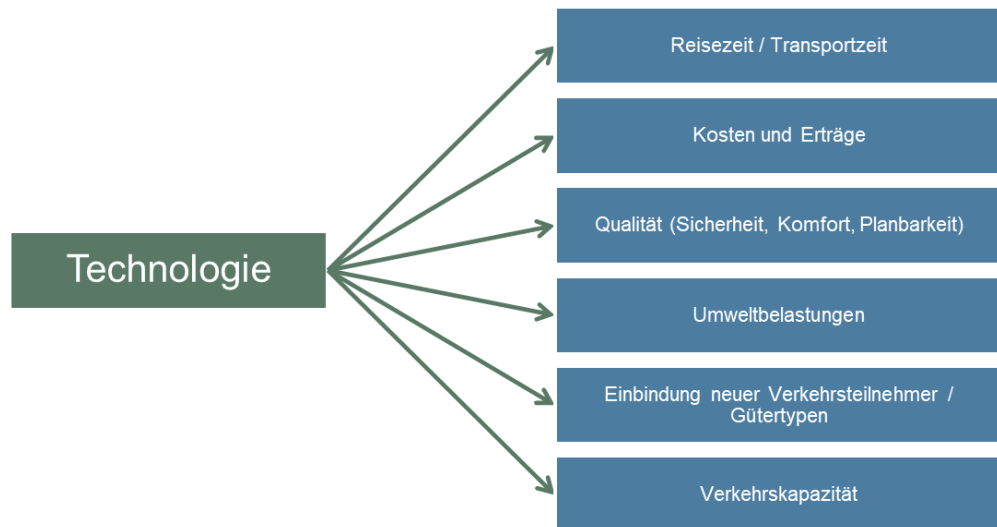


Abb. 6. Einflüsse von Technologien auf den Personen- und Güterverkehr

Folgende Beispiele zeigen, wie technologiegetriebene Veränderungen auf einzelne Elemente wirken und somit Verkehrsangebot und -nachfrage beeinflussen:

- **Reisezeit/Transportzeit:** Das automatisierte Fahren und die Verfügbarkeit von IKT-Technologien, welche Arbeits- oder Freizeitaktivitäten während der Fahrt unterstützen, reduzieren den Anteil unproduktiver Zeit an der Reisezeit, so dass die Zeitkosten abnehmen, und damit die wirtschaftlich relevante Reisezeit (der klassische Begriff der Reisezeit wäre dazu inskünftig auszudifferenzieren in aktive Lenkzeit sowie anderweitig nutzbare Reisezeit). Auch Änderungen der Umsteigehäufigkeit pro Weg (und damit auch den Anteil unproduktiver Zeit an der Reisezeit), z.B. durch den Umstieg von einer multimodalen Wegeketten auf ein automatisiertes Fahrzeug für die gesamte Tür-zu-Tür-Reise, wirken sich auf die Zeitkosten und die wahrgenommene Reisezeit aus.
- **Kosten und Erträge:** Die automatisierte Steuerung, welche den Fahrer ersetzt, kann heute unrentable Buslinien durch den Einsatz kleineren Sharing-Fahrzeuge rentabel machen. Auch der Aufwand für den Unterhalt von Fahrzeugen kann durch den Wechsel von Verbrenner- zu Elektromotoren reduziert werden, die Infrastrukturkosten können durch den Einsatz intelligenter Sensoren zur Überprüfung von Schwachstellen («Predictive Maintenance») optimiert werden.
- **Qualität:** Die Qualität einer Mobilitätsdienstleistung kann durch neue Technologien in vielfältiger Weise beeinflusst werden, z.B. über die erhöhte Endbenutzerfreundlichkeit bei der Reiseplanung, -buchung und -bezahlung (multimodale Routenplanungsapps; kreditkartenbasierte und anmeldefreie Fahrradverleihsysteme).
- **Umweltwirkungen:** Neben klassischen Umwelttechnologien wie zum Beispiel Abgasnachbehandlungssysteme können neue Technologien zur Bereitstellung und Nutzung der Antriebsenergie zu reduzierten Umweltwirkungen führen, z.B. günstige erneuerbare

Energiebereitstellung, energetisch hocheffiziente Antriebe, und (teil)elektrifizierte Antriebsstränge.

- **Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer:** Neue Technologien können nicht nur zu günstigeren, schnelleren oder qualitativ besseren Mobilitätsdienstleistungen führen, oder zu reduzierten Umwelteinwirkungen oder eine positive Wirkung auf das verkehrliche Gesamtsystem, sondern auch zusätzliche Verkehrsteilnehmer (im Güterverkehr: neue Güterverkehre) einbinden, z.B. kann das hochautomatisierte, vollautonome Fahren die Einbindung von Jugendlichen und Kindern ermöglichen, können bewegungseingeschränkte Personen vermehrt mobil sein, oder Betagte dank automatisierten Fahrzeugen länger mit dem eigenen Auto mobil bleiben.
- **Verkehrskapazität:** Die Erhöhung der Kapazität der Infrastruktur und der Verkehrsmittel, womit eine höhere Frequenz von Verbindungen und/ oder eine schnellere Durchschnittsgeschwindigkeit ermöglicht werden, z.B. durch intelligente und nachfrageoptimierte Steuerung des Verkehrsflusses während Stosszeiten. Auch die Leerfahrten automatisierter Fahrzeuge wirken sich auf die durchschnittliche Auslastung von Fahrzeugen aus sowie auf die Auslastung der Infrastruktur.

3 Aktuelle und absehbare Trends

Im vorherigen Kapitel wurde die Definition einer Schlüsseltechnologie festgelegt, deren Einsatzfelder beschrieben sowie Einflussbereiche auf den Verkehr identifiziert (in je mehr Einflussbereichen eine Technologie Einflüsse aufweist, desto eher handelt es sich um eine Schlüsseltechnologie). Wichtig dabei war auch die Trennung zwischen Technologie und Anwendung. In diesem Kapitel fangen wir an, mögliche Technologien zu sammeln. Dazu werden zukünftige Trends und Begriffe zusammengefasst, welche in Zusammenhang mit den Themen Verkehr der Zukunft und Digitalisierung zu finden sind. Diese Auslegeordnung hat das Ziel, einen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens wiederzugeben. Hierbei ist die Trennung zwischen Technologie und Anwendung noch nicht immer herausgearbeitet. Im Rahmen des nächsten Kapitels 4, wenn es um die Zusammenführung einer Liste aller infrage kommenden Technologien – und dann um die Identifikation der Schlüsseltechnologien – geht, wird ausschliesslich auf Technologien fokussiert, während dadurch ermöglichte Anwendungen und Dienstleistungen nicht Gegenstand dieses Berichts sind.

Wir beginnen in Kap. 3.1 mit einem kurz- bis mittelfristigen Überblick zu Trends pro Verkehrsträger (Strasse Schiene, Wasser, Luft), basierend auf Expertenwissen und Literaturquellen (IEA 2017; IET 2015; Stephenson et al. 2018; TA-Swiss 2013; ASTRA 2011, Intraplan 2015, BFS und ARE 2017). Auf Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsträgern untereinander, und mit dem Energiesystem wird hingewiesen. Die weiteren Auswirkungen von Technologien auf Verkehrsangebot und Nachfrage werden in Kapitel 6 vertieft; die Wechselwirkungen von Regulierung, Finanzierung und Technologien in anderen Teilprojekten des Gesamtprojekts «Verkehr der Zukunft». In den weiteren Unterkapiteln werden die wichtigsten Trends näher betrachtet, nämlich Elektrifizierung, Automatisierung, mögliche Mobilitätsdienstleistungen sowie digitale Infrastrukturen. Die bei diesen Trendanalysen erwähnten Technologien fliessen in das nächste Kapitel 4 ein.

3.1 Trends je Verkehrsträger

Nachfolgend werden aktuelle und absehbare Trends je Verkehrsträger beschrieben. Dabei werden auch Luft- und Wasserverkehr abgedeckt. Diese finden zwar nicht in der Schweiz statt (Territorialprinzip), ihre Verkehrsanteile (Einwohnerprinzip) sind jedoch so gross, dass sie auf das Verkehrsverhalten innerhalb der Schweiz stark zunehmende Auswirkungen haben. Die nachstehende Abbildung zeigt, wie ca. ab 2030 der grösste Teil der Jahreskilometer (nach Einwohnerprinzip) auf den Flugverkehr entfallen dürfte. Grosse Teile der Reisezeit und der Reisebudgets werden in Auslandflüge investiert. Dies reduziert die Nachfrage nach höheren Reisegeschwindigkeiten und das Verkehrswachstum innerhalb der Schweiz. Das Gesamtprojekt «Verkehr der Zukunft 2060» geht von einer solchen Entwicklung aus und fokussiert dabei auf das Mobilitätssystem innerhalb der Schweiz.

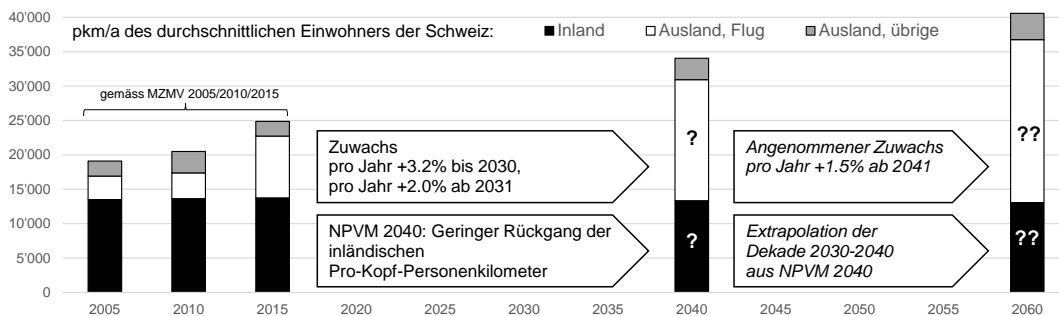


Abb. 7. Anteil des Flugverkehrs an den schweizerischen Pro-Kopf-Personenkilometer (ARE und BFS 2007; 2012; 2017; Schätzung für 2040 nach ARE 2016; INTRAPLAN 2015; ICAO 2016). Die Extrapolation auf 2060 ist mit grösseren Unsicherheiten verbunden.

Strassenfahrzeuge/ -verkehr

Trends



Der Strassenverkehr stellt das Rückgrat unseres Verkehrssystems dar und erbringt die weitaus meisten Mobilitätsdienstleistungen, im Güterverkehr (Liefer- und Lastwagen) wie im Personenverkehr (individuelle motorisierte Mobilität sowie ÖV-Busse). Im Vergleich zu den anderen Verkehrsträger weist der Strassenverkehr die *kürzesten Umwälzungszeiten* des Fahrzeugbestandes auf: Die meisten Busse und Lastwagen erreichen nach 10 Jahren ihr Lebensende, bei Lieferwagen und Personenwagen sind es 12 bis 20 Jahre, Trolleybusse haben eine Lebensdauer von 25 Jahren. Bis 2060 wird sich der Bestand deshalb noch mehrmals umwälzen. Die Strassen-Infrastruktur weist aber deutlich längere Lebensdauern auf und beeinflusst die mögliche Entwicklung.

Im Personenverkehr werden bei *Personenwagen* Verbrennungsmotoren trotz den Fortschritten der vergangenen 15 Jahren nochmals effizienter, getrieben durch die europäischen Emissionsvorschriften für Hersteller (z.B. Downsizing, Heat-to-Power), unter gleichzeitiger dauerhafter Einhaltung der Abgasvorschriften. Zunehmend werden Hybridantriebe und serielle (Plug-in-)Hybride den Antriebsstrang auch bei grösseren Fahrzeugen elektrifizieren (elektrische in-wheel-Motoren, möglicherweise mit drahtloser Stromübertragung). Kleinere Fahrzeuge werden nur noch batterieelektrisch ausgelegt. Die Automatisierung wird über das Premium-Segment eindringen.

Beim ÖPNV werden *Stadtbusse* und später Regionalbusse elektrifiziert werden und bis 2060 alle Busse im Grundaufbau elektrisch sein, mit unterschiedlichen Energiezufuhrsystemen (entweder nur Nachtladung, über Nachladen der Batterie via partielle Oberleitung oder an Haltestellen).

Bei *Motorrädern*, Scootern und Motorfahrrädern wird sich die vollständige Elektrifizierung durchsetzen, wobei neben Energieeffizienz Luftreinhaltung und Lärmschutz den Ausschlag geben.

Im Güterverkehr werden die für City-Logistik eingesetzten *Lieferwagen* vollständig elektrifiziert; die automatisierte, führerlose Zustellung benötigt weitere Technologien am Zustellort (automatisierte Paketfächer), hätte dann aber disruptives Potenzial. Stark betriebliche Effizienzfortschritte wären über eine vernetzte, vereinheitlichte, voll digitalisierte Logistik («physisches Internet») möglich (siehe auch Kap. 3.5).

Lastwagen und andere schwere Nutzfahrzeugen mit Tagesfahrleistungen bis 300 km werden elektrifiziert. Über 300 km/Tag werden sich viele Ansätze parallel entwickeln: Grosse Batterien (mit reduzierter Nutzlast), Schnell-Ladung von Batterien, Nachladen über partielle Oberleitungen, Beimischung von Biotreibstoffen, und synthetische Treibstoffe (Power-to-Gas), sowie Wasserstoff-Brennstoffzellen. Das teil-automatische Fahren wird Platooning ermöglichen (siehe auch den Trend Automatisierung in Kap. 3.3).

Auf der Seite der *Energiebereitstellung* werden flüssige und gasförmige Treibstoffe in der Kohlenstoffintensität reduziert (Biotreibstoff-Beimischungen; power-to-X-Anwendungen mit Wasserstoff, Methan oder komplexere Moleküle), ebenso der europäische und schweizerische Strommix mit verkehrstypischem Lastgang. Bei der *Ladetechnologie* werden Normladeleistungen bis 350 kW Einzug halten; das induktive Laden wird sich mindestens in Nischenanwendungen, für Fahrzeugflotten und führerlose Fahrzeuge durchsetzen (siehe den Trend Elektrifizierung in Kap. 3.2).

Bei allen Fahrzeugkategorien werden die *Assistenzsysteme* nicht nur weiter zunehmen (ständiges Monitoring des Fahrers, seiner Reaktionsfähigkeit, seiner Gesundheit, ggf. Reaktivieren des Fahrers, Eingriff ins Lenkungssystem), sondern vernetzt sein: Fahrzeuge übermitteln ständig Daten an den Hersteller und reservieren bei Bedarf selbständig einen Termin in der Garage oder bestellen Ersatzteile. Dabei können neuartige Angebotsformen von Mobilität auch die Effizienz des Strassenverkehrs erhöhen. Das Thema Automatisierung ist im Kap. 3.3 weiter vertieft.

Anmerkungen

Die Auswirkungen des technologischen Wandels auf Fuss- und Veloverkehr können beachtlich sein (längere Strecken dank E-Bikes; aber auch Ersatz Fuss-/Velo-Wege durch bequeme, selbstparkende automatisierte Fahrzeuge). Möglicherweise entstehen neue Fahrzeugkategorien (Kleinwagen der Kat. L6/L7; E-Bikes mit Witterungsschutz; neue Generation von Segways).

Wechselwirkungen mit Luftverkehr, Langsamverkehr und Energie

Angesichts der zunehmenden Auslastung der Verkehrsinfrastrukturen werden neue Technologien eher für höhere betriebliche Effizienz eingesetzt, nicht zur Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeiten. Die Kaufkraft der Schweizer Bevölkerung nimmt aber weiter zu. Deshalb wird immer mehr geflogen, die Pro-Kopf-Strassenkilometer innerhalb der Schweiz stagnieren tendenziell ab ca. 2030 (NPVM 2040: ARE 2016).

Die zunehmende Energie-Effizienz sowie – in längerer Frist – die mögliche Nutzung der Unterwegszeit in hoch automatisierten Autos für andere Zwecke (Erholung, Kommunikation, Arbeit) führt dazu, dass das Auto im Vergleich zu den anderen Verkehrsmitteln an Attraktivität gewinnt. Das Laden von Elektroautos kann auf die Verfügbarkeit erneuerbarer Energie, den lokalen Netzzustand und benötigte Regelenergie ausgerichtet werden, namentlich bei PKW – das Laden von Nutzfahrzeugen und Bussen wird auf die betrieblichen Erfordernisse ausgerichtet sein.

Schienenverkehr

Trends



Der Personenverkehr auf der Schiene stellt, bei entsprechender Belegung, die energieeffizienteste Verkehrsform dar. In der Schweiz existiert ein Bahnstromnetz mit eigener, weitgehend CO₂-freier Produktion aus Wasserkraft und mit Atomkraft-Produktionsanteilen.

Als sehr infrastrukturlastiger Verkehrsträger ist der Schienenverkehr durch ausgeprägte Pfadabhängigkeiten gekennzeichnet. Das Rollmaterial weist – im Vergleich mit den anderen Verkehrsträgern – die längste Lebensdauer auf. Das aktuell bestellte Rollmaterial wird 2060 zumindest als Reservekompositionen noch in Betrieb sein. Die Trends für den Schienenverkehr lassen sich trennen in Rollmaterial und Betrieb.

Beim *Rollmaterial* stehen weiteren möglichen Einsparungen (z.B. Klimaanlage; Leichtbauweise; verteilte Antriebe; höhere Effizienz, S-Bahn 2G) potenzielle Verbrauchszunahmen gegenüber (z.B. höhere Geschwindigkeiten, höherer Komfort, vermehrte Tunnelstrecken; stärkere Beschleunigung für die Fahrplanstabilität; Zunahme Nebenverbräuche im Bereich IKT). Während in der Schweiz fast ausschliesslich elektrische Lokomotiven zum Einsatz kommen, werden für die heutigen im Ausland verkehrenden Diesellokomotiven alternative Energieträger (z.B. LNG) erprobt und batterieelektrische Züge geplant. Betrieblich sind Einsparungen möglich durch Eco-Drive und den Einsatz erneuerbarer Energien im Normalstrom-Bereich. Kostenrelevant wäre vor allem die Einführung von fahrerlosen Zügen.

Infrastruktur-Ausbauten und Angebotsformen. Gemäss ARE-Verkehrsperspektiven wird der öffentliche Verkehr bis 2040 gegenüber dem Jahr 2010 um 51% zunehmen. Dieses Wachstum kann – insbesondere während den Spitzenzeiten – nicht mit dem bestehenden Angebot abgedeckt werden. Um das Wachstum zu absorbieren sind (a) neue Angebotsformen zwecks besserer Verteilung der Nachfrage über den Tagesverlauf sowie – nach Ausschöpfung der bestehenden Kapazitäten – (b) ein Ausbau des Angebots (z.B. Taktverdichtungen oder Kapazitätserhöhung der bestehenden Züge, und (c) der Einsatz von neuer Verkehrsinfrastruktur erforderlich. Falls die Infrastruktur trotz absehbaren Ausbauten nicht in der Lage sein würde, die Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung zu decken, müsste auch das Ausweichen auf alternative Verkehrsträger geprüft werden (wie z.B. Strasse, Cargo Sous Terrain). Das Thema Automatisierung ist im Kap. 3.3 weiter vertieft

Anmerkungen

Im Personenverkehr könnten – ausländischen Beispielen folgend – umwillen der Fahrplanstabilität vermehrt durchgehende Fernverbindungen in kürzere, «halbe» Verbindungen aufgeteilt werden. Nach einer teils geplanten Taktverdichtung im Fernverkehr von 30 auf 15 Minuten könnte längerfristig, ebenfalls ausländischen Beispielen folgend, auf 10 Minuten verkürzt bzw. die dynamische Trasse-Vergabe eingeführt werden. Verschiedene Bahnhöfe werden im Rahmen des geplanten Mehrverkehrs ihre Kapazitätsgrenze erreichen. Teils wird sich die Frage stellen, ob der Zugang zu Perrons nur via Zutrittssystemen möglich sein soll. Auch könnten vermehrt schnelle Zugverbindungen zu Vorort-Bahnhöfen angeboten werden um Tangentialverkehre zu stärken und die Hauptknoten zu entlasten. Die weitere Zunahme und Beschleunigung des Personenverkehrs stehen zunehmend im Zielkonflikt mit dem auf den gleichen Strecken stattfindenden Güterverkehr

Wechselwirkungen

Der geplante Personen-Mehrverkehr führt im Bereich der Bahnhöfe (Zubringerverkehr mit Autos) und ihre Anbindung an den Velo- und Fussverkehr sowie an den ÖPNV zu Herausforderungen, insbesondere bei Bahnhöfen mit Taktknoten, wo der darauf ausgerichtete ÖPNV den bahnhofnahen Strassenraum bereits heute stark beansprucht.

Wasserfahrzeuge

Trends



Der maritime Gütertransport stellt die energieeffizienteste (pro Tonnenkilometer) Transportart dar. Es gibt starke Bestrebungen zur Reduktion des Schwefelgehalts des als Treibstoff eingesetzten Schweröls (sog. HMO = Heavy Maritime Oil); denn bis zu einem Drittel der weltweit emittierten *Feinpartikel* könnten von Schiffen stammen. Schiffe verursachen 2.5% der globalen CO₂-Emissionen; der maritime Gütertransport wird – abhängig von der Weltkonjunktur – bis 2050 um 50% bis 250% wachsen (IMO 2015).

Der Schiffbestand wälzt sich langsam um, Güterschiffe erreichen ca. 30 Jahre Einsatzdauer. Hauptinstrument für erhöhte *Energieeffizienz* sind reduzierte Geschwindigkeiten; die Erweiterungen des Suez- und des Panamakanals reduzieren Umwege. Der Einsatz von Segeln, Starrsegeln oder Kite-Segeln wird geprüft und in absehbarer Zeit wirtschaftlich. In Zukunft werden Schiffe vermehrt seriell-hybrid ausgelegt, mit Stromerzeugung aus HMO, Diesel, oder künftig potenziell verflüssigtes Erdgas (LNG).

Landseitige Fahrzeuge (Lastwagen, Containerstapler usw.) in den *Umschlaghäfen* werden zunehmend autonom und elektrisch (mit induktiver Ladung) und integrieren sich in autonomen Container-Terminal-Systemen. Schiffe verwenden zunehmend Landstrom statt bordeigenen Generatoren, was hier hohe Effizienzfortschritte erlaubt.

Auf die *Binnenschifffahrt* entfallen 11% der Schweizer In- und 5% der Exporte (über die Rheinhäfen). Die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte führt dazu, dass nur noch Schiffsdiesel eingesetzt wird, sowie zunehmend Abgasnachbehandlungstechnologien.

Die *Personenschifffahrt* findet maritim v.a. auf Kreuzfahrtschiffen statt (diese sind technisch gesehen ähnlich wie Güterschiffe, Einsatzdauer bis 40 Jahre; Geschwindigkeitsreduktion als Hauptmassnahme besteht hier nicht; sehr hoher Stromverbrauch auch zur Wasserentsalzung), sowie auf Flusskreuzfahrten. Die Schweiz spielt beim weltweiten Kreuzfahrt-Boom eine überdurchschnittliche Rolle; 2016 buchten 140'000 Schweizer eine Kreuzfahrt. Kreuzfahrten gehen dabei meist mit Flügen zum Ein- und Ausschiffungshafen einher. Bei der Binnensee- und Küstenschifffahrt sind vor allem die Fährschiffe relevant. Diese werden auf kürzeren Strecken in Zukunft zunehmend elektrisch ausgelegt (per Unterwasserkabel, oder Aufladen im Hafen).

Anmerkungen

Die EU führt Monitoringmassnahmen (Monitoring, Reporting und Verification) ein (seit Beginn 2018 obligatorisch für alle Schiffe über 5000 Bruttoregistertonnen BRT, welche EU-Häfen anlaufen), um später Treibhausgas-Reduktionsziele durchsetzen zu können. Parallel erarbeitet auch die International Maritime Organization (IMO) Ziele für den internationalen Schiffverkehr.

Die Schifffahrt auf den *Schweizer Binnengewässern* wird hier wegen ihrer geringen und abnehmenden verkehrlichen und umweltpolitischen Relevanz nicht thematisiert.

Wechselwirkungen mit Schiene und Nachfrage

Die EU und ihre Mitgliedstaaten fördern den Ausbau der Binnenschifffahrt. Beispielsweise muss der Hinterlandverkehr des Hafens Rotterdam (bis zum Jahr 2035 wird mit jährlichen Wachstumsraten von 7.2% gerechnet, d.h. einer Verdreifachung des Containerumschlags auf 18 Mio. Twenty-foot Equivalent Units [TEU]) zu mindestens 45% (heute 37%) über die Binnenschifffahrt erfolgen. Dies wird auch den Ausbau der Rheinhafen-Kapazitäten und ihrer bahnseitigen Anbindung erforderlich machen.

Analog zum internationalen Flugverkehr reduziert auch das starke Wachstum (global 1990–2020 über 6.6% pro Jahr) der im Ausland stattfindenden Kreuzfahrten die Nachfrage nach Mobilität innerhalb der Schweiz; genaue Zahlen sind nicht verfügbar. Die Zunahme von Komfort- und Sicherheitsbedürfnissen dürfte das Wachstum langfristig tragen. Der Trend zu grösseren Kreuzfahrtschiffen führt zur Bündelung des landseitigen Zubringerverkehrs.

Luftverkehr

Trends



Auf den Luftverkehr entfallen 13% der globalen CO₂-Emissionen des Verkehrs (ICAO 2016). Das *jährliche Wachstum* beträgt global 3–5% (ICAO 2016); ab Schweizer Flughäfen 3.5–4% (Intraplan 2015). Flugzeuge sind in den letzten Dezennien ca. 1% pro Jahr effizienter geworden (Graham et al. 2014), v.a. dank des Einsatzes grösserer Flugzeuge. Ein Wachstum von 2010 bis 2050 von 5% jährlich bedeutet +600% Nachfrage. Deshalb wird die *gesamte Umweltbelastung* trotz technischen Fortschritten weiter steigen (Cox et al. 2018). Entsprechend hoch ist der Druck für weitere *Effizienzsteigerungen* (grössere Flugzeuge, Propellerflugzeuge für Kurzstrecken, neue Leichtgewicht-Materialien; optimiertes Luftraummanagement und An-/Abflugverfahren; Optimierung der Bodenoperationen) und zur *Dekarbonisierung* (Biotreibstoffe; Elektroantriebe).

Elektroantriebe: Batteriezellen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren wiesen 2017 bereits eine Energiedichte von ca. 300 Wh/kg auf (1994: ca. 115 Wh/kg), was vor allem auf reduziertes Packaging zurückzuführen ist. Ab Energiedichten von 400 Wh/kg und einem Zelle-zu-Pack-Verhältnis von 0.7 bis 0.8 erreichen Batterien den «tipping point», wo sie auf Kurzstrecken bis 700 km nachhaltiger wären als Biotreibstoff-Beimischungen. Entsprechend haben EasyJet (Ziel 150-plätziges Elektroflugzeug ab 2027) und Norwegen (Ziel 100% Elektro auf Strecken <400 km bis 2040) bereits reagiert. Solche Elektro-Kurzstreckenflüge konkurrenzieren vor allem die Schiene.

Für *Langstreckenflüge* (90% des CO₂ des Flugverkehrs) werden *Biotreibstoffe* diskutiert. Die Einführung neuer Technologien bei Flugzeugantrieben braucht Jahrzehnte, und der Bestand wälzt sich langsam um (mittlere Einsatzdauer von Flugzeugen: 25-30 Jahre). Erste Versuche mit Biotreibstoff-Beimischungen finden statt.

Rollfeldfahrzeuge eignen sich gut zur Elektrifizierung (das Gewicht der Batterie macht keinen massgeblichen Unterschied; keine Einschränkung der Reichweite durch Elektrifizierung). Bis auf Notfallfahrzeuge ist bis 2060 mit einer weitgehenden Elektrifizierung zu rechnen.

Das weitere Wachstum des Flugverkehrs wird auch zu einer *Ausdifferenzierung* führen: Ein Premiumsegment mit kleineren Flugzeugen für höhere Punkt-zu-Punkt-Geschwindigkeit und ein Massensegment (immer grössere Flugzeuge, preisgünstige, gut ausgelastete Flugzeuge). In den letzten Jahren wurden auch Versuche gestartet, Zeppeline neu zu bauen. Diese besitzen hohe Beladungskapazitäten und könnten eine Rolle für schlecht angeschlossene Gebiete spielen.

Anmerkungen

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Rahmen des Pariser Abkommens wird auch den internationalen Flugverkehr beeinflussen. ICAO hat vorgeschlagen, ab 2020 das Wachstum des CO₂-Ausstosses des Flugverkehrs über eine Zertifikatlösung zu kompensieren. Dies würde mit CO₂-Reduktionen vor allem ausserhalb des Mobilitätssektors einhergehen. Dies berücksichtigt nicht, dass die Feinpartikel- und Wasserdampf-Emissionen des Flugverkehrs in der oberen Troposphäre einen Einfluss auf die Strahlungsbilanz haben, welche jene des CO₂ um ein Mehrfaches übersteigt. Weitere ungelöste Probleme sind z.B. die Lärmbelastung im Umfeld der Flughäfen, die fehlenden Kapazitäten im Luftraum (und auf Flughäfen) sowie der Umgang mit automatisierten Luftfahrzeugen.

Wechselwirkungen mit Strasse, Energie und Nachfrage

Statt Biotreibstoffe in Flugzeugen einzusetzen wäre es aus systemischer Sicht (Energiedichte; Sicherheit; Infrastruktur) naheliegender, sie in Strassenfahrzeugen einzusetzen. Elektroflugzeuge würden die Nachfrage nach Batteriezellen beeinflussen und sie für andere Anwendungen verteuern; sie induzieren Mehrnachfrage und konkurrenzieren Hochgeschwindigkeitszüge.

Der internationale Flugverkehr beeinflusst die Verkehrsnachfrage in der Schweiz massiv: 2015 wurden bereits 45% der Personenkilometer der Schweizer Bevölkerung im Ausland zurückgelegt, davon 81% im Flugzeug. Werden die Umweltauswirkungen anstelle der Personenkilometer betrachtet, exportiert die Schweiz bereits heute mehr als die Hälfte seines Mobilitäts-Footprints. Auf den internationalen Luftverkehr entfallen 36% aller Personenkilometer der Schweizer Bevölkerung. Es ist anzunehmen, dass innert 10 Jahren mehr als die Hälfte der Jahresmobilität im Ausland stattfindet, und die Hälfte aller Personenkilometer mit dem Flugzeug zurückgelegt wird.

Auch im Güterverkehr steigt die Rolle der Luftfahrt: Nach dem Wert betrachtet, werden bereits ca. 1/3 aller schweizerischen Exporte und 1/6 aller Importe auf den Luftverkehrsweg transportiert (über die Flughäfen Zürich, Frankfurt und Paris Charles-de-Gaulle).

3.2 Elektrifizierung des Strassenverkehrs

Die Digitalisierung gilt als zentraler, übergeordneter Trend im Bereich Mobilität. Die folgenden Themen unterliegen diesem Megatrend und haben grosses Entwicklungspotenzial: Elektrifizierung, Automatisierung, Vernetzung sowie Sharing und Pooling (EBP 2017a). Diese alle werden die zukünftige Mobilität stark beeinflussen und verändern. Die fortschreitende Elektrifizierung macht auch vor dem Verkehrssektor keinen Halt. Ein für die Umweltverträglichkeit der Mobilität der Zukunft wichtiger Fahrzeugtechnologietrend ist die **Elektromobilität**. Die immer kompetitiver werdenden Elektrofahrzeuge sind eine wichtige Alternative zu herkömmlichen Verbrennerfahrzeuge. Da 25% des weltweit ausgestossenen CO₂ vom Verkehr (davon 75% durch Strassenfahrzeuge) stammt (IEA, 2009), bildet die Elektrifizierung des Strassenverkehrs eine wichtige Möglichkeit zur Reduktion dieser Emissionen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass Ökostrom eingesetzt wird. Es scheint im Moment so, als ob sich Lithium-Ionen-Batterien auch längerfristig als der am weitesten verbreitete Energiespeicher für Elektrofahrzeuge etablieren wird. Der Preis für Batterien – welche die teuerste und für das Etablieren der Elektrofahrzeuge grösste Hürde darstellen – ist in den letzten sieben Jahren um ca. 75% gesunken; viel schneller als Prognosen von Fachleuten dies erwarteten. Dieser rapide Preiszerfall wird sich künftig nicht auf diese Weise fortsetzen, doch in nächster Zukunft werden Elektrofahrzeuge bezüglich des Kaufpreises mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) konkurrenzfähig sein. *Abb. 8* zeigt den beobachteten Fall der Preise der letzten Jahre und die weitere erwartete Entwicklung des Preises bis 2035.

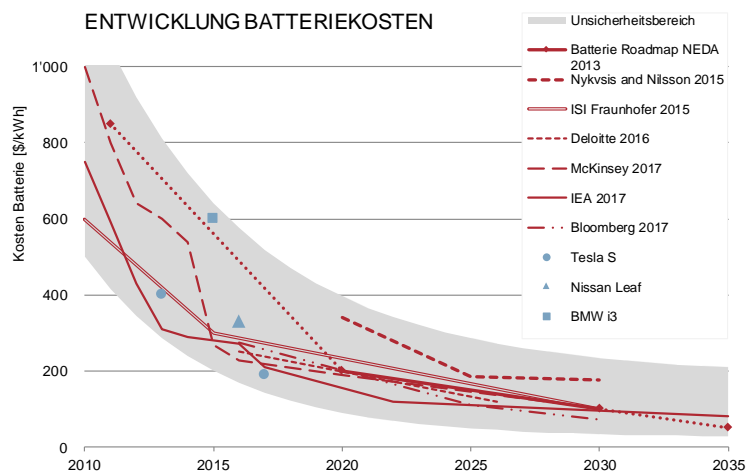


Abb. 8. Entwicklung der Batteriekosten von 2010 bis 2035, historische Daten und Szenarien aus diversen Studien (EBP 2018).

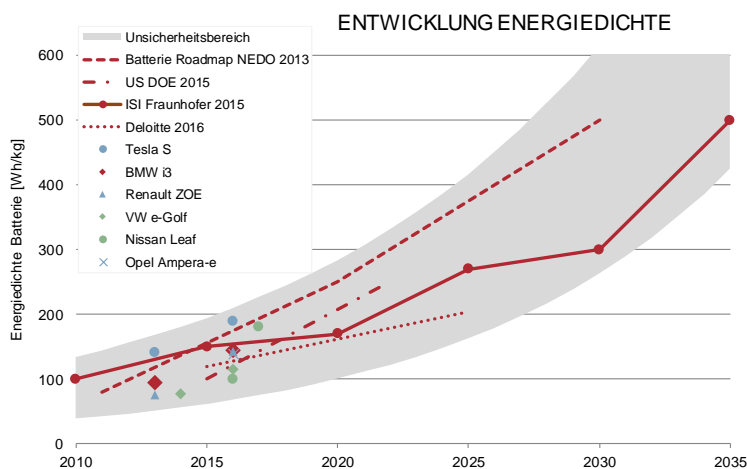


Abb. 9. Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien 2010–2035, historische Daten und Zukunftsszenarien aus diversen Studien (EBP 2018).

Neben dem Preis hat sich die Energiedichte der Batterien in EV ebenfalls verbessert. Das führt dazu, dass die in den nächsten Jahren auf den Markt kommenden Fahrzeuge meist über 300 km (reelle) Reichweite haben werden. Dadurch wird die sogenannte Reichweitenangst – welche oft zu Hemmnissen beim Kauf von Elektrofahrzeugen führte – immer unbegründeter. Die beobachtete und erwartete Entwicklung der Energiedichte für die Zeitdauer 2010 bis 2035 ist in *Abb. 9* visualisiert. Die Elektromobilität setzt sich heute schon immer mehr durch: In Norwegen, dem Land mit dem höchsten Marktanteil von BEV (39% im Jahr 2017) wächst der Markt jährlich um rund 10% (Bauer 2018); dies ist jedoch von starken staatlichen Anreizen geprägt. Aber auch bei der Elektromobilität gibt es Punkte, die sich negativ auf das Verkehrssystem auswirken können, und kritische Erfolgsfaktoren für die Etablierung von Elektrofahrzeugen im Markt: Einerseits ist eine ausreichende Ladeinfrastruktur notwendig. Das Laden wird mehrheitlich mit geringen Ladeleistungen beim ruhenden Fahrzeug (zu Hause oder am Arbeitsplatz) erfolgen. Man geht aber davon aus, dass auch eine Mindestversorgung mit öffentlichen Schnellladesäulen notwendig ist, um ein elektrifiziertes Verkehrssystem zu stützen. Wenn diese Grundladeinfrastruktur nicht gegeben ist, nimmt die «Reichweitenangst» bei Konsumenten wieder zu.

3.3 Automatisierung bei Strassenfahrzeugen

Die tiefgreifendsten verkehrlichen Veränderungen im Bereich der Fahrzeugtechnologien werden von der fortschreitenden **Automatisierung der Strassenfahrzeuge** erwartet. Für den Personenverkehr sowie den Strassengüterverkehr sind für das Jahr 2060 vollautomatisierte Fahrzeuge denkbar (ARE, 2016). Die Markteinführung hängt dabei massgeblich von der technologischen Entwicklung, den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Nutzerakzeptanz ab. Letztere steigt sicherlich aufgrund der Verkehrssicherheit, welche mit zunehmender Automatisierung steigt, da menschliches Versagen als Unfallursache grösstenteils ausgeschlossen werden kann. Andererseits werden aber technische Fehler und Angriffe aufkommen. Weiter ist die Vernetzung zwingend, wenn positive Effekte erzielt werden sollen (ASTRA 2016).

Heutige Fahrzeuge können auf einer Skala bis fünf (vgl. *Tab. 1*) einen Automatisierungsgrad bis Stufe zwei erreichen. Die gefühlte Reisezeit sinkt mit zunehmender Automatisierung, da die Reisezeit produktiv genutzt werden kann. Wie gross die Erhöhung der Mobilität dadurch sein wird, ist noch ungewiss. Der Grund für eine erwartete Steigerung der Personenkilometer durch automatisierte Fahrzeuge jeglicher Art ist, dass das tägliche Zeitbudget, das Menschen für Reisen aufzuwenden bereit sind (Travel Time Budget, TTB), täglich ca. 1.1 Stunden beträgt. Dieser Wert ist unabhängig vom Wohlstand; mit grösserem Wohlstand steigt lediglich die in dieser budgetierten Zeit zurückgelegte Distanz. Falls die Reisezeit künftig jedoch nicht mehr als solche wahrgenommen wird führt dies zu einer Erhöhung der Mobilität.

Tab. 1 Automatisierungsgrad von Fahrzeugen (gemäss SAE J3016)

Level	Bezeichnung	Beispiele
0	Nicht automatisiert	Konvention. Fahrzeug mit Spurhalte- und Kollisionswarnung
1	Assistiert	Bremsassistent, Parkassistent, Spurhalteassistent, Spurwechselassistent, Abstandsregeltempomat, Lane Centering
2	Teilautomatisiert	Abstandsregeltempomat mit Lane Centering, Autobahnassistent
3	Bedingt automatisiert	Autobahn-Chauffeur
4	Hochautomatisiert	Autobahn-Pilot, automatischer Nothalt, Park-Pilot
5	Vollautomatisiert	Roboterauto

Die wichtigsten Möglichkeiten, welche automatisiertes Fahren mit sich bringt, sind, dass durch gleichzeitiges Anfahren ein reibungsloser Verkehrsfluss zu Stosszeiten erreicht werden kann; dies verlangt aber eine vollständige Umstellung auf automatisierte Fahrzeuge. Die Strassenkapazität wird maximiert, da die Fahrzeuge mit minimalem Abstand fahren können. Eine erste Phase des Mischverkehrs (nicht-automatisierte und automatisierte

Fahrzeuge zur gleichen Zeit) muss zuerst überbrückt werden, bis die grössten Vorteile automatisierten Fahrens vollständig aufgezeigt werden können. Die Sicherheit im Verkehr könnte ebenfalls um ein Vielfaches gesteigert werden, denn 95% aller Unfälle können auf menschliches Versagen zurückgeführt werden (NHTSA, 2015). Es wird jedoch postuliert, dass wegfallende Unaufmerksamkeitsfehler der Verkehrsteilnehmer durch neue technologiebedingte Fehler teilweise kompensiert werden dürften (FVS 2018). Ferner gibt es auch eine Vielzahl von Anwendungen und Dienstleistungen, die aus dem automatisierten Fahren entstehen könnten. Dies ist nur eine Auswahl der möglichen Einflüsse, die das automatisierte Fahren auf das Verkehrssystem haben wird. Es gibt aber nicht nur positive Auswirkungen des automatisierten Fahrens: Rebound-Effekte können dazu führen, dass die Mobilitätsnachfrage steigt und die Effekte der gesteigerten Effizienz teilweise oder auch vollständig kompensiert werden.

Die Grenzen zwischen Individual- und öffentlichem Verkehr werden verschwimmen (ASTRA 2016). Im Folgenden werden mögliche Anwendungen und Dienstleistungen, welche durch vollautomatisierte Fahrzeuge begünstigt oder erst ermöglicht werden, vorgestellt. Beispielsweise vollautomatisierte Sammeltaxis: Sie stellen ein kombiniertes Sharing und Pooling dar, kommen ohne Fahrer aus und optimieren ihren Betrieb anhand der Anmeldungen der Nutzer (keine Bindung an Fahrpläne oder fixen Haltestellen). Sie werden als «Sammeltaxis», «SVV (Sammel-/Verteilverkehr)» oder auch «ÖIV Öffentlicher Individualverkehr» bezeichnet (siehe Abb. 10). Für öffentliche Körperschaften und ÖV-Unternehmungen ergeben sich insbesondere aus der erwarteten Wettbewerbsverschärfung zwischen konventionellem MIV und ÖV besondere Chancen und Herausforderungen.

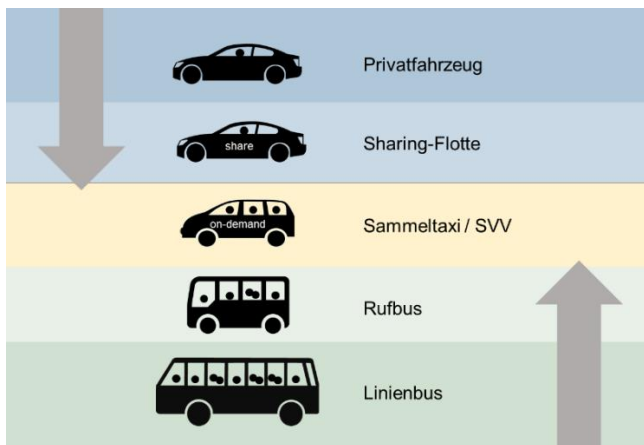


Abb. 10. Mögliche Einsatzformen: Sammel-/Verteilverkehre (SVV) im Übergangsbereich zwischen konventionellem MIV und konventionellem ÖV (EBP 2017a).

Die Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen (EBP 2017a) zeigt, dass sich mehrere Effekte überlagern. Durch Nutzung der Reisezeit, neue Nutzergruppen, Leerfahrten, neue Angebotsformen, die veränderte Verkehrsmittelwahl sowie Umwegfahrten beim Sammel-/Verteilverkehr (SVV) werden die Verkehrsleistungen (Perskm) und die Fahrleistungen (Fzkm) unterschiedlich beeinflusst. Mit der Vollautomatisierung nehmen die Fahrzeugkilometer und die Personenkilometer deutlich zu, da sich verschiedene treibende Nachfrageeffekte überlagern. Mit verkehrspolitischen Massnahmen kann insbesondere die Fahrleistung beschränkt werden.

Die Nutzung von einzelnen Fahrzeugen durch unterschiedliche Personen kann seriell («**Sharing**») oder parallel («**Pooling**») erfolgen. Insbesondere in der Diskussion zu den automatisierten Fahrzeugen sind beide Begriffe relevant, denn automatisiertes Fahren erlaubt neue Möglichkeiten zur Organisation von Transportketten. Für den Nutzer ist das Suchen von «Sharing»-Fahrzeuge nicht mehr entscheidend, da diese selbständig zwischen zwei Fahrten den Standort wechseln werden. Dadurch erleichtert sich eine Verhaltensänderung von der Benutzung des eigenen Fahrzeugs hin zum Konsum von Mobilitätsdiensten.

Der Smart Car als Systemkonzept bietet dem Halter ein verbessertes Fahrerlebnis (ICEEI, 2013). Smart Cars integrieren die Fahrzeugelektronik mit Kommunikation und Unterhaltung (Infotainment). Dazu gehört zum Beispiel neben Komfortsteigernden Fahrzeuginrichtungen auch das automatische Finden freier Parkplätze über das IoT, bei dem sich freie Parkplätze «bemerktbar machen» und direkt angesteuert werden können (EUSPN, 2016). Wichtig ist für Smart Cars vor allem, dass die Schnittstelle (Interface) vom Infotainment zum Fahrer als visuell attraktiv und einfach zu bedienen empfunden wird (Yoon & Cho, 2016). Hauptanliegen des Smart Car-Konzepts ist die Steigerung des Reisekomforts, auch wenn es Überschneidungen mit anderen Themengebieten (z.B. automatisierte Fahrzeuge) gibt, welche den Verkehr auch auf anderen Ebenen beeinflussen werden. Ähnlich gelagert wie Smart Cars sind sogenannte **Connected Cars**. Die mit diesem Begriff angesprochene Konnektivität sind auch eine (nicht zwingende) Eigenschaft von automatisierten Fahrzeugen (d.h. automatisierte Fahrzeuge sind tendenziell Connected Cars). Connected Cars sind PKWs, die untereinander (C2C) oder mit der Infrastruktur (C2I) kommunizieren können. Durch das Kommunizieren untereinander können sich Fahrzeuge effizienter und sicherer im Verkehr fortbewegen; dies gilt für Fahrzeuge unterschiedlicher Automatisierungslevels. Es gibt sehr viele Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie: z.B. das Warnen des entgegenkommenden Verkehrs vor Gefahrenstellen. Weiter können Fahrzeuge, die in einem Stau stehen (z.B. wegen einer Baustelle oder Unfall) diese Information in Echtzeit an andere Fahrzeuge weiterleiten. Diese können dann den Stau umfahren und der Verkehrsfluss wird weniger beeinträchtigt. Allgemein besitzt der Fahrer (oder das Fahrzeug) mehr Informationen zu Umgebung und kann sicherer und effizienter reagieren.

3.4 Automatisierung im Schienenverkehr

Im Schienenverkehr gibt es bereits vollautomatisierten Betrieb innerhalb von geschlossenen Systemen und klar abgegrenzten Anwendungen (z.B. Metro in Lausanne oder am Flughafen Zürich). Für den Fern- und Regionalverkehr existiert weltweit noch keine vollautomatisierte Anwendung aufgrund der offenen Netzumgebung, des heterogenen Rollmaterial, und Gleisanlagen sowie Differenzen der technischen Netzausrüstung.

Die Klassifizierung der Automatisierungsgrade für den Schienenverkehr von automatisierten Anwendungen im Schienenverkehr geht gemäss UITP (Union Internationale des Transports Publics) von L0 «Fahren auf Sicht» bis L4 «Selbstfahrend» (siehe Tab. 2). Folgende Zugsysteme zur Überwachung und Betrieb sind für die Automatisierungsstufen notwendig bzw. von zentraler Bedeutung (EBP 2017a):

- «Automatisches Zugleitsystem» (ATS, Automatic Train Supervision): Das automatische Zugleitsystem überwacht Fahrstrassen und Zugfahrten auf dem gesamten Netz und übermittelt alle für einen sicheren Betrieb notwendigen Informationen an die Leitstelle.
- «Automatische Zugsicherung» (ATP, Automatic Train Protection): Kontrolle der Einhaltung von Geschwindigkeit und Abständen zwischen Haltepunkten, automatischer Bremseneingriff möglich, Berechnung der Geschwindigkeitsbegrenzung anhand der Belegung der folgenden Streckenblöcke, Informationsübertragung an Zug über ortsfeste Einrichtungen
- «Automatische Zugsteuerung» (ATO, Automatic Train Operation): Übernahme Fahrkontrolle gemäss Fahrplan (inkl. Halt und Anfahrt), über ortsfeste Anlagen werden Informationen zu fahrplanmässigen Halten und Geschwindigkeiten übertragen.
- «Automatischer Bahnbetrieb» (ATC, Automatic Train Control): Dieses heute vor allem im Metrobereich angewendete Betriebsprinzip basiert auf den drei soeben erwähnten Subsystemen ATS, ATP und ATO.
- Fahrerloser Zugbetrieb (DTO, Driverless Train Operation): Das System übernimmt zusätzlich zur vollständigen Fahrkontrolle die Türöffnung und -schliessung. Der Fahrer wird nur für Serviceaufgaben und Notfallsteuerung gebraucht.
- Unbemannter Zugbetrieb (UTO, Unattended Train Operation): System kann mit Störfällen umgehen (hohe Anforderungen an Ausfallsicherheit, Hinderniserkennung notwendig), kein Personal mehr an Bord notwendig.

Tab. 2 Automatisierungsgrade (UITP 2017)

Level	Bezeichnung
0	Herkömmlich auf Sicht (z.B. Strassenbahn)
1	Manuell mit Zugbeeinflussung, PZB, LZB, ETCS, ATS ggf. bereits ATP mit Fahrer
2	Halbautomatisch (STO), ATP und ATO, mit Fahrer
3	Vollautomatisch (DTO), ATP und ATO, ohne Fahrer
4	Selbstfahrend (UTO), ATC

Auch auf dem Verkehrsträger **Schiene** werden neue Technologien eingesetzt und Trends erkennbar. Die SBB beispielsweise setzen Automatisierung und Digitalisierung auf drei Ebenen ein, um die Effizienz des Schienenverkehrs zu steigern (SBB 2017):

- Verbesserung der Kundeninteraktionen ► guter Telefonie- und Internetempfang im Zug; digitale Reisebegleiter (SBB-App); SwissPass (einheitliches Ticket für jegliche ÖV)
- Interne Effizienzsteigerung ► mitarbeitende verbinden; Smart Work und flexible Arbeitsformen
- Kapazitätsmanagement ► Rail Control System (Hub Optimization Technology); Adaptive Lenkung (Echtzeit-Steuerung des Zugverkehrs); IoT (Warn-App für Sicherheit)

Es geht in erster Linie um den Einsatz von IKT um Mobilität einerseits massgeschneidert auf den einzelnen Kunden anbieten zu können, andererseits mithilfe des IoT (in diesem Fall der Vernetzung von Zügen, Bahnhöfen und Gleisen) die Kapazität (ebenfalls der Züge, Bahnhöfe und Schiene) zu optimieren. Mit dem Programm SmartRail 4.0 hat die SBB ein langfristiges Zielbild gesetzt, welches folgende Ziele verfolgt:

- Integrierte automatisierte Planung, Automatisierung der Betriebszentralen
- Feinsteuerung Zugläufe / Geschwindigkeiten.
- Lückenlose Sicherheitstechnik und Vollüberwachung.
- Automatisierte Fernsteuerung des Zuges («ATO», mit oder ohne Lokführer).
- Präzise Zugführung/Abfahrt und Einfahrt.
- Hohe Datenfunk-Kapazität für Kunden und Bahnverkehr

3.5 Mobilitätsdienstleistungen und Digitalisierung

Der Verkehr und die Mobilität haben sich prinzipiell seit der Erfindung und Verbreitung des Automobils nicht mehr grundlegend verändert. Vor hundert Jahren gab es die heute gängigsten Fortbewegungsmittel schon (mit Ausnahme von Verkehrsflugzeugen). Der technologische Wandel in Bezug auf Verkehr und Mobilität bis zur heutigen Zeit war geprägt von kleinen aber stetigen Schritten, welche vor allem auf «Hardware»-Seite geschahen. Fahrzeuge jeder Art wurden schneller, effizienter und preisgünstiger. Voraussichtlich wird sich das in Bezug auf die «Hardware» (sichtbare Seite) der Verkehrsmittel auch weiter so gestalten. Auf «Software»-Ebene hingegen scheint die Entwicklung stetig schneller voranzuschreiten. Bis zum Jahr 2060 werden auf diesem Gebiet weitere tiefgreifende Veränderungen erwartet, vor allem betreffend Geschäftsmodelle und neue Anwendungen. Gemäss ASTRA (2017) kann die Digitalisierung den zeitlich und räumlich ungleichmässig verteilten Verkehr effizienter gestalten (Erhöhung des Besetzungsgrads von Fahrzeugen, Bündelung von Fahrten und verkehrsträgerübergreifende Gestaltung der bestehenden). Auf der anderen Seite kann eine fortschreitende Digitalisierung an negativen Effekten mit sich bringen: Falls die Mobilität kostengünstiger, komfortabler und neue Verkehrsteilnehmer einschliesst, folgt daraus unweigerlich ein Mobilitätswachstum. Wobei sich das Ausmass dieses «Rebound»-Effektes nur schwer schätzen lässt.

Folgende **Mobilitätsdienste** werden eine bedeutende Rolle im Rahmen der Digitalisierung des Verkehrs spielen und sind im Folgenden kurz zusammengefasst (ASTRA 2017a):

- **Navigations- und Verkehrsinformationsdienste** benötigen eine Kartengrundlage sowie verlässliche Daten zum Verkehr, damit sie raumbezogene Informationen zur Verkehrslage in Echtzeit liefern können.
- **Buchungsplattformen** dienen der Vorbereitung einer Reise und gehören zum Feld des e-Commerce. Hier wird weiter unterschieden zwischen öffentlichem Verkehr, Transportdienstleistungen (Mitfahrer), Vermietung von Verkehrsmitteln (Selbstfahrer), Mobilitäts-services (Zusatzdienste) und Reiseplaner / Mobilitätsportal (verkehrsmittelübergreifend).
- **Mobility as a Service (MaaS)** ist eine Gesamtdienstleistung eines oder mehrerer Mobilitätsanbieter. In fertiger Form hat der Kunde den Zugang zu jeglicher Form von Mobilität und nutzt und zahlt genau den Anteil an Mobilität, die er beansprucht. MaaS liefert eine bequeme Möglichkeit zur Verkehrsmittelwahl und gibt dem Benutzer den optimalen Tür-zu-Tür-Weg zum Ziel an. Obwohl für den Weg wahrscheinlich mehrere Mobilitätsanbieter frequentiert werden müssen, kann einheitlich und nur für die konsumierte Mobilität bezahlt werden (Kamargianni, 2016). Unklar ist, ob sich die aktuellen proprietären Lösungen festigen oder sich ein offenes System entwickelt, das für den Kunden den grössten Nutzen bringen würde.

Die neuen Mobilitätsanwendungen und Dienstleistungen werden **Mobilitätsdaten** generieren. Diese werden unterteilt in Daten aus dem Fahrzeug, Daten ausserhalb des Fahrzeugs, Verkehrsflussanalyse mit Big Data (ASTRA 2017a). Vollumfängliche Auswertungen von Big Data werden heute noch wenig durchgeführt und stossen aufgrund des hohen Aufwands bei der Analyse schnell an die Grenzen des Möglichen. Ausserdem unterliegen viele der sinnvollen und notwendigen Daten dem Datenschutz und können somit meist nur beschränkt verwendet werden. Folgende Mobilitätsdaten können unterschieden werden:

- Bei **Daten aus dem Fahrzeug** wird unterschieden zwischen Daten aufgrund einer gesetzlichen Regelung (z.B. Verpflichtung des automatischen Notrufs in Personenwagen ab dem 1 April 2018), Daten aufgrund technischer Prozesse (vor allem Daten die System- und Umgebungszustände abbilden, welche dann abgespeichert und weitergegeben werden) und moderne Dienstleistungen aufgrund vertraglicher Regelung (für Updates des Betriebssystems oder aktualisierte Navigationskarten).
- **Daten ausserhalb des Fahrzeugs** tragen ebenfalls zur Big Data der Mobilität bei. Das prominenteste unter diese Kategorie fallende Beispiel sind Verbindungsdaten von Mobiltelefonen mit Ortungsinformationen und -angaben.
- Der Begriff **Big Data** bezeichnet Datenmengen, die zu gross, komplex, schnelllebig und zu schwach strukturiert sind, um sie mit herkömmlichen Methoden der Datenverarbeitung zu analysieren. Das Thema «Big Data» betrifft nicht mehr nur die Informationstechnologie, sondern für immer mehr Unternehmen steigt die Wichtigkeit der Verarbeitung der ständig wachsenden Datenmengen (IBM, 2012). Wie «normale» Daten sind Big Data für sich nicht brauchbar; erst durch eine sinnvolle Analyse können nützliche Informationen ermittelt werden. Die stetig wachsenden Datenmengen aus verkehrlichen Messungen und Analysen, sind eine Quelle weiterer Möglichkeiten für Anwendungen (Mobilitätsdaten sind insofern sowohl Input als auch Output des Verkehrssystems). Die Fachpublikation der AWK Group (AWK, 2015) zählt Big Data zu den wichtigsten Technologietrends für den MIV der Zukunft. Es gibt verschiedene Ansätze, wie Big Data den Verkehr verändern könnte: durch die richtige Analyse von Daten, können z.B. Angaben zum Verkehrsfluss in Echtzeit gewonnen werden. Befindet sich jemand gerade zu Fuss, mit dem ÖV oder in einem privaten Fahrzeug unterwegs? Durch das Wissen der verschiedenen Routen vieler Verkehrsteilnehmer können Engpässe vorhergesehen und vermieden werden. Diese Technologie wird schon heute benutzt, die Algorithmen zur Analyse müssen aber noch besser und effizienter werden. Ein weiteres Thema sind die stetig wachsenden Datenmengen, welche durch immer mehr internetfähige Geräte zusammengetragen werden.
- Unter **Verkehrsflussanalysen mit Big Data** versteht man auch wieder vor allem die Nutzung der Verbindungsdaten von Smartphones. Durch diese anonymisierten Informationen können kontinuierliche Verkehrsfluss-Analysen hergestellt werden.

Das von Mobilitätsdaten stark abhängige und in der Schweiz unter dem Namen **Mobility Pricing** bekannte Konzept hat zum Ziel, Verkehrsspitzen zu brechen und eine gleichmässige Auslastung der Verkehrsinfrastrukturen zu erreichen (Bundesrat, 2016). Das Konzept will benützungsbezogene Abgaben für Infrastrukturnutzung und Dienstleistungen im Individualverkehr und im öffentlichen Verkehr einführen, um eine uniformere Auslastung herzustellen. Der Verkehr wächst seit Jahren stetig. Ursachen dafür sind Bevölkerungswachstum, steigender Wohlstand und zunehmende räumliche Trennung von Arbeits- und Wohnort. Auch die Transportleistung im Güterverkehr ist stark angestiegen. Auf der Strasse beträgt der Zuwachs seit 1980 155%, während die Transportleistung bei der Schiene um «nur» 39% gestiegen ist. Dadurch hat sich der Modal Split zugunsten der Strasse entwickelt. 1980 machte die Transportleistung der Schiene noch 49% aus, 2014 noch 38%. Die Mobilitätsnachfrage wird in Zukunft noch weiterwachsen. Nach Modellrechnungen (ARE, 2016) wird bis 2030 (mit 2010 als Vergleichsjahr) ein Zuwachs von 50% im öffentlichen Verkehr und 19% im motorisierten Individualverkehr erwartet. Das ergibt ein Gesamtwachstum von 25% in den betrachteten 20 Jahren. Der Grund für diese weitere Steigerung sind Entwicklungen auf demographischer, wirtschaftlicher, technologischer und räumlicher Ebene. Da die Infrastruktur schon heute vielerorts – vor allem in urbanen Gebieten – an ihre Grenzen stösst, prüft der Bundesrat ob das Konzept «Mobility Pricing» in die Realität umgesetzt werden kann. Das Hauptproblem ist nicht die absolute Menge der Mobilität, die bewältigt werden muss, sondern die zeitlich schlechte Verteilung. *Abb. 11* zeigt den auf der Zeitachse stark ungleich verteilte ÖV am Hauptbahnhof Zürich. Zu Stosszeiten (morgens um 7 Uhr, abends um 17 Uhr) ist die Nachfrage ca. doppelt so gross wie sonst am Tag.

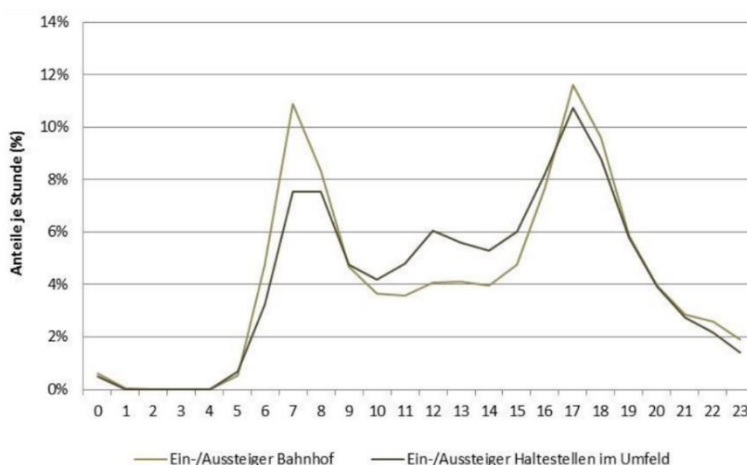


Abb. 11. Tagesganglinie der Ein- und Aussteiger im Hauptbahnhof Zürich und an den Haltestellen im Umfeld der VBZ, 2012 (Stadt Zürich, 2012)

Um eine gleichmässige Auslastung des Verkehrssystems zu erreichen, will der Bundesrat Mobility Pricing einführen. Die Grundprinzipien, nach denen Mobility Pricing ausgestaltet werden soll, sind in *Abb. 12* dargestellt.

Alle erwähnten Möglichkeiten der Digitalisierung können eine Effizienzsteigerung des Verkehrssystems mit sich bringen. Falls diese Möglichkeiten aber grösstenteils zur Steigerung des Komforts genutzt werden, wird der Effekt bezüglich Effizienz in die entgegengesetzte Richtung wirken.

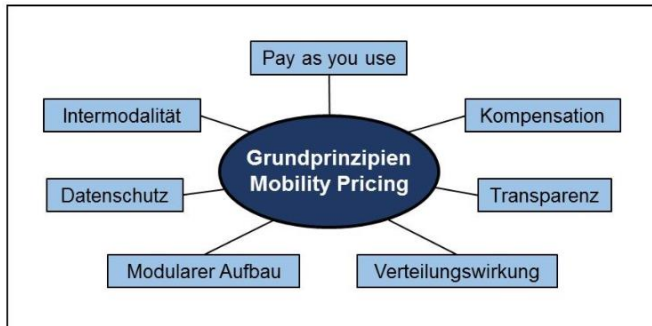


Abb. 12. Grundprinzipien von Mobility Pricing (Bundesrat, 2016)

In allen von der Digitalisierung betroffenen Bereichen wird das Thema der **Cyber-Security** immer wichtiger. Cyber-Security behandelt den Schutz von IT-Geräte vor Diebstahl und Schaden der Hard- und Software, sowie Informationen. Durch die voranschreitende Digitalisierung werden immer mehr Bereiche des Lebens durch Maschinen übernommen oder gesteuert. In Zukunft wird dieses noch Einflussgebiet noch weiter ausgedehnt und auch Gebiete betreffen, welche lebensbedrohlicher Natur sein können (automatisierte Fahrzeuge). Darum wird der Schutz dieser Systeme von immer grösserer Wichtigkeit.

3.6 Vernetzte und intelligente Infrastruktur

Die intelligente Infrastruktur wird als Basis für die darauf aufbauenden Mobilitätsdienste verstanden. Die neu entstehenden, grossen Datenmengen müssen verlässlich und schnell zwischen den Verkehrsteilnehmern sowie von und zur Infrastruktur übermittelt werden. Die auf der IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie) basierende Infrastruktur, welche diese Datenübertragung ermöglicht, fällt unter den Begriff: «Digitale Infrastruktur». In anderen Berichten wird auch über «Intelligent Transport System» (ITS) gesprochen, wobei auch dieser Begriff sich in erster Linie um die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur dreht (Zhankaziev, 2017).

Vernetzung bedeutet in diesem Fall die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander (Car-to-Car, C2C) und mit der Infrastruktur (Car-to-Infrastructure, C2I), welche zusammengefasst als Car-to-X-Kommunikation (C2X) zusammengefasst werden. C2C bedeutet die instantane Kommunikation zwischen Fahrzeugen, um verkehrsrelevante Informationen weiterzuleiten. C2I liegt beispielsweise vor, wenn eine Ampelphase direkt von der Ampel an das Fahrzeug weitergegeben wird. Dies ist für den Verkehrsfluss, sowie die Verkehrssicherheit wichtig, da dem Fahrer oder automatisierten Fahrzeug wichtige Daten zur Verkehrslage in Echtzeit vorliegen.

Von einer **intelligenten Strasse** spricht man, wenn diese in das Internet of Things (IoT, Internet der Dinge) einbezogen ist. Das IoT bezeichnet eine durch IKT vernetzte Infrastruktur von heterogenen Alltagsgegenständen über das Internet (Steinhoff, 2016). Eine wichtige Grundlage für das IoT ist ein ausgewogen abgestimmtes Netzwerk, welches einerseits auf LPWAN-Netzwerken aufbaut (LPWAN = Low Power Wide Area Network), welche sich über ihren tiefen lokalen Stromverbrauch definieren, andererseits schnellere Versionen des heutigen Mobilfunknetzes (z.B. 5G) einbindet. Die Schweiz, Niederlande und Südkorea sind die ersten Länder mit einem flächendeckenden LPWAN-Netzwerk. Damit sich das IoT durchsetzen kann, muss eine umfassende – den Ansprüchen hinsichtlich Datendurchsatzraten und Verzögerungsfreiheit genügende – Datenübertragung gewährleistet sein. Die Hoffnungen liegen hier auf den «Next Generation Mobile Networks» (NGMN): 5G (die fünfte Generation) wird zehn Mal schneller sein als das momentane 4G (Farris, 2017).

Ein Begriff, der im Kontext der künftigen Infrastruktur häufig aufkommt, ist die sogenannte «**Smart City**» welche sich unter anderem ebenfalls das IoT zum Vorteil macht. Auch hier ist eine fortschrittliche IT-Integration die Grundlage, welche grosse Datenmengen kreiert und interpretiert. Das Ziel einer Smart City ist das optimierte Zusammenspiel aller in einer Stadt ablaufenden Vorgänge (Kim, 2017). Smarte Systeme im Allgemeinen sind Systeme,

welche sich basierend auf Daten, intelligenten Algorithmen und menschlichen Entscheidungen optimieren. Die Echtzeitdaten entstammen Sensoren, Logistiksystemen oder den sozialen Medien. Die intelligenten Algorithmen basieren in der Regel dem Gebiet des maschinellen Lernens, wobei man vier Komplexitätsstufen unterscheiden kann (Abb. 13):

- Deskriptive Analytik: Was ist geschehen?
- Diagnostische Analytik: Weshalb ist es geschehen?
- Prädiktive Analytik: Was wird geschehen?
- Präskriptive Analytik: Was muss getan werden, um Systemzustand x erreichen zu können?

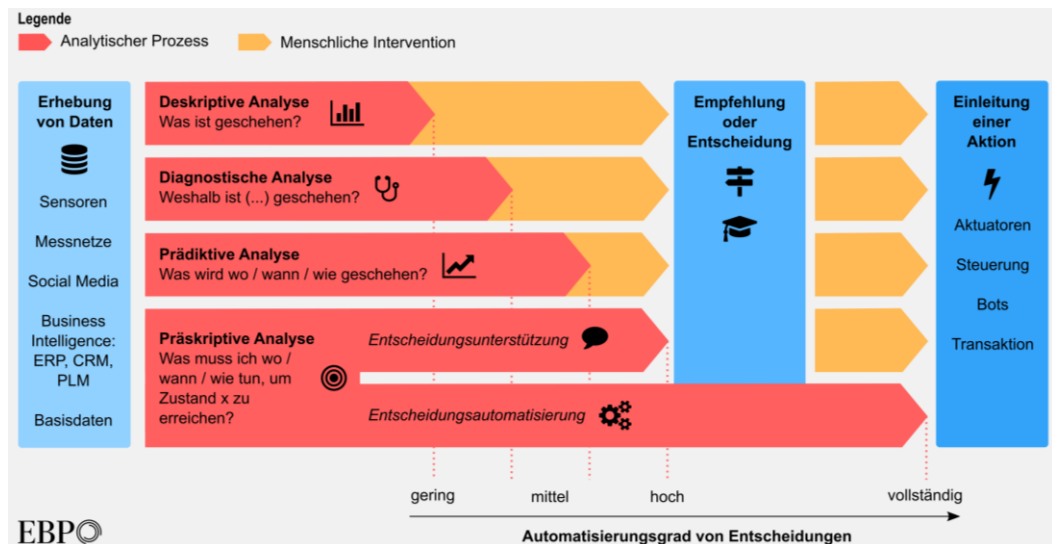


Abb. 13. Die vier Analytikstufen smarterer Systeme nach Gartner (Quelle: EBP 2017b)

Smarte Systeme kamen in der Fertigungsindustrie auf, wobei es um die Optimierung der Produktion über Informations- und Kommunikationstechnologien ging. Diese Entwicklung nennt man «Industrie 4.0». Dieser Gedanke wird nun seit einiger Zeit auf ganze Städte ausgeweitet. Ziel der Optimierung bei Smart Cities ist gesteigerte Effizienz, Nachhaltigkeit und Lebensqualität. Die Digitalisierung, Vernetzung und Automatisierung schlagen sich ebenfalls massgeblich im Güterverkehr nieder. Die **Digitalisierung in der Logistik** wird ebenfalls oft mit dem Begriff der «Industrie 4.0» betitelt. Unter diesem Namen versteht man den Fortschritt smarterer Systeme in industriellen Anlagen zur Optimierung von Produktionsprozessen. Der Begriff geht auf ein Projekt der deutschen Bundesregierung zurück (Deutscher Bundestag 2016). Das Ziel dieses Projektes war die Verzahnung der industriellen Produktion mit modernen Informations- und Kommunikationstechnologien. Durch die Vernetzung sollen nicht mehr nur einzelne Produktionsschritte optimiert werden, sondern die gesamte Wertschöpfungskette (EBP 2017b). Gemäss ASTRA (2017a) werden im Bereich Digitalisierung der Logistik die folgenden Technologien und Anwendungen eine relevante Rolle spielen: Truck Platooning, Güterverkehr mit Drohnen, additive Fertigung mit 3D-Druckern, IoT in der Logistik, Logistik in der Sharing Economy und Komfort-Logistik.

4 Identifikation von Schlüsseltechnologien

In diesem Kapitel untersuchen wir, welche Technologien – direkt oder indirekt – relevante Auswirkungen auf den Verkehr der Zukunft haben. Dabei verwenden und kombinieren wir mehrere Methoden. Der Arbeitsbegriff «Schlüsseltechnologie» wurde in Kap. 2 definiert über die Relevanz und Anzahl der Wirkungsfelder einer Technologie. Ziel ist es, ein Set von etwa 10 bis 15 «Schlüsseltechnologien» zu identifizieren, welche sich für den vorliegenden Bericht eignen, um die Auswirkungen des technologischen Wandels auf den Verkehr der Zukunft zu erfassen.

Auf Basis von Expertenwissen, Internetrecherchen, Experteninterviews, Workshops mit internen und externen Experten sowie der Analyse Schwacher Signale (Kap. 4.1) wurde eine «long list» von möglichen relevanten Technologien erstellt (Kap. 4.2). In Kap. 2 wurden – unter anderem auf Basis von Erkenntnissen aus systemdynamischen Modellen – sechs potenzielle Wirkungsfeldern von Technologien identifiziert; die «long list» wird bewertet anhand der Anzahl der Wirkungsfelder, in welchen die jeweilige Technologie Auswirkungen hat (Kap. 4.3). Für die Aufnahme einer Technologie in das Set an Schlüsseltechnologien kamen Expertenwissen und Workshops zum Einsatz; zusätzlich wurde gezählt, wie oft eine Technologie bei Experteninterviews als potenzielle Schlüsseltechnologie genannt wurde (dokumentiert in Anhang I.1). Das Resultat sind die zwölf Schlüsseltechnologien, welche den grössten potenziellen Einfluss auf das Verkehrssystem haben. Sie werden je in einem Faktenblatt beschrieben mitsamt ihren Abhängigkeiten untereinander, den Chancen und Risiken sowie ihrer Durchsetzungsgeschwindigkeiten (in Kapitel 4.4).

4.1 Analyse von «Weak Signals»

Um die Auswirkungen des technologischen Wandels auf den Verkehr der Zukunft zu analysieren, sollen auch jene Technologien, welche sich heute eben erst abzeichnen, aber Diskontinuitäten bzw. disruptive Entwicklungen einleiten könnten, einbezogen werden. Für disruptive Entwicklungen eignen sich statistische oder ökonometrische Methoden – welche letztlich versuchen, Trends zu extrapolieren – nicht (van Notten et al. 2005), weil sich disruptive Veränderungen nicht kausallogisch aus der Vergangenheit erklären lassen, oder weil die für die Veränderung verantwortliche Parameter (noch) nicht bekannt sind.

In der Zukunftsforschung wird dazu aus der Technologiefrüherkennung und den Strategischen Frühwarnsystemen die Analyse von „weak signals“ (Schwache Signale) verwendet. Begründet durch Ansoff (1975), wird versucht, jene schwache Signale zu detektieren, welche auf Diskontinuitäten hinweisen (siehe Mendonça et al. 2012; Harris und Zeisler 2002). Diese Methode hat klare Limiten beim Prognosehorizont (entspricht etwa der Lebensdauer einer Fahrzeuggeneration und ist somit typischerweise geringer als bei der Trendanalyse).

Der Verkehr zeichnet sich auf Seiten der Fahrzeuge, Energiebereitstellung und Infrastruktur durch längere Lebensdauern und hohe Pfadabhängigkeit aus; hier sind Trendanalyse und Expertenwissen (z.B. über Workshops, Interviews und Delphi-Befragungen) bewährte Zukunftsforschungsmethoden. Im Bereich der Digitalisierung (IKT), welche sich weniger physisch manifestiert, kann die Analyse Schwacher Signale am ehesten Beiträge leisten. Dies betrifft damit eher «enabling technologies» als «main technologies». In ihrer Anwendung dürfte für die Mobilität das grösste disruptive Potential stecken, wenn dank Vernetzung bestehende Fahrzeuge, Energien und Infrastruktur besser organisiert und Kundenbedürfnisse besser, schneller und günstiger befriedigt werden können.

Die Analyse von Schwachen Signalen ist abzugrenzen von Starken Signalen und von Trends. Holopainen und Toivonen (2012) liefern mehrere empirische Beispiele für die Identifizierung, Sammlung und Interpretation von Schwachen Signalen. Die verschiedenen Arten von Signalen können – wenn Zeitreihen von Zukunftsdaten wie z.B. Patentdaten oder Expertenbeiträgen in Zukunftsforen betrachtet werden – wie folgt charakterisiert werden:

- **Trends:** Hier ist eine technologische Entwicklung in den Zeitreihen bereits soweit erkennbar, dass – unter Zuhilfenahme von Erkenntnissen aus der Diffusionstheorie – eine

auf die Analyse der Zeitreihe gestützte Vorhersage für die weitere Marktentwicklung möglich ist. Rein statistische Extrapolationsverfahren eignen sich jedoch nicht, weil die Technologie noch in einem frühen, nicht-linearen Stadium ist.

- **Starke Signale:** Diese lassen sich statistisch aus Zeitreihen identifizieren und quantitativ in ihrem Bestehen bestätigen (Vorhandensein eines Starken Signals), jedoch nicht metrisch interpretieren oder extrapolieren.
- **Schwache Signale:** Diese Signale lassen sich in einer Zeitreihenanalyse noch nicht vom statistischen Rauschen trennen. Es kann jedoch versucht werden, über weitere Kriterien wie die Neuartigkeit oder Singularität von Signal-Events solche Schwache Signale eben doch vom Hintergrundrauschen zu trennen, wobei dies letztlich Expertenurteile benötigt und sich nicht automatisieren oder objektivieren lässt.

In *Abb. 14* ist die Trennung zwischen Schwachen und Starken Signalen anhand des statistischen Rauschens in einer Zeitreihe illustrativ dargestellt.

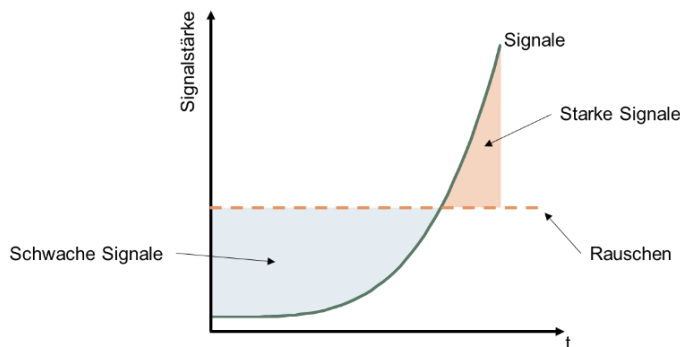


Abb. 14. Schematische Illustration Schwacher Signale (eigene Darstellung).

Schwache Signale können künftige Geschäftsmodelle tendenziell positiv (oder bestehende Geschäftsmodelle tendenziell negativ) beeinflussen. Während früher «Schwache Signale» als ein Sammelbegriff für quantitativ noch nicht identifizierbare, aber postulierte Früh-Trends verwendet wurde (basierend auf Knowhow und Expertenwissen), konzentriert sich die jüngere Forschung darauf, Schwache Signale als Frühindikatoren künftiger Trends – auch wenn sie gezwungenermaßen unpräzise sind – auch quantitativ zu fassen. Yoon (2012) schlägt beispielsweise eine automatische, quantitative Methode vor über die Auswertung und das Auszählen von Stichwörtern innerhalb von web-basiertem Textmining. Kim und Lee (2017) kombinieren ein solches Textmining mit einer Outlier-Analyse, um die Neuartigkeit eines Signals beurteilen zu können (dabei werden Patentanmeldungs-Daten als Proxy für existierende Paradigmen zur technologischen Innovation verwendet). Sie zeigen dies in einer Fallstudie für «virtual and augmented reality»-Technologien. – Für die vorliegende Studie erwies sich diese quantitative Form der Analyse Schwacher Signale als nicht umsetzbar, weil der Fokus (gesamtes Verkehrssystem inkl. Fahrzeuge, Infrastruktur, Energie) und die hier gesuchten «Technologien» sehr breit gefasst sind.

Für diese Studie wurden (im Internet recherchierte) an ICT- und Fahrzeugmessen vorgestellten Konzepte sowie (im Internet recherchierte) Fachaufsätze qualitativ analysiert. Die Resultate sind in der Erstellung der umfangreichen Technologienliste («long list», Kapitel 4.2) eingeflossen. Sie betreffen vor allem «Untertechnologien», welche in diesem Bericht zu «grösseren» Technologien zusammengefasst wurden. Dies betrifft insbesondere das automatisierte Fahren, «embedded and wearable technologies», das automatisierte Auswerten von Verhaltensmuster zwecks Hypothesenbildung von Absichten sowie – damit eng verwandt – die Künstliche Intelligenz (in Kapitel 4.2 und 4.3 dokumentiert mit den Nummern 20, 29, 30 bzw. 33). Auch der Einsatz von Drohnen innerhalb von Logistikketten zwecks schnellerer Auslieferung – entweder auf der letzten Meile, oder aber für die Strecke zwischen Warenlager und einem Feinverteilungsfahrzeug sticht hervor (als mögliche Untertechnologien oder deren Anwendung von Drohnen aufgenommen als Nr. 37 in Kap. 4.2).

Es zeigt sich, dass die Methode der Analyse Schwacher Signale für die Technologiefrüherkennung im Bereich Verkehr der Zukunft sich weniger eignet für technologischen Trends im Bereich von Fahrzeugtechnik, Infrastruktur oder Energiebereitstellung, aber nützlich sein kann im Bereich von «verknüpfenden» ICT-Technologien, welche systematische Effekte haben könnten, namentlich in den Bereichen Digitalisierung und Vernetzung, Ortserkennung und Man-Machine-Interface. Die Methode kann hier die Trendanalyse ergänzen. Sie liefert aber keine Beiträge zur möglichen Priorisierung von Technologien. Auch die Auswertung von Patentanmeldungen erwies sich als nicht durchführbar, weil die technologische Themenbreite von «Verkehr der Zukunft» dafür viel zu breit ist und zu viele Technologie-Bereiche eine mögliche Rolle für den Verkehr der Zukunft spielen könnten. Innerhalb eines eingegrenzten Technologiebereichs wäre dies aber erneut zu prüfen.

4.2 Liste möglicher relevanten Technologien

Durch Internetrecherche, Literaturstudium, Workshops und Befragung von Expertinnen und Experten wurde eine umfassende Liste mit anfänglich mehr als 150 Einträgen zu möglicherweise künftig relevanten Technologien erstellt. Diese Liste wurde bereinigt und an einem Workshop (15.11.17) mit externen Verkehrsexpertinnen und -experten sowie Mitgliedern der Fachstelle auf ihre Qualität geprüft und bezüglich redundanter/ähnlicher Technologien bereinigt. Das Ergebnis ist eine Liste mit möglicherweise relevanten Technologien, die sich mehr oder weniger stark in der Zukunft in den Bereichen Energie, Transportmittel, Infrastruktur und IKT ausprägen werden. In Tab. 3 sind sie je mit einer kurzen Beschreibung aufgelistet.

#	Energie	Transportmittel	Infrastruktur	IKT	sonstige	Technologie	Beschreibung
1	X	X				FC Vehicles (Brennstoffzellenfahrzeuge)	Wasserstoff wird in Brennstoffzelle eingespeist um den Elektromotor anzutreiben
2	X	X				Elektromobilität/Elektrofahrzeuge	Von einem Elektromotor angetriebene Fahrzeuge
3	X	X				Elektroflugzeuge (Kurzstrecken)	Kurzstreckenflüge werden von elektrisch betriebenen Flugzeugen bewältigt
4	X	X				Hybrid Electric Vehicle (HEV)	Nutzt die Vorteile eines Elektromotors und eines Verbrennungsmotors
5	X	X				Hybrid Flugzeuge	Flugzeuge, welche elektrisch und durch fossile Treibstoffe angetrieben werden
6	X	X				Fahren elektrisch per Batterie oder Unterwasserkabel	Fahren mit elektrischem Antrieb
7	X	X				Solarzellen auf Fahrzeugdächern	Solarzellen speisen elektrische Energie in die Batterie des BEV ein
8	X		X			Oberleitungen für LKWs	Elektro-LKWs beziehen Antriebsenergie aus Fahrleitungen
9	X					Wechselakkusysteme für EV	Statt die Batterie aufzuladen, wird sie durch eine volle Batterie ersetzt
10	X					Bleiakkumulator	Akkumulator mit Elektroden aus Blei und Elektrolyt aus Schwefelsäure
11	X					Lithium-Ionen-Akkumulator	Akkumulator auf Basis von Lithium-Verbindungen in allen drei Phasen
12	X					Durchbrüche in Batterietechnologien	Steigerung der Leistungsfähigkeit und Energiedichte von Batterien
13	X					Induktionladen	EV lädt ohne Steckdose (über Induktion) auf (während Parken oder Fahren)
14	X					Smart Grid	Kommunikative Vernetzung und Steuerung des Stromnetzes (Dezentralisierung)
15	X					Hochspannungsladen	Gleichstrom Hochspannungstankstellen (z.B. Tesla Supercharger)
16	X					Power-to-Gas	Elektrizität wird mittels Elektrolyse in chemische Energie umgewandelt
17	X					Sammeltaxi und -shuttle	Zukünftige Verkehrsformen im Übergangsbereich von MIV und ÖV auf Basis von vollautomatisierten Fahrzeugen
18	X					Kernfusion	Zwei Atomkerne verschmelzen zu einem ► keine Endlagerung radioaktiver Abfälle
19		X	X			Magnet-, Luftdruckbahnen	Hochgeschwindigkeitszüge befördern die Passagiere in kürzester Zeit an den Zielort
20		X		X		Automatisiertes Fahren	Fahrzeuge besitzen leichte Fahrhilfen bis hin zum voll-automatisierten Fahren
21		X		X		Roboter für Gütertransport	Roboter übernehmen den Gütertransport
22		X		X		Truck Platooning	Lastwagenfahrten in einer Kolonne und untereinander vernetzt
23		X				1-Personen-Shuttles auf Strasse o. Schiene	Geführte oder ungeführte Shuttles für den Einzelpersonen-Transport, automatisiert
24		X				"Microlino" (Mirco Mobility Systems)	Mikromobilität: (vor allem elektrisch betriebene) kleine Fahrzeuge
25			X	X		Lichtsignalsteuerungen	Ampeln reagieren dynamisch auf den zu bewältigenden Verkehr
26			X			Cargo Sous Terrain / Hyperloop	Güter sollen auf unterirdischen Strassen transportiert werden / Personen werden auf Magnetschwebbahnen transportiert
27			X			Schwebende Unterwasser-Tunnels	Um z.B. in Norwegen Fjorde passieren zu können
28			X			"Electric skates" (The Boring Company)	Lifte befördern Autos in Untergrund-Tunnelsystem in urbanen Gebieten

#	Energie	Transportmittel	Infrastruktur	IKT	sonstige	Technologie	Beschreibung
29				X		Embedded and Wearable Technology	Werden im oder auf dem Körper getragen (Grundlage für Human Devices)
30				X		Gedankensensor	Schliesst aus den Gedanken, auf die eigenen Bedürfnisse
31				X		Verkehrsmittelübergreifende Authentifizierungssysteme	Ein Ticket für z.B. Bikesharing, Zug, CarSharing, usw. (Grundlage für BIBO)
32				X		Robotik	Entwicklung und Steuerung Roboter (vor allem für Güterumschlag)
33				X		Künstliche Intelligenz	Roboter lernen und arbeiten ohne äussere Instruktionen
34				X		Machine Learning / Computer Vision	Verkehrsführung könnte damit optimiert werden (Vorstufe und Grundlage für KI)
35				X		Quantencomputer	Steigert die Leistung und minimiert die Grösse von Rechnern auf molekularer Ebene
36				X		Bibo-Technologie	Be-In, Be-Out - Ticket muss nicht an ein Lesegerät gehalten werden
37				X		Drohnen	Flugfähige automatisierte Luftfahrzeuge; meist ein Quadrocopter
38				X		Internet of Things (IoT)	Infrastruktur der Informationsgesellschaften; Vernetzung physischer Gegenstände
39				X		Navigations-/Routenwahlsysteme	Raumbezogene Informationen in Echtzeit und genauer Auflösung (z.B. TomTom)
40				X		Cooperated Intelligent Transport Systems	Kommunikation zwischen den einzelnen Fahrzeugen und Infrastruktur
41				X		Mobility Pricing (Sensoren usw. für Pricing)	Durch Nachfrageoptimierung der Verkehrspreise Verkehrsspitzen glätten
42				X		Physical Internet	Logistik-System welches auf fortgeschrittener ICT und Big Data Verarbeitung aufbaut
43				X		Echtzeit-Karten	Google Maps als Cam, auch Indoor - stetige momentane Informationen zur Umwelt
44				X		Digitale Buchungsplattformen	Reisen werden dynamisch geplant, gebucht und bezahlt
45				X		5G (und Nachfolger)	Schnelleres mobiles Internet - wichtig für V2X, IoT, usw.
46				X		Big Data Verarbeitung	Massendaten, welche Schlüsse zur Verkehrsentwicklung ermöglichen
47				X		Quantified Self und My Data	Marktplatz für Bewegungs- und Intentionsdaten
48				X		Revolutionäre User Devices	Weiterentwicklung des heutigen Smartphones
49				X		Blockchain	Datensätzen, welche mittels Kryptographie miteinander verkettet sind
50				X		Virtuelle Realität	Mit Hilfe von VR-Brille lässt sich jede gewünschte Realität kreieren
51				X		Optimierungsalgorithmen Wegfindung	Algorithmus definiert den schnellsten, günstigsten oder/und energieeffizientesten Weg
52				X		Fahrplanfreies Fahren (ÖV)	Kein fixierter Fahrplan, sondern Nachfrageabhängig optimiert
53				X		3D Druck / Additive Produktionsmethoden	Statt Waren zu transportieren, werden sie am Zielort 3D-gedruckt
54				X		Exoskellet zur Fortbewegung	Bewegungseingeschränkten Menschen wird ein Zugang zu Mobilität verschafft
55				X		"Straddling Bus"	Bus fährt auf der Strasse, ist aber erhöht und lässt unter sich Platz für Verkehr
56				X		"SkyTran"	Ähnlich wie ein Skilift aber über einer Stadt, per App bestellbar (200km/h)
57				X		"Skylon"	Flugzeug; fünffache Schallgeschwindigkeit ausserhalb des Orbits (London > Sydney in 4h)
58				X		"Martin Jetpack"	Mit diesem Jetpack können Personen 30' fliegen (Höchstgeschwindigkeit von 74km/h)
59				X		Teleportation/Beamen	Innerhalb eines Sekundenbruchteils den Ort wechseln
60				X		Zeppelin	Zeppeline besitzen hohe Beladungskapazitäten; für schlecht angeschlossene Gebiete
61				X		Techniken aus dem Bereich Parkierung	Neue Konzepte für das Parkaus der Zukunft: stapelbare/faltbare Autos, moderne Parkleitsystem, Hochregallager, usw.

Tab. 3 Umfangreiche Technologienliste aus Literatur, Interviews und Workshops

4.3 Identifikation der Schlüsseltechnologien

Einfluss auf das Verkehrssystem. Der erste Schritt zur Identifikation der Schlüsseltechnologien war, dass für die identifizierten Technologien (*Tab. 4*) der Einfluss auf das Verkehrssystem eingeschätzt wurde und mit dem systemdynamischen Modell plausibilisiert wurde. Dadurch konnten gewisse Technologien definitiv ausgeschlossen werden, die zwar in anderen Wirkungsbereichen wichtig sein mögen, aber nur eine marginale Auswirkung auf das Verkehrssystem hätten.

Tab. 4: Beschreibung der Einflüsse zur ersten Bestimmung der Schlüsseltechnologien

Kriterium (Einfluss)	Beschreibung
Reisezeit / Transportzeit	Kürzere Reisezeit / Transportzeit : Weniger zurückgelegte Strecken; Steigerung Durchschnittsgeschwindigkeit;
Kosten/Erträge	Tiefere Kosten für Mobilität: Nutzungskosten (beinhalten fixe und variable Kosten) zum Konsum von Fahrzeugen, Mobilitätsdienstleistungen und Infrastruktur – Einheit sind CHF/ Pkm für PV und CHF/ Tkm für GV. Höhere Erträge, die durch neue Mobilitätsdienstleistungen möglich werden.
Sicherheit/Komfort/Planbarkeit	Grössere Verkehrssicherheit : Weniger Unfälle Steigerung des Reisekomforts : Reisezeit nutzbarer (Schlafen, Essen); kürzere Vorbereitungszeit; Weniger Puffer einberechnet (Stau, Verspätungen); Zeit zwischen Verkehrsmitteln verkürzt (Umsteigen), Verbesserung der Planbarkeit
Umweltbelastungen	Tiefere Umweltbelastungen : Tiefere CO ₂ Emissionen, Steigerung Energieeffizienz, Lärmreduktion, Reduktion Stickoxide, Zerschneidung, Versiegelung, Flächenverbrauch, Feinstaub, unangepasste Planung
Neue Verkehrsteilnehmer Gütertypen	/Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer : Junge <18 J; Senioren >75J; Bewegungseingeschränkte; Mütter/Väter mit Kinderwagen. Neue Gütertypen (z.B. für
Verkehrskapazität	Erhöhte Verkehrskapazität: Mehr Fahrzeuge; grössere Fahrzeugauslastung; bessere Flächennutzung

Um die Einflüsse mit einer «Richtung» – also «+1», «0» und «-1» – bewerten zu können, wurden sie ebenfalls jeweils mit einer (aus Perspektive des Konsumenten als positiv empfunden) Richtung versehen. Somit bedeutet also in *Tab. 5* und *Tab. 6* eine 1 bei der Reisezeit, dass diese verkürzt wird; eine -1 würde eine Verlängerung dieser voraussetzen und eine 0 bedeutet, dass diese Technologie keine Veränderungen zu diesem Aspekt mit sich bringt. Eine erste Bestimmung möglicher Schlüsseltechnologien erfolgte basierend auf der Annahme, dass je mehr positive Einflüsse eine Technologie auf den Verkehr hat, desto eher handelt es sich dabei um eine Schlüsseltechnologie.

Tab. 5: Einfluss auf das Verkehrssystem je Technologie (1)

#	Energie	Fahrzeug	Infrastruktur	IKT	sonstige	Technologie	Reisezeit/Transportzeit	Kosten und Erträge	Sicherheit/Komf./Planb.	Umweltbelastungen	Neue Verkehrsteiln.	Verkehrskapazität	Relevanz für VdZ
1	X	X				FC Vehicles (Brennstoffzellenfahrzeuge)	0	0	0	0	0	0	0
2	X	X				Elektromobilität/Elektrofahrzeuge	0	0	0	1	0	0	1
3	X	X				Elektroflugzeuge (Kurzstrecken)	0	0	0	1	0	0	1
4	X	X				Hybrid Electric Vehicle (HEV)	0	0	0	1	0	0	1
5	X	X				Hybrid Flugzeuge	0	0	0	1	0	0	1
6	X	X				Fähren elektrisch per Batterie oder Unterwasserkabel	0	0	0	1	0	0	1
7	X	X				Solarzellen auf Fahrzeugdächern	0	0	0	1	0	0	1
8	X		X			Oberleitungen für LKWs	0	-1	0	1	0	0	0
9	X					Wechselakkusysteme für EV	1	-1	1	0	0	0	1
10	X					Bleiakkumulator	0	0	0	0	0	0	0
11	X					Lithium-Ionen-Akkumulator	0	0	0	0	0	0	0
12	X					Durchbrüche in Batterietechnologien	1	1	1	1	0	0	4
13	X					Induktionsladen	1	0	1	0	0	0	2
14	X					Smart Grid	0	0	1	1	0	0	2
15	X					Hochspannungsladen	1	-1	0	0	0	0	0
16	X					Power-to-Gas	0	0	0	1	0	0	1
17	X					Sammeltaxi und -shuttle	1	0	1	0	0	0	2
18	X					Kernfusion	0	0	0	1	0	0	1
19		X	X			Magnet-, Luftdruckbahnen	1	-1	1	0	0	1	2
20		X		X		Automatisiertes Fahren	1	0	1	0	1	1	4
21		X		X		Roboter für Gütertransport	1	1	1	0	0	1	4
22		X		X		Truck Platooning	1	1	1	0	0	1	4
23		X				1-Personen-Shuttles auf Strasse o. Schiene	1	0	1	0	1	1	4
24		X				"Microlino" (Mirco Mobility Systems)	0	0	0	1	1	1	3
25			X	X		Lichtsignalsteuerungen	1	0	1	0	0	1	3
26			X			Cargo Sous Terrain / Hyperloop	1	-1	1	1	0	1	3
27			X			Schwebende Unterwasser-Tunnels	0	-1	1	0	0	1	1
28			X			"Electric skates" (The Boring Company)	1	-1	1	0	1	1	3
29				X		Embedded and Wearable Technology	1	0	1	0	1	0	3
30				X		Gedankensensor	1	0	1	0	1	0	3
31				X		Verkehrsmittelübergreifende Authentifizierungssysteme	0	0	1	0	0	0	1

Tab. 6: Einfluss auf das Verkehrssystem je Technologie (2)

#	Energie	Fahrzeug	Infrastruktur	IKT	sonstige	Technologie	Reisezeit/Transportzeit	Kosten und Erträge	Sicherheit/Kont./Planb.	Umweltbelastungen	Neue Verkehrsteiln.	Verkehrskapazität	Relevanz für VdZ
32				X		Robotik	1	1	1	0	1	1	5
33				X		Künstliche Intelligenz	1	0	1	0	0	1	3
34				X		Machine Learning / Computer Vision	1	0	1	0	0	1	3
35				X		Quantencomputer	0	0	0	0	0	0	0
36				X		Bibo-Technologie	0	0	1	0	0	0	1
37				X		Drohnen	1	1	1	-1	0	1	3
38				X		Internet of Things (IoT)	0	0	1	0	0	1	2
39				X		Navigations-/Routenwahlssysteme	1	0	1	0	0	0	2
40				X		Cooperated Intelligent Transport Systems	1	0	1	0	0	1	3
41				X		Mobility Pricing (Sensoren usw. für Pricing)	1	-1	0	0	0	1	1
42				X		Physical Internet	1	1	1	0	0	1	4
43				X		Echtzeit-Karten	1	0	1	0	0	1	3
44				X		Digitale Buchungsplattformen	0	0	1	0	0	0	1
45				X		5G (und Nachfolger)	0	0	1	-1	0	0	0
46				X		Big Data Verarbeitung	1	0	1	-1	0	1	2
47				X		Quantified Self und My Data	0	0	1	0	0	0	1
48				X		Revolutionäre User Devices	0	0	1	0	1	0	2
49				X		Blockchain	0	1	1	0	0	0	2
50				X		Virtuelle Realität	1	1	1	1	1	1	6
51				X		Optimierungsalgorithmen Wegfindung	1	0	1	0	0	1	3
52				X		Fahrplanfreies Fahren (ÖV)	1	0	1	0	1	0	3
53				X		3D Druck / Additive Produktionsmethoden	1	1	1	0	0	1	4
54				X		Exoskellet zur Fortbewegung	1	0	1	0	1	0	3
55				X		"Straddling Bus"	0	0	0	0	0	1	1
56				X		"SkyTran"	1	-1	0	0	0	1	1
57				X		"Skylon"	1	-1	0	0	0	1	1
58				X		"Martin Jetpack"	0	0	-1	0	0	1	0
59				X		Teleportation/Beamen	1	0	0	0	0	1	2
60				X		Zeppelin	0	0	0	0	0	0	0
61				X		Techniken aus dem Bereich Parkierung	0	0	1	0	0	0	1

Die Technologien, welche nach diesem Verfahren (Tab. 5 und Tab. 6) die grösste Relevanz für den künftigen Verkehr haben werden sind die virtuelle Realität und Robotik. Der Grund, weshalb diese die meisten Einflüsse haben, ist, dass die virtuelle Realität eine der wenigen verkehrsvermindernden Technologien ist und deshalb einen positiven Einfluss auf jegliche Aspekte des Verkehrs hat. Die Robotik ist eine Technologiegruppe, welche viele Technologien beinhaltet und wiederum für kaum eine Technologie abdingbar ist. Aus diesem Grund kann sie ebenfalls viele positive Einflüsse auf das Verkehrssystem haben. Auffallend ist, dass vier der acht am drittrelevantesten (nach diesem Verfahren) bewerteten Technologien (Tab. 7) der übergeordneten Kategorie des automatisierten Fahrens zugeordnet werden können: 1-Personen-Shuttles, Truck Platooning, Roboter für Gütertransport und Automatisiertes Fahren.

Tab. 7: Technologien mit grösstem Einfluss auf das Verkehrssystem

Rang (Relevanz)	Technologie
1 (6)	Virtuelle Realität
2 (5)	Robotik
3 (4)	3D Druck / Additive Produktionsmethoden
3 (4)	Physical Internet
3 (4)	Drohnen
3 (4)	1-Personen-Shuttles auf Strasse o. Schiene
3 (4)	Truck Platooning
3 (4)	Roboter für Gütertransport
3 (4)	Automatisiertes Fahren
3 (4)	Durchbrüche in Batterietechnologien

Interviews. Der zweite Schritt zur Identifikation der Schlüsseltechnologien waren die 30 durchgeführten Interviews mit Expertinnen und Experten (Liste der Befragten im Anhang I.1). Bei der Auswahl der Experten wurde darauf geachtet, dass es Fachleute aus möglichst verschiedenen Gebieten sind. Es war wichtig, dass nicht nur Expertinnen und Experten aus der Wissenschaft, sondern auch aus der Wirtschaft und NGOs befragt wurden. Auch in diesen einzelnen Gebieten war es erheblich, dass die Auswahl möglichst breit abgestützt blieb. Es muss angemerkt werden, dass vor allem bei Expertinnen und Experten aus der Wirtschaft manchmal die Bereitschaft der Teilnahme am Interview tiefer war, aus Vorsicht vor der Verbreitung von eigenen Firmengeheimnissen (z.B. Tesla).

Das Vorgehen der Befragungen sah wie folgt aus: In einer ersten Befragungsrunde wurden 20 Expertinnen und Experten zu ihren Zukunftsvisionen bezüglich Verkehr befragt. Während dem Interview kristallisierte sich heraus, welches die wichtigsten Technologien dieser Zukunftsvision waren. Daraus ging eine erste Auswahl an Schlüsseltechnologien hervor. In der zweiten Runde der Interviews wurden die Experten mit der Auswahl an Schlüsseltechnologien konfrontiert und mussten diese verteidigen oder kritisieren. Weiter wurde jede Technologie bezüglich Treiber und Hindernisse / Chancen und Risiken charakterisiert. Die Aussagen aller Experten sind zusammengefasst im Anhang I.1 zu finden.

Die genannten Schlüsseltechnologien aller Interviews wurden zusammengetragen und es wurde ermittelt, welche Technologie wie oft genannt wurde. Die Nennhäufigkeit wird für die Auswertung der Interviews als Hauptkriterium für die Wichtigkeit einer Technologie angenommen (siehe Tabelle 8).

Tab. 8: Auswertung der am häufigsten genannten Technologien in den Experteninterviews

Rang (Relevanz)	Technologie
1 (18)	
2 (14)	Robotik Automatisiertes Fahren
3 (6)	Virtuelle Realität 3D Druck / Additive Produktionsmethoden
4 (4)	Power-to-X
4 (4)	Drohnen
5 (3)	Oberleitungen
5 (3)	Internet of Things
5 (3)	Neue Infrastruktur
6 (2)	Mobility Pricing
6 (2)	Robotik
6 (2)	Revolutionäre User Devices

Die Grundhaltung der Expertinnen und Experten war, dass sich die **Elektromobilität** im Jahr 2060 für den Personenverkehr zum grössten Teil vollständig durchgesetzt haben wird. Woher die Elektrizität/Energie für den Antrieb stammen wird, blieb aber offen. Oft wurden Batterien genannt, was bedeuten würde, dass die Energie aus dem Stromnetz stammen würde. Brennstoffzellen oder Oberleitungen wurden als wichtige Möglichkeiten der Elektromobilität für grössere Fahrzeuge (LKWs, Busse) eingestuft.

Automatisierte Fahrzeuge wurden nach der Elektromobilität am zweitmeisten genannt. Bei der Frage, wie stark die Ausprägung für das Jahr 2060 sein wird, gingen die Meinungen jedoch auseinander. Einige Fachleute erwogen, dass schon im Jahr 2022 die ersten vollautomatischen Personenwagen auf dem Markt sein werden. Andere waren sich – etwa aufgrund noch ungeklärter rechtlicher Fragen – unsicher, wie die Entwicklung in Zukunft aussehen wird. Manche der Befragten hatten das Gefühl, dass automatisierte Fahrzeuge besser in der Stadt funktionieren, wo die Informationsdichte hoch ist, während diese in ländlichen Gebieten eher tief ist. Schliesslich meinten einige, dass die Stadt die schwierigste Umgebung für vollautomatische Fahrzeuge sei, da dort am meisten Variablen (Fussgänger, Ampeln, usw.) vorhanden seien. Es ist dabei wichtig festzuhalten, dass vollautomatisches Fahren im Gegensatz zur Elektromobilität einschneidende Veränderungen in das Verkehrssystem mit sich bringt. Wie sich der Fahrzeugbesitz durch vollautomatische Fahrzeuge verändern wird, blieb ebenfalls ungeklärt. Nach Meinung der Expertinnen und Experten kann sich dadurch entweder ein durchgängiges Sharingangebot durchsetzen (d.h. der Fahrzeugbesitz sinkt) oder es kommt im Gegenteil zu einer starken Erhöhung des Fahrzeugbesitzes, da Personen, die heute vom MIV ausgeschlossen sind (Kinder, Senioren, Menschen mit Behinderung), dann in einem eigenen Fahrzeug am Verkehr teilhaben können.

Die Bedeutung von **Virtual Reality** und von Hologrammen wurden sehr hoch eingestuft. Ein Grund für die Nennhäufigkeit könnte sein, dass die meisten Expertinnen und Experten grosse Erwartung in diese noch sehr unbekanntem Technologien setzen. **Drohnen** wurden zwar ebenfalls oft genannt, die Mehrheit der Expertinnen und Experten sah aber ein, dass Lärm und die offene Rechtslage eine grosse Schwierigkeit darstellen werden. Für den Anschluss entlegener Gebiete oder den Transport heikler Güter, die einem starken Zeitdruck unterliegen, können Drohnen aber eine valide Technologie sein. Im Personenverkehr werden Drohnen nach Meinung der Expertinnen und Experten nur punktuell zum Einsatz kommen und bis im Jahr 2060 ein High-End Produkt bleiben.

Das **Internet of Things (IoT)** wurde ebenfalls oft genannt, da es die Grundlage vieler Vernetzungstechnischer Entwicklungen bildet. **Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur** wie zum Beispiel Cargo Sous Terrain oder der Hyperloop wurden ebenfalls als relevante Technologien genannt. Viele Expertinnen und Experten zweifeln allerdings an solchen Projekten, da die Investitionskosten sehr hoch seien und diese Systeme auf einer unflexiblen (und deshalb möglicherweise beschränkt zukunftsfähigen) Infrastruktur basierten. Für den Zeithorizont 2060 und ein Land mit einem hohen Wohlstand wie der Schweiz könnten solche Systeme aber nach Meinung gewisser Expertinnen und Experten trotzdem erfolgreich sein. **Robotik** wird ebenfalls eine tragende Rolle im künftigen Verkehr haben. Die Befragten sehen den Einsatz vor allem im Bereich des Güterverkehrs um den Güterumschlag zu vereinfachen und effizienter zu gestalten. Mit dem Begriff **Revolutionäre User Devices** meinen die Expertinnen und Experten eine neue Version von Smartphones, die ähnlich revolutionär sein wird wie das originale Smartphone. Smartphones 2.0 sind möglicherweise in die Körper von Menschen implantiert und verfügen allenfalls über direkte Schnittstellen zu unseren Gehirnen. Sie würden die Interaktion mit Betreibern verschiedenster Verkehrsangebote viel organischer und effizienter gestalten, als sie das heute schon ist.

Workshop mit Begleitgruppe und Experten. Die Resultate der Interviews und der Beurteilung der Longlist anhand der Einflüsse auf den Verkehr wurden im Rahmen von zwei Workshops (15. Oktober 2017, 25. Januar 2018) mit der Begleitgruppe und mit externen Experten besprochen, angepasst und schlussendlich finalisiert. Dabei wurden weitere Technologien ergänzt und unwichtige gestrichen. Durch diesen Prozess wurden weitere Schlüsseltechnologien identifiziert (z.B. die Blockchain), welche eher indirekte Effekte auf das Verkehrssystem haben dürften. Folgende in den Interviews genannten Technologien wurden nicht als Schlüsseltechnologien gewählt: IoT, da der Begriff eher übergeordnet ist und nicht direkt auf das Verkehrssystem übertragbar ist; Mobility Pricing, da es sich um eine Anwendung und nicht eine Technologie handelt.

Tab. 9 Die zwölf in diesem Projekt betrachteten Schlüsseltechnologien

#	Schlüsseltechnologie	Bemerkungen zur Auswahl
1	Automatisierte Strassenfahrzeuge	Wurde bei den Interviews genannt und im Workshop bestätigt. Hat grossen Einfluss auf das Verkehrssystem.
2	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Stand in der Long List und wurde im Workshop explizit genannt, hat grossen Einfluss auf das Verkehrssystem.
3	Automatisierte Luftfahrzeuge	Wurde von bei den Interviews genannt (als Drohnen) und im Workshop bestätigt. Der Begriff Drohne wurde hier allgemein als Kategorie Automatisierte Luftfahrzeuge bezeichnet. Hat grossen Einfluss auf das Verkehrssystem.
4	Nachhaltige Antriebsenergie	Sammelbegriff für die Technologien Elektromobilität, Power-to-X, Brennstoffzellenfahrzeuge und Oberleitungen, welche bei den Interviews genannt worden sind.
5	Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	Wurde bei den Interviews genannt und im Workshop bestätigt, hat grossen Einfluss auf das Verkehrssystem.
6	Virtual & Augmented Reality	Wurde bei den Interviews genannt und im Workshop bestätigt, kann grossen Einfluss auf das Verkehrssystem haben.
7	Batterietechnologien	Wurde von bei den Interviews nicht genannt. Eine «enabling» Technologie, welche im Rahmen des Workshops identifiziert worden ist.
8	Robotik	Wurde bei den Interviews genannt und im Workshop bestätigt, hat grossen Einfluss auf das Verkehrssystem.
9	Vernetzung	Wurde von bei den Interviews nicht genannt. Eine «enabling» Technologie, welche im Rahmen des Workshops identifiziert worden ist. Sammelbegriff für IoT, 5G, LPWAN, usw.
10	Künstliche Intelligenz	Wurde von bei den Interviews nicht genannt. Eine «enabling» Technologie, welche im Rahmen des Workshops identifiziert worden ist.
11	Revolutionäre User Devices	Wurde bei den Interviews genannt und im Workshop bestätigt. Umbenannt mit übergeordnetem Begriff (statt Smartphone 2.0 / implantierte Displaytechnologien)
12	Blockchain	Wurde von den Experten im Rahmen des Workshops identifiziert.

Die Technologien, die nach diesem tiefgreifenden Prozess als Schlüsseltechnologien zurückbehalten worden sind, wurden jeweils in einem detaillierten Steckbrief beschrieben (vgl. Kapitel 4.4) und sind in der Tabelle 9 mit einer kurzen Erklärung zu ihrer Auswahl aufgelistet. Ausserdem findet sich im Anhang II eine Gegenüberstellung der umfangreichen Technologienliste mit den identifizierten Schlüsseltechnologien, die die Beziehungen zwischen diesen beiden Auswahlen aufzeigt.

4.4 Steckbriefe zu den Schlüsseltechnologien

Jeder der im Folgenden aufgeführten Steckbriefe beginnt mit einer kurzen Beschreibung der jeweiligen Schlüsseltechnologie. Als nächstes folgen die Chancen und Risiken, welche diese Technologie mit sich bringt oder von ihr erwartet werden. Anschliessend wurden die Treiber und Hindernisse, welche die Entwicklung und Diffusion steigern oder hemmen, ermittelt. Darauffolgend werden die Einflüsse auf den Verkehr aufgegriffen. Diese resultieren grösstenteils aus der Analyse der umfangreichen Liste an Technologien (*Tab. 5* und *Tab. 6*). Falls die Werte nicht direkt aus diesen Tabellen gelesen werden konnten, wurden die Einflüsse neu definiert. Alle Einflüsse (ob positiv oder negativ) wurden hier mit einem «X» versehen, um einen übersichtlichen Steckbrief fertigen zu können. Abschliessend wird der abgeschätzte zeitliche Verlauf der Entwicklung dieser Technologie dargestellt. Dieser bezieht sich nicht auf die Diffusion im Markt, sondern auf den rein technologischen Aspekt der Entwicklung der jeweiligen Technologie. Die Diagramme zeigen jeweils auf, ab wann eine Technologie reif und für einen Einsatz im Massenmarkt verfügbar ist. Die Resultate basieren auf Expertenwissen, welches im Rahmen des ersten Workshops und durch die Interviews abgeholt worden ist. Die Steckbriefe wurden zur Erhöhung der Lesbarkeit als Synthesen ausformuliert; sie basieren auf Grundlagen- und Übersichtsstudien (ASTRA 2011; 2016, Bundesrat 2016, EBP 2017a, IEA 2009; 2017, IET 2015, RappTrans 2017, SBB 2017, Zhankaziev 2017) sowie Expertenwissen der Forschungsstelle.

Automatisierte Strassenfahrzeuge



Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge kann für die Steuerung und Effizienz des Verkehrssystems interessante Perspektiven bieten. Die Entwicklung im Individualverkehr verläuft eher stufenweis/evolutionär: automatisierte Funktionen werden auf der Grundlage etablierter Fahrerassistenzsysteme sukzessive weiterentwickelt. Erste Anwendungen auf der Autobahn (z.B. Highway Pilot, Platooning) oder in Parksituationen werden später ausgeweitet. Für den ÖV werden automatisierte Strassenfahrzeuge, wie Sammeltaxis oder fahrplanunabhängige «Travel Pods», insb. auf den kurzen und mittleren Distanzen sowie in ländlichen Regionen eingesetzt werden. Die Grenzen zwischen öffentlichem und individuellem Verkehr werden sich verwischen. Die Automatisierung wird eine wichtige Rolle im Güterverkehr spielen.

Chancen

Automatisiertes Fahren bietet Lösungen für die heutigen Verkehrsprobleme. Potenziale liegen darin, den Verkehrsfluss effizienter und den Strassenverkehr sicherer zu machen und die vorhandenen Kapazitäten besser auszunutzen. Effizienzsteigerungen können auch durch die Optimierung des Besetzungsgrad der Fahrzeuge oder bündeln von Fahrten erzielt werden (ASTRA 2017a). Die Reisezeit ist besser nutzbar und kann für nicht-fahrbezogene Tätigkeiten benutzt werden (z.B. Office on Wheels). Automatisierte Strassenfahrzeuge gewähren z.B. Schulkinder oder Personen, die nicht (mehr) Auto fahren können, wie Senioren oder Behinderten, einen Mobilitätszugang. Auch vergrössert es die Zugänglichkeit (z.B. durch Sharing). Verschiedene mögliche Geschäftsmodelle mit automatisierten Fahrzeugen sind denkbar: Automatisiertes Privatauto, Robotaxi, Sammeltaxi/Shuttle, Automatisierter öV im Linienverkehr usw.

Risiken

Automatisiertes Fahren kann Risiken mit sich bringen: z.B. eine steigende Verkehrsnachfrage durch Leerfahrten oder ein neuer Lifestyle automobiler „Nomaden“. Diese erhöhte Nachfrage belastet Infrastruktur, Umwelt und Ressourcen. Weitere Risiken bestehen durch unerwünschte Modalshifts insb. in urbanen Gebieten. Risiken im Bereich Sicherheit sind Hackerangriffe und Systemabstürze. Regionale Disparitäten können zunehmen, wenn automatisierte Strassenfahrzeuge und die damit verbundenen MaaS-Angebote nur in den Zentren angeboten werden. Ebenfalls kann die Zersiedelung zunehmen, weil Wohnorte in bis anhin schlecht erschlossenen Gebieten attraktiver werden

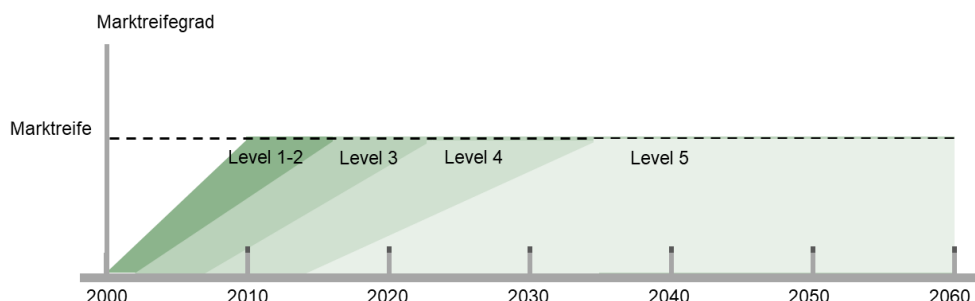
Treiber & Hindernisse

Neue Geschäftsmodelle (z.B. Sharing, Transportleistung im Güterverkehr) und schnellere Entwicklungen in gewissen Gebieten (z.B. Platooning, Autobahn, Sammeltaxi) beschleunigen die Diffusion des automatisierten Fahrens. Allerdings können Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen, ungenügende Datensicherheit (Security) oder fehlende (politische und gesellschaftliche) Akzeptanz der Technologie die Diffusion hemmen. Weitere Hindernisse: Akzeptanz von Automatisierung allgemein, Klärung der rechtlichen Fragen im Rahmen der technischen und der «wirtschaftlichen» Zulassung. Zudem gehören dem Bund und den Kantonen (und damit der Bevölkerung) die grössten Transportunternehmen in der Schweiz. Es stellt sich die Frage nach dem Schutz des Eigentums, respektive dem Schutz der konzessionierten Angebote vs. Zulassung von neuen Mobilitätsangeboten. Beim Schienengüterverkehr: Automatisierung erfordert Investitionen und Investoren.

Einflüsse auf den Verkehr

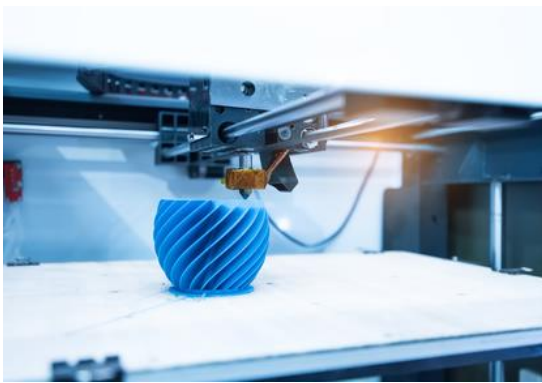
✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



(Marktreife bezieht sich auf technische Möglichkeiten; dies bedeutet nicht automatisch, dass Fahrzeuge überall entsprechend eingesetzt werden dürfen.)

3D-Druck / Additive Fertigungsmethoden



3D-Druck gehört zu den generativen Fertigungsverfahren und dient der Herstellung von dreidimensionalen Gegenständen. Dabei werden Werkstoffe schichtweise computergesteuert zu fertigen Teilen aufgebaut. Der Einsatz liegt heute hauptsächlich in der Produktion von Prototypen, da es eine hohe Flexibilität bezüglich der zu fertigenden Form besitzt. Es wird aber auch immer häufiger für die Serienproduktion verwendet.

Seit 2010 sind Modelle für den Heimgebrauch erhältlich.

Chancen

Aus Perspektive der Fertigung gibt es einige Vorteile gegenüber klassischen Herstellungsverfahren. Einerseits lässt sich – im Gegensatz zum Giessen – auf Gussformen verzichten; andererseits müssen die gefertigten Teile nicht nachbearbeitet werden – wie das bei material abtragenden Verfahren der Fall ist. Zudem lassen sich komplizierte Formen herstellen, die mit anderen Produktionsmethoden nicht möglich sind. Durch den 3D-Druck erhält man eine hohe Flexibilität bezüglich der zu produzierenden Form.

Die Chancen für den Verkehr liegen an der dadurch ermöglichten dezentralen Produktion von Gütern (am ehesten bei Kunststoffen). Es müssen nur noch die Rohstoffe transportiert werden, die fertigen Güter können vor Ort hergestellt werden. Dadurch vermindert sich der Bedarf nach Güterverkehr. Allein die Feinverteilung müsste dann noch durch klassischen Güterverkehr übernommen werden.

Risiken

Eine Dezentralisierung der Produktion dank 3D-Druck ist ein mögliches Szenario. Denkbar ist aber auch, dass sich ein Hersteller auf den Druck eines bestimmten Materials spezialisiert, hier Weltmarktführer wird und damit die ganze Welt beliefert.

Eine Gefahr liegt darin, dass möglicherweise Güter aufgrund des günstigeren Transports und der sinkenden Produktionskosten preiswerter werden und es dadurch einen Rebound Effekt gibt, der den Konsum und dadurch den Transport ankurbelt.

Treiber & Hindernisse

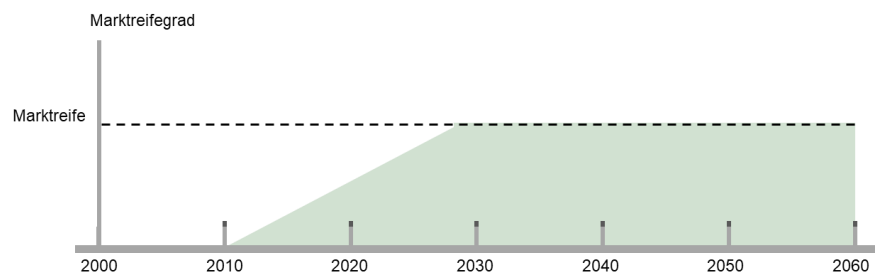
Erst sobald sich die beiden Faktoren (Produktionszeit & -kosten) vermindern lassen, kann es sich zu einer tragenden Produktionsmethode entwickeln. Treiber für diese Entwicklung können die Gebiete der Industrie (z.B. Luft-, Raumfahrt und Medizin) sein, in denen der 3D-Druck schon heute zur Serienfertigung verwendet wird. Die durch die Konsumentennahe Produktion agilere Lieferkette kann auch zu einem Anreiz führen, dass dieses Verfahren einem anderen vorgezogen wird. Die hohe Automatisierung der 3D-Drucker führt zudem zu einer Personalarmen Produktion, welche ebenfalls die Kosten eines Produktes senken könnte.

Der Hauptgrund, dass es sich noch um eine Nischenanwendung handelt, liegt darin, dass 3D-Druck ein zeitaufwändiges und kostenintensives Verfahren ist. Die Auswahl an Materialien, die für den 3D-Druck eingesetzt werden können, ist noch sehr klein. Die Grösse der zu produzierenden Materialien ist ebenfalls durch die Grösse des Druckers limitiert.

Einflüsse auf den Verkehr

✗	✗	✗			✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Automatisierte Luftfahrzeuge



Automatisierte Luftfahrzeuge bzw. Drohnen können als „Taxis der Lüfte“ Personen oder Güter von einem Ort an den anderen bringen. Die Lufttaxis haben Elektroantriebe; je besser die Akkus werden, desto längere Flüge sind möglich. Sie starten und landen senkrecht und können in der Luft schweben. Durch diese Voraussetzungen können sie in engem Raum eingesetzt werden. Vielen glauben, dass die Zukunft der Fortbewegung in der Luft liegt, insb. in den immer voller werdenden Städten. Immer mehr Firmen befassen sich mit fliegenden Fortbewegungsmitteln, wie e-volo (Volocopter), Ehang, Airbus, Amazon, DHL und Uber. Neu ist, dass die Geschäftsmodelle sich nicht mehr auf den Fernverkehr ausrichten, sondern auf den Nahverkehr in Agglomerationen und Städten

Chancen

Die zentrale Chance von automatisierten Luftfahrzeugen liegt in der Geschwindigkeit und der Nutzung der zusätzlichen Kapazitäten im Luftraum. Davon ausgehend, können u.U. weniger Unfälle und Staus resultieren. Automatisierte Luftfahrzeuge bedeuten eine Entlastung der Strasse und ermöglichen eine effizientere Logistik. Vorteile eines urbanen Mobilitätskonzepts, das auf automatisierte Luftfahrzeuge setzt, sind z.B. weniger Staus, weniger Unfälle, Einbindung von neuen Verkehrsteilnehmern, schnellere Paketauslieferung. Diese sog. „3D-Mobilität“ ermöglicht auch die attraktivere Gestaltung von Teilen der Städte, die dadurch (fast) von Verkehr entlastet sind.

Risiken

Bedenken gibt es bezüglich technischer Fragen, wie Lärmbelästigung oder Energiebedarf sowie Belastung des Luftraums. Auch könnte der Einsatz automatisierter Luftfahrzeuge eine Steigerung der Verkehrsnachfrage mit sich bringen.

Treiber & Hindernisse

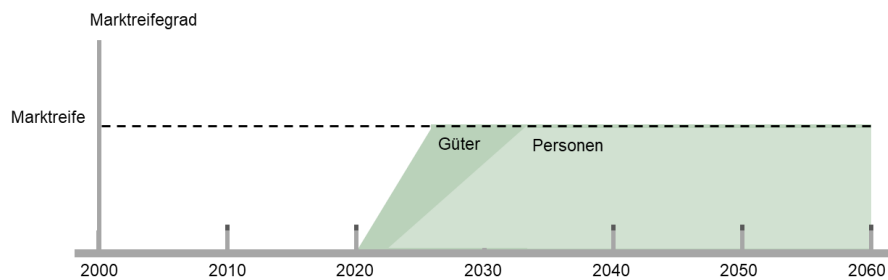
Neue Anwendungen & Geschäftsmodelle und die erwarteten Zeitgewinne mit automatisierten Luftfahrzeugen beschleunigen die Diffusion der Technologie. Periphere Standorte können (besser) erschlossen und zeitkritische Transporte schneller durchgeführt werden. Allerdings kann eine fehlende Akzeptanz (insb. wegen Lärmbelästigung) die Diffusion hemmen.

Insbesondere gesetzliche Grundlagen für die Benutzung des Luftraums, z.B. die Luft- und Landerechte müssen gegeben sein. Auch die Sicherheit muss gewährleistet sein, damit die Skepsis potentieller Nutzer gegenüber der Technologie sinkt. Weiter soll die Einbettung in das Gesamtverkehrssystem (z.B. Definition von Luftstrassen in Agglomerationen) erfolgen.

Einflüsse auf den Verkehr

✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Nachhaltige Antriebsenergie



Eine zukunftsfähige, möglichst CO₂-freie Mobilität erfordert nachhaltige Antriebsenergien. Erdöl- und Erdgasbasierte Kraftstoffe werden dabei bei kleineren Fahrzeugen (Motorräder, PKW, Lieferwagen) und geringen Tagesreichweiten (Stadtlogistik, Stadtbusse, Kehrmaschinen usw.) durch regenerativ erzeugte Elektrizität ersetzt. Bei grösseren Fahrzeugen und/oder hohen Tagesfahrleistungen gibt es sechs verschiedene Ansätze (grössere Batteriepakete; Nachladung über Schnell-Ladung; Nachladung über partielle Oberleitungen; [Beimischung von] biogene Energien; [Beimischung von] Power-to-X-Treibstoffen gasförmig oder flüssig; Wasserstoff-Brennstoffzellen).

Chancen

Die grössten Chancen von nachhaltigen Antriebsenergien sind die geringere Umweltbelastung und die Verringerung der Erdölabhängigkeit des Verkehrssektors. «Nachhaltig» bedeutet die möglichst geringe Gesamt-Umweltbelastung über den gesamten Lebenszyklus, inklusive fahrzeugseitigen Auswirkungen (z.B. Einfluss von schweren Batteriepaketen). Die Betrachtung ist zeitabhängig: Sollte in Zukunft erneuerbare Energie mit geringen Umweltauswirkungen tatsächlich in Überfluss vorhanden sein, würde die deutlich geringere Energie-Effizienz von Brennstoffzellen und Power-to-X-Energieträgern weniger ins Gewicht fallen als heute.

Risiken

Die Umweltvorteile der Elektromobilität sind am grössten, wenn Ökostrom eingesetzt wird. Recyclingsysteme für die Batterien müssen erst noch entwickelt werden. Ein weiteres Risiko ist die Kompensation der Einsparungen durch neue Ansprüche (Rebound-Effekte). Wasserstoff-Brennstoffzellen und Power-to-X-Energien gehen mit hohen Umwandlungsverlusten einher; deren Förderung kann bei begrenzter Verfügbarkeit von Ökostrom zu Carbon Leakage führen.

Treiber & Hindernisse

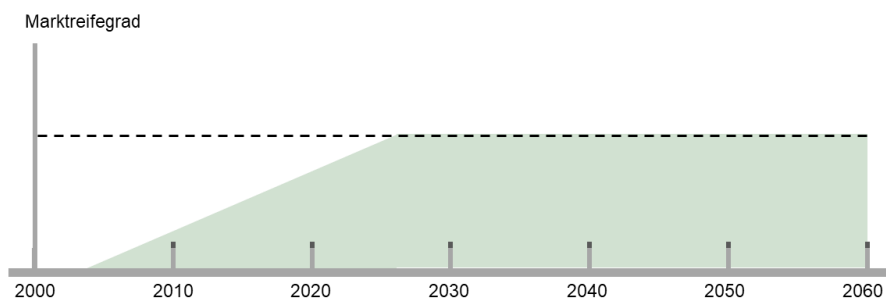
Wichtige Treiber sind die aktuelle Klimapolitik in einer Zeit der grossen Sorge um die Umwelt und die Umweltverträglichkeit (inkl. Lärm) alternativer Energiekonzepte, wie Elektromobilität. Hindernisse sind z.B. die Langsamkeit des politischen Systems vs. die benötigte Diffusions-Geschwindigkeit, die günstigen Preise fossiler Brennstoffen, die Gewährleistung der Sicherheit (insb. bei Wasserstoff-Anwendungen) und die Kosten (solange es noch externe Umweltkosten gibt, welche nicht internalisiert werden konnten).

Die Entwicklung von Konzepten zur nachhaltigen Antriebsenergie ist insb. von der EU-Politik, von neuen politischen Instrumenten (z.B. CO₂-Steuern), von Strategien der Automobilindustrie (Beibehaltung des Status Quo durch die etablierten Autohersteller als Hindernis für die Marktdurchdringung neuer Antriebe) und von der Verfügbarkeit von Ökostrom abhängig. Die Strategien der Autoindustrie sind u.a. auch von den gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie den Bedürfnissen der Konsumentinnen und Konsumenten abhängig. Die neuen Instrumente sind vom politischen Willen abhängig. Für viele neue Energiekonzepte ist eine neue Infrastruktur erforderlich (z.B. Oberleitungen, Tankstellen, Ladestationen). Auch bleibt die Weiterentwicklung von Batterietechnologien und Brennstoffzellentechnologien (insb. Speicher, Energie-Dichte, Energieeffizienzgrad) sowie Power-to-X weiterhin wichtig.

Einflüsse auf den Verkehr

	✗		✗		
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur



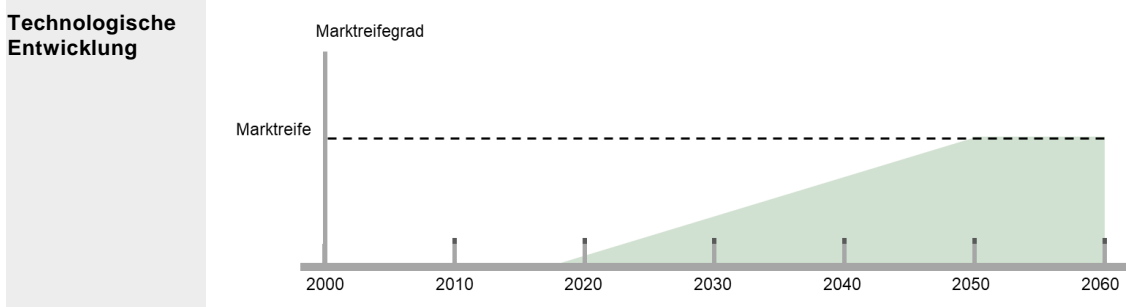
Die bestehende Infrastruktur ist am Limit. Experten erwarten, dass neue Verkehrssysteme und -infrastrukturen das heutige Verkehrssystem signifikant entlasten können. Beispiele sind (1) Hochgeschwindigkeitstransportsysteme (z.B. Swiss Metro neue Generation, Hyperloop), (2) Unterirdische Röhrensysteme (z.B. Cargo Sous Terrain) mit Entkopplung des Güterverkehrs von der klassischen Mobilität, (3) Mikromobilität, Zwischenformen für MIV und ÖV und (4) sog. „moving rooms“, Einheiten die für mehrere unterschiedliche Transportmodi eingesetzt werden können. Damit solche neuen Konzepte erfolgreich sind, braucht es reife Grundlagenkonzepte, die politisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich getragen werden.

Chancen Neue Verkehrssysteme und -infrastrukturen bieten mögliche Lösungen für die uns heute bekannten Verkehrsprobleme, wie Raumwirkung, Kapazitätsprobleme und Schadstoffbelastung. Unterirdische Lösungen schaffen oberirdisch mehr Raum. Durch Cargo Sous Terrain würden beispielsweise in der Schweiz LKWs aus urbanen und nicht-urbanen Gebieten verschwinden (wobei die potenzielle Verkehrswirkung von Cargo Sous Terrain begrenzt ist, wenn die Kapazität und die Transportgeschwindigkeit dieses Systems in Betracht gezogen wird). Auch sind mit neuen Verkehrssystemen grössere Einzugsgebiete, eine höhere Geschwindigkeit und eine höhere Zuverlässigkeit möglich.

Risiken Neue Verkehrssysteme brauchen in der Regel viel neue Infrastruktur. Neue Verkehrskonzepte können für eine zunehmende Mobilität sorgen oder Nebenfolgen haben, die wir jetzt noch nicht benennen können. Weitere Risiken sind vergrösserte Ballungsräume, mögliche Zersiedelung, Abwertung von nicht-angeschlossenen Gebieten oder Kannibalisierung der bestehenden Systeme (z.B. Schiene). Weiter bestehen im Zusammenhang mit sehr aufwändigen unter- bzw. oberirdischen Infrastrukturen relevante Kostenrisiken.

Treiber & Hindernisse Zentrale Treiber sind die Erhöhung von Infrastrukturkapazitäten, die steigende Verkehrsnachfrage sowie das Bedürfnis nach schneller Mobilität. Viele halten die notwendige Wende im Bereich Nachhaltigkeit für einen wichtigen Treiber dieser neuen Verkehrskonzepte. Sonstige Treiber sind z.B. die Wirtschaftlichkeit und begleitende Vorschriften (z.B. Verbot von LKWs in urbanen Gebieten). Die Vernetzung/Verzweigung mit bestehenden Verkehrsmitteln, logistische Anforderungen und die (hohen) Investitionskosten sind Hindernisse, die die Diffusion hemmen können. Weitere Hemmnisse: Einbettung in das Gesamtverkehrssystem, Abstimmung mit der bestehenden Verkehrsinfrastruktur und Schutz der bereits getätigten Infrastrukturinvestitionen. Schlussendlich ist wichtig, dass die neuen Verkehrssysteme eine bessere Umweltbilanz aufweisen als die bestehenden.

Einflüsse auf den Verkehr	✗	✗	✗	✗		✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität	



Virtual & Augmented Reality



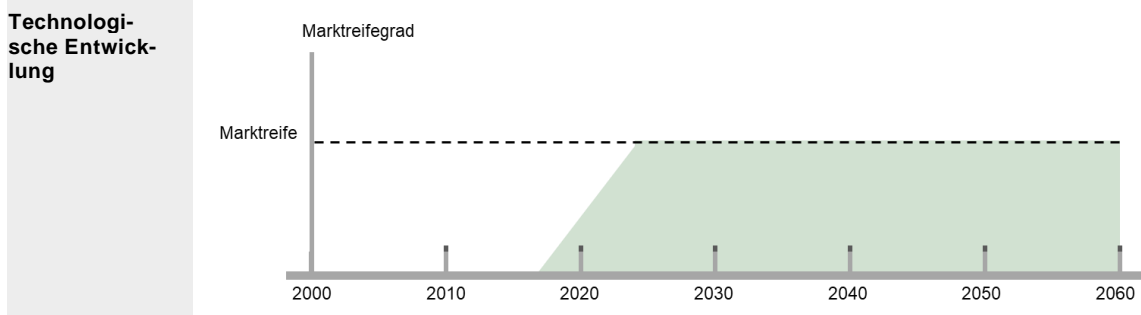
Als virtuelle Realität wird die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung bezeichnet. Unter erweiterter Realität (augmented reality – AR) versteht man computergestützte Erweiterungen der Realitätswahrnehmung. VR und AR wird bereits für die Forschung verschiedener Verkehrsthemen eingesetzt, z.B. in realitätsnahen Fahr simulatoren. Digital geschaffene Welten ermöglichen somit Reaktionen der Nutzer auf vorgeschlagene Fahrzeuge, Infrastruktur, Technologien, usw. bevor diese tatsächlich gebaut werden. Allerdings kann mit VR auch die Notwendigkeit um physisch zu reisen reduziert werden, indem Menschen in der virtuellen Realität auf Distanz zusammen agieren können.

Chancen Der Einsatz von VR kann zu einer Reduktion der Mobilitätsnachfrage führen (z.B. Berufs- und Freizeitmobilität). VR ermöglicht es den Nutzern, eine virtuelle 360° Welt zu erleben, diese von allen Seiten zu betrachten, sich in ihr zu bewegen und mit dieser zu interagieren. Dadurch würden z.B. physische Treffen überflüssig. In diesem Sinn könnte VR unser Arbeits- und Privatleben künftig signifikant verändern.

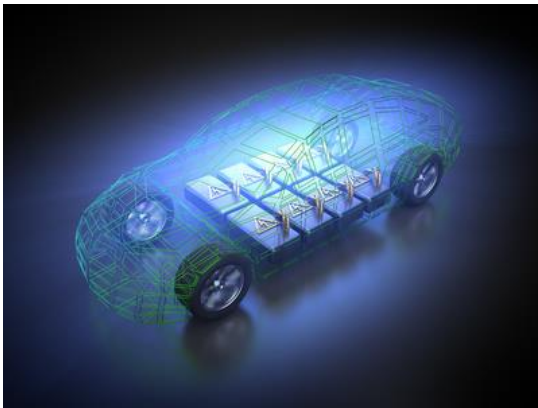
Risiken Risiken der Technologie sind z.B. soziale Isolation (siehe Diskussion über soziale Medien). Bei Anwendung in der Öffentlichkeit hat die Technologie ein Sicherheitsrisiko, da der Nutzer die reale Welt nicht mehr wahrnimmt. Weiter besteht das Risiko, dass VR-Anwendungen eine hohe Suchtgefahr bieten.
Die Anwendung von augmented reality in der Öffentlichkeit bringt Sicherheitsrisiken, da der Nutzer die reale von der virtuellen Welt möglicherweise nicht mehr unterscheiden kann (z.B. Projektionen auf Windschutzscheiben, Ablenkung durch augmented reality Features).

Treiber & Hindernisse Der VR-Trend passt zum Trend der Individualisierung (immer mehr 1-Mensch-Haushalte). Durch technologische Fortschritte werden Gestik und Mimik immer realitätsnäher, wodurch VR eine vollwertige Alternative für zwischenmenschlichen Kontakt sein kann. Gleichzeitig ist das Bedürfnis der Menschen nach zwischenmenschlichem Kontakt auch ein Hindernis für VR, weil VR nicht real genug wäre. Sonstige Hindernisse sind der hohe Preis und die Tendenz zur Reisekrankheit für die Nutzer.
Die Entwicklung von VR ist von der Diffusions-Geschwindigkeit der IKT-Entwicklungen generell abhängig, z.B. in Bezug auf die Rechenkraft, die grosse Datenmengen ohne Latenz und ohne Qualitätsverlust drahtlos von A nach B ermöglicht. Weitere Abhängigkeiten liegen in der Entwicklung von AR (siehe Fussnote) und Display- und Holographie-Technologien (nicht nur optisch, auch haptisch, alle Sinne ansprechend). Die Preise des Flugverkehrs werden den Einsatz von VR bei z.B. Sitzungen/Workshops in einem internationalen Rahmen beeinflussen.

✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität



Batterietechnologien



Batterien bilden den Grundstein vieler heutigen Anwendungen; vom Smartphone zum Computer bis hin zum Fahrzeug. Im Verkehr tauchen Batterien immer häufiger in Form von Elektroautos und E-Bikes auf. Die am weitesten verbreitete Batterieart ist die Lithium-Ionen-Batterie. Momentan macht der Anteil an Elektrofahrzeugen an der Gesamtflotte noch einen geringen Anteil aus; die Tendenzen sind jedoch auf ganzer Bandbreite steigend.

Batterien in Fahrzeugen werden gebraucht um den Elektromotor lokal emissionsfrei mit Strom zu versorgen.

Chancen

Die beiden Faktoren, die eine Batterie grundlegend für den Verkehr wettbewerbsfähig machen, sind die Energiedichte und der Preis. Wenn diese beiden Faktoren stimmen, dann lassen sich Fortbewegungsmittel produzieren, welche kaum Nachteile gegenüber des Antriebs eines Motors mit fossilen Treibstoffen besitzen. Die Chance liegt darin, dass die Batterie der Haupttreiber oder -hemmer der batteriebetriebenen Elektromobilität ist. Zudem hat eine Batterie eine hohe Effizienz bezüglich des geladenen und entladenen Stroms. Dies führt zu einer höheren Effizienz bezüglich gewonnener Energie als über fossile Energieträger. Weiter werden lokal keine Luftschadstoffe emittiert, was insbesondere im urbanen Raum ein zentrales Element für die Luftreinhaltepolitik darstellt.

Risiken

Die Herstellung der Batterien benötigt sehr viel Energie und seltene Rohstoffe. Weiter sollen geeignete Recyclingsysteme entwickelt werden, um die zahlreichen Batterien umweltfreundlich zu entsorgen. Es sind kurzfristige Engpässe bei den Rohstoffen aufgrund von Handelsblockaden oder Tarifstreitigkeiten denkbar sowie eine andauernde Verknappung und Verteuerung möglich, wenn die Kapazitäten nicht frühzeitig ausgebaut werden. Zudem müsste die Produktion der Batterien durch Strom erneuerbarer Basis geschehen, um die CO₂-Emissionen der Herstellung zu minimieren.

Treiber & Hindernisse

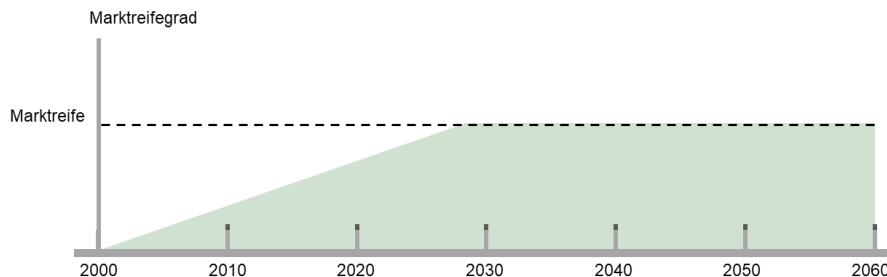
Luftverschmutzung in Städten und der weltweite Klimawandel sind die stärksten Treiber dieser Technologie, die in sich der Haupttreiber für die Elektromobilität ist. Weitere Treiber sind die Entwicklung der Stromnetze zu dezentralisierten Smart Grids, die Batterien als Zwischenspeicher, bei Stromüberschuss verwenden können. Bei der Produktion von Strom durch erneuerbare Energien ist oft die starke Volatilität ein Problem, Batterien könnten die Energie zwischenspeichern. Ein Mentalitätswandel in der Bevölkerung in Richtung Nachhaltigkeit, kann die Entwicklung der Batterietechnologien ebenfalls fördern.

Auf Elektrofahrzeuge bezogen ist die Reichweitenangst und zudem die Ladedauer ein grosses Hemmnis. Deshalb ist eine geeignete Batteriegrösse die realen Reichweiten zwischen 300 und 400 Km ermöglicht von massgeblicher Wichtigkeit, um das Vertrauen in die Elektromobilität zu steigern. Die CO₂-Intensität der Rohstoffgewinnung und Batterieproduktion sind ein weiteres Argument gegen Batterien. Die Marktmacht bestehender (fossiler) Energieträger hemmen den Fortschritt dieser Technologie ebenfalls.

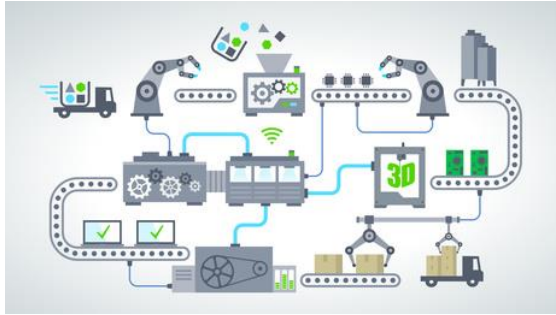
Einflüsse auf den Verkehr

✗	✗		✗		
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Robotik



Bei der Robotik geht es um die Herstellung von Robotern und Computersystemen. Diese Technologie wird verwendet als Ersatz für Menschen und versucht menschliches Handeln zu reproduzieren. Heute liegt ihr Einsatzgebiet in Produktionsprozessen.

Künftig kann man sich vorstellen, dass Roboter das Leben der Menschen auf verschiedensten Gebieten erleichtern werden. Auf den Verkehr bezogen lassen sich Anwendungen für den effizienten Umschlag von Gütern vorstellen. Ausserdem besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der Einsparung an Arbeitskräften, der Pendlerverkehr abnimmt.

Chancen

Im Verkehrsbereich bietet die Robotik primär Vorteile im Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen. Dank Robotik lassen sich auch die Umschlagsvorgänge automatisieren, sodass z.B. im Güterverkehr eine durchgängige automatisierte Lieferkette möglich ist. Güter und Dienstleistungen könnten dadurch ebenfalls preiswerter angeboten werden. Die für die Robotik entwickelten Sensoren, finden unzählige weitere Verwendungsmöglichkeiten. Weiter, für die Fortbewegung bewegungseingeschränkter Menschen (z.B. Exoskelette) werden Roboter in Zukunft an Wichtigkeit dazugewinnen.

In Gebieten, die für den Menschen nicht oder nur erschwert zugänglich sind (z.B. Krisengebiete, Gebiete mit extremer Hitze oder Kälte), können Roboter Aktivitäten ermöglichen oder wesentlich erleichtern.

Risiken

Falls die Entwicklung schnell voranschreitet, kann es dazu führen, dass eine grosse Anzahl an Arbeitsplätzen an die Roboter verloren gehen. Dies würde zu einer hohen Arbeitslosigkeit führen.

Falls die Kosten für Güter durch günstigeren Güterumschlag vermindert werden, kann das zu einem erhöhten Konsum führen. Dieser Rebound-Effekt würde bedeuten, dass mehr Güterverkehr erwartet werden kann.

Treiber & Hindernisse

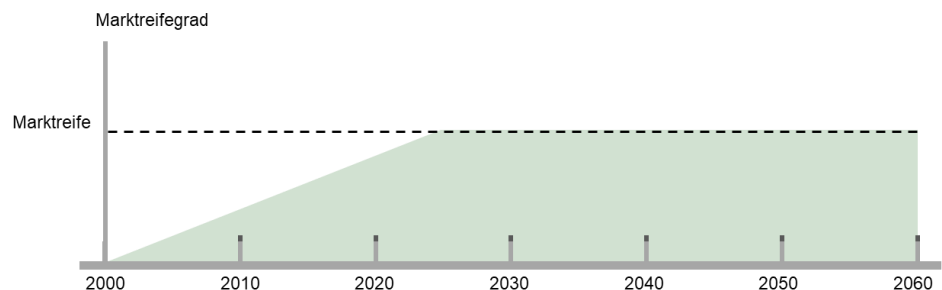
Zentrale Treiber sind der Wunsch nach Entlastung (z.B. im Haushalt, in der Pflege, auf der Arbeit) sowie Kosteneinsparungen bei der Produktion und der Erbringung von Dienstleistungen. Technische Fortschritte auf den verschiedenen technologischen Ebenen (z.B. künstliche Intelligenz, Sensorik) der Robotik treiben die Entwicklung voran. Weitere Treiber sind Sicherheitsbedürfnisse der Menschen, die sich nicht mehr in unwirtliche Gebiete/Situationen begeben möchten. Steigende Qualitätsanforderungen und erstrebte Kosteneinsparungen führen zu vermehrten Einsetzen von Robotern. Die steigenden Anforderungen an Standardisierung und Planbarkeit von Prozessen setzen den Einsatz der Robotik voraus.

Ob sich die stetige Verfremdung zur Natur irgendwann der gesellschaftlichen Akzeptanz entzieht bleibt offen. Falls es aber zu Massenentlassungen kommt, wird die Zustimmung der betroffenen Bevölkerungen stark sinken (Modernitätsverlierer). Falls sich die Menschen – wegen hochentwickelten Robotern – durch die Roboter bedroht fühlen, wird deren Entwicklung ebenfalls gehemmt.

Einflüsse auf den Verkehr

✗	✗	✗		✗	✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Vernetzung



Unter dem Begriff Vernetzung tauchen weitere Begriffe, wie zum Beispiel «Internet of Things» (IoT) und «Industrie 4.0» auf. Diesen und weiteren Begriffen/Trends/Technologien ist gemeinsam, dass es um die Interkonnektivität verschiedenster Alltagsgegenständen über Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) geht, die über Sensoren eine umfangreiche Informationsdichte (Big Data) kreieren.

Die Weiterverarbeitung dieser Datenmengen um schlüssige Informationen zu erhalten, lässt sich sehr gut auch für den Verkehr anwenden. Verkehrsengpässe können beispielsweise vorausgesehen werden und dadurch vermindert werden.

Chancen

Vorteile eines Systems an vollständigen in sich schlüssigen Echtzeit-Daten sind, dass durch eine sinnvolle Verarbeitung dieser Informationen optimierte Regulierungen und Entscheide getroffen werden können. Die Informationen im Echtzeit können genutzt werden können, um ein besseres Mobilitätsverhalten vorzuschlagen und die bestehenden Gewohnheiten zu ändern. Weitere Beispiele sind die Unterstützung des Menschen in vielerlei Situationen; ein Kühlschrank, der versteht wann ein Produkt fehlt und dieses selbständig ersetzt. Bei der Vernetzung von Fahrzeugen, kann es zu einer Verminderung der Unfälle kommen. Ausserdem wäre das ein wichtiger Treiber für das (vernetzte) automatisierte Fahren.

Risiken

Ein Risiko der steigenden Vernetzung ist der Missbrauch von Daten. Bei einem erhöhten Informationsaustausch muss gewährleistet sein, dass nur solche Informationen weitergegeben werden, welche ein Nutzer auch bereit ist zu teilen. Um die Daten zu schützen, braucht es eine entsprechende Gesetzgebung sowie technische Vorkehrungen zum Schutz der Daten. Cybersecurity ist ein weiteres wichtiges Thema bezüglich Datenschutz, welches gewährleistet, dass die Informationen der Nutzer vor Hackerangriffen geschützt sind. Ein weiteres Risiko ist eine Verkehrssteigerung, falls z.B. das nachbestellen fehlender Güter in Lagern und Kühlschränken nicht optimiert erfolgt, sondern einzeln zugestellt wird (nur um alles immer so schnell wie möglich zu erhalten).

Treiber & Hindernisse

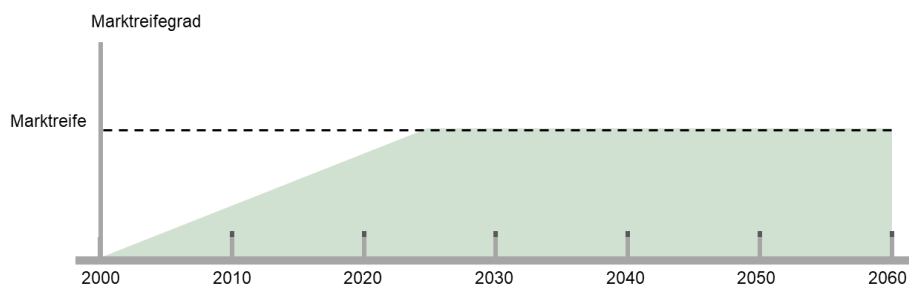
Treiber für eine erhöhte Vernetzung sind Kapazitätsengpässe der Infrastruktur, die durch ein smartes umlenken gewisser Verkehrsströme minimiert werden könnte.

Hindernisse sind, dass beispielsweise für das Umlenken von Verkehrsströmen systemische Entscheide nötig sind, welchen sich möglicherweise nicht alle Teilnehmer des Verkehrs unterwerfen möchten. Ein vollumfänglich vernetztes Verkehrssystem würde grosse Investitionskosten mit sich bringen, die ebenfalls die Diffusion hemmen können.

Einflüsse auf den Verkehr

✗		✗			✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Künstliche Intelligenz



Unter dem Begriff Künstliche Intelligenz wird die Fähigkeit künstlicher Agenten (Maschinen, Computerprogramme) verstanden, ihre Umgebung wahrzunehmen und adäquate Massnahmen zu treffen, um irgendwie definierte Ziele möglichst zu erreichen. Künstliche Intelligenz fusst auf einer Reihe von Unterthemen wie z.B. Computer Vision und Machine Learning sowie Big Data und Crowdsourcing (z.B. für die Generierung sogenannter Trainings-Datensätze). Sie tritt bereits heute zum Beispiel in sogenannten Chatbots, in Anwendungsbereichen im Verkehr (z.B. Erkennung von Verkehrszeichen) und im automatisierten Fahren in Erscheinung. In Zukunft die künstliche Intelligenz für die intelligente Verkehrssteuerung im «Verkehrsmanagement 4.0» eingesetzt.

Chancen

Durch ihre Flexibilität und Adaptabilität bietet künstliche Intelligenz die Chance, gegenüber klassischen Ansätzen der Automatisierung weitere Gebiete automatisch zu steuern – insbesondere solche, die heute eher mit menschlicher Intelligenz als mit einfachen technischen Regelwerken assoziiert werden. Künstliche Intelligenz hat daher insbesondere Potenzial, menschliche Arbeitskraft teilweise zu ersetzen (mit entsprechenden Implikationen für die berufliche Mobilität) und die Steuerung von z.B. Produktions- und Verteilprozessen (Logistik und Verkehr) zu optimieren. Die künstliche Intelligenz kann auch einzelne Aufgaben zur Entlastung übernehmen und diese Aufgaben verbessern. Indirekte Effekte können auch zu zusätzlicher Beschäftigung führen (z.B. in der Forschung und Entwicklung).

Risiken

Falls sich das Automatisierungspotenzial in vorhergesagtem Umfang realisieren lässt, kommen grosse gesellschaftliche Herausforderungen auf uns zu: Was geschieht mit dem nicht mehr in der Wirtschaft gebundenen Teil der menschlichen Arbeitskraft? Wie lässt sich die ökonomische Verteilungsfrage lösen (vgl. die Diskussion um die «Robotersteuer»)? Auf einer übergeordneten Ebene warnen manche Fachleute vor der (technologischen) Singularität. Diese bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem sich «Maschinen» mit künstlicher Intelligenz sich derart schnell selbst verbessern können, dass nach diesem Zeitpunkt die Zukunft der Menschen nicht mehr vorhersagbar ist. Es ist jedoch umstritten, ob diese Szenarien tatsächlich eintreten werden.

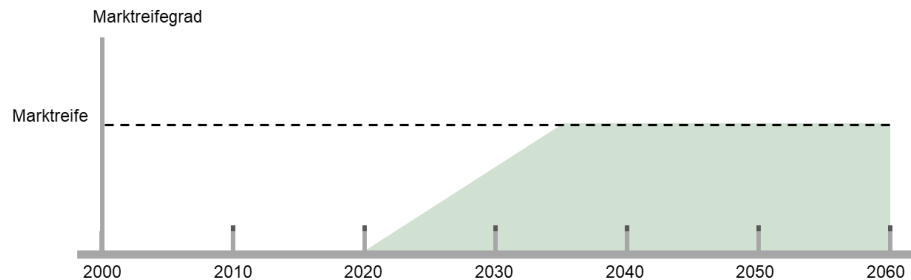
Treiber & Hindernisse

Treiber für künstliche Intelligenz können sein: hohe komparative Kosten des Produktionsfaktors Arbeit für einfache Tätigkeiten (z.B. Erteilen von Auskünften); zunehmende Menge und/oder Komplexität von Eingangsgrössen (z.B. Daten) und Zielgrössen (z.B.: effiziente Verkehrssteuerung, Koordination von Dienstleistungsnachfrage und -angebot), die die menschliche Kapazität übersteigen; abnehmende Kosten und zunehmende Miniaturisierung von Hardware-Komponenten; bessere Verfügbarkeit von Trainingsdaten dank Big Data und Crowdsourcing; GPU-Computing und Cloud-Computing. Hindernisse für die künstliche Intelligenz können darstellen: Bedenken bezüglich ethischer Implikationen von mittels künstlicher Intelligenz automatisierten Entscheidungen (z.B. Algorithmic Accountability, KI als Black Box); Ablehnung des breiten Einsatzes von auf künstlicher Intelligenz basierenden Systemen (z.B.: Chatbots statt Auskunftspersonal); unvorhergesehener Trendabbruch bei notwendigen Voraussetzungen (z.B. Computing-Performance, Verfügbarkeit von Trainingsdaten).

Einflüsse auf den Verkehr

✗	✗	✗			✗
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Revolutionäre User Devices



Unter dem Begriff «revolutionäre User Devices» verstehen wir die nächste Generation der «mobile / smart devices», die sich heute im Wesentlichen als Smartphones und Tablets manifestieren. Es sind explizit nicht kontinuierliche Weiterentwicklungen dieser Endgeräte gemeint, also nicht etwa faltbare Displays, Miniaturisierung, neue Energiequellen, neue Sensoren oder Integration von AR/VR, Eye-Tracking und Hologrammtechnologie. Revolutionäre User Devices sind vielmehr eine neue Geräteklasse. Ein möglicher Pfad hin zu solchen Devices könnten die Konzepte der Bioelektronik (kybernetische Organismen, d.h. teilweise Verschmelzung von Mensch und Maschine) sein.

Chancen und Risiken

Dank revolutionären User Devices verfügt jeder Mensch jederzeit über vollständige, perfekte Information. Es gibt keine Unbekannten mehr, die durch fehlenden instantanen Zugriff auf Information entstehen (beispielsweise, weil das Smartphone keine Batterie hat oder nicht im Blickfeld ist), sondern nur noch «wahre Unbekannte», d.h. Sachverhalte über die es noch nirgends Informationen gibt.

Diese neuen User Devices ermöglichen ungekanntes «Informiert-Sein» und dadurch Optimierungen des täglichen Lebens wobei beispielsweise die Interaktionen mit Mobilitätsplattformen viel organischer ausfallen. Die Grenze zwischen Device und Mensch löst sich auf. Beispielsweise wird «User Experience» unbedeutend, da der User untrennbar mit dem Device verknüpft ist und dieses nicht mehr als etwas Externes wahrnimmt. Andererseits könnten solche Devices und ihre Position im menschlichen Bewusstsein das menschliche Handeln zu technokratisch machen: vollständig optimiertes Verhalten, ohne glücklich zu sein. Dies überträgt sich natürlich ebenfalls auf verkehrliche Anliegen des Individuums. Basierend auf geographischer Position, Gefühlslage und Stauvorkommen werden die Menschen optimal ans Ziel geführt.

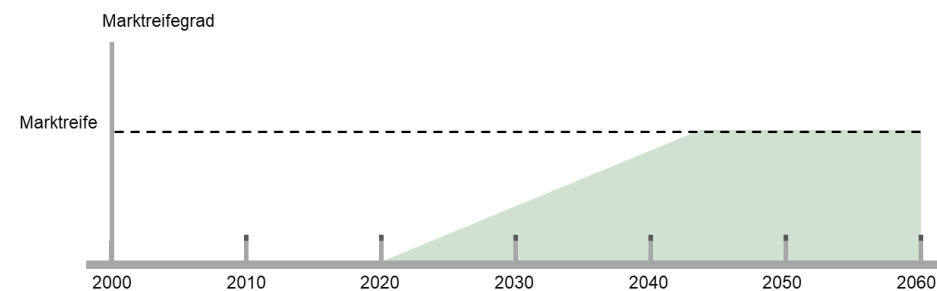
Treiber & Hindernisse

Treiber sind neben Marktkräften (kommerzielle, angewandte Forschung von bestehenden und künftigen Technologieunternehmen) menschliche Neugier und Erfindergeist. Als Treiber für Bioelektronik spielt die Verbesserung der Gesundheit und der Lebensqualität für Menschen mit einer Behinderung eine wichtige Rolle. Hindernisse auf dem Weg zu revolutionären User Devices sind hauptsächlich ethisch-philosophische Bedenken und offene Fragen zur Sicherheit, initial allenfalls auch die Kosten.

Einflüsse auf den Verkehr

		✗		✗	
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



Blockchain



Die Blockchain ist ein Protokoll zur Sicherung der Integrität von Daten – bei Kryptowährungen z.B. Transaktionen zwischen Nutzern - in einer Abfolge von fälschungssicheren Datenblöcken. Die Fälschungssicherheit der Daten wird durch den Einsatz kryptographischer Verfahren und durch die verteilte Speicherung der Blockchain auf Hunderten von Computern in einem Peer-to-Peer-Netzwerk sichergestellt.

Der historisch gesehen wichtigste Einsatz der Blockchain betrifft die Verwaltung von digitalisierbaren Werten und Rechten. Dank der Möglichkeit, sog. «Smart Contracts», d.h. Verträge zwischen den Teilnehmern von Business-Prozessen, auf der Blockchain aufzusetzen und ausführen zu lassen, erweitert sich der mögliche Einsatz der Blockchain enorm.

Chancen

Blockchain-Anwendungen sind überall dort erfolgsversprechend, wo Prozesse zwischen verschiedenen, finanziell eigenständigen Akteuren heute zentrale Vermittler erfordern, da die Akteure untereinander nicht das Vertrauen bzw. die technologischen Möglichkeiten haben, Geschäftsprozesse samt den zugehörigen Zahlungsströmen ohne Intermediär abzuwickeln.

Beispiele für die Anwendung der Blockchain-Technologie im Bereich Verkehr sind:

- Fälschungssichere Tickets für Anbieter-übergreifende Verkehrsketten (z.B. bestehend aus Taxi, Bahn und Flugzeug) mit der Möglichkeit, z.B. bei Verspätungen Reservationen automatisch zu aktualisieren («mobility as a service»).
- Automatische Abrechnung von vertraglich vereinbarten Entschädigungszahlungen bei Verspätungen, dem Ausfall von Transportdienstleistungen, bei Anschlussbrüchen etc.
- Automatisierte Vermarktung von selbstfahrenden Fahrzeugen für Transportdienstleistungen.
- Setzen von finanzielle Anreizen (z.B. günstigere Tarife in Echtzeit je nach Verkehrsnachfrage)
- Potenziale im Bereich Peer-to-Peer Sharing

Risiken

Risiken bestehen insbesondere für Firmen, die heute primär Vermittler von Dienstleistungen sind, ohne wesentlich zur Dienstleistungserbringung beizutragen. So könnte z.B. mit heutiger IT-Technologie der grösste Teil der Dienstleistung der Firma UBER bereits abgedeckt werden. Der Einsatz der Blockchain fördert diese Möglichkeit weiter, indem z.B. Zahlungen automatisch ausgelöst (in normalen Währungen oder Kryptowährungen) und verschiedene Nachteile zentraler IT-Systeme entfallen (z.B. geringere Wahrscheinlichkeit für Systemausfall, fälschungssichere Ratings für Fahrer und Nutzer). Ein weiteres Risiko ist vom hohen Energieverbrauch für das Mining der Kryptowährungen dargestellt.

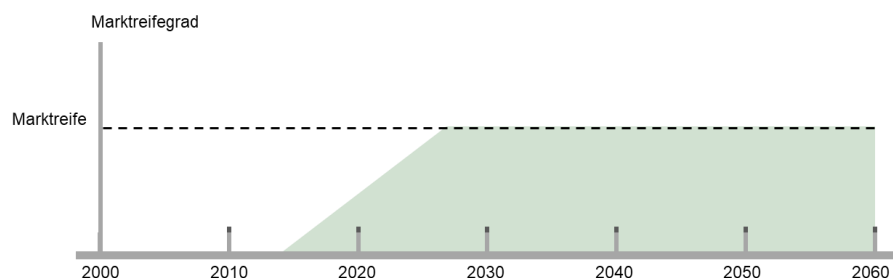
Treiber & Hindernisse

Derzeit besteht ein grosser Hype um Blockchain-Anwendungen, der an die Pionierzeit des Internets erinnert. Welche Anwendungen sich durchsetzen werden ist heute erst in Ansätzen absehbar. Wichtige Treiber für Blockchain-Anwendungen sind die zunehmende Digitalisierung und neue Datenströme (z.B. Austausch von Fahrzeugdaten im Sinne des «Internet of Things»), der zunehmende Einsatz von Kryptowährungen. Hindernisse bestehen derzeit vor allem bei der beschränkten Zahl von Transaktionen pro Blockchain.

Einflüsse auf den Verkehr

	✗	✗			
Reisezeit	Kosten	Sicherheit und Komfort	Umweltbelastungen	Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer	Verkehrskapazität

Technologische Entwicklung



5 Diffusion der Schlüsseltechnologien

5.1 Trägheit des Verkehrssystems

Nach Identifikation der künftigen Schlüsseltechnologien gilt es nun, deren künftige Entwicklung und Implikationen auf den Verkehr zu eruieren. Dazu wird im Folgenden die «Trägheit» der Flottenumwälzung von Verkehrsmitteln analysiert: Aufgrund von Überlebensraten, Lebensdauern und Abschätzungen zur Diffusionsgeschwindigkeit neuer Technologien lässt sich abschätzen, wie lange es dauert, bis eine technologische Neuerung sich in der Gesamtflotte durchsetzt (z.B. dass 50%, 90% oder 95% aller Fahrzeuge über die neue Technologie verfügen).

Strassenfahrzeuge sind von kürzeren Lebensdauern geprägt und werden deswegen meist nicht nachgerüstet. Bei automatisierten und hochautomatisierten Fahrzeugen stellt sich die Frage, ab wann die meisten Fahrzeuge (hoch)automatisiert sein werden (damit systemische Effekte bei Sicherheit, Verflüssigung und Verkehrsmanagement zum Tragen kommen können). Wie lange könnte der «Mischverkehr» zwischen nicht-automatisierten und (hoch)automatisierten (bzw. vernetzten) Fahrzeugen dauern (ausser, wenn regulatorisch eingegriffen würde)? Wie würde diese manchmal als «Übergangsphase» bezeichnete Periode von der Fahrzeugflottenzusammensetzung her aussehen? – Die übrigen Verkehrsträger und die Infrastruktur weisen längere Lebensdauern auf und können typischerweise teilweise nachgerüstet werden, so dass sich die Frage des «Mischverkehrs» nicht so akzentuiert stellt.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut:

- Bei den Strassenfahrzeugen setzen wir eine detaillierte, kohortenbasierte Bestandesmodellierung ein und kombinieren diese mit einer Modellierung zur Technologiediffusion (Kap. 5.1.1).
- Zu den übrigen Verkehrsträgern und der Infrastruktur kommen Abschätzungen zur Dauer der Flottenumwälzung zum Einsatz (Kap. 5.1.2 und 5.1.3).
- Insgesamt lässt sich so ein Bild der «Trägheit» des Fahrzeugbestands je Verkehrsträger zeichnen (Kap. 5.1.4).
- Die Abhängigkeiten zwischen den Schlüsseltechnologien werden auf Basis einer Trend-Impact-Analyse aufgearbeitet (Kap. 5.2).
- Dieses Kapitel schliesst mit einer Zusammenfassung der gegenseitigen Abhängigkeiten, der Abfolge und den Marktdurchdringungszeiträumen für die zwölf Schlüsseltechnologien (Kap. 5.3).

5.1.1 Strassenfahrzeuge

Die Geschwindigkeit der Umwälzung des Bestandes von Strassenfahrzeugen wurde mittels eines Kohortenmodells untersucht. Für das Kohortenmodell wurden Modellrechnungen, basierend auf empirischen Daten zur Flottenzusammensetzung, implementiert. Dadurch kann aufgezeigt werden, mit was für einer Verzögerung Trends (z.B. neue Technologien) bei neuen Fahrzeugen sich in der statistischen (bestandsgewichteten) Flotte manifestieren. Zudem kann über Marktanteilsverläufe auf die Flotte geschlossen werden. Für das Kohortenmodell zu Strassenfahrzeugen wurden anhand von BFS-Daten zuerst Überlebensraten von verschiedenen Fahrzeugkategorien bestimmt, die dann anschliessend zusammen mit historischen und prognostizierten Neuzulassungen von 1975 bis 2060 die Modellierung der Schweizer Flottenzusammensetzung ermöglichten. Die Überlebensraten wurden aus den Daten zum Fahrzeugflottenbestand über die Jahre 2012 bis 2017 gewonnen. Dabei wurde für jedes dieser Jahre die Flottenzusammensetzung und das Alter der einzelnen Fahrzeuge ermittelt. Die Unterteilung der Strassenfahrzeuge betrachtet folgende Verkehrsmittel:

- Personenwagen (PKW)
- Motorräder
- Busse
- Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)
- Lastkraftwagen (LKW)

Einfluss von Retrofitting und Nachrüstung:

Die ermittelten Überlebensraten sind in Abb. 15 abgebildet. Die beruhen auf historischen Daten, ihre Anwendung in der Zukunftsforschung impliziert die Annahme gleicher Gesetzmässigkeiten. Natürlich können neuartige, überlegene Technologien, stark erhöhte Preise für Ressourcen und regulatorische Eingriffe die Überlebensraten in Zukunft beeinflussen. Die Kurven beschreiben für den jeweiligen Fahrzeugtyp, wie gross die Überlebenschancen der Fahrzeuge mit dem auf der x-Achse gekennzeichneten Alter ist.

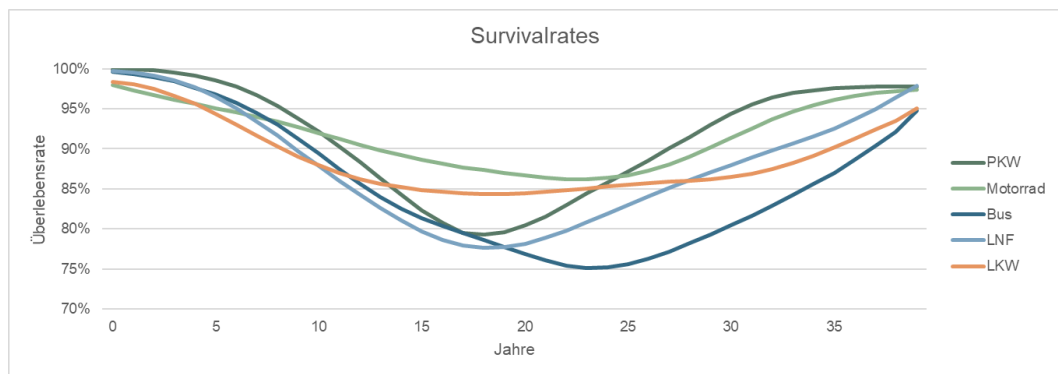


Abb. 15 Überlebensraten der fünf gewählten Fahrzeugtypen (Quelle: eigenes Kohortenmodell – EBP)

Um zu definieren, wie gross der Anteil eines gewissen Fahrzeugtyps zu einem definierten Zeitpunkt ist, wird die Überlebensrate (Abb. 15) über die Zeit kumuliert. In Abb. 16 ist dieser Vorgang graphisch dargestellt. Aus dieser Kurve lässt sich das durchschnittliche Alter ablesen. Dieses liegt an dem Punkt, an dem die jeweilige Kurve die 50%-Marke schneidet. Abbildung 16 bildet für jeden Strassenfahrzeugtyp einzeln das durchschnittliche Alter ab.

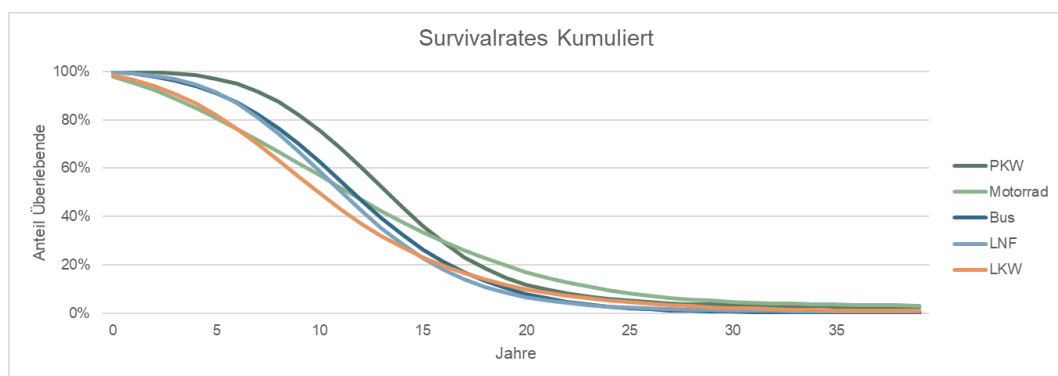


Abb. 16: Kumulierte Überlebensraten der fünf gewählten Fahrzeugtypen (Quelle: eigenes Kohortenmodell – EBP)

Die berechneten Überlebensdauern, bis 50%, 90% bzw. 95% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt sein werden (bezogen auf den Bestand, nicht auf die Fahrleistung), liegen für die verschiedenen Fahrzeugkategorien bei (Anfangsbestand bezeichnet hier die Menge aller Neuzulassungen innerhalb eines gegebenen Kalenderjahres):

- PKW: 14 Jahre, bis 50% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt;
21 Jahre, " 90% " " " " " "
26 Jahre, " 95% " " " " " "
- Motorrad: 12 Jahre, bis 50% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt;
24 Jahre, " 90% " " " " " "
30 Jahre, " 95% " " " " " "
- Busse: 11 Jahre, bis 50% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt;
19 Jahre, " 90% " " " " " "
22 Jahre, " 95% " " " " " "
- LNF: 14 Jahre, bis 50% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt;
19 Jahre, " 90% " " " " " "
22 Jahre, " 95% " " " " " "
- LKW: 9 Jahre, bis 50% des Anfangsbestands ausser Verkehr gesetzt;
20 Jahre, " 90% " " " " " "
25 Jahre, " 95% " " " " " "

Diese Überlebensdauern (Abb. 16) sind ein erstes Mass für die Trägheit der verschiedenen Technologien. Sie alleine genügen aber noch nicht, um die gesamte Trägheit bei der Durchdringung eines Fahrzeugbestandes mit einer neuen Technologie zu erfassen. Dazu wird im nächsten Schritt auch die Geschwindigkeit der Technologiediffusion betrachtet.

Technologien sind nicht einfach plötzlich da und dominieren den Markt vollständig, sondern werden schrittweise durch die Käuferschaft akzeptiert. Das Angebot benötigt zudem eine gewisse Zeit, bis die Marktreife gänzlich erreicht ist. Zur Beschreibung der Diffusion einer Technologie im Markt wird hier die Diffusionstheorie nach Rogers (1995) verwendet. Diese beschreibt, wie Konsumentinnen und Konsumenten normalerweise auf neue Technologien reagieren. Anfangs wird eine Technologie skeptisch betrachtet, und nur wenige innovative Personen probieren das neue Produkt. Sind deren Erfahrungen positiv, führt das dazu, dass immer mehr Menschen sich für das neue Produkt entscheiden. Die Diffusionstheorie geht von fünf verschiedenen Typen von Innovations-Adoptionsgruppen aus (Abb. 17). Eine Erweiterung dieser Theorie (Moore, 2014) führt die «Kluft» ein, wo das Marktanteilwachstum sich nicht mehr fortsetzt, sondern eher konstant bleibt.

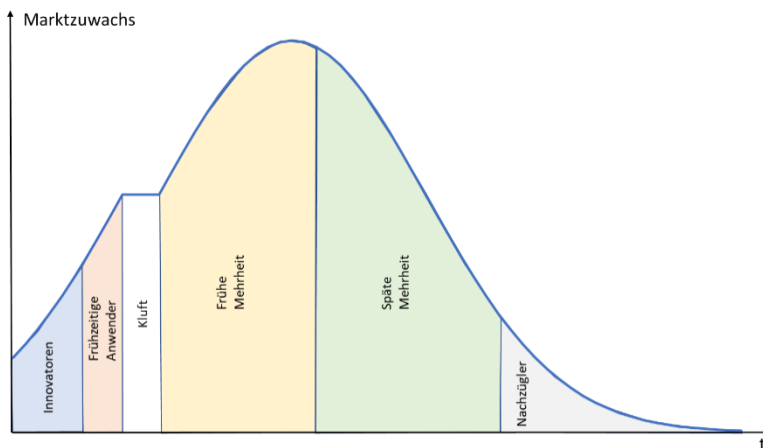
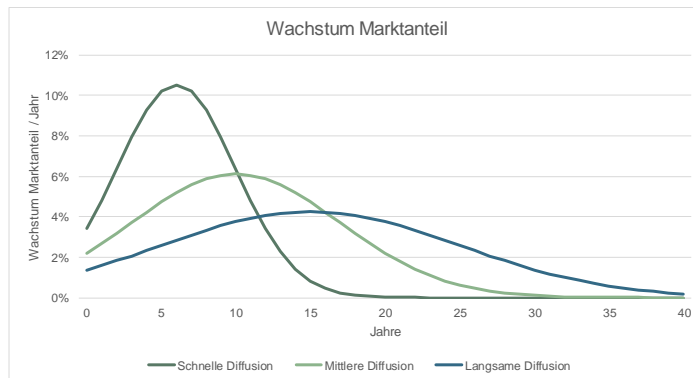


Abb. 17. Die Diffusionstheorie nach Rogers (1995) zeigt den zeitlichen Verlauf des Marktanteilswachstums einer neuen Technologie nach den fünf Adoptionsgruppen (eigene Darstellung)

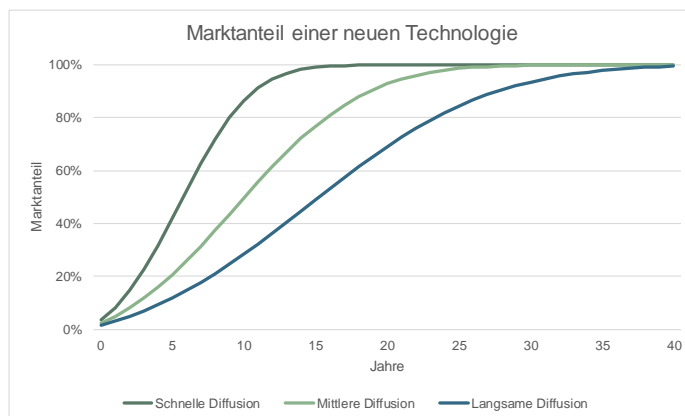
Um den Effekt der Innovationsdiffusion auf die «Trägheit» von Verkehrssystem zu demonstrieren, parametrisieren wir Rogers' Diffusionstheorie. Zur Illustration wurden drei verschiedene Diffusionstypen (schnell, mittel, langsam) gewählt (Tab. 10 und Abb. 18).

Tab. 10: Annahmen für gewählte Diffusionsgeschwindigkeiten

	Maximum der Wachstumsrate [in Jahren ab Markteintritt]	Marktanteil im Endzustand	Varianz des Maximums [in Jahren]
Schnelle Diffusion	6	100%	4
Mittlere Diffusion	10	100%	8
Langsame Diffusion	15	100%	17

**Abb. 18.** Die drei gewählten Diffusionsgeschwindigkeiten.

Aus diesen Kurven des Wachstums der Marktpenetration, kann auf den gesamten Marktanteil einer neuen Technologie geschlossen werden. Dieser ist in *Abb. 19* dargestellt. Bei allen Diffusionsgeschwindigkeiten wird schliesslich der gleiche endgültige Marktanteil (hier angenommen: 100%) erreicht.

**Abb. 19.** Zeitlicher Verlauf der Marktanteile einer neuen Technologie in Abhängigkeit der gewählten Diffusionsgeschwindigkeit im Markt (Quelle: eigenes Kohortenmodell EBP)

Kombiniert man nun diese «Trägheit des Marktes» mit der «Trägheit der Flotte», erhält man ein umfassendes Bild darüber, wie lange es dauert, bis eine Technologie sich effektiv im Flottenbestand manifestiert. In *Abb. 20* ist anhand der betrachteten Fahrzeugtypen über die Zeit aufgezeigt, wie sich eine neue Technologie – die nicht instantan den ganzen Markt erobert – auf die Flotte auswirken kann. Ebenfalls aufgezeigt wird die «Schlagartige Markteinführung»: Eine Veränderung dieser Art ist beispielsweise die Einführung einer Norm, welche alle neuen Fahrzeuge ab einem Sticht datum einhalten müssen. Dies entspricht der schnellstmöglichen Markteinführung und führt zur Mindestdauer, bis eine neue Technologie sich in einem Fahrzeugbestand vollständig durchsetzen kann. Einzig Gesetze mit Zwangsausschlussverordnungen oder verpflichtenden Nachrüstungen von Bestandsfahrzeugen könnten zu einer noch schnelleren Verbreitung einer Technologie führen.

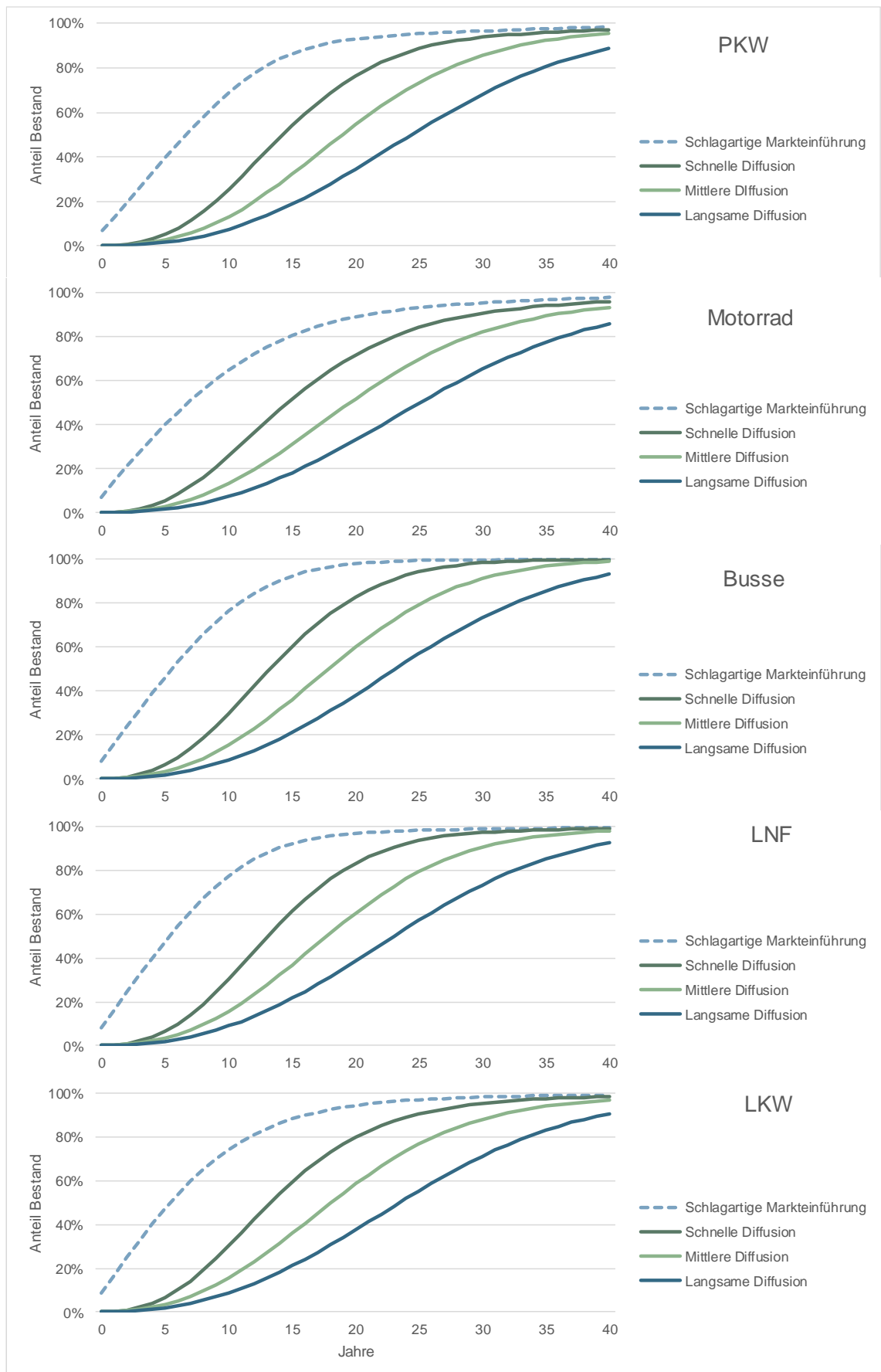


Abb. 20. Veränderung des Bestandsanteils der neuen Technologie, abhängig von der Diffusionsgeschwindigkeit.

Tab. 11: Wann entspricht die Flotte zu 50%, 90% oder 95% der neuen Technologie?

[Jahre]		Schlagartige Markteinführung	schnelle Diffusion	mittlere Diffusion	langsame Diffusion
PKW	- 50%	7	15	19	25
	- 90%	17	26	33	41
	- 95%	24	33	39	47
Motorrad	- 50%	7	15	20	26
	- 90%	21	30	36	44
	- 95%	30	38	44	51
Bus	- 50%	6	14	18	24
	- 90%	14	23	30	38
	- 95%	17	26	34	43
LNF	- 50%	6	14	18	24
	- 90%	14	23	30	38
	- 95%	18	27	34	43
LKW	- 50%	6	14	19	24
	- 90%	16	25	32	40
	- 95%	21	30	37	45

Abschliessend kann gesagt werden, dass die Effekte der Marktdiffusion dazu führen, dass neue Fahrzeugtechnologien zwischen 25 und 40 Jahren benötigen, bis sie 90% einer Flotte ausmachen. Dies sind relevante Trägheiten, welche aufzeigen, dass Technologien für das Jahr 2060 bereits heute entwickelt werden. Und die Periode des «Mischverkehrs» zwischen nicht-automatisierten Fahrzeugen sowie (hoch)automatisierten (und vernetzten) Fahrzeugen dürfte mehrere Dekaden andauern. Diese Aussagen basieren auf Gesetzmässigkeiten (Überlebensraten und Diffusionsgeschwindigkeiten) aus der Vergangenheit. Stark überlegene Technologien, stark gestiegene Preise für Energie und/oder Ressourcen sowie regulatorische Eingriffe könnten bewirken, dass die hier verwendeten Überlebensraten sich in Zukunft anders darstellen.

5.1.2 Übrige Verkehrsträger

Für die weiteren Verkehrsträger wurde keine detaillierte kohortenbasierte Flottenmodellierung durchgeführt. Dies insbesondere, weil diese Segmente höhere Lebensdauern haben, und sich deshalb auch die Nachrüstung wirtschaftlich lohnen kann. Bei der Nachrüstung können technische Eckpunkte zwar nicht mehr wesentlich geändert werden, aber die Betriebs- und Leittechnik, die Kommunikationssysteme, viele für den Passagierkomfort wichtige Faktoren, teilweise die Energieeffizienz und in Einzelfällen sogar der Energieträger an sich können geändert werden. Anhand der nachstehend dokumentierten Daten werden allgemeine Aussagen zur Trägheit dieser weiteren Teile des Verkehrssystems formuliert.

Rollmaterial. Beim Rollmaterial ist eine umfangreiche Datengrundlage vorhanden. Die SBB führt eine Online-Datenbank (SBB 2018) zu ihrem Rollmaterial. Auswertungen dieser Datenbank ergaben, dass Schweizer Züge im Durchschnitt den Jahrgang 1998 aufweisen bzw. 18.6 Jahre alt sind (Stand Ende 2017). Rollmaterial wird oft nach ca. 20 Jahren generalüberholt und weist eine geplante Einsatzdauer von ca. 40 Jahren auf.

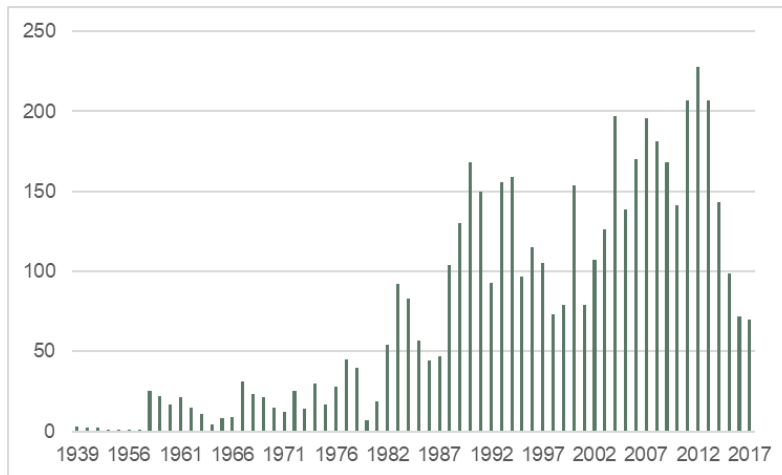


Abb. 21. Jahrgänge der Züge, die heute in der Schweiz in Benutzung sind

Diese Angaben erlauben uns einen ähnlichen Schluss wie in den vorherigen Kapiteln: 50% der Züge des Jahres 2060 werden vor dem Jahr 2043 gebaut worden sein. Dies bedeutet, dass die Technologien der nächsten 25 Jahre in diesem Bereich 2060 noch immer tragend sein werden. Gewichtet mit der Fahrleistung (neue Züge fahren wesentlich mehr als alte; sehr alte Kompositionen stehen teilweise nur noch als Dispozüge im Einsatz, erscheinen aber weiterhin in der Rollmaterialdatenbank) weisen die neueren Züge einen höheren Anteil auf.

Schifffahrt. Informationen zur Halbwertszeit von Wasserfahrzeugen sind nur spärlich vorhanden. Die durchschnittliche Lebenserwartung eines modernen Schiffes beträgt 25 bis 30 Jahre (Shippedia 2018). Eine andere Quelle (splash247 2017) schätzt das Alter von im Jahr 2016 ausgemusterten Schiffen auf 23.4 Jahre (gefallen von 29.6 Jahren im Jahr 2011). Aufgrund dieser Angaben kann man von einer Lebenserwartung von ca. 25 Jahren ausgehen. Dies bedeutet für das Prognosejahr 2060 (mit Diffusion ähnlich der schnellen Diffusion bei Strassenfahrzeugen), dass 50% der Wasserfahrzeugflotte aus Schiffen bestehen wird, die vor dem Jahr 2035 gebaut wurden. Dies bedeutet wiederum, dass Technologien, die in der Schifffahrt innerhalb den nächsten 15 Jahren erfunden und eingesetzt werden, im Jahr 2060 einen grossen Teil der technologischen Ausstattung ausmachen werden.

Flugverkehr. Die durchschnittliche Lebensdauer von Passagierflugzeugen beträgt 32 Jahre (Morrel 2009, Dray 2013). Zu dieser Zahl muss aber noch die Trägheit der Produktion hinzugerechnet werden, die für Flugzeuge bis 20 Jahre (Dray 2014) betragen kann. Allerdings werden Flugzeuge sehr intensiv gewartet und dabei ständig nachgerüstet, wo dies möglich, wirtschaftlich sinnvoll oder aus Sicherheitsgründen vorgeschrieben ist. Angesichts des starken Wachstums des Flugverkehrs weltweit ist auch in den kommenden Jahrzehnten damit zu rechnen, dass viele Flugzeuge mittels Nachrüstung und Retrofit-Programmen länger im Einsatz sein werden.

5.1.3 Infrastruktur

Daten zur Infrastruktur besitzen eine grosse Spannweite bezüglich Lebensdauer. Das Tiefbauamt des Kantons Zürich macht auf seiner Webseite folgende Angabe: «Die Lebensdauer einer Strasse hängt stark von ihrer Nutzung und der Wartungsintensität ab. Eine neu erbaute Strasse würde ohne regelmässigen Unterhalt nach etwa 50 Jahren zerfallen.» Ausserdem: «Die Lebensdauer reduziert sich auf Autobahnen um ca. 35 Prozent». Die Schweizer Baucontrolling (SwissBauCo 2018) gibt die Lebenserwartung von Haus-Bauteilen mit einer Spannweite von 40 bis 200 Jahren an. Der Baumeisterverband Aargau (2016) schätzt in einem Merkblatt die Lebenserwartung von Strassen(bestandteilen) wie folgt:

- Unterbau: bis 100 Jahre
- Asphaltstrassen:
 - Deckschichten: 20 bis 25 Jahre
 - Binderschichten: 40 bis 50 Jahre
 - Tragschichten: 40 bis 50 Jahre
- Betonstrassen: 30 Jahre und mehr
- Ausserdem:
 - Beschilderungen: 15 Jahre
 - Ausstattungen wie beispielsweise Leitplanken: 10 bis 15 Jahre
 - Markierungen: 2 bis 5 Jahre

Strassen werden zunehmend auch mit Verkehrstelematik ausgestattet (Lichtsignalanlagen, Parkleitsysteme, dynamische Geschwindigkeitsanzeigen, Detektoren zur Messung des Verkehrsflusses etc). Die Lebensdauer dieser Bestandteile variiert zwischen 10 und 15 Jahren.

Die Infrastruktur rund um den Verkehrsträger Schiene bedarf ebenfalls ständiger Nachbesserungen und muss nach gewisser Abnutzung ausgewechselt werden. Die Abnutzung der Schienen selber hängen stark von der Benutzung dieser ab. Strecken, welche nicht stark befahren sind, müssen auch weniger ersetzt werden. Die Liegezeit der Schienen in Kehrtunnels der Gotthardbahn betragen andererseits nur ca. 3 Jahre, trotz regelmässigem Abschleifen. Zudem müssen die Schwellen und das Schotterbeet ebenfalls in regelmässigen Abständen geprüft, gepflegt und ersetzt werden. Die Schwellen besitzen aber eine Liegezeit, welche oft bis zu 25 Jahre betragen kann. Abschliessend kann zu Schiene gesagt werden, dass sie zwar einer grossen Pflege bedarf, und die einzelnen Teile öfter erneuert werden müssen als vielleicht angenommen, im Grossen und Ganzen die Strecken aber die gleichen bleiben und dies an vielen Stellen schon sehr lange sind.

Die Essenz aus den zitierten Quellen ist, dass die grundlegenden Strukturen des Städte-, Strassen- und Schienenbaus im Jahr 2060 sich nicht stark von den heute vorhandenen unterscheiden werden. Bis auf die Beschilderung und sonstige kleinere Ausstattungen ist die Strasseninfrastruktur Grundskelett des künftigen Verkehrs schon heute gegeben. Hingegen kann Infrastruktur typischerweise *nachgerüstet* werden, insbesondere was Verkehrsleitsystemen betrifft (z.B. Verkehrsmanagement 4.0, Kommunikationsinfrastruktur für C2I).

5.1.4 Überblick zur Trägheit im Verkehrssystem

Die Lebenserwartung von Verkehrsmitteln alleine ist zwar kein sehr genauer Hinweis für das Verhalten in der Flotte zu sein. Sie legt aber unumstösslich eine Tendenz der Trägheit im Bestand eines Verkehrsmittels fest: je grösser die Lebenserwartung, desto träger verhält sich die Flotte. Auch weil die Lebenserwartung oft die einzig auffindbare Information war, wird im Folgenden die Halbwertszeit der verschiedenen (in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten) Verkehrsmittel verglichen.

In *Abb. 22* wird aus der Perspektive des Jahres 2060 definiert, wie alt die verschiedenen Verkehrsmittel und Verkehrsinfrastrukturen (IKT und Strasseninfrastruktur) zu diesem Zeitpunkt im Mittel sein werden. Daraus lässt sich darauf schliessen, wie weit in der Zukunft (aus heutigem Standpunkt) die technologische Entwicklung einen relevanten Einfluss auf die Verkehrsmittel und Verkehrsinfrastrukturen des Jahres 2060 hat. Aus *Abb. 22* wird somit ersichtlich, welche Teile des Verkehrssystems schnell reagieren und welche eher träger Natur sind. Es ist beispielsweise ersichtlich, dass die heutige Strasseninfrastruktur auch die Mobilität im Jahr 2060 prägen wird. Strassen und Gebäude werden sich grösstenteils noch an den selben Stellen befinden wie heute. Flugzeuge, Schiffe und Züge sitzen in der Mitte des Trägheitsspektrums: Für das Jahr 2060 sind für sie die technologischen Entwicklungen der nächsten 10, 20 und teilweise 30 Jahre von Interesse. Was danach kommt, ist für die Flotte im betrachteten Jahr insignifikant (wird erst nach 2060 bedeutsam). Strassenfahrzeuge besitzen dagegen eine eher schnelle Umwälzung: Für sie sind technologische

Entwicklungen bis ca. zum Jahr 2050 von Interesse. Informations- und Kommunikationstechnologien besitzen die schnellste Umwälzung. Es kann bei diesen Technologien zudem von einem sehr raschen Marktverhalten bezüglich neuer Technologien ausgegangen werden.

Was hier nicht untersucht wurde, sind die zusätzlichen Kosten und Nutzen eines beschleunigten Austausches älterer Fahrzeuge zwecks schnellerer Flottenumwälzung. Beispielsweise kann sich die Frage stellen, ob zu einem gegebenen Zeitpunkt nicht-vernetzungs-fähige Fahrzeuge nicht mehr auf dem öffentlichen Strassennetz zugelassen sind, und welche Kosten dies einerseits verursacht, und welcher Nutzen dabei entsteht.

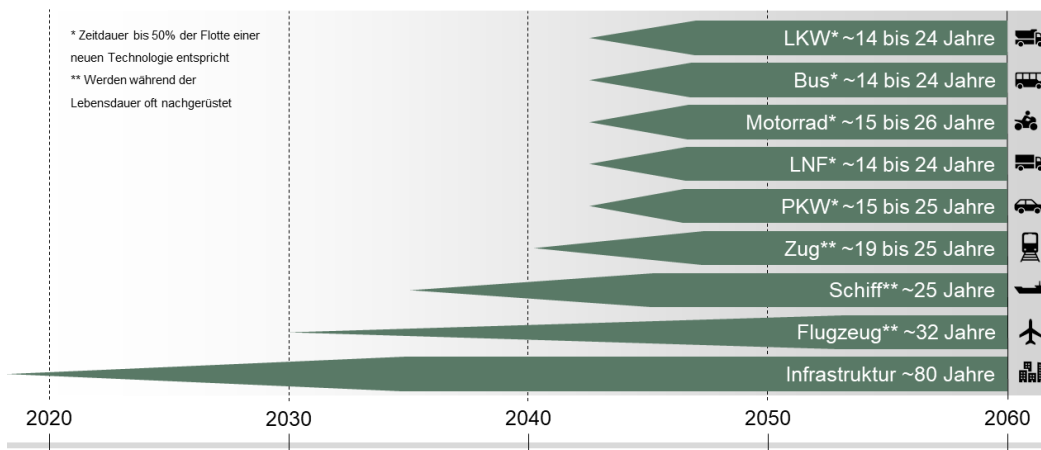


Abb. 22. Trägheiten der Verkehrsunterssysteme und Verkehrsmittel; die Möglichkeiten von Nachrüstung/Retrofit-Programmen im Bereich der Infrastruktur und von Kommunikations- und Leitsystemen innerhalb Fahrzeugen sind hier nicht berücksichtigt (eigene Abbildung – EBP)

Um nun Aussagen zur Diffusion der Schlüsseltechnologien (Kapitel 4.4) treffen zu können, werden sie in *Tab. 12* anhand der oben bestimmten Trägheit der verschiedenen Verkehrsmittel und Technologien eingeordnet. Dadurch können erwartete Verzögerungen und Trägheiten bei technologischen Neuerungen abgeschätzt werden.

Automatisierte Strassenfahrzeuge und Nachhaltige Antriebsenergien sind für den MIV von besonderer Bedeutung und wurden deshalb dem Strassenverkehr untergeordnet. Neue Verkehrssysteme und -infrastruktur ist die einzige Technologie, welche auf grossen infrastrukturellen Veränderungen aufbaut. Ihre Trägheit ist deshalb der Trägheit der Infrastruktur gleichgestellt.

Die grösste Gruppe der Schlüsseltechnologien machen die IKT aus. Robotik, Vernetzung, Künstliche Intelligenz, Revolutionäre User Devices, Blockchain, Virtual & Augmented Reality und Automatisierte Luftfahrzeuge gehören in diese Kategorie; mit entsprechender Trägheit.

Bei zwei Schlüsseltechnologien (3D-Druck und Batterietechnologien) lässt sich dies nicht so einfach machen, da sie sich der getroffenen Auswahl nicht unterordnen lassen. Die Einordnung beim 3D-Druck gelingt nicht, weil es sich nicht um eine Technologie handelt, die im Verkehrssystem implementiert werden muss, sondern es sich um eine Fertigungstechnologie handelt, welche die Verkehrsnachfrage beeinflussen kann. Entsprechend ist klar, dass nicht der Strassenverkehr oder die Infrastruktur Basis für die Trägheit sein kann. Bei den Batterietechnologien werden Entwicklungen basieren auf *Abb. 8* und *Abb. 9* angenommen. Batterien sind ein integraler Bestandteil eines Fahrzeugs. Alle Komponenten, d.h. Batterie, Batteriemanagementsystem und Antriebsstrang, sind aufeinander abgestimmt. Bei den Elektrofahrzeugen der ersten Generation wurden in Einzelfällen ganze Batteriepakete ausgetauscht, für die Zukunft jedoch ist davon auszugehen, dass Batterien grundsätzlich ein Fahrzeugleben lang halten werden. Dabei kann es sein, dass einzelne

Batteriezellen ausgetauscht werden, aber nicht die ganze Batterie. Für Garantiefälle werden alle Komponenten eines Fahrzeugs – auch die Batterien – während des Produktionszeitraums hergestellt und eingelagert; es wäre (ganz analog zu der Situation bei Laptops oder Mobiltelefonen) nicht zweckmässig, in ein älteres Fahrzeug eine gänzlich neue Batterie, welche nicht für dieses Fahrzeug konzipiert wurde, einbauen zu wollen. Auch die kalendarische Alterung von Akkuzellen entwickelt sich positiv, die zurzeit von den Herstellern erbrachte Gewährleistung (meistens 80% Kapazität verbleibend nach 160'000 Kilometer oder 8 Jahren) scheint – aufgrund erster Erfahrungswerte – konservativ zu sein und nach dieser Dauer noch über 90% der Kapazität verfügbar zu sein.

Tab. 12: Einordnung der Schlüsseltechnologien in Trägheitskategorien

Trägheit basierend auf:	Schlüsseltechnologie:
Strassenverkehr (Flottenumwälzung)	Automatisierte Strassenfahrzeuge Nachhaltige Antriebsenergie
Infrastruktur	Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur
Informations- und Kommunikationstechnologie	Robotik Vernetzung Künstliche Intelligenz Revolutionäre User Devices Blockchain Virtual & Augmented Reality Automatisierte Luftfahrzeuge
sonstige	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren Batterietechnologien

5.2 Gegenseitige Abhängigkeiten der Schlüsseltechnologien

Im vorangegangenen Kapitel wurde die erwartete Entwicklung der verschiedenen Verkehrsmittel und Verkehrstechnologien besprochen. Dabei wurden die Elemente des Verkehrssystems individuell betrachtet. Nun werden die Abhängigkeiten der verschiedenen Schlüsseltechnologien untereinander definiert. Darauf aufbauend wird diskutiert, welchen Einfluss die Abhängigkeiten auf die Entwicklung der einzelnen Technologien haben.

Der Einsatz systemdynamischer Modelle (Kap. 2.3) erlaubte zwar die Identifikation relevanter Eigenschaften, welche Schlüsseltechnologien auszeichnen, aber nicht die gegenseitige Abhängigkeit von Schlüsseltechnologien untereinander. Weil auch die reine Extrapolation bisheriger Trends für einen weit entfernten Analysehorizont unzulässig ist, wenden wir die Zukunftsforschungsmethode der Trend-Impact-Analyse an: Dabei werden Auswirkungen unterschiedlicher Ereignisse auf erwartete Entwicklungspfade abgeschätzt. Im vorliegenden Projekt werden die ermittelten Technologien als Ereignisse betrachtet und analysiert, was die Ausreifung dieser Technologien für einen Einfluss auf andere künftige Ereignisse (also wiederum Technologien) haben. Ein grosser Vorteil dieser Analyse besteht darin, dass die Verknüpfung und die Beeinflussung (Korrelation) zwischen Technologien definiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Technologie eintritt, wird durch das Eintreten oder Ausbleiben einer anderen Technologie massgeblich beeinflusst. Diese bedingten Wahrscheinlichkeiten wurden in einer Matrix zusammengefasst (Abb. 23). Die Leitfrage dabei ist: Wenn eine Technologie (erste Zeile; horizontale Achse) auftaucht, wie verändern sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die anderen Technologien (erste Spalte; vertikale Achse)?

Einfluss auf Technologie von Technologie	Automatisierte Fahrzeuge	3D-Druck	Automatisierte Flugobjekte	Nachhaltige Antriebsenergie	Neue Verkehrssysteme & Infrastruktur	Virtual & Augmented Reality	Batterietechnologien	Robotik	Vernetzung	Künstliche Intelligenz	Revolutionäre User Devices	Blockchain	Tech. ist grundlegend
Automatisierte Fahrzeuge	■												0
3D-Druck		■											0
Automatisierte Flugobjekte			■										0
Nachhaltige Antriebsenergie				■									0
Neue Verkehrssysteme & Infrastruktur					■								0
Virtual & Augmented Reality						■							0
Batterietechnologien			++	++			■						2
Robotik		+			+			■					1
Vernetzung	++		+					+	■		++	+	3.5
Künstliche Intelligenz	++		++			+		+		■	+		4
Revolutionäre User Devices											■		0
Blockchain												■	0
Tech. ist abhängig	2	1	2.5	1	0.5	0.5	0	1	0	0	1.5	0.5	

Abb. 23. Trend-Impact-Analyse der Schlüsseltechnologien. Positive Abhängigkeiten sind mit + markiert, stark positive mit ++.

Starke Abhängigkeiten wurden jeweils mit einem «++» markiert und weniger starke Abhängigkeiten mit einem abgeschwächten «+». Für die Werte der letzten Zeile und Spalte wurde jeweils ein doppeltes Pluszeichen mit dem Wert 1 und ein einfaches Pluszeichen mit dem Wert 0.5 summiert. Die Matrix zeigt damit auf, welche Schlüsseltechnologien auf das Durchsetzen anderer bauen und im Gegensatz dazu, welche sich weitgehend unabhängig voneinander entwickeln können. Die Zahl in der untersten Zeile der Matrix definiert, wie stark die Weiterentwicklung und dadurch Diffusion einer Technologie von anderen Technologien abhängig ist. Die letzte Spalte macht die umgekehrte Aussage: je höher die Zeilensumme einer Technologie, desto eher beeinflusst die Diffusion dieser Technologie die Entwicklung anderer. In der Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Technologien wurden keine (direkten) negativen Abhängigkeiten explizit betrachtet. Es sind jedoch konkurrierende Entwicklungen denkbar. So würde beispielsweise eine vollständige Entwicklung von 3D-Druck, Virtual & Augmented Reality und automatisiertes Fahren mit Platooning zum niedrigen Bedarf von neuen Verkehrssystemen (Cargo-Sous Terrain) führen. Andererseits würde die Entwicklung von neuen Verkehrssystemen den Druck, voll automatisierten Verkehr zu entwickeln, verringern.

Die Analyse ermittelte damit als am stärksten von der Entwicklung anderer Technologien abhängige Schlüsseltechnologien:

- Automatisierte Strassenfahrzeuge
- Automatisierte Luftfahrzeuge
- Revolutionäre User Devices

Folgende Schlüsseltechnologien haben einen Einfluss auf die Entwicklung anderer Schlüsseltechnologien:

- Vernetzung
- Robotik
- Künstliche Intelligenz
- Batterietechnologien

Diese Technologien sind nicht oder kaum auf andere Schlüsseltechnologien im Verkehrsbereich angewiesen. Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Schlüsseltechnologien zusammengefasst und detaillierter diskutiert.

5.3 Synthese: Diffusionszeitraum und zeitliche Abfolge der 12 Schlüsseltechnologien

Die Diffusion der Schlüsseltechnologien, ohne Betrachtung der Treiber und Hindernisse im regulatorischen und politischen Sinn wird grundsätzlich von den folgenden Elementen geprägt:

- **Technologische Reife:** wann ist die Technologie marktreif und bereit für den Markteintritt?
- **Marktdiffusion:** Wie lange dauert es, bis eine marktreife Technologie sich im Markt durchgesetzt hat?
- **Erwartetes Potenzial:** Wie gross ist das technische, das wirtschaftliche und das ökologische Potenzial?
- **Gegenseitige Abhängigkeiten:** Wie beeinflussen sich die einzelnen Technologien untereinander?

Im Folgenden wird aufgrund der Resultate der Kapitel 5.1 und 5.2 ein in sich geschlossenes Gesamtbild der Diffusion der zwölf Schlüsseltechnologien angefertigt. *Abb. 24* zeigt die Interkonnektivität aller betrachteten Schlüsseltechnologien basierend auf den obenstehenden vier Elementen. Je weiter rechts eine Technologie erscheint, desto stärker baut sie auf anderen Technologien auf (die technologisch übergeordnete Ebene «Main Technologies» gemäss *Abb. 4*). Je weiter links sich eine Technologie befindet, desto grundlegender ist sie für andere («Enabling Technologies» gemäss *Abb. 4*). Die technologische Reife wurde den Steckbriefen (Kap. 4.4) entnommen, die Trägheit den Recherchen und die Abhängigkeiten der Trend-Impact-Analyse (Kap. 5.2).

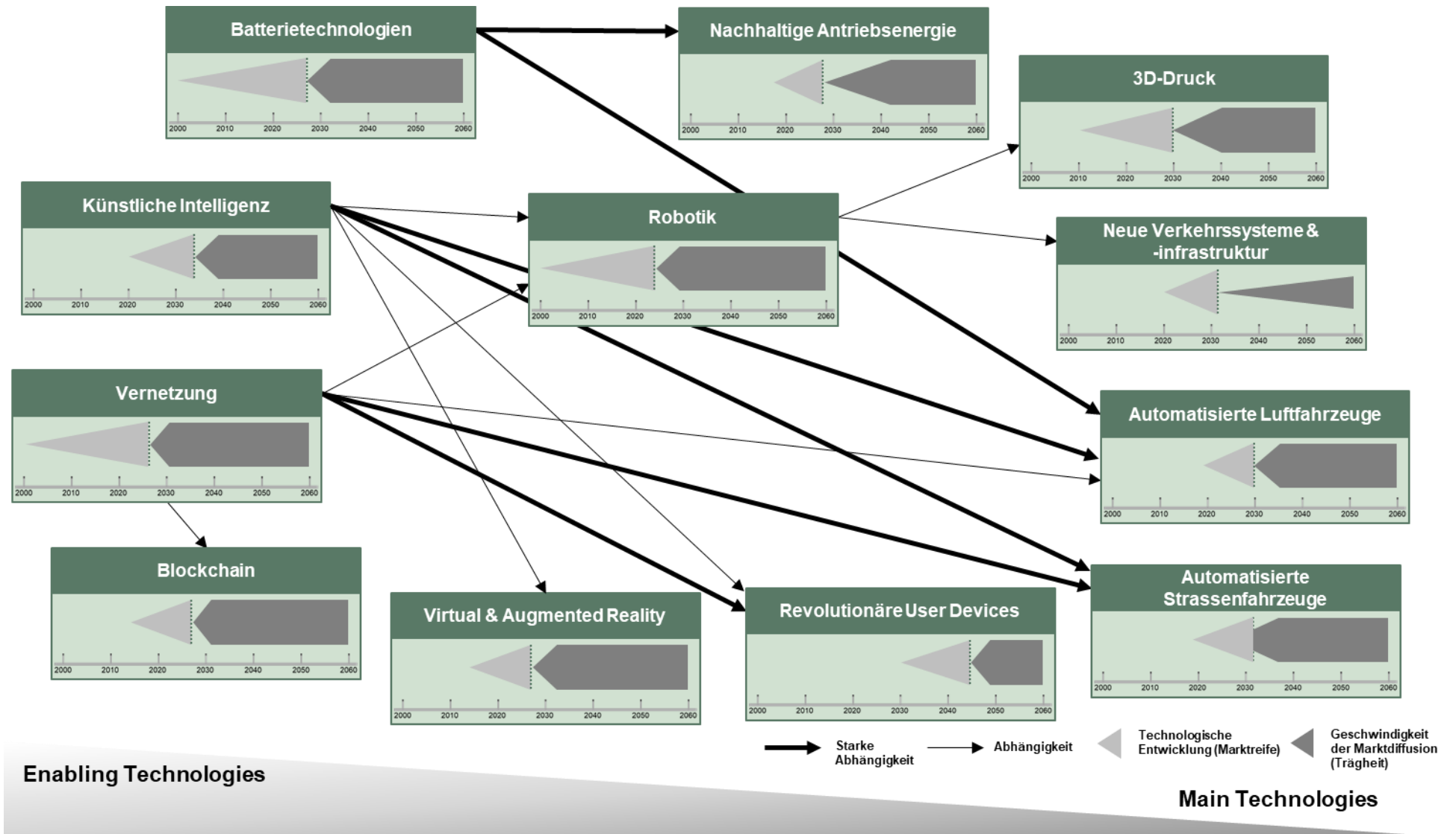


Abb. 24 Abhängigkeiten zwischen den zwölf Schlüsseltechnologien

Die drei im vorangegangenen Unterkapitel (Kapitel 0) als am grundlegendsten identifizierten Technologien (Künstliche Intelligenz, Vernetzung, und Batterietechnologien), liegen in der Darstellung auf der linken Seite. Konkret bedeutet dies beispielsweise für automatisierte Strassenfahrzeuge: ohne Entwicklungen in der künstlichen Intelligenz und Vernetzung können sie sich nicht weiterentwickeln. Deswegen können in diesem Beispiel künstliche Intelligenz und Vernetzung starke Treiber aber ebenfalls Hindernisse für das automatisierte Fahren darstellen.

Die Graphik lässt weiter darauf schliessen, dass selbst wenn eine Technologie auf der rechten Seite sich sehr schnell im Markt durchsetzen könnte, sie über die Trägheit einer linksstehenden Technologie limitiert ist. Vergleicht man aber die ermittelten Trägheiten (vgl. Kap. 5.1) mit der Darstellung, fällt auf, dass tendenziell je weiter links sich eine Technologie befindet, desto höhere Diffusionsgeschwindigkeiten besitzt sie. Ausserdem – wegen der Struktur, dass «Main Technologies» rechts stehen und «Enabling Technologies» links – haben die Technologien auf der rechten Seite einen direkten Einfluss auf das Verkehrssystem, wobei linksstehende (auch wenn möglicherweise kein Ast von dieser Technologie in *Abb. 24* weiterführt) nur indirekt auf das Verkehrssystem haben (z.B. Blockchain hat nur einen Einfluss auf mögliche Geschäftsmodelle, nicht direkt auf den Verkehr).

Im Folgenden werden drei interessante Abhängigkeitsketten diskutiert (basierend auf den oben genannten Elementen, die die Diffusion beeinflussen), und aufgezeigt, was für Grundlagen gegeben sein müssen, damit Schlüsseltechnologien sich durchsetzen können. Es werden mögliche Probleme und Verzögerungspotenziale (aufgrund hoher Trägheiten oder später technologischer Reife) definiert.

Abhängigkeitskette «Revolutionäre User Devices»

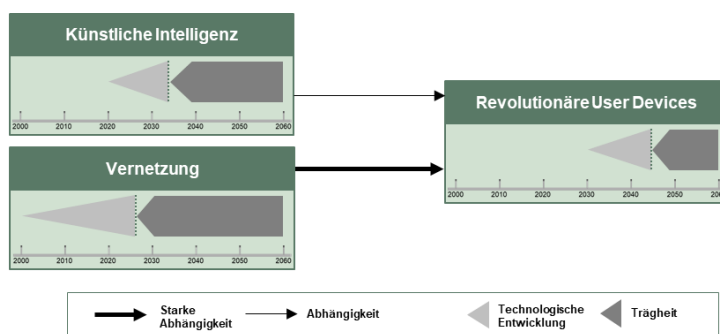


Abb. 25. Darstellung der Abhängigkeitskette «Revolutionäre User Devices»

Unter die Kategorie «Revolutionäre User Devices» fallen neuartige Technologien, die das menschliche Verhalten – ähnlich wie die Einführung des Smartphones – beeinflussen und unterstützen. Bezogen auf die Mobilität dienen sie der Unterstützung, Vereinfachung und Schnittstelle jeglicher Interaktion zwischen dem Menschen und dem Verkehrssystem.

- Revolutionäre User Devices sind Technologien, welche in die Gruppe der Informations- und Kommunikationstechnologien fallen. Deshalb sind sie eine sehr dynamische Technologie mit einem schnellen Marktverhalten und rascher Bestandsumwälzung.
- Diese Schlüsseltechnologie hängt von einer fortschrittlichen Vernetzung, sowie Fortschritten im Bereich der künstlichen Intelligenz ab. Diese sind ebenfalls IKT, was bedeutet, dass sobald sich Neuerungen auf diesen Gebieten ergeben, von einer raschen Adaption in neue User Devices ausgegangen werden kann.
- Die Entwicklung dieser Schlüsseltechnologie ist ebenfalls limitiert durch die Fortschritte auf den beiden zugrundeliegenden Gebieten.

Abhängigkeitskette «Nachhaltige Antriebsenergie»

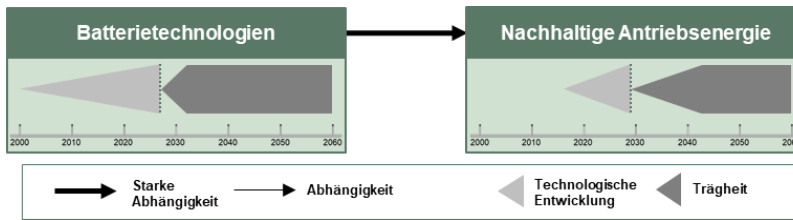


Abb. 26. Darstellung der Abhängigkeitskette «Nachhaltige Antriebsenergie»

Die Kategorie «Nachhaltige Antriebsenergie» umfasst jegliche Antriebe mit tieferer CO₂-Intensität als konventionelle Antriebe. Konkret bedeutet dies batterieelektrische Fahrzeuge (inkl. PHEV), Brennstoffzellenfahrzeuge und Fahrzeuge, die über Oberleitungen Energie tanken können. Dies bedeutet impliziert ein sehr breites Spektrum an Technologien, die jeweils für verschiedene Anwendungen optimal sind und die nicht alle dieselben Hinderungsfaktoren aufweisen.

- Grundlegend kann gesagt werden, dass die Diffusion der unterschiedlichen Antriebstypen an die Trägheit der einzusetzenden Fahrzeugflotte gebunden ist. Die Fahrzeuge mit den neuen Antriebssystemen müssen zuerst den Markt «erobern» und sind dann hauptsächlich über die Durchlaufquote der betreffenden Flotte limitiert.
- Bei der Trend-Impact-Analyse wurde als einzige (aber starke) Abhängigkeit die Batterietechnologien ermittelt. Diese Abhängigkeit gilt für alle Systeme, da eine leistungsfähigere, leichtere und günstigere Batterie für jede der genannten Antriebsformen Vorteile bringt. Für Oberleitungen gilt dies nur, falls die Fahrzeuge für gewisse Strecken entkoppelt von der Oberleitung fahren müssen. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen ist die Batterie ebenfalls nur bedingt der limitierende Faktor, obwohl auch in diesem Fall eine leistungsfähigere und günstigere Batterie zu besserer Wettbewerbsfähigkeit führt. Die Batterie ist schon heute der Hauptgrund, weshalb batterieelektrische Fahrzeuge noch keinen massgeblichen Anteil der Schweizer Fahrzeugflotte ausmachen.
- Für Brennstoffzellenfahrzeuge und Oberleitungen liegt aber die hauptsächlich Limitierung nicht bei der Batterie, sondern bei der (momentan kaum vorhandenen) sehr kostenintensiven Infrastruktur, die diese Antriebssysteme voraussetzen. Diese umfasst ein Oberleitungsnetz bzw. eine Wasserstoffinfrastruktur, welche die durchgehende Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen erlaubt.

Abhängigkeitskette «Automatisierte Strassenfahrzeuge»

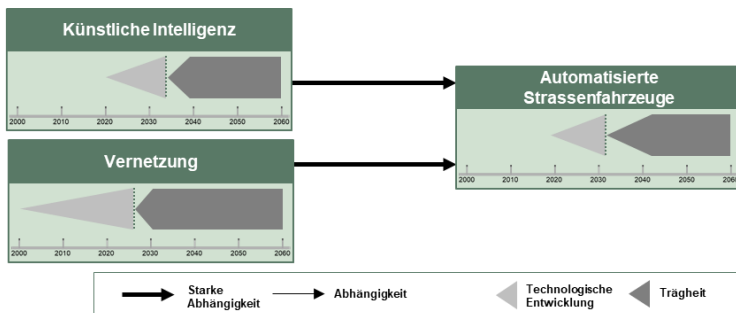


Abb. 27. Darstellung der Abhängigkeitskette «Automatisierte Strassenfahrzeuge»

Automatisierte Strassenfahrzeuge sind der wahrscheinlich bedeutsamste im vorliegenden Projekt untersuchte Trend für den Verkehr der Zukunft. Automatisiertes Fahren bringt viele Vorteile mit sich, die möglichen Nachteile können sich aber genauso stark auf den Verkehr auswirken. Man spricht heute von fünf Levels der Automatisierung (vgl. Tab. 1). Diese macht eine

klare Bestimmung, wann die Technologie im Markt verbreitet sein wird, schwieriger. Ein tieferes Level als das vollautomatisierte Fahren (Level 5) kann bereits grosse Veränderungen des Verkehrsverhalten mit sich bringen und wird natürlich bereits vor der Vollautomatisierung potenziell bedeutender Teil der Flotte sein.

- Die Diffusion automatisierter Fahrzeuge ist grundlegend von der Trägheit der Fahrzeugflotte und des Fahrzeugmarktes abhängig.
- Die Trend-Impact-Analyse ergab, dass automatisierte Strassenfahrzeuge nach den automatisierten Luftfahrzeugen die grössten Abhängigkeiten aller Schlüsseltechnologien besitzen. Hauptsächlich hängt die technologische Entwicklung von der Vernetzung und der künstlichen Intelligenz ab. Die Entwicklung auf diesen Gebieten bestimmt den Fortschritt der Automation von Fahrzeugen.
- Weitere mögliche Hindernisse sind noch ungeklärte rechtliche, ökonomische Fragen und die gesellschaftliche Akzeptanz automatisierter Fahrzeuge.

6 Wirkungen auf das Verkehrssystem

6.1 Vorgehensweise

Ziel der Forschungsarbeit ist die Erfassung von Wirkungspotenzialen von Technologien auf den Verkehr. Es geht also um *Technologie*, *Verkehr* und *Wirkung*. Um das Zusammenspiel dieser drei Felder zielführend beschreiben zu können, müssen diese zuerst begrifflich eingeführt und geschärft werden. In Kap 3 und 4 wurden aus der Gesamtzahl an *Technologien* die massgeblichen Schlüsseltechnologien hergeleitet und deren gegenseitige Abhängigkeiten und Diffusions-Geschwindigkeit abgeschätzt. Die Herleitung von *Verkehr* und *Wirkung* sowie deren Wirkungszusammenhang folgt im vorliegenden Kapitel.

Dazu wird zuerst der Begriff *Wirkung* eingeführt und dessen Einsetzbarkeit in Bezug auf die Fragestellung dargelegt. In diesem Zusammenhang werden auch die verschiedenen Ausprägungen von Wirkungen, wie Einwirkungen oder Auswirkungen, deklariert und Konventionen zu deren Beschreibung festgehalten.

Dann wird das System *Verkehr* eingeführt und beschrieben. Die Verkehrssysteme sind in Stufen, Bereiche und Komponenten gegliedert und werden für Güterverkehr und Personenverkehr gesondert ausformuliert. Dadurch wird den unterschiedlichen Gesetzmässigkeiten Rechnung getragen.

In der Folge werden die Schlüsseltechnologien den Komponenten dieser Verkehrssysteme gegenübergestellt und die Wirkungspunkte lokalisiert. In diesem Zusammenhang wird auch detektiert, wo überhaupt Wirkungen von Schlüsseltechnologien auf das Verkehrssystem eintreten. Als Resultat liegt eine Matrix mit den Wirkungen der Schlüsseltechnologien auf die Verkehrssysteme vor.

Aus der Matrix ist erkennbar, dass nicht jede Schlüsseltechnologie direkt auf das Verkehrssystem wirkt. Für die Forschungsfrage relevant – und materiell fassbar – sind nur die direkten Wirkungen. Entsprechend werden aus den Schlüsseltechnologien diejenigen als relevant herausgefiltert, die direkt auf die Verkehrssysteme wirken. Die indirekten Wirkungen werden nur kurz beschrieben. Diese sollen in anderen Teilprojekten (z.B. SVI 006 „Geschäftsmodelle“) vertieft betrachtet werden.

Für diese relevanten Schlüsseltechnologien werden Wirkungsmodelle erstellt, welche pro Schlüsseltechnologie zwischen den Komponenten die Wirkungsrichtung und die Vorzeichen (positiv oder negativ) anzeigen. Die Wirkungsmodelle stellen somit die Wirkungsketten der Schlüsseltechnologien auf die Verkehrssysteme dar. Wie im vorherigen Schritt werden die Verkehrssysteme nach Güterverkehr und Personenverkehr getrennt betrachtet. Als Resultat des Arbeitsschritts liegen die Wirkungszusammenhänge zwischen Schlüsseltechnologien und Verkehrssystemen in deskriptiver Form vor.

Wie gross diese Wirkungen sind wird in diesem Arbeitsschritt nicht behandelt und bildet den Inhalt des nachfolgenden AP4. Somit unterscheiden sich die beiden Arbeitspakete dadurch, dass in AP3 eine Qualifizierung der Wirkungen vorgenommen wird, während in AP 4 eine Quantifizierung der Wirkungen in Form verschiedener Intensitätsstufen erfolgt.

6.2 Wirkung

Der Begriff *Wirkung* scheint auf den ersten Blick trivial und eine Einführung dessen unnötig. In der Diskussion um ‚Auswirkungen‘ von Technologien auf das Verkehrssystem wird jedoch offensichtlich, dass infolge der Menge an unterschiedlich gearteten Wirkungszusammenhängen eine differenzierte Handhabung des Begriffs unumgänglich ist.

Entscheidend geprägt ist die Verwendung des Wirkungsbegriffs durch Frederic Vester. Er hat 1970 mit dem sogenannten Papiercomputer (unter anderem auch als Vester'sche Einflussmatrix, Vernetzungsmatrix oder Vernetzungsgitter bekannt) ein grafisches Hilfsmittel zur Herstellung von Verbindungen zwischen verschiedenen Begriffen nach vermuteter Ursache-Wirkung-Beziehung eingeführt. Vester nennt dieses Hilfsmittel später Einflussmatrix. Ziel ist es dabei, zu erarbeiten, welche Einflüsse verändert werden müssen, um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen.

Damit war ein methodischer Grundstein zur Modellierung von Wirkungen gegeben. Eine für die vorliegende Fragestellung zielführende Ausprägung ist die Ursache-Wirkung-Modellierung. Für die Beschreibung von Wirkungen wird in der Folge auf dieses Modell abgestützt.

6.2.1 Konvention Wirkung

Auf Basis der Ursache-Wirkung-Modellierung wird unter einer Wirkung eine Beziehung (kausaler oder systemischer Zusammenhang) sowie ein Effekt (mit Richtung, Vorzeichen und Intensität) zwischen zwei Elementen/Komponenten verstanden. Während im alltäglichen Gebrauch unter ‚Wirkung‘ ein Vorgang mit unmittelbarer Reaktion verstanden wird, ist im Zusammenhang mit Verkehr die Unmittelbarkeit der Reaktion oft nicht gegeben. Insofern muss in der vorliegenden Arbeit ‚Wirkung‘ als ‚macht Druck auf‘ oder ‚wirkt auf etwas ein‘ interpretiert werden.

Für die vorliegende Arbeit werden zur Beschreibung von Wirkungen folgende Konventionen aufgestellt:

- Wirkungen beschreiben **Beziehungen** zwischen zwei Elementen/Komponenten. Diese werden mit dem Symbolbild Strich dargestellt.
- Wirkungen besitzen eine **Richtung**. Diese wird durch einen Pfeil dargestellt.
- Wirkungen können **Vorzeichen** besitzen und Elemente positiv oder negativ beeinflussen.
 - Wenn die Wirkung eine Zunahme oder Abnahme darstellt, wird diese durch die Symbolbilder **+** (Plus) oder **-** (Minus) bei Start oder Ende des Striches / Pfeils dargestellt.
 - Wenn die Wirkung eine Verbesserung oder Verschlechterung darstellt, wird diese durch die Symbolbilder **↻** (Verbesserung) oder **↻** (Verschlechterung) dargestellt.
- Wirkungen können **Intensitäten** besitzen. Diese werden durch Zahlen entlang der Striche dargestellt.

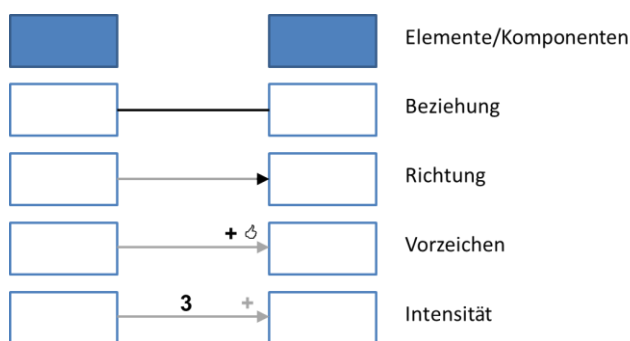


Abb. 28. Konvention zur Beschreibung von Wirkungen (eigene Darstellung)

Folglich wird eine Schlüsseltechnologie als Element/Ursache einer Wirkung auf das Verkehrssystem mit einem Pfeil von der Schlüsseltechnologie auf das Verkehrssystem dargestellt. Die Erfassung von Wirkungen nach diesen Prinzipien wird als Wirkungsmodell bezeichnet.

6.2.2 Einwirkung / Auswirkung / Wechselwirkung

Nachdem der Begriff der *Wirkung* eingeführt ist, bedarf es noch der Konkretisierung weiterer Wirkungs-Begriffe. So umfasst die Forschungsfrage mögliche *Auswirkungen* von Technologien

auf den Verkehr. Daneben bestehen aber auch *Einwirkungen* auf den Verkehr sowie *Wechselwirkungen* zwischen Verkehrs-Komponenten. In der Definitionswelt werden die drei Begriffe nicht voneinander unterschieden. Deshalb wird in der Folge versucht eine Klärung dieser Begriffe zu formulieren.

Eine Wirkung kann eine Auswirkung, eine Einwirkung oder eine Wechselwirkung sein. Der Inhalt der Beziehung bleibt immer derselbe und wiedergibt einen kausalen oder systemischen Zusammenhang zwischen Elementen/Komponenten. Die drei Begriffe unterscheiden sich jedoch vom Standpunkt der Wirkung aus. Zur Unterscheidung gegenüber Wirkungen werden sie als Blockpfeile dargestellt.

Eine *Auswirkung* legt den Fokus auf die Ursache und beschreibt einen Zusammenhang und Effekt abgehend von der Ursache. Der Empfänger wird dabei nicht konkretisiert, sondern meist pauschalisiert beschrieben (Bsp. Umwelt).

Dem gegenüber legt die *Einwirkung* den Fokus auf den Empfänger und beschreibt einen Zusammenhang und Effekt ankommend beim Empfänger. Der Absender wird dabei nicht konkretisiert, sondern meist pauschalisiert beschrieben (Bsp. Wetter).

Die *Wechselwirkung* beschreibt schliesslich eine Folge von unterschiedlich gerichteten Wirkungen zwischen zwei Komponenten. Diese werden zwar als gleichzeitig beschrieben, sind in der Realität aber immer sequentiell. Somit entspricht eine Wechselwirkung einer Wirkungskette zwischen zwei Elementen/Komponenten. Die Komponenten können konkretisiert oder pauschalisiert genannt werden.

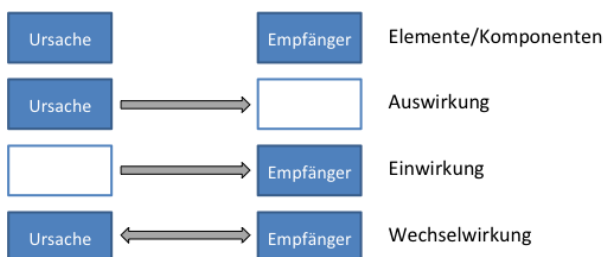


Abb. 29. Auswirkung, Einwirkung und Wechselwirkung (Eigene Darstellung)

Die in der Forschungsfrage genannten *Folgen* des technologischen Wandels für Mobilität und Verkehr sind somit als *Auswirkungen* der Technologie und als *Einwirkungen* auf Mobilität und Verkehr zu betrachten. *Wechselwirkungen* zwischen Technologie und Mobilität und Verkehr sind hingegen nicht Inhalt dieser Arbeit.

6.3 Verkehrssysteme

In der Literatur sind vielfältige Herleitungen und Darstellungen von Verkehrssystemen vorhanden. Diese bilden meist den konkreten Kontext ab, in welchem sie entwickelt worden sind. Die Abgrenzungen sind sachbezogen unterschiedlich, Systemgrenzen differieren je nach Fragestellung. Weniger häufig sind in der Literatur Wirkungszusammenhänge von Verkehrssystemen anzutreffen. Doch auch dort sind diese direkt mit der vorliegenden Fragestellung verbunden.

In einer Studie zu Verfahren von Technologie Assessment im Verkehrswesen¹ lassen sich Hinweise zur Deklaration von Verkehrssystemen des Personen- und Güterverkehrs finden. Ver-

¹ „Verfahren von Technology Assessment im Verkehrswesen“ (Rapp/IKAÖ/Interface) SVI 2003, Seite 20

kehr wird dabei als Vorgang der Ortsveränderung, bzw. Raumüberwindung von Menschen, Gütern, Informationen und allenfalls Energie definiert. Im System-Zusammenhang bilden dann Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage das sogenannte Verkehrssystem, welches mit einem physischen (Menschen, Fauna, Landschaft, Boden, Luft, etc.) und nicht-physischen Umfeld (Gesellschaft, Wirtschaft, Politik, etc.) interagiert. Diese Herleitung bietet zwar einen Ansatz zur Beschreibung von Wirkungszusammenhängen zwischen Umsystem und Verkehrssystem, es erfasst jedoch das System Verkehr in einem zu engen Rahmen und ist vor allem auf Güterverkehr- und Logistik-Abläufe bezogen.



Abb. 30. Verkehrssystem und Umsystem gemäss Studie Technologie Assessment (Rapp/IKAÖ/Interface 2003)

Eine allgemeiner gültige, generische Darstellung von Verkehrssystemen und ein darauf aufbauendes Wirkungsmodell konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Aus diesem Grund wird in der Folge ein generisches Verkehrssystem mit einem darauf aufbauenden Wirkungsmodell entwickelt.

Das Verkehrssystem und das Wirkungsmodell bilden die sachliche Basis um Wirkungszusammenhänge zwischen Schlüsseltechnologien und Verkehrssystemen herzuleiten und zu charakterisieren.

6.3.1 Entwicklung generisches Verkehrssystem

Für die vorliegende Fragestellung gilt es ein Verkehrssystem zu entwickeln, welches sich von seinem Aufbau und den Komponenten her eignet die Auswirkungen von Technologien darzustellen.

Das Verkehrssystem soll neben dem physischen Verkehrsgeschehen vor- und nachgelagerte Elemente zur Beschreibung der Einwirkungen und der Auswirkungen auf den physischen Verkehr umfassen. Technologien, die eine Beeinflussung des Verkehrssystems bewirken, stehen ausserhalb des Systems im sogenannten Umsystem.

Das gewählte Verkehrssystem-Modell stellt sich wie in *Abb. 31* als dreistufiges Gebilde. In der Mitte liegt der effektive physische Verkehr als Verkehrs-Geschehen oder - im prozessualen Sinn – als Verkehrs-Abwicklung. Diesem vorgelagert sind Angebot und Nachfrage als Verkehrs-Einwirkungen (Verkehrs-Entstehung, oben), nachgelagert folgen dessen Verkehrs-Auswirkungen mit den Komponenten Ressourcen und Raumstruktur (Verkehrs-Konsequenz, unten) dar. Diese Wirkungen finden innerhalb des Systems statt und sind zu unterscheiden von den Einwirkungen des Umsystems auf das Verkehrssystem.

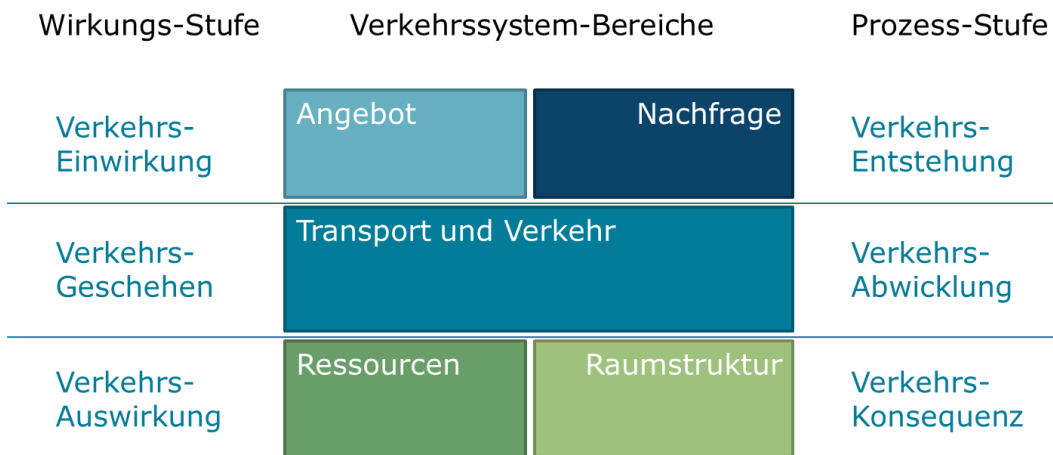


Abb. 31. Verkehrssystem als Modell

Die Verkehrs-Einwirkungen beinhalten die Mechanismen des Verkehrsmarkts – die Entscheidungen im Kopf oder auf dem Papier, bevor Verkehr entsteht. Entsprechend werden Verkehrs-Einwirkungen durch die Komponenten ‚Angebot‘ und ‚Nachfrage‘ des Verkehrsmarkts gebildet. Wo Angebot und Nachfrage aufeinander treffen resultieren Entscheide zum Verzicht auf eine Ortsveränderung (nicht-stattfindender Verkehr) oder Entscheide zum Vollzug einer Ortsveränderung (physisch stattfindender Verkehr) → Verkehrsgeschehen.

Das Verkehrs-Geschehen beschreibt die physisch stattfindenden Güter- und Personen-Bewegungen und –Beförderungen sowie deren Qualitäts-Ausprägungen. Die Elemente des Verkehrs-Geschehens umfassen die Elemente der Verkehrsabwicklung, vom Beginn der Fahrt bis zum Ende. Darin inbegriffen sind Qualitäts-Komponenten wie Leistungsfähigkeit, Transport-Effizienz aber auch Verkehrssicherheit. Aus dem Verkehrs-Geschehen resultieren Konsequenzen für Raum und Umwelt → Verkehrs-Auswirkungen

Die Verkehrs-Auswirkungen beschreiben zeitlich fern oder nah nachgelagerte Effekte des Verkehrsgeschehens. Diese Effekte werden in den beiden Klassen ‚Ressourcen‘ und ‚Raumstruktur‘ erfasst. Quantitative Effekte auf Land, Luft oder Energie, wie Lärm, Ausstoss von Schadstoffen, Flächenbedarf oder Energieverbrauch, werden unter Ressourcen subsummiert, qualitative Effekte auf Orte und Räume, wie Erreichbarkeit oder Siedlungsqualität, unter Raumstruktur. Die Effekte stellen Resultate des Verkehrs-Geschehens dar und beeinflussen selber das Verkehrs-Geschehen in seiner Abwicklung nicht (mehr).

Rekursive Wirkungsprozesse

Die drei Wirkungsstufen folgen keinem linearen Prozess, sondern stehen auf unterschiedliche Weise untereinander in Beziehung. Dabei bilden Ausgangsgrößen selber Eingangsgrößen zu vorangehenden Stufen. In diesem Sinn besteht das Verkehrssystem aus verschiedenen rekursiven Wirkungsprozessen.

Einen inneren rekursiven Prozess bildet die Rückkopplung des Verkehrs-Geschehens auf die Verkehrs-Einwirkung. Zum Beispiel erlaubt eine genügend grosse Leistungsreserve auf einer Bahnlinie einen zusätzlichen Kurs anzubieten (Angebot). Oder ein funktionierendes Verkehrsnetz verleitet dazu Fahrten neu zu unternehmen oder den gleichen Aktivitäten an entfernteren Orten nachzugehen (Nachfrage). Aus diesem Zirkelbezug resultieren Verlagerungs- und Umlagerungs-Effekte von Fahrten und Transporten. Wird zum Beispiel ein Nadelöhr durch eine bauliche Massnahme eliminiert, so erfolgen Routenwahl-Änderungen, bis an der gleichen oder an anderer Stelle ein Nadelöhr entsteht. Diese Effekte sind eher kurzfristig und stehen in der Regel nicht im Zusammenhang mit Veränderungen von Raumstruktur, wie z.B. Wohn- oder Arbeitsort.

Einen äusseren rekursiven Prozess bildet die Rückkopplung der Verkehrs-Auswirkungen auf die Verkehrs-Einwirkungen. Verändert z.B. eine neue Verkehrsverbindung (Angebot) die Erreichbarkeit eines Standorts und dieser wird als Wohnort attraktiver, so führt dies zum Neubau von Siedlungen mit neuen oder zusätzlichen Einwohnern, die ihrerseits neue oder zusätzliche Fahrten erzeugen (Nachfrage). Oder eine neue Autobahnzufahrt (Angebot) verbessert in hohem Masse die Erreichbarkeit, was Logistik-Unternehmen dazu veranlasst neue Zwischenlager einzurichten, welche ihrerseits neue Fahrten oder Verlagerungen von Fahrten generieren (Nachfrage).

Das Verkehrssystem bewegt sich demnach in zwei rekursiven Prozessen: Einem inneren Prozess zwischen Verkehrs-Geschehen und Verkehrs-Einwirkung, und einem äusseren Prozess zwischen Verkehrs-Auswirkung und Verkehrs-Einwirkung. Beiden Prozessen ist gemeinsam, dass sie ihren Angriffspunkt bei der Verkehrs-Einwirkung besitzen.

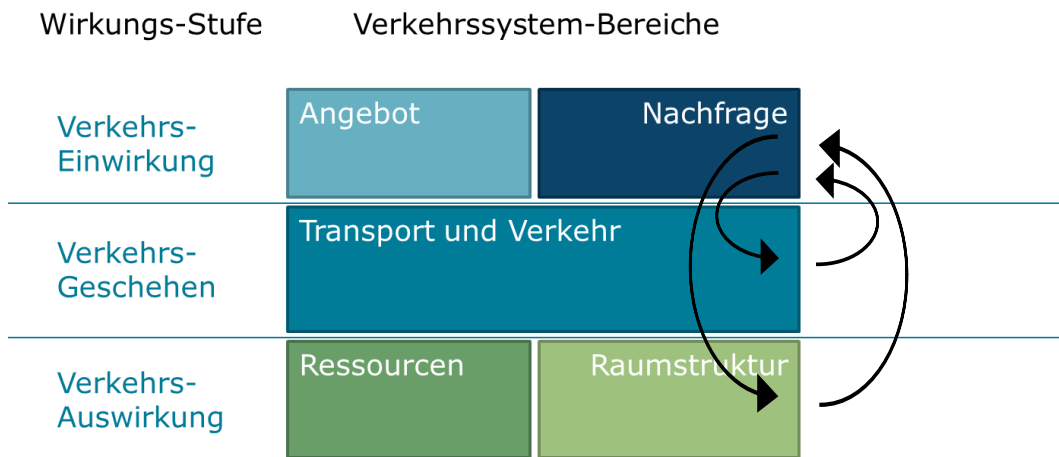


Abb. 32. Innerer und äusserer rekursiver Prozess

Interaktionen zwischen Umsystem und Verkehrs-System

Neben diesen inneren Prozessen haben auch Prozesse im Umsystem Einfluss auf das Verkehrssystem. Generell bilden Angebot und Nachfrage oder auch Ressourcen und Raumstruktur den Empfänger dieser Beziehungen, hingegen nie Transport und Verkehr selber.

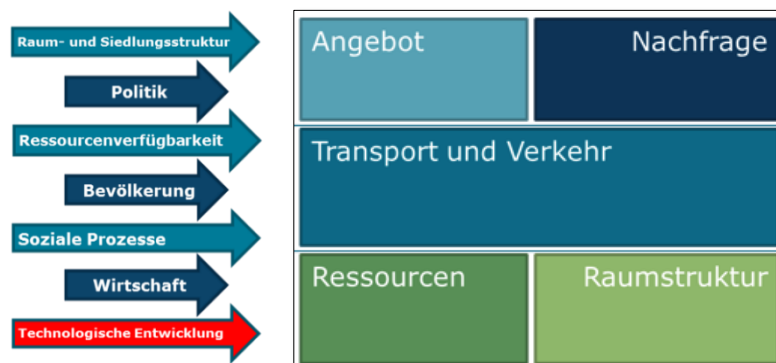


Abb. 33. Verkehrssystem und Umsystem

Die Elemente des Umsystems sind aus der Studie Technologie Assessment übernommen (in der obigen Abbildung Pfeile von links). Demnach stellen auch technologische Entwicklungen ein Element des Umsystems dar. Entsprechend ihrer Darstellung als Blockpfeile stellen Elemente des Umsystems externe Einflüsse auf die Gesamtheit des Verkehrssystems dar.

6.3.2 Verkehrssystem für Personen- und Güterverkehr

Das im vorigen Kapitel eingeführte Verkehrssystem ist generisch und besitzt für alle Verkehrsarten Gültigkeit. Das Zusammenspiel von Verkehrsmarkt, bestehend aus Angebot und Nachfrage, als Einwirkung auf den physisch stattfindenden Verkehr und dessen Auswirkung auf Ressourcen und Raumstruktur stellen einen sozio-technischen Grundmechanismus dar. Er ist in dieser Form auch auf nicht-physische Verkehre (z.B. Datenverkehr) anwendbar.

Innerhalb des physischen Verkehrs können von ihren Gesetzmässigkeiten her zwei unterschiedliche Ausprägung unterschieden werden: Personenverkehr und Güterverkehr. Der Personenverkehr beschreibt die physische Ortsveränderung von Menschen, während der Güterverkehr die physische Ortsveränderung von Dingen umfasst. Unter den Dingen werden aber auch Tiere und Pflanzen subsummiert.

Die Gesetzmässigkeit zwischen diesen beiden Verkehren unterscheidet sich im Wesentlichen dadurch, dass beim Personenverkehr die beförderte Einheit selber (der Mensch) seine physische Ortsveränderung bestimmt, während beim Güterverkehr nicht die beförderte Einheit, sondern ein Mensch oder ein übergeordneter Algorithmus über seine physische Ortsveränderung bestimmt.

Prozessual betrachtet erfolgt die Verkehrs-Entstehung beim Personenverkehr durch (menschzentrierte) Angebots- und/oder Nachfrage-Wünsche. So entsteht im Personenverkehr aus einer (menschzentrierten) Aktivität der Wunsch eine Fahrt zu einer spezifischen Zeit durchzuführen (Angebots-Wunsch) oder eine angebotene (ÖV-)Fahrt zu nutzen (Nachfrage-Wunsch).

Die Verkehrs-Entstehung beim Güterverkehr verhält sich hingegen anders. Hier erfolgt eine Fahrt nicht aus dem ‚ding-eigenen‘ Wunsch nach Ortsveränderung, sondern aus einem (menschzentrierten) Entscheid ein Ding zu transportieren. Der Transport-Entscheid selber wird wieder durch Angebot- und Nachfrage-Elemente bestimmt.

Diese prozessuale Differenz äussert sich in unterschiedlichen Ausprägungen der Verkehrs-Abwicklung. So kann beim Personenverkehr die Ortsveränderung in Ausnahmefällen einen Selbstzweck darstellen (z.B. Flanieren, Mountainbiken, Fahrt ins Blaue), während beim Güterverkehr die Ortsveränderung stets einen Prozessteil einer übergeordneten Geschäftsabwicklung darstellt (z.B. Transport von Gemüse).

Bei der Verkehrs-Konsequenz – um in der prozessualen Betrachtung zu bleiben – zeigen sich zwar aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsabwicklungen ebenfalls Unterschiede, die Auswirkungen des physisch stattfindenden Güter- und Personenverkehrs auf Ressourcen und Raumstruktur folgen aber den gleichen Gesetzmässigkeiten. So hat ein Mehr an Güterverkehr grundsätzlich analoge Auswirkungen auf Emissionen oder Bodenbeanspruchung wie ein Mehr an Personenverkehr, unter sonst gleichen Bedingungen.

Komponenten des Verkehrssystems

Personenverkehr und Güterverkehr enthalten pro Wirkungsstufe und Verkehrssystem-Bereich unterschiedliche Komponenten. Diese werden in der Folge eingeführt.

Beim Personenverkehr stammen die Komponenten für Angebot und Nachfrage aus der klassischen Verkehrsmarktbetrachtung, wo hingegen beim Güterverkehr auf der Nachfrageseite Elemente der Logistik diese Komponenten beschreiben. Bei Transport und Verkehr entsprechen die Komponenten den Leistungsgrössen der Verkehrsträger und unterscheiden sich zwischen Personen- und Güterverkehr nur in der Bezeichnung (Transport = Güterverkehr; Verkehr = Personenverkehr oder Gesamtverkehr). Die Komponenten für Ressourcen und Raumstruktur schliesslich sind bei Personen- und Güterverkehr identisch und beschreiben Indikatoren von Nutzung und Verbrauch.

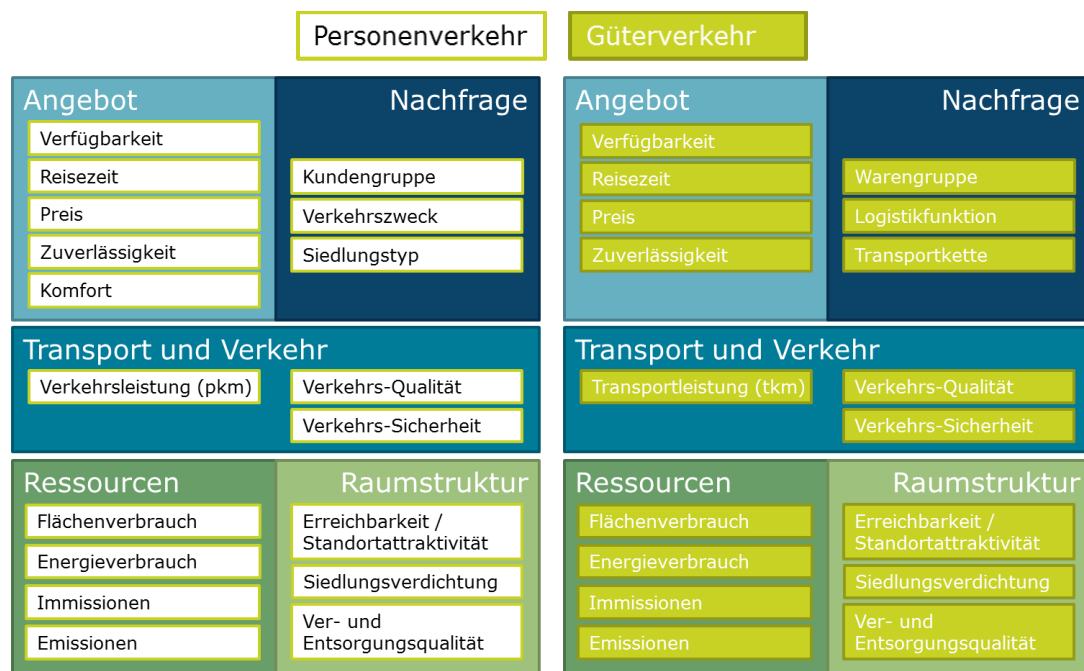


Abb. 34. Komponenten des Verkehrssystems, getrennt nach Personen- und Güterverkehr

Die Komponenten des Angebots sind die zeitliche und örtliche Verfügbarkeit (Abfahrtszeitpunkt, Abfahrtsort), die Reisezeit (Tür-zu-Tür), der Preis wie auch die Zuverlässigkeit (Pünktlichkeit). Ergänzend kommt beim Personenverkehr noch der Komfort (Bequemlichkeit, Witterungsschutz) als Angebots-Komponente dazu.

Die Komponenten der Nachfrage unterscheiden sich zwischen Personenverkehr und Güterverkehr deutlich, können aber auf verwandte Punkte zurückgeführt werden. So entspricht die Kundengruppe (Kinder, Erwerbstätige, Senioren,...) beim Personenverkehr der Warengruppe, unterschieden nach wichtigen Anforderungen im Transport, (Kühlgüter, Wertgegenstände, Massengüter,...) beim Güterverkehr. Ebenso besteht eine Verwandtschaft zwischen Verkehrszweck (Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Geschäftsverkehr und Freizeitverkehr) beim Personenverkehr und Logistikkfunktion (Transport, Umschlag, Lagerung, Werksverkehr,...) beim Güterverkehr. Dem gegenüber besitzen Siedlungstyp (Stadt, Agglomeration, ländlicher Raum, Bergregion) beim Personenverkehr und Transportkette (Vorlauf, Hauptlauf, Nachlauf, Direktverkehr) beim Güterverkehr nur indirekte Verwandtschaften.

In Transport und Verkehr werden nur die Komponenten hinsichtlich Verkehrsmenge nach Personen- und Güterverkehr unterschiedlich beschrieben: Verkehrs-Leistung (Personen-Kilometer) und Transport-Leistung (Tonnen-Kilometer). Die Komponenten zur Beschreibung der Verkehrs-Funktionalität sind hingegen bei Personen- und Güterverkehr identisch: Verkehrs-Qualität (Mass für ungehindertes Vorwärtskommen) und Verkehrs-Sicherheit (Unversehrtheit).

Die Ressourcen beinhalten als Komponenten Indikatoren der Umweltbeeinträchtigung. Neben Emissionen (Schadstoffe, Feinstaubpartikel, CO₂), Immissionen (Lärm) und Energieverbrauch (Elektrizität, Diesel,...) bildet auch der Flächenverbrauch (Bodenbeanspruchung, Flächenverbrauch) eine Komponente der Ressourcen.

Die Raumstruktur wird hingegen durch Komponenten repräsentiert, welche die Nutzung des Raums durch den Menschen und dessen Qualität beschreiben. Einerseits Erreichbarkeit / Standortattraktivität (Verkehrsgunst eines Standorts) und Siedlungsqualität (Verdichtung, Zersiedelung) als Konsequenzen des Personenverkehrs und die Ver- und Entsorgungsqualität (Zuführen und Abführen von Einkauf, Abfall, Wasser,...) als Konsequenz des Güterverkehrs. Sie besitzen jedoch auch für beide Verkehrssysteme Gültigkeit.

Verkehrssysteme als Wirkungsmodelle

Die in den beiden Verkehrssystemen eingeführten Komponenten weisen eine hohe begriffliche Verwandtschaft zu den in Kapitel 2.3. eingeführten Komponenten des systemdynamischen Modells aus. Deren Funktion ist jedoch komplett unterschiedlich. Während im systemdynamischen Modell diese Komponenten zur Detektion der Eigenschaften von Technologien und daraus zur Filterung der Schlüsseltechnologien eingesetzt wurden, werden die Komponenten hier zur Detektion der Eigenschaften des Verkehrssystems und zur Erfassung von Wirkungszusammenhängen eingesetzt.

Folglich werden die in den beiden Verkehrssystemen eingeführten Komponenten als Elemente von Wirkungen betrachtet. Neben der groben Beziehung von Angebot und Nachfrage als Einwirkung auf, sowie Ressourcen und Raumstruktur als Auswirkung von Transport und Verkehr lassen sich nun alle Komponenten in Beziehung bringen.

Innerhalb der Verkehrssysteme ergeben solche Wirkungsbeziehungen keine Mehrwerte. Hingegen erlaubt das nach Komponenten aufgebaute Verkehrssystem die Lokalisierung von Einwirkungen aus dem Umsystem auf das Verkehrssystem, indem einzelne Komponenten als Empfänger solcher Einwirkungen detektiert werden können. Damit ist ein Instrument gegeben, um Wirkungen von Technologien auf das Verkehrssystem beschreiben zu können.

6.4 Wirkung Schlüsseltechnologien auf Verkehrssysteme

Die Schlüsseltechnologien stellen als Element des Umweltsystems eine Einwirkung auf das Verkehrssystem dar. Mit dem aus Komponenten bestehenden Verkehrssystem ist die Möglichkeit gegeben, pro Schlüsseltechnologie mögliche Einwirkungen auf Komponenten des Verkehrssystems zu darzustellen.

Die Einwirkung von Schlüsseltechnologien auf Komponenten des Verkehrssystems ist unterschiedlich ausgeprägt. Einerseits können Schlüsseltechnologien auf unterschiedliche Bereiche der Verkehrssysteme einwirken, andererseits können die Einwirkungen direkt oder indirekt sein. Durch diese Segmentierung lassen sich auch die Handlungsfelder der einzelnen Teilprojekte des Forschungspakets positionieren.

Das vorliegende Forschungsprojekt befasst sich mit ‚Auswirkungen‘ von Technologien auf das Verkehrssystem. Damit sind ‚Einwirkungen‘ von Schlüsseltechnologien auf die Verkehrs-Entstehung gemeint, welche ihrerseits auf das Verkehrs-Geschehen einwirken. Dabei wird zwischen direkten und indirekten Wirkungen unterschieden.

Direkte Wirkung bedeutet, dass Schlüsseltechnologien in ihrer ureigenen oder generischen Form ohne Zwischenprodukte oder –formen das Verkehrssystem beeinflussen. Dem gegenüber bedeutet **indirekte Wirkung**, dass Schlüsseltechnologien über ein Produkt, eine Veredelung als Geschäftsmodell oder als weiterführende Technologie auf das Verkehrssystem wirken.

Entscheidend ist, dass in der vorliegenden Forschungsarbeit nur generische Wirkungen behandelt werden. Das bedeutet, dass Wirkungen von Schlüsseltechnologien in der Form erfasst und interpretiert werden, wie sie sich ohne Regulation entfalten würden.

6.4.1 Detektion von Wirkungen

Mit den im vorigen Kapitel eingeführten Verkehrssystemen lassen sich mögliche Wirkungen detektieren. Diese greifen entweder auf Komponenten der Verkehrs-Einwirkungen (Angebot / Nachfrage) oder auf Komponenten der Verkehrs-Auswirkungen (Ressourcen / Raumstruktur).

Im Rahmen eines internen Workshops wurde pro Schlüsseltechnologie erfasst, ob sie eine Einwirkung auf das Verkehrssystem besitzt und welche Komponente den Empfänger dieser Einwirkung darstellt.

Folgende Aspekte erwiesen sich in der Diskussion als essentiell um Wirkungen zielgerichtet detektieren und klassieren zu können:

- **Nur generische Wirkung betrachten:** Für die Detektion von Wirkungen ist unabdingbar, dass Wirkungen nur in ihrer generischen Form (gemäss Konvention oben) betrachtet werden. Daraus resultieren insbesondere bei den Verkehrs-Auswirkungen (Ressourcen, Raumstruktur) Wirkungen, die aktuellen Verkehrspolitischen Zielen oft zuwiderlaufen. Auf der anderen Seite zeigen genau diese Wirkungen auf, wo bei einer Diffusion der Schlüsseltechnologie Regulierungen erforderlich werden könnten.
- **Saubere Unterscheidung von direkten zu indirekten Wirkungen:** Für die Detektion der Relevanz einer Schlüsseltechnologie ist unabdingbar, dass zwischen direkten und indirekten Wirkungen (gemäss Konvention oben) sauber getrennt wird. Daraus resultiert insbesondere, dass direkte Wirkungen nur auf Komponenten der Verkehrs-Einwirkung (Angebot, Nachfrage) bestehen können. Komponenten der Verkehrs-Auswirkung (Ressourcen, Raumstruktur) erfahren indessen Wirkungen nie direkt von Schlüsseltechnologien nie direkt, sondern immer von Anwendungen, Produkten oder Geschäftsmodellen, die auf Schlüsseltechnologien basieren.

Die getreue Handhabung dieser zwei Aspekte war herausfordernd. Die daraus abgeleiteten Detektionen führten zu angeregten Diskussionen. Insbesondere die Beschränkung auf die initiale Wirkung hat sich als anspruchsvoll herausgestellt. So können Wirkungen auf die Komponente Raumstruktur immer nur Folgewirkungen sein und nie initiale Wirkungen. Zur besseren Verständlichkeit werden in den folgenden Kapiteln die detektierten (direkten und indirekten) Wirkungen näher erläutert.

Das Resultat dieses Workshops wurde in Form einer Wirkungs-Matrix erfasst. Dabei wird insbesondere erkannt, ob überhaupt eine Wirkung von einer Schlüsseltechnologie auf eine Komponente der Verkehrssysteme besteht. Da sich weder eine direkt noch eine indirekte Wirkung auf die Komponente Raumstruktur ergab, ist diese in der Matrix ausgeblendet.

Kategorie	Schlüsseltechnologie	Personenverkehr			Güterverkehr		
		Angebot	Nachfrage	Ressourcen	Angebot	Nachfrage	Ressourcen
Strassenfahrzeuge	Automatisierte Fahrzeuge	x	x		x		
	Nachhaltige Antriebsenergie			x			x
Infrastruktur	Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	x			x		
Informations- und Kommunikationstechnologien	Robotik						
	Vernetzung	x	x		x	x	
	Künstliche Intelligenz					x	
	Revolutionäre User Devices		x				
	Blockchain	x	x		x	x	
	Virtual & Augmented Reality		x				
sonstige	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren					x	
	Batterietechnologien			x			x

x = direkte Wirkung
x = indirekte Wirkung

Abb. 35. Abstraktion Wirkungen Schlüsseltechnologien auf Verkehrssysteme

6.4.2 Schlüsseltechnologien mit direkten Wirkungen

Aus der Wirkungsmatrix gemäss Abb. 35 können fünf Schlüsseltechnologien insgesamt, bzw. pro Verkehrssystem vier Schlüsseltechnologien detektiert werden, die direkte Wirkungen besitzen. Drei davon wirken bei beiden Verkehrssysteme in der gleichen Form, zwei wirken nur je bei einem Verkehrssystem. Diese Schlüsseltechnologien werden als relevant bezeichnet:

- *Automatisierte Strassenfahrzeuge:* Wirken direkt auf Angebot und Nachfrage von Personenverkehr sowie auf Angebot von Güterverkehr
- *Neue Verkehrssysteme und -infrastrukturen:* Wirken direkt auf Angebot von Personen- und Güterverkehr

- *Virtual & Augmented Reality*: Wirkt direkt auf Nachfrage beim Personenverkehr
- *Automatisierte Luftfahrzeuge*: Wirken direkt auf Angebot und Nachfrage von Personenverkehr sowie auf Angebot von Güterverkehr
- *3D-Druck / adaptive Fertigungssysteme*: Wirkt direkt auf Nachfrage beim Güterverkehr

Die Wirkungen dieser fünf relevanten Schlüsseltechnologien werden im nächsten Kapitel anhand individueller Wirkungsmodelle vertieft.

Die fünf relevanten Schlüsseltechnologien wirken alle entweder direkt auf das Angebot oder direkt die auf Nachfrage. Hingegen erfolgen keine Wirkungen der Schlüsseltechnologien direkt auf Ressourcen oder Raumstruktur. In der Übersicht werden die direkten Wirkungen dieser relevanten Schlüsseltechnologien stichwortartig wiedergegeben:

Relevante Schlüsseltechnologie	Personenverkehr		Güterverkehr	
	Angebot	Nachfrage	Angebot	Nachfrage
Automatisierte Fahrzeuge	Neue Zwischenform zwischen MIV und ÖV	Erschließung neuer Kundengruppen (Kinder, Senioren)	Lieferroboter, selbstfahrender Güterwagen, cargo-shuttle	
Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	Hyperloop, MIV-Systeme in +1 oder -1		Cargo Souterrain, unterirdische Ver- und Entsorgung, induktive Energieversorgung	
Virtual & Augmented Reality		Substitution Fahrweg durch Virtuelle Konferenz		
Automatisierte Flugobjekte	Volocopter, luftbasierte Punkt-zu-Punkt-Angebote	Erschließung spezifischer Siedlungstypen (Städte, Bergregionen)	Drohnen, luftbasierte Punkt-zu-Punkt-Angebote	
3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren				Einfluss auf Ort von Produktion und Konsum, räumliche Verteilung der Nachfrage

Abb. 36. Direkte Wirkungen relevante Schlüsseltechnologien auf Verkehrssystem

6.4.3 Schlüsseltechnologien mit indirekten Wirkungen

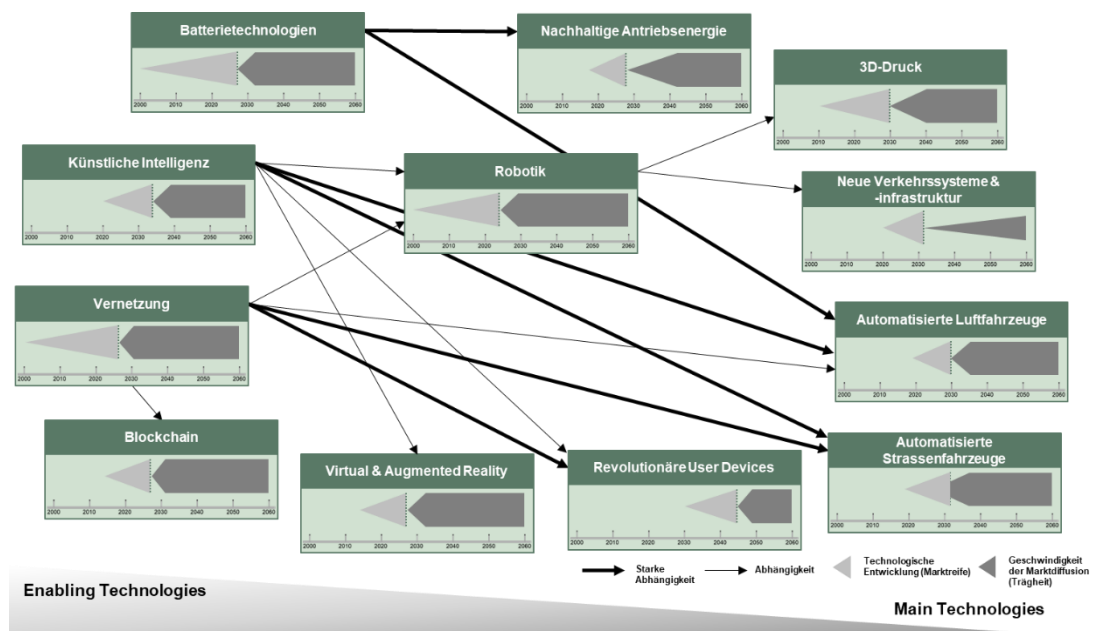
Die indirekten Wirkungen zwischen (nicht relevanten) Schlüsseltechnologien und Verkehrssystemen werden in den Wirkungsmodellen (Kap 6.5) nicht weiter vertieft. Die Wirkungszusammenhänge werden folgend in gestraffter Form skizziert.

- *Nachhaltige Antriebssysteme und Batterie-Technologien*: Diese beiden Schlüsseltechnologien führen zu Anwendungen, welche ihrerseits direkt auf Ressourcen wirken. So bilden beide Schlüsseltechnologien die Basis für z.B. Elektrofahrzeuge. Diese haben keine direkten Wirkungen auf Angebot und Nachfrage der Verkehrssysteme, Elektrofahrzeuge stellen kein neues Angebot dar, welches mit anderen Antriebsformen so nicht gegeben wäre. Ebenso erzeugen sie keine Nachfrage, welche mit konventionellen Fahrzeugen so nicht befriedigt werden könnte. Sie stellen ‚lediglich‘ eine direkte Wirkung auf die Komponenten ‚Energieverbrauch‘ und ‚Emissionen‘ dar, indem sie ihre Energie in einer alternativen Form beziehen und weniger CO₂ und Schadstoffe ausstossen. In diesem Sinn besitzen diese beiden Schlüsseltechnologien – über Elektrofahrzeuge – eine indirekte Wirkung auf das Verkehrssystem.
- *Vernetzung*: Diese Schlüsseltechnologie wirkt indirekt auf Angebot und Nachfrage. Durch Vernetzung von Fahrzeugen untereinander oder zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur können Verbesserungen der Leistungsfähigkeiten von Verkehrsträgern (Strassen, Schienen, ...) resultieren. Höhere Kapazitäten erlauben zusätzliche Angebote, leistungsfähige Verkehrsträger generieren ihrerseits aber auch zusätzliche Nachfrage. Insofern besitzt ‚Vernetzung‘ eine indirekte Wirkung auf Angebot und Nachfrage. Ebenso – aber im Verhältnis dazu untergeordnet – wirkt ‚Vernetzung‘ indirekt auch auf Komponenten wie Verkehrs-Qualität, Verkehrs-Sicherheit oder Energie-Verbrauch.
- *Künstliche Intelligenz*: Diese Schlüsseltechnologie wirkt indirekt auf den Bereich Nachfrage beim Güterverkehr. Durch künstliche Intelligenz können Logistikketten und Gütertransport

effizienter den Produktionsprozessen angepasst werden. Die Güterverkehrs-Angebote selber werden davon nicht beeinflusst, aber infolge der höheren Effizienz wird die Nachfrage nach intelligenten Gütertransporten beeinflusst. Insofern wirkt künstliche Intelligenz indirekt auf die Nachfrage.

- **Revolutionäre Devices:** Diese Schlüsseltechnologie wirkt indirekt auf den Bereich Nachfrage beim Personenverkehr. Mit neuartigen User-Devices wird sich der Zugang zu Mobilitäts-Dienstleistungen vereinfachen und verändern. Die Nutzung dieser Mobilitäts-Dienstleistungen wirkt direkt auf die Nachfrage. Revolutionäre Devices als Zugangs-Vermittler zu solchen Dienstleistungen wirken somit indirekt auf die Nachfrage.
- **Blockchain:** Diese Schlüsseltechnologie wirkt indirekt auf Angebot und Nachfrage. Wie bereits oben ausgeführt wirken nicht die Blockchain selber, sondern auf Blockchain basierende Technologien direkt auf die Verkehrssysteme. So können auf Blockchain basierende Bezahlssysteme die Angebotsseite beeinflussen. Oder Blockchain ermöglicht Mobilitäts-Dienstleistungen mit höherer Akzeptanz, welche ihrerseits direkt Auswirkungen auf die Nachfrageseite bewirken. Blockchain selber wirkt somit indirekt auf Angebot und Nachfrage.
- **Robotik:** Diese Schlüsseltechnologie besitzt weder direkte noch indirekte Wirkungen auf das Verkehrssystem, sondern bildet als Enabling Technology die Basis für Schlüsseltechnologien, die auf das Verkehrssystem wirken. Den naheliegendsten Bezug zum Verkehrssystem ergibt sich beim Güterverkehr, wo Robotik-Elemente Bestandteile von Lager-Infrastrukturen bilden.

Die Reduktion der Schlüsseltechnologien auf fünf relevante Schlüsseltechnologien mit direkten Wirkungen auf das Verkehrssystem lässt sich auch aus der Abhängigkeits-Matrix der Schlüsseltechnologien aus Kapitel 5.3 (Abbildung 24) herleiten.



Wiederholung Abbildung 24 aus Kap 5.3

Die aus der Gegenüberstellung als relevant evaluierten Schlüsseltechnologien entsprechen weitgehend den ‚Main Technologies‘. Dies ist einleuchtend, da Main Technologies am ehesten direkt auf Systeme wirken können. Mit einer Ausnahme: Virtual & Augmented Reality wird aufgrund ihrer direkten Nachfragewirkung von Virtual Reality als relevante Schlüsseltechnologie betrachtet, obwohl sie in der Abhängigkeits-Matrix als Enabling Technology klassiert ist. Zu Gunsten einer begrifflichen Vereinfachung wird in der Folge nur noch die Bezeichnung ‚Main Technologies‘ für die relevanten Schlüsseltechnologien und ‚Enabling Technologies‘ für die restlichen Schlüsseltechnologien verwendet.

6.5 Wirkungsmodelle nach Schlüsseltechnologien

Die konkreten Wirkungen der fünf Main Technologies auf die Verkehrssysteme werden in diesem Kapitel vertieft betrachtet. Die Erfassung der Wirkungen erfolgt gemäss den in Kapitel 6.2 eingeführten Konventionen in Form von Wirkungsmodellen.

In Anwendung der Konventionen werden für die Wirkungsmodellierung folgende Darstellungsregeln definiert:

- Einflüsse des Umsystems auf das Verkehrssystem werden als Blockpfeile mit Richtung und Vorzeichen dargestellt. Sie stellen die Primärwirkung dar.
- Wirkungen innerhalb des Verkehrssystems werden als Pfeile mit Richtung und Vorzeichen dargestellt. Sie stellen Sekundärwirkungen dar.
- Weitergehende Wirkungen (vom Empfänger einer Sekundärwirkung) werden als Folgewirkungen bezeichnet. Sie werden mit einem gestrichelten Pfeil dargestellt. Mögliche weitere Folgewirkungen werden nicht dargestellt.
- Empfänger von Primärwirkungen sowie Elemente von Sekundär- und Folgewirkungen (Ursache oder Empfänger) sind Komponenten des Verkehrssystems.
- Ein Plus- oder Verbesserungs-Vorzeichen bedeutet, dass die Wirkung zu einer Zunahme bzw. Verbesserung der Empfänger-Komponente führt, ein Minus- oder Verschlechterungs-Vorzeichen steht für eine Abnahme oder Verschlechterung.
- Es werden nur noch Komponenten dargestellt, welche Elemente einer Wirkung sind.

Für ein fiktives Beispiel, bei dem ein Einfluss aus dem Umsystem direkt zu einem besseren (da tieferen) Angebots-Preis führt (Primärwirkung), dadurch innerhalb des Verkehrssystems zusätzliche Nachfrage generiert wird (Sekundärwirkung), welche ihrerseits zu einer Zunahme der Verkehrsleistung führt (Folgewirkung), würde das Wirkungsmodell folgende Darstellung ergeben:

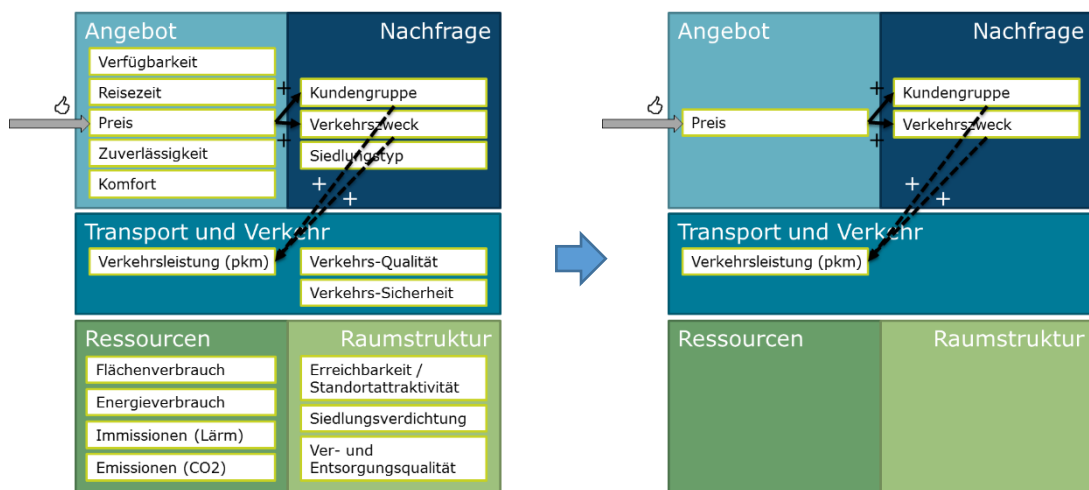


Abb. 37. Beispielhafte Darstellung von Wirkungen als Wirkungsmodell

Nach diesem Muster werden die Wirkungsmodelle der relevanten Schlüsseltechnologien hergeleitet und in der Folge beschrieben. Wo erforderlich, wird zwischen der Ausprägung im Verkehrssystem Personenverkehr und derjenigen im Verkehrssysteme Güterverkehr unterschieden.

Zeitliche Dimension von Wirkungen

In Kapitel 5 wurde mit der Diffusion der Schlüsseltechnologien eine zeitliche Dimension eingeführt. Diese gilt für die Einwirkung auf die Verkehrssysteme und dient als Indikator, mit welcher Trägheit eine Technologie zu einer Wirkung beim Verkehrssystem führen kann. Eine zeitliche Dimension der (Sekundär- und Folge-)Wirkungen im Verkehrssystem hingegen bildet keinen Gegenstand dieser Arbeit.

Diese wären aus der Erfahrung heraus grob abzuschätzen. So führen erfahrungsgemäss Veränderungen im Angebot in relativ kurzer Zeit zu Reaktionen auf der Nachfrageseite. So wäre zu erwarten, dass die Eröffnung eines Hyperloops ähnlich schnelle Nachfragewirkungen zeigen würden, wie dazumal bei der Eröffnung des Lötschberg-Basistunnels die neuen Fernverkehrs-Angebote zwischen der Region Wallis und der Region Bern.

Gemäss der dem ganzen Forschungspaket zugrundeliegenden Aufgabenstellung bilden die Wirkungsmodelle nur den Endzustand 2060 ab. Zwischenzustände, die von ihrer Wirkung her andere Effekte ergeben würden, werden nicht berücksichtigt. So sind Experten sich einig, dass automatisierte Strassenfahrzeuge in einem Zwischenzustand (bestehend aus einem Mix von konventionellen und automatisierten Fahrzeugen) zu einer tieferen Verkehrs-Qualität führen, als ein Endzustand mit nur noch automatisierten Fahrzeugen. Diese Zwischenzustände werden nicht als Wirkungsmodelle skizziert, aber bei den Ausführungen pro Schlüsseltechnologie beschrieben.

6.5.1 Automatisierte Strassenfahrzeuge

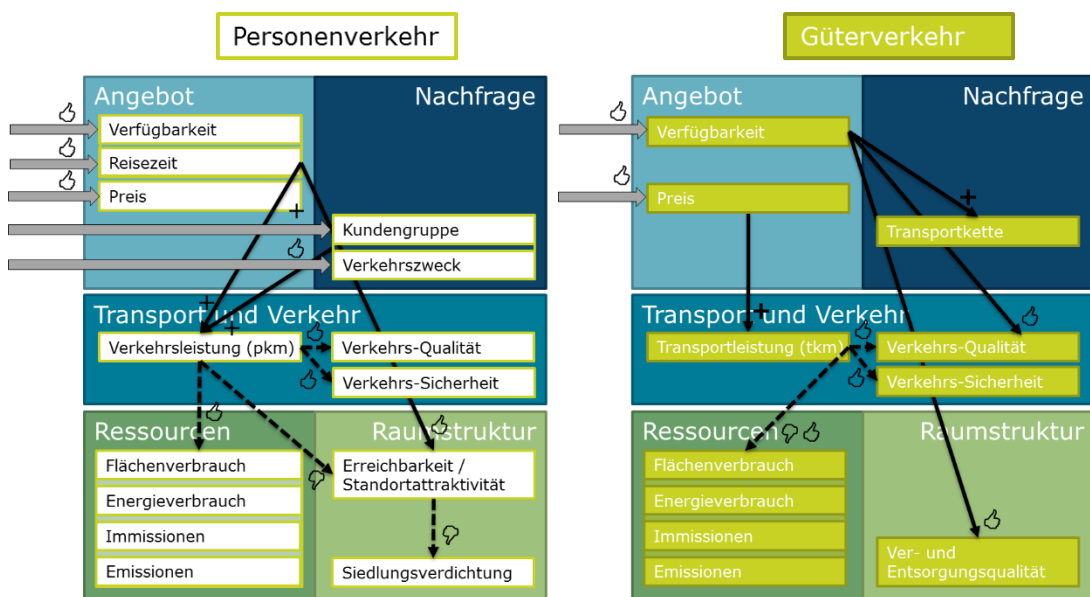


Abb. 38. Wirkungsmodell zu Schlüsseltechnologie ‚Automatisierte Strassenfahrzeuge‘

Personenverkehr

Automatisierte Strassenfahrzeuge können sowohl im Kontext von MIV wie auch von ÖV gesehen werden. Im ÖV bewirkt die Automatisierung heutiger Fahrzeuge keinen Impact auf das Verkehrssystem; mit Ausnahme des Preises verändert sich an den Gesetzmässigkeiten im ÖV nichts. Ebenso würde im MIV die Automatisierung von nach wie vor privat genutzten Fahrzeugen kaum Wirkungen auf das Verkehrssystem ergeben. Gemäss aktuellen Studien soll für diesen Fall sogar die Komponente ‚Preis‘ kaum wirksam sein (Bösch et al. 2018).

Erst die Einführung neuer automatisierter und individuell nutzbarer Fahrzeugtypen würde eine Veränderung ergeben, für den ÖV wie für den MIV. So wäre denkbar, dass sich kleine automatisierte Strassenfahrzeuge als zusätzliche Angebote des ÖV etablieren – im Sinn eines ‚öffentlichen Individualverkehrs (ÖIV)‘. Dies hätte Wirkungen sowohl bei heutigen ÖV- wie auch bei heutigen MIV-Kunden und wäre somit auf das Verkehrssystem wirksam. Da dies den interessantesten Fall darstellt, begrenzt sich unser Wirkungsmodell auf solche automatisierte ÖIV-Fahrzeuge.

Automatisierte ÖIV-Fahrzeuge vermögen auf der Nachfrageseite neue Kundengruppen (Kinder, Senioren) zu erschliessen und führen zu Fahrten unterschiedlicher Zwecke (Ausbildung, Freizeit, Einkaufen), die sonst nicht erfolgen würden. Auf der Angebotsseite ergeben sich mit automatisierten ÖIV-Fahrzeugen für den bisherigen ÖV-Kunden grosse Verbesserungen hinsichtlich örtlicher und zeitlicher Verfügbarkeit, aber auch hinsichtlich Reisezeit. Für den bisherigen MIV-Kunden ergeben sich preisliche Vorteile, jedoch auf Kosten kleiner Abstriche bei Verfügbarkeit und Reisezeit. Die Angebotsseitigen und nachfrageseitigen Effekte führen gemeinsam zu einer Zunahme der Verkehrsleistung (Personen-Kilometer).

Ob aus der Zunahme der Verkehrsleistung eine Zunahme oder Abnahme der Verkehrs-Qualität entsteht (Stau), hängt davon ab, ob die ÖIV-Fahrzeuge Fahrten bündeln (Pooling) oder individuell abwickeln (im Sinne von heutigen Taxis). Ebenso ist die Frage nach Zunahme oder Abnahme der Verkehrs-Qualität davon abhängig, ob nur noch automatisierte Strassenfahrzeuge verkehren, oder diese sich den Strassenkörper mit konventionellen Fahrzeugen teilen.

Wie in der Initialstudie des ASTRA zu Automatisiertem Fahren ausgeführt (ASTRA 2017b) darf für den Zustand einer vollkommenen Automatisierung davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge zu einer verbesserten Ausnutzung der Verkehrsfläche führen, so dass mehr Verkehr auf der gleichen Fläche bewältigt werden kann. Für das Wirkungsmodell wird dieser Fall hinterlegt. Hingegen wird angenommen, dass eine Mischung von kommerziellen und automatisierten Fahrzeugen infolge der defensiven Sicherheitsabstände automatisierter Fahrzeuge zu einer Verschlechterung der Verkehrsqualität und auch der Verkehrssicherheit führt.

Weiter bewirkt der Mehrverkehr als Folgewirkung höhere Ressourcenbedarfe, wobei je nach Ausprägung der Automatisierung diese positiv wie auch negativ ausfallen könnten. Z.B. könnte der Flächenbedarf an Strassen mit einer vollständigen Automatisierung sinken, hingegen könnte eine Teilautomatisierung den Bedarf nach zusätzlichen (getrennten) Fahrstreifen für automatisierte und konventionelle Fahrzeuge zur Folge haben. Unabhängig des Automatisierungsgrads ist aber mit einer Steigerung des Energieverbrauchs zu rechnen. Je nach Antriebsform sind damit auch negative Wirkungen hinsichtlich Emissionen und Immissionen verbunden.

Positiv für die beiden Bereiche ‚Transport und Verkehr‘ und ‚Ressourcen‘ wären automatisierte Strassenfahrzeuge dann, wenn nur noch solche verkehren (Kein Mischbetrieb) und sie einerseits Fahrten bündelten (Pooling) und andererseits mit emissionsarmen und energiewirksamen Antrieben verkehren. Für den Endzustand wird von einer solchen Situation ausgegangen.

Bei der Raumstruktur ergibt sich durch die Verbesserungen auf Angebotsseite eine Verbesserung der Erreichbarkeit und damit der Standortattraktivität auch von peripheren Siedlungsräumen. Auf der anderen Seite bewirkt die Zunahme der Verkehrsleistung eine Abnahme der Standortattraktivität für alle, die an mehrbelasteten Strassenräumen wohnen. Dies führt seinerseits zu einem weiteren Druck auf periphere Räume auszuweichen. Ohne regulierende Eingriffe führend diese Mechanismen zu einem erhöhten Druck auf den ländlichen Raum und begünstigt eine Zersiedelung, bzw. läuft der planerischen Absicht nach Siedlungsverdichtung zuwider.

Güterverkehr

Automatisierte Strassenfahrzeuge im Güterverkehr beeinflussen massgeblich die Verfügbarkeit von Gütertransporten, es fallen zeitliche Restriktionen weg, da automatisiertes Fahren stetige und gut vorausberechenbare Transporte ermöglicht. Es werden neue Möglichkeiten in der Transportkette geschaffen, die darauf beruhen, dass zeitlich unabhängig eine permanente Lo-

gistik ermöglicht wird. Fahrende Hubs und Kleinstransporter, wie Bodendrohnen und Lieferroboter, werden im Verkehrssystem neu integriert. Dadurch werden auf der Nachfrageseite Direktverkehre kleinerer Sendungsgrößen rentabel, aber auch Hub-Verkehre können bei einem hohen Automatisierungsgrad schnell und kostengünstig abgewickelt werden, da der Fahrer wegfällt. Gütertransporte werden attraktiver und zuverlässiger. Insgesamt wird die Transportleistung deutlich ansteigen und den Druck auf Qualität und Sicherheit im Verkehr erhöhen aber diese auch verbessern.

Die automatisierten Transportoptionen haben auch einen Einfluss auf die Art der nachgefragten Sendungen. Verstärkt werden kleinere Chargen bei Konsumgütern sowie in der Entsorgung nachgefragt. Eine Bündelung von Sendungen findet senderbezogen statt, Empfänger können individualisiert auf der letzten Meile angefahren werden. Die hohe Transportnachfrage wird weiter verstärkt dadurch, dass die Automatisierung im Güterverkehr zu einer Abnahme der Transportpreise führt. Auf die Ressourcen hat dies negative Auswirkungen.

Die zeitlich wesentlich flexiblere Logistik wird sich positiv auf die Ver- und Entsorgungsqualität auswirken. Dienstleistungen können schneller, häufiger und günstiger angeboten werden.

6.5.2 Neue Verkehrssysteme/-infrastrukturen

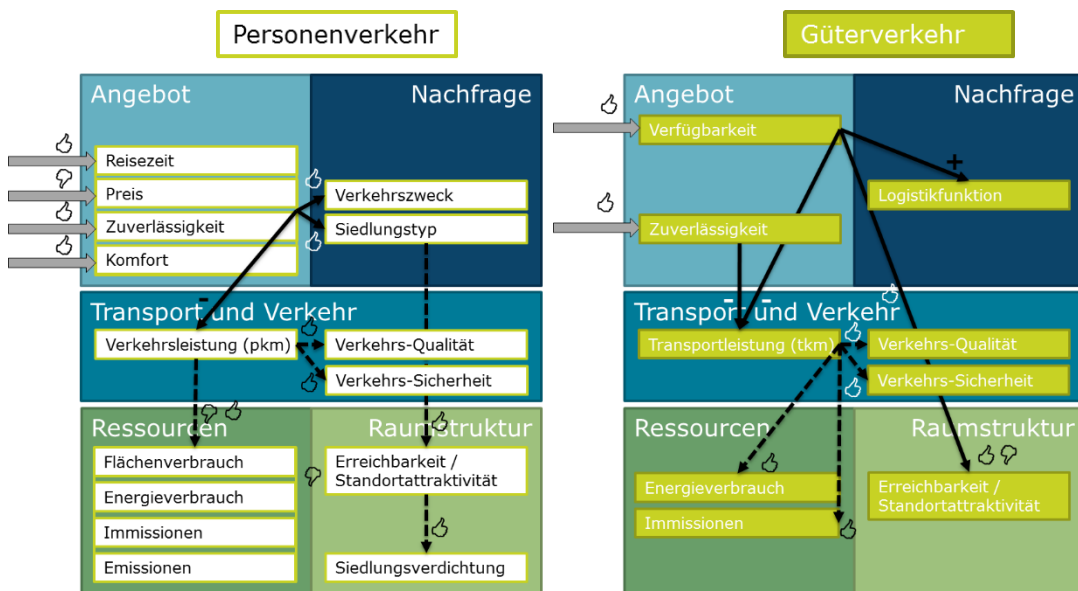


Abb. 39. Wirkungsmotivierung zu Schlüsseltechnologie 'Neue Verkehrssysteme/-infrastrukturen'

Personenverkehr

Neue technische Verkehrssysteme oder -Infrastrukturen, wie Hyperloop oder Metrosysteme, bewegen sich unterirdisch oder oberirdisch und damit weitgehend isoliert im ungestörten Raum. Dadurch erreichen solche Systeme grosse Verbesserungen hinsichtlich Reisezeit und Zuverlässigkeit, aber auch Reisekomfort. Die grossen Infrastrukturaufwendungen führen generisch betrachtet zu hohen Verkehrswegekosten und damit zu höheren Nutzerpreisen. Die Vorteile überwiegen hingegen, so dass mit solchen Systemen insbesondere die Verkehrszwecke Arbeits- und Nutzverkehr profitieren. Da solche Systeme aufgrund ihrer Infrastruktur-Intensivität als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufgebaut sind, werden damit vor allem bevölkerungsintensive Siedlungstypen wie Städte bedient. Für diese wird die Erreichbarkeit und die Standortqualität stark verbessert, was zu einer (aus Sicht Raumplanung gewünschten) Stärkung der verdichteten Räume führt.

Durch die Verlagerung eines Teils des Verkehrs unter oder über die Oberfläche werden an der Oberfläche Kapazitäten im Landverkehr frei, was dort zu einer Abnahme der Verkehrsleistung

führt und eine positive Wirkung auf Verkehrs-Qualität und Verkehrs-Sicherheit nach sich zieht. Ebenso verringert sich der Flächenbedarf an der Oberfläche. In der Summe aller Verkehre (Oberfläche + Unter- und Oberirdisch) nimmt die Verkehrsleistung jedoch zu. Da die neuen Infrastrukturen in isolierten Räumen operieren, resultiert aber auch dort eine positive Wirkung auf Verkehrs-Qualität und Verkehrs-Sicherheit.

Bezogen auf die weiteren Ressourcenkomponenten werden neue Verkehrs-Systeme zu einem erhöhten Energieverbrauch führen. Hinsichtlich Lärm ist die Wirkung von der Hoch- oder Tief-Lage der Infrastruktur abhängig. Hingegen darf davon ausgegangen werden, dass solche Systeme emissionsärmer funktionieren.

Güterverkehr

Güterverkehr auf neuen Infrastrukturen, wie z.B. im Untergrund auf automatisierten Fördersystemen, führt zu starken Veränderungen im Angebot. Transporte werden in der Regel jederzeit verfügbar sein. Die zeitlichen Anforderungen an die Bündelung von Sendungen bei einer verestigten Transportoption sinken, die Lieferströme werden entflochten. Die Zuverlässigkeit und Verfolgbarkeit von Sendungen verbessert sich zudem auch. Dies wirkt sich auch auf die Logistikfunktionen aus, Logistiker erhalten eine zentralere Rolle, mit Möglichkeiten stärkeren Einfluss auf Bündelung und Kommissionierung zu nehmen. Zudem hat eine neue Infrastruktur bei hoher Verlässlichkeit eine starke Puffer- und somit (Zwischen-)Lagerfunktion.

Die ständige Verfügbarkeit von Transportoptionen, mit zuverlässigen, störungsfreien Ankunftszeiten führt zu einer hohen Transportnachfrage auf der neuen Infrastruktur. Dies führt an der Oberfläche zu freiwerdenden Kapazitäten und einer sinkenden Transportleistung. Insgesamt werden die Transportsysteme entlastet. Güter können mit einer neuen Infrastruktur zweckdienlich transportiert werden. Die Qualität der Transporte steigt und die Sicherheit aller Transportsysteme ebenfalls.

Die neue Infrastruktur wird neue Anschlusspunkte aufweisen. Dies führt zu einer Veränderung der Erreichbarkeitsstruktur. Im Güterverkehr wird es hier Gewinner und Verlierer geben, wobei bereits in der Erstellung eine Ausrichtung an bestehender Nachfrage erfolgen wird. Die Entlastung der Oberfläche führt zusätzlich zu geringerem Energieverbrauch und weniger Lärm.

6.5.3 Augmented / Virtual Reality

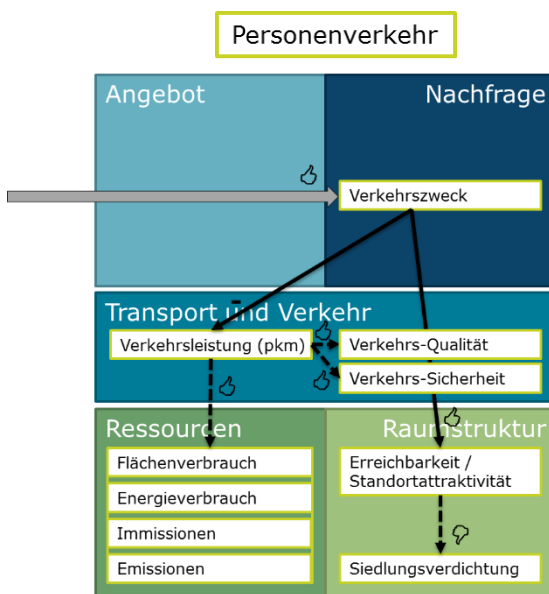


Abb. 40. Wirkungsmodell zu Schlüsseltechnologie „Augmented / Virtual Reality“

Personenverkehr (Virtual / Augmented Reality)

Die Schlüsseltechnologie Virtual Reality stellt eine Besonderheit hinsichtlich Einwirkung auf Verkehrssysteme dar, weil sie generisch das Potenzial besitzt Verkehr zu substituieren. Augmented Reality – mit der Möglichkeit jederzeit die erforderlichen Informationen einbringen zu können – wird zwar zu einer Verbesserung der Verkehrsnutzung führen, hingegen keine wesentlichen Veränderungen des Verkehrssystems bewirken. Aus diesem Grund wird im Wirkungsmodell nur die Schlüsseltechnologie ‚Virtual Reality‘ abgebildet.

Virtual Reality hat einen grossen Einfluss auf alle Verkehrszwecke und verringert die Anzahl Fahrten. Dies führt zu Verbesserungen der Verkehrs-Qualität und Verkehrs-Sicherheit, wirkt sich aber auch positiv auf den Ressourcenbedarf aus.

Wenn virtuelle Räume Aktivitäten ortsunabhängig ermöglichen, stellen Erreichbarkeiten keine räumlichen Differenzierungsmerkmale mehr dar und die Qualitäten der Standorte nivellieren sich. Damit erlangen bisher nicht zentrale Siedlungsräume eine erhöhte Attraktivität, was als Folgewirkung zur Zersiedelung führen kann.

6.5.4 Automatisierte Luftfahrzeuge

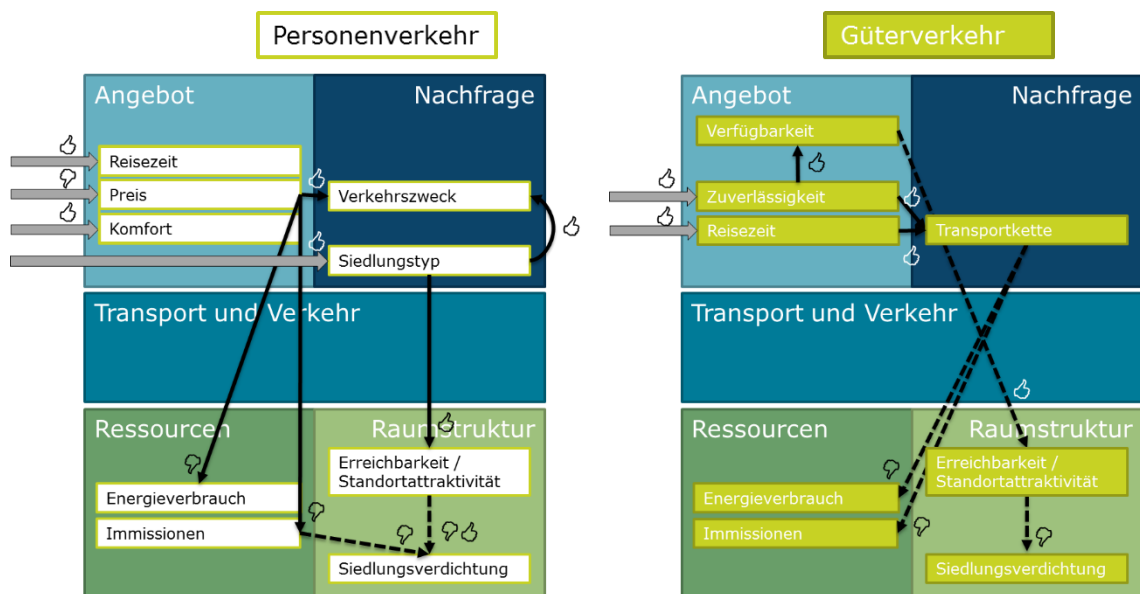


Abb. 41. Wirkungsmodell zu Schlüsseltechnologie ‚Automatisierte Luftfahrzeuge‘

Personenverkehr

Automatisierte Luftfahrzeuge für Personen (Personendrohnen) bewirken mit gezielten Punkt-zu-Punkt-Verbindungen infolge der Fahrzeit-Ersparnis in spezifischen Siedlungstypen, wie Städten oder Bergregionen abseits einer Verkehrsachse, eine zusätzliche Nachfrage. Ebenfalls erhöht ein solches Punkt-zu-Punkt-Angebot den Reise-Komfort. Hingegen darf erwartet werden, dass solche Angebote – unabhängig von den Gestehungskosten und des zugrundeliegenden Geschäftsmodells - nur zu stark höheren Preisen konsumierbar sein werden, weshalb diese Form des Personenverkehrs in den betreffenden Siedlungstypen wohl vor allem den Verkehrszweck ‚Nutzverkehr/Wirtschaftsverkehr‘ ansprechen wird.

Für die genannten Siedlungstypen wird mit automatisierten Luftfahrzeugen die Erreichbarkeit stark verbessert. Dieser Effekt kann in Städten zu einer weiteren Verdichtung führen, während genau der gleiche Effekt in Bergregionen die Erschliessung unterstützt.

Durch die Verlagerung eines Teils des Verkehrs in die Luft werden Kapazitäten im Landverkehr frei. Gemäss Einschätzungen der Experten werden automatisierte Luftfahrzeuge jedoch eine Nischenanwendung bleiben, weshalb der Effekt auf den Bereich Transport und Verkehr vernachlässigbar ist.

Bezogen auf die Ressourcen wird Luftverkehr energieintensiver sein als Landverkehr und erzeugt – auch mit neuen Antriebsformen – neuen Lärm, mit Nachteilen für die Siedlungsqualität. Hinsichtlich Flächenverbrauch wird davon ausgegangen, dass analog zu laufenden Entwicklungen solche Luftfahrzeuge nur punktuelle und keine flächigen Start- und Landeinfrastrukturen benötigen.

Güterverkehr

Die Angebote der Drohnen Transporte ermöglichen den Einbezug einer weiteren Dimension in die Logistik. Die direkten Wege im Luftraum verringern die Transportzeiten und erhöhen im verhältnismässig konfliktfreien Luftraum die Zuverlässigkeit. Dies wirkt sich positiv auf die Verfügbarkeit von Transporten aus, die von weniger externen Störungen beeinflusst wird. Diese Vorteile übersteuern mögliche Einflüsse der Komponente Preis (nicht Kosten), weshalb diese keine Wirkungskomponente darstellt.

In der Transportkette werden Verkehre in der Luft insbesondere für direkte Transporte genutzt, es kommen aber auch neue Konzepte in der Transportkette zum Einsatz. So kann von verschiedenen Standorten im Vorlauf durch Luftfahrzeuge auf einen mobilen Hub geliefert werden, so dass eine gebündelte empfängerbezogene Auslieferung stattfindet. Durch die Flexibilität ohne weitere Infrastruktur transportieren zu können, wird die Erreichbarkeit von vielen Standorten verbessert. Dies führt jedoch indirekt auch zu einem Anreiz disperser Standortverteilung.

Der Einsatz von Luftfahrzeugen verursacht jedoch zusätzlichen Verkehrslärm, der seine Wirkung auch an neu erreichbaren Orten und Ebenen entfaltet. Weiterhin sind Transporte durch die Luft energieintensiver. Auch bei kleinen Transportmengen wird sich dies negativ auswirken.

6.5.5 3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren

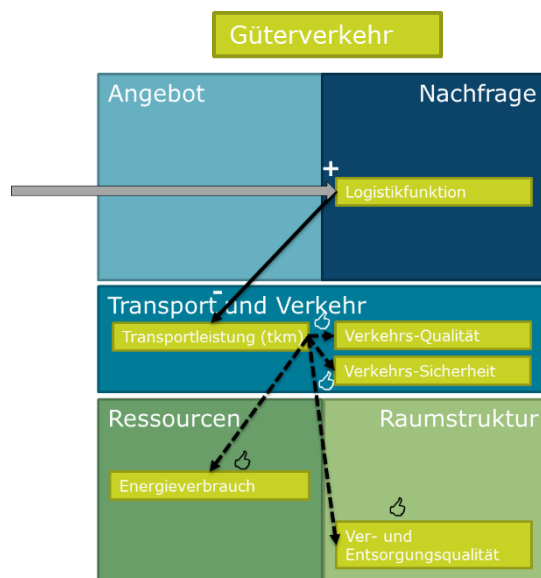


Abb. 42. Wirkungsmodell zu Schlüsseltechnologie ‚3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren‘

Güterverkehr (3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren)

Die Möglichkeit mit Hilfe von neuen Herstellungsverfahren näher an Standorten von Endkunden zu produzieren sowie kleinere Chargengrößen bereitzustellen, schafft eine neue Nachfrage nach Logistikdienstleistungen. So ist neu eine Ausdifferenzierung von Funktionen direkt an Logistikstandorten möglich, die dadurch zu Fertigungsstandorten erweitert werden können. Eine Bündelung von einheitlichen Rohmaterialien in der Belieferung der Fertigungsstandorte wird effizienter möglich sein als die heutigen Transporte von Zwischenprodukten oder Fertigbauteilen. In der Verteilung der Produkte ab den Herstellungsorten werden kleinere Mengen über kürzere Distanzen zeitlich flexibel zugestellt, jedoch nimmt bei individuelleren Produkten die Zustellhäufigkeit ab. Für die Nachfrager resultiert dies in einer Qualitätsverbesserung, da eine individualisierte Ver- und Entsorgung stattfindet.

Diese Effekte werden zu einem Rückgang der Transportleistung führen, was positiv auf Verkehrs-Qualität und Verkehrs-Sicherheit wirkt. Zudem wird insgesamt der Energieverbrauch durch Transporte zurückgehen, da die Transporteffizienz höher ist.

6.5.6 Fazit Wirkungsmodelle

Mit den Wirkungsmodellen der relevanten Schlüsseltechnologien können Grundmechanismen von Wirkungszusammenhängen erkannt werden, die generische Aussagen erlauben. Diese Grundmechanismen sind nicht neu, werden hier aber durch die Herleitung anhand komplett differenzierter Einwirkungen aus den relevanten Schlüsseltechnologien erhärtet.

So sind Verkehrs-Qualität und Verkehrs-Sicherheit immer eine Folgewirkung der Verkehrsleistung, hingegen nie eine direkte Folgewirkung von Angebot oder Nachfrage. Ebenso reagiert Siedlungsverdichtung immer im Schlepptau von Erreichbarkeit und Standortattraktivität.

Dem Gegenüber treten in den Wirkungsmodellen die unterschiedlichen Wirkungszusammenhänge zwischen Personenverkehr und Güterverkehr deutlich hervor. Auch bei sehr ähnlich gelagerten Schlüsseltechnologien, wie automatisierte Luftfahrzeuge, folgen die Wirkungsketten unterschiedlichen Mechanismen. Deshalb ist es für die folgende Quantifizierung der Wirkungen von elementarer Bedeutung, dass die beiden Verkehrsarten gesondert betrachtet werden.

6.6 Intensität der Wirkungen

In den vorhergehenden Kapiteln sind die Wirkungszusammenhänge zwischen Schlüsseltechnologien und Verkehrssysteme deskriptiv erfolgt. Mit Ausnahme der Klassierungen nach direkt – indirekt, bzw. Primär-, Sekundär- und Folge-Wirkung wurden die Wirkungen nicht weiter qualifiziert oder quantifiziert. Dies erfolgt gemeinsam für Angebot und Nachfrage diesem Kapitel.

Als Fortsetzung der deskriptiven Wirkungsbeurteilung werden die Intensitäten der Wirkungen erfasst und grob skaliert. Diese Intensitäten stellen eine weitere Diskretisierung der Wirkungszusammenhänge aus dem Wirkungsmodell dar, besitzen jedoch noch nicht die Aussagekraft einer quantitativen Auswirkungsbeurteilung.

Die Intensitäten werden auf einer Skala zwischen «-3: Starke Abnahme» bis zu «+3: Starke Zunahme» rangiert. Die Leserichtung geht von den Schlüsseltechnologien zu den Beurteilungs-Komponenten, im Sinn: <Schlüsseltechnologie> bewirkt eine <starke Zunahme bis starke Abnahme> der <Komponente>. Beispiel: Automatisierte Luftfahrzeuge bewirken eine starke Abnahme der Angebotskomponente Reisezeit. Nach diesem Muster werden die Intensitäten der Wirkungen zwischen Schlüsseltechnologien und Komponenten hergeleitet. Weiter bedeuten leere Felder, dass es keinen Wirkungszusammenhang zwischen Schlüsseltechnologie und Beurteilungs-Komponenten gibt. Eine Intensität ‚0‘ bedeutet hingegen, dass es zwar einen Wirkungszusammenhang zwischen Schlüsseltechnologie und Beurteilungs-Komponenten gibt, diese Wirkung jedoch zu keiner Veränderung der Intensität führt.

Die Intensitäten decken sich mit der in Kap 6.4 vorgenommenen Filterung der relevanten Schlüsseltechnologien. Die Wirkungen sind insbesondere dort hoch, wo auch eine direkte Wirkung vorhanden ist. Insofern dient die Beurteilung der Intensität auch als Plausibilisierung der zuvor detektierten direkten und indirekten Wirkungen.

6.6.1 Intensitäten beim Angebot

Bezogen auf die Komponenten des Bereichs Angebot ergeben sich nach Personenverkehr und Güterverkehr unterschieden folgende Einschätzungen der Intensitäten. Ebenso unterscheiden sich gemäss Kap 6.3.2 die Angebots-Komponenten zwischen Personen- und Güterverkehr im Detail. Auf die Einschätzung der Intensität bezüglich der Angebots-Komponente ‚Zuverlässigkeit‘ wurde bewusst verzichtet, da diese vertiefte Kenntnisse der betrieblichen Umsetzung voraussetzen würde.

Personenverkehr

Die Angebotskomponenten werden für die Beurteilung der Intensität gegenüber Kap 6.3.2 etwas ausdifferenziert. Zudem wird der Indikator benannt, nach welchem der Vergleich erfolgt.

Als Vergleichsbasis zur Beurteilung der geschätzten Intensität wird eine ‚anzustrebende Intensität‘ formuliert. Diese gibt an, welche Ausprägung die Intensität aus Kundensicht im Idealfall erreichen sollte. Diese ‚anzustrebende Intensität‘ ist pro Komponente unterschiedlich. So ist die Wirkung bei der Reisegeschwindigkeit am höchsten, wenn sie sehr stark zunimmt. Hingegen ist die Wirkung bei der Reisezeit am höchsten, wenn diese sehr stark abnimmt. Entsprechend wird bei jeder Komponente initial angegeben, welche Wirkungsausprägung im Idealfall angestrebt würde.

Als Spezialfall beim Personenverkehr spielt es für die Interpretation der Intensität einen Unterschied, ob als Vergleichsbasis der Zustand ÖV oder der Zustand MIV herangezogen wird. So würde beim ÖV eine starke Zunahme des Reisekomforts durchaus angestrebt, während beim MIV mit dem eigenen Auto der Idealfall bereits im IST-Zustand gegeben ist und demnach ein Beibehalten des Reisekomforts erstrebenswert wird. Analog bei der zeitlichen und örtlichen Verfügbarkeit, wo mit dem eigenen Auto ebenfalls der Idealfall bereits gegeben ist. Entsprechend werden die anzustrebenden Intensitäten wie folgt differenziert formuliert:

Angebotskomponenten Personenverkehr	Angebots- Indikatoren	Anzustrebende Intensität ÖV	Anzustrebende Intensität MIV		
Zeitliche Verfügbarkeit	Wartezeit	-3	0		
Örtliche Verfügbarkeit	Anmarschweg	-3	0		
Reisegeschwindigkeit	Tür-zu-Tür	3	3		
	Reisezeit	-3	-3		
Preis	pro Zeiteinheit	-3	-3		
	pro Streckeneinheit	-3	-3		
Komfort	soziale Nähe	-3	0		
	Reisekomfort	3	0		
	Witterungsschutz	3	0		
				Skala	
				Starke Zunahme	3
				Zunahme	2
				Leichte Zunahme	1
				Konstanz	0
				leichte Abnahme	-1
				Abnahme	-2
				Starke Abnahme	-3

Abb. 43. Angebotskomponenten sowie anzustrebende Intensitäten ÖV und MIV

Unabhängig der anzustrebenden Intensitäten werden die zu erwartenden Intensitäten pro Angebotskomponente nach MIV und ÖV getrennt geschätzt. Die Schätzungen basieren auf den Überlegungen, welche zu den Wirkungsmodellen in Kap 6.5 geführt haben.

Sie wiedergeben in einer hohen Differenziertheit auch die Wirkungszusammenhänge zwischen Schlüsseltechnologien und Komponenten des Verkehrssystems aus Kap 6.4.1, bzw. Abb. 35: Hohe Intensitäten von Angebotskomponenten einer Schlüsseltechnologie gemäss folgender Abb. 44 korrespondieren mit detektierten direkten Wirkungen zwischen Schlüsseltechnologie

und der Verkehrssystem-Komponente Angebot gemäss Abb. 35. Dieser Mechanismus trifft auch auf die später folgenden Intensitäten des Güterverkehrs und der Nachfrage zu.

Die nachfolgende Übersicht der Intensitäten zwischen Personenverkehr Angebot und Schlüsseltechnologien lässt erkennen, dass rund ein Viertel der Schlüsseltechnologien gar keine Wirkungen besitzen (Robotik bei ÖV) oder nur auf einzelne Komponenten (Blockchain).

Hingegen bewirkt der Einsatz von automatisierten Strassenfahrzeugen als zusätzliche Angebote des öffentlichen Verkehrs – im Sinne eines öffentlichen Individualverkehrs ÖIV gemäss Kap 6.5.1, dass die Intensitäten bei **automatisierten Fahrzeugen** sowohl für bisherige ÖV-Nutzer wie auch – in komplementärer Ausprägung – für bisherige MIV-Nutzer sehr stark ausgeprägt sind. Dies begründet sich aus der Tatsache heraus, dass die neue automatisierte Angebotsform als Zwischenform zwischen MIV und ÖV (Robo-Taxis oder ähnlich) für beide Seiten starke Veränderungen hinsichtlich der Nutzung bedeuten. Diese Nutzungsveränderungen führen auf Seite ÖV-Nutzer wie auf Seite MIV-Nutzer zu Intensitäten nahe bei der anzustrebenden Intensität, jedoch jeweils leicht unter dem Wunschmass. Eine Ausnahme stellen Reisegeschwindigkeit und Reisezeit dar, welche bei den MIV-Nutzern zu Intensitäten führen, die stark von der anzustrebenden Intensität abweichen.

Korrespondierend zu den Wirkungszusammenhängen aus Kap 6.4.1 und den Wirkungsmodellen aus Kap 6.5 führen die Schlüsseltechnologien **Automatisierte Luftfahrzeuge** und **Neue Verkehrssysteme** zu deutlichen Intensitäten. Dabei gilt es bei den automatisierten Luftfahrzeugen darauf hinzuweisen, dass die Intensitäten die Zu-/Abnahmen im Luftverkehr (und nicht die Reaktionen beim Landverkehr) wiedergeben. Einen Spezialfall stellt die Schlüsseltechnologie **Virtual Reality** dar, welche durch Substitution ganzer Fahrten sehr starke Abnahme-Intensitäten ergibt. Im Gegensatz zu vorhin wurde hier explizit die Reaktion beim Landverkehr beurteilt (da die Nutzung von Virtual Reality keine andere verkehrliche Wirkung erzeugt).

Angebotskomponenten		Angebots-Indikatoren	Automatisierte ÖIV-Fahrzeuge*	Nachhaltige Antriebsenergie Fahrzeuge	Neue Verkehrssyst. & -infrastruktur	Robotik	Vernetzung	Künstliche Intelligenz	Revolutionäre User Devices	Blockchain	Virtual & Augmented Reality**	Automatisierte Flugobjekte	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Batterie-Technologien Fahrzeuge	
Personenverkehr															
ÖV	Zeitliche Verfügbarkeit	Wartezeit	-2	0	0		-1	-2	-1		-3	0			
	Örtliche Verfügbarkeit	Anmarschweg	-2	0	0		0	-1	-1		-3	1			
	Reisegeschwindigkeit	Tür-zu-Tür	2	0	3		1	1	1			2			
	Reisezeit	Tür-zu-Tür	-2	0	-1		-2	-1	-1			-3			
	Preis	pro Zeiteinheit		2	1	3		2	1	1	-2		3		-1
		pro Streckeneinheit		1	1	1		1	1	1	-2		2		-1
	Komfort	soziale Nähe		-2		0						-3	-2		
		Reisekomfort		2	1	1		1	1	1	1		2		1
Witterungsschutz			2		0							2			
MIV	Zeitliche Verfügbarkeit	Wartezeit	-1	0	0		0	0	0		-3	2			
	Örtliche Verfügbarkeit	Anmarschweg	-1	0	0		0	0	0		-3	2			
	Reisegeschwindigkeit	Tür-zu-Tür	-1	0	2	1	1	1	1			1			
	Reisezeit	Tür-zu-Tür	1	0	-2	-1	-2	-1	-1			-2			
	Preis	pro Zeiteinheit		-2	1	2	-1	2	1	1	-2		2		-1
		pro Streckeneinheit		-2	1	1	-1	1	1	1	-2		1		-1
	Komfort	soziale Nähe		-1		0						-2	2		
		Reisekomfort		-1	1	1		1	1	1	1		-2		1
Witterungsschutz			-1		0							-1			

* Beurteilung anhand Bösch et al (2017); ** Beurteilt in Form der substituierten Fahrt

Abb. 44. Intensitäten Personenverkehr Angebot unterteilt nach ÖV und MIV

Güterverkehr

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt besitzt der Güterverkehr im Gegensatz zum Personenverkehr grundlegend andere Wirkungsmechanismen. Dies ist vordergründig dadurch begründet, dass die Güter-Objekte selber keine Transport-Entscheidungen treffen, sondern deren Transport nach ökonomischen Gesichtspunkten durch Händler und Logistiker definiert wird.

Entsprechend erfolgt die Beurteilung anhand leicht geänderten Angebotskomponenten und die Intensitäten pro Schlüsseltechnologie führen zu deutlich anderen Ausprägungen gegenüber dem Personenverkehr.

Die Angebotskomponenten im Güterverkehr werden durch **automatisierte Strassenfahrzeuge** am stärksten beeinflusst. Die Automatisierung hat einen direkten Einfluss auf die zeitliche Verfügbarkeit von Transportoptionen, lässt die Transportkosten sinken und erhöht die Zuverlässigkeit. Sechs weitere Schlüsseltechnologien haben zudem einen verstärkenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit im Güterverkehr, die im Angebot des Güterverkehrs eine wichtigere Rolle einnimmt, als die reine Geschwindigkeit.

Neue Verkehrssysteme stellen direkt neue Angebotsformen zum Transport im Güterverkehr her. Eine neue Infrastruktur verbreitert die Möglichkeiten der Logistik und die räumliche Erschließung. Auch wenn eine neue Infrastruktur nicht die feingliedrige Erreichbarkeit des Strassennetzes bietet, kann sie als Ergänzung für ein neues System Optionen bieten. Jedoch muss ein neues System auch finanziert werden, wodurch Transportpreise leicht zunehmen können.

Die Schlüsseltechnologien **Robotik**, **Vernetzung** und **künstliche Intelligenz** können durch Optimierungen dazu beitragen, dass Preise sinken und die Zuverlässigkeit erhöht wird. Zudem können logistische Prozesse besser an der Nachfrage ausgerichtet und enger vertaktet werden, so dass die zeitliche Verfügbarkeit der Angebote steigt, wobei insbesondere durch die Vernetzung indirekt auch die räumliche Verfügbarkeit und eine höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit erzielt werden können.

Angebotskomponenten Güterverkehr	Angebots-Indikatoren	Automatisierte Fahrzeuge	Nachhaltige Antriebsenergie Fahrzeuge	Neue Verkehrssyst. & -infrastruktur	Robotik	Vernetzung	Künstliche Intelligenz	Revolutionäre User Devices	Blockchain	Virtual & Augmented Reality	Automatisierte Flugobjekte	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Batterie-Technologien Fahrzeuge
Zeitliche Verfügbarkeit	Slot / Liefertermin	3	2	1	1	1					2		
Örtliche Verfügbarkeit	Zustell-/Abholpunkte	0	2			1					2	1	
	Logistikstandorte	0	2			1					0	1	
Transportgeschwindigkeit	Tor zu Tor	0	1			1			0		2	1	
Transport-Preis	Tor zu Tor	-2	1	-1	-1	-1			-2		0		

Abb. 45. Intensitäten Güterverkehr Angebot

Zugewinne bei der zeitlichen- und örtlichen Verfügbarkeit können auch durch **automatisierte Luftfahrzeuge** gewonnen werden. Zudem sind direkte, schnelle Transporte möglich. Die Wirkung der Technologie auf Transportpreise ist abhängig von verfügbaren Substituten. Die Anbindung von sonst schwer erreichbaren Orten (z.B. Berggebiete, Seitentäler) ist über den direkten Luftweg, ohne weitere Infrastruktur, effizient. Im Vergleich mit Transporten auf bestehender Infrastruktur ist ein Transport durch die Luft bei gleichem Automatisierungsgrad aber kostenintensiver.

6.6.2 Intensitäten bei der Nachfrage

Personenverkehr

Die drei Nachfragekomponenten des Personenverkehrs werden für die Beurteilung der Intensität gegenüber Kap 6.3.2 in weitere Segmente unterteilt. So bilden Kohorten Segmente der Kundengruppen, bei den Verkehrszwecken wird nach den vier bekannten Ausprägungen aufgeschlüsselt und der Siedlungstyp wird in vier Räume gegliedert. In Abhängigkeit der verkehrlich relevanten Topographie wird dabei der ländliche Raum nach Ebene und Berge unterteilt.

In der Übersicht zeigt die Beurteilung, dass der Einsatz von Schlüsseltechnologien - mit Ausnahme von Virtual Reality - bei allen Nachfragekomponenten eine Intensitäts-Zunahme zur Folge hat.

Die deutlichste Zunahme der Nachfrage wird durch die **Automatisierung von Fahrzeugen** im Sinne eines öffentlichen Individualverkehrs ÖIV (vgl. Kap 6.5.1) erwartet. Unabhängig davon, wie das konkrete Geschäftsmodell oder das Angebot dieser automatisierten Verkehrsmittel gestaltet ist, erschliessen diese Technologien neue Kundengruppen (Kinder, Jugendliche, Senioren), welchen bisher der selbstständige Zugang infolge ihres Alters oder ihrer körperlichen Verfassung verwehrt oder an Zulassungsbedingungen (Fahrausweis) geknüpft war. Ebenso wird die Möglichkeit die Reisezeit in automatisierten Fahrzeugen produktiv zu nutzen zu einer Steigerung der Nachfrage bei den bisherigen Nutzern von Fahrzeugen ergeben. Aufgrund der höheren Flächenbeanspruchung als der klassische ÖV werden ÖIV jedoch in städtischen Räumen ihre Angebotsmöglichkeiten nicht entfalten und keine Nachfrageeffekte bewirken können.

Eine spezifische Nachfragewirkung ist aus **automatisierten Luftfahrzeugen** zu erwarten. Diese Technologie hat das Potenzial in Räumen, wo der Landverkehr mit strukturellen oder topographischen Widerständen konfrontiert ist (Städte, Bergregionen), diesen auf den Luftweg umzulagern. Ebenso darf davon ausgegangen werden, dass der zeitsensitive Nutzverkehr – trotz womöglich höheren Kosten – die direkten und zeitsparenden Luftverbindungen in hohem Masse annimmt und selber weitere (Luft-)Fahrten induziert.

Nachfragekomponenten Personenverkehr	Nachfragekomponenten P	Automatisierte ÖIV-Fahrzeuge*	Nachhaltige Antrieb-senergie Fahrzeuge	Neue Verkehrssyst. & -infrastruktur	Robotik	Vernetzung	Künstliche Intelligenz	Revolutionäre User Devices	Blockchain	Virtual & Augmented Reality**	Automatisierte Flugobjekte	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Batterie-Technologien Fahrzeuge
Kundengruppe	Kinder 6 - 14	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jugendliche 14 - 25	2	0	0	1	1	1	2	-1	0	0	0	0
	Singles 25 - 65	3	1	1	1	0	1	-2	1	0	0	0	0
	DINKs 25 - 65	3	1	1	1	1	1	-2	1	0	0	0	0
	Jung-Familien 25 - 40	2	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
	Familien 40 - 65	2	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
	Senioren >65	3	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0
Verkehrszweck	Pendlerverkehr	3	3	1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
	Einkaufsverkehr	2	0	1	1	2	-3	0	0	0	0	0	0
	Nutzverkehr	1	2	2	1	1	-3	1	0	0	0	0	0
	Freizeitverkehr	3	1	0	2	2	-3	0	0	0	0	0	0
Siedlungstyp	Stadt	0	1	3	1	1	1	-1	3	1	0	0	0
	Agglomeration	2	0	1	1	0	0	-1	1	0	0	0	0
	Ländlicher Raum Ebene	3	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
	Ländlicher Raum Berge	3	0	0	1	1	2	-2	3	0	0	0	0

* Beurteilung anhand Bösch et al (2017); ** Beurteilt in Form der substituierten Fahrt

Abb. 46. Intensitäten Personenverkehr Nachfrage

Ebenfalls eine bedeutende Nachfrage-Zunahme ist durch neue leistungsfähige **Verkehrs-Infrastrukturen** zu erwarten. Insbesondere in städtischen Räumen und zu Hauptverkehrszeiten führen solche Infrastrukturen zu höheren Verkehrsleistungen und einer Reduktion der Reisezeit.

Eine grosse Nachfrage-Abnahme (im Landverkehr) darf aus einer breiten Anwendung von **Virtual Reality** erwartet werden. Insbesondere bei der geschäftstätigen Bevölkerung wird sich bei kompletter Diffusion dieser Technologie die physische Ortsveränderung auf Aspekte reduzieren, die eine physische Präsenz voraussetzen, meist sozial motivierte Interaktionsformen zwischen Menschen. Hingegen werden ‚Erledigungen‘, wie Einkaufen, Besprechungen mit bekannten Partnern oder Supportdienste nach Möglichkeit über den virtuellen Weg ohne physische Ortsveränderung abgewickelt. Untergeordnete Nachfragewirkungen sind von den Schlüsseltechnologien **Vernetzung**, **Blockchain** und **Revolutionäre User-Devices** zu erwarten. Diese sind in Kap 6.4.1 skizziert.

Güterverkehr

Die Nachfragekomponenten im Güterverkehr sind gegenüber der Darstellung in den Wirkungsmodellen (vgl. Kap. 6.5) weiter ausdifferenziert. Dies ist für eine Beschreibung der Intensitäten insbesondere sinnvoll, weil die verschiedenen zu transportierenden Güter in Warengruppen unterschiedliche Anforderungen haben und zudem Logistikfunktionen durch die Schlüsseltechnologien unterschiedlich beeinflusst werden. Weiterhin ist eine Differenzierung zwischen Direktverkehren und komplexeren Transportketten nötig, um Wirkungen der Schlüsseltechnologien differenzierter darzustellen.

Die Schlüsseltechnologie **3D-Druck** hat eine direkte Wirkung auf die Nachfrage. Durch die Technologie kommt es zur Substitution von Produkten, die in der Transportnachfrage für Güter und in den Dienstleistungen der Logistik deutlich werden. Während der Transport von Rohmaterialien in Tank- oder Silotransporten sowie als Massengüter als essentieller Input für Produktion vermehrt stattfindet und auch näher an die Konsumenten rückt, werden Transporte für andere Warengruppen eher für kürzere Distanzen und somit weniger stark nachgefragt. Funktionen wie Lagerung, Kommissionierung und auch Rücktransporte werden durch die Konfektionsfertigung ersetzt. Die Transportintensität konzentriert sich auf weniger Warengruppen und Logistikfunktionen, steigt aber insgesamt an.

Durch den Einsatz von **Blockchain** und die sicheren, nachvollziehbaren Kommunikationsmöglichkeiten nimmt die Briefpost stark ab. Weiterhin erlaubt die Technologie gesicherte und effiziente Verknüpfungen verschiedener Prozesse in der Logistik auch zwischen Unternehmen zu erreichen, die die Bedeutung der Logistik erhöhen. Der Einsatz **künstlicher Intelligenz** wirkt sich indirekt auf die Effizienz der Logistik aus. Durch eine automatisierte Organisation und Steuerung der Funktionen werden diese besser verknüpft, was die Nachfrage steigen lässt.

Nachfragekomponenten Güterverkehr		Automatisierte Fahrzeuge	Nachhaltige Antriebsenergie Fahrzeuge	Neue Verkehrssyst. & -infrastruktur	Robotik	Vernetzung	Künstliche Intelligenz	Revolutionäre User Devices	Blockchain	Virtual & Augmented Reality	Automatisierte Flugobjekte	3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Batterie-Technologien Fahrzeuge
Warengruppen	Pakete	0				1			0			-2	
	Post- und Brief	0				1			-3			0	
	Stückgut	-1				1			0			-2	
	Komplettladungen	1				0			0			0	
	Tank/Silo-Güter	1				0			0			3	
	Massengüter	1				0			0			2	
Logistikfunktion	Transport	2		1	1	1	1		1		2	2	
	Lagerung	-1		-2	1	0	1		1		0	-3	
	Umschlag	-1		2	1	1	2		1		2	1	
	Kommissionierung	0		1	1	1	1		1		2	-2	
	Entsorgung/Retouren	1		1	0	1	0		1		0	-2	
Transportkette	Vorlauf	-1	-1	2		1			1		1		-1
	Hauptlauf	-1	-1	2		1			1		1		-1
	Nachlauf	-1	-1	2		1			1		1		-1
	Direktverkehr	2	1	-3		1			1		2		1

Abb. 47. Intensitäten Güterverkehr Nachfrage

Transportketten können durch den Einsatz **neuer Infrastruktur** und dem Einsatz von neuen Vehikeln, wie z.B. **Luftfahrzeugen**, mit neuen Elementen besetzt werden. Dies bedingt eine enge Verzahnung der Transportmittel, aber fördert einen wesens- und sachgerechten Transport. Die **Automatisierung von Transporten** hingegen kann zu vermehrten Direktverkehren führen. Insbesondere bei eiligen Transporten und kleinen Transportgefässen bietet sich dies an. Die Schlüsseltechnologien **nachhaltige Antriebe** und **Batterie-Technologien** ermöglichen zudem einen effizienteren Betrieb von direkteren Verbindungen auch über grössere Distanzen.

Neue Transportmöglichkeiten durch Automatisierung, neue Infrastruktur und Luftfahrzeuge verteilen die Gewichtung in der Logistknachfrage zudem bei den Funktionen um. Lagerkapazität wird weniger in Gebäuden, sondern vorwiegend in Fahrzeugen und unterwegs bereitgestellt. Mit diesem Prozesswandel kommt es in der Folge auch zu Veränderungen beim Umschlag.

Quantitative Auswirkungsbeurteilung

In den vorangehenden Kapiteln wurde die Wirkung von Schlüsseltechnologien in Form von Intensitäten auf einer Ordinalskala qualitativ beurteilt. Die verwendete 7-teilige Skalierung von «-3: Starke Abnahme» über «0: Keine Wirkung» bis «+3: Starke Zunahme» erlaubt bereits eine grobe Quantifizierung, die Grössenordnung bleibt jedoch undefiniert.

In den Diskussionen zur Herleitung der Intensitäten der Wirkungen zeigte sich, dass aufgrund der komplexen Wirkungsketten alleine die Beurteilung des korrekten Vorzeichens einer Wirkung bereits anspruchsvoll ist. Die Abschätzung des Wirkungsmasses oder der Intensität in schwach – mittel – stark ist folgend die feinstmögliche Beurteilung einer Wirkung auf qualitativer Basis. Eine weiter aufgeschlüsselte Wirkungsbeurteilung lässt sich daraus nicht ableiten.

Zur Erlangung von quantifizierten Aussagen zu Wirkungen einzelner Schlüsseltechnologien bedürfte es einer Modellierung derselben. Dabei müsste jede Schlüsseltechnologie hinsichtlich ihrer verkehrlichen Ausprägung und ihrem Wirkungszusammenspiel Raum – Verkehr – Gesellschaft hinreichend definiert und parametrisiert werden können. Für zukünftige Technologien liegen solche Wirkungszusammenhänge nicht vor, sie müssten pro Technologie mittels Stated Preference-Befragungen oder ähnlichen Methoden in Erfahrung gebracht werden. Diese Vorgehensweise würde sich nur für Main Technologies mit direkter Wirkung auf das Verkehrssystem eignen, Enabling Technologies mit ihren indirekten Wirkungen könnten auch bei einem solchen Vorgehen nicht erfasst werden.

Ein solches Vorgehen bildet eine eigenständige Forschungsfrage und würde den Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit sprengen. Mit Resultaten aus solchen Befragungen wäre eine Implementierung in konventionellen Verkehrsmodellen zu prüfen. Zielführender wäre eine Implementierung in Multiagenten-Modellen, wo die Wirkungszusammenhänge in entsprechenden Nutzenfunktionen abbildbar wären. Dieser Weg wird jedoch nicht verfolgt.

Aus diesen Gründen wird auf eine explizite quantitative Auswirkungsbeurteilung verzichtet. Als Grob-qualitative Aussageform dienen die Intensitäten aus den vorangehenden Kapiteln.

7 Der technologische Wandel in drei Szenarien

7.1 Überblick über die drei Szenarien

Die Paketleitung hat drei Szenarien als Leitfaden für das übergeordnete Gesamtprojekt «Verkehr der Zukunft 2060» definiert (Inputpapier vom 7. August 2017) und weiter präzisiert (Inputpapier vom 8. Januar 2018), welche hier kurz beschrieben werden:

- Szenario 1 – «**Evolution ohne Disruptionen**»: Dieses Szenario geht von der Fortsetzung der heutigen Trends aus, unter Beibehaltung der Eckpunkte des heutigen Mobilitätssystems, namentlich des Verhältnisses von Individualverkehr und Öffentlicher Verkehr und der entsprechenden Strukturen und Akteursrollen. Das Regulativ versucht eine möglichst freie Marktwirtschaft und parallel die Funktionsfähigkeit eines flächendeckenden ÖV herzustellen. Die Fortschritte auf technologischer Ebene werden genutzt, um alle Verkehrsträger zu verbessern; die Automatisierung beispielsweise verbessert sowohl das Privatauto wie auch den ÖV, und übt damit letztlich keinen einschneidenden Einfluss auf das Verkehrssystem im Jahr 2060 aus.
- Szenario 2 – «**Revolution der individuellen Mobilitätsservices**»: Dieses Szenario geht von grösseren Änderungen des Mobilitätssystems aus, wobei der grösstmögliche individuelle Komfort und Wohlstand im Vordergrund steht. Der Fokus des Regulativs liegt auf einer Maximierung der betriebswirtschaftlichen Effizienz. Nicht internalisierte Kosten, namentlich betreffend der Flächeninanspruchnahme und dem Ressourcenverbrauch, stehen nicht im Fokus der Effizienzmaximierung. Die technologischen Fortschritte – beispielsweise die dank der Automatisierung teilweise wegfallenden Fahrerkosten – werden eingesetzt, um massgeschneiderte, individualisierte, die Unterwegszeit des Einzelnen minimierenden Mobilitätsdienstleistungen zu ermöglichen. Wo der ÖV zeitlich oder räumlich keine starke Bündelung erreichen kann, entwickelt er sich zum individualisierten ÖV weiter.
- Szenario 3 – «**Revolution der kollektiven Mobilitätsservices**»: Dieses Szenario geht ebenfalls von grösseren Änderungen des Mobilitätssystems aus, wobei der grösstmögliche Wohlstand des Kollektivs im Zentrum steht. Der Fokus des Regulativs liegt auf einer Maximierung der volkswirtschaftlichen Effizienz, unter Berücksichtigung oder Internalisierung von heute nicht internalisierten Kosten. Die Klimapolitik ist ein starker Treiber dieser Entscheide – in diesem Szenario werden die Pariser Klimaziele eingehalten. Die Bevölkerung ist bereit, Fahrzeuge deutlich mehr als heute zu teilen. Die technologischen Fortschritte – beispielsweise die Automatisierung – werden genutzt, um kollektive Mobilitätsdienstleistungen zu realisieren, welche die Teilziele der Klima- und Energiepolitik im Bereich Verkehr unterstützen und ein insgesamt optimales Gesamtsystem ermöglichen. Wo das Teilen von Fahrzeugen zeitlich oder räumlich möglich ist und aus einer Gesamtsicht Kosten- und Umweltvorteile bringt, wird der motorisierte Individualverkehr durch einen individualisierten ÖV ersetzt.

Die Tabelle (Tab. 13) zeigt die Spezifikation je Szenarien für die zugrundeliegenden Annahmen und Charakteristiken der Rahmenbedingungen.

Tab. 13: Szenarien und deren Treiber.

Treiber	Szenario 1: Evolution ohne Disruptionen	Szenario 2: Revolution der individuellen Mobilitätsservices	Szenario 3: Revolution der kollektiven Mobilitätsservices
Demographie	→	→	↗
Raumentwicklung	→	↘	↗
Relevanz Klima	→	→	↗
Urbane Mobilität	→	↗	↗
Regulativ	→	↘	↗
Neue Organisationsformen und Diffusion	→	↗	↗

7.2 Schlüsseltechnologie-Sets für die Szenarien

Im Folgenden werden die identifizierten Schlüsseltechnologien im Zusammenhang mit den definierten Szenarien gebracht. Mittelpunkt der Analyse ist die Ausprägung, welche eine Schlüsseltechnologie je nach Szenario und Rahmenbedingungen haben kann. Eine massgebliche Erkenntnis des vorliegenden Berichts ist, dass die Verfügbarkeit und Marktreife der Technologien – und der technologische Fortschritt – exogen zum Schweizer Mobilitätssystem sein werden, und damit im Prinzip szenario-unabhängig sein werden. Das heisst, jede Technologie steht in jedem Szenario zur Verfügung. Das Regulativ beeinflusst aber, welche Technologien bei welchem Verkehrsträger und zu welchem Zweck zum Einsatz kommen, d.h. welche Marktanteile die Technologien in den einzelnen Teilen des Mobilitätssystems erzielen. Dies wiederum kann die weitere technische Entwicklung von Technologien zumindest indirekt beeinflussen, weil ein Markteinsatz in der Schweiz es Herstellern (die im Bereich der Mobilität immer international, zumeist global ausgerichtet sind) erlaubt, weitere Forschungs- und Entwicklungsmittel zu generieren und die Technologie weiterzuentwickeln. Die Schweiz als kleines Land mit hoher Zahlungsbereitschaft in den Bereichen des Umwelt- und Landschaftsschutzes kann dabei eher in den Anfangsphase des Technologiezyklus Impulse auslösen, weniger in späteren Massenmarkt-Phasen.

Im Rahmen einer Delphi-Umfrage wurden 13 Experten (eine Auswahl der Experten aus den Interviews und Workshops) nach der Ausprägung der Schlüsseltechnologien je Szenario befragt (siehe Anhang I.1 für die Liste der Experten). Der iterative Prozess fand in zwei Runden nach der Delphi-Methode statt. In der ersten Runde wurde die Ausprägung jeder Schlüsseltechnologie pro Szenario von den Experten abgeschätzt. Die Antworten wurden ausgewertet und anschliessend erhielten die Teilnehmer eine Rückmeldung mit der durchschnittlichen Antwort aller Experten. Die Experten konnten dann allfällige Diskrepanzen gegenüber den von ihnen gegebenen Antworten erklären und verteidigen – wodurch weitere Anpassungen am Endresultat gemacht werden konnten.

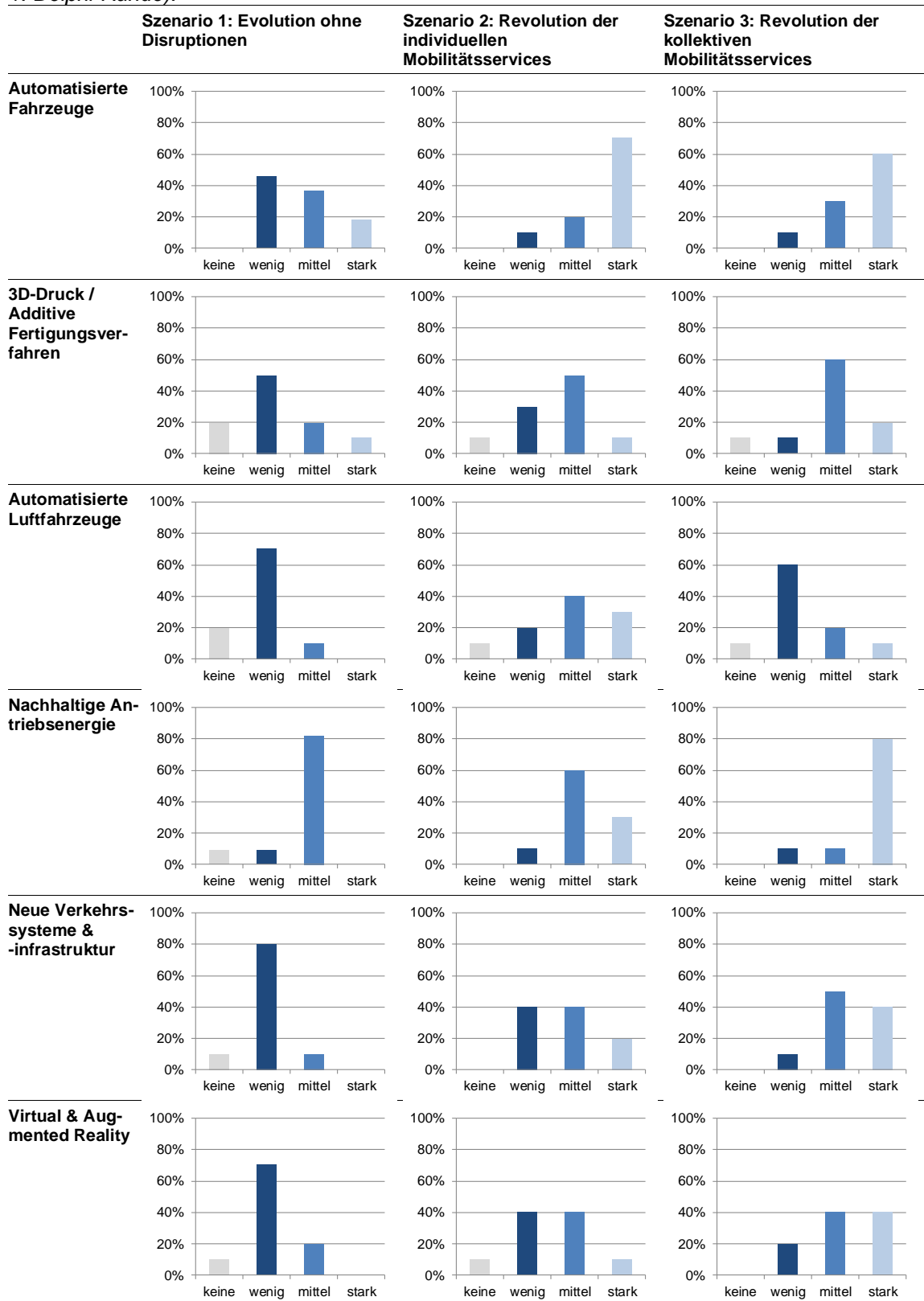
Diese Online-Befragung wurde für sechs der zwölf Schlüsseltechnologien durchgeführt: Automatisierte Fahrzeuge, 3D-Druck, automatisierte Luftfahrzeuge, Nachhaltige Antriebsenergie, Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur, sowie Virtual & Augmented Reality. Der Grund für diese Auswahl ist, dass es sich bei den restlichen sechs um «Enabling Technologies» (Abb. 3 und Abb. 24) handelt, was bedeutet, dass diese keinen direkten Einfluss auf das verkehrliche Geschehen haben, obwohl sie entscheidend sind für die Verbreitung der «Main Technologies». Weil kein direkter Einfluss vorhanden ist, lässt sich dieser auch kaum abschätzen, weshalb

diese Technologien an dieser Stelle weggelassen werden. Die Resultate aus der Befragung (erste Runde) sind in *Tab. 14* dargestellt.

Bei der Haupt-Schlüsseltechnologie «Nachhaltige Antriebsenergie» ist zu bemerken, dass zwar ihr Einsatz in den Szenarien sehr unterschiedlich wäre, die weiteren Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -Nachfrage jedoch gering. Letztlich führt der Wechsel von Energieträgern (konkret von flüssigen Kohlenwasserstoffen auf Elektrizität, später evtl. für Langstreckenlösungen auf Wasserstoff) nur zu geringfügigen verkehrlichen Änderungen (leicht reduzierte Reichweiten, an Lade- oder Betankungs-Erfordernissen angepasste Routenführung, usw.). Ein Elektroauto ist immer noch ein Auto – die wesentlichen verkehrlichen Fragestellungen (Modus- und Routenwahl, Belegungsgrad) werden nicht beeinflusst. Jedoch können die systemischen Auswirkungen (namentlich die Umweltwirkungen) stark beeinflusst werden. Der Wechsel auf erneuerbare Energieträgern (flüssige oder gasförmige Biotreibstoffe, Ökostrom, nachhaltig hergestellter Wasserstoff, usw.) beeinflusst die verkehrlichen Fragestellungen gar nicht. Zwar können sich dadurch die Energiekosten erhöhen, diese machen jedoch nur einen kleinen Teil der Gesamtkilometerkosten aus. Beim motorisierten Individualverkehr stehen viele technischen Optionen bereit (Alternativantriebe, effizientere Antriebe, Reduktion von Antriebsleistung, Fahrzeuggrösse und Fahrzeuggewicht), so dass verkehrliche Auswirkungen ausbleiben würden. Nur bei einer durch den Regulator eingeführten sehr starken Besteuerung von Energie oder Treibhausgasemissionen so, dass trotz Energieträgerwechsel und technische Effizienzmassnahmen die Gesamtkilometerkosten sich deutlich erhöhen würden, wären Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage zu erwarten.

Die Rückmeldungen aus der zweiten Runde sind mit den Resultaten des dritten Expertenworkshops zusammengefügt worden und in die Bildung von *Tab. 15* und *Tab. 16* eingeflossen.

Tab. 14: Ausprägung der ausgewählten Schlüsseltechnologien je Szenario (Ergebnisse der 1. Delphi-Runde).



Tab. 15: Ausprägung der ausgewählten Schlüsseltechnologien je Szenario für Personenverkehr.

	Szenario 1: Evolution ohne Disruptionen	Szenario 2: Revolution der individuellen Mobilitätsservices	Szenario 3: Revolution der kollektiven Mobilitätsservices
Automatisierte Strassenfahrzeuge	30% shared <-> 70% privat Sammel- und Verteilerverkehr (SVV) in Grossstädten Übergang SVV auf Bus/Tram/Zug	Starke Automatisierung im Strassenverkehr (Level 5) Kleiner Anteil «sharing» in Städten	Nur «shared» Starke Automatisierung aller Fahrzeuge (Level 5) + Bahn & Bus (Shuttles) → hoher Anteil SVV
3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Kein Effekt	Kein Effekt	Kein Effekt
Automatisierte Luftfahrzeuge	Kaum Anwendung	Als Service für VIPs und Wohlhabende	Kaum Anwendung
Nachhaltige Antriebsenergie	Mittlere Elektrifizierung → EBP-Szenario «BAU» Keine FCEV	Nur teil-elektrisch → EBP-Szenario «EFF» / «COM» Keine FCEV Keine starke Regulierung, Einfluss andere Länder gross (China, Norwegen, usw.)	Sehr hohe Elektrifizierung → EBP-Szenario «DEC» FCEV für Langstrecken Erreichung der klimapolitischen Ziele, Einführung von Mobility pricing.
Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	Keine revolutionären Änderungen → Optimierungen an bestehendem System → kein Hyperloop	Keine revolutionären Änderungen → stetige Weiterentwicklung an bestehender Infrastruktur → mehr als Szenario 1 → Für die «upper class» Infrastruktur von Privaten gebaut	Einbezug neuer Systeme vor allem unterirdischer Art für den ÖV → «ÖV Einbindung» → Braucht es die SBB noch? Evtl. wird die Infrastruktur finanziell gefördert
Virtual & Augmented Reality	Als Unterhaltungsmittel und zur Vereinfachung der Multimodalität (Freizeitaktivität)	Mittlere bis starke Ausprägung: «Digital Nomads» → zersplitterte Gesellschaft Nutzung für Steigerung der Unterhaltung	VR-Treffen ersetzen geschäftlich bedingte Reisezwecke mit MIV oder Flugzeug VR für einfachere Multimodalität Falls Verkehr teuer → grosser Einsatz VR

Erläuterung EBP-Szenarien (2018):

Die bottom-up gerechneten Szenarien für die Schweiz lassen sich wie folgt charakterisieren:

BAU (Business As Usual): Dieses Szenario berücksichtigt die weitere Verschärfung der Emissionsvorschriften für neue Personenwagen. Die Schweiz übernimmt dabei die Vorschriften der EU (neuer Zielwert: 95 g CO₂/km im Jahr 2021). Der Bund unterstützt die Elektromobilität des Weiteren indirekt.

EFF (Efficiency): Für effiziente Fahrzeuge werden zusätzliche Förder- und Anreizinstrumente eingeführt, damit die Ziele 2030/2035 der Energiestrategie im Bereich der Strassenmobilität erreicht werden können. Technologieneutrale Förderinstrumente werden bevorzugt. Die Totalrevision des CO₂-Gesetzes für die Zeit nach 2020 verfolgt eine weitere Verschärfung der CO₂-Vorschriften für Fahrzeuge in den Jahren 2025 und 2030 in Anlehnung an die EU.

COM (Connected Mobility): Aus energiesystemischen Überlegungen werden Elektroautos spezifisch gefördert. Höhere Energie- und Mobilitätspreise führen zu Änderungen im Mobilitätsverhalten. Ein zunehmender Anteil der Fahrzeugkilometer wird mit kleinen Elektrofahrzeugen (Mikromobilität: Fahrzeugklassen L5e, L6e, L7e statt M1) zurückgelegt.

DIB (Partial Diesel Ban): Die angekündigten und kurz im Anschluss teils bereits beschlossenen partiellen Fahrverbote von älteren Dieselfahrzeugen im europäischen Ausland führt zu einer starken Verunsicherung am Schweizer Neuwagenmarkt. Auch im Inland werden politische Vorstösse unternommen, welche auf Autos mit Verbrennungsmotoren zielen

DEC (Decarbonisation): Das Szenario DEC zeigt die vollständige Dekarbonisierung des Personenwagenverkehrs in der Schweiz bis 2050. Die Dekarbonisierung erfordert eine sehr schnelle Transformation des Verkehrssektors. Demzufolge muss der Personenwagenverkehr im Jahr 2050 unabhängig von fossilen Treibstoffen sein.

Tab. 16: Ausprägung der ausgewählten Schlüsseltechnologien je Szenario für Güterverkehr.

	Szenario 1: Evolution ohne Disruptionen	Szenario 2: Revolution der individuellen Mobilitätsservices	Szenario 3: Revolution der kollektiven Mobilitätsservices
Automatisierte Strassenfahrzeuge	Hauptsächlich für Truck Platooning. Die Anschlussdichte der Nationalstrassen bedingt jedoch ein häufiges Auflösen und Bilden von Platoons. Deshalb im CH-Kontext nur mit beschränktem Potenzial.	Automatisierung wird hauptsächlich für Citylogistik mit kleinen Lieferwagen eingesetzt, für die individualisierte, schnellstmögliche Zustellung	Citylogistik erfolgt gebündelt mit grösseren, besser ausgelasteten Lieferwagen; individualisierte Zustellung vor allem über dynamische Lieferadressen. CST verwendet automatisierte Strassenfahrzeuge
3D-Druck / Additive Fertigungsverfahren	Kaum Relevanz	Gesteigerter Konsum und Individualität → mehr 3D-Druck und «just-in-time» Produktion	Höhere Preise von Ressourcen, Bündelung von Fertigungsverfahren → mehr 3D-Druck vor Ort
Automatisierte Luftfahrzeuge	Nur punktueller Einsatz	Wichtig für «same day delivery» Werden für die letzte Meile von Logistikern (Post, DHL, usw.) verwendet. Rein sicherheit-technische Regulierung, funktionale Einschränkungen möglich. Aufgrund der beschränkten Akzeptanz hat die Technologie keinen grossen Einfluss auf tkm. Reine Zeiteinsparung für Kunden.	Nur für sehr spezifische Anwendungen → zu energieintensiv für die breite Verwendung Start reguliert (Schaffung Korridore, ...)
Nachhaltige Antriebsenergie	Dieselantriebe weiterhin am wichtigsten → tiefe Elektrifizierung auf Langstrecken H2 nur für ausgewählte LKW-Flotten	Dieselantriebe weiterhin am wichtigsten → mittlere Elektrifizierung auf Langstrecken H2, Power-to-X breit verbreitet	Oberleitungen und/oder Brennstoffzellen ersetzen Dieselbetriebene LKWs auf allen Strecken
Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	Keine revolutionären Änderungen → Optimierungen an bestehendem System; Überwertungen	Keine revolutionären Änderungen → stetige Weiterentwicklung an bestehender Infrastruktur Durch Private Investoren	Zunächst wird der kombinierte Verkehr mit vollautomatischen Umschlagssystemen (Robotik) revolutioniert. CST wird für den vereinheitlichten unterirdischen Gütertransport eingesetzt Benötigt Zusammenschluss von Anbietern
Virtual & Augmented Reality	Kaum Einfluss	Kaum Einfluss	Mittlere Ausprägung → Kosten und bestellte Güter niedrig halten (auch aufgrund Einsatz von Mobility Pricing)

8 Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht fokussiert auf die **Folgen des technologischen Wandels** für den Verkehr der Zukunft. Dazu untersucht dieser Bericht neue **Schlüsseltechnologien** sowie ihre Eigenschaften, Treiber, Diffusion, gegenseitige Abhängigkeiten und Auswirkungen. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse des vorliegenden Teilprojekts mit Bezug auf den Verkehr der Zukunft lauten wie folgt:

- Es gibt weder eine Nomenklatur noch eine Klassifizierung, welche alle heutigen und künftigen für den Verkehr relevanten Technologien abdeckt oder diese in eine Beziehung zueinander setzen würde. Deshalb werden für den vorliegenden Bericht neue **Schlüsseltechnologien** identifiziert, welche ihrerseits **unterstützende Technologien** voraussetzen. Schlüsseltechnologien sind allein durch ihre künftige potenzielle Relevanz definiert. Sie prägen relevante Mobilitätseigenschaften (Zeit, Kosten, Komfort; systemische Aspekte) entscheidend, d.h. sie sind geeignet, Verkehr **schneller, günstiger, komfortabler oder systemisch effizienter** anzubieten und abzuwickeln. Bereits heute im Rahmen von Mobilitätsdienstleistungen etablierte Schlüsseltechnologien werden nicht betrachtet.
- Die aktuellen Trends bei den verschiedenen Verkehrsträgern bilden die Ausgangslage, um aus den vielen heute erkennbaren Zukunftstechnologien in den Bereichen Fahrzeuge, Infrastruktur sowie Informations- und Kommunikationstechnologie die relevanten Schlüsseltechnologien zu identifizieren. Dabei fliessen technische und **systemische Überlegungen sowie Experteneinschätzungen** ein. Die wichtigsten Folgen des technologischen Wandels auf den Verkehr lassen sich mit **zwölf ausgewählten Schlüsseltechnologien** beschreiben. Diese Auswahl ist letztlich ein Abbild des momentanen Expertenwissens zu den künftigen Technologien.
- Jede Schlüsseltechnologie lässt sich beschreiben anhand ihrer Chancen und Risiken, den Treibern und Hindernissen sowie den gegenseitigen Abhängigkeiten mit anderen Schlüsseltechnologien. Je nach Schlüsseltechnologie sind die Einflüsse auf das Verkehrssystem sehr unterschiedlich: Manche beeinflussen die **Hauptparameter** einer jeden Mobilitätsdienstleistung (**Zeit, Kosten, Komfort**), andere beeinflussen vor allem die übrigen, **systemischen Parameter** (Umwelt, Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer, Kapazität). In der Summe zeigt sich, dass die zwölf Schlüsseltechnologien alle Parameter wesentlich beeinflussen können. Die **technologischen Potenziale** sind deshalb als gross einzustufen; sie können in der Summe **alle wesentlichen Merkmale des Verkehrssystems stark beeinflussen**.
- Bei keiner Schlüsseltechnologie konnte ein Einfluss des heutigen Schweizer Mobilitätssystems auf die Verfügbarkeit, d.h. die Marktreife der Schlüsseltechnologie identifiziert werden. Der technologische Wandel scheint damit in allen wesentlichen Aspekten **exogen zum Schweizer Verkehrssystem** zu sein (indirekte Rückkopplungen sind aber möglich, zum Beispiel dass der Einsatz einer Technologie in der Schweiz den Herstellern die Weiterentwicklung der Technologie erleichtert). Das **Ausmass der Diffusion**, d.h. die Marktanteile der einzelnen Technologien in einzelnen Märkten, ist hingegen zum grösseren Teil von ebendiesen Märkten und ihrer **Regulierung** abhängig.
- Die technische Lebensdauer und **Bestandesumwälzung von Fahrzeugen und Infrastruktur führt zu einer Trägheit** einzelner Elemente des Mobilitätssystems, welche die Diffusionsgeschwindigkeit massgebend prägt. Die **Marktdurchdringung wird bei den Digitalisierungs- und IT-Technologien am schnellsten** gehen. Auf der Ebene der Transportmittel wird die Marktdurchdringung bei den Bussen, Nutzfahrzeugen und Personenwagen am schnellsten geschehen, während bei **Flugzeugen und Zügen auf Modelle, welche heute neu beschafft werden, auch noch im Jahr 2060** relevante Verkehrsanteile entfallen werden. Damit sich Schlüsseltechnologien schnell entwickeln, müssen sich auch die notwendigen unterstützenden Technologien auf Seite der Infrastruktur (Verkehrsinfrastruktur und Energieversorgung) entsprechend entwickeln.

- Der Verkehr der Zukunft wird im Energiesystem der Zukunft eingebettet sein und dieses durch den hohen momentanen Leistungsbedarf prägen. **Alternative Antriebsenergien stellen eine Schlüsseltechnologie dar.** Dennoch haben die verschiedenen Optionen zur Energieversorgung wenig direkten Einfluss auf das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage. Der Einfluss ist vor allem indirekter Natur und von der Ausgestaltung durch den Regulator abhängig. Auch bei einem zunehmenden **Einsatz sehr effizienter Strassenfahrzeuge und erneuerbarer Energien würden die Energiekosten etwa gleich** bedeutend sein wie heute und keine grosse Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage haben.
- Die Beschreibung von Auswirkungen erfordert die Einführung klar **strukturierter Wirkungsbegriffe.** Das Erfassen von Wirkungen ist anspruchsvoll und gelingt nur durch eine **Abstraktion auf die generischen Wirkungen.** Die direkten Wirkungen der einzelnen Schlüsseltechnologien sind eher gering, grosse Wirkungen werden durch die **Kombinationen mehrerer Technologien** erzielt. Für das Ausformulieren von Wirkungs-Zusammenhängen erweist sich der **Einsatz von Wirkungsmodellen** als zielführend.
- Die Auswirkungen des technologischen Wandels **betreffen das Verkehrssystem vor allem bei Angebot und Nachfrage und erst nachgelagert bei Ressourcen und Raumstruktur.** Fünf Schlüsseltechnologien wirken direkt auf Angebot und Nachfrage und stellen die relevanten Schlüsseltechnologien dar. Die weitreichendsten Auswirkungen auf das Verkehrssystem bewirken **automatisierte Strassenfahrzeuge,** mit möglichen negativen Folgen auf die Raumstruktur (Zersiedelung), während **Neue Verkehrssysteme** die Verdichtung von Siedlungsräumen unterstützen. **Virtual Reality** erweist sich als einzige Schlüsseltechnologie, die Verkehr gänzlich zu substituieren vermag.
- Im **Güterverkehr** besitzen unterstützende Schlüsseltechnologien im Umfeld der Automatisierung (**Vernetzung, Künstliche Intelligenz** oder **Blockchain**) aber auch neue Verkehrssysteme (z. Bsp. Cargo Sous Terrain) das Potenzial **Logistikabläufe zu verstetigen** und damit gesamte **Prozessketten umzuwälzen.** **Additive Fertigungsmethoden** unterwandern bestehende Abfolgen von Herstellung, Transport und Fertigung und bewirken **Veränderungen in der gesamten Wertschöpfungskette.** **Automatisierte Luftfahrzeuge** führen zu einer **zuverlässigen Abwicklung kleinteiliger Sendungsgrössen** (Bsp. Pakete) und entlasten den Landverkehr.
- Der technologische Wandel ist exogen. Werden denkbare **Szenarien des Schweizer Verkehrssystems** betrachtet, stehen alle Schlüsseltechnologien grundsätzlich zur Verfügung. Es zeigen sich aber **grosse Unterschiede, welche Schlüsseltechnologie zu welchem Zweck** und in welchem Kontext eingesetzt würde. Verkehrsreduzierende Schlüsseltechnologien (3D-Druck und additive Fertigung; Virtual & Augmented Reality) beispielsweise spielen eine grössere Rolle, je mehr das gesamte Verkehrssystem zugunsten räumlicher, energetischer und gesamtwirtschaftlicher Effizienz reguliert wird.

Wie die Schlüsseltechnologien sich in denkbaren Szenarien, respektive Zukunftsbildern, manifestieren werden, und wie die Konsumentinnen und Konsumenten darauf reagieren, wird wesentlich durch den **Regulator und sozio-ökonomische Treiber** moduliert. Dieses Teilprojekt fokussiert auf die Chancen, Treiber, gegenseitige Abhängigkeiten und verkehrliche Auswirkungen der 12 ausgewählten Schlüsseltechnologien. In Form von welchen **konkreten Anwendungen** sich dies manifestieren könnte, ist Thema des Teilprojekts zu neuen Organisationsformen und Anwendungen. Beispielsweise kann das – technisch identische – automatisierte Strassenfahrzeug das ÖPNV-Angebot sowohl relevant ergänzen wie auch stark konkurrenzieren.

Das vorliegende Forschungsprojekt ist auf den technologischen Wandel ausgerichtet und bietet keine Basis für regulatorische oder politische Handlungsempfehlungen. Hervorzuheben ist die Erkenntnis, dass die technologischen Potenziale sehr gross sind, und dass die **Realisierung der Chancen** – und das Minimieren der Risiken – der Schlüsseltechnologien zugunsten des Verkehrs der Zukunft im Wesentlichen **durch den Regulator bestimmt** wird. Der Regulator kann beeinflussen, oder eher die direkten (Zeit, Kosten, Komfort) oder die indirekten, systemischen Aspekte (Kapazität, Einbindung neuer Verkehrssteilnehmer, Umwelt inkl. Flächeninanspruchnahme, Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen) «bedient» werden. Beispielsweise können die Schlüsseltechnologien – im Verbund eingesetzt – wesentlich dazu beitragen, den Verkehr zeitlich und räumlich zu verteilen sowie die Kapazitäten zu erhöhen und so

die steigende Verkehrsnachfrage effizienter zu bewältigen. Auch erlauben die Schlüsseltechnologien – im Verbund eingesetzt – eine weitere starke Erhöhung der Effizienz des Verkehrs im Hinblick auf Energie, Klima und Flächeninanspruchnahme. Es gibt aber keine Schlüsseltechnologie, welche bei heutiger Regulierung sich rein von sich aus durchsetzen und diese Effekte bewirken würde. Ohne eine solche auf die indirekten Aspekte ausgerichtete Regulierung manifestieren sich vor allem jene Schlüsseltechnologien, welche die direkten (für den Einzelnen direkt relevanten) Aspekte des Verkehrs beeinflussen, und die Mobilität schneller, günstiger und komfortabler machen.

Anhänge

I	Experteninterviews und Delphi-Umfrage	127
I.1	Befragte Experten	127
I.2	Zusammenfassung der Interviews	128
II	Technologien vs. Schlüsseltechnologien	141

I Experteninterviews und Delphi-Umfrage

I.1 Befragte Experten

1. Runde:

Name	Institution	Land	Delphi
Pierpaolo Cazzola	IEA	FRA	
Prof. Dr. Andrea Vezzini	BFH	CHE	
Dr. Till Gnann	Fraunhofer	DEU	
Thomas Bachmann	Smide, Mobiliar	CHE	
Prof. Dr. Barbara Lenz	DLR	DEU	
Dr. Jürgen Peters	InnoZ	DEU	
Dr. Steffen Braun	Fraunhofer	DEU	
Prof. Dr. Beat Hintermann	Unibas	CHE	
Coan Bresser	SWECO	SWE	
Prof. Dr. Dirk Helbling	ETH	CHE	
Teun Hendriks	TU Delft	NLD	
Dr. Daniel Müller-Jentsch	Avenir Suisse	CHE	
Prof. Dr. Francesco Corman	ETH	CHE	Ja
Prof. Dr. Bart Van Arem	TU Delft	NLD	
Lars Thomsen	Future Matters	CHE	
Dr. Jörg Beckmann	TCS	CHE	
Alexander Mankowsky	Daimler	DEU	
Prof. Dr. Kay Axhausen	ETH Zürich	CHE	Ja
Dr. Monica Menendez	ETH Zürich	CHE	
Michael Sena	Futurist	USA	

2. Runde:

Name	Institution	Land	Delphi
Dr. Peter Mock	ICCT	DEU	Ja

Hans-Paul Kienzler	Prognos	DEU	
Dr. Sergio Bellucci	Bellucci Innovation Consulting	CHE	Ja
Dr. Thomas Sauter-Servaes	ZHAW	CHE	Ja
Christian Bach	Empa	CHE	Ja
Albert Schütte	Verkehrsausschuss des Landtags Baden-Württemberg	DEU	
Dr. Johannes Töpler	DWV	DEU	Ja
Dr. Manuel Schaloske	e-mobil BW	DEU	Ja
Bettina Zahnd	AXA Winterthur	CHE	Ja
Yves Zischek	SBB	CHE	Ja

Haben nur an der Delphi-Umfrage teilgenommen:

Name	Institution	Land	Delphi
Thomas Stoiber	AWEL	CHE	Ja
Christian Egeler	ARE	CHE	Ja

I.2 Zusammenfassung der Interviews

1. Runde:

1. Experte

Technologien tauchen nicht einfach plötzlich auf, es geht darum, dass sie aus einer Nische in den Alltag kommen, siehe z.B. InnoZ-Projekt Zukunftsfenster. Bspw. war Elektromobilität 2009 schon da, dann eine Weile „weg“, jetzt 2017 wieder da, aber noch immer in Nische, künftig wird diese Technologie aber Massenmarkt/Alltag sein.

Künftig wird auch die Robotik einen immer wichtigeren Platz einnehmen und sich 2060 komplett durchgesetzt haben. Fahren wird dann zu 80% automatisiert sein. Der Luftraum wird stärker beansprucht (z. B. Drohnen, Volocopters). Mobilität wird anders organisiert sein: kleine Grids/Netzwerken für bezahlen und sharen, z.B. auch Apps mit Flatrate für Mobilität und Verkehr. Auch wird die Mobilität im Boden zunehmen, z.B. in Röhren zwischen Städten (wo Neubauten möglich sind, eher nicht DE und CH). Das Fahrrad (oder ähnliches, wie Pedelec) bleibt, da Menschen bewegen und gesund bleiben wollen.

Technologien sind gut, so lange sie akzeptiert sind – es ist keine technologische Diskussion. Nicht die einzelnen Technologien sind interessant, sondern mehrere Technologien die als ein funktionierendes System funktionieren. Ohne gesellschaftliche Akzeptanz dieses Systems geht es nicht. Damit sich Technologien durchsetzen, muss einiges gewährleistet werden, z.B. Rechtsrahmen (z. B. automatisiertes Fahren, städtebaulich, ...), Förderungsgesetze, Transparenz, sicherheitstechnische Sachen, z.B. Datenschutz (obwohl das aus Sicht des Experten derzeit überbewertet ist).

2. Experte

Die wichtigsten technologischen Treiber für die nahe Zukunft (sowohl Pilotanwendungen als grosse Marktdurchdringung) sind: Mikromobilität (von Pedelec bis zu Automobil), fluggebundene Mobilität, z.B. Drohne und Volocopter), automatisierter ÖPNV, z.B. Helsinki, Lausanne, zunehmend automatisierter MIV – Anwendung in bestehenden Fahrzeugen, Mobilitätsplattformen, wie Mobility as a Service (MaaS), Hyperloop für ausgewählte Strecken

Es wird in 10-20 Jahren ein Rückgang von schienengebundenen Systemen erwartet, da die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme fehlt (insb. Instandhaltung von z.B. U-Bahnsystemen ist zu kostenintensiv (siehe man jetzt schon in NY)).

Was es 2030 gibt, wird 2060 voll etabliert sein. Einzelne Technologien sind dann aber schwierig zu identifizieren, es geht hin zu einem vielseitigen einheitlichen System. Wichtige Elemente in diesem System sind: luftgebundene Mobilität und Mikromobilität. Z.B. Robocaps auf Strasse oder in Luft an Schnittstellen zwischen MIV und ÖPNV mit eigenen Nutzungsprofilen auf Basis von Sharing. Weiter wird die Infrastruktur anders als jetzt aussehen, z.B. flächendeckende induktive Ladestationen.

Bis dahin gibt es regulatorische Herausforderungen (z.B. Ermöglichen bemannter und unbemannter fluggebundener Systeme), technologische Herausforderungen (z.B. leistungsfähige Elektromotoren, insb. Speichertechnologie (Komprimieren von Energie: elektrisch, flüssig, Wasserstoff, ...)) und wirtschaftliche Herausforderungen (z.B. skalierbare Geschäftsmodelle (auf Basis Predictive Analytics, Big Data, künstliche Intelligenz, ...)).

3. Experte

Für die nahe Zukunft wird im ÖPNV insb. die automatische Erfassung der Wege und der Preise im Vordergrund stehen. Es werden keine neuen Technologien auftauchen oder abgelöst werden.

2060 wird es Mobility Pricing geben (was zurzeit noch keinen Durchgang im Parlament findet), gestaltet als dynamisches Pricingssystem, wobei mehr belastete Strecken teurer als wenig belastete Strecken sind. Technologien, die benötigt sind um zu erfassen wer wann wohin fährt werden mithalten und sich weiterentwickeln. Rückgängig sind Papiertickets im Verkehr (obwohl es das Telefonbuch heutzutage auch noch immer gibt, man weiss ja nie...). Auch wird es keine Verbrennungsmotoren mehr geben, sondern elektrischer Antrieb oder auf Basis natürlicher Gase oder Wasserstoff. Von Fahrern gesteuerten Autos wird es 2060 noch immer geben.

Hierfür werden Durchbrüche in der Speichertechnologie (mit erneuerbaren Energien) und der Umweltökonomie (Kostenerhöhung/Verbot von fossilen Brennstoffen) benötigt sein. Im Allgemeinen muss der Anstieg des Energieverbrauchs geknackt werden.

4. Experte

Der allgemeine Trend für die nächsten 40 Jahre ist, dass die Technologien sich durchsetzen werden, die realistische Lösungen einfach und schnell bieten können. Alleinstehende (stand-alone) Technologien, wie Wifi-P für das vernetzte Fahren (ITS-G5) oder Lora oder Sigfox werden sich nicht durchsetzen; dafür aber 5G. Bluetooth hat zwar einen Platz erworben, ist aber relativ schwierig einsetzbar. Es wird erwartet, dass einfachere Alternativen für Bluetooth entwickelt werden.

Weiter spielen die Kosten eine wichtige Rolle. Z.B. die Telekom-Industrie wird voraussichtlich nicht in die teure Wifi-P Technologie für das vernetzte Fahren investieren, wenn eine gute und viel günstigere Technologie, nämlich 5G, verfügbar ist.

In 20-40 Jahren werden alle Fahrzeuge elektrisch sein. Grosse Schritte bzgl. Energieerzeugung und -speicherung sind dann genommen. Die wichtigsten Technologien für den Verkehr 2060 sind: Augmented Reality (z.B. technologische Unterstützung ohne etwas Bestimmtes tun/tragen/... zu müssen), Künstliche Intelligenz (z.B. zur Verteilung der Kapazität: wer wann wo mit welchem Verkehrsmittel unterwegs sein will), Nachfolger von 5G (z.B. jede 10 Jahre 1G dazu \approx 11G), Technologien für Jedermann (nicht nur NL/CH, sondern Inklusion der ganzen Welt).

Wichtig für die Durchsetzung o.g. Technologien sind z.B. Display Technologien (was wie wo projiziert wird), rechtlicher Rahmen und die gesellschaftliche Veränderung. Wenn alles künftig automatisiert ist, was machen die Menschen dann, die vorher „am Steuer“ waren (wörtlich und bildlich), wie sollte die Wirtschaft dann funktionieren, wie wird Geld verdient, gibt es z.B. noch LKW-Fahrer, ...?

5. Experte

Es wird technisch gedacht, es geht nicht um HW/SW, sondern um soziale Innovation, eine neue Organisation der Gesellschaft. Wichtige Technologien in die nächsten 10 Jahren, die dies unterstützen:

- Transport as a Service, z.B. Uber für Personen und Güter
- Elektro-Fahrzeuge, z.B. TESLA
- Selbstfahrende Fahrzeuge

Die Sharing Economy wird immer wichtiger, wir werden z.B. weniger Fahrzeuge benötigen (und Fahrzeuge auf Abruf benutzen). Dies bedeutet auch, dass weniger Energie benötigt wird für die Herstellung von Fahrzeugen, weniger Parkplätze/Garagen, usw.

In ferner Zukunft werden Technologien und Mobilitätsformen konvergieren, z.B.

- Fusion des öffentlichen und privaten Verkehrs, multimodal integriert, z.B. Bus, Bahn und Uber greifen ineinander um die letzte Meile abzudecken
-

- Integration von Personen- und Güterverkehr, z.B. sowohl Personen als Pakete werden in selbstfahrenden Taxis unterwegs sein

Die Sharing Economy wird sich auch in den Bereichen Stadtplanung und Architektur durchsetzen, so dass Home und Office immer mehr verschmelzen, was weitgehende Veränderungen in die Mobilitätsbedürfnisse haben wird. Künftig werden Räume multifunktionell genutzt werden, z.B. das Schlafzimmer wird mit robotischen Möbeln zum Arbeitszimmer. Videotelefonie in Richtung 3D und weitgehende graphische Techniken werden solche fundamentalen Durchbrüche unterstützen.

Im Allgemeinen ist für diese Transformation Mut benötigt: man muss experimenteller werden und einfach ausprobieren. Z.B. City Olympics: ein freundlicher Wettbewerb für Städte um kreativ die globalen Herausforderungen in allen Bereichen anzugehen. Die Gesellschaft soll mobilisiert werden um das maximale Innovationspotential zu erschliessen.

6. Experte

Technologietrends für die nächsten 10-20 Jahre sind: automatisiertes Fahren auf Autobahnen, Truck Platooning, LKW mit Elektro-/Hybrid-/Natural Gas-/Wasserstoff-Antrieb, Oberleitungen für LKW, neue Logistik-Formen in städtischen Regionen (z.B. kleine Lagerhallen, Drohnen).

2060 werden diese Trends völlig umgesetzt sein. Dann wird es keine fossilen Brennstoffe mehr geben (z.B. jetzt schon Statements über 2040 in FR/UK). Ob z.B. Hyperloop sich durchsetzen wird ist schwierig, da es eine sehr anfällige Technologie mit hohen Unfallrisiken ist. Weiter werden bis 2060 neue Transportformen existieren, z.B. Zwischenformen für Auto und Fahrrad, die komfortabel, schnell, günstig und insb. für kürzere Distanzen innerhalb der Stadt einsetzbar sind.

Eine Technologie, wie FM RDS-TMC wird es dann nicht mehr geben. Obwohl die Technologie jetzt schon obsolet ist, wird sie vorläufig noch bleiben. Ausstieg oder Austausch einer Technologie ist im Allgemeinen schwierig und mühsam, da die Anzahl im Feld befindlicher Geräte sehr hoch ist und die Alternative (oft neue Technologie) noch kein Massenprodukt ist (z.B. FM Switch-off => DAB).

7. Experte

Technologische Trends kann man nicht von anderen Trends trennen. Deshalb ist die Verzahnung der Teilprojekte innerhalb des Gesamtprojekts „Verkehr der Zukunft 2060“ sehr wichtig. Als Beispiel werden automatisch fahrende, elektro-getriebene LKWs, die nachts auf der rechten Spur einer Autobahn fahren, genannt. Dieses Zukunftsbild ist nur möglich, wenn verschiedene Bereiche (technisch, organisatorisch, infrastrukturell, politisch, regulatorisch, usw.) in einander greifen, damit gemeinsam Lösungen entwickelt und umgesetzt werden können.

Insgesamt geht es um eine fundamentale Veränderung rund um zwei Fragen: (1) wie nutzt man die Technologien und (2) welche Rahmenbedingungen sollen geschaffen werden? Es gibt zurzeit eine klare Trennung zwischen der Schweizer Verkehrspolitik und Innovationstreibern (wie Uber, Tesla, Silicon Valley, usw.), da die Politik vom Ingenieursdenken des 19. Jahrhunderts dominiert wird. Als Beispiel wurden die Milliardeninvestitionen für den Gotthard Basistunnel genannt. Gedanken über die Gesamtkonstellation (z.B. transnationale, multimodale Korridore, Schnittstellen mit der Logistikkette) kommen viel zu kurz.

Scharfe Botschaften zum Aufrütteln der Politik sind gefragt; gerne auch in diesem Teilprojekt, z.B. über Zitate von Think Tanks (beispielsweise Avenir Suisse), z.B.:

- „Die Schweizer Politik operiert als gäbe es keine Digitalisierung; sie ist noch nicht richtig in diesem Zeitalter angekommen.“
- „Die Politik muss wegkommen von ihrer passiven und reaktiven Sichtweise und stattdessen gestalterisch denken und proaktiv handeln.“
- „Der Wandel findet jetzt statt, also muss jetzt reagiert werden. Die Politik muss also zwei Gänge in ihrer Denkweise hochschalten.“
- „Die Politik muss sich überlegen, wie die Weichen für die nächsten 20 Jahre gestellt werden sollen, beginnend heute!“

Die nächsten 10-20 Jahre wird es eine modale Verschiebung zw. Strasse-Schiene geben. Die Entwicklungen auf der Strasse werden viel schneller gehen als auf der Schiene. Die Vermutung ist, dass der Schienenverkehr künftig der Dino der Mobilitätswelt sein wird: zu wenig Hirn, zu viele Masse, zu träge (organisatorisch, infrastrukturell) und zu teuer (Kapitalkosten).

8. Experte

In 10-20 Jahren wird es keine reinen Verbrennungsfahrzeuge geben, alle Fahrzeuge werden elektrisch oder hybrid sein. Ein weiterer Trend wird Shared Mobility sein, insb. Ride Sharing. Neue Formen von ÖV werden entwickelt, z.B. Minibusse, die Nachfrage-basiert sind. Insgesamt wird es ein multimodales Verkehrssystem geben mit

hoher Koordination der Informationen und Kontrolle. Auch wird die Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen, insb. auf Autobahnen und bzgl. Parkieren, wesentlich vergrößert sein. Grosse Schritte bzgl. Energiespeicherung und Vorhersage der Verkehrsnachfrage sind dann genommen.

Mobilitätsformen, so wie wir sie jetzt kennen, z.B. Uber/Taxis oder Fahrradverleihsysteme, wird es künftig nicht mehr geben. Durch Shared Mobility geht es hin zu einem System mit „frei schwebenden“ (free-floating) Elektrofahrzeugen, die nicht zu einem Standort zurückgebracht werden müssen.

Schlüsseltechnologien für 2060 sind: 3D-Mobilität (insb. Luft), spezielle, persönliche Führungstechnologien (z.B. Nachfolger Smartphone: nicht ständig auf Bildschirm gucken müssen), Technologien um Reisezeit/Pendelzeit (besser) als Arbeits- oder Freizeit nutzen zu können.

9. Experte

Technologien, die in 10-20 Jahren im Vordergrund stehen:

- Elektrisch Fahren (PKW, LKW, Fahrrad, Motorroller, ...) – ermöglicht durch Speichertechnologie
- Vernetztes Fahren – ermöglicht durch Kommunikationstechnologie (z.B. 4G/5G/Wifi P/G5/...) und oben drauf eine Plattform für Diensten
- Automatisiertes Fahren: PKW: insb. L2 und auf Autobahnen und Autobahnähnlichen Strassen, LKW: Truck Platooning auf längeren (internationalen) Strecken

MaaS ist heutzutage noch eine Nische und wird dies ohne externe Eingriffe (z.B. politisch) voraussichtlich bleiben, da MaaS relativ teuer ist im Vergleich zu Auto- und Parkplatzbesitz. Allerdings wäre MaaS insb. in Städten gut umsetzbar, wenn Bahn und Leih-Fahrrad besser verknüpft würden. Ob Car Sharing sich durchsetzt ist fraglich, denn dafür müsste das Auto ein knappes Produkt werden und so sieht es nicht aus.

Durchdringung von automatisiertem Fahren mit L3/4 wird länger als 20 Jahre dauern, hängt stark von Voraussetzungen/Definitionen ab, denn Audi behauptet kurzfristig schon ein L3/4-Auto mit Stauassistent zu lancieren. L4-Fahrzeuge werden künftig auf separater Infrastruktur fahren („operational design domain“), insb. Pods, z.B. auf Fahrradwegen (Pilots in NL). Da Autos künftig sicherer sein werden, wird sich der Autobau bzw. die Karosserie von Autos verändern (z.B. Autos werden leichter).

China ist das Land, wo sich die grössten technologischen Innovationen abspielen werden. Zurzeit sind die technologischen Entwicklungen und Umsetzungen noch beschränkt durch Fachkräftemangel, aber 2060 wird China dies nachgeholt haben und wird hier z.B. das Hyperloop umgesetzt sein.

Wie die Welt 2060 aussieht ist zu viel eine „Kristallkugel“. Es geht insb. darum ein Bild zu haben, wie wir dann leben und arbeiten werden. Technologien werden da sein um uns zu unterstützen, aber welche genau ist schwierig zu sagen. Wichtige Technologien sind jedenfalls Virtual Reality und Computing (z.B. dann wird es den Quantencomputer geben). Weiter wird es elektrische Fahrzeuge mit automatisierten Funktionen geben, sowie spezielle Hochgeschwindigkeits-Infrastruktur für z.B. Bahn und Fahrrad.

10. Experte

Wichtige technologische Entwicklungen in den nächsten 10 Jahren:

- Energie/Antrieb: nächste Stufe in Batterietechnologie (höhere Energiedichte, längerer Lebensdauer, günstigerer Preis); elektrische Fahrzeuge im Personenverkehr, im ÖV, in der Logistik.
- ICT: Internet of Things (IPv6) (sieht Herr Thomsen als Technologie, im Gegensatz zu unseren Folien): alle Dinge, die mit Verkehr/Logistik zusammenhängen werden mit dem Internet verbunden sein, z.B. vollkommen automatische Frachtbörse (statt Dispatcher per Telefon)
- Fahrzeuge: erste vollautomatisierte Fahrzeuge ohne Fahrer auf der Strasse, z.B. City Pods (letztendlich als Konkurrenz zum heutigen ÖV) und autonome Busse im ländlichen Gebiet, erste elektrische Flugzeuge für Kurzstreckenverkehr (<150 km) für kleine Zubringerdienste, erste elektrische Wasserfahrzeuge, z.B. kleine, private Boote

In den nächsten 20 Jahren werden folgende Weiterentwicklungen stattgefunden haben:

- Der Verbrennungsmotor existiert nicht mehr, der Elektromotor ist die günstigere Alternative zum Verbrennungsmotor
- Autonome Busse/Pods im urbanen Bereich, fahrerlose Züge im Pendlerverkehr, kommerzielle elektrische Fähre, vollautonome Wasserfahrzeuge für die transnationale Lastbeförderung, elektrische Flugzeuge auf Mittelstreckenverkehr (2000 km)
- Passagier-Drohnen für Punkt-zu-Punkt-Beförderung (5-300 km); vollautomatisch und elektrisch betrieben; Preis ~ 1. Klasse Bahnfahrt; Luftraumregelungen müssen getroffen werden
- Service-Robotik, z.B. mobile Roboter, die LKW beladen oder Pakete ausliefern (z.B. Drohne)

2060 wird Mobilität ein Dienst sein. Die Notwendigkeit um physisch zu reisen wird drastisch abgenommen haben. Virtuelle Realitäten werden immer wichtiger. Nach Luft, Wasser, Strasse und Schiene wird Röhre die 5. Form der Mobilität sein. Dezentrale regenerative Energieerzeugung wird sich durchgesetzt haben. Innerhalb 50 Jahren werden 60% der Arbeitsplätze vollkommen automatisiert sein.

11. Experte

Insbesondere der Elektro-Antrieb wird den Verkehr und die Mobilität in Zukunft stark prägen. Für den Individualverkehr sind folgende Segmente betroffen:

- Automobil
- Velo: „Renaissance der aktiven Mobilität“, Veränderungen im Pendlerverkehr, z.B. Umsteiger von Bahn oder Auto auf Velo, elektrisches Velo mit zusätzlichen Ladenkapazität: Lastenvelo/E-Cargo-Bike
- Velo-ähnliche Geräte der Mikro-/Nanomobilität, z.B. Segway, E-Trottinette, One-wheeler

Die Elektrifizierung des Verkehrs ist nicht nur eine neue Antriebstechnologie, diese technologische Entwicklung kommt mit neuen Akteuren (z.B. Energieversorger), neuen Geschäftsmodellen, neuer Infrastruktur (z.B. Voraussetzung = flächendeckendes Ladennetz, z.B. auch beim Arbeitgeber oder Shoppingcenter). Die Systemwirkungen der Elektrifizierung sind gross, man müsste sich auch zu Mobility Pricing bekennen.

Neben der Elektrifizierung spielt die Sharing Economy eine grosse Rolle: eine soziale Innovation, die von Technologien (hier: Sharing Technologien) ausgelöst wird, z.B. Peer-to-Peer car sharing. Die Sharing Economy kommt mit neuen Akteuren, z.B. TNCs (Transportation Network Companies), wie Uber und Lyft, die sich mit neuen Dienstleistungen und neuen Geschäftsmodellen zwischen schon etablierten Akteuren, wie OEM und ÖV, einen Platz sichern müssen.

2060 wird der motorisierte Personenlandverkehr zu 99% elektrifiziert sein. Als Hobby kann man dann mit seinem Oldtimer mit Verbrennungsmotor in der Freizeit auf einem Parcours fahren. Weiter werden dann 99% aller Automobile als vollautomatische Fahrzeuge („Travel Pods“) über Flottenanbieter mit unterschiedlichen Geschäftsmodellen buchbar und teilbar in Zonen herumfahren. Eine Frage, die in der heutigen Debatte noch zu kurz kommt, ist was die Konsequenzen des technologischen Wandels für die Menschen sind. Z.B. Was bedeutet das für mich, werde ich immer unterwegs sein, was verändert im Haus, in meinem Arbeitsleben, usw. Übrigens ist die Vermutung, dass wir 2060 nicht nur in Travel Pods unterwegs sein werden, die Städte werden viel lebbarer als jetzt und damit attraktiver für den aktiven, Langsamverkehr sein.

12. Experte

Die zwei wichtigsten Technologien für Mobilität und Verkehr in den nächsten Jahrzehnten sind:

- Autonomes Fahren: wichtige Voraussetzung ist „informiertes Vertrauen“, denn Mobilität ist Kooperation, wie tanzen, intuitiv, ohne Worte. Ein Roboter im Raum ist vielleicht noch niedlich, ganz viele Roboter im Raum sind vielleicht bedrohend. Es müssen u.a. Wahrnehmungshandlungsmodelle entwickelt werden, damit autonome Fahrzeuge die automatischen Mechanismen von Menschen im Verkehr erkennen, damit umgehen und selber übernehmen können. Gesetzgebung spielt auch eine wichtige Rolle, aber die kommt meistens nachher.
- Elektrifizierung: insb. die Energiequelle (d.h. Batterie) zeigt viel Verbesserungspotential auf. Bzgl. Stromerzeugung müssen alternative, nicht-fossile Kraftstoffe gefunden werden, z.B. künstliche Photosynthese, flüssige Wasserstoff.

Ein Bild für 2060 abzugeben ist sehr gewagt. Der Klimawandel wird bis dahin sehr spürbar sein und unser Leben, auch Mobilität und Verkehr, werden daran angepasst sein. Technologische Innovationen und kulturelle Innovationen müssen zusammengebracht werden. Partizipative Forschung (z.B. mit Künstlern) ist wichtig um gemeinsam kreative Lösungen für Probleme zu finden.

13. Experte

Bzgl. Produktion wird sich die Automatisierung aller Verkehrsmittel weiterentwickeln, damit: (a) Fehler vermieden, (b) Kapazitäten besser ausgenutzt und (c) (abhängig vom Verkehrsmittel) Betriebskosten eingespart werden können.

Bzgl. Nachfrage kann uns insb. die künstliche Intelligenz bestimmte Koordinations- und Organisationsarbeiten abnehmen, aber der Experte empfindet das nicht als grosser Durchbruch (z.B. im Vergleich zur Erfindung des Autos). Er ist in dieser Hinsicht eher ein bisschen pessimistisch und verweist auf das Buch „Rise and Fall of American Growth“.

Nach einer Phase vom gemischten Verkehr werden im Jahr 2060 nur selbstfahrende Autos herumfahren. Aber nur wenn wir diese Phase durchkommen: d.h. wenn die Akzeptanz für selbstfahrende Autos da ist und die vermeinten Vorteile sich bewiesen haben. Selbstgesteuerte Fahrzeuge wird es voraussichtlich nur in Freizeitparks geben. Neben Automatisierung sind weitere Schlüsseltechnologien für 2060: Energiespeicherung und Überschallflug.

14. Experte

Die nächsten 10-20 Jahre werden von Technologien geprägt sein, die jetzt schon da sind (z.B. in der Testphase), aber noch nicht weit verbreitet sind:

- Vernetztes und automatisiertes Fahren: insb. das vernetzte Fahren wird einen grossen Einfluss auf die Mobilität haben, insb. die Entwicklung der Verwendung dieser Technologien wird im Fokus stehen (z.B. Entwicklung von Algorithmen), um die Möglichkeiten besser auszunutzen (z.B. Umleitung, Signalsteuerung, besserer Zugang zu Mobilität für bestimmte Benutzersegmente, z.B. ältere Menschen, usw.)
- Mobility as a Service: Zugriff auf das gesamte Paket an Transportmodi und nur wählen/zahlen was gebraucht wird, Verlagerung vom Auto auf andere Transportmodi
- Carsharing: nicht nur neue Dienstleister, sondern auch traditionelle OEMs, die Carsharing anbieten werden (z.B. Zugang zu verschiedenen Fahrzeugtypen, z.B. ein kleines Auto um das Kind von der Schule abzuholen, ein grösseres Auto zum Einkaufen), evtl. mehr Autofahrten, vor allem von Leuten, die vorher kein Auto hatten

Technologien die (auf Dauer) verschwinden werden, sind z.B. Schleifendetektoren (FCD sind eine bessere Quelle, z.B. Entwicklungsländer überspringen die Installation von Schleifendetektoren und werden FCD verwenden), Lichtsignalen und Verkehrsschilder (Veränderungen erwartet, z.B. weniger und elektronisch), Diesel-Antrieb und vielleicht auch Gas-Antrieb.

2060 ist wirklich weit weg und die technologischen Entwicklungen gehen so schnell. Im Jahr 2060 wird es noch vernetztes und autonomes Fahren geben. Aber bis dahin wird das eher „traditionell“ sein. Völlig neue Transportmodi werden dann entwickelt sein, z.B. Hyperloops zur Verbindung von Grossstädten auf der ganzen Welt oder eine Art Einheiten/Pods, die als mehrere Transportmodi fungieren oder diese integrieren können (z.B. „moving room“ als Auto/Privatflugzeug/Zug, usw.).

15. Experte

Eine Technologie, die am wahrscheinlichsten verschwindet, sind eingebettete Strassensensoren. Sie sind zu teuer, schwierig zu installieren und liefern nur eine Art von Information. Für die Erfassung von Verkehrsinformationen sind nicht nur Messfahrzeuge auf der Strasse geeignet. Auch unbemannte kleine Flugzeuge (z. B. Drohnen) sind sehr geeignet um Geschwindigkeit, Verkehrsstörungen und Wetter zu überwachen und werden voraussichtlich in den kommenden Jahren mehr und mehr eingesetzt.

Anhand des Beispiels von Stephen Hawking, der seinen Doomsday-Timer immer wieder korrigiert, erklärt der Experte, dass es extrem schwierig ist, 50 Jahre vorausszuschauen. 50 Jahre zurückblicken zeigt, dass es in dieser Zeitspanne viele Entwicklungen gibt, die man damals überhaupt nicht hatte vorsehen können. Das beste Beispiel ist das Smartphone.

Der Experte erwartet in den nächsten 50 Jahren keine grossen Veränderungen im Verkehr und Transport. Er geht z. B. nicht davon aus, dass wir dann alle in automatisierten Fahrzeugen herumfahren und schätzt die Wahrscheinlichkeit höher, dass wir uns mit privaten Flugzeugen fortbewegen werden. Allerdings werden sich insb. infolge des Internets Dinge ändern, die sich auf Verkehr und Transport auswirken. Schon jetzt sehen wir, dass Einkaufszentren verschwinden, weil die Leute ihre Sachen im Internet kaufen. Auch wird erwartet, dass sich insb. unsere Arbeitssituation ändern wird: wir werden nicht mehr zur Arbeit fahren müssen, entweder weil wir die Arbeit mit technischer Unterstützung von Zuhause aus erledigen können oder weil unsere Arbeit von Robotern übernommen wird.

Die wichtigste Schlüsseltechnologie für 2060 ist nach Ansicht des Experten dann auch künstliche Intelligenz. Es gibt starke militärische und wirtschaftliche Interessen bei der Entwicklung von Robotisierungskonzepten, wie fahrerlosen Fahrzeugen und Drohnen, die ihren Weg in die Verkehrsszene finden. Auch Technologien zur Verbesserung menschlicher Sensoren (z. B. Lidar, Radar, Kamera) sind Teil dieser Entwicklungen.

Es ist von grösster Wichtigkeit, dass Politik und Entscheidungsträger Verantwortung übernehmen und über die Ziele nachdenken, die sie 2060 erreichen wollen, und sich jetzt entsprechend verhalten, damit diese Ziele erreicht werden können.

16. Experte

Der Experte sieht die wichtigsten aufkommenden Technologien schon in den nächsten zehn Jahren. Er erwartet, dass bis ins Jahr 2027 Elektrofahrzeuge an Wichtigkeit gewinnen werden. Zudem hat er das Gefühl, dass die Technologie hinter autonomen Fahrzeuge in den nächsten zehn Jahren soweit reifen wird, dass sie in handelsüblichen Fahrzeugen enthalten sein wird. Fahrzeuge werden ausserdem leichter, und die Kosten der Batterien werden weiter sinken; dies verspricht Elektrofahrzeuge kompetitiver zu machen.

Für den Zeithorizont 2037 (20 Jahre) erörtert er weiter, dass das autonome Fahren sich ausbreiten wird und auch Probleme mit sich bringen kann. Die Menschen werden weitere Wege auf sich nehmen, wenn die Reisezeit nicht mehr als solche erfahren wird. Die Wichtigkeit steigt in diesem Zeitraum auch, die CO₂-Emissionen zu lindern. Deshalb steigt die Nachfrage an Zero-Emission Technologies in diesem Zeitraum. Über die Frage ob sich der Güterverkehr elektrifiziert antwortete er, dass es in urbanen Gebieten sicher der Fall sein wird. Für grössere

Strecken jedoch, glaubt er nicht daran und hat eher das Gefühl, dass sich der Güterverkehr auf die Schienen verlagern wird.

Für den Zeithorizont 2060 nennt er weitere politische Handlungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die CO₂-taxierung. Die Folge davon wäre, dass der Preis für Mobilität steigt, was zu einer Reduktion der Nachfrage führen würde. Abermals wird deshalb auf die Wichtigkeit von «Zero-emission technologies» hingewiesen. Power-to-X sieht der Experte als sehr wichtig, auch wenn ihm klar ist, dass die Infrastruktur für den Transport von Wasserstoff momentan noch nicht gewährleistet ist. Weiter wird das «Physical Internet» als wichtiger Fortschritt erwähnt. Das ist ein Begriff aus der Logistik, der ein globales vernetztes Logistiksystem, welches durch einheitliche Datenkap selung, Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle an Effizienz gewinnt.

Allgemein gesagt sieht er als Treiber hinter den meisten möglichen Schlüsseltechnologien ein intakter politischer Rahmen, der durch Subventionen das Verkehrssystem in die gewollte Richtung steuert. Genannte Beispiele sind ein Dieselvebot und die Subventionierung/Regulierung CO₂ armer Verkehrsmittel. Dieser Punkt wird immer wieder beteuert, und darauf hingewiesen, dass das gesamte Verkehrssystem (Politik und Wirtschaft eingeschlossen) in eine Richtung arbeiten müssen, damit sich die jeweiligen Technologien durchsetzen können.

17. Experte

Der Experte sieht klare Trends in der künftigen Mobilität. Den elektrischen Fahrzeugen stehen seiner Meinung nach nur noch die Kosten der Batterie im Weg. Wichtiger scheinen ihm, dass die Ladeinfrastruktur aufgebaut wird und sich noch verbessert; dabei liegt seiner Meinung nach der Schwerpunkt auf den Schnellladestationen. Für ihn ist auch noch nicht klar definierbar, ob nicht doch induktives Laden an Wichtigkeit gewinnen wird. Weiter befindet er als wichtiger Punkt, dass die Graue Energie bei der Erzeugung der EV (vor allem Batterie) möglichst CO₂-neutral ist.

Autonomes fahren wird für ihn im Jahr 2060 zum Standard gehören. In den nächsten zehn Jahren sieht er jedoch eine Steigerung zu Level 3 autonomen Fahren als maximalen Fortschritt an. Er sieht den Wandel aber eher im menschlichen Mobilitätsverhalten, welches sich wandelt und durch die Autonomie weiter beeinflusst wird. Er fragt sich ob überhaupt noch jemand ein Fahrzeug besitzen wird, oder ob das Auto als Statussymbol – wie wir es heute kennen – vollständig seinen Wert verlieren wird. Das sharing Fahrzeugen würde eine viel bessere Fahrzeugauslastung mit sich bringen. Die Fahrzeuge würden nicht mehr – wie heute üblich – 23 Stunden am Tag stehen, sondern rund um die Uhr optimal ausgelastet. Weiter sagt er, dass die Anzahl Pkm und Fzkm weiter steigen werden, die absolute Anzahl Fahrzeuge aber sinken wird. Zu Leerfahrten macht er sich keine Sorgen; wenn man nämlich kein Fahrzeug besitzt – sondern shart – kann es optimal benutzt werden und die Leerkilometer werden minimiert.

Ein sehr spannendes Bild hat er von der Zukunft des Güterverkehrs. Für das Jahr 2060 sagt er, dass man umdenken müsse bezüglich Güterverkehr. Der Trend geht immer mehr in die Richtung, dass die online bestellten Güter so schnell wie möglich an den Zielort gelangen sollen (same-day-delivery, usw). Deshalb wird sich der Güterverkehr – vor allem in der Schweiz wo die Distanzen nicht allzu gross sind – vom klassischen Verkehrssystem lösen. Er kann sich Projekte wie „cargo sous terrain“ oder Systeme wie „Flaschenpost“ gut vorstellen, wo die Güter durch eine neue Infrastruktur (z.B. Röhren Über- oder Untergrund) gesendet werden. Er kann sich sehr gut vorstellen, dass im Jahr 2060 in der Schweiz weder in urbanen noch in nicht-urbanen Gebieten LKWs mehr im Einsatz sind.

Power-to-X sieht er als sehr wichtige Technologie (schon für den Zeithorizont 2040). Auf die Frage, ob denn die fehlende Infrastruktur nicht ein grosses Problem darstellen wird, antwortete er, dass für die EV eine kontinuierliche Ladeinfrastruktur die Grundlage sei und diese genauso schwer zu implementieren sei, wie eine Infrastruktur wie für z.B. Wasserstoff.

Als letzten wichtigen Punkt erwähnte er Technologien, welche die Mobilität senken werden: Beispiele wie Hologramme, VR und additive Verfahren wurden dabei genannt.

MaaS ist für ihn keine Technologie, sondern eine Dienstleistung.

Hyperloop findet er spannend, sieht jedoch das Problem, dass man Fahrplangebunden mit vielen Leuten „eingepfercht“ im ÖV sitzt. Dann würde er viel lieber in einem autonomen Fahrzeug (alleine) sitzen. Hyperloop könne alleindurch die Geschwindigkeit und Kosten überzeugen.

18. Experte

Der Experte beginnt direkt (Zeithorizont 10 Jahre) vom Internet of Things (IoT) zu sprechen. Das habe sich bis anhin nur noch nicht durchgesetzt, weil keine Standards bei den end-to-end Schnittstellen definiert wurden. Systeme wie „LORA“ (Long Range Wide Area Network) bei welchen es explizit um die Energieeffizienz geht sieht er als Zukunftsträger, da Sensoren und die Datenübertragung zu viel Energie benötigen. Für den gleichen Zeithorizont sieht er bei Sharing ein grosses Potential, was noch lange nicht ausgeschöpft sei. Die junge Generation habe noch halb so viele Führerscheine wie früher üblich und merke, dass der Komfort viel grösser ist, wenn man Verkehrsmittel (z.B. Boot, Fahrrad und Auto) nicht mehr besitzt, sondern leiht. Die fehlenden Führerscheine bedeuten aber auch, dass Verkehrsträger gebraucht werden, für welche kein Führerschein benötigt wird.

Zu autonomen Fahrzeugen sagt der Experte, dass sie kurzfristig überschätzt werden. Mittel- und längerfristig sieht er aber ein riesen Potential. Es entsteht weniger Stau, denn die Fahrzeuge fahren in minimalen Abstand.

Die Schwierigkeit ist, dass die Frage der Versicherungen noch nicht geklärt ist. Wer haftet bei einem Unfall? Der „Fahrer“, der eigentlich keiner mehr ist? Der Autohersteller? Der Anbieter der Kommunikationsdienste? Diese Fragen müssen zuerst politisch geklärt werden, was eine geraume Zeit dauern kann. Deshalb sieht er das Potential kurzfristig vor allem bei Zügen, Trams und Bussen welche einer klar definierten Route folgen. Bei der Implementation der Autonomie würden die öffentlichen Verkehrsmittel zuerst überwacht und nach einer gewissen Zeitperiode ohne Überwachung unterwegs sein. Für den gleichen Zeithorizont (2037) sieht er zudem noch Drohnen, welche vorerst (auch wieder aus rechtlichen Gründen) nur für den Güterverkehr verwendet werden. Für den Personenverkehr kann er sich auch vorstellen, dass es an Wichtigkeit gewinnen wird; da aber neue Gesetze die Grundlage dafür sein werden, dauert es auch hier lange. Um dem Transport so viel Platz wie möglich zu bieten, kann sich der Experte auch gut vorstellen, dass es zwischen den Städten untergrund-Tunnels geben wird; möglicherweise für Autos oder auch für „Hyperloop“-ähnliche Fortbewegung. In 20 Jahren sieht er auch keine ICEV mehr auf dem Markt; diese werden nur noch als Old-Timer verwendet.

Für den effektiven Zeithorizont (2060) sagt er könne man nur noch spekulieren und es grenze an Raten. Der Experte kann sich vorstellen, dass VR und Hologramme so gut werden, dass sie zu einer Abnahme der Mobilitätsnachfrage führen werden. Weiter wird die Robotik sich so weit entwickelt haben, dass man nicht mehr selber einkaufen geht. Auf der anderen Seite erwähnt er den Begriff „Digital Detox“ der heute schon grossgeschrieben wird; wobei Leute vor der Digitalisierung in die Ferien flüchten was bedeutet, dass eine Steigerung der Digitalisierung auch mehr Reisen bedeuten könnte. Der ÖV wird bestimmt Fahrplänen gebunden sein und höchst wahrscheinlich auch keine fixen Stationen mehr haben.

19. Experte

Der Experte begann direkt über das autonome Fahren zu sprechen. Er war aber eher zurückhaltend zu diesem Thema, wenn man es mit anderen Expertenaussagen vergleicht. Er sieht für die nächsten zwanzig Jahre einen langsamen und schrittweisen Fortschritt. In zwanzig Jahren werden die Fahrzeuge seiner Meinung nach noch nicht alle vollständig automatisiert sein. Für das Jahr 2060 sieht er eine vollständige Automatisierung. Er macht sich kaum Sorgen bezüglich Anzahl Leerfahrten, denn er glaubt, dass dann mehr „pooling“ ohne den Besitz von Fahrzeugen geschehen wird.

Das nächste Thema ist die fortschreitende Vernetzung, welche sich stetig weiter entwickeln wird und viele neue Angebote wie z.B. «Uber» entstehen lassen wird. Er äussert sich aber nicht weiter dazu; das seien auch keine Technologien.

Das Gespräch führte weiter zu Antriebsformen. Der Experte unterscheidet stark zwischen urbanen und nicht-urbanen Räumen. In Urbanen Gebieten wird sich der Verkehr schneller in Richtung einer vollständigen Elektrifizierung aller Fahrzeuge bewegen. Er sieht Oberleitungen als wiederkehrender Trend für Busse, um vor allem in Flächen welche Hügel haben die ungenügenden Batterien zu ersetzen. Dieser Trend wird wahrscheinlich in den meisten Europäischen Städten zu beobachten sein, da lokale Emissionen in urbanen Gebieten verboten sein werden. Zwischen Städten (grosse Distanzen) werden die Batterien wahrscheinlich nicht ausreichend Reichweite zur Verfügung stellen können. Eine valide alternative vor allem für den Strassen-Güterverkehr sind Oberleitungen über Autobahnen für LKWs. Oberleitungen können nach Berechnungen des Experten sogar relativ kostengünstig ausfallen, wenn man die Kosten auf alle LKWs verteilt. Die einmaligen Investitionskosten sind natürlich sehr hoch (DE --> 4000km Oberleitung kosten 10 Mrd. Euro). Power-to-X sieht der Experte als valide alternative, welche fossile Brennstoffe für LKWs, Schiffe und sogar Flugzeuge durch erneuerbare Brennstoffe ersetzen könnte. Das Problem dabei sind die tiefen Effizienzen dieser Umwandlung von Strom zu Wasserstoff zu Kohlenwasserstoff. Falls sich diese Technologie durchsetzt, könnten Treibstoffe im Ausland hergestellt werden und dann im eigenen Land getankt und genutzt werden. Man hätte dabei lokale Emissionen (bei Kohlenwasserstoffen), diese würden aber durch die Produktion amortisiert.

Die Ladeinfrastruktur ist ein weiterer wichtiger Treiber für die Elektrifizierung des PKW-Marktes. Der Experte erzählt von der Marke «Porsche» welche heute an einer Ladesäule mit 350 kW Leistung und gekühlten Ladekabeln arbeitet.

20. Experte

Der Experte erzählt als erstes, dass es eigentlich alle künftigen Technologien schon gibt. Er sieht in den nächsten 10 Jahren ein Dominieren der Elektromobilität. Ob sich diese durch rein Batteriebetriebene Fahrzeuge oder durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellen etablieren wird ist ihm noch unklar. Er fragt sich aber, wie eine Elektrifizierung mit Wartungsärmeren und -freundlicheren Fahrzeugen die auf ICEV fokussierte Wirtschaft beeinflussen wird.

Synthetische Kraftstoffe (Power-to-X) werden in den nächsten zehn Jahren ebenfalls effizienter und wirtschaftlich. Diese Brennstoffe werden sich aber vor allem für Langstreckenfahrzeuge (Busse und LKWs) oder Fortbewegungsmittel wo Batterien kaum einsetzbar sind (Langstreckenflugzeuge) durchsetzen. Flugzeuge für Kurzstrecken (sehr kurz!) können möglicherweise in einem teuren Preissegment doch elektrifiziert werden.

Autonomes Fahren wird nach Meinung des Experten bestimmt schon in den nächsten paar Jahren perfektioniert werden. Einzig in ländlichen Gebieten sieht er Schwierigkeiten, weil da die Einfachheit einer Autobahn nicht gegeben ist und das vernetzte Informationssystem – wie es in urbanen Gebieten vorhanden ist – fehlt. Er sieht gefahren in der möglichen Monopolisierung des autonomen Fahrens: Wenn es nur noch um den rein ökonomischen Aspekt bei der Betreuung der Flotte geht, werden Gebiete welche nicht lukrativ sind einfach nicht bedient.

Für den Güterverkehr sieht er die Automatisierung als Gefahr, weil die Schiene kaum mit der Attraktivität der Strasse mithalten werden kann.

Deshalb hofft er, dass der ÖV – in welcher Form auch immer er in der Zukunft vorhanden sein wird – weiter staatlich überwacht wird und nicht nur kommerziell betrieben wird.

Bus Rapid Transit (BRT) ist ein System, welches sich in verschiedenen Südamerikanischen Städten und auch in Teilen Europas durchgesetzt hat. Man setzt dabei auf Busse, welche meist eigene Spuren besitzen und somit den Komfort einer Bahn anbieten können mit den Kosten des Transports auf der Strasse.

Oberleitungen sind seiner Meinung nach eine valide Möglichkeit zur Elektrifizierung schwer-elektrifizierbarer Fahrzeuge. Er sieht auch die Möglichkeit von Systemen wo ein Bus oder LKW über gewisse Strecken an einer Oberleitung angeschlossen ist und dabei die interne Batterie aufladen kann. An gewissen (schwierigen) Stellen, kann er sich entkoppeln und direkt als BEV weiterfahren.

Ein interessanter Punkt zu allgemeinen 3D Mobilität wurde genannt: Man könne gut alle Menschen durch Drohnen transportieren, denn die Kapazität des Luftraums ist schier unendlich. Beim Landen und starten jedoch, sieht es komplett anders aus denn man ist da wieder durch die Zwei-Dimensionalität der Erdoberfläche limitiert.

2.Runde:

1. Experte

Der Experte ist sicher, dass die Zukunft **elektrisch** ist. Er sieht für das Jahr 2060, dass alle PKWs BEV oder zumindest BEV mit «range extender» (RE) sind. Auch LKWs und Busse werden grösstenteils elektrifiziert sein. Er sieht da aber Induktion oder Oberleitungen im urbanen Gebiet als konkurrenzierende Technologien. Induktives Laden macht aber vor allem bei Bussen Sinn, da diese immer wieder halten müssen und das für induktives Laden unerlässlich ist. Kurzfristig ist die Ladeinfrastruktur in den meisten Ländern noch ungenügend. Das Ausbauen einer funktionierenden Ladeinfrastruktur ist der wichtigste Treiber für die Elektrifizierung. In den Augen des Experten braucht es dazu Förderungen und Zusammenarbeit der Staaten mit Unternehmen, welche die Ladesäule herstellen und anbieten. Gesetze welche eine Quote an Ladestationen pro PEV voraussetzen können möglicherweise eine gute Voraussetzung dafür sein. Die Chancen der Elektromobilität sind die höhere Effizienz und die lokale Emissionsbefreiung. Als Risiken sieht er, dass der Strom erneuerbar sein muss um Null-Emissionen der Fahrzeuge voraussetzen zu können. Rohstoffe – wie z.B. Kobalt – welche für Batterien notwendig sind, müssen nachhaltig und sozial verträglich abgebaut werden.

Beim **autonomen Fahren** sagt der Experte, dass in den nächsten zehn Jahren noch nicht viel zu erwarten ist. Mittel- und langfristig jedoch, wird es den Verkehr sehr stark beeinflussen. Die Chancen sind, dass die Reisezeit anderweitig genutzt werden kann. Fahrzeuge können bei vollständiger Automatisierung auch komplett anders gebaut werden als heute, da sie dann nicht mehr den gleichen Sicherheitskriterien genügen müssen. Dadurch können Autos z.B. leichter gebaut werden. Zusammen mit «shared mobility» lassen sich autonome Fahrzeuge effizienter nutzen. Risiken sind, dass autonome Fahrzeuge nicht automatisch auch effiziente Autos sind. Falls die Reisezeit nicht mehr als solche wahrgenommen wird, kann die konsumierte Mobilität stark steigen. Deshalb muss dann der Preis für Mobilität entsprechend der Kosten und Externalitäten (hoch) gehalten werden, damit immer noch mit Verstand Mobilität konsumiert wird.

Power-to-X ist für ihn ein völliger Unsinn wegen der schlechten Effizienz. Möglicherweise sieht er für Flugzeuge und Schiffe einen möglichen Einsatz dieser synthetischen Treibstoffe. Doch auch bei diesen Fortbewegungsmitteln sagt er, dass es mit den herkömmlichen Technologien noch riesen grosse Potentiale der Effizienzsteigerung gibt. Diese Idee würde vor allem in Deutschland momentan lobbyiert und finde sonst nirgends (weltweit) anklang.

Oberleitungen sind für ihn eine sehr wichtige Technologie (für LKWs), auch wenn es keine neue Technologie ist und alle Grundlagen schon vorhanden sind. Die Infrastruktur schein auf den ersten Blick sehr teuer, wenn man die Kosten aber auf alle konsumierenden Fahrzeuge umwälzt steigen die Kosten nur marginal. Die hauptsächliche Schwierigkeit sieht er in der Internationalität. Die Systeme müssen durchgehend vorhanden und kompatibel sein.

FCEV gegenüber ist der Experte optimistischer als der allgemeine Grundton (BEV). Er kann sich sehr gut vorstellen, dass sie sich durchsetzen werden. Wahrscheinlich aber eher im oberen Preissegment bei PKWs und auch «nur» als range extender (RE). Für LKWs sieht er eine noch grössere Wahrscheinlichkeit für das Durchsetzen. Schwierigkeiten sind die Wasserstoff-Infrastruktur (teurer als Ladesäulen) welche zuerst gebaut werden muss (Huhn-Ei). Er habe in seiner Doktorarbeit mehrere Szenarien durchgerechnet und FCEV hätten sich bei manchen sehr stark durchgesetzt; immer abhängig von den gewählten Rahmenbedingungen.

Zu **VR, Hologrammen, Hyperloop** und ähnlichen Ideen sagt er, dass die Ideen an sich schon sehr lange existieren, sich aber trotzdem nie durchgesetzt hätten und schon gar nicht den Verkehr beeinflusst hätten. Bei Facetime und Skype hätte man auch erwartet, dass die Mobilität abnehme, effektiv geschehen sei aber gar nichts.

Truck Platooning sei einfach eine Untergruppe des autonomen Fahrens und wenn autonomes Fahren an sich existiert ist Truck Platooning nicht mehr interessant. Zudem gebe es diese Technologie auch schon lange (Daimler habe schon vor 15 Jahren davon gesprochen).

2. Experte

Eine spannende Aussage des Experten zur **Elektromobilität** ist, dass er überzeugt ist, dass es nicht das alleinige Antriebssystem sein wird. Er glaubt aber auch, dass in 10 Jahren schon 50% des Neuwagenmarktes elektrischer Natur sein wird. Gründe für diese schnellen Entwicklungen sind politische Treiber, wie zum Beispiel angestrebte Quoten an BEV in China oder komplettes ICEV-verbot, wie es von mehreren europäischen Ländern angestrebt wird. Risiken sind der ökologische Fussabdruck der Batterien (in Norwegen wird schon darüber diskutiert, Fahrzeuge mit grossen Batterien von den Subventionen auszuschliessen), die fehlende Ladeinfrastruktur und auch in ärmeren Ländern die allgemein fehlende Stromnetzinfrastruktur.

Gegenüber dem **autonomen Fahren** ist er skeptischer als der Grundton in den Medien usw. ist. Die regulierenden Gesetze fehlen auch noch vollständig und solange diese nicht gesetzt sind kann sich keine Technologie durchsetzen. Die Teilautomatisierung wird natürlich immer weiter fortschreiten. In zehn Jahren kann es sein, dass Fahrer auf Autobahnen z.B. nicht mehr vollständig auf das Fahren konzentriert sein müssen. Autonome Fahrzeuge wird es aber nur auf klar definierten Arealen geben. Chancen sind ein optimiertes Verkehrssystem mit konstantem Verkehrsfluss und hohe Sicherheit. Risiken sind die steigende Mobilität welche auch Verkehrsunfähige (Junge / Alte) einschliessen wird.

Er ist sehr überzeugt von **Power-to-X**. Hauptsächlich nicht aus Verkehrstechnischen Gründen, sondern als Unterstützung des Verkehrsnetzes bei Überproduktion. Dadurch kann die volatile Stromproduktion erneuerbarer Energien aufgewertet werden. Der dadurch entstandene Treibstoff kann dann für den Antrieb von Fahrzeugen verwendet werden. Der Experte sieht den Einsatz jedoch nicht für Flugzeuge oder Schiffe, da die Kosten viel zu hoch seien. Wichtig ist, dass solche Systeme nur in Zeiten der Stromüberproduktion laufen (2'000-3'000 h/Jahr), da es ansonsten zu ineffizient ist. Schon heute muss so viel Strom billig abgesetzt werden (DE: 5TWh in 2015) und in China laufen gewisse Windenergie Farmen gar nicht, da die Kosten höher sind als die zu erzielenden Gewinne.

Der Experte ist **Drohnen** gegenüber skeptisch, da es günstigere und effizientere Wege gibt.

Oberleitungen sieht er in urbanen Gebieten als Möglichkeit, für LKWs auf Autobahnen seien die Kosten aber viel zu hoch.

FCEV werden sich durchsetzen, weniger aber für Personenwagen. Das Einsatzfeld liegt dabei mehr bei Lastwagen und Bussen. Das Risiko sei, dass die Infrastruktur sehr teuer sei und es nur wenige Anbieter gibt (Monopolisierung).

Die **elektrische Mikromobilität** kann eine valide alternative für den Kurzstrecken-Pendelverkehr darstellen. Es müssen aber noch vermehrt Velowege ausgebaut werden.

Etwas Ähnliches wie «Cargo Sous Terrain» (**neue Infrastruktur**) kann er sich gut vorstellen, da es unbedingt alternative Lösungen für den Güterverkehr braucht bei immer mehr Staus. Die Firmen seien gross und besitzen viel Geld, was die Umsetzung vereinfachen würde.

3. Experte

Der Experte ist mit der Auswahl der Technologien einverstanden und findet, dass sie ausreichend den künftigen Verkehr (technologisch) abbildet. Wenschon seien ein paar zu viel darunter, welche wirtschaftlich nicht machbar seien.

Zum **Autonome Fahren** ist er überzeugt und erwartet, dass in den nächsten 10-15 Jahren die vollständige Automatisierung erreicht wird. Es müssten vor allem noch rechtliche Grundlagen geschaffen werden. Risiko sei dabei, dass autonomes Fahren den ÖV überflüssig macht und dieser dadurch verschwinden könnte. Ausserdem sei der Strassenraum limitiert, was bei der steigenden Anzahl Fahrzeuge ein Problem sein wird (auch autonom).

Bei **VR** kann er sich vorstellen, dass wenn die Technologie wirklich ausgereift ist, es vor allem Businessstrips weniger notwendig machen wird und dies einen viel grösseren Effekt habe als Facetime und Skype.

Power-to-X sei sehr wichtig, da die Stromproduktion durch Erneuerbare fluktuiert und deshalb gespeichert werden muss. Er kann sich gut vorstellen, dass man das «X» als Treibstoff für Fahrzeuge jeder Art gebrauchen kann.

Zu **Drohnen** meint er, dass diese wahrscheinlich in Zukunft nur für Nischen-Anwendungen gebraucht werden: z.B. für schwer erreichbare Berghütten.

Brennstoffzellen-betriebene Fahrzeuge seien eine valide Konkurrenz zu BEV. Er kann sich vor allem für Kommunale Fahrzeuge (z.B. Kehrtafeln) Wasserstoff als Treibstoff vorstellen.

Oberleitungen seien nichts Neues und durchaus realistisch. Er fragt sich einfach ob die Investitionen, welche sich rechnen müssen, nicht doch zu hoch seien. Ausserdem meint er, dass Batterien so leistungsfähig werden, dass die Reichweiten und Energiemengen kein Problem mehr darstellen werden.

Über **neue Infrastrukturen** meint er, dass er zum Beispiel Cargo Sous Terrain nur für kurze Strecken von und zur Industrie als lukrative Möglichkeit sieht; nicht für grosse Strecken. Er findet die Ideen sehr futuristisch und meint es sei allgemein sehr schwierig neue Verkehrssysteme in das bereits vorhandene Verkehrssystem einzubinden. Es sei besser die bisher vorhandenen zu verbessern und optimieren. Das seien sowieso Ideen, welche es seit viele Jahren gebe; geschehen sei aber noch nichts.

Truck Platooning wird in den nächsten 10 Jahren auf den Autobahnen Normalität sein. Rein rechtliche Fragen müssen da noch geklärt werden.

4. Experte

Der Experte ist mit der Auswahl der Technologien grundsätzlich einverstanden, sagt aber, es sei schwierig vorherzusagen ob nicht doch eine neue Technologie auftauchen wird, welche den Verkehr einschneidend verändern wird, welche nicht vorhergesagt werden kann. Weiter finde er sowieso, dass man beim Thema Mobilität nicht so fokussiert auf neue Technologien/Infrastruktur sein sollte, sondern lieber das Menschliche Verhalten durch Taxierung beeinflussen sollte.

Über die **Elektromobilität** sagt er, er sei an verschiedenen Tagungen und Studien beteiligt gewesen, welche aufzeigen, dass die allgemeine Akzeptanz am Steigen ist. Die Zahlen seien jedoch auf den Markt bezogen noch immer sehr klein und er glaubt auch nicht, dass sich das kurzfristig ändern wird. Die Ladeinfrastruktur sei noch unzureichend ausgebaut und vor allem die Anzahl Schnellladestationen sei noch viel zu niedrig. Zudem sind die Kosten beim Autokauf noch deutlich höher als bei einem ICEV. Er kann sich vorstellen, dass Haushalte deshalb zwei Autos besitzen werden, eines für den täglichen Gebrauch (BEV) und eines für grössere Strecken (ICEV). Weiter sei die Energiebilanz bei der Herstellung der Batterien noch sehr schlecht, was das «grüne» Bilde der BEV in den Schatten stellt. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor müssen heute Abgaben an den Staat machen, von denen BEV noch befreit sind. Falls diese Fahrzeuge auch besteuert werden, wird das fahren eines elektrischen Autos noch teurer.

Autonomes Fahren sei noch sehr unerprobt und unsicher. Niemand wisse, ab wann mit autonomen Fahren zu rechnen sei. Vor allem auf die Kompatibilität der verschiedenen Marken weist der Experte hin. Falls diese nicht vereinheitlicht wird, kommt es zu noch schwierigeren Bedingungen für den Verkehr und die Gesetzgebung. Über die Kosten von autonomen Fahrzeugen liesse sich auch noch kaum etwas Vorhersagen.

Drohnen für den GV sieht er als grosses Potential. Auch hier fehlen noch die rechtlichen Grundlagen.

FCEV findet der Experte super, sagt aber, dass man seit langer Zeit daran arbeitet und die Resultate seien sehr bescheiden. FCEV seien kostenintensiv und es fehle noch fast vollständig die Ladeinfrastruktur.

5. Experte

Der Experte sagt, dass allgemein alle künftigen Technologien heute schon vorhanden sind; welche und wie sie sich durchsetzen werden, stehe aber noch in den Sternen. Das wichtigste vorweg: Der Verkehr der Zukunft wird sicher **elektrisch** sein. Ob dies über **BEV, FCEV, Oberleitungen** oder Induktionsladen erreicht wird, ist noch unsicher.

Autonomes Fahren wird auch sowieso aufkommen: ob in 2,5 oder 10 Jahren kann man noch nicht sagen. Es wird aber bald passieren. Auch die benötigte Anzahl Fahrzeuge liegt bei nur 10-20% der heutigen. Hier ist die Frage eher, ob die Menschen gewillt sind das Sharing anzunehmen. Im Güterverkehr wird es noch vor dem Personenverkehr auftauchen, weil da viel mehr Geld im Spiel sei, und es wenige grosse Akteure gibt. Der Experte sagt, dass die Strasse immer Schienenähnlicher wird.

Drohnen befinden sich in einem momentanen Hype, Er glaubt aber nicht daran.

VR und Hologramme sind ein WICHTIGES Thema, falls **mobility pricing** eingeführt wird. Man wird nur auf alternative Kommunikationsformen umsteigen, wenn die Mobilität teurer wird. **Mobility pricing** sieht der Experte als einzige Möglichkeit, denn Verkehr Nachhaltig gestalten zu können. Sobald für jegliche Externalitäten gezahlt werden muss, geht man sinnvoller mit der Mobilität um.

Die extremen Verluste von **Power-to-X** stellen ein grosses Problem dar. Wenn wir immer mehr «überflüssigen» Strom wegregeln müssen, lohnt es sich aber vielleicht trotzdem, auf diese Technologie zu setzen.

Bei **Hyperloop** hat der Experte interessante Punkte genannt: Ballungsräume von Städten wachsen dadurch weiter an. Will man das? Gebiete, welche sich an der Strecke des Hyperloops befinden aber keine Station besitzen werden abgewertet.

6. Experte

Der Experte ist sich sicher, dass die Zukunft (2060) **elektrischer Natur** sein wird. Wie schnell sich jedoch elektrische Fahrzeuge etablieren werden, dauert länger als heute im Allgemeinen angenommen. Die Autoindustrie sei noch zu sehr auf Autos mit Verbrennungsmotoren ausgelegt. Die ganzen Fabriken und Wertschöpfungsketten dieser Industrie seien noch auf die Herstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ausgelegt. Zudem seien noch sehr viele Fragen bezüglich der elektrischen Fahrzeuge und ihrer Batterien (LI-Ion) ungeklärt: Die Herstellung und das Recycling ist noch energie- und emissionsintensiv. Zudem müssen – weil wir noch zu wenig zu Batterien wissen – bei jedem Unfall die Batterien ausgewechselt werden, auch wenn keine Verbrauchsspuren zu sehen sind. Eine weitere Schwierigkeit ist die Art und Weise der Stromproduktion und die allgemeine durch die Elektromobilität induzierte steigende Stromnachfrage. Lino Guzzola (Präsident ETH) habe mal gesagt, dass nur wer Solarzellen auf dem Dach seines Hauses hätte, dürfe ein elektrisch betriebenes Fahrzeug besitzen.

Aus versicherungstechnischen Gründen sei beim **autonomen Fahren** alles geklärt. Wenn ein Unfall geschieht haftet der Fahrer oder Halter des Fahrzeuges. Dass versucht die Versicherung den Schuldigen zu ermitteln: Falls der Hersteller die Schuld am Unfall trägt, muss er büssen. Falls er sich jedoch innerhalb der Richtlinien befand, muss möglicherweise die Zulassungsbehörde büssen. Eine wichtige Frage, welche momentan heiss diskutiert wird ist, ob der Technik zugemutet werden kann, dass der Fahrer die Hände vom Steuer nehmen darf. Eine weitere Schwierigkeit ist die Software mit ihren Updates: Der Automobilindustrie muss bewusstwerden,

dass sie nicht mehr nur «einfach» Autos verkauft, sondern fahrende Computer, deren Software auch gewartet und auf dem aktuellsten Stand sein muss. Dies bringt weiter Kosten mit sich, welche beim Kauf eines Neuwagens einberechnet werden müssen.

7. Experte

Der Experte weiss über die **Elektromobilität** zu berichten, dass momentan ein starker Hype darum ist. Er erwartet deshalb, dass sobald eine gewisse Anzahl Elektrofahrzeuge auf den Strassen unterwegs sind ein Tal dem Hype folgen wird. Es werden erst dann gewisse Probleme auftauchen, wie zum Beispiel eine ungenügende Ladeinfrastruktur und Netzbelastungen mit welchen umgegangen werden muss. Trotzdem werden BEV zusammen mit **FCEV** und **Power-to-X** den künftigen Markt beherrschen. Das grösste Argument für BEV ist seiner Meinung nach die unschlagbare Effizienz.

Power-to-X wird höchstwahrscheinlich für jene Fortbewegungsmittel verwendet, wo die Elektrifizierung durch Brennstoffzellen oder Batterien nicht machbar ist; also für Schiffe und Flugzeuge.

Der grosse Vorteil von **FCEV** ist das unabhängige und schnelle tanken, wo man das bisherige Tankverhalten nicht ändern muss; im Gegensatz zu BEV. Ausserdem sei der Trend beim PKW-Kauf immer noch, dass die Fahrzeuge immer grösser werden. Dies deutet darauf hin, dass der Brennstoffzellenbetrieb immer sinnvoller wird.

Zum Thema **autonomes Fahren** sagt der Experte, dass die Technologie schon sehr fortgeschritten ist und bald auch im Stadtverkehr einsetzbar wird. Das Hauptproblem ist seiner Meinung nach die Akzeptanz der Kunden. Er kann sich nicht vorstellen, dass Leute sich «trauen» die Hand vollständig vom Steuer zu lassen. Weiter sei es rechtlich auch schwierig zu bestimmen, wie ein Fahrzeug zu reagieren hat, wenn eine Kollision unumgänglich ist, das Fahrzeug aber verschiedene Kollisionsmöglichkeiten hat.

Als weitere Punkte erwähnt der Experte das **Sharing**, was seiner Meinung nach definitiv einen technologischen Aspekt besitzt und eine wichtige Lösung für die heute sehr schwach ausgelasteten (aber hohe Anzahl) and PKWs. Durch das Sharing werden Autos mehr genutzt und die Lebensdauer schrumpft dadurch. Dadurch entsteht ein schnellerer Durchlauf. Zudem seien momentan Entwicklungen im Gange zum **elektrischen Fliegen**. Bald könne man Kurzstreckenflüge mit bis zu 100 Personen durch eine Kombination von Batterie und Brennstoffzelle realisieren.

8. Experte

Der Experte sagt, dass die **Elektromobilität** den künftigen Verkehr beherrschen wird. Die Frage sei einfach, woher und wie der Strom gespeichert wird. Für ihn ist klar, dass der Batteriebetrieb für kleine Fahrzeuge und kurze Distanzen (bis 200 km) am besten geeignet sind. Die Batterien haben einen Wirkungsgrad von bis 90%, was sehr gut ist. Für grosse Fahrzeuge (Lkws usw.) und für grosse Distanzen sind jedoch die benötigten Batterien so gross (und schwer), dass die Effizienz dadurch sinkt. Deshalb braucht man für diesen Verwendungszweck **Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge**. Wo genau die Grenze liegt, hängt der Entwicklung des Wirkungsgrads der Brennstoffzellen und der Energiespeicherdichte von Batterien ab. Ein weiteres Problem ist die graue Energie (und Emissionen) welche bei der Batterieproduktion anfallen. Anscheinend muss ein BEV 40'000 km mit CO₂-neutralem Strom fahren, bis es diesen Emissionen gerecht wird. Zur Ladeinfrastruktur von Wasserstoff sagt er, dass heute schon jährlich 24 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff in Deutschland hergestellt und in flüssigem Zustand transportiert werden. Für den Ausbau einer LIS für den Verkehr sieht er kein Problem. Im Zusammenhang dazu sagt der Experte, dass **Power-to-X** das Stromnetz stabilisieren kann und die Fluktuationen der erneuerbaren Energien ausgleichen kann.

Oberleitungen für LKWs haben seiner Meinung nach keine Chance gegen die FCEV. Heute schon gibt es in den USA LKWs, welche mit einer Leistung von 1000 PS eine Reichweite von 1000 km besitzen; wieso sollte man also eine so aufwendige Infrastruktur aufbauen (Oberleitungen)?

Drohnen sieht er nur für den Spezialeinsatz in Krisengebieten, für die Bedüngung oder für militärische Einsätze.

9. Experte

Zur **Elektromobilität** meint der Experte, dass sie sich langsamer entwickeln wird als gewisse andere Experten erwarten. In zehn Jahren zum Beispiel erwartet er immer noch den grössten Anteil an ICEV. In reichen Städten wird der Anteil möglicherweise aber doch schon ziemlich hoch sein. In China werde momentan stark in einen möglichst emissionsfreien Verkehr investiert. Der Hauptgrund dafür sind die lokalen Emissionen, welche die Lebensqualität stark reduzieren. Schlussendlich müsse aber gesagt werden, dass solange die Emissionen tief sind kann es einem eigentlich egal sein wie die Elektrifizierung erreicht wird (ob mit Brennstoffzellen oder Oberleitungen). Ein weiteres Problem von BEV ist die Herstellung der Batterien, welche neben allen Emissionen auch soziale Probleme mit sich bringt (beim Abbau von Kobalt).

Autonomes Fahren wird seiner Meinung nach die Welt tiefgreifender ändern als man denkt. Es wird beispielsweise kein Parkplatzproblem mehr in den Städten geben und auf dem Land könne sich Sharing durchsetzen. Autonomes Fahren bringt aber auch negative Effekte mit sich: Als Beispiel nannte der Experte, dass Fahrschulen mit allen Fahrlehrern dann nicht mehr gebraucht würden. Er glaubt, dass 2025 die ersten vollautonomen Fahrzeuge auf dem Markt erhältlich sein werden. Seiner Meinung nach wird das einzelne Auto autonom sein

und keine Vernetzung benötigen. In Kombination mit der **Digitalisierung** bekommt man durch das autonome Fahren viel mehr (auch) intermodale Möglichkeiten (**MaaS**).

VR und Hologramme werden den Verkehr nicht vermindern. Der Mensch will als Wesen kommunizieren und wissen, dass auch wirklich jemand da ist. Zudem habe man heute ja auch schon viel mehr kommunikative Möglichkeiten als früher aber der Verkehr nimmt weiter stetig zu. Die einzige Möglichkeit wäre eine Verteuerung des Verkehrs (z.B. durch CO₂-Steuer), wodurch aus rein wirtschaftlichen Gründen auf Mobilität verzichtet werden müsste.

Zu **Power-to-X** sagt der Experte nur kurz, dass wenn viel erneuerbarer Strom verfügbar ist, dann ist der schlechte Wirkungsgrad nicht mehr von Belangen.

Oberleitungen bräuchte man da, wo die Batterie nicht mehr ausreicht. Er sieht es aber nicht über Autobahnen, sondern nur auf kurzen klar definierten Strecken.

Die Digitalisierung ist für den Experten von zentraler Wichtigkeit, da sie die Intermodalität vorantreibt. Wichtige Einflussfaktoren sind auch wie sich die Klimaerwärmung weiter auf die Welt auswirkt und wie sich möglicherweise der Mensch auch weiterentwickelt.

10. Experte

Der Experte bestätigt, dass die **Elektromobilität/alternative Antriebssysteme** eine Schlüsseltechnologie ist. Es müsse aber noch einiges geschehen, da Elektrofahrzeuge heute noch nicht wirklich nachhaltig seien. Brennstoffzellen, zur Produktion des benötigten Stroms, seien auch eine valide Alternative zu BEV. Auf das Mobilitätsverhalten hat aber Elektromobilität keinen Einfluss, denn eine Elektroauto ist grundsätzlich noch immer ein Auto.

Kombiniert man Elektromobilität mit **autonem Fahren**, wird die Geschichte seiner Meinung nach interessant. Das Verhältnis der Konsumenten mit Mobilität ändert sich natürlich stark, wenn die Reisezeit nicht mehr als solche wahrgenommen wird (man kann arbeiten während der Fahrt).

Nach Meinung des Experten seien die folgenden Themen wichtig: Wie lässt sich die Strassenkapazität verbessern (Autonomes Fahren auf spezifischen Strecken zulassen?)? Und Wer wird der Dienstleister für kombinierte Mobilität sein (Google oder SBB)?

Blockchain verändert das ganze Modell. Es hat ein grosses Potential, ist aber heute noch nicht richtig implementiert. Auf den Verkehr hat es direkt keinen Einfluss, aber auf Tarifsysteme und macht Dienstleistungen wegen Einfachheit möglich.

Neue Infrastrukturen wie Hyperloop und CST machen schweizweit keinen Sinn, als Verbindung zwischen europäischen Städten aber schon. Es seien aber noch technische Fragen zu klären, bis Hyperloop überhaupt möglich wird. Trotzdem seien die Kosten sowieso nicht tragbar und das sei schlussendlich die entscheidende Frage.

II Technologien vs. Schlüsseltechnologien

Technologie	Beschreibung
keine	
3D-Druck /Additive Fertigung	
Virtual & Augmented Reality	
Vernetzung	
Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	
Automatisierte Luftfahrzeuge	
Nachhaltige Antriebsenergie	
Batterietechnologien	
Blockchain	
Robotik	
Revolutionäre User Devices	
Künstliche Intelligenz	
Automatisierte Strassenfahrzeuge	
	FC Vehicles (Brennstoffzellenfahrzeuge)
X	Elektromobilität/Elektrofahrzeuge
X	Elektroflugzeuge (Kurzstrecken)
	Hybrid Electric Vehicle (HEV)
	Hybrid Flugzeuge
	Fahren elektrisch per Batterie oder Unterwasserkabel
	Solarzellen auf Fahrzeugdächern
X	Oberleitungen für LKWs
	Wechselakkusysteme für EV
	Bleiakkumulator
	Lithium-Ionen-Akkumulator
	Durchbrüche in Batterietechnologien
	Induktionsladen
	Smart Grid
	Hochspannungsladen
	Power-to-Gas
	Sammeltaxi und -shuttle
	Kernfusion
	Magnet-, Luftdruckbahnen
	Automatisiertes Fahren
	Roboter für Gütertransport
	Truck Platooning
	1-Personen-Shuttles auf Strasse o. Schiene
	"Microlino" (Mirco Mobility Systems)
	Lichtsignalsteuerungen
	Cargo Sous Terrain / Hyperloop
	Schwebende Unterwasser-Tunnels
	"Electric skates" (The Boring Company)
	Embedded and Wearable Technology
	Gedankensensor

										Technologie	Beschreibung	
									keine			
									3D-Druck /Additive Fertigung			
									Virtual & Augmented Reality			
									Vernetzung			
									Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur	X		Verkehrsmittelübergreifende Authentifizierungssysteme Ein Ticket für z.B. Bikesharing, Zug, CarSharing, usw. (Grundlage für BIBO)
									Autonomisierte Luftfahrzeuge	X		Robotik Entwicklung und Steuerung Roboter (vor allem für Güterumschlag)
									Nachhaltige Antriebsenergie	X		Künstliche Intelligenz Roboter lernen und arbeiten ohne äussere Instruktionen
									Batterietechnologien			Machine Learning / Computer Vision Verkehrsführung könnte damit optimiert werden (Vorstufe und Grundlage für KI)
									Blockchain			Quantencomputer Steigert die Leistung und minimiert die Grösse von Rechnern auf molekularer Ebene
									Robotik			Bibo-Technologie Be-In, Be-Out - Ticket muss nicht an ein Lesegerät gehalten werden
									Revolutionäre User Devices			Drohnen Flugfähige automatisierte Luftfahrzeuge; meist ein Quadrocopter
									Künstliche Intelligenz			Internet of Things (IoT) Infrastruktur der Informationsgesellschaften; Vernetzung physischer Gegenstände
									Autonomisierte Strassenfahrzeuge	X		Navigations-/Routenwahlssysteme Raumbezogene Informationen in Echtzeit und genauer Auflösung (z.B. TomTom)
												Cooperated Intelligent Transport Systems Kommunikation zwischen den einzelnen Fahrzeugen und Infrastruktur
												Mobility Pricing (Sensoren usw. für Pricing) Durch Nachfrageoptimierung der Verkehrspreise Verkehrsspitzen glätten
												Physical Internet Logistik-System welches auf fortgeschrittener ICT und Big Data-Verarbeitung aufbaut
												Echtzeit-Karten Google Maps als Cam, auch Indoor - stetige momentane Informationen zur Umwelt
												Digitale Buchungsplattformen Reisen werden dynamisch geplant, gebucht und bezahlt
												5G (und Nachfolger) Schnelleres mobiles Internet - wichtig für V2X, IoT, usw.
												Big Data Verarbeitung Massendaten, welche Schlüsse zur Verkehrsentwicklung ermöglichen
												Quantified Self und My Data Marktplatz für Bewegungs- und Intentionsdaten
												Revolutionäre User Devices Weiterentwicklung des heutigen Smartphones
												Blockchain Datensätzen, welche mittels kryptographie miteinander verkettet sind
												Virtuelle Realität Mit Hilfe von VR-Brille lässt sich jede gewünschte Realität kreieren
												Optimierungsalgorithmen Wegfindung Algorithmus definiert den schnellsten, günstigsten oder/und energieeffizientesten Weg
												Fahrplanfreies Fahren (ÖV) Kein fixierter Fahrplan, sondern Nachfrageabhängig optimiert
												3D Druck / Additive Produktionsmethoden Statt Waren zu transportieren, werden sie am Zielort 3D-gedruckt
												Exoskellet zur Fortbewegung Bewegungseingeschränkten Menschen wird ein Zugang zu Mobilität verschafft
												"Straddling Bus" Bus fährt auf der Strasse, ist aber erhöht und lässt unter sich Platz für Verkehr
												"SkyTran" Ähnlich wie ein Skilift aber über einer Stadt, per App bestellbar (200km/h)
												"Skylon" Flugzeug; fünffache Schallgeschwindigkeit ausserhalb des Orbits (London > Sydney in 4h)
												"Martin Jetpack" Mit diesem Jetpack können Personen 30' fliegen (Höchstgeschwindigkeit von 74km/h)
												Teleportation/Beamen Innerhalb eines Sekundenbruchteils den Ort wechseln
												Zeppelin Zeppeline besitzen hohe Beladungskapazitäten; für schlecht angeschlossene Gebiete
												Techniken aus dem Bereich Parkierung Neue Konzepte für das Parkaus der Zukunft: stapelbare/faltbare Autos, moderne Parkleitsystem,

Abkürzungsverzeichnis

Die nachstehenden Abkürzungen zu Technologien, Fahrzeugen und Antriebsarten werden in den Steckbriefen zu den Schlüsseltechnologien (Kap. 4.4) näher erläutert.

Begriff	Bedeutung
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
ASTRA	(1) Akronym eines systemdynamischen Modells (ASsessment of TRAnsport strategies) im Rahmen des EU-Forschungsprojekts Reflex (http://reflex-project.eu/model-coupling/astra/) (2) Schweizerisches Bundesamt für Strassen
BEV	Battery Electric Vehicle – Batteriebetriebenes Fahrzeug
C2C	Car-to-Car
C2I	Car-to-Infrastructure
C2X	Car-to-X (Sammelbegriff für C2C und C2I)
EV	Electric Vehicle (Sammelbegriff; umfasst BEV, PHEV und meist auch FCEV)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle - Brennstoffzellenfahrzeug
GV	Güterverkehr
HEV	Hybrid Electric Vehicle – Fahrzeug mit Hybridantrieb, jedoch ohne externe Auflademöglichkeit
ICE (ICEV)	Internal Combustion Engine (Vehicle) – Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
IKT ICT	Informations- und Kommunikationstechnologie <i>Information and Communication Technology</i>
IoT	Internet of Things – Internet der Dinge
ITS	Intelligent Transport System
LV	Langsamverkehr, Sammelbegriff für Fuss- und Veloverkehr
MaaS	Mobility as a Service
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MODUM	Akronym eines systemdynamischen Modells (MODell Umwelt – Mobilität) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 41 (Abschluss 2001)
NGMN	Next Generation Mobile Networks
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖIV	Öffentlicher Individualverkehr, siehe SVV
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle – Hybridelektrisches Fahrzeug
Pkm	Personenkilometer
PV	Personenverkehr
RE	Range Extender – Reichweitenverlängerer
SVI	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
SVV	Sammel-/Verteilverkehr. Zukünftige Verkehrsformen im Übergangsbereich von MIV und ÖV auf Basis von vollautomatisierten Fahrzeugen (z.B. vollautomatisierte Sammeltaxis). Diese stellen ein kombiniertes Sharing und Pooling dar. Sie kommen ohne Fahrer aus und optimieren ihren Betrieb anhand der Anmeldungen der Nutzer. Auch ÖIV genannt.
Tkm	Tonnenkilometer
Travel Pods	Konzept eines führerlosen Personentransportsystems, das ohne Fahrplan Fahrgäste individuell auf Bestellung ohne Zwischenhalt vollautomatisch an ihr Ziel bringt.
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich

Literaturverzeichnis

Ansoff 1975	Ansoff H I, 1975. « Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals », California Management Review, vol. XVIII no. 2, pp. 21–33.
ARE 2016	Bundesamt für Raumentwicklung, « Perspektiven des Schweizer Personen- und Güterverkehrs bis 2040 », 169 Seiten.
ASTRA 2016	« Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen », Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Leutenegger Oberholzer 14.4169 «Auto-Mobilität», 37 Seiten.
ASTRA 2017a	Bundesamt für Strassen (Februar 2017), « Effizienzsteigerung durch Digitalisierung in der Mobilität », 58 Seiten.
ASTRA 2017b	Bundesamt für Strassen (August 2017), « Chancen und Risiken des Einsatzes von Abstandhaltesystemen sowie des Platoonings von Strassenfahrzeugen – Machbarkeitsanalyse », 128 Seiten.
ASTRA 2011	« Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen ». EBP und Mobilitätsakademie (Forschungsauftrag 2009/009) für Bundesamt für Strassen (ASTRA). Bruns F, Bernath K, Brendel S, de Haan P, Beckmann J, 185 Seiten.
AWK Group 2015	AWK Group – Mürger R., Büchi P., Geissbühler P. (März 2015), « Die Zukunft des Autofahrens – Technologietrends im Strassenverkehr », AWK Fokus, 4 Seiten.
Bauer 2018	« The impact of battery electric vehicles on vehicle purchase and driving behavior in Norway ». Bauer G, Transportation Research Part D, 58, January 2018, Pages 239-258, https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.011 .
Baumeisterverband Aargau	Merkblatt « Lebenserwartung von Strassen », http://www.toby-on-tour.ch/files/media-toby/pdf/Infra_Strassenbau_200x120cm.pdf , abgerufen am 26.02.18.
BFS und ARE 2007	Mobilität in der Schweiz. Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten. Neuchâtel 2007, 100 Seiten
BFS und ARE 2012	Mobilität in der Schweiz. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010. Neuchâtel 2012, 120 Seiten
BFS und ARE 2017	Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung (2017) « Verkehrsverhalten der Bevölkerung – Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 », Neuchâtel, 88 Seiten.
CEDR 2014	Conférence Européenne des Directeurs des Routes – Transnational Road Research Programme (Dezember 2014), « Mobility & IST », 12 Seiten.
Cox et al. 2018	Cox B, Jemiolo W, Mutel C. (Januar 2018) « Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet. » Transportation Research Part D, 58 Seiten, 1–13, https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.017 .
Der Bundesrat 2016	Der Bundesrat – Schweizer Eidgenossenschaft (Juni 2016), « Konzeptbericht Mobility Pricing: Ansätze zur Lösung von Verkehrsproblemen für Strasse und Schiene in der Schweiz », 75 Seiten.
Deutscher Bundestag 2016	Deutscher Bundestag – Dr. Steinhoff Christine (September 2016), « Aktueller Begriff: Industrie 4.0 », 2 Seiten.
Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment 2015	Netherlands – Ministry of Infrastructure and the Environment (Oktober 2015), « European Truck Platooning Challenge 2016 – A fresh perspective on mobility and logistics », 28 Seiten.
Dray 2014	Dray L. (2014) « Time constants in aviation infrastructure », 7 Seiten, In: Transport Policy 34 (2014) 29–35.
Dray 2013	Dray L. (2013) « An Analysis of the impact of aircraft lifecycles on aviation emissions mitigation policies », 8 Seiten, In: Journal of Air Transport Management 28 (2013) 62–69.
EBP 2018	EBP Schweiz AG (2018) « Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz », 37 Seiten, Downloadlink (0.4 MB).
EBP 2017a	EBP Schweiz AG (2017a) « Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz », 108 Seiten, Downloadlink (3 MB).
EBP 2017b	EBP Schweiz AG (2017b) « Wasser 4.0: Chancen der Digitalisierung bei Hydrologie- und weiteren Messnetzen », 55 Seiten, http://geo.ebp.ch/2017/12/12/analytik-in-smarten-systemen/ .

EBP und Ecoplan 2015	«Fehlanreize im Mobilitätsbereich aus Sicht des Energieverbrauchs» EBP und Ecoplan im Auftrag Bundesamt für Energie (BFE), 30. Sep. 2015, 116 Seiten, www.bfe.admin.ch .
EUSPN 2016	International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks – Atif Y., Ding J., Jeusfeld M. (2016), « Internet of Things Approach to Cloud-Based Smart Car Parking », 6 Seiten, In: Procedia Computer Science 98 (2016) 193–198, doi: 10.1016/j.procs.2016.09.031.
Farris et al. 2017	Farris I., Orsino A., Militano L., Iera A., Araniti G. (2017), « Federated IoT services leveraging 5G technologies at the edge », 12 Seiten, https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.09.002 .
FVS 2018	« Automatisierten Fahren: Auswirkungen auf die Strassenverkehrssicherheit ». Erarbeitet von EBP im Auftrag des Fonds für Verkehrssicherheit, 35 Seiten.
Graham et al. 2014	Graham W R., Hall C A, Vera Morales M (2014) « The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction » Transp. Policy, 34, pp. 36-51.
Harris und Zeisler 2002	Harris S D, Zeisler S. « Weak signals: Detecting the next big thing ». The Futurist, Nov-Dec, 21–28.
Holopainen and Toivonen 2012	Holopainen M, Toivonen M, 2012. « Weak signals: Ansoff today ». Futures, Volume 44, Issue 3, April 2012, Pages 198-205, https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.10.002 .
IBM 2012	International Business Machines Corporation – Institute for Business Value (2012), « Analytics: Big Data in der Praxis – Wie innovative Unternehmen ihre Datenbestände effektiv nutzen », 24 Seiten.
ICAO 2016	International Civil Aviation Organization (2016) « Environmental Report 2016 – On board a sustainable future » Montréal, 250 Seiten, www.icao.int .
ICEEI 2013	International Conference on Electrical Engineering and Informatics – Wuryandari A., Gondokaryono Y., Widnyana I. (2013), « Design and Implementation of Driver Main Computer and Head Display on Smart Car », 7 Seiten, In: Procedia Technology 11 (2013) 1041 – 1047.
IEA 2017	« Energy Technology Perspectives 2017 ». International Energy Agency, Paris, 6 June 1997, 443 Seiten, ISBN 978-92-64-27597-3, www.iea.org .
IEA 2009	International Energy Agency (2009), « Transport, Energy and CO2 – Moving Toward Sustainability », 418 Seiten, 61 2009 25 1 P1.
IET 2015	« Clean Mobility and Intelligent Transport Systems ». The Institution of Engineering and Technology (IET), Fiorini M. and Lin J-C (eds). London, 2015, ISBN 978-1-84919-895-0, 464 pages, www.theiet.org .
IMO 2015	International Maritime Organization (IMO) 2015. « Third IMO Greenhouse Gas Report 2014 ». London, 327 Seiten, www.imo.org .
Intraplan 2015	Intraplan Consult GmbH. « Zweites Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit des Schweizer Luftverkehrs ». Im Auftrag Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), März 2015, 198 Seiten, www.bazl.admin.ch .
JAMESfocus 2017	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Suter L., Waller G., Willemse I, Genner S., Süss D., « JAMESfocus – Handyverhalten und Nachhaltigkeit », 24 Seiten.
Kamargianni et al. 2016	Kamargianni M., Li W., Matyas M., Schäfer A. (2016), « A critical review of new mobility services for urban transport », 10 Seiten, In: Transportation Research Procedia 14 (2016) 3294 – 3303.
Kim und Lee 2017	Kim J, Lee C. 2017. Novelty-focused weak signal detection in futuristic data. « Assessing the rarity and paradigm unrelatedness of signals ». Technological Forecasting and Social Change, Vol.120, July 2017, Pages 59-76, https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.04.006 .
Kim et al. 2017	Kim T., Ramos C., Mohammed S. (2017), « Smart City and IoT », 4 Seiten, In: Future Generation Computer Systems 76 (2017) 159–162.
Mendonça et al. 2012	Mendonça S., Cardoso G., Garaça J. (2012), « The Strategic Strength of Weak Signal Analysis », 11 Seiten, Futures 44 (2012) 218–228.
Moore 2014	Moore G. A. (2014), « Crossing the Chasm, 3rd Edition: Marketing and Selling Disruptive Products to Mainstream Customers », 288 Seiten, Harper Business, ISBN 978-0062292988.
Morrel 2009	Morrel P., Dray L. (2009) « Environmental Aspects of Fleet Turnover, Retirement and Life Cycle », 92 Seiten, Final Report for the Omega Consortium.
NHTSA 2015	U.S. Department of Transportation: National Highway Traffic Safety Administration – Singh S. (Februar 2015), « Critical Reasons for Crashes Investigated in the National

	Motor Vehicle Crash Causation Survey – A Brief Statistical Summary », 2 Seiten, Stats. Report No. DOT HS 812 115, Washington DC.
Rapp/IKAÖ/Interface	«Verfahren von Technology Assessment im Verkehrswesen», SVI 2003, Seite 20.
Rapp Trans 2017	Rapp Trans AG – Bosch R., Oehry B., Jermann J. (Juni 2017), « Automatisiertes Fahren; Initialprojekt: Klärung des Forschungs- und Handlungsbedarfs », 109 Seiten, Forschungsprojekt ASTRA 2015/004 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA).
Rogers 1995	Rogers M R, 1995. « Diffusion of Innovations », ISBN 0-02-926671-8.
SBB 2017	« Digitale Transformation bei der SBB ». Vortrag M. Basler vom 11. Mai 2017, Cham (Link).
SBB 2018	Rollmaterial-Datenbank der SBB: https://data.sbb.ch/explore/dataset/rollmaterial/ (abgerufen am 20.02.2018)
Shippedia 2018	« Life Cycle of a Ship », http://www.shippedia.com/life-cycle-of-a-ship/ , abgerufen am 23.02.18.
Splash247 2017	« Are ships set for shorter lifespans? » http://splash247.com/ships-set-shorter-lifespans/ , abgerufen am 23.02.18.
Stadt Zürich 2012	Stadt Zürich – Tiefbau- und Entsorgungsdepartement / Tiefbauamt, Mobilität + Verkehr (2012), « Mobilität in Zahlen 2012/3: Verkehrszählung – Im Fokus: Wirkungskontrolle Westtangente und Flankierende Massnahmen ».
Stephenson et al. 2018 (in press)	Deep interventions for a sustainable transport future . Stephenson J, Spector S, Hopkins D, McCarthy A. Transportation Research Part D (in press, corrected proof available online), https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.031 .
SwissBauCo 2018	Schweizer Baucontrolling GmbH. http://www.swissbauco.ch/admin/up/Lebensdauer_Bauteile_und_Bauteilschichten.pdf (abgerufen am 26.02.18)
TA Swiss 2013	Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. EBP und EMPA im Auftrag des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung (TA Swiss). De Haan P, Zah R, Zürich, vdf Hochschulverlag AG, 260 S., ISBN 978-3-7281-3487-5, Download-Link (vdf-Verlag) .
UITP	UITP (2017), « Policy Brief. Autonomous Vehicles: A Potential Game Changer for Urban Mobility », UITP International Association of Public Transport.
van Notten et al 2005	van Notten P W F, Slegers A M, van Asselt M B A, 2005. « The future shocks: On discontinuity and scenario development ». Technological Forecasting and Social Change, 72, 175–194.
Yoon 2012	Yoon J, 2012. « Detecting weak signals for long-term business opportunities using text mining of Web news ». Expert Systems with Applications, Volume 39, Issue 16, 15 November 2012, Pages 12543-12550, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.04.059 .
Yoon & Cho 2016	Yoon S, Cho E, 2016. « Convergence Adoption Model (CAM) in the Context of a Smart Car Service », 8 Seiten, In: Computers in Human Behaviors, 60, 500–507.
Zhankaziev 2017	Zhankaziev S. (2017), « Current Trends of Road-Traffic Infrastructure Development », 9 Seiten, In: Transportation Research Procedia, 20, 731–739.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 28.02.2020

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2017/003

Projekttitel: Verkehr der Zukunft 2060: Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr

Enddatum: 28.02.2020

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Zur Analyse des Einflusses des technologischen Wandels auf den Verkehr 2060 wurde ein kompaktes Set an Schlüsseltechnologien identifiziert. Es umfasst sechs «main technologies». Diese beeinflussen direkt die Hauptparameter einer jeden Mobilitätsdienstleistung (Zeit, Kosten, Komfort): Automatisierte Strassenfahrzeuge, Additive Fertigungsverfahren, Automatisierte Luftfahrzeuge, Nachhaltige Antriebsenergie, Neue Verkehrssysteme & -infrastruktur, Virtual & Augmented Reality. Zusätzlich gibt es sechs «enabling technologies», welche die Voraussetzung bilden für die «main technologies»; sie beeinflussen die systemischen Parameter (Umwelt, Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer, Kapazität) und haben indirekte Auswirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage. Dies sind Batterietechnologien, Robotik, Vernetzung, Künstliche Intelligenz, Revolutionäre "User Devices", sowie Blockchainttechnologien. Für jede Schlüsseltechnologie wurden Steckbriefe erstellt (Chancen und Risiken; Treiber und Hindernisse; Einflüsse auf Reisezeit, Kosten, Sicherheit und Komfort; Umweltbelastung; Einbindung neuer Verkehrsteilnehmer; ungefähre Zeitverlauf bis zur Erlangung der Marktreife). Die Auswirkungen des technologischen Wandels, repräsentiert durch die sechs Haupt-Schlüsseltechnologien, auf das Verkehrssystem betreffen vor allem das Angebot und indirekt die Nachfrage; und erst nachgelagert die benötigten Ressourcen und die Raumstruktur. Zwischen Personen- und Güterverkehr treten Unterschiede auf. Für jede Schlüsseltechnologie wurde ein spezifisches Wirkungsmodell erarbeitet. Für die drei Zukunftsbilder des Gesamtprojekts wurden mit einem expertenbasierten Delphi-Verfahren kohärente Kombinationen der Ausprägungen der Schlüsseltechnologien ausgearbeitet. Je nach Szenario kommen die Haupt-Schlüsseltechnologien für andere Mobilitätsdienstleistungen zur Anwendung.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Ziele des Projektes waren

- die relevanten technologischen Entwicklungen identifizieren und verstehen (Identifikation der Schlüsseltechnologien und deren Chancen und Risiken sowie Abhängigkeiten),
- die Trends, die diese Entwicklungen antreiben untersuchen (Identifikation von Treibern und Hindernisse der Diffusion, mögliche disruptive Veränderungen),
- die Auswirkungen verschiedener Technologien auf Verkehrsangebot und -nachfrage im Personen- und Güterverkehr,
- die Ausprägungen von Schlüsseltechnologien in den drei Szenarien des Forschungspakets

Der Forschungsplan konnte wie geplant umgesetzt werden, die Forschungsziele konnten erreicht werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Folgerungen für die Regulierung, damit die grossen Potenziale der identifizierten Schlüsseltechnologien für den Verkehr der Zukunft realisiert werden können, werden formuliert. Es wird darauf hingewiesen, dass nur der Einsatz der Schlüsseltechnologien im Verbund eine weitere starke Erhöhung der Effizienz des Verkehrs im Hinblick auf Energie, Klima und Flächeninanspruchnahme erlaubt.

Publikationen:

Forschungsbericht zum Projekt

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: de Haan

Vorname: Peter

Amt, Firma, Institut: EBP Schweiz AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Forschungsprojekt hat mit einem mehrstufigen analytischen Expertenprozess 12 relevante Schlüsseltechnologien identifiziert, die mit hoher Relevanz einen direkten oder indirekten Einfluss auf das zukünftige Verkehrssystem haben. Der Fokus liegt auf dem Strassenverkehr. Die erarbeiteten Steckbriefe bilden die Basis für die abgeleiteten qualitativen Aussagen zu den gegenseitigen Abhängigkeiten, zur Diffusion und zu den Einflüssen auf das Verkehrssystem. Der Bericht ist klar strukturiert und liefert eine sehr wertvolle systemische Übersicht über die komplexen Zusammenhänge und Wirkungsweisen. Der Forschungsansatz hat sich bewährt und die Forschungsziele konnten vollumfänglich erreicht werden. Als besondere Herausforderung (sowohl inhaltlich als auch methodisch) hat sich die Analyse von 'Weak Signals' herausgestellt, weil sie vor allem ausserhalb des Verkehrssystems zu erwarten sind.

Umsetzung:

Die Ergebnisse werden direkt im Synthesebericht des Forschungspakets übernommen. Der Bericht hat auch (ebenfalls im Rahmen eines Expertenprozesses) Inputs geliefert für die Ausprägungen verschiedener Zukunftsszenarien, die in der quantitativen Analyse (Forschungsprojekt Raum-Verkehr) aufgenommen wurden. Die Systematik der Schlüsseltechnologien und die gut strukturierten Steckbriefe bilden sowohl für die Kommunikation als auch für zukünftige Arbeiten (z.B. in Teilbereichen und Vertiefungen) eine wichtige Grundlage.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der Bericht macht selbst keine vertieften Aussagen zum zukünftigen Forschungsbedarf. Es lassen sich aber drei Schwerpunkte für weitere Vertiefungen ableiten:
(1) Konkretisierung der einzelnen Schlüsseltechnologien: Laufende Aufdatierung der Entwicklungen, wirtschaftliche, gesellschaftliche und politische (regulatorische) Bedingungen für die zukünftige Diffusion im Verkehrssystem;
(2) Vertiefung der Zusammenhänge der Schlüsseltechnologien: Interessant sind insbesondere die Zusammenhänge zwischen Vernetzung (Datenmanagement), Künstlicher Intelligenz/Automatisierung und User Devices (Angebotsformen und Kundenschnittstellen) und ihre Potenziale für die kollektive Mobilität;
(3) Wechselwirkungen der Technologiemarkte: Analyse der verschiedenen Technologiemarkte und die Einflüsse auf den Mobilitäts- bzw. Verkehrsmarkt (Fahrzeuge-Infrastruktur, Energiemarkt, Telekommunikationsmarkt, Unterhaltungsindustrie, Freizeitindustrie).

Einfluss auf Normenwerk:

kein Einfluss.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Kilcher

Vorname: Daniel

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Arbeitshilfen --> Formulare --> Verzeichnis der Berichte*) heruntergeladen werden.

SVI-Publikationsliste

Die Liste kann bei der [SVI \(www.svi.ch](http://www.svi.ch) --> Publikationen) bezogen werden.