



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Digitalisierte und dekarbonisierte Mobilität in der Schweiz – volkswirtschaftliche Potenziale möglicher Szenarien 2050

**Digitalised and decarbonised mobility in Switzerland –
economic impact of possible scenarios 2050**

**Mobilité numérisée et décarbonée en Suisse –
Potentiels économiques de scénarios possibles à
l'horizon 2050**

INFRAS AG

Dr. Anne Greinus
Alexandra Zwankhuizen
Dr. Michel Zimmermann
Rebekka Heikkilä

DLR

Dr. Martin Winter
Klaus Jäkel

Forschungsprojekt MB4_20_03B_01
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
Juni 2026 | 1824

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)

Digitalisierte und dekarbonisierte Mobilität in der Schweiz – volkswirtschaftliche Potenziale möglicher Szenarien 2050

Digitalised and decarbonised mobility in Switzerland – economic impact of possible scenarios 2050

Mobilité numérisée et décarbonée en Suisse – Potentiels économiques de scénarios possibles à l’horizon 2050

INFRAS AG

Dr. Anne Greinus
Alexandra Zwankhuizen
Dr. Michel Zimmermann
Rebekka Heikkilä

DLR

Dr. Martin Winter
Klaus Jäkel

**Forschungsprojekt MB4_20_03B_01
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
Juni 2026 | 1824**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Anne Greinus

Mitglieder

Alexandra Zwankhuizen

Michel Zimmermann

Rebekka Heikkilä

Martin Winter

Klaus Jäkel

Begleitkommission

Präsident

Daniel Kilcher

Mitglieder

Frank Bruns

Jörg Jermann

Joséphine Leuba

Roman Rosenfellner

Christoph Schreyer

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

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

Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung	17
Résumé	24
Summary	32
1 Ausgangslage	39
1.1 Hintergrund und Ziel	39
1.2 Methodisches Vorgehen in der Übersicht	40
1.3 Systemgrenzen.....	44
1.3.1 Abgrenzung des Systems «Verkehr»	44
1.3.2 Räumliche Grenzen und Betrachtungszeitraum	45
1.3.3 Weitere inhaltliche Abgrenzungen	45
2 Begriffliche Abgrenzung.....	47
2.1 Dekarbonisierung durch Elektrifizierung.....	47
2.2 Automatisierung und Vernetzung	49
2.3 Sharing und Zusammenarbeit.....	51
3 Literatur	53
3.1 Vorgehen Literaturreview.....	53
3.2 Direkte verkehrliche Wirkungen	55
3.2.1 Personenverkehr.....	55
3.2.1.1 Elektrifizierung Personenverkehr	55
3.2.1.2 Automatisierung Personenverkehr	57
3.2.1.3 Sharing Personenverkehr	64
3.2.1.4 Interdependenzen Digitalisierung und Elektrifizierung im Personenverkehr	71
3.2.1.5 Herausforderungen/Erkenntnislücken Digitalisierung Personenverkehr.....	71
3.2.2 Güterverkehr.....	77
3.2.2.1 Elektrifizierung Güterverkehr	77
3.2.2.2 Automatisierung Güterverkehr	78
3.2.2.3 Sharing Güterverkehr	83
3.2.2.4 Interdependenzen Digitalisierung und Elektrifizierung im Güterverkehr	85
3.2.2.5 Herausforderungen/Erkenntnislücken Digitalisierung Güterverkehr	85
3.2.3 Auswirkungen der Automatisierung und Elektrifizierung auf die Infrastruktur	87

3.2.3.1	Leistungsfähigkeit der Strasseninfrastruktur aufgrund Automatisierung und Elektrifizierung der Fahrzeuge	87
3.2.3.2	Leistungsfähigkeit der Infrastruktur aufgrund Digitalisierung des Verkehrsmanagements	89
3.2.3.3	Infrastrukturanpassungen	90
3.2.3.4	Herausforderungen/Erkenntnislücken Auswirkungen der Digitalisierung und Elektrifizierung auf die Infrastruktur ...	92
3.3	Indirekte/Sekundäre Wirkungen: Gesundheit und Umwelt	96
3.3.1	Personenverkehr	96
3.3.2	Güterverkehr	98
4	Beschreibung der Szenarien	101
4.1	Herleitung der Szenarien	101
4.2	Beschreibung der Szenarien	102
4.2.1	Referenzszenario	102
4.2.1.1	Personenverkehr	103
4.2.1.2	Güterverkehr	107
4.2.2	Elektrifizierungsszenario – E-Mobilität	110
4.2.2.1	Personenverkehr	110
4.2.2.2	Güterverkehr	111
4.2.3	Technologieszenario – Automatisierte E-Mobilität	113
4.2.3.1	Personenverkehr	113
4.2.3.2	Güterverkehr	116
4.2.4	Mobility-as-a-Service-Szenario – Automatisierte, geteilte E-Mobilität	119
4.2.4.1	Personenverkehr	119
4.2.4.2	Güterverkehr	121
4.3	Übersicht zentrale Stellschrauben in den Analyseszenarien	124
4.3.1	Personenverkehr	124
4.3.2	Güterverkehr	128
5	Verkehrliche Wirkungen	131
5.1	Verkehrliche Wirkungen im Personenverkehr	131
5.1.1	Vorgehen im Personenverkehr	131
5.1.2	Ergebnisse Personenverkehr	132
5.1.2.1	Übersicht verkehrliche Wirkungen	133
5.1.2.2	Veränderung des Aufkommens	135
5.1.2.3	Veränderung der Verkehrsleistung	136
5.1.2.4	Veränderung der Fahrleistung MIV	137
5.1.2.5	Veränderung von Fahrzeugstunden im MIV	139

5.1.2.6	Abschätzungen zu neuen Angebotsformen im MIV	140
5.2	Verkehrliche Wirkungen im Güterverkehr	142
5.2.1	Vorgehen im Güterverkehr	142
5.2.2	Ergebnisse im Güterverkehr	142
5.2.2.1	Übersicht verkehrliche Wirkungen	142
5.2.2.2	Verkehrsleistung und Modal Split	143
5.2.2.3	Fahrleistung und Fahrzeugstunden Strasse	144
5.3	Fazit verkehrliche Wirkungen	145
6	Ökonomische Wirkungen	147
6.1	Mikroökonomische Wirkungen	147
6.1.1	Vorgehen	147
6.1.2	Effekte im Personenverkehr	148
6.1.2.1	Übersicht zu den direkten und indirekten Effekten im Personenverkehr..	148
6.1.2.2	Direkte Effekte (ceteris paribus Wirkungen)	149
6.1.2.3	Indirekte Effekte	152
6.1.3	Effekte im Güterverkehr	157
6.1.3.1	Übersicht zu den direkten und indirekten Effekten	157
6.1.3.2	Direkte Effekte (ceteris paribus Wirkungen)	158
6.1.3.3	Indirekte Effekte	158
6.1.4	Fazit	161
6.2	Makroökonomische Wirkungen	163
6.2.1	Vorgehen	163
6.2.2	Entwicklung der Wertschöpfung und Beschäftigung	165
6.2.2.1	Referenzszenario	165
6.2.2.2	Elektrifizierungsszenario – E- Mobilität	167
6.2.2.3	Technologieszenario – Automatisierte E- Mobilität	171
6.2.2.4	Mobility-as-a-Service – Automatisierte, geteilte E-Mobilität	174
6.2.3	Fazit	177
7	Synthese und Handlungsansätze	183
7.1	Elektrifizierungsszenario	183
7.2	Technologieszenario	185
7.3	MaaS-Szenario	187
7.4	Fazit	189
7.5	Weiterer Forschungsbedarf	190
	Glossar	191

Literaturverzeichnis.....	192
Datenverwendung	212
Projektabschluss	213

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept Wirkungsanalyse.....	17
Abbildung 2: Übersicht Referenz- und Analyseszenarien.....	18
Abbildung 3: Veränderung der Fahrleistung im Personenverkehr (links) und Güterverkehr (rechts) (Quelle: INFRAS).....	19
Abbildung 4: Mikroökonomische Effekte im Personenverkehr	20
Abbildung 5: Mikroökonomische Effekte im Güterverkehr	20
Abbildung 6: Ökonomische Wirkungen im Vergleich zur Referenz.....	22
Abbildung 7: Konzept Wirkungsanalyse.....	40
Abbildung 8: Arbeitsprogramm	41
Abbildung 9: Ebenen der ökonomischen Analyse.....	43
Abbildung 10: Automatisierungsstufen im Strassenverkehr nach SAE J3016 (angelehnt an ARE 2021 auf Basis von SAE J3016)	50
Abbildung 11: Typisierung von Sharing-Angeboten im Personenverkehr (angelehnt an ARE 2021, angepasst)	52
Abbildung 12: Zusammensetzung der Kosten im Güterverkehr	79
Abbildung 13: Übersicht Referenz- und Analyseszenarien	102
Abbildung 14: Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr im Referenzszenario bis 2050.....	104
Abbildung 15: Entwicklung der Fahrleistung Strasse im Personenverkehr im Referenzszenario bis 2050.....	104
Abbildung 16: Referenzentwicklung der Verkehrsleistung im GV bis 2050 (Quellen: BFS 2024d, ARE 2022a).....	107
Abbildung 17: Referenzentwicklung der Fahrleistung im Strassengüterverkehr bis 2050 (Quelle: BFS 2024c, ARE 2022a)	107
Abbildung 18: Referenzentwicklung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr bis 2050 (Quelle: BFS 2024c, ARE 2022a)	108
Abbildung 19: Flottenentwicklung im LNF (oben) und SNF (unten) nach Antriebstechnologie bis 2050 (BFE 2022)	109
Abbildung 20: Elastizitäten der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	110
Abbildung 21: Flottenentwicklung nach Antriebstechnologien im LNF (oben) und SNF (unten) im Elektrifizierungsszenario bis 2050 (INFRAS 2024).	112
Abbildung 22: Entwicklung der Besetzungsgrade MIV in der Referenz und den Analyseszenarien	125
Abbildung 23: Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz im Quervergleich (Quelle: INFRAS).....	126
Abbildung 24: Kostensätze im MIV und ÖV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz im Quervergleich (Quelle: INFRAS).....	127
Abbildung 25: Veränderung der Gesamtkosten GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz.....	129
Abbildung 26: Veränderung der durchschnittlichen Beladung GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz	129
Abbildung 27: Veränderung der durchschnittlichen Geschwindigkeit im GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz	130
Abbildung 28: Elastizitäten im GV.....	130

Abbildung 29: Wirkungsmodell Personenverkehr (Quelle: INFRAS).....	132
Abbildung 30: Verkehrsaufkommen im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	135
Abbildung 31: Veränderung des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	136
Abbildung 32: Veränderung der durchschnittlichen Wegdistanz im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	136
Abbildung 33: Verkehrsleistung im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	137
Abbildung 34: Veränderung der Verkehrsleistung im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	137
Abbildung 35: Fahrleistung privater MIV und ÖIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	138
Abbildung 36: Veränderung der Fahrleistung privater MIV und ÖIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	138
Abbildung 37: Fahrzeugstunden MIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS).....	139
Abbildung 38: Veränderung der Fahrzeugstunden MIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)	140
Abbildung 39: Durchschnittliche Besetzungsgrade im MIV und ÖIV (Quelle: INFRAS)	140
Abbildung 40: Fahrleistungsanteile MIV und ÖIV (Quelle: INFRAS)	141
Abbildung 41: Anteil an der Verkehrsleistung (Quelle: INFRAS)	141
Abbildung 42: Wirkungsmodell Güterverkehr (Quelle: INFRAS).....	142
Abbildung 43: Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS).....	143
Abbildung 44: Veränderung der Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)	143
Abbildung 45: Modal Split Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)	144
Abbildung 46: Veränderung der Fahrleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)	144
Abbildung 47: Fahrzeugstunden Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)	145
Abbildung 48: Veränderung der Fahrzeugstunden Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)	145
Abbildung 49: Übersicht direkte und indirekte Effekte im Personenverkehr (Quelle: ARE 2021/INFRAS)	148
Abbildung 50: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Kostenänderung MIV (Quelle: INFRAS)	150
Abbildung 51: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Kostenänderung ÖV (Quelle: INFRAS)	151
Abbildung 52: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Änderung VoT im MIV (Quelle: INFRAS)	152
Abbildung 53: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung des Aufkommens im MIV inkl. ÖIV (Neuverkehr aufgrund neuer Nutzende) (Quelle: INFRAS).....	153
Abbildung 54: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Fahrzeugstunden im Basisverkehr des MIV inkl. ÖIV (Quelle: INFRAS).....	154
Abbildung 55: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Unfallkosten aufgrund der Änderung der Verkehrsleistung und des Modal Split (Quelle: INFRAS)	154
Abbildung 56: Zusatznutzen aus der Veränderung der Unfallkosten aufgrund der Automatisierung (Quelle: INFRAS)	155

Abbildung 57: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Unfallkosten gesamt (Quelle: INFRAS).....	155
Abbildung 58: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Umwelt und Gesundheitskosten (Quelle: INFRAS)	156
Abbildung 59: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung des ext. Gesundheitsnutzens (Quelle: INFRAS)	157
Abbildung 60: Übersicht mikroökonomischer Effekte im Güterverkehr.....	157
Abbildung 61: Direkter Effekt Veränderung Kilometerkosten im GV	158
Abbildung 62: Indirekter Effekt Veränderung Nachfrage im GV	159
Abbildung 63: Indirekter Effekt Veränderung Zeitkosten im GV	159
Abbildung 64: Indirekter Effekt Veränderung Unfallkosten (Mengeneffekt) im GV	160
Abbildung 65: Indirekter Effekt Veränderung Unfallkosten (Preiseffekt) im GV..	161
Abbildung 66: Indirekter Effekt Veränderung Umwelt- und Gesundheitskosten im GV	161
Abbildung 67: Mikroökonomische Effekte im Personenverkehr (gesamt)	162
Abbildung 68: Mikroökonomische Effekte im Güterverkehr (gesamt)	163
Abbildung 69: Grundlogik der Input-Output-Analyse.....	164
Abbildung 70: Wirkungskette der Referenzentwicklung	166
Abbildung 71: Wirkungen für Elektrifizierungsszenario	168
Abbildung 72: Wirkungskette für Technologieszenario	171
Abbildung 73: Wirkungskette für MaaS-Szenario.....	174
Abbildung 74: Ökonomische Wirkungen im Vergleich zur Referenz.....	190

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse (Veränderung zum Referenzszenario 2050) (Quelle: INFRAS).....	21
Tabelle 2: Strukturelemente Verkehr. FäG: Fahrzeugähnliche Geräte (Trottis etc.), PW: Personenwagen, RoLa: Rollende Landstrasse. (angelehnt an ARE 2021)	44
Tabelle 3: Verschlagwortung in Zotero (eigene Darstellung in Anlehnung an ARE 2021).....	55
Tabelle 4: Veränderung des VoT im MIV mit Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021, angelehnt an Kolarova et al. 2019, Kolarova et al. 2020, Correia et al. 2019).....	58
Tabelle 5: Zeitkostensätze im Personenverkehr	60
Tabelle 6: Veränderung der Mobilitätsrate aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021 angelehnt an Truong et al. 2017)	60
Tabelle 7: Veränderung der Besetzungsgrade im MIV aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021 angelehnt an Meyer et al. 2017, Hörl et al. 2019, Soteropoulos et al. 2019).....	62
Tabelle 8: Veränderung der Besetzungsgrade aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Mühlethaler et al. 2011, Hörl et al. 2019, ITF 2020, Soteropoulos et al. 2019).....	65
Tabelle 9: Veränderung des VoT aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Mühlethaler et al. 2011, Hörl et al. 2019, ITF 2020, Soteropoulos et al. 2019).....	66
Tabelle 10: Veränderung der Mobilitätsrate aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Lutzenberger et al. 2018, Hülsmann et al. 2018) ...	69
Tabelle 11: Übersicht der für die Operationalisierung der Szenarien relevantesten in der Literatur zu finden- den Wirkungsstärken für den Personenverkehr (Quelle: ARE 2021, ergänzt).....	77
Tabelle 12: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr aufgrund Automatisierung ggü. Referenz (Quelle: ARE 2021).....	79
Tabelle 13: Zeitkostensätze im Güterverkehr	83
Tabelle 14: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr aufgrund von Sharing/Kooperationen ggü. Referenz (Quelle: ARE 2021)	84
Tabelle 15: Übersicht der für die Operationalisierung der Szenarien relevantesten in der Literatur zu finden- den Wirkungsstärken für den Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, aktualisiert/ergänzt).....	87
Tabelle 16: Zentrale Stellschrauben des NPVM Strasseninfrastrukturkapazität (Quelle: ARE 2021)	88
Tabelle 17: Übersicht der relevantesten in der Literatur zu findenden Wirkungsstärken hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur (Quelle: ARE 2021, aktualisiert/ergänzt).....	95
Tabelle 18: Referenzszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen	105
Tabelle 19: Stellschrauben Personenverkehr Referenzszenario, VoT (Quelle: VSS 2019).....	106
Tabelle 20: Kostensätze im Güterverkehr, Perspektive Transportunternehmen (Quelle: ARE 2021)	108

Tabelle 21: Elektrifizierungsszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen ..	110
Tabelle 22: Annahmen Elektrifizierungsszenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario	111
Tabelle 23: Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	113
Tabelle 24: Technologieszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen	115
Tabelle 25: Annahmen Technologieszenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario	116
Tabelle 26: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr «Technologie» (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	117
Tabelle 27: Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	117
Tabelle 28: Veränderung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	119
Tabelle 29: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021)	119
Tabelle 30: MaaS-Szenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen	120
Tabelle 31: Annahmen MaaS-Szenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario	121
Tabelle 32: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr «Technologie» (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	122
Tabelle 33: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	122
Tabelle 34: Veränderung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)	123
Tabelle 35: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021)	124
Tabelle 36: Überblick Stellschrauben im Personenverkehr im Vergleich zum Referenzszenario *Keine Veränderung, absolute Werte	125
Tabelle 37: Überblick Flottenmix im Personenverkehr, fahrleistungsbezogen	127
Tabelle 38: Überblick Veränderung Stellschrauben im Güterverkehr in den Analyseszenarien ggü. Referenz	128
Tabelle 39: Veränderungen im Personenverkehr ggü. der Referenz (Quelle: INFRAS)	134
Tabelle 40: Veränderungen im Güterverkehr ggü. der Referenz (Quelle: INFRAS)	143
Tabelle 41: Übersicht Zusatzkosten und -nutzen im Personenverkehr (Quelle: INFRAS) Zusatznutzen (+) / Zusatzkosten (-). Differenzen in den Summen durch Rundungen.	149
Tabelle 42: Preise im ÖV aus Sicht der Nutzenden (Quelle: INFRAS)	150
Tabelle 43: Value of Time im MIV, Fortschreibung auf Preisbasis 2021 mit dem Nominallohnindex (Quelle: INFRAS)	152
Tabelle 44: Übersicht Zusatzkosten und -nutzen im Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS) Zusatznutzen (+) / Zusatzkosten (-). Differenzen in den Summen durch Rundungen.	158
Tabelle 45: Szenario Elektrifizierung - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INFRAS)	169
Tabelle 46: Szenario Technologie - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INFRAS)	173

Tabelle 47: Szenario Mobility-as-a-Service - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INFRAS).....	176
Tabelle 48: Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse (Veränderung zum Referenzszenario 2050) (Quelle: INFRAS); ↗ <i>leichte Zunahme</i> ; ↘ <i>leichte Abnahme</i>	177
Tabelle 49: Veränderung der Wertschöpfung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zur Referenzszenario (Quelle: INFRAS); ↑ <i>Starke Zunahme</i> ; ↓ <i>Starke Abnahme</i> ; ↗ <i>leichte Zunahme</i> ; ↘ <i>leichte Abnahme</i>	179
Tabelle 50: Veränderung der Beschäftigung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zur Referenzszenario (Quelle: INFRAS); ↑ <i>Starke Zunahme</i> ; ↓ <i>Starke Abnahme</i> ; ↗ <i>leichte Zunahme</i> ; ↘ <i>leichte Abnahme</i>	180
Tabelle 51: Chancen und Risiken des Elektrifizierungsszenarios nach Akteursgruppen.....	184
Tabelle 52: Chancen und Risiken des Technologieszenarios nach Akteursgruppen.....	186
Tabelle 53: Chancen und Risiken des MaaS-Szenarios nach Akteursgruppen	188

Abkürzungsverzeichnis

AMG	Aggregierte Methode Güterverkehr
ASTRA	Bundesamt für Strassen
ACC	Adaptive Geschwindigkeitsanlagen
ADAS	Fahrzeugassistentensystem (advanced driver-assistance system)
AP	Arbeitspaket
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
AV	Automatisierte Fahrzeuge
BAV	Bundesamt für Verkehr
BAZ	Bundesamt für Zivildienst
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge
BFE	Bundesamt für Energie
BG	Besetzungsgrad
Bsp.	Beispiel
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
CAV	Vernetzte automatisierte Fahrzeuge
CNG	Erdgas
CST	Unterirdischer Transport (cargo sous terrain)
DAK	Digitalisierte automatische Kupplung
DWV	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
EIOT	Energie- und verkehrsdifferenzierte Input-Output-Tabelle
EV	Elektrisch angetriebene Fahrzeuge
EWLV	Einzelwagenladungsverkehr
FäG	Fahrzeugähnliche Geräte
FFCS	Free-floating-car-sharing
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GFEI	Global Fuel Economy Initiative
GoA	Automatisierungsgrad (Grade of Automation)
GV	Güterverkehr
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HGV	Schwerer Lastkraftwagen (heavy goods vehicle)
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (internal combustion engine vehicle)
IOT	Input-Output-Modell
IoT	Internet der Dinge
KI	Künstliche Intelligenz
konv.	konventionell
LCA	Lebenszyklusanalyse (life cycle analysis)
LCV	Leichte Nutzfahrzeuge (light commercial vehicle)
LPG	Autogas
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
MaaS	Mobility as a Service
MCS	Megawatt Charging Systems

MIV	Motorisierter Individualverkehr
MR	Mobilitätsrate
MZMV	Mikrozensus Mobilität und Verkehr
n.a.	nicht verfügbar (not available)
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
ÖIV	Öffentlicher Individualverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHEV	Plug-in-Hybride
Pkm	Personenkilometer
PUDO	Pick-up- und Drop-off
PV	Personenverkehr
RoLa	Rollende Landstrasse
SAE	Amerikanische Vereinigung von Automobilingenieuren (Society of Automotive Engineers)
SAEV	Gemeinsam genutzte automatisierte elektrische Fahrzeuge (Shared Autonomous Electric Vehicles)
SAV	Gemeinsam genutzte automatisierte Fahrzeuge (Shared Autonomous Vehicles)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
TCO	Total Cost of Ownership
TGH	Treibhausgas (greenhouse gas, GHG)
TNC	Transportation network companies
UBA	Bundesamt für Umwelt
UKV	Unbegleiteter kombinierter Verkehr
UVEK	Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
V2G	Vehicle-to-Grid
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-X, Vehicle-to-Everything
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDE	Verband der Elektrotechnik Informationstechnik
vlg.	vergleiche
VoT	Reisezeitbewertung (Value of Time)
WLV	Wagenladungsverkehr
WWB	Weiter-Wie-Bisher

Zusammenfassung

Hintergrund, Ziel und Vorgehen

Die Mobilität in der Schweiz wird sich bis 2050 grundlegend verändern. Zwei Megatrends – die Digitalisierung und die Dekarbonisierung – prägen die zukünftige Entwicklung des Verkehrssektors. Während die Digitalisierung neue technologische Möglichkeiten wie automatisiertes und vernetztes Fahren hervorbringt, steht die Dekarbonisierung für den Übergang zu klimaneutralen Antrieben, insbesondere durch Elektrifizierung. Beide Trends verlaufen nicht isoliert, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Die Kombination beider Entwicklungen eröffnet Chancen für Effizienzsteigerungen, Sicherheit, Ressourcenschonung und volkswirtschaftliche Wertschöpfung, bringt aber auch Herausforderungen hinsichtlich Infrastruktur, Regulierung und sozialer Akzeptanz mit sich.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, die volkswirtschaftlichen Potenziale einer digitalisierten und dekarbonisierten Mobilität in der Schweiz im Jahr 2050 zu analysieren. Dabei werden die mikro-, meso- und makroökonomischen Wirkungen verschiedener Analyseszenarien im Vergleich zu einem Referenzszenario („Weiter wie bisher“) untersucht. Abbildung 1 zeigt das Konzept der Wirkungsanalyse. Die ökonomischen Wirkungen werden auf Basis der verkehrlichen Wirkungen und der Entwicklung ökonomischer Parameter wie bspw. der Entwicklung von Kostensätzen für das Jahr 2050 hergeleitet.

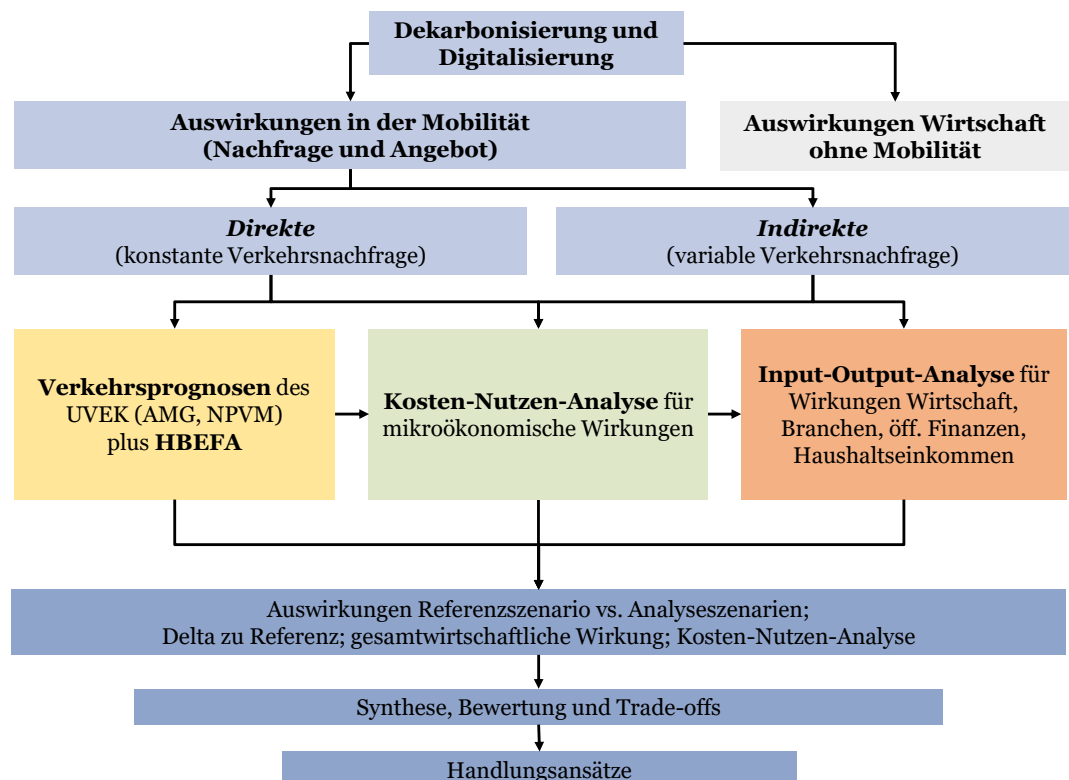


Abbildung 1: Konzept Wirkungsanalyse

Szenarien

Zur Abschätzung der Wirkungen werden ein Referenzszenario und drei Analyseszenarien entwickelt, die mögliche Entwicklungsrichtungen bis 2050 abbilden. Im **Referenzszenario** wird eine Fortsetzung heutiger Trends ohne zusätzliche politische Massnahmen („Weiter wie bisher“, WWB) angenommen. Es bildet die Grundlage für den Vergleich und orientiert sich an der retrospektiven Entwicklung bis 2023 und der Entwicklung des WWB-Szenarios der Verkehrsperspektiven 2050 des Bundes.

Im **Elektrifizierungsszenario** ist der Fahrzeugbestand im Personen- und Güterverkehr weitgehend elektrifiziert. Die Energieeffizienz steigt deutlich, die Betriebskosten sinken und die Treibhausgas-Emissionen werden ggü. der Referenz erheblich reduziert. Der Grad der Automatisierung entspricht dem Niveau im Referenzszenario (32% im Personenverkehr).

Im **Technologieszenario** wird die Elektrifizierung mit einem hohen Grad der Automatisierung und Vernetzung kombiniert. Fahrzeuge übernehmen wesentliche Fahrfunktionen selbstständig (Automatisierungsstufen 4–5 nach SAE). Der MIV gewinnt neue Nutzergruppen (Personen ohne Führerschein und mobilitätseingeschränkte Personen). Für den Güterverkehr wird angenommen, dass sowohl der Strassen- als auch der Schienengüterverkehr nahezu vollständig hoch- bzw. vollautomatisiert (Level 4 + 5 bzw. GoA 4) sind.

Im **MaaS-Szenario** („Automatisierte, geteilte E-Mobilität“) findet die technologische Transformation wie im Technologieszenario statt. Gleichzeitig hat das Teilen von Fahrzeugen und Fahrten eine hohe Akzeptanz. Neue kollektive und bedarfsorientierte Angebote (öffentlicher Individualverkehr, ÖIV) gewinnen im Personenverkehr an Bedeutung. Der private MIV und der ÖV werden teilweise durch den ÖIV ersetzt. Im Güterverkehr sind die Fahrzeuge weiterhin elektrisch und automatisiert. Zusätzlich sind die Unternehmen bereit, ihre Ressourcen zu teilen.

				Sharing Hohe Quote an Car-/ Ride-Sharing (3 private PW werden durch 1 PW ersetzt)
			Automatisierung 99 % der Fahrzeuge sind vollautomatisiert	Automatisierung 99 % der Fahrzeuge sind vollautomatisiert
	Referenz MIV: 80 % öV Strasse: 43 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 47 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %
	Referenzszenario	Elektrifizierungs-Szenario	Technologie-Szenario	Mobility as a Service

Abbildung 2: Übersicht Referenz- und Analyseszenarien

Verkehrliche Wirkungen

Die verkehrlichen Wirkungen werden modellgestützt geschätzt. Die Modelle bauen auf verschiedenen Datengrundlagen auf, u.a. BFS-Statistiken, dem MZMV, Verkehrsperspektiven 2050 sowie Ergebnissen der nationalen Verkehrsmodelle (NPVM, AMG). Grundlage bilden, neben der Verkehrsentwicklung im Referenzszenario, Annahmen zentraler Stellschrauben bzw. Parameter wie z.B. Mobilitätsrate, Besetzungsgrad, Geschwindigkeit und Kosten.

Im **Elektrifizierungsszenario** sind die verkehrlichen Wirkungen im Personenverkehr nur marginal, da lediglich die Kosten im MIV leicht sinken (niedrigere Betriebskosten) und die anderen Stellschrauben weitgehend unverändert bleiben. Im Güterverkehr bleiben die Verkehrsleistungen auf der Strasse und Scheine unverändert sowie auch der Modal Split. Ausserdem hat die Elektrifizierung keinen Effekt auf die Fahrleistung oder die Fahrzeugstunden auf der Strasse.

Im **Technologieszenario** steigen das Aufkommen (+2.7%) und die Verkehrsleistung (+7.5%) im Personenverkehr, v.a. im MIV (Aufkommen +9.5%, Verkehrsleistung +12.3%). Beim ÖV gehen Aufkommen und Verkehrsleistung zurück. Es kommt also zu einem Modal Shift hin zum MIV. Die Verkehrsleistung im Güterverkehr steigt insgesamt um 0.9%, während der Modal Split nahezu unverändert bleibt. Die Fahrleistung auf der Strasse steigt ggü. der Referenz sowohl für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) aber auch für schwere Nutzfahrzeuge (SNF).

Im **MaaS-Szenario** nehmen im Personenverkehr sowohl das Verkehrsaufkommen (+5.4%) als auch die Verkehrsleistung (+12.2%) in 2050 im Vergleich zum Referenzszenario zu. Es findet eine Verlagerung vom privaten MIV und ÖV auf den öffentlichen Individualverkehr (ÖIV) statt. Die Verkehrsleistung des privaten MIV sinkt gegenüber dem Referenzszenario. Der ÖIV macht knapp 20% der Verkehrsleistung aus, der individuelle MIV 53%. Die Güterverkehrsleistung steigt im MaaS-Szenario insgesamt um 1.6%, während der Modal Split nahezu unverändert bleibt. Mit einer verbreiteten Kollaboration steigt die Auslastung der schweren Nutzfahrzeuge, weswegen die Fahrleistung abnimmt. Bei den leichten Nutzfahrzeugen steigt die Auslastung hingegen nicht (auch aufgrund der begrenzten Nutzlast), weswegen die Fahrleistung steigt.

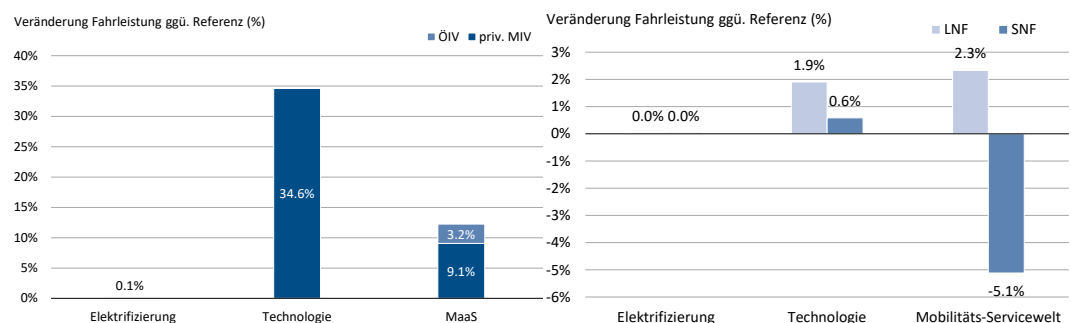


Abbildung 3: Veränderung der Fahrleistung im Personenverkehr (links) und Güterverkehr (rechts) (Quelle: INFRAS)

Mikroökonomische Wirkungen

Die Dekarbonisierung und Digitalisierung im **Personenverkehr** erzeugen sowohl direkte als auch indirekte Effekte. Im Elektrifizierungsszenario resultieren die Wirkungen vor allem aus tieferen Kilometerkosten. Im Technologie- und MaaS-Szenario überwiegen hingegen Effizienzgewinne: Automatisierung reduziert die Reisezeitkosten (Value of Time) deutlich, wodurch Zusatznutzen entstehen. Im MaaS-Szenario wirken tiefere Kilometerkosten und sinkende ÖV-Tarife ebenfalls positiv. Indirekte Effekte umfassen zusätzliche Verkehrsleistungen, Fahrzeugstunden, Unfall-, Umwelt- und Gesundheitskosten. Zwar führen steigende Verkehrsleistungen teilweise zu höheren Umwelt- und Gesundheitskosten, diese werden jedoch durch sinkende Unfallraten infolge der Automatisierung weitgehend kompensiert.

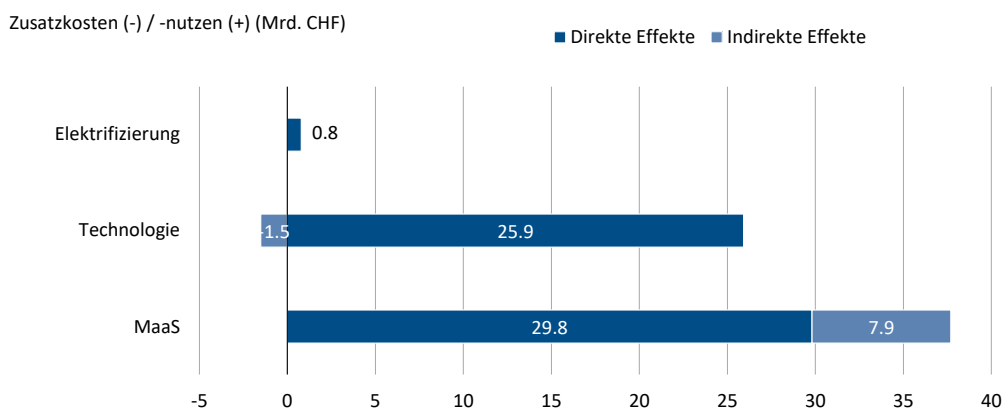


Abbildung 4: Mikroökonomische Effekte im Personenverkehr

Im **Güterverkehr** entstehen die positiven Wirkungen vor allem aufgrund höherer Umwelt- und Gesundheitsnutzen infolge des veränderten Flottenmixes im Elektrifizierungsszenario. Im Technologie- und MaaS-Szenarien kommen zusätzliche Effekte durch veränderte Unfall-, Zeit- und Kilometerkosten hinzu. Bei den indirekten Effekten führen steigende Verkehrsleistungen im Technologie- und MaaS-Szenario zu Mehrkosten, diese werden jedoch durch niedrigere Unfallkosten infolge der Automatisierung weitgehend kompensiert. Zusätzlich tragen geringere Fahrzeugstunden und reduzierte externe Kosten wesentlich zum Nutzengewinn bei.

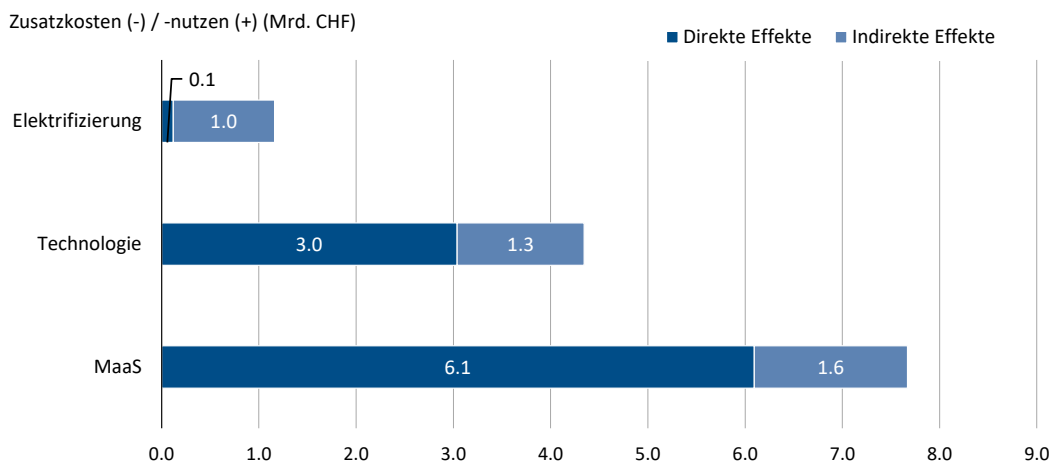


Abbildung 5: Mikroökonomische Effekte im Güterverkehr

Makroökonomische Wirkungen

Im Referenzszenario ist die Elektrifizierung bereits weit fortgeschritten. Damit vollzieht sich eine grundlegende Transformation von der fossilen hin zur elektrischen Energieversorgung, begleitet von einer sinkenden Importabhängigkeit und einem wachsenden inländischen Stromsektor. Wirtschaftlich resultiert daraus ein moderates Wachstum bis 2050: Die Bruttowertschöpfung nimmt um durchschnittlich rund 1.5% pro Jahr zu, die Beschäftigung um rund 0.3%. Die Arbeitsproduktivität steigt entsprechend, was auf eine höhere Effizienz der Schweizer Wirtschaft hinweist.

Im **Elektrifizierungsszenario** wird die Umstellung der Mobilität auf elektrische Fahrzeuge angenommen. Die Unternehmen profitieren von tieferen Betriebs- und Energiekosten, während die Haushalte aufgrund sinkender Mobilitätsausgaben über mehr Einkommen verfügen. Dadurch steigt der Konsum anderer Güter und die inländische Wertschöpfung leicht an (+0.3%). Die Abhängigkeit von Energieimporten nimmt weiter ab, da importiertes Mineralöl durch Strom ersetzt wird, der mehrheitlich im Inland produziert wird.

Das **Technologieszenario** ergänzt die Elektrifizierung durch umfassende Automatisierung im Güter- und Personenverkehr. Die Automatisierung senkt die Produktionskosten, insbesondere im öffentlichen Verkehr und im Gütertransport, führt aber zu einer deutlichen Reduktion der inländischen Arbeitsnachfrage. Trotz steigender Fahrleistung und höherem Strombedarf sinkt die inländische Wertschöpfung leicht (–0.3%) und die Beschäftigung deutlicher (–1.1%). Die Produktivität steigt, während die Beschäftigung insbesondere im Verkehrssektor zurückgeht.

Im **MaaS-Szenario** wird die Digitalisierung um eine verhaltensbezogene Komponente ergänzt: Fahrzeuge werden geteilt und nach Bedarf genutzt. Die Kombination von Automatisierung und Sharing steigert die Effizienz nochmals erheblich: Mobilitätsdienstleistungen werden günstiger und Haushalte geben weniger für Mobilität aus. Das freiwerdende Einkommen fliesst in andere Konsumbereiche, was die inländische Produktion ausserhalb des Verkehrssektors stärkt. Die Wertschöpfung liegt leicht über der Referenz (+0.4%), während die Beschäftigung zurückgeht (–0.7%). Der Verkehrssektor selbst – abgesehen von der neuen Angebotsform des öffentlichen Individualverkehrs (ÖIV) – schrumpft.

Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse (Veränderung zum Referenzszenario 2050)

	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
Wertschöpfung	0.25%	-0.3%	0.4%
Beschäftigung	0.1%	-1.1%	-0.7%

Tabelle 1: Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse (Veränderung zum Referenzszenario 2050) (Quelle: INFRAS)

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich ein klarer Strukturwandel: Arbeitsintensive Branchen wie Verkehr, Fahrzeughandel und Mineralölwirtschaft verlieren an Bedeutung, während kapital-, technologie- und wissensintensive Bereiche wie Stromwirtschaft, Elektrotechnik und Dienstleistungen an Bedeutung gewinnen.

Synthese, Handlungsansätze und weiterer Forschungsbedarf

Die Studie bestätigt die Ergebnisse bisheriger Forschung zur Digitalisierung und Dekarbonisierung in der Mobilität. Sie erweitert den bestehenden Wissensstand um eine systematische volkswirtschaftliche Betrachtung und Abschätzung der Kosten- und Nutzeneffekte sowie der Wertschöpfungs- und Beschäftigungswirkungen. Dabei wird auch deutlich, dass technologische und organisatorische Innovationen mikro- und makroökonomische Wirkungen entfalten, die weit über den Verkehrssektor hinausreichen. Alle drei Analyseszenarien zeigen einen mikroökonomischen Zusatznutzen (Abbildung 6). Im Elektrifizierungsszenario ist dieser am kleinsten, im MaaS-Szenario mit einem Zusatznutzen von mehr als 45 Mrd. CHF am grössten. Die makroökonomischen Effekte (Wertschöpfung, Beschäftigung) steigen im Elektrifizierungsszenario an. Das Technologieszenario ist aufgrund sinkender Wertschöpfung und Beschäftigung makroökonomisch nachteilig. Im MaaS-Szenario steigt die Wertschöpfung stärker als im Elektrifizierungsszenario, gleichzeitig ist aber mit negativen Beschäftigungseffekten zu rechnen. Aus mikroökonomischer Sicht und vor dem Hintergrund der Wertschöpfungseffekte ist das MaaS-Szenario insgesamt am vorteilhaftesten. Gleichzeitig geht dies auch mit den grössten Beschäftigungswirkungen einher, die es aufzufangen gilt.

 Elektrifizierung	 Technologie	 Mobility-as-a-Service
Mikroökonomische Effekte: Zusatznutzen ↗ 1.9 Mrd. CHF p.a.	Mikroökonomische Effekte: Zusatznutzen ↗ 28.7 Mrd. CHF p.a.	Mikroökonomische Effekte: Zusatznutzen ↗ 45.4 Mrd. CHF p.a.
Makroökonomische Effekte: - Wertschöpfung ↗ 2.8 Mrd. CHF (+0.3%) - Beschäftigte ↗ 3'900 (+0.1%)	Makroökonomische Effekte: - Wertschöpfung ↘ 3.4 Mrd. CHF (-0.3%) - Beschäftigte ↘ 49'100 (-1.1%)	Makroökonomische Effekte: - Wertschöpfung ↗ 3.9 Mrd. CHF (+0.4%) - Beschäftigte ↘ 31'100 (-0.7%)
↓	↓	↓
Volkswirtschaftlich und umweltökonomisch sinnvoll, allerdings mit geringstem Zusatznutzen	Volkswirtschaftlich v.a. aufgrund hohem Zusatznutzen sinnvoll, aber Reduktion Wertschöpfung und Beschäftigte	Volkswirtschaftlich sinnvoll v.a. aufgrund höchstem Zusatznutzen, aber auch höchstem Anstieg der Wertschöpfung

Abbildung 6: Ökonomische Wirkungen im Vergleich zur Referenz

Die ökonomischen Wirkungen der Digitalisierung und Dekarbonisierung können erreicht werden, wenn technologische Innovationen und Verhaltensänderungen mit gezielten regulatorischen, ordnungsrechtlichen, finanziellen und beschäftigungsbezogenen Massnahmen gefördert werden. Aus den jeweiligen Handlungsansätzen lassen sich verschiedene Handlungsprioritäten ableiten. Am wichtigsten – auch im Hinblick auf das volkswirtschaftlich beste Szenario – ist die Umschulung von Personal, welches aufgrund der Automatisierung traditionelle Arbeitsplätze bspw. als Chauffeure verlieren. Diese sind für neue Berufe wie z.B. Operatoren zu qualifizieren. Gleichzeitig ist die Ausbildung auf die neuen Anforderungen und v.a. technologischen Entwicklungen auszurichten. Diese Chancen der Transformation sind zu nutzen und gut zu begleiten.

Trotz umfassender Literaturanalyse konnten einige Stellschrauben, die relevant für die Modellierung der verkehrlichen Wirkungen und damit auch ausschlaggebend für die Abschätzung der ökonomischen Wirkungen waren, nur geschätzt werden. Hierfür wurden Hinweise aus der Literatur mit der Begleitkommission diskutiert und nach Möglichkeit ein Konsens für die weitere Bearbeitung gefunden. Die Ergebnisse der

Forschungsarbeit zeigen eine grobe Schätzung der Wirkungen, sind jedoch nicht als Prognosen zu verstehen.

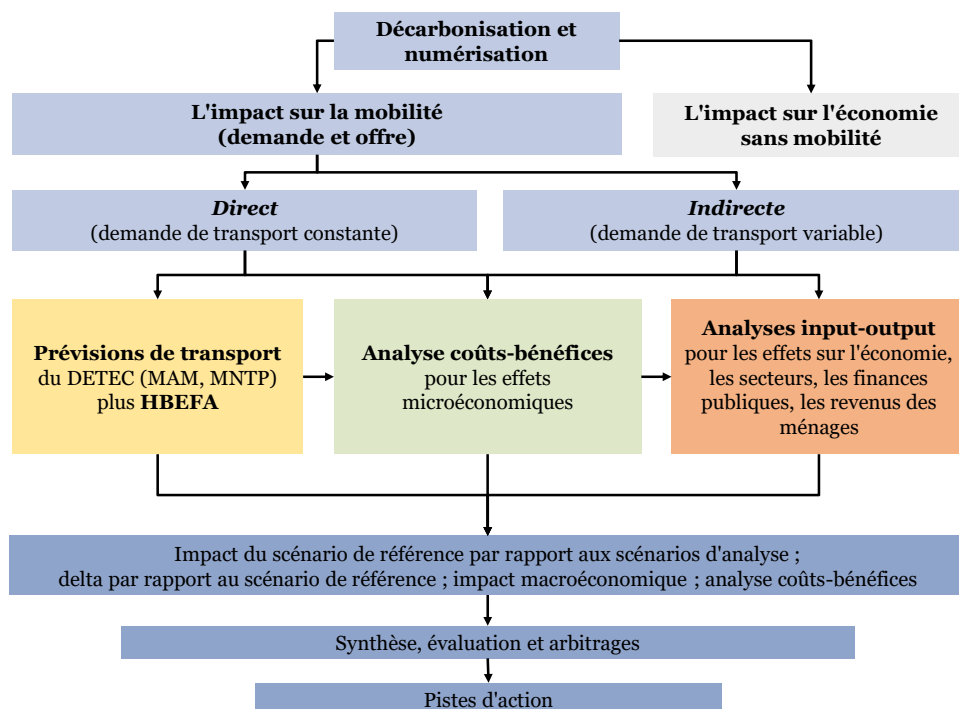
Empirische Grundlagen zu Verhaltensänderungen mit automatisierten Fahrzeugen fehlen bislang. In weiteren Forschungsarbeiten ist der Fokus daher auf empirische Analysen von Pilotprojekten v.a. im automatisierten Fahren und der Akzeptanz von geteilten Fahrzeugen im ÖIV (z.B. Ride-Pooling) zu legen. Dies wird im Rahmen von aktuellen Ausschreibungen von Forschungsprojekten angegangen. Weiterhin sind gesellschaftliche und arbeitsmarktbezogene Auswirkungen weiter zu erforschen.

Résumé

Contexte, Objectif et Procédure

La mobilité en Suisse va connaître des changements fondamentaux d'ici 2050. Deux mégatrends – la numérisation et la décarbonisation – marqueront l'évolution future du secteur des transports. Alors que la numérisation ouvre de nouvelles perspectives technologiques telles que la conduite automatisée et connectée, la décarbonisation est associée à la transition vers des modes de propulsion neutres sur le plan climatique, notamment grâce à l'électrification. Ces deux tendances ne sont pas isolées, mais s'influencent mutuellement. La combinaison de ces deux dynamiques ouvre des perspectives en matière d'amélioration de l'efficacité, de sécurité, de préservation des ressources et de création de valeur économique, mais pose également des défis en termes d'infrastructures, de réglementation et d'acceptation sociale.

L'objectif de ce travail de recherche est d'analyser le potentiel économique d'une mobilité numérisée et décarbonée en Suisse en 2050. Pour ce faire, les effets microéconomiques, mésoéconomiques et macroéconomiques de différents scénarios d'analyse sont examinés par rapport à un scénario de référence («statu quo»). La figure 1 illustre le concept de l'analyse d'impact. Les effets économiques sont déduits sur la base des effets sur le trafic et de l'évolution de paramètres économiques tels que l'évolution des taux de coûts pour l'année 2050.



INFRAS | DLR

Figure 1: Concept de modèle d'impact

Scénarios

Afin d'évaluer les effets, un scénario de référence et trois scénarios d'analyse sont développés. Ces scénarios d'analyse reflètent les évolutions possibles jusqu'en 2050. Le **scénario de référence** suppose une poursuite des tendances actuelles sans mesures politiques supplémentaires («statu quo»). Il sert de base à la comparaison et s'appuie sur l'évolution rétrospective jusqu'en 2023 et sur le scénario «statu quo» des perspectives d'évolution du transport 2050 de la Confédération.

Dans le **scénario d'électrification**, le parc automobile dans le transport de personnes et de marchandises est en grande partie électrifié. L'efficacité énergétique augmente considérablement, les coûts d'exploitation diminuent et les émissions de gaz à effet de serre sont considérablement réduites par rapport au scénario de référence. Le degré d'automatisation correspond au niveau du scénario de référence (32% dans le transport de personnes).

Dans le **scénario technologique**, l'électrification est associée à un haut degré d'automatisation et de mise en réseau. Les véhicules prennent en charge de manière autonome les fonctions de conduite essentielles (niveaux d'automatisation 4-5 selon la SAE). Le trafic individuel motorisé (TIM) gagne de nouveaux groupes d'utilisateurs (personnes sans permis de conduire et personnes à mobilité réduite). Pour le transport de marchandises, on suppose que le transport routier et ferroviaire sera presque entièrement automatisé (niveaux 4 + 5 ou GoA 4).

Dans le **scénario MaaS** («mobilité électrique automatisée et partagée»), la transformation technologique se déroule comme dans le scénario technologique. Parallèlement, le partage de véhicules et de trajets est très bien accepté au niveau sociétal. De nouvelles offres collectives et axées sur la demande (transport individuel public, TIV) gagnent en importance dans le transport de personnes. Le transport individuel motorisé privé et les transports publics (TP) sont en partie remplacés par le TIV. Dans le transport de marchandises (TM), les véhicules restent électriques et automatisés. De plus, les entreprises sont prêtes à partager leurs ressources.

				Sharing Taux élevé de Car-/ Ride-Sharing (3 voitures particulières sont remplacées par 1 voiture)
			Automatisation 99 % des véhicules sont entièrement automatisés	Automatisation 99 % des véhicules sont entièrement automatisés
	Référence TIM : 80 % TP routier : 43 % TP ferroviaire : 100 % TM routier : 47 % TM ferroviaire : 100 %	Électrification TIM : 99 % TP routier : 83 % TP ferroviaire : 100 % TM routier : 90 % TP ferroviaire : 100 %	Électrification TIM : 99 % TP routier : 83 % TP ferroviaire : 100 % TM routier : 90 % TP ferroviaire : 100 %	Électrification TIM : 99 % TP routier : 83 % TP ferroviaire : 100 % TM routier : 90 % TP ferroviaire : 100 %
	Scénario de référence	Scénario d'électrification	Scénario de technologie	Mobility as a Service

Figure 2: Aperçu des scénarios de référence et d'analyse

Effets sur le Trafic

Les effets sur le trafic sont estimés à l'aide de modèles. Les modèles s'appuient sur différentes bases de données, notamment les statistiques de l'OFS, le Microrecensement mobilité et transports (MRMT), les perspectives d'évolution du transport 2050 et les résultats des modèles nationaux de transport (MNTP, MAM). Outre l'évolution du trafic dans le scénario de référence, ils se fondent sur des hypothèses relatives à des paramètres clés tels que le taux de mobilité, le taux d'occupation, la vitesse et les coûts.

Dans le **scénario d'électrification**, les effets sur le transport de personnes sont marginaux, car seuls les coûts du trafic individuel motorisé diminuent légèrement (coûts d'exploitation moins élevés) et les autres paramètres restent largement inchangés. Dans le transport de marchandises, les prestations de transport routier et ferroviaire restent inchangées, tout comme la répartition modale. En outre, l'électrification n'a aucun effet sur les prestations kilométriques ou les heures de service des véhicules sur la route.

Dans le **scénario technologique**, le volume de trafic (+2.7%) et la prestation de transport (+7.5%) augmentent dans le transport de personnes, notamment dans le trafic individuel motorisé (volume de trafic +9.5%, prestation de transport +12.3%). Dans les transports publics, le volume de trafic et la prestation de transport diminuent. On assiste donc à un transfert modal vers le TIM. La prestation de transport dans le transport de marchandises augmente globalement de 0.9%, tandis que la répartition modale reste pratiquement inchangée. Par rapport au scénario de référence, les prestations kilométriques augmentent tant pour les véhicules utilitaires légers que pour les véhicules utilitaires lourds.

Dans le **scénario MaaS**, tant le volume de trafic (+5.4%) que la prestation de transport (+12.2 %) augmentent en 2050 par rapport au scénario de référence. On observe un transfert du trafic individuel motorisé (TIM) privé et des transports publics vers le

transport individuel public (TIP). La prestation de transport du trafic individuel motorisé privé diminue par rapport au scénario de référence. Le transport individuel public représente près de 20% de la prestation de transport, le TIM individuel 53%. Dans le scénario MaaS, la prestation de transport de marchandises augmente globalement de 1.6%, tandis que la répartition modale reste pratiquement inchangée. Grâce à une collaboration généralisée, le taux d'utilisation des véhicules utilitaires lourds augmente, ce qui entraîne une diminution des prestations kilométriques. En revanche, le taux d'utilisation des véhicules utilitaires légers n'augmente pas (notamment en raison de leur charge utile limitée), ce qui entraîne une augmentation des prestations kilométriques.

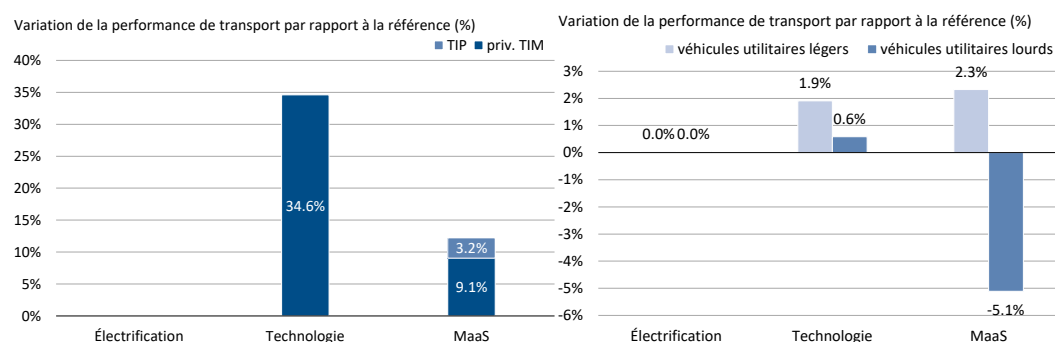


Figure 3: Variation de la performance de transport de personnes (à gauche) et de marchandises (à droite) (Source : INFRAS)

Effets Microéconomiques

La décarbonisation et la numérisation dans le transport de personnes ont des effets directs et indirects. Dans le scénario d'électrification, les effets résultent principalement de la baisse des coûts kilométriques. Dans le scénario technologique et MaaS, en revanche, ce sont les gains d'efficacité qui prédominent : l'automatisation réduit considérablement les coûts liés au temps de trajet (valeur du temps), ce qui génère des avantages supplémentaires. Dans le scénario MaaS, la baisse des coûts kilométriques et des tarifs des transports publics a également un effet positif. Les effets indirects comprennent les prestations de transport supplémentaires, les heures-véhicule, les coûts liés aux accidents, à l'environnement et à la santé. Si l'augmentation des prestations de transport entraîne en partie une hausse des coûts liés à l'environnement et à la santé, celle-ci est toutefois largement compensée par la baisse du taux d'accidents grâce à l'automatisation.

Coûts supplémentaires (-) / bénéfices supplémentaires (+) (Md. CHF)

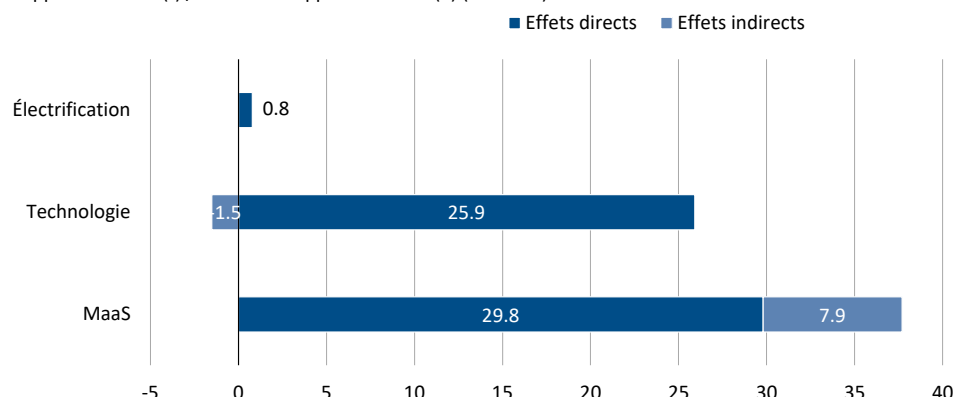


Figure 4: Effets microéconomiques dans le transport de personnes

Dans le domaine du **transport de marchandises**, les effets positifs résultent principalement des avantages accrus pour l'environnement et la santé découlant de la modification de la composition de la flotte dans le scénario d'électrification. Dans les scénarios technologiques et MaaS, des effets supplémentaires s'ajoutent en raison de la modification des coûts liés aux accidents, au temps et au kilométrage. En ce qui concerne les effets indirects, l'augmentation des prestations de transport dans les scénarios technologiques et MaaS entraîne des coûts supplémentaires, mais ceux-ci sont largement compensés par la baisse des coûts liés aux accidents grâce à l'automatisation. De plus, la réduction du nombre d'heures de fonctionnement des véhicules et la diminution des coûts externes contribuent de manière significative à l'augmentation des bénéfices.

Coûts supplémentaires (-) / bénéfices supplémentaires (+) (Md. CHF)

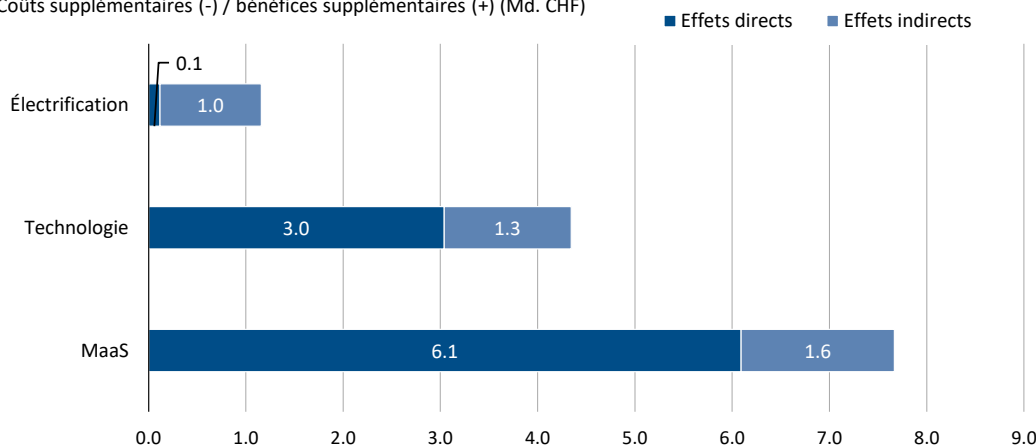


Figure 5: Effets microéconomiques dans le transport de marchandises

Effets Macroéconomiques

Dans le scénario de référence, l'électrification est déjà bien avancée. On assiste ainsi à une transformation fondamentale de l'approvisionnement énergétique, qui passe des énergies fossiles à l'électricité, accompagnée d'une diminution de la dépendance vis-à-vis des importations et d'une croissance du secteur électrique national. Sur le plan économique, il en résulte une croissance modérée jusqu'en 2050: la valeur ajoutée brute

augmente en moyenne d'environ 1.5 % par an, l'emploi d'environ 0.3 %. La productivité du travail augmente en conséquence, ce qui indique une plus grande efficacité de l'économie suisse.

Le **scénario d'électrification** suppose le passage à des véhicules électriques. Les entreprises bénéficient de coûts d'exploitation et d'énergie moins élevés, tandis que les ménages disposent d'un revenu plus important en raison de la baisse des dépenses de mobilité. Cela entraîne une légère augmentation de la consommation d'autres biens et de la valeur ajoutée nationale (+0.3%). La dépendance vis-à-vis des importations d'énergie continue de diminuer, car le pétrole importé est remplacé par de l'électricité produite principalement dans le pays.

Le **scénario technologique** complète l'électrification par une automatisation complète du transport de marchandises et de personnes. L'automatisation réduit les coûts de production, en particulier dans les transports publics et le transport de marchandises, mais entraîne une baisse significative de la demande de main-d'œuvre nationale. Malgré l'augmentation des prestations kilométriques et des besoins en électricité, la valeur ajoutée nationale diminue légèrement (-0.3%) et l'emploi de manière plus significative (-1.1%). La productivité augmente, tandis que l'emploi diminue, en particulier dans le secteur des transports.

Dans le **scénario MaaS**, la numérisation est complétée par une composante comportementale : les véhicules sont partagés et utilisés selon les besoins. La combinaison de l'automatisation et du partage augmente encore considérablement l'efficacité : les services de mobilité deviennent moins chers et les ménages dépensent moins pour la mobilité. Le revenu ainsi libéré est réinvesti dans d'autres domaines de consommation, ce qui renforce la production nationale en dehors du secteur des transports. La valeur ajoutée est légèrement supérieure à la référence (+0.4%), tandis que l'emploi recule (-0.7%). Le secteur des transports lui-même se contracte, à l'exception de la nouvelle forme d'offre de transport public individuel (TPI).

Aperçu des résultats macroéconomiques (évolution par rapport au scénario de référence 2050)

	Électrification	Technologie	MaaS
Valeur ajoutée	0.25%	-0.3%	0.4%
Emploi	0.1%	-1.1%	-0.7%

Tableau 1: Aperçu des résultats macroéconomiques (évolution par rapport au scénario de référence 2050) (Source : INFRAS)

Tous les scénarios révèlent une évolution structurelle claire : les secteurs à forte intensité de main-d'œuvre tels que les transports, le commerce automobile et l'industrie pétrolière perdent en importance, tandis que les secteurs à forte intensité de capital, de technologie et de connaissances tels que l'électricité, l'électrotechnique et les services gagnent en importance.

Synthèse, Pistes d'Action et Besoins de Recherche Supplémentaires

L'étude confirme les résultats des recherches menées jusqu'à présent sur la numérisation et la décarbonisation dans le domaine de la mobilité. Elle élargit l'état actuel des connaissances en proposant une analyse économique systématique et une estimation des coûts et des avantages, ainsi que des effets sur la création de valeur et l'emploi. Il apparaît également clairement que les innovations technologiques et organisationnelles ont des effets microéconomiques et macroéconomiques qui dépassent largement le secteur des transports. Les trois scénarios analysés montrent une valeur ajoutée microéconomique (figure 6). Celle-ci est la plus faible dans le scénario d'électrification et la plus importante dans le scénario MaaS, avec une valeur ajoutée supplémentaire de plus de 45 milliards de francs. Les effets macroéconomiques (valeur ajoutée, emploi) augmentent dans le scénario d'électrification. Le scénario technologique est défavorable sur le plan macroéconomique en raison de la baisse de la valeur ajoutée et de l'emploi. Dans le scénario MaaS, la valeur ajoutée augmente plus fortement que dans le scénario électrification, mais il faut s'attendre à des effets négatifs sur l'emploi. D'un point de vue microéconomique et compte tenu des effets sur la valeur ajoutée, le scénario MaaS est globalement le plus avantageux. Mais il s'accompagne également des effets les plus importants sur l'emploi, qu'il sera nécessaire de compenser.

 Électrification	 Technologie	 Mobility-as-a-Service
Effets microéconomiques : Bénéfice ajouté ↗ 1.9 Md. CHF p.a.	Effets microéconomiques : Bénéfice ajouté ↗ 28.7 Md. CHF p.a.	Effets microéconomiques : Bénéfice ajouté ↗ 45.4 Md. CHF p.a.
Effets macroéconomiques : ▪ Valeur ajoutée ↗ 2.8 Md. CHF (+0.3 %) ▪ Employé-e-s ↗ 3'900 (+0.1 %)	Effets macroéconomiques : ▪ Valeur ajoutée ↘ 3.4 Md. CHF (-0.3 %) ▪ Employé-e-s ↘ 49'100 (-1.1 %)	Effets macroéconomiques : ▪ Valeur ajoutée ↗ 3.9 Md. CHF (+0.4 %) ▪ Employé-e-s ↘ 31'100 (-0.7 %)
		
Économiquement et écologiquement viable, mais avec une valeur ajoutée minimale	Économiquement viable, principalement en raison d'un bénéfice ajouté élevé, mais réduction de la valeur ajoutée et de l'emploi	Économiquement viable, en raison du bénéfice ajouté le plus élevé, mais aussi en raison de la plus forte augmentation de la valeur ajoutée

Figure 6: Effets économiques par rapport au scénario de référence

Les effets économiques de la numérisation et de la décarbonisation peuvent être atteints si les innovations technologiques et les changements de comportement sont encouragés par des mesures réglementaires, juridiques, financières et liées à l'emploi ciblées. Différentes priorités d'action peuvent être déduites des approches d'action respectives. La plus importante – également dans la perspective du meilleur scénario économique – est la reconversion du personnel qui, en raison de l'automatisation, perdra son emploi traditionnel, par exemple celui de personnel de conduite. Ces personnes doivent être qualifiées pour de nouveaux métiers, tels que celui d'opérateur et d'opératrice. Parallèlement, la formation doit être adaptée aux nouvelles exigences et surtout aux évolutions technologiques. Il faut saisir ces opportunités de transformation et les accompagner de manière adéquate.

Malgré une analyse approfondie de la littérature, certains paramètres pertinents pour la modélisation des effets sur le trafic et donc déterminants pour l'estimation des effets économiques n'ont pu être qu'estimés. À cette fin, les indications tirées de la littérature ont été discutées avec la commission d'accompagnement et, dans la mesure du

possible, un consensus a été trouvé pour la suite des travaux. Les résultats des travaux de recherche fournissent une estimation approximative des effets, mais ne doivent pas être considérés comme des prévisions.

Il n'existe à ce jour aucune base empirique concernant les changements de comportement liés aux véhicules automatisés. Les travaux de recherche futurs devront donc se concentrer sur l'analyse empirique de projets pilotes, notamment dans le domaine de la conduite automatisée et de l'acceptation des véhicules partagés dans le transport individuel public (par exemple, le covoiturage). Cette question sera abordée dans le cadre des appels d'offres actuels pour des projets de recherche. Il convient également de poursuivre les recherches sur les répercussions sociales et sur le marché du travail.

Summary

Background, Objective, and Approach

Mobility in Switzerland will undergo fundamental changes by 2050. Two megatrends – digitalisation and decarbonisation – are shaping the future development of the transport sector. While digitalisation is giving rise to new technological possibilities such as automated and connected driving, decarbonisation represents the transition to climate-neutral powertrains, particularly through electrification. These two trends are not isolated but influence each other. The combination of these two developments opens up opportunities for increases in efficiency, safety, resource conservation, and economic added value, but also brings challenges in terms of infrastructure, regulation, and social acceptance.

The aim of this research project is to analyse the economic potential of digitised and decarbonised mobility in Switzerland in 2050. The micro-, meso- and macroeconomic effects of various analysis scenarios are examined in comparison with a baseline scenario (“business as usual”). Figure 1 shows the concept of the impact analysis. The economic effects are derived from the transport effects and the development of economic parameters such as the development of cost rates for the year 2050.

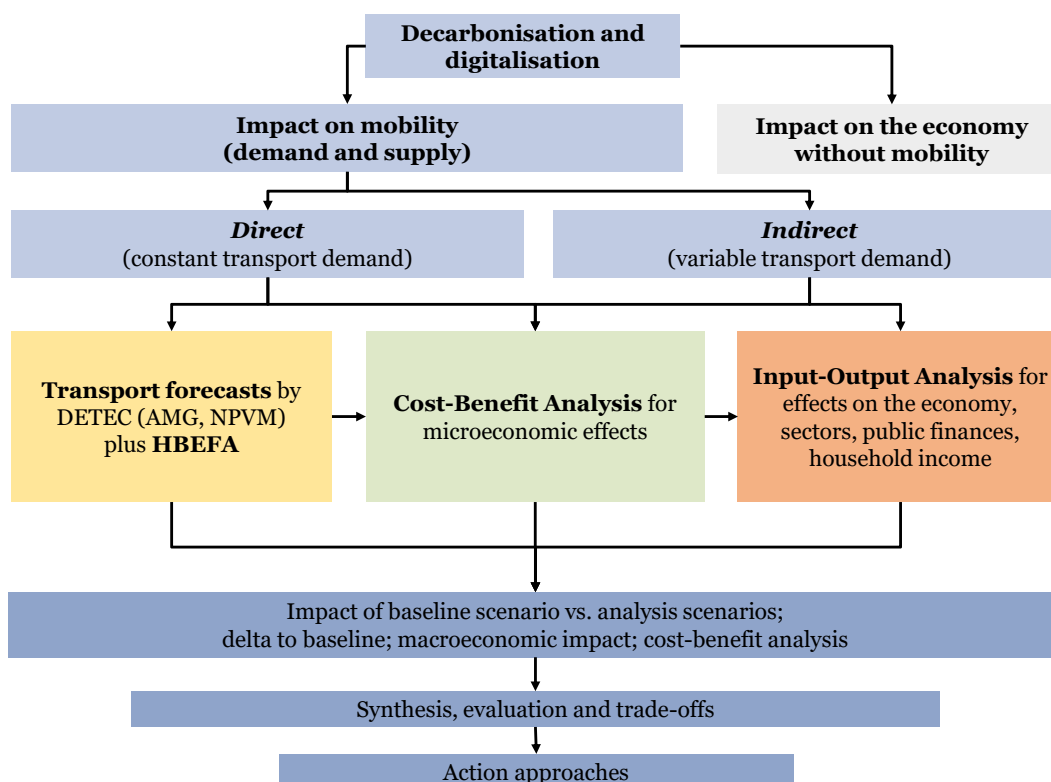


Figure 7: Impact analysis concept

Scenarios

To estimate the effects, a baseline scenario and three analysis scenarios are developed, which illustrate possible development paths up to 2050. The **baseline scenario**

assumes a continuation of current trends without additional policy measures (“business as usual” BAU). It forms the basis for the comparison and is based on retrospective developments up to 2023 and the BAU scenario in the federal government’s 2050 Transport Outlook.

In the **electrification scenario**, the vehicle fleet in passenger and freight transport (FT) is largely electrified. Energy efficiency increases significantly, operating costs fall, and greenhouse gas emissions are reduced considerably compared to the baseline scenario. The degree of automation corresponds to the level in the baseline scenario (32% in passenger transport).

In the **technology scenario**, electrification is combined with a high degree of automation and connectivity. Vehicles take over essential driving functions autonomously (automation levels 4–5 according to SAE). Motorised individual transport (MIT) is gaining new user groups (people without a driver's license and people with reduced mobility). For freight transport, it is assumed that both road and rail freight transport will be almost completely highly or fully automated (levels 4 + 5 or GoA 4).

In the **MaaS scenario** (“automated, shared e-mobility”), the technological transformation takes place as in the technology scenario. At the same time, vehicle and ride sharing is widely accepted. New collective and demand-oriented services (public individual transport, PIT) are gaining importance in passenger transport. Private MIT and public transport (PT) are partially replaced by PIT. In freight transport, vehicles continue to be electric and automated. In addition, companies are willing to share their resources.

				Sharing High rate of car-/ride-sharing (3 private cars are replaced by 1 car)
			Automation 99 % of vehicles are fully automated	Automation 99 % of vehicles are fully automated
	Baseline MIT: 80 % PT road: 43 % PT rail: 100 % FT road: 47 % FT rail: 100 %	Electrification MIT: 99 % PT road : 83 % PT rail: 100 % FT road: 90 % FT rail: 100 %	Electrification MIT: 99 % PT road : 83 % PT rail: 100 % FT road: 90 % FT rail: 100 %	Electrification MIT: 99 % PT road : 83 % PT rail: 100 % FT road: 90 % FT rail: 100 %
	Baseline scenario	Electrification scenario	Technology scenario	Mobility as a Service

Figure 8: Overview of baseline and analysis scenarios

Traffic impacts

Traffic impacts are estimated using models. The models are based on various data sources, including statistics from the Federal Statistical Office (FSO), the Microcensus on Mobility and Transport (MCMT), Transport Outlook 2050, and the results of

national transport models (NPVM, AMG). In addition to traffic development in the baseline scenario, the models are based on assumptions about key variables and parameters such as mobility rates, occupancy rates, speeds, and costs.

In the **electrification scenario**, the effects on passenger transport are only marginal, as only the costs of MIT decrease slightly (lower operating costs) and the other variables remain largely unchanged. In freight transport, transport services on the road and rail remain unchanged, as does the modal split. Furthermore, electrification has no effect on transport performance or vehicle hours on the road.

In the **technology scenario**, passenger traffic volume (+2.7%) and transport performance (+7.5%) increase, especially in MIT (traffic volume +9.5%, transport performance +12.3%). In public transport, traffic volume and transport performance decline. This results in a modal shift towards MIT. Transport performance in freight transport increases by 0.9% overall, while the modal split remains nearly unchanged. Transport performance increases compared to the baseline scenario for both light-duty commercial vehicles (LDV) and heavy-duty commercial vehicles (HDV).

In the **MaaS scenario**, both traffic volume (+5.4%) and transport performance (+12.2%) in passenger transport will increase in 2050 compared to the baseline scenario. There will be a shift from private MIT and public transport to public individual transport (PIT). The traffic performance of private MIT will decrease compared to the baseline scenario. Public individual transport will account for just under 20% of transport performance, while private MIT will account for 53%. Freight transport performance will increase by a total of 1.6% in the MaaS scenario, while the modal split will remain almost unchanged. With widespread collaboration, the utilisation of heavy-duty commercial vehicles will increase, which is why transport performance will decrease. In contrast, the utilisation of light-duty commercial vehicles will not increase (also due to the limited payload), which is why transport performance will increase.

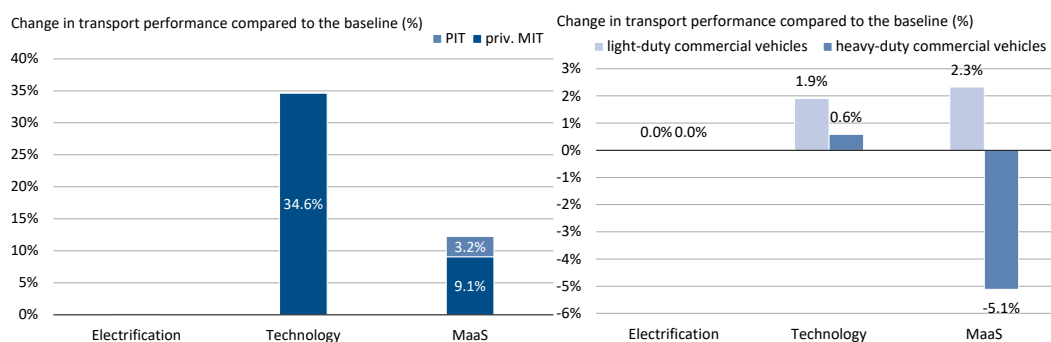


Figure 9: Change in passenger transport performance (left) and freight transport performance (right) (Source: INFRAS)

Microeconomic effects

Decarbonisation and digitalisation in passenger transport generate both direct and indirect effects. In the electrification scenario, the effects result primarily from lower kilometre costs. In the technology and MaaS scenario, on the other hand, efficiency gains predominate: automation significantly reduces travel time costs (value of time), creating additional benefits. In the MaaS scenario, lower kilometre costs and falling public

transport fares also have a positive effect. Indirect effects include additional transport performance, vehicle hours, accident, environmental, and health costs. Although rising transport performance leads to higher environmental and health costs in some cases, these are largely offset by falling accident rates as a result of automation.

Additional costs (-) / benefits (+) (bn CHF)

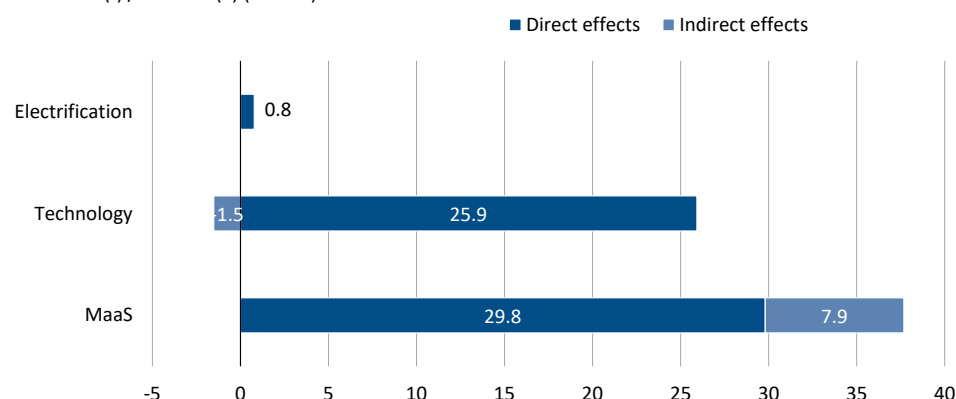


Figure 10: Microeconomic effects in passenger transport

In **freight transport**, the positive effects arise primarily from greater environmental and health benefits as a result of the changed fleet mix in the electrification scenario. In the technology and MaaS scenarios, additional effects are added due to changes in accident, time, and mileage costs. In terms of indirect effects, increasing transport performance in the technology and MaaS scenarios leads to additional costs, but these are largely offset by lower accident costs as a result of automation. In addition, fewer vehicle hours and reduced external costs contribute significantly to the increase in benefits.

Additional costs (-) / benefits (+) (bn CHF)

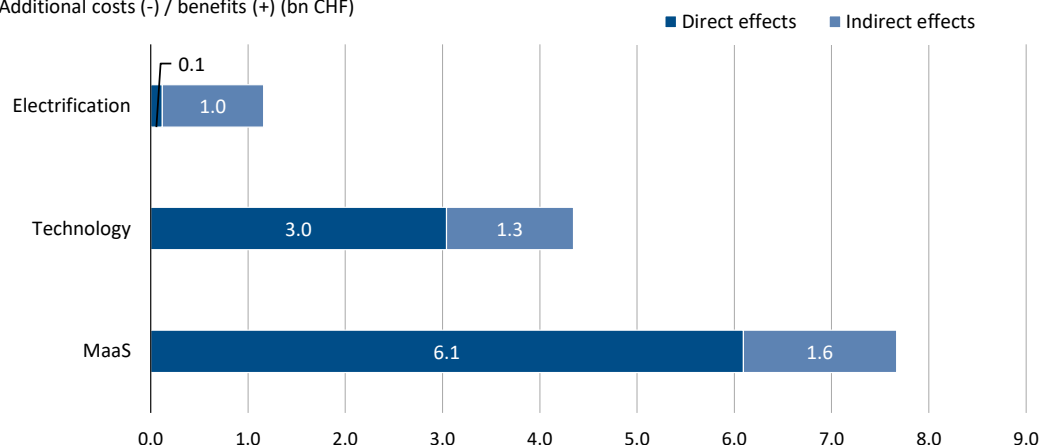


Figure 11: Microeconomic effects in freight transport

Macroeconomic effects

In the baseline scenario, electrification is already well advanced. This is leading to a fundamental transformation from fossil fuels to electric energy supply, accompanied by declining import dependency and a growing domestic electricity sector. Economically, this will result in moderate growth until 2050: gross value added will increase by

an average of around 1.5% per year, and employment by around 0.3%. Labor productivity will rise accordingly, indicating greater efficiency in the Swiss economy.

The **electrification scenario** assumes a shift in mobility towards electric vehicles. Companies benefit from lower operating and energy costs, while households have more disposable income due to lower mobility expenses. This leads to an increase in the consumption of other goods and a slight rise in domestic value added (+0.3%). Dependence on energy imports continues to decline as imported mineral oil is replaced by electricity, most of which is produced domestically.

The **technology scenario** complements electrification with comprehensive automation in freight and passenger transport. Automation reduces production costs, particularly in public transport and freight transport, but leads to a significant reduction in domestic labour demand. Despite rising mileage and higher electricity demand, domestic value added declines slightly (−0.3%) and employment declines more significantly (−1.1%). Productivity increases, while employment declines, particularly in the transport sector.

In the **MaaS scenario**, digitisation is supplemented by a behavioural component: vehicles are shared and used as needed. The combination of automation and sharing further increases efficiency significantly: mobility services become cheaper and households spend less on mobility. The income that becomes available flows into other areas of consumption, which strengthens domestic production outside the transport sector. Value added is slightly above the baseline (+0.4%), while employment declines (−0.7%). The transport sector itself – apart from the new form of public individual transport (ÖIV) – is shrinking.

Overview of macroeconomic results (change compared to the baseline scenario 2050)

	Electrification	Technology	MaaS
Value added	0.25%	−0.3%	0.4%
Employment	0.1%	−1.1%	−0.7%

Table 1: Overview of macroeconomic results (change compared to the 2050 baseline scenario 2050) (Source: INFRAS)

Across all scenarios, a clear structural change is evident: labour-intensive sectors such as transportation, vehicle trade, and the petroleum industry are losing importance, while capital-, technology-, and knowledge-intensive sectors such as the electricity industry, electrical engineering, and services are gaining in importance.

Synthesis, Approaches for Action, and Further Research Needs

The study confirms the findings of previous research on digitalisation and decarbonisation in mobility. It expands the existing level of knowledge with a systematic economic view and assessment of the cost and benefit effects as well as the value creation and employment effects. It also becomes clear that technological and organisational innovations have microeconomic and macroeconomic effects that extend far beyond the transport sector. All three analysis scenarios show additional microeconomic

benefits (Figure 6). It is smallest in the electrification scenario and largest in the MaaS scenario, with an additional benefit of more than CHF 45 billion. The macroeconomic effects (value added, employment) increase in the electrification scenario. The technology scenario is macroeconomically disadvantageous due to declining value added and employment. In the MaaS scenario, value added increases more strongly than in the electrification scenario, but negative employment effects are to be expected. From a microeconomic perspective and against the backdrop of value added effects, the MaaS scenario is the most advantageous overall. At the same time, it also has the greatest employment effects, which need to be addressed.

 Electrification	 Technology	 Mobility-as-a-Service
Microeconomic effects: Added benefit ↗ 1.9 bn CHF p.a.	Microeconomic effects: Added benefit ↗ 28.7 bn CHF p.a.	Microeconomic effects: Added benefit ↗ 45.4 bn CHF p.a.
Macroeconomic effects: - Value added ↗ 2.8 bn CHF (+0.3 %) - Employees ↗ 3'900 (+0.1 %)	Macroeconomic effects: - Value added ↘ 3.4 bn CHF (-0.3 %) - Employees ↘ 49'100 (-1.1 %)	Macroeconomic effects: - Value added ↗ 3.9 bn CHF (+0.4 %) - Employees ↘ 31'100 (-0.7 %)
		
Economically and environmentally viable, but with minimal added value	Economically viable, primarily due to high added benefit, but reduction in added value and employment	Economically viable, primarily due to the highest added benefit, but also due to the highest increase in value added

Figure 12: Economic effects compared to the baseline

The economic effects of digitalisation and decarbonisation can be achieved if technological innovations and behavioural changes are promoted through targeted regulatory, legal, financial, and employment-related measures. Various priorities for action can be derived from the respective approaches. The most important priority – also in terms of the best economic scenario – is the retraining of personnel who are losing traditional jobs, such as chauffeurs, due to automation. These individuals must be qualified for new professions, such as operators. At the same time, training must be geared toward new requirements and, above all, technological developments. These opportunities for transformation must be exploited and well supported.

Despite a comprehensive analysis of the literature, some parameters that were relevant for modelling the traffic effects and thus also decisive for estimating the economic effects could only be estimated. To this end, information from the literature was discussed with the accompanying commission and, where possible, a consensus was reached for further processing. The results of the research work show a rough estimate of the effects but should not be understood as forecasts.

Empirical evidence on behavioural changes associated with automated vehicles is currently lacking. Further research should therefore focus on empirical analyses of pilot projects, particularly in the areas of automated driving and the acceptance of shared vehicles in public individual transport (e.g., ride pooling). This is being addressed in the context of current tenders for research projects. Furthermore, social and labour market-related impacts need to be researched further.

1 Ausgangslage

1.1 Hintergrund und Ziel

Die Mobilität in der Schweiz wird sich in den nächsten Jahrzehnten grundlegend verändern. Die beiden Megatrends Digitalisierung und Elektrifizierung bzw. Dekarbonisierung prägen die Zukunft der Mobilität.



Die **Digitalisierung** hat vielfältige Aspekte und Auswirkungen. In der Literatur und Forschung werden v. a. zwei Aspekte adressiert. Erstens ist die technologische Entwicklung hin zu automatisierten und vernetzten Fahrzeugen relevant. Zweitens ermöglichen die Digitalisierung neue Angebotsformen in der Mobilität, die u.a. das Teilen von Fahrzeugen und Fahrten vereinfachen. **Sharing**-Angebote wie Mobility (Car-Sharing) sind etabliert, andere Angebote des Ride-Sharing werden getestet oder wie z.B. mybuxi kontinuierlich weiterentwickelt. Es wird sich eine **Mobilitäts-Servicewelt** (Mobility as a Service, MaaS) entwickeln.



Unter **Dekarbonisierung** des Verkehrs wird die Reduktion kohlestoffhaltiger Energieträger im Verkehrssektor verstanden. Die Dekarbonisierung des Verkehrs ist wichtig, um das Netto-Null-Ziel der Langfristigen Klimastrategie 2050 des Bundes zu erreichen. Mehrere Technologien sind verfügbar: synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff und Elektrofahrzeuge. Da die **Elektrifizierung** bereits am stärksten vorangeschritten ist, fokussieren wir uns auf diese Technologie.

Die Entwicklung ist dynamisch und bringt verschiedene ökonomische Chancen aber auch Herausforderungen mit sich. Die Forschung an den beiden Megatrends erfolgt in der Schweiz bisher separat: Sowohl für die Digitalisierung als auch die Dekarbonisierung wurden die ökonomischen Effekte in den letzten Jahren analysiert (ARE 2021, Angst et al. 2021). Daraus lassen sich wichtige Erkenntnisse ableiten. Dennoch zeigt die Literatur auch, dass beide Herausforderungen in der Realität gemeinsam sowie deren Interdependenzen zu betrachten sind. Zum einen, weil sich die Entwicklungen im Zusammenhang der Dekarbonisierung und Digitalisierung zeitlich überlappen werden. Zum anderen, weil sich die beiden Entwicklungen gegenseitig bedingen und beeinflussen.

Für die Schweiz braucht es vertiefte Forschung, wie die verschiedenen Trends zusammenspielen, welche volkswirtschaftlichen Chancen und Risiken damit verbunden sind und wie Synergien genutzt werden können. Zu analysieren sind die Folgen für die einzelnen Segmente des Verkehrs (Güterverkehr, Personenverkehr, MIV, ÖV etc.), die Produktionsstrukturen, die volkswirtschaftliche Bedeutung nach Branchen, und die Kosten und Nutzen des Verkehrs.

Beide Trends in kombinierten Szenarien zu betrachten und mit einer Referenzentwicklung und deren ökonomischen Wirkungen zu vergleichen hilft, entsprechende

Massnahmen und Instrumente zu planen, die eine ökonomisch sinnvolle Transformation der Mobilität in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ermöglichen bzw. unterstützen.

1.2 Methodisches Vorgehen in der Übersicht

Ziel des Projekts ist es, die volkswirtschaftlichen Wirkungen einer digitalisierten und dekarbonisierten Mobilität im Jahr 2050 zu analysieren. Unser Grundverständnis der Wirkungen ist in Abbildung 7 zusammengefasst.

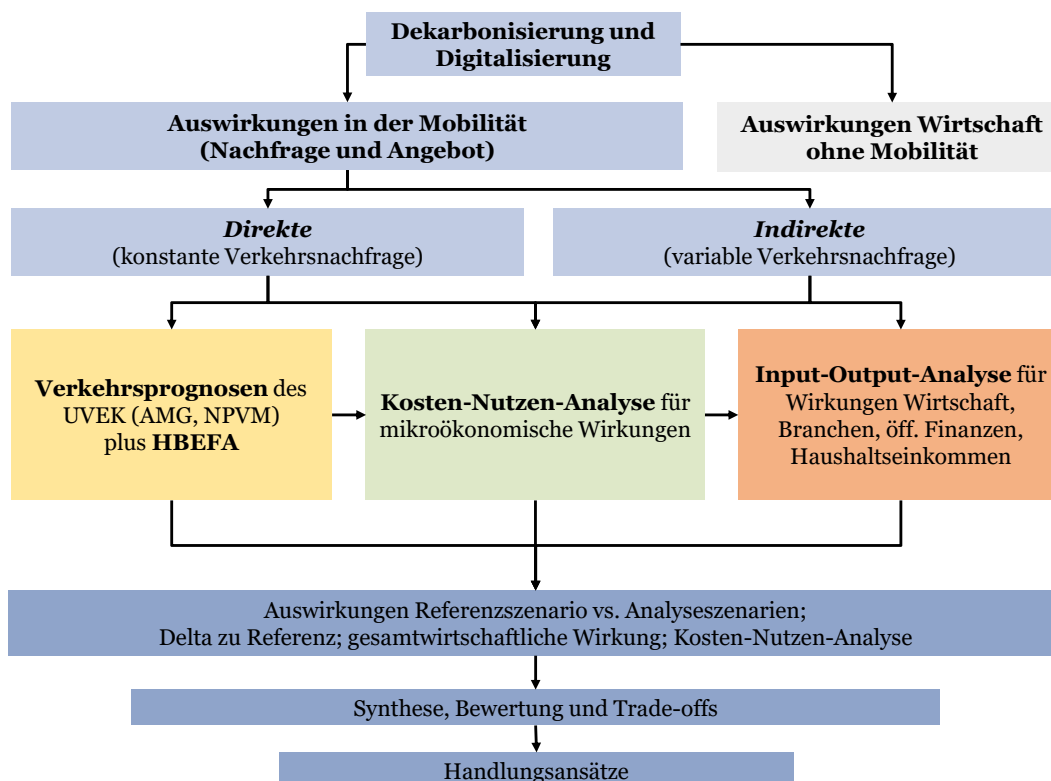


Abbildung 7: Konzept Wirkungsanalyse

Die Digitalisierung und Dekarbonisierung in der Mobilität hat sowohl direkte als auch indirekte Wirkungen. Direkte Wirkungen sind beispielsweise die Veränderung der Kosten der Verkehrsangebote ohne Berücksichtigung der daraus resultierenden Veränderung der Verkehrsnachfrage. Im Kern der Arbeiten werden die mikroökonomischen Wirkungen mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse und die meso- und makroökonomischen Wirkungen mittels einer Input-Output-Analyse geschätzt.

Die volkswirtschaftlichen Wirkungen der Dekarbonisierung durch Elektrifizierung und Digitalisierung in der Mobilität werden in Szenarien untersucht. Es werden ein Referenzszenario und drei Analyseszenarien für das Jahr 2050 definiert. Im Ergebnis werden die verkehrlichen und ökonomischen Wirkungen der Analyseszenarien mit dem Referenzszenario verglichen. Im Fokus stehen also die Veränderungen aufgrund der jeweiligen Entwicklungen.

Die Verkehrsperspektiven 2050 des UVEK, Ergebnisse früherer Modellierungen mit dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) sowie die Aggregierte Methode Güterverkehr (AMG) und das Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) bilden wichtige Grundlagen zur Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen. Im Rahmen des Projekts wird ein Wirkungsmodell zur Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen für den Personen- und Güterverkehr basierend auf diesen und weiteren Annahmen erstellt. Diese Ergebnisse bilden wiederum Grundlage für die Abschätzung der mikroökonomischen Wirkungen (Kosten und Nutzen) sowie der meso- und makroökonomischen Wirkungen (Input-Output-Analyse).

Abbildung 8 zeigt das Arbeitsprogramm und die einzelnen Arbeitspakete (AP) in der Übersicht. Das methodische Vorgehen wird im Folgenden kurz beschrieben und in den jeweiligen Kapiteln vertieft.

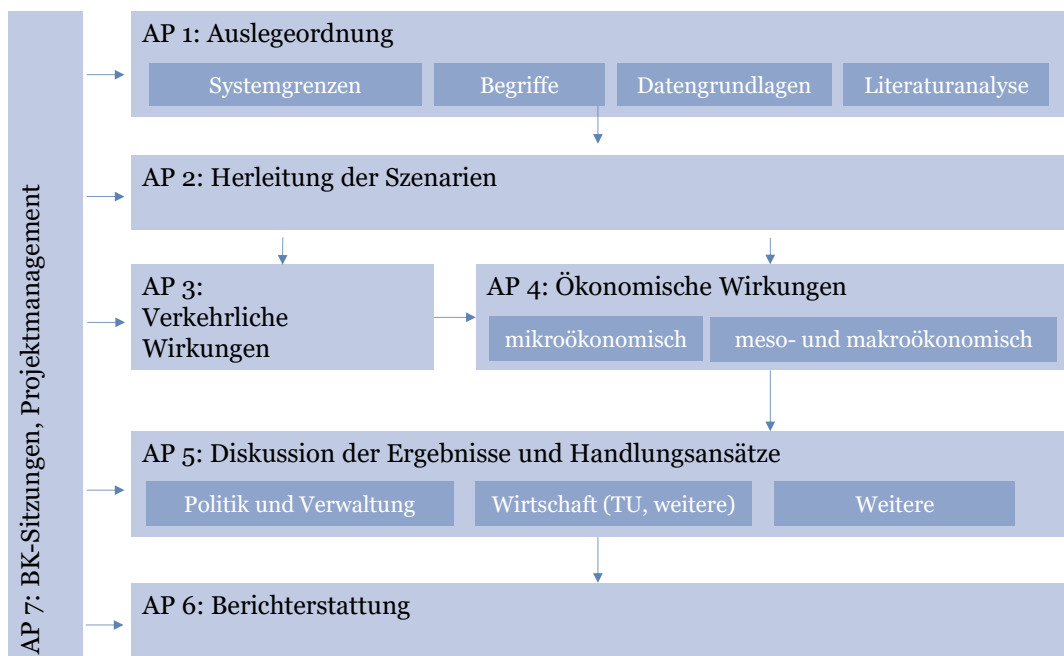


Abbildung 8: Arbeitsprogramm

Für die **Auslegeordnung** werden Systemgrenzen abgesteckt, Begriffe definiert und Datengrundlagen gesichtet. Neue Erkenntnisse aus der aktuellen nationalen und internationalen Literatur in Bezug auf die zentralen Stellschrauben (Mobilitätsrate etc.) werden analysiert. Besonderer Fokus liegt auf den Interdependenzen der Wirkungen von Digitalisierung und Dekarbonisierung. Hierfür bauen wir auf der Literaturlatenbank der Studie zur Digitalisierung in der Mobilität (ARE 2021) und zur Dekarbonisierung (Angst et al. 2022) auf.

Die Definition von **Szenarien** erlaubt es, Entwicklungen zu modellieren und die Wirkungen innerhalb der einzelnen Szenarien akzentuiert darzustellen. Aufbauend auf

den Erkenntnissen der Literaturanalyse werden drei Analyseszenarien hergeleitet, die dem Referenzszenario gegenübergestellt werden. Das Referenzszenario bildet ein Weiter-wie-bisher Szenario ab. Die Analyseszenarien sollen den Raum möglicher zukünftiger Entwicklungen aufzeigen und sind explorative Szenarien («Was wäre wenn»). Die Szenarien sind additiv aufgebaut, sodass jeweils ein neuer Trend hinzukommt und die entsprechenden verkehrlichen und ökonomischen aufgezeigt werden können. Sie sind als Eckszenarien zu verstehen, die die Extreme möglicher Entwicklungen ausleuchten. Es handelt sich nicht um Prognosen. Für die Herleitung der Analyseszenarien sind drei Entwicklungen bzw. Trends relevant, die in Abschnitt 2 näher erläutert wurden:

1. Dekarbonisierung bzw. Elektrifizierung der Fahrzeuge (technologische Entwicklung)
2. Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen (technologische Entwicklung)
3. Sharing bzw. Teilen von Fahrzeugen und Fahrten (Entwicklung des Verhaltens v.a. im Personenverkehr)

Für die Abschätzung der **verkehrlichen Wirkungen** basieren wir auf bestehende Ergebnisse zur Automatisierung und Digitalisierung (Jermann et al. 2020, ARE 2021) sowie den Verkehrsperspektiven 2050 des Bundes (ARE 2022a) und entwickeln diese auf Basis retrospektiver Entwicklungen der letzten Jahre weiter. Für das Referenzszenario sowie die drei Analyseszenarien werden für eine Auswahl relevanter Stellschrauben (v.a. Mobilitätsrate, Kosten, Elastizitäten, Auslastung/Besetzungsgrad und Geschwindigkeit) Annahmen über die Entwicklung bis 2050 basierend auf den Ergebnissen der Literaturanalyse getroffen. Damit kann abgeschätzt werden, wie sich Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung, Fahrleistung und Fahrzeugstunden in den Analyseszenarien gegenüber der Referenz entwickeln. In einem ersten Schritt wird der motorisierte Individualverkehr (MIV) im Rahmen der Wirkungsmodelle für den Personenverkehr als eine Angebotsform betrachtet. In einem weiteren Schritt wird dieses Segment in den privaten motorisierten Individualverkehr (individueller MIV) und öffentlichem Individualverkehr (ÖIV) unterschieden. Beim ÖIV handelt es sich um eine neue Angebotsform, die in Kapitel 2.3 näher erläutert wird.

Im Rahmen der **ökonomischen Analysen** werden zum einen die Wirkungen auf Kosten und Nutzen analysiert (mikroökonomische Ebene). Zum anderen die Wirkungen auf Wertschöpfung, Beschäftigung und Produktion der Gesamtwirtschaft sowie einzelner Branchen (meso- und makroökonomische Ebene).

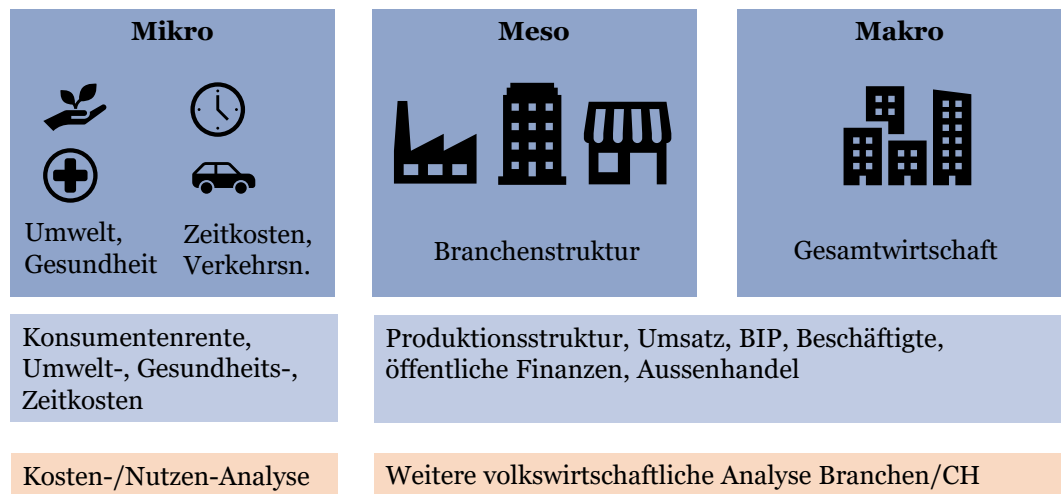


Abbildung 9: Ebenen der ökonomischen Analyse

Für die mikroökonomischen Wirkungen einer dekarbonisierten und digitalisierten Mobilität erstellen wir eine Kosten-Nutzen-Analyse für direkte und indirekte Effekte für die drei Analyseszenarien. Zur Monetarisierung greifen wir auf Annahmen zu Schlüsselvariablen sowie weitere Grundlagen zurück. Liegt zu einzelnen Stellschrauben bzw. Parametern keine Literatur vor, werden Annahmen getroffen. Wird keine Quelle genannt, handelt es sich um Annahmen der Autoren und Autorinnen auf Basis der Literaturanalyse.

Die meso- und makroökonomischen Auswirkungen analysieren wir mittels eines Input-Output-Modells. Dieses liegt aus Arbeiten zur wirtschaftlichen Bedeutung einer digitalisierten Mobilität vor (ARE 2021) und wird auf die hier vorgestellte Untersuchung angepasst und erweitert. Zu Beginn modellieren wir die Referenzentwicklung bis 2050, gegen diese wir dann die drei Analyseszenarien vergleichen. Der Ausgangspunkt dafür bildet eine energie- und verkehrsdifferenzierte Input-Output-Tabelle (EIOT), die die Wirtschaft der Schweiz im Jahr 2014 repräsentiert (Nathani et al. 2019).¹ Die EIOT wird anhand von Branchenprognosen für das Jahr 2050 hochgerechnet. Damit liegt die EIOT 2050 für das Referenzszenario vor. Das Input-Output-Modell folgt anschliessend einem vierstufigen Ansatz: i) Stilisierte Wirkungsanalyse; ii) Anpassungen der Produktionsstruktur; iii) Modellierungen der Nachfrageimpulse inklusive der Investitionsentscheidungen; und iv) Ausgleich des Haushaltsbudgets. Am Schluss stehen symmetrische und ausgeglichene Input-Output-Tabellen für jedes Szenario zur Verfügung und wir können durch den Vergleich mit der Referenz die Auswirkungen der Szenarien auf die Produktion, die Bruttowertschöpfung, die Beschäftigung der Branchen und die gesamte Wirtschaft bestimmen.

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der verkehrlichen und ökonomischen Modellierungen zusammengeführt und Handlungsansätze für Politik und Verwaltung, wie auch die Privatwirtschaft abgeleitet.

¹ Im Moment läuft ein Projekt zur energie- und verkehrsspezifischen Differenzierung der BFS IOT 2017. Die Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Arbeiten noch nicht in der finalen Form vor. Gewisse Elemente (z.B. zur Differenzierung der E-Mobilität) flossen jedoch bereits ein.

1.3 Systemgrenzen

1.3.1 Abgrenzung des Systems «Verkehr»

In dieser Studie steht fließender und ruhender Landverkehr auf Strasse und Schiene im Fokus. Der Gütertransport mit Binnenschiff und in Rohrfernleitungen wird nicht betrachtet. Unterschieden wird nach Personenverkehr (PV) und Güterverkehr (GV). Die Wirkungen werden getrennt erfasst und gegenseitige Wechselwirkungen qualitativ eingeordnet. Die Strukturelemente sind in Tabelle 2 dargestellt. Da unsere Modellierung teilweise auf den Ergebnissen aus den UVEK-Verkehrsmodellen fusst, sind hierbei einige Elemente vorgegeben, andere hingegen können nicht abgebildet werden.

Strukturelemente Verkehr

Struktur- element	Personenverkehr	Güterverkehr
Verkehrsträger	Strasse, Schiene	
Verkehrsmittel/ Transport- gefässe	- Strasse: - PW (inkl. Motorräder), Busse/Trolleybusse - Fuss- und Veloverkehr (inkl. FäG) - Schienengebunden: - Eisenbahnen, Zahnradbahnen, Tram (Unterscheidung ist für 2050 nicht relevant)	- Strasse: - Lieferwagen bzw. leichte Nutzfahrzeuge (LNF) < 3.5t zGG - Lastwagen und Sattelzüge (Lkw) bzw. schwere Nutzfahrzeuge (SNF) > 3.5t zGG - Schiene: - Wagenladungsverkehr (WLV) - Kombinierter Verkehr (KV), d.h. Unbegleiteter Kombiniertes Verkehr (UKV) und Begleiteter KV (RoLa²)
Verkehrsmittel- nutzung Strasse	- privat/individuell (MIV) - individuell/kollektiv gemischt (ÖIV) - kollektiv (ÖV)	<i>keine Unterscheidung zwischen Ganz- und Teilladungsverkehre</i>
Marktbereiche	- Privater Verkehr - Gewerblicher Verkehr (ÖV, ÖIV)	<i>keine Unterscheidung zwischen gewerblichen und Werkverkehr</i>

Tabelle 2: Strukturelemente Verkehr. FäG: Fahrzeugähnliche Geräte (Trottis etc.), PW: Personenwagen, RoLa: Rollende Landstrasse. (angelehnt an ARE 2021)

Im Güterverkehr und der Logistik ist die Abgrenzung im Hinblick auf Kombinierten Verkehr komplex. Folgen der Automatisierung von Umschlagvorgängen werden durch deren Wirkung auf die Stellschrauben im Verkehrsmodell berücksichtigt. Nicht untersucht werden die Kosten, die mit der Automatisierung von öffentlichen und privaten Umschlaganlagen verbunden sind.

Im Zuge der Dekarbonisierung durch Elektrifizierung wird die Kopplung von Verkehrs- und Energiesektor immer wieder thematisiert (Sektorkopplung). Wir fokussieren in dieser Studie auf den Verkehr. Wie der für die Elektrifizierung benötigte Strom bezogen werden kann und die Ladeinfrastruktur wird nur vereinzelt berücksichtigt, nämlich bei den makroökonomischen Wirkungen (Auswirkungen auf Konsum und Staatshaushalt). Bei den verkehrlichen Wirkungen ist die Ladeinfrastruktur genauso wie die Tankinfrastruktur nicht relevant.

² Die künftige Entwicklung der RoLa ist ungewiss, da sie per Ende 2025 eingestellt wird (RALpin AG, 2025). Im Bericht wird die RoLa weiterhin als Teil der Schiene berücksichtigt.

Im Strassenpersonenverkehr werden die Grenzen zwischen privatem und öffentlichem Verkehr zunehmend verschwimmen. Wir unterscheiden deswegen zusätzlich zwischen der individuellen (MIV) und kollektiven Nutzung (ÖIV) sowie zwischen kommerziellem (Personenbeförderung gegen Entgelt) und nicht kommerziellem (Nutzung zu privaten Zwecken) Verkehr.

1.3.2 Räumliche Grenzen und Betrachtungszeitraum

Die Analyse erfolgt für die Schweiz. Im Rahmen der verkehrlichen und ökonomischen Analysen gilt das Territorialitätsprinzip. Im Rahmen der Quantifizierung der Wirkungen erfolgen keine regionalen Differenzierungen. Diese werden nach Möglichkeit qualitativ im Rahmen der Literaturanalyse berücksichtigt. Im Rahmen der Literaturanalyse werden zudem nationale als auch internationale Publikationen berücksichtigt.

Die Analysen fokussieren auf einen langfristigen Zeithorizont. Nachfolgend wird hierfür das Jahr 2050 verwendet. Es werden keine Entwicklungen oder Transformationsprozesse auf dem Weg bis 2050 betrachtet. Zum einen wird auf Datengrundlagen zurückgegriffen, die den Zustand vor der Pandemie abbilden (bspw. NPVM 2017). Zum anderen wird auf «geglättete» Daten abgestützt (Verkehrsperspektiven 2050).

1.3.3 Weitere inhaltliche Abgrenzungen

Im Zentrum der Studie stehen die Wirkungen der Digitalisierung und Dekarbonisierung des Verkehrs auf die Volkswirtschaft. Nicht explizit untersucht werden Effekte auf andere Branchen oder die Effekte, die andere Branchen im Zuge des Wandels auf Mobilität und Verkehrsnachfragen haben könnten (z.B. durch Veränderungen in der Arbeitswelt durch Homeoffice, Einsatz von Robotern in der Logistik).

Da der Landverkehr auf Strasse und Schiene Untersuchungsgegenstand ist, wird unterirdischer Transport (CST) nicht berücksichtigt.

2 Begriffliche Abgrenzung

Für die Herleitung der Szenarien und Untersuchung der ökonomischen Wirkungen unterschiedlicher Entwicklungen sind die drei relevanten Entwicklungen und wichtige damit im Zusammenhang stehende Begriffe und Abgrenzungen zu definieren. Dies betrifft die Elektrifizierung sowie die zwei relevanten Trends der Digitalisierung: Automatisierung einschliesslich Vernetzung sowie Sharing.

Der Begriff Digitalisierung umfasst ein breites Spektrum an Themen und wird unterschiedlich definiert. Wolf und Strohschen (2018) beschreiben sie als den vollständigen oder teilweisen Ersatz analoger Dienstleistungen durch digitale, computerbasierte Modelle. Diese Transformation wird durch neue digitale Technologien wie Robotik, Sensorik und künstliche Intelligenz vorangetrieben. Besonders im Bereich der Mobilität wird die Digitalisierung als Gigatrend betrachtet (z.B. Wittmer und Linden 2017). Es wird angenommen, dass die Digitalisierung das Zusammenwachsen von Menschen und Technologie fördert, was indirekt zu veränderten Erwartungen, Einstellungen und Verhaltensweisen führt. Die Auswirkungen der Digitalisierung sind vielfältig und umfassen im Verkehrsbereich technologische Trends und Verhaltensänderungen: Automatisierung und Vernetzung sowie Sharing und Zusammenarbeit.

2.1 Dekarbonisierung durch Elektrifizierung

Fahrzeuge, die mit fossilen Brennstoffen angetrieben werden, verursachen einen Grossteil der Emissionen im Verkehr: Im Jahr 2023 wurden 13.62 Tonnen Treibhausgasemissionen verursacht (BAFU 2025). Das betrifft sowohl den Personen- als auch den Güterverkehr. Zur Erreichung der Klimaziele, insbesondere des Netto-Null-Ziels bis 2050, ist die Reduktion dieser Emissionen zwingend notwendig. Dekarbonisierung wird durch technologische Fortschritte und eine Verhaltensänderung ermöglicht, aber auch politische Rahmenbedingungen sind notwendig (Angst et al. 2021). Wir fokussieren auf den technologischen Trend der Dekarbonisierung durch Elektrifizierung. Hierzu zählen alle Steckerfahrzeuge, also Plug-In-Hybride (PHEV) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV).

Aus technologischer Sicht sind mehrere Alternativen bis zur Marktreife erprobt: Mit Wasserstoff- und Elektrofahrzeugen sind zwei Antriebstechnologien vorhanden, die zur Dekarbonisierung beitragen. Synthetische Kraftstoffe bieten die Möglichkeit, auch mit Verbrennungsmotor zu dekarbonisieren. Den stärksten Markthochlauf weisen bisher Elektrofahrzeuge auf: 2022 machen batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) einen Anteil von 2.4% am Bestand der Personenwagen aus; bei Plug-in-Hybriden sind es 1.4% und der Anteil der mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge ist sehr gering (INFRAS 2024). Gemäss Prognosen des HBEFA wird der Anteil BEV am Bestand der Personenwagen im Jahr 2050 bei 86% liegen. Aus diesem Grund fokussieren wir im Folgenden ausschliesslich auf die Elektrifizierung.

Im Betrieb erzeugen Elektrofahrzeuge keine Emissionen. Plug-In-Hybride erzeugen je nach Nutzung deutliche weniger Emissionen als Verbrenner, in der Praxis werden jedoch die hohen elektrischen Fahranteile aus den Prüfzyklen oft nicht erreicht, sodass mehr als 3,5-fach höhere CO₂-Emissionen resultieren (Europäische Kommission 2024). Wird der für den Elektromotor benötigte Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnen (Wasser, Wind, Solar, Biomasse), ist die CO₂-Bilanz neutral³. Herstellung und Recycling der Fahrzeuge und v.a. der Batterien erzeugen allerdings nach wie vor Emissionen. Dennoch sind die LCA-Emissionen von Elektrofahrzeugen geringer als die von Verbrennern (Luh 2023, Sacchi et al. 2022). Kosten für die Anschaffung sind aktuell noch höher als bei Verbrennerfahrzeugen, bei einem Hochlauf ist aber mit Skaleneffekten zu rechnen. Die knappe Verfügbarkeit der für die Batterien benötigten Metalle könnte eine Herausforderung darstellen. Dem wird mit technischer Weiterentwicklung der Batterien begegnet, neuen Batteriematerialien (z.B. LFP-Akkus ohne Kobalt oder Natrium-Ionen-Akkus), einem zirkulären Ansatz mit hohen Recyclingraten und der Verbesserung der Lieferketten der Metalle.

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur ist Voraussetzung für die Elektrifizierung (Luh 2023). Eine Kombination von privaten (zu Hause, bei der Arbeit) und öffentlichen (z.B. an Autobahnrastplätzen und -stätten, bei Einkaufszentren) Ladestationen ist Grundlage für ein leistungsfähiges Netz. Die Ansprüche der Nutzenden sind unterschiedlich und reichen vom Laden über Nacht, Laden während einer anderen Aktivität wie Einkaufen oder bei der Arbeit bis hin zu schnellem Laden bei Langstreckenfahrten. Das gilt sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr. Für den Güterverkehr werden allerdings leistungsfähigere Ladepunkte (Megawatt Charging Systems, MCS) auf Grund höherer Batteriekapazität benötigt.

Im Bereich des Personenverkehrs ist bis 2023 ein deutlicher Anstieg im Bestand von PHEV und BEV zu verzeichnen (INFRAS 2024). 2023 machen sie zusammen einen Anteil von 6% bei Fahrzeugen des Personenverkehrs aus (Personenwagen, Busse, Reisebusse, Motorräder). Während die Verkaufszahlen 2024 wieder leicht gesunken sind, ist langfristig klar von einer Steigerung auszugehen, auch weil die Preisparität von BEV und ICEV ca. 2026 erreicht sein wird. Der Schienenpersonenverkehr in der Schweiz ist bereits nahezu vollständig elektrifiziert. Zusätzlich kommen neue elektrifizierte Verkehrsmittel auf den Markt, wie beispielsweise E-Scooter und E-Bikes, die den städtischen Verkehr ergänzen und umweltfreundliche Alternativen zu herkömmlichen Fahrzeugen bieten.

Auch der Güterverkehr auf der Schiene ist nahezu vollständig elektrifiziert. Auf der Strasse gestaltet sich die Elektrifizierung im Güterverkehr schwieriger als im Personenverkehr. 2023 waren 2% des Fahrzeugbestands im Güterverkehr (LNF, SNF) in der Schweiz elektrisch (INFRAS 2024). Das liegt daran, dass die Anforderungen an den Güterverkehr insbesondere in Bezug auf die Reichweite hoch sind. Weitere Herausforderungen sind Gewicht und Platz. Je nach Fahrzeugtyp und Einsatzbereich variieren dieser Herausforderungen und sind teilweise mit Elektro-Lkw schwer zu bewältigen. Ein weiterer bedeutender Engpass ist die Ladeinfrastruktur für Elektro-Lkw. Während erste Schritte zum Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur unternommen werden,

³ Kernenergie wird ebenfalls als CO₂-arm deklariert und führte daher beim Einsatz in Elektromotoren zu einer besseren CO₂-Bilanz als bspw. der Einsatz von Energie aus Kohlekraftwerken.

entstehen eine Vielzahl privater Depotlademöglichkeiten. Eine Skalierung der Elektrifizierung im Strassengüterverkehr wird innerhalb der kommenden Jahre (bis 2030/2035) als wahrscheinlich betrachtet (Strategy& 2022, ITF 2022, Agora Verkehrswende 2022).

2.2 Automatisierung und Vernetzung

Automatisierung umfasst insbesondere die technologische Weiterentwicklung der Fahrzeuge selbst, was Grundlage für die Vernetzung beider Elemente ist. Definitionen unterscheiden sich in Abhängigkeit von dem angenommenen Automatisierungsgrad. Der Konzeptbericht des Bundes beschreibt «automatisiertes Fahren» als die teilweise oder vollständige Übernahme der Fahrzeugführung durch technische Systeme (Bundesrat 2016). Der Verband der Automobilindustrie (VDA 2015) definiert automatisiertes Fahren als «das selbständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr mit bordeigenen Sensoren, nachgeschalteter Software und im Fahrzeug gespeichertem Kartenmaterial für die Erfassung der Fahrzeugumgebung.» Das Departement Informationstechnologie und Elektrotechnik der ETH Zürich forscht in diesem Bereich u.a. an intelligenten Roboterautos und erkennt Vorteile u.a. durch geringeres Unfallrisiko, grössere Kapazität auf der Strasse (bspw. im Güterverkehr durch Platooning) und weniger Umweltbelastung durch energieeffizientes Fahren. Technische Voraussetzungen umfassen:

- Sensoren, welche es erlauben die Welt detailliert und exakt wahrzunehmen (360-Grad-Kamera)
- Kommunikation zwischen Fahrzeugen
- genaues Verständnis der räumlichen Grenzen des Fahrzeugs
- autonome Fahrzeuge müssen stets gleich und vorhersehbar fahren (ETHZ 2024).

Der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE 2016) definiert automatisiertes Fahren als den Einsatz von Informations-, Kommunikations- und Automatisierungstechnologien in Fahrzeugen zur Unterstützung der Fahraufgabe. Automatisiertes Fahren erstreckte sich von der Assistenz beim menschlichen Fahren (ADAS, advanced driver-assistance systems oder Fahrerassistenzsysteme) bis zur kompletten Übernahme aller Fahraufgaben durch ein technisches System (autonomes Fahren). Für eine genauere Einteilung dieser Bandbreite differenziert die Society of Automotive Engineers (SAE) sechs Automatisierungsstufen (Abbildung 10). Bei den Stufen 3 (bedingt automatisiert), Stufe 4 (hochautomatisiert) und 5 (vollautomatisiert) überwacht das System den Fahrbereich.

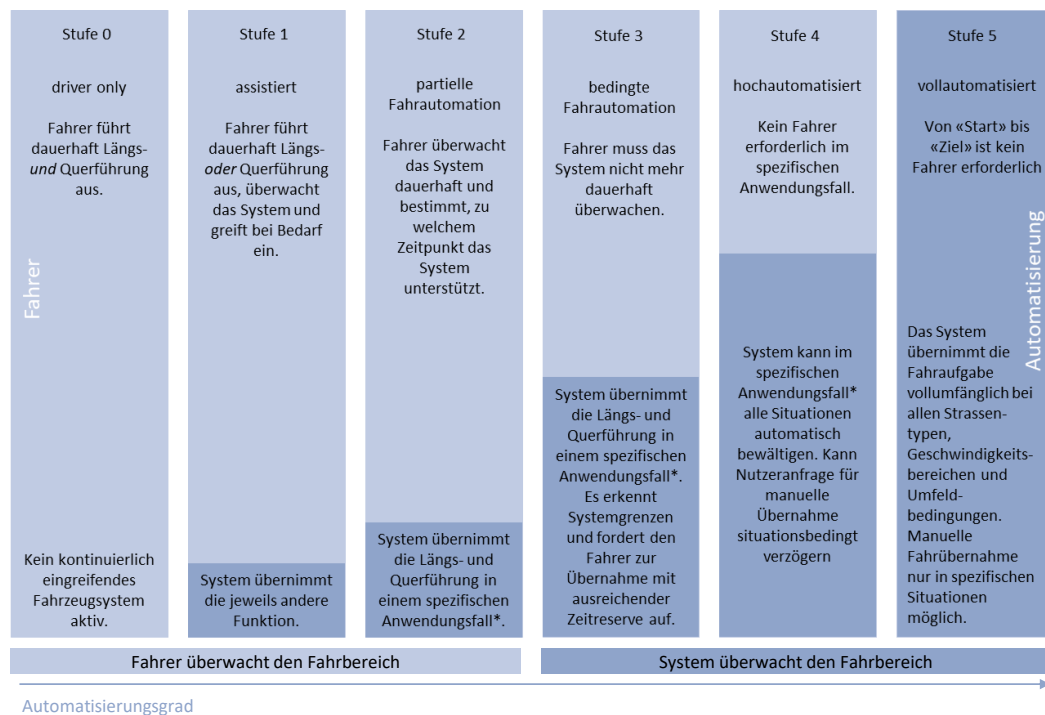


Abbildung 10: Automatisierungsstufen im Strassenverkehr nach SAE J3016 (angelehnt an ARE 2021 auf Basis von SAE J3016)

Der Begriff «Vehicle-to-X» (V2X) beschreibt die Vernetzung im Verkehr (VDA 2015). Fahrzeuge können in verschiedenen Richtungen kommunizieren («Vehicle-to-Everything», V2X), insbesondere von Fahrzeug zu Fahrzeug («Vehicle-to-Vehicle», V2V), von Fahrzeug zu Infrastruktur («Vehicle-to-Infrastructure», V2I) aber auch mit Fussgängern («Vehicle-to-Pedestrian», V2P). Im Zuge der Elektrifizierung ist auch Vehicle-to-Grid (V2G) relevant, also die Integration von Elektro- und Hybridfahrzeugen als mobile Speicher im Stromnetz.⁴ Unter V2X fällt zusätzlich noch die Kommunikation von Fahrzeugen zu Mobilitätsplattformen oder Fahrzeugherstellern (Bundesrat 2016).

Im Schienenverkehr ist das automatisierte Fahren in geschlossenen Betrieben bereits etabliert. Die Automatisierungsgrade orientieren sich hier ebenfalls an einem fünfstufigen System (Grade of Automation, GoA; smartrail 4.0 2019).

Eine aktuelle Entwicklung im Bereich der Digitalisierung ist die «Digitalisierte Automatische Kupplung (DAK)», mit welcher der Kupplungsprozess der Fahrzeuge und ihrer Bremsluftleitungen automatisch erfolgen kann. Mit dem Ersatz des bisher aufwendigen manuellen Prozesses hat DAK besonders im Einzelwagenladungsverkehr (EWLV) grosses Potenzial, den Schienengüterverkehr zu beschleunigen, vereinfachen und kostengünstiger zu machen (BAV 2022).

⁴ Bei Vehicle-to-Grid werden die Antriebsakkus Teil des öffentlichen Stromnetzes und können im Akku gespeicherten elektrischen Strom zurück ins Netz einspeisen. Die Speisung des Netzes aus Antriebsakkus wird auch bidirektionales Laden genannt. Zum einen dienen Akkus damit als Stromspeicher (Bezug und Speicherung von weniger teurer Energie in Schwachlastzeiten). Zum anderen können sie Lastspitzen ausgleichen, indem sie überschüssige Energie während ebensolcher Spitzen ins Netz zurückspeisen und damit zu einer stabileren Stromversorgung beitragen (Liu 2013).

2.3 Sharing und Zusammenarbeit

Der zweite zentrale Aspekt im Bereich der Digitalisierung ist das Entstehen neuer Angebotsformen, die das gesellschaftliche Verhalten in Bezug auf das Teilen («Sharing») von Verkehrsmitteln (Fahrzeugen) und Fahrten beeinflussen. Sharing bzw. die Sharing Economy fusst insbesondere auf der Verbreitung des Internets und mobiler Endgeräte in den letzten 15 Jahren (von Stokar et al. 2018). Diese sind Voraussetzung für digitale Plattformen.

Auf diesen Plattformen werden Mobilitätsdienstleistungen angeboten und konsumiert. Das bringt neue Geschäftsmodelle mit sich. In der Regel wird eine App erstellt und die verschiedenen Mobilitätsdienstleistungen können über das mobile Endgerät gebucht werden. Voraussetzung dafür ist der Zugang zu Daten für Plattformbetreibende und App-Entwickler. Innerhalb der Plattformstruktur fliessen die Informationen vom Mobilitätsanbieter über den Mobilitätsvermittler/die Plattform an den Endnutzer. Die Plattform stellt Informationen zur Verfügbarkeit und Routenplanung bereit. Sie bietet die Möglichkeit der Reservation, Buchung und Bezahlung und erfasst Mobilitätsdaten der Nutzenden.

Auf den Plattformen kommen Netzwerkeffekte zum Tragen: Sowohl für Anbieter/-innen als auch Konsument/-innen steigt der Nutzen, wenn die jeweils andere Gruppe grösser wird. Das heisst, dass der Nutzen eines Car-Sharing-Angebots, bei dem private Fahrzeuge geteilt werden, steigt, wenn mehr Privatpersonen ihre Fahrzeuge zur Verfügung stellen und andere diese Fahrzeuge nachfragen. Die Anbieter/-innen profitieren von der erhöhten Nachfrage nach ihren Fahrzeugen, während die Mietenden von einer grösseren Auswahl an verfügbaren Fahrzeugen profitieren. Gleichzeitig bieten Plattformen den Vorteil niedriger Transaktionskosten, einer grossen Marktreichweite und geringer Informationsasymmetrien (Engelhardt et al. 2017). Der Austausch von Daten und Dienstleistungen und die gemeinsame Nutzung von Ressourcen wird niederschwelliger. Neben dem Teilen von Ressourcen bieten Plattformen gleichzeitig die Möglichkeit, verschiedene Verkehrsmittel zu kombinieren sowie neue Dienstleistungen anzubieten. So können Personenwagen, Velos, Scooter, Zug und Bus kombiniert und effizienter genutzt werden. Bereits mehrere solcher Plattformen sind lanciert, darunter ZüriMobil (Stadt Zürich, im Juli 2023 planmässig beendet) und WienMobil (Wien). Dass die räumlich übergreifende Erstellung einer Plattform sehr komplex und teuer sein kann, zeigt das Vorhaben der Städte Basel, Bern und Zürich, die im Mai 2024 das Projekt einer gemeinsamen Mobilitätsplattform aufgrund zu hoher Kosten verworfen haben (BaZ 2024). Auch die Mobilitätsapp Whim existiert seit 2004 nicht mehr (CCAM-TAC 2024).

Im Personenverkehr werden beim Sharing einerseits Fahrzeuge geteilt (MIV), andererseits Fahrten in einem Fahrzeug geteilt (Pooling). Hierbei unterscheiden wir den sogenannten klassischen ÖV mit Konzessionen des Bundes (in Gefässen mit mehr als 9 Personen) und den öffentlichen Individualverkehr (ÖIV). Letzteres ist die bedarfsgerechte Bündelung von Fahrten, wobei darunter das Ride-Pooling aber auch Ride-Sharing verstanden wird (Abbildung 11).

	ÖV	Öffentlicher Individualverkehr (ÖIV)		Privater MIV	
	Teilen von Fahrten			Teilen von Fahrzeugen	
	ÖV	ÖIV: bedarfsgerechte Bündelung von Fahrten (Mobility on demand)		Fahrten nach Bedarf	
	Klassischer ÖV	Ride-Pooling	Ride-Sharing/Car-Pooling	Car-/Bike-/Scooter-Sharing	Ride-Hailing, -Selling
Beschreibung	Teilen einer Fahrt eines Fahrzeugs, das regelmässig und auf vorab definierten Linien verkehrt (Betriebs-, Transport-, Fahrplan-, Tarifpflicht)	Teilen einer Fahrt eines Fahrzeugs und bedarfsorientierte Bündelung versch. Fahrtwünsche von Personen, die Umwege/längere Fahrzeiten in Kauf nehmen	Teilen eines Fahrzeugs und einer Fahrt, die ohnehin stattfinden würde, von Personen mit gleichen Fahrtwünschen	Teilen eines Fahrzeugs (sequenziell) (Personenwagen/Vans, Velo, Scooter etc.)	Teilen eines Fahrzeuges, exklusive Fahrt nach Wunsch (on-demand-Verkehr)
Anbieter/Fahrzeug	Fahrzeuge und Lenker kommerzieller Anbieter, im abgeltungsberechtigten ÖV keine Gewinnorientierung (B2P)	i.d.R. Fahrzeuge und Lenker kommerzieller Anbieter, mit/ohne Gewinnorientierung, Beitrag an die Gesamtkosten (B2P)	i.d.R. auf privater Basis (private PW und Lenker), keine Gewinnorientierung / Beitrag an die Betriebskosten (P2P)	kommerz. Basis, gewinnorientiert (B2P)	auf privater Basis (P2P)
Plattform	keine notwendig, Fahrpläne, Linien und Haltestellen vorab definiert	Vermittlungsplattform einschliesslich eines Algorithmus (Pooling)	Real-Time Ride-Sharing (spontan) oder geplant via Vermittlungsplattform	Vermittlungsplattform (App, Webseite)	Vermittlungsplattform (App)
Beispiele CH / Ausland	Konzessionierte Transportunternehmen (KTU): SBB AG, BLS, Post Auto AG (PAG), VBZ, etc.	TU / Verbünde, Vereine: mybuxi, PAG Kolibri, BusAlpin, sowiduu, BerIKönig	neue Mobilitätsanbieter: CleverShuttle, Moia, UberPool, Lyft Line	taxi, HitchHike, Ride2Go, BlaBlaCar, Idosh, Mitfahrgelegenheit	Mobility, Share Now, Publibike, Lime, Bird, Circ, Tier, DriveNow
				Turo, drivy	Free Now, UberX, UberBlack, Lyft

←

kollektiv

individuell

Abbildung 11: Typisierung von Sharing-Angeboten im Personenverkehr (angelehnt an ARE 2021, angepasst)

Im Güterverkehr werden Ressourcen wie Lagerhäuser, Fahrzeuge und Anlagen zunehmend gemeinsam genutzt. Über digitale Plattformen werden Daten geteilt. Genauso wie im Personenverkehr ist auch hier die Kombination verschiedener Verkehrsmittel und -träger (Strasse, Schiene, Wasser, Luft) einfacher, sodass intermodaler Verkehr zunimmt.

3 Literatur

3.1 Vorgehen Literaturreview

Die Analyse der internationalen und nationalen Literatur verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele: In erster Linie werden die Ergebnisse der Literaturanalyse des ARE-Berichts „Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Digitalisierung in der Mobilität“ aus dem Jahr 2021 (ARE 2021) aktualisiert und um Quellen aus den Jahren 2021 bis 2024 ergänzt. Dabei wird insbesondere herausgearbeitet, ob sich neue Trends bezüglich der Wirkungen der Digitalisierung abzeichnen und welche Erkenntnisse bezüglich der Interdependenzen zwischen der Digitalisierung und Elektrifizierung erkennbar sind. Dabei werden die Themenblöcke Automatisierung, Sharing und neue Mobilitätsangebote sowie Elektrifizierung adressiert. Zudem dienen die Ergebnisse der Literaturanalyse als Grundlage für die Entwicklung und Plausibilisierung der Szenarien.

Die Durchführung der Literaturrecherche folgt einem mehrstufigen Vorgehen. Eine erste Recherche erfolgte auf Google Scholar und Web of Science unter Verwendung folgender Stichworte:

- digital trans* AND decarbon*
- digitali*
- emission reduc*; efficien* AND autono*
- shared mobility
- passenger transport
- freight transport
- transport system
- public transport
- rail
- road

Im zweiten Schritt wurde die Suche um weitere Publikationen ergänzt, die in der anfänglichen Recherche nicht aufgeführt waren, aber im Rahmen des Desk Research gefunden wurden.

Alle Ergebnisse der Literatursuche wurden in eine Zotero-Datenbank übertragen und verschlagwortet. Die Verschlagwortung orientiert sich an der bestehenden Systematisierung der ARE-Studie 2021 und erweitert diese um eine ausdifferenzierte Betrachtung der Verkehrsmodi und einer expliziten Aufnahme der grundlegenden Themen Elektrifizierung, Automatisierung und Sharing. Die Verschlagwortung ist in Tabelle 3 dargestellt. Dabei dienen die Kategorien der Orientierung und stellen selbst keine Schlagworte dar.

Verschlagwortung in Zotero

Kategorie	Schlagworte	Detaillierte Schlagworte
Effekte erster Ordnung	Monetäre Kosten	Fixkosten Besitz
		Variable Kosten
		Personalkosten
	Reisezeitaspekte	Reisezeit
		Zu- und Abgangszeiten inkl. Parken
		Wartezeiten
		Reisezeitbewertung (VoT)
		Zuverlässigkeit
	Fahrkomfort	
	Verkehrsverhalten	Moduswahl
		Reiseweite
		Umwege
		Leerfahrten
		Wegeaufkommen
	Zugang zu Mobilität	Nutzergruppen
		Geschäftsgebiete
	Strassenkapazität und Verkehrsfluss	Autobahn
		Kreuzungen
		urbaner Kontext
Effekte zweiter Ordnung	Fahrzeugflotte	PW-Besitz
		Flottendurchdringung Automatisierung
		Antriebsarten
		Fahrzeuggrösse
	Raumimplikationen	Wohnstandortwahl
		Parkraum
		Halte- und Lieferbuchten
		Verkehrsinfrastruktur generell
		Standortwahl
		Logistikstandorte
Effekte dritter Ordnung	Energieverbrauch	
	Emissionen	Klimagase
		Lokale Schadstoffe
	Ökonomie	Marktsituation
		Neue Märkte
		Beschäftigungseffekte

Kategorie	Schlagworte	Detaillierte Schlagworte
Themen	Verkehrssicherheit	
	Gesundheit	
	Soziale Teilhabe	
	Automatisierung	
	Sharing	
Verkehrsmodus	Elektrifizierung	
	PV MIV	
	PV ÖIV	
	PV ÖV	
	GV	
Generelle Keywords	Metastudie	
	Szenario-Studie	
	Unsicherheit	

Tabelle 3: Verschlagwortung in Zotero (eigene Darstellung in Anlehnung an ARE 2021)

3.2 Direkte verkehrliche Wirkungen

3.2.1 Personenverkehr

3.2.1.1 Elektrifizierung Personenverkehr

Der Aufbau einer ausreichenden Ladeinfrastruktur ist für die Dekarbonisierung des Verkehrs eine wichtige Voraussetzung. Schröder et al. (2023) zeigen, dass durch eine gleichmässige Erhöhung des Anteils elektrifizierter PW, Busse, Carsharing-Fahrzeuge und Mopeds in München ein Elektrifizierungsgrad von 72.2% erreicht werden muss, um 80% emissionsfreien Transport zu erzielen. Dies führt zu einer Reduktion der Klimakosten und der Luftverschmutzung sowie zu einer Verringerung der gesamten externen Kosten um 8%. Diese Studien unterstreichen die Machbarkeit und die positiven Umweltauswirkungen der Elektrifizierung im Personenverkehr. Die Kombination aus ausreichender Ladeinfrastruktur, Smart Charging und einem hohen Elektrifizierungsgrad kann signifikante Einsparungen bei Kosten und Emissionen ermöglichen, wodurch eine nachhaltigere und umweltfreundlichere Mobilität erreicht wird.

Für die Schweiz existieren neben den Energieperspektiven 2050 (EP2050+) aktuellere Elektromobilitätsszenarien (INFRAS 2024) für die Entwicklung bis 2050 unter Berücksichtigung der Verkehrsperspektiven 2050 (Basisszenario). Gemäss Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) von INFRAS (2024) sind im Jahr 2023 Personenfahrzeuge (PW, Busse, Reisebusse, Motorräder) zu 94% Verbrennerfahrzeuge (Diesel, Benzin, CNG, LPG, Ethanol, etc.), 6% sind batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und 1% Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV). Der Motorisierungsgrad bei Personenwagen liegt 2023 bei 0.54, die Fahrleistung bei 59.6 Mrd. Fzkm. Bis 2050 zeigen die Prognosen des HBEFA einen starken Anstieg von Steckerfahrzeugen. 2050 wird der Anteil bei 88% liegen (5.1 Mio. Fzg.), wovon fast alle Fahrzeuge BEV sind. Verbrennerfahrzeuge machen mit 400'000 Fzg. nur noch einen geringen Anteil von 7% aus. Bei den

Personenwagen sinkt der Motorisierungsgrad leicht auf 0.49. Gleiches gilt für die Fahrleistung mit 59.6 Mrd. Fzkm im Jahr 2050.

BFE (2023a) unterstreicht, dass Steckerfahrzeuge in der Schweiz stark zunehmen werden und BEV 2050 bei PW dominieren werden. Hierfür sei ein Mix an Ladeoptionen nötig, also sowohl öffentliche als auch private Ladeinfrastruktur. Dass strategische Ladeinfrastruktur von grosser Bedeutung für die Dekarbonisierung des MIV ist, zeigt auch die Publikation von Luh (2023): Bei schlechter Erreichbarkeit von Nachtlademöglichkeiten würden 39% weniger BEV eingesetzt werden.

Das PSI (2020) vergleicht in einer Studie zur «Mobilität von Morgen» die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus (LCA) anhand von Mittelklasseautos. BEV verursachen die geringsten THG-Emissionen (122.2 g CO₂-Äq/km in 2018), Diesel- und Benzin-Fahrzeuge jeweils deutlich mehr (233.8 bzw. 293.7 g CO₂-Äq/km in 2018). Die Herstellung der Fahrzeuge und der Infrastruktur (Strasse) verursacht zwar höhere Emissionen als bei Verbrennerfahrzeugen. Allerdings sind die Emissionen im Betrieb bei Elektrofahrzeugen niedriger als bei Diesel- und Benzinfahrzeugen. Weitere LCA-Daten können den LCA-Datenbanken mobitool 3.0/Umweltrechner Verkehr⁵ und Ecoinvent⁶ entnommen werden.

Angst et al. (2021) zeigen anhand einer Analyse mit drei Eck-Szenarien auf, dass die Dekarbonisierung des Personenverkehrs in der Schweiz mit positiven wirtschaftlichen Effekten verbunden ist. Während die CO₂-Emissionen im Personenverkehr im Jahr 2050 von 6 auf 1.7 Mio. Tonnen sinken (im Vergleich zum Referenzszenario), steigt die Wohlfahrt hauptsächlich aufgrund zunehmender Freizeit.

Ecoplan (2024) untersucht die Kosten und Finanzierung des Verkehrs 2021. Die Studie zeigt, dass elektrischen Fahrzeugen im Personenverkehr 2021 insgesamt ein niedriger Kostenanteil zugeschrieben wird. Bei den Personenwagen sind es 0.03% der Verkehrsmittelkosten, bei Motorrädern 0.02%. Die Verkehrsmittelkosten pro Fzkm sind bei elektrischen Personenwagen höher als beim Total des Bestands, der zum Grossteil aus Verbrennerfahrzeugen besteht. Bei elektrischen Personenwagen betragen die Kosten 0.90 CHF/Fzkm im Vergleich zu 0.54 CHF/Fzkm beim Total (+66%). Bei Motorrädern sind die Verkehrsmittelkosten bei elektrischem Antrieb niedriger also beim Total und belaufen sich auf 0.42 CHF/Fzkm (0.49 CHF/Fzkm beim Total).

Neben diesen positiven Effekten der Elektrifizierung auf die CO₂-Emissionen kann es aufgrund von Rebound-Effekten zu gegenläufigen Effekten kommen. Direkte Rebound-Effekte sind vorhanden, wenn mit sparsameren/klimafreundlicheren Fahrzeugen mehr gefahren wird oder infolge der Elektrifizierung leistungsstärkere Motoren⁷ nachgefragt werden (Raimund 2023). Von einem indirekten Rebound-Effekt wird gesprochen, wenn durch die Einsparungen, die durch Elektrifizierung beim PW gemacht wurden, beispielsweise mit vermehrten Flugreisen kompensiert werden. Seebaumer et al. (2018) geben für den Personenverkehr eine Bandbreite von 5–45% bei direktem Rebound an. Beim indirekten Rebound sind es 20–40%. Diese Angaben

⁵ <https://www.energieschweiz.ch/programme/umweltrechner-verkehr/>

⁶ <https://ecoinvent.org/>

⁷ Bei E-Motoren ist zwischen der Maximalleistung und der 30-Minuten-Dauerleistung zu unterscheiden.

gelten allgemein für Rebound-Effekte im Personenverkehr und sind damit auf die Elektrifizierung übertragbar. Aktuelle Entwicklungen deuten bereits auf einen Rebound hin: Ein Bericht der Global Fuel Economy Initiative (GFEI 2023) zeigt, dass die Verkaufszahlen für BEV und PHEV global steigen, gleichzeitig aber der Anteil der SUV auf 50% gestiegen ist.

In einer Kostenanalyse elektrischer Fahrzeuge für Deutschland untersuchen König et al. (2021) die Entwicklung der Kosten für die Herstellung des Fahrzeugs, die TCO, die Ladeinfrastruktur und die Energiekosten. Heute werden viele potenzielle Endnutzer von den hohen Anschaffungskosten für batterieelektrische Fahrzeuge (im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen) vom Kauf abgehalten. Bis 2030 prognostizieren die Autoren, dass insbesondere die Preise für Batterien fallen werden, was zu nahezu gleichen Produktionskosten der Fahrzeuge führt. Die Berechnung der TCO basieren auf Annahmen zur Entwicklung von Energiekosten, Herstellungskosten und Inflation am Beispiel eines kleinen SUV, der jährlich 15'000 km über eine fünfjährige Besitzdauer zurücklegt. TCO für BEV und ICEV erreichen 2026 Preisparität. Langfristig (nach 2026) erweisen sich BEV als günstiger.

Für die Schweiz vergleicht eine Studie im Auftrag des BFE (2023b) alle anfallenden Kosten bei PW über die gesamte Besitzdauer für verschiedene Antriebsarten. Elektroautos überzeugen gegenüber dem Verbrenner- und Plug-in Hybrid Antrieb in allen Fahrzeugkategorien (Kleinwagen, Mittelklasse, Oberklasse, SUV) mit den geringsten Kosten.

Zu Auswirkungen der Elektrifizierung im Personenverkehr auf den VoT liegen gemäss unseren Recherchen keine Studien vor. Wir gehen davon aus, dass zwar die Automatisierung einen spürbaren Effekt hat, die Elektrifizierung jedoch nicht.

3.2.1.2 Automatisierung Personenverkehr

Die Nutzung automatisierter Fahrzeuge wird als eine aus der zunehmenden Digitalisierung aller Lebensbereiche resultierenden Technologie angesehen, die zu tiefgreifenden Änderungen der Mobilität führen könnte. Diese Auswirkungen werden umso stärker sein, je höher der Grad der Automatisierung ist. Besonders starke Auswirkungen sowohl auf das individuelle Verkehrsverhalten als auch auf den Gesamtverkehr werden erwartet, sobald substanzielle Durchdringungsrate für Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktionen der Level 4 und 5 gemäss der Nomenklatur der amerikanischen Vereinigung von Automobilingenieuren (SAE) erreicht sind und eine Nutzung der entsprechenden Funktionen nicht nur auf dezidierten Strecken bei Überlandfahrten, sondern auch im städtischen Verkehr erfolgen kann.

Es ist darauf hinzuweisen, dass im Zuge der Einführung automatisierter Fahrzeuge insbesondere im Strassenverkehr über einen längeren Zeitraum ein Mischverkehr mit steigenden Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge vorherrschen wird, welcher mit besonderen Herausforderungen einhergeht. Die Berücksichtigung dieser spezifischen Probleme ist aber nicht Bestandteil der diesem Bericht zugrundeliegenden Szenarien, weshalb in der Literaturanalyse die mit der Einführung von automatisierten Fahrzeugen einhergehenden Wirkungen nicht betrachtet werden.

Reisezeitbewertung (Value of Time, VoT)

Das automatisierte Fahren ermöglicht für die bisherigen Fahrer konventioneller Fahrzeuge die Reisezeit anders und gegebenenfalls produktiver zu nutzen. Dies wird als ein zentraler Vorteil der Nutzung automatisierter Fahrzeuge im MIV angesehen. Allerdings bestehen sowohl hinsichtlich der Richtung als auch der Grössenordnung der Änderung der Bewertung von Reisezeiten grosse Unsicherheiten. Die Literaturrecherche in ARE (2021) zeigt, dass die Bewertung der Reisezeit im MIV signifikant reduziert werden kann. In Tabelle 4 werden die nach Fahrtzwecken differenzierten Annahmen für die Änderungen der Reisezeitbewertung für das Automatisierungsszenario gegenüber der Referenz dargestellt, welche in ARE (2021) zugrunde gelegt wurden. Es zeigt sich, dass für mit der Arbeit oder der Ausbildung verbundene Wege die Reisezeitbewertung sich um ca. 40% reduziert, während sich bei Freizeit- und Einkaufswegen keine signifikanten Änderungen der Reisezeitbewertung ergeben.

Veränderung des VoT im MIV mit Automatisierung ggü. der Referenz

Fahrtzweck	Veränderung des VoT ggü. Referenz
Arbeit	-40%
Ausbildung	-40%
Einkauf	0%
Freizeit	0%
geschäftliche Tätigkeit & Dienstfahrt	-30%
Service- & Begleitung	-30%
Sonstiges	0%
Total (aufkommensgewichtet)	-14%

Tabelle 4: Veränderung des VoT im MIV mit Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021, angelehnt an Kolarova et al. 2019, Kolarova et al. 2020, Correia et al. 2019)

Neben den Fahrtzwecken stellen auch die zurückzulegende Fahrtstrecke und das Haushaltseinkommen relevante Einflussgrössen sowohl im Hinblick auf die absolute Höhe der Reisezeitbewertung als auch der Änderung aufgrund der Nutzung automatisierter Fahrzeuge dar. Zudem kann auch in Abhängigkeit vom Fahrtzweck die Ausstattung der automatisierten Fahrzeuge sowie die Frage, ob man allein oder mit Begleitpersonen unterwegs ist, einen Einfluss auf die Reisezeitbewertung haben. Über diese bereits in ARE (2021) diskutierten Aspekte hinaus, setzen sich neuere Studien insbesondere mit dem Vertrauen der Nutzer in die neue Technologie als weitere die Reisezeitbewertung beeinflussende Faktoren auseinander. Insgesamt kann mangelndes Vertrauen in die Technik dazu führen, dass die Reisezeitbewertung ansteigt, da die Passagiere während der Fahrt Stress empfinden (Nunez und Tirachini 2023; Kolarova und Cherchi 2021).

Ein gewisser Trend in neueren Studien zur Änderung der Reisezeitbewertung bei Nutzung automatisierter Fahrzeuge ist, dass zunehmend auch ein Anstieg der Bewertung von Reisezeiten für plausibel gehalten und untersucht wird. Zudem wird analysiert welche Faktoren zu einem Anstieg oder einer unveränderten Bewertung von

Reisezeiten beitragen können. So weisen Nunez und Tirachini (2023) darauf hin, dass die Automatisierung von Fahrzeugen sowohl zu einer Abnahme als auch zu einer Zunahme der Bewertung von Reisezeiten führen kann. Es wird ausgeführt, dass sich durch die Nutzung automatisierter Fahrzeuge die Bewertung der Reisezeit nicht notwendigerweise verändern muss oder sogar steigen kann, falls sich Personen unwohl bei der Nutzung der neuen Technologie fühlen und sich nicht anderen Tätigkeiten zuwenden. In Rashidi et al. (2021) werden ausgehend von empirischen Hinweisen, dass die Bewertung der Reisezeit durch die Nutzung automatisierter Fahrzeuge auch steigen kann, theoretische Erklärungen für diese Beobachtungen identifiziert und evaluiert.

Huda et al. (2023) haben auf Grundlage einer Metaanalyse von mehr als 24 Studien herausgearbeitet, dass die Nutzung privater automatisierter Fahrzeuge gegenüber der Nutzung konventioneller Fahrzeuge wege zweckunabhängig mit einer Reduktion der Bewertungen der Reisezeit von 12.7% einhergeht. Da es sich um eine australische Studie handelt, wurden die durchschnittlichen VoT in AU\$/h angegeben. Dabei haben sie einen durchschnittlichen VoT von 17.3 AU\$/h für konventionelle Fahrzeuge, von 12.1 AU\$/h für privat genutzte automatisierte Fahrzeuge und von 19.4 AU\$ für die Nutzung von Sharing-Diensten mit automatisierten Fahrzeugen ermittelt. Kato et al. (2024) haben für Freizeitfahrten im Ballungsraum Tokio auf Grundlage von Stated-Preference-Befragungen eine Reduktion der Bewertung der Reisezeit von 7.3% für die Nutzung automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ermittelt. Dabei wurden für die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen ein VoT von 19.5 JPY/min und für Nutzer konventioneller Fahrzeuge von 21.1 JPY/min abgeschätzt.

Insgesamt liegen die in neueren Studien ermittelten Änderungen der Reisezeiten in der in ARE (2021) ermittelten Bandbreite. So wird in Harb et al. (2021) eine Spannweite für die Reduktion der Bewertung der Reisezeit zwischen 5% und 90% angegeben. Es scheint aber einen Trend zu geben, dass eher von nicht allzu hohen Reduktionen oder sogar einem Anstieg der Reisezeiten durch die Nutzung automatisierter Fahrzeuge ausgegangen wird (vgl. Kroesen et al. 2023, Rashidi et al. 2021). Insofern sollten in den Szenarien eher Werte am unteren Ende der in ARE (2021) und dieser Studie ermittelten Bandbreite der Änderung von Reisezeitbewertung angenommen werden. Zu der Frage, inwieweit arbeitsbezogene Fahrten und Freizeitfahrten mit unterschiedlichen Änderungen der Reisezeitbewertung einhergehen, konnten keine neueren Erkenntnisse identifiziert werden. Die Abschätzung der Änderung der Bewertung von Reisezeiten ist jedoch weiterhin mit grossen Unsicherheiten behaftet und hängt von einer Vielzahl von Einflussgrössen ab, deren Effekt nicht einfach zu bestimmen ist.

Nationale Literatur zur Änderung der Reisezeitbewertung durch Automatisierung liegt unseres Wissens nicht vor. Jedoch gibt die Literatur Auskunft darüber, auf welchem Niveau der VoT in der Schweiz unter Berücksichtigung verschiedener Parameter ist. Die Analyse einer Stated-Preference-Befragung aus dem Jahr 2021 vom ARE (2024) gibt detaillierte Informationen zu aggregierten durchschnittlichen Zeitwerten: Für den MIV liegt der VoT bei 14 CHF pro Stunde, im ÖV bei 16 CHF pro Stunde, für das Velo oder E-Bike bei 34 CHF pro Stunde und für Fussgänger bei 19 CHF pro Stunde. Diese Werte wurden unter Berücksichtigung der Personengewichte der Mobilitäts- und Verkehrserhebung (MZMV 2021, BFS und ARE 2023) und auf dem Preisniveau von 2021

berechnet. Im Vergleich zu 2015 ist der VoT beim ÖV gestiegen, was möglicherweise eine Folge der Covid-19-Pandemie ist. Econcept (2024) untersucht in einer quantitativen Befragung, wie Reisende in der Schweiz ihre Reisezeit nutzen. Unabhängig vom Verkehrsmittel ist «Entspannen» die häufigste Tätigkeit gefolgt von digitalen Tätigkeiten (ausser bei Autofahrer/-innen).

Als Referenz für die Zeitkostensätze basieren wir auf der aktuellen VSS Norm 41 822a (Zeitkosten im Personenverkehr, Tabelle 5).

Zeitkosten im Personenverkehr (CHF/h, Preisstand 2007)						
Verkehrsmittel		Alle Zwecke	Pendler-fahrt	Einkaufs-fahrt	Nutzfahrt	Freizeit-fahrt
Öffentlicher (ÖV)	Verkehr	14.43	16.08	12.32	35.73	12.01
Motorisierter Individualverkehr (MIV)	Individu-	23.29	31.45	20.72	32.24	22.05

Tabelle 5: Zeitkostensätze im Personenverkehr

Neue Nutzergruppen (Mobilitätsrate) und Verkehrsaufkommen

Allgemein können sowohl der Wechsel von Nutzenden von anderen Verkehrsmitteln auf Fahrten mit automatisierten Fahrzeugen als auch die Durchführung zusätzlicher Fahrten zu einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr führen. Darüber hinaus kann das Verkehrsaufkommen aufgrund der Erschliessung neuer Nutzergruppen wie älteren und allgemein mobilitätseingeschränkten Personen sowie jüngeren Personen ohne Führerausweis ansteigen. Die in ARE (2021) für das Automatisierungsszenario angenommenen nach Altersklassen differenzierten Veränderungen der Mobilitätsrate gegenüber der in ARE (2021) zugrunde gelegten Referenz, sind in Tabelle 6 dargestellt. Dabei wurde angenommen, dass die Mobilitätsrate zum einen für jüngere Personen ohne Führerausweis und zum anderen für älteren Personen ansteigt.

Veränderung der Mobilitätsrate aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz

Altersklasse	Veränderung der Mobilitätsrate ggü. Referenz
≤ 17	+3.0%
18–24	Keine Veränderung angenommen
25–44	Keine Veränderung angenommen
45–64	Keine Veränderung angenommen
65–74	+5.0%
≥ 75	+18.5%
≥ 65	+10.0%

Tabelle 6: Veränderung der Mobilitätsrate aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021 angelehnt an Truong et al. 2017)

Über diese bereits in ARE (2021) betrachteten neuen Nutzergruppen, weisen Bieser und Kriukelyte (2021) darauf hin, dass ausgehend von den Einsparungen der

Personalkosten bei automatisierten Ride-Hailing-Angeboten auch Nutzende mit geringeren Einkommen eher die Möglichkeit erhalten, diese Angebote zu nutzen. Zudem können durch ein attraktiveres und auf die individuellen Ansprüche zugeschnittenes automatisiertes Verkehrsangebot auch Nutzergruppen angesprochen werden, die vorher andere Verkehrsmittel genutzt haben, oder Fahrten in Anspruch nehmen, die sie vorher aufgrund von zu hohen Kosten oder zu langen Reisezeiten nicht angetreten hätten.

Allerdings gibt es Unterschiede bezüglich der Affinität zur Nutzung automatisierter Fahrzeuge zwischen den Nutzergruppen. Canitez (2021) weist darauf hin, dass zu erwarten ist, dass jüngere, der Generation Y angehörende Personen, sich vergleichsweise einfach an die Nutzung automatisierter Fahrzeuge gewöhnen können, während dies älteren Menschen schwerer fallen dürfte. In eine ähnliche Richtung argumentieren Winter et al. (2021). Sie stellen fest, dass allgemein Nutzende öffentlicher Verkehrsmittel weniger affin zu automatisierten Sharing-Diensten auf Abruf sind. Diese sind tendenziell älter und eher kosten- als zeitbewusst. Dem gegenüber zeigen jüngere Pendler die grösste Affinität für Free-Floating-Carsharing-Dienste (FFCS) und gemeinsam genutzte automatisierte Fahrzeuge (SAV).

In von Schmidt et al. (2022) werden mithilfe mikroskopischer Modellierungsmethoden die Auswirkungen der Nutzung automatisierter Fahrzeuge für das Testfeld Niedersachsen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Einführung von automatisierten Fahrzeugen zu einer signifikanten Verschiebung des Verkehrsmittelanteils hin zu einer stärkeren Nutzung des PW um bis zu 5% sowie einen Anstieg der täglich mit dem PW zurückgelegten Kilometer um etwa 21% führen kann. Dies wird unter anderem auf die Erschliessung neuer Nutzergruppen innerhalb der Szenarien mit selbstfahrenden PW zurückgeführt.

In einer Studie von Sonnleitner et al. (2023) werden die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge (AV) auf die Verkehrsnachfrage mittels makroskopischer Modellierungsmethoden untersucht. Eine zentrale Erkenntnis ist, dass die Einführung automatisierter Fahrzeuge zu einem Anstieg der Fahrleistung (in Fzkm) um bis zu 9% auf Autobahnen und 18% auf allen Hauptstrassen führen kann, wenn 80% der Fahrzeuge automatisiert sind. Die Studie zeigt, dass hochautomatisierte Fahrzeuge die Attraktivität des PW erhöhen und somit eine Verlagerung vom öffentlichen Verkehr und aktiven Verkehrsmitteln hin zum MIV bewirken können. Dies führt zu induziertem Verkehr; die zunächst erzielte Erhöhung der Kapazität und Reduktion der Reisezeit wird durch eine anschliessende Zunahme des Verkehrsaufkommens (über-)kompensiert. Es wird betont, dass weitere Forschung erforderlich ist, um die Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf verschiedenen Strassentypen und bei unterschiedlichen Anteilen automatisierter Fahrzeuge genauer zu verstehen.

Insgesamt liegen die in den neueren Studien ermittelten Werte für die Änderung des Verkehrsaufkommens in der in ARE (2021) angegebenen Spannweite von 0 bis +30%. Die neueren Erkenntnisse führen somit zu keiner grundsätzlich neuen Einschätzung der Wirkungen der Automatisierung auf das Verkehrsaufkommen, so dass die Annahmen aus ARE (2021) als Grundlage für die Erstellung Szenarien genutzt werden

können. In der nationalen Literatur gibt es hierzu keine Studien, die nicht schon in ARE (2021) berücksichtigt wurden.

Besetzungsgrade und Leerfahrten

In ARE (2021) wurden für das Automatisierungsszenario die in Tabelle 7 dargestellten, nach Distanzklassen differenzierten Änderungen des Besetzungsgrades gegenüber der dortigen Referenz angenommen. Dabei wurde von einer Reduktion des Besetzungsgrades zwischen 13% für kürzere Fahrten bis 10 km und von 20% für längere Fahrten ab 10 km ausgegangen. Gemittelt über alle Distanzen ergibt sich aufgrund von Automatisierung eine Reduktion des Besetzungsgrads um 16.7%.

Veränderung Besetzungsgrade im MIV aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz

Distanzklasse	Veränderung der Besetzungsgrade ggü. Referenz
< 5 km	-13%
5-10 km	-13%
10-25 km	-20%
25-50km	-20%
> 50 km	-20%

Tabelle 7: Veränderung der Besetzungsgrade im MIV aufgrund der Automatisierung ggü. der Referenz (ARE 2021 angelehnt an Meyer et al. 2017, Hörl et al. 2019, Soteropoulos et al. 2019)

In der aktuellen Literatur sind keine weitergehenden Aussagen bzw. aktuelle Studien zur Änderung des Besetzungsgrades zu finden. In Noussan et al. (2020) wird in einer Szenarioanalyse zu den Auswirkungen der Nutzung automatisierter Fahrzeuge mit einem Besetzungsgrad von 1.2 ein ähnlicher Wert zu den in ARE (2021) ermittelten Werten verwendet.

Private automatisierte Fahrzeuge des Level 5 gemäss der Nomenklatur der amerikanischen Vereinigung von Automobilingenieuren (SAE) können innerhalb eines Haushalts geteilt werden und ein Fahrzeug kann somit zwei Personen zeitversetzt zur Arbeit bringen oder Hol- und Bringwege von Kindern übernehmen. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Einzelwege mit einem Fahrzeug sowie die Anzahl der Leerfahrten. Im Hinblick auf die Zunahme von Leerfahrten ermitteln Tajaddini und Vu (2023) in einer modellbasierten Analyse, dass Leerfahrten die zurückgelegten Fahrzeugkilometer um 20% erhöhen. Insgesamt ist es aber schwierig, Aussagen über die Entwicklung der Leerfahrten zu erhalten und in einigen Studien wie beispielsweise in von Schmidt et al. (2022) wird die Thematik explizit ausgeschlossen.

In UBA (2023a) wird darauf hingewiesen, dass es zur Reduktion von Raumnutzungskonflikten anzustreben ist, potenzielle Steigerungen der MIV-Fahrleistung zu vermeiden und diesen beispielsweise durch eine Begrenzung von Leerfahrten automatisierter Fahrzeuge oder durch Preisinstrumente zu begegnen.

Kostenentwicklung Personenverkehr

Die Kosten für die Anschaffung, den Unterhalt und die Nutzung automatisierter Fahrzeuge haben einen entscheidenden Einfluss auf die Durchdringungsraten und die Nutzungshäufigkeit automatisierter Fahrzeuge.

Im Hinblick auf die Anschaffungskosten wird von einer Erhöhung der Kosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ausgegangen. In ARE (2021) wird für die Anschaffungskosten eine Steigerung von 4% bis 20% angegeben. Carreyre et al. (2024) geben für die Anschaffungskosten für private automatisierte Fahrzeuge, die elektrifiziert sind, eine Steigerung der Anschaffungskosten von 24% an. Für automatisierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren wird eine Steigerung von 29% ermittelt. Diese Werte liegen etwas über der in ARE (2021) angegebenen Spannweite.

Mitropoulos et al. (2022), die eine TCO-Berechnung für nicht-automatisiert und automatisierte Steckerfahrzeuge durchführen, nehmen für ein nicht-automatisiertes Steckerfahrzeug Anschaffungskosten von 33'900 € und für automatisierte Steckerfahrzeuge 44'347 € an, was in etwa 30% höheren Kosten entspricht. Für die Unterhaltskosten nehmen sie für nicht-automatisierte und automatisierte Steckerfahrzeuge ähnlich hohe Kosten an. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus ARE (2021). Für die Versicherungskosten wird aufgrund geringerer Unfallwahrscheinlichkeiten von einer Senkung der Kosten für die Nutzung automatisierter Fahrzeuge ausgegangen. Mitropoulos et al. (2022) weisen in ihrer TCO-Berechnung allerdings darauf hin, dass die Kosten für eine Reparatur bei automatisierten Fahrzeugen höher ausfallen könnten, was das Potential für die Senkung der Versicherungskosten schmälert. Vor diesem Hintergrund gehen sie von einer Reduktion der Kosten für die Versicherung von 10% aus. Diese liegt unter der in ARE (2021) angegebenen Reduzierung der Versicherungskosten von 50%. Bezüglich der Energiekosten ist darauf hinzuweisen, dass diese grundsätzlich stark von der genutzten Antriebstechnologie abhängen. Mitropoulos et al. (2022) vergleichen die Energiekosten von automatisierten und nicht-automatisierten Steckerfahrzeugen und ermitteln für die Nutzung des automatisierten Steckerfahrzeugs um 19.9% geringere Energiekosten. Als Grund hierfür werden vor allem die effizientere Fahrweise automatisierter Fahrzeuge angegeben.

Besondere Aspekte des Schienenverkehrs

Bisher wurde ein Fokus auf den Verkehrsträger Strasse gelegt. Die mit der Automatisierung des Schienenverkehrs einhergehenden Wirkungen wurden dabei aussen vorge lassen und sollen nun betrachtet werden. Die Automatisierung des Schienenverkehrs hat Einfluss auf die mit dem Angebot verbundenen Kosten. Hier stehen sich potenzielle Einsparungen bei den Personalkosten, da die Kosten für das Fahrpersonal entfallen, und eventuell höhere Kosten für die Anschaffung der Fahrzeuge sowie zusätzliche Investitionen in die Infrastruktur gegenüber. In Kostrzewski et al. (2021) wird für die durch die Automatisierung zu erwartenden Einsparungen bei den Betriebskosten, welche Lohnkosten für das Fahrpersonal enthalten, eine Spanne von 10% bis 30% angegeben. Diese Werte werden aus einer Auswertung der Kosten von urbanen Schienenverkehrssystemen in den USA abgeleitet und um Erkenntnisse aus einer internationalen Literaturrecherche ergänzt. In ARE (2021) wird aber darauf hingewiesen, dass die zu erwartenden tatsächlichen Kosten nur in gewissen Anteilen auf reale

Kostenreduktion durch die Automatisierung zurückzuführen sein dürften und zudem sehr stark von der Ausgestaltung der entsprechenden Angebote abhängig sind.

Auf der Seite der Nachfragenden nach Angeboten des Schienenverkehrs ist die Veränderung der Reisezeitbewertung von Interesse. Zu dieser Thematik wurde allerdings keine neuere Literatur gefunden. Es erscheint aber plausibel, dass sich an der Reisezeitbewertung durch die Automatisierung des Schienenverkehrs nur wenig ändern wird, da diese keine neuen grundsätzlich andere Nutzung der Reisezeit erlaubt.

3.2.1.3 Sharing Personenverkehr

Durch die Digitalisierung wird das Teilen von Fahrzeugen in Form von Car-Sharing und das Teilen von Fahrten in Form von Ride-Sharing insbesondere durch Angebote digitaler Plattformen erheblich erleichtert. Dies kann dazu führen, dass der private PW-Besitz an Bedeutung verliert und die alternativen Angebote zunehmend genutzt werden. Andererseits können aber auch Fahrten aus dem ÖV und Wege, die zu Fuss oder auf dem Velo zurückgelegt werden, auf Sharing-Angebote verlagert werden. Dies ist insbesondere zu erwarten, wenn die Preise für die Nutzung von Sharing-Angeboten aufgrund der zunehmenden Automatisierung der eingesetzten Fahrzeuge sinken (ARE 2021).

PW-Besitz und Flottenentwicklung

In ARE (2021) wurden verschiedene Aspekte des privaten PW-Besitzes und der Flottenentwicklung untersucht, wobei insbesondere die Auswirkungen des Sharing im Personenverkehr betrachtet wurden. Dabei wurde in ARE (2021) davon ausgegangen, dass aufgrund der Nutzung von Sharing-Angeboten 2 private PW durch 1 geteilten PW ersetzt werden, so dass die Jahresfahrleistung pro PW verdoppelt werden kann.

Dabei wurden Unterschiede in den Nutzungsmustern für stationsbasierte und Free-Floating-Angebote beim Car-Sharing festgestellt. Diese haben unterschiedliche langfristige Auswirkungen auf den PW-Besitz. Zudem variiert das Substitutionsverhältnis von Car-Sharing-Fahrzeugen erheblich je nach Quelle der Studie, mit Zahlen, die von 1.3 bis 20.3 private Fahrzeuge pro Car-Sharing-Fahrzeug reichen.

Ein weiterer Punkt betrifft die Effekte von Ride-Hailing-Angeboten, die in den USA nur geringe Veränderungen im PW-Besitz bewirken. Schliesslich zeigen Simulationsstudien, dass die Automatisierung ein potenzieller Hebel für hohe Substitutionsraten sein könnte, wobei diese stark von den Angebotsparametern wie Wartezeiten, Umwegen und Abholorten abhängen (Wang et al. 2021).

Neuere Untersuchungen bestätigen und erweitern die Erkenntnisse aus ARE (2021) hinsichtlich der Auswirkungen von Sharing-Diensten auf den privaten PW-Besitz. So prognostizieren Noussan und Tagliapietra (2020), dass bis 2050 Sharing-Dienste bis zu 20% des privaten Fahrzeugbesitzes substituieren können. Eine detaillierte Simulationsstudie von Carreyre et al. (2024) zeigt, dass die Kombination von automatisierten Fahrzeugen als Sharing-Angebote (SAV) den privaten Fahrzeugbesitz erheblich reduzieren könnte. Mit dem Stop-Based-Routing, bei dem Ein- und Ausstiege nur an bestimmten Stationen erlaubt sind, und Door-to-Door-Diensten wird die Einführung von

zwei unterschiedlichen Arten der Ausgestaltung von Sharing-Angeboten für Berlin untersucht. Die Einführung von SAV mit Door-to-Door-Routing könnte laut Studie zu einer Reduktion der privaten Fahrzeugflotte um 80% im Vergleich zum Basisszenario führen. Bei Stop-Based-Routing fällt die Reduktion mit 75% etwas geringer aus. Dies deutet darauf hin, dass die Reduktion des PW-Besitzes durch SAV abhängig von der Auslastung, der Routingmethode und der Fahrzeuggrösse sehr hoch sein können.

Eine empirische Untersuchung von Kolleck (2021) in 35 grossen deutschen Städten ergab, dass ein zusätzliches stationsbasiertes Car-Sharing-Fahrzeug mit einer Reduktion von etwa neun privaten PW verbunden ist, während für Free-Floating-Car-Sharing keine statistisch signifikante Beziehung zum privaten Autobesitz festgestellt werden konnte. Die Autoren erklären diesen fehlenden Einfluss dadurch, dass Free-Floating-Car-Sharing Angebote allen voran in Grossstädten bestehen, wo Fahrzeugbesitz durch andere Faktoren wie bspw. der Besiedlungsdichte beeinflusst wird. Im Gegensatz zeigen Stinson et al. (2021) mittels diskreter Wahlmodelle, dass Sharing-Dienste Nutzende auch dazu führen können, die private Fahrzeugflotte um bis zu 6% zu vergrössern, unter der Bedingung, dass diese zur Steigerung des Haushaltseinkommens genutzt werden können. Diese neuen Erkenntnisse unterstreichen die Komplexität der Auswirkungen von Sharing-Diensten auf den privaten Fahrzeugbesitz und heben die unterschiedlichen Effekte je nach Art des Sharing-Angebots und regionalen Kontexten hervor. Sie sind jedoch teilweise optimistischer als die bisherigen Substitutionsverhältnisse von 1.3 bis 20.3 privaten Fahrzeugen pro Car-Sharing-Fahrzeug in ARE (2021). Weiterhin besteht Unsicherheit im Hinblick auf die Auswirkungen, da diese sehr abhängig vom Untersuchungskontext sind und durch die Komplementaritäten oder Substitute mit anderen aufkommenden Mobilitätstechnologien negative oder positive Multiplikatoren entstehen können.

Besetzungsgrade und Leerfahrten

ARE (2021) stellt fest, dass Sharing-Angebote das Potenzial haben, die Besetzungsgrade im MIV einschliesslich neuer ÖIV-Angebote sowie Leerfahrten zu erhöhen. Dabei zeigen sich allerdings starke regionale Unterschiede, die sich erheblich auf die Besetzungsgrade und das Ausmass der Leerfahrten auswirken können. Die in ARE (2021) im Sharing-Szenario angenommenen Veränderungen des Besetzungsgrads gegenüber dem Referenzszenario werden nach Fahrtzweck differenziert (Tabelle 8).

Veränderung Besetzungsgrade aufgrund Sharing ggü. der Referenz

Fahrtzweck	Veränderung der Besetzungsgrade ggü. der Referenz
Arbeit	7%
Bildung	6%
Einkauf	6%
Nutzfahrt	7%
Freizeit	14%
Sonstiges	6%

Tabelle 8: Veränderung der Besetzungsgrade aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Mühlethaler et al. 2011, Hörli et al. 2019, ITF 2020, Soteropoulos et al. 2019)

Die aus der Literaturanalyse der neuesten Veröffentlichungen gewonnen Erkenntnisse bestätigen die differenzierte Perspektive auf die Auswirkungen von Sharing-Diensten auf Besetzungsgrade und Leerfahrten aus ARE (2021). Zum einen werden die positiven Effekte durch die Studie von Noussan und Tagliapietra (2020) bestätigt, die zeigt, dass die Bündelung von Fahrten in Sharing-Diensten den durchschnittlichen Besetzungsgrad der Fahrzeuge im Vergleich zu privaten PW erhöht. Besonders automatisierte Fahrzeuge können durch ihre ständige Verfügbarkeit und den Wegfall von Fahrerpausen effizienter eingesetzt werden, was die Auslastung pro Fahrzeug steigern könnte. Intelligente Routenplanung und die Bündelung von Fahrten können Leerfahrten reduzieren, obwohl bestimmte Leerfahrten, wie die Rückkehr von Fahrzeugen an Sammelpunkte, unvermeidbar bleiben. Dennoch wird erwartet, dass der Anteil der Leerfahrten deutlich unter dem von konventionellen Taxis liegen wird. Insgesamt prognostizieren Noussan und Tagliapietra (2020), dass durch Automatisierung und Sharing die Fahrzeugauslastung und Besetzungsgrade deutlich steigen werden, wobei bei 80% der Fahrten drei Passagiere je Fahrzeug erreicht werden können. Carreyre et al. (2024) haben festgestellt, dass Shared Autonomous Vehicles (SAV) im Vergleich zu konventionellen PW die gesamten gefahrenen Kilometer erheblich reduzieren können, da Fahrgemeinschaften die Fahrzeugauslastung erhöht. Die Simulationen für Berlin zeigen, dass ein Door-to-Door-Dienst die gesamten gefahrenen Kilometer im Vergleich zur Basis um 23% reduzieren könnte, während Stop-Based-Routing sogar eine Reduktion von 28% erreichen könnte.

Im Gegensatz dazu weist die Studie von Mouraditis et al. (2021) auf die möglichen negativen Auswirkungen von Ride-Hailing-Diensten wie Uber und Lyft auf die Verkehrsdynamik in Städten hin. Diese Dienste erhöhen die Verkehrsbelastung, insbesondere durch "Deadheading", also Fahrten ohne Passagiere, bei denen die Fahrer unterwegs sind, um neue Fahrgäste abzuholen. Diese Fahrten machen einen erheblichen Anteil der Gesamtfahrleistung aus und führen zu mehr Verkehr auf den Strassen.

Wie in ARE (2021) zeigen auch die neueren Studien, dass die Entwicklung der Besetzungsgrade und Leerfahrten aufgrund der erhöhten Nutzung von Sharing-Angeboten komplex und stark kontextabhängig ist. Insgesamt wurden aber keine neueren Studien gefunden, die den in ARE (2021) getroffenen Annahmen grundsätzlich widersprechen.

Reisezeitbewertung (Value of Time, VoT)

Hinsichtlich der Reisezeitbewertung (Value of Time) wurde in ARE (2021) für den MIV (inkl. ÖIV) sowie den ÖV für das Sharing-Szenario nach Fahrzwecken differenziert.

Veränderung VoT aufgrund Sharing ggü. der Referenz		
Fahrtzweck	MIV	ÖV
Pendlerfahrt	-21%	-21%
Einkaufsfahrt	-1%	-1%
Nutzfahrt	- 16%	- 16%
Freizeitfahrt	-1%	-1%
Alle Zwecke (gew. Mittel)	-9%	-12%

Tabelle 9: Veränderung des VoT aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Mühlethaler et al. 2011, Hörl et al. 2019, ITF 2020, Soteropoulos et al. 2019)

In Carreyre et al. (2024) werden mit dem Stop-Based-Routing, bei dem Ein- und Ausstiege nur an bestimmten Stationen möglich sind, und Door-to-Door-Diensten zwei unterschiedliche Arten für die Ausgestaltung von Sharing-Angeboten betrachtet. Die Studie zeigt, dass Stop-Based-Routing die In-Vehicle-Reisezeit für Fahrgäste reduzieren kann, da Umwege vermieden werden. Dies führt jedoch zu einer Verlängerung der Zu- und Abgangszeiten. In dicht besiedelten Gebieten sollten daher Stop-Based-Dienste bevorzugt werden, um Reisezeiten und gefahrene Kilometer zu begrenzen. Bei geringerer Nachfrage oder weniger Wettbewerb durch konventionelle Fahrzeuge werden Door-to-Door-Dienste attraktiver.

Diese Einsichten bestätigen die Potenziale, die bereits in ARE (2021) aufgezeigt wurden, und deuten die konkreten Vorteile von Stop-Based-Routing in dicht besiedelten Gebieten an. Die neuere Studienlage erlaubt jedoch keine weitreichenden neuen Erkenntnisse. Die Auswirkungen und Effizienzen von verschiedenen Sharing- und Routing-Modellen bedürfen weiterer Forschung, um eine umfassendere Bewertung und Optimierung der Reisezeiten im Personenverkehr zu ermöglichen.

Für die nationale Perspektive zum Value of Time beim Car-Sharing untersuchen Suel et al. (2024), wie hoch die Flexibilität von Car-Sharing-Nutzern bei den gebuchten Zeitslots ist. In der Modellierung wurde analysiert, dass ein finanzieller Anreiz zwischen 22.4 und 35.5 CHF pro Personenstunde für die Verlegung von gebuchten Slots erforderlich ist. Die Höhe des Wertes ist abhängig von sozioökonomischen Merkmalen, den Einstellungen der Nutzer und dem Zweck der Fahrt.

Nutzungskosten Sharing-Angebote

In ARE (2021) wurde eine durchschnittliche Reduktion der variablen, entscheidungsrelevanten Kosten im MIV (inkl. ÖIV) um 11% angenommen. Für den ÖV wurde von einer Reduktion der Kosten um 5% der distanzabhängigen Preiskomponenten ausgegangen.

Durch die Einsparung der Anschaffungs-, Wartungs- und Versicherungskosten von Fahrzeugen können Nutzer von Sharing-Diensten finanziell profitieren, da sie nur für die tatsächlich genutzten Fahrten zahlen. Zudem wird auf die vielfältigen Preismodelle hingewiesen, die verschiedene Nutzerbedürfnisse und -gewohnheiten berücksichtigen. Diese Modelle umfassen unter anderem minuten- oder kilometerbasierte Tarife sowie monatliche Abonnements, was die Nutzung von Sharing-Angeboten flexibel und attraktiv gestaltet.

Neuere Studien bestätigen die aufgezeigten Vorteile der Nutzungskosten von Sharing-Angeboten aus ARE (2021) und erweitern diese um detaillierte wirtschaftliche Analysen. Carreyre et al. (2024) haben in ihren Simulationen für Berlin gezeigt, dass die Einführung eines Sharing Dienstes mit automatisierten Fahrzeugen bei der Nutzung eines Door-to-Door-Routings Investitionen von rund 27.7 Mrd. € und bei einem Stop-Based-Routing etwa 23.1 Mrd. € erfordern würde. Diese hohen Investitionskosten resultieren hauptsächlich aus den Ausgaben für die Fahrzeugflotte und die erforderliche Infrastruktur wie Stationen und Ladeeinrichtungen. Zusätzlich entstehen laufende Betriebskosten für Wartung, Energie und Personal zur Überwachung. In Zukunft könnten die Kosten pro Fahrzeug bei Anschaffung sowie die Betriebskosten durch

Skaleneffekte, technologischen Fortschritt und Lerneffekte bei der Produktion jedoch deutlich sinken. Höhere Fahrzeugauslastungen und Effizienzsteigerungen durch Sharing und optimierte Routenplanung können die Kosten pro Fahrt reduzieren.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus ARE (2021), die bereits auf die potenziellen Kosteneinsparungen und die Vielfalt der Preismodelle hingewiesen haben, bieten die neuen Studien von Carreyre et al. (2024) detaillierte Einblicke in die notwendigen Investitionen und die langfristigen Kostendynamiken. Sie bestätigen, dass Sharing-Angebote eine kostengünstige Alternative zum Fahrzeugbesitz darstellen können. Dennoch bleibt die Unsicherheit über die langfristige Entwicklung der Betriebskosten bestehen.

Verlagerungseffekte

Eine zentrale Feststellung von ARE (2021) bezüglich der Verlagerungseffekte durch die Nutzung von Sharing-Angeboten ist, dass Nutzer zunehmend von privaten PW zu Sharing-Angeboten wechseln. Diese Verlagerung kann erhebliche Auswirkungen auf den öffentlichen Verkehr haben, da Sharing-Dienste sowohl Fahrgäste vom öffentlichen Verkehr abziehen als auch als Ergänzung fungieren können. Die Flexibilität von Sharing-Angeboten ermöglicht es, diese für verschiedene Fahrtzwecke wie Pendeln, Freizeitaktivitäten und andere Erledigungen wie Einkaufen zu nutzen. Darüber hinaus führen Sharing-Angebote zu Anpassungen der Mobilitätsmuster, indem sie das Verhalten der Nutzer hinsichtlich ihrer Fortbewegungsgewohnheiten für unterschiedliche Fahrtzwecke verändern.

In Winter et al. (2020) werden die Verlagerungseffekte durch die Einführung eines automatisierten Sharing-Angebots untersucht. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass zwar Personen von der Nutzung des privaten PW zum Sharing-Dienst wechseln, aber der grössere Anteil der Verlagerung zum einen aus dem ÖPNV und zum anderen aus dem Fuss- und Veloverkehr stammt. Die Nutzung des privaten PW nimmt nach ihrer Analyse von 29% der Fahrten auf 24% ab. Der automatisierte Sharing-Dienst wird aber nach seiner Einführung für 26% der Fahrten genutzt.

Insgesamt zeigt sich auch in neueren Studien der Trend, dass die Einführung automatisierter Sharing Dienste eher zu einer Reduktion der Nachfrage im öffentlichen Verkehr und der zu Fuss oder mit dem Velo zurückgelegten Wege führt, während eine geringere Nutzung des privaten PW nur im kleineren Umfang zu erwarten ist.

Induzierter Verkehr (Wegeaufkommen)

In ARE (2021) wurde zudem die Wirkung von Sharing-Angeboten auf den induzierten Verkehr und das damit einhergehende erhöhte Wegeaufkommen untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund des Sharing und den damit leicht reduzierten Kosten jüngere Personen ohne PW häufiger unterwegs sind (Tabelle 10).

Veränderung Mobilitätsrate aufgrund Sharing ggü. der Referenz

Altersklasse	Veränderung der Mobilitätsrate ggü. Referenz
≤ 17	+5.0%
18–24	+5.0%
25–44	+5.0%
45–64	Keine Veränderung angenommen
65–74	Keine Veränderung angenommen
≥ 75	Keine Veränderung angenommen
≥ 65	Keine Veränderung angenommen

Tabelle 10: Veränderung der Mobilitätsrate aufgrund Sharing ggü. der Referenz (Quelle: ARE 2021 angelehnt an Lutzenberger et al. 2018, Hülsmann et al. 2018)

Diese zusätzlichen Fahrten, die ohne die Verfügbarkeit von Sharing-Angeboten möglicherweise nicht unternommen worden wären, könnten insgesamt zu einem Anstieg des Verkehrsaufkommens beitragen.

Neuere Studien differenzieren die vorherigen Ergebnisse des ARE-Berichts 2021 zum induzierten Verkehr durch Sharing-Angebote und liefern detaillierte Einblicke in deren Auswirkungen.

Hawkins und Kockelman (2024) zeigen, dass Dynamic-Ride-Sharing-Angebote, bei denen mehrere Reisende mit ähnlichen Ausgangs-, Ziel- und Abfahrtszeiten in einem Fahrzeug zusammenfasst werden, das Wegeaufkommen sowie die Treibhausgasemissionen (GHG-Emissionen) um bis zu 20% im Vergleich zum privaten Fahrzeuggebrauch senken können. Zusätzlich besteht ein Einsparpotenzial für Parkraum von 90%, was erhebliche städtische Flächenressourcen freisetzen könnte.

Im Gegensatz dazu gibt es auch vereinzelte Studien, die aufzeigen, dass das Verkehrsaufkommen durch die Einführung von Sharing-Diensten auch erhöht werden kann. Die Studie von Mouraditis et al. (2021) beleuchtet die verkehrlichen und ökologischen Auswirkungen von Ride-Hailing-Diensten wie Uber und Lyft in San Francisco. Diese Dienste wurden als Hauptursache für die zunehmende Verkehrsbelastung identifiziert. Während sie die Bequemlichkeit und Mobilität für viele Nutzer erhöhen, tragen sie gleichzeitig zur Verkehrsüberlastung bei und erhöhen den Energieverbrauch sowie die Emissionen, wenn sie nicht effektiv reguliert werden.

Insgesamt bestätigen die neuen Studien die bisherigen Ergebnisse und betonen abermals den Einfluss der genauen Ausgestaltung der Sharing-Angebote sowie die Abhängigkeit vom Untersuchungskontext. So können Sharing-Dienste in bestimmten Städten und unter bestimmten Bedingungen zu positiven oder negativen Effekten führen. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit gezielter Regulierungsmassnahmen und weiterer Forschung, um die positiven Effekte von Sharing-Angeboten zu maximieren und negative Auswirkungen zu minimieren.

Effekte von Angeboten des Velo- und E-Scooter-Sharings

In ARE (2021) wurden auch die Effekte von Velo- und E-Scooter-Sharing-Angeboten betrachtet. Zunächst ergänzen diese Sharing-Dienste andere Verkehrsmittel und bieten zusätzliche Mobilitätsoptionen, die den Nutzern mehr Flexibilität verschaffen. Darüber hinaus hat die Nutzung von Velos und E-Scooter positive Umweltauswirkungen, da sie zur Reduzierung von Luftverschmutzung und Lärmbelastung beitragen. Dies allerdings nur, wenn Fahrten mit dem (fossilen) MIV oder ÖV ersetzt werden. Zudem zeichnen sich diese Angebote durch ihre einfache Zugänglichkeit und Nutzerfreundlichkeit aus, was ihre Beliebtheit bei den Nutzern erhöht.

Das Themensegment wird auch in neuen Studien zu Sharing-Angeboten betrachtet. Noussan und Tagliapietra (2020) prognostizieren, dass Bike Sharing für die letzte Meile die Nutzung anderer Verkehrsmittel bis 2050 um 5% verringern kann. Diese Erkenntnis unterstreicht die potenziellen positiven Umweltauswirkungen und die Effizienzsteigerung durch die Nutzung von emissionsfreien Fahrzeugen. Aarhaug (2023) zeigt durch eine Befragung, dass die Nutzung von E-Scootern den Bedarf an einem privaten Fahrzeug reduzieren und damit den Autoverkehr in Städten verringert. Zudem ergänzen E-Scooter und Velos den öffentlichen Nahverkehr, indem sie häufig in Kombination mit öffentlichen Verkehrsmitteln genutzt werden und die "letzte Meile" abdecken. Die Studie betont auch räumliche Effekte: E-Scooter und Velos benötigen deutlich weniger Stellfläche als PW, was zu einer sparsameren Nutzung des knappen Stadtraums und einer lebenswerteren Stadtgestaltung beitragen kann. Langfristige Effekte hängen jedoch davon ab, ob E-Scooter und Velos tatsächlich Autofahrten ersetzen oder zusätzlichen Verkehr induzieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass E-Scooter eher eine Ergänzung als eine Konkurrenz zum ÖV darstellen.

Neben diesen positiven Effekten werden aber auch vereinzelt negative Effekte aufgezeigt. Die Studie von Schröder et al. (2023) zeigt, dass die externen Gesamtkosten pro Personenkilometer des E-Scooter-Sharings alle anderen Verkehrsmittel übersteigen, hauptsächlich aufgrund der hohen Unfallkosten. Diese basieren auf Unfallstatistiken von 2019, als E-Scooter erstmals in München eingeführt wurden und hohe Unfallzahlen im Vergleich zu den zurückgelegten Kilometern auftraten. Die meisten Unfälle mit E-Scootern ereigneten sich entweder allein oder im Zusammenhang mit aktiver Mobilität, was zu hohen Unfallkosten führte. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Statistiken bei E-Scootern nicht sharing-induziert sind, wie es die Autoren für andere Fahrzeugkategorien aufzeigen. Nichtsdestotrotz sind die externen Unfallkosten bei der Betrachtung der breitflächigen Einführung verschiedener Sharing-Dienste aufgrund ihres vergleichbar hohen Einflusses zu beachten.

Ähnlich wie in ARE (2021) ergibt sich auch bei den neueren Studien ein gemischtes Bild im Hinblick auf die Wirkungen von E-Scooter und Velo-Sharing Angeboten. Auf der einen Seite stehen positive Umweltauswirkungen und eine hohe Nutzerfreundlichkeit. Auf der anderen Seite geht insbesondere die Nutzung von E-Scootern auch mit hohen Unfallrisiken einher und die Integration von Sharing Angeboten für E-Scooter und Velos in bestehende Verkehrssysteme stellt eine Herausforderung dar.

3.2.1.4 Interdependenzen Digitalisierung und Elektrifizierung im Personenverkehr

Es konnten keine Veröffentlichungen gefunden werden, die explizit das Zusammenspiel zwischen der Digitalisierung und der Elektrifizierung betrachten. Bei Studien zur Automatisierung wird zwar häufig davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge auch elektrifiziert sind, aber nicht betrachtet, inwieweit die Automatisierung zu einer schnelleren Elektrifizierung beiträgt und vice versa. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass die Automatisierung der Fahrzeugflotte auch mit einer Elektrifizierung einhergeht. Es erscheint plausibel, dass aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen (etwa hinsichtlich der EU-Flottengrenzwerte für Fahrzeughersteller) sowie der antizipierten Kostenvorteile von BEV gegenüber konventionell betriebenen PW der Anteil Steckerfahrzeuge an der Gesamtflotte künftig stark zunimmt. Darüber hinaus liesse sich explizit regulativ festlegen, dass automatisierte Fahrzeuge elektrifiziert sein müssen. Für den Einfluss des Sharing auf den Elektrifizierungsgrad konnten ebenfalls keine Veröffentlichungen identifiziert werden. Da hier kommerzielle Anbieter über die Anschaffung der Fahrzeuge entscheiden, kann davon ausgegangen werden, dass die TCO einen signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung haben.

Auch wenn keine Veröffentlichungen identifiziert werden konnten, die den Zusammenhang zwischen Digitalisierung und Elektrifizierung explizit betrachten, gibt es Studien, die den allgemeineren Zusammenhang zwischen der Digitalisierung und der Dekarbonisierung beleuchten. So betonen Bieser und Kriukelyte (2021), dass digitale Anwendungen im Personenverkehr die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sowohl senken als auch erhöhen können. Damit sie zum Klimaschutz beitragen, müssen sie so gestaltet werden, dass sie emissionsreduzierende Massnahmen fördern und emissionssteigernde Massnahmen verhindern. In eine ähnliche Richtung gehen die Ergebnisse von Krail et al. (2019). Entscheidend ist dabei der Trade-off: Einerseits zwischen Effizienzgewinnen durch die Digitalisierung, die zu einer Senkung von THG-Emissionen führen, und andererseits einer Verlagerung von Fahrten auf die Strasse aufgrund der erhöhten Attraktivität der durch die Digitalisierung ermöglichten Angebote, die mit einer Steigerung der THG-Emissionen einhergehen können.

3.2.1.5 Herausforderungen/Erkenntnislücken Digitalisierung Personenverkehr

Insgesamt bestehen die in ARE (2021) identifizierten Herausforderungen und Erkenntnislücken weiterhin. Im Hinblick auf die Wirkung der Automatisierung sowie von Sharing-Angeboten auf die Bewertung von Reisezeiten gibt es nur wenige neue Veröffentlichungen, welche entweder in Form von Metastudien die Ergebnisse bestehender Studien zusammenfassen oder auf den Stated-Preference-Ansatz zurückgreifen und somit nicht auf realen Erfahrungen und tatsächlichem Verhalten beruhen. Neben der generellen Problematik, inwieweit sich die Befragten in ihnen unbekannte Situationen hineinversetzen können, fehlen Untersuchungen zu speziellen Situationen wie dem Teilen von Fahrten mit unbekannten Personen oder dem Verhalten unter bestimmten Sicherheitslagen, wie nächtlichen Fahrten oder Fahrten in Randgebieten. Insbesondere mangelt es weiterhin an Studien, die die Reisezeitbewertung für geteilte Fahrten und Fahrzeuge analysieren. Neuere Studien weisen zudem darauf hin, dass die Automatisierung nicht notwendigerweise zu einer Reduktion der Reisezeitbewertung führen muss, sondern auch mit einer Erhöhung des Value of Time einhergehen kann.

Dadurch wird die Bandbreite der in der Literatur ermittelten Veränderungen der Reisezeitbewertung durch die Digitalisierung noch erhöht.

Ähnliches gilt für die grosse Bandbreite, die für die Wirkung von Sharing-Angeboten auf den PW-Besitz und die Entwicklung der Fahrzeugflotte ermittelt wurde. In ARE (2021) wurden Substitutionsraten für ein Sharing-Fahrzeug zwischen 1 zu 1.25 und 1 zu 20.3 angegeben. Aus den neueren Studien konnten keine Erkenntnisse gewonnen werden, die diesen grosse Bandbreite von möglichen Entwicklungen entscheidend einschränken, da nach wie vor empirische Auswertungen zu dieser Thematik fehlen.

Neben diesen bereits in ARE (2021) adressierten Erkenntnislücken stellt die mit Ermittlung der mit den Interdependenzen zwischen Automatisierung und Elektrifizierung einhergehenden Wirkungen eine besondere Herausforderung dar, da einschlägige Veröffentlichungen zu dieser Thematik fehlen.

Übersicht wichtigste Stellschrauben im Personenverkehr

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
Automatisierung				
Value of Time MIV	-100% bis 0%			
	-40% (Pendlerfahrt) Keine Veränderung (Einkaufsfahrt) -30% (Nutzfahrt) Keine Veränderung (Freizeit)	ARE 2021	CH	
	-80% bis -100%	Kohli und Willumsen 2016	n.a./diverse	Expertenbefragung
	-25% bis -95%	Singleton et al. 2019	n.a./diverse	Metastudie von Simulationsstudien
	-41% (Arbeitswege)	Kolarova et al. 2019	DE	
	0% (Freizeit und Einkauf)	Kolarova et al. 2019	DE	
	-18% bis -32% (Pendlerf.)	Zhong et al. 2020	USA	
	-12.7% über alle Wegezwecke	Huda et al. 2023	AUS	Metastudie
	-7.3% (Freizeitfahrten)	Kato et al. 2024	JP	Stated-Preference-Befragungen
	Auch ansteigende VoT möglich, nicht quantifiziert	Nunez und Tirachini 2023, Kolarova und Cherchi 2021,	DE DE n.a	

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
		Rashidi et al. 2021		
Value of Time ÖV	Keine Veränderung	ARE 2021	CH	
Wegeaufkommen MIV (Neuverkehr)	0% bis 30%			
	0.0% bis 18.5%	ARE 2021	CH	Gesamteffekt (Alter und Verfügbarkeit Mobilitätswerkzeuge)
	+4% Wegeaufkommen	Truong et al. 2017	AU	
	+16% Fzkm	Meyer et al. 2017	CH	
	0% bis +20% (Pkm, Einkauf)	Ecoplan 2018	CH	
	0% bis +30% (Pkm, Freizeit)	Ecoplan 2018	CH	
	+21% Fzkm	von Schmidt et al. 2022	DE	Mikroskopische Simulationen
	+9% Fzkm (Autobahn) +18% Fzkm (Landstrasse)	Sonnleitner et al. 2023		Makroskopische Simulationen
Wegeaufkommen ÖV (Neuverkehr)	0.0% bis 18.5%	ARE 2021	CH	Gesamteffekt (Alter und Verfügbarkeit Mobilitätswerkzeuge)
Besetzungsgrad	-30% bis -10%			
	-16.7%	ARE 2021	CH	
	-30%	Sessa et al. 2016	n.a./diverse	Expertenbefragung
	-10%	Soteropoulos et al. 2019	AT	
	-16%	Truong et al. 2017	AU	Autoren testen grossen Sensitivitätsbereich
	-15%	Meyer et al. 2017	CH	
Anschaffungskosten MIV	+4% bis +30%			

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
	+ 10%	ARE 2021	CH	Automatisiertes BEV im Vergleich zum BEV
	+4%	Bruns et al. 2020	CH	
	+20%	Bösch et al. 2018	n.a.	
	+24% (elektrische Fahrzeuge) +29% (Verbrenner)	Carreyre et al. 2024	CH	
	+30% (elektrische Fahrzeuge)	Mitropoulos et al. 2022	FRA	
Betriebskosten MIV	-50% bis 0%			
	0% (Unterhalt)	Bösch et al. 2018	CH	
	-50% (Versicherung)	Bösch et al. 2018	CH	
	-10% (Treibstoff)	Bösch et al. 2018	n.a.	
	0%	Huang et al. 2019, Buffat et al. 2018, Fagnant und Kockelman 2015	US, CH, US	
	- 10% (Versicherung) - 19.9% (Energie)	Mitropoulos et al. 2022	FRA	
Kilometerkosten MIV	+4%	Bösch et al. 2018	CH	
ÖV Preise	- 5.59%	ARE 2021	CH	
Sharing				
Reduktion des privaten PW-Besitzes durch die Einführung von Sharing				
	Ersetzungsrate von 2 (2 Fahrzeuge werden durch 1 ersetzt)	ARE 2021	DE	
	Ersetzungsraten von 1.3 – 20.3 privaten PW pro	Deutsch 2019 für Metastudie; Loose 2016 für	DE	

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
	stationsgebundenem, konventionellem Sharing-Fahrzeug	optimistische Werte		
	Ersetzungsraten von 1.25 – 1.25 und 3.6 pro Stationsgebundenem, konventionellem Sharing-Fahrzeug	Deutsch 2019 für Metastudie; Mitteregger et al. 2020 für optimistischsten Wert	DE	
	Autoabschaffung aufgrund von TNC-Nutzung gemäss 2/3 der Befragten unwahrscheinlich	Circella et al. 2019	US	
	Bei 91% der Ride-Hailing-Nutzer keine Veränderung beim PW-Besitz	Clewlow et al. 2017	US	
	Ersetzungsraten von 10 bis 25 privaten PW pro automatisiertem On-Demand-Fahrzeug	Hörl et al. 2019 für Literatürübersicht von Simulationsstudien	n.a./diverse	Annahmen zur Ausprägung des Angebotes teilweise unterschiedlich/ nicht explizit
	Bei Automatisierung plus Sharing bis zu 80% der Fahrten mit 3 Personen	Noussan und Tagliapietra 2020	EU-28	Szenarioanalyse
Besetzungsgrade	0.8 bis 4.5			
	1.6 bei stationsungebundenem Car-Sharing	BMW et al. 2016	DE	
	über 50% der Fahrten mit stationsgebundenen Car-Sharing Mitfahrende, bei 20% stationsungebunden	Riegler et al. 2016	DE	
	1.7 und 2.88 Personen bei betrieblichen Mitfahrgelegenheiten	Mühlethaler et al. 2011	CH	
	Anteil gepoolter Fahrten bei TNC 15 – 59%, davon 2% mit Fremden	Circella et al. 2019; Schaller 2019; Lavieri und Bhat 2019	US	

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
	2.6 Spitzenzeiten, 2.4 Nebenzeiten, 2.3 Nacht für automatisierte Angebote	ITF 2015	PT	
	2.3 (ländlich) – 5.0 (innerhalb Kernstadt) für ÖIV	Bruns et al. 2018	CH	Autoren stützen sich auf ITF 2016
	0.8–1.4 Ride-Hailing, 1.9–4.5 Bedarfsverkehr	PTV et al. 2019	DE	szenarien- und raumabhängig
	1.8–2.4	ITF 2020	FR	
	6%	ARE 2021	CH	Veränderung
Leerfahrtenanteil Fzkm	3.4% bis 17%			
	3.4–17% an TNC-Fzkm	Martin und Shaheen 2016	US	
	8% urban	Fagnant und Kockelman 2014; Hörl et al. 2019	US	Hörl et al. 2019 beziehen sich auf Fagnant und Kockelman 2014
	15% ländlich	Bösch et al. 2016 Hörl et al. 2019	CH	Hörl et al. 2019 beziehen sich auf Bösch et al. 2016
	5%	Martin und Shaheen 2016, Soteropoulos et al. 2019	US, AT	Soteropoulos et al. 2019 beziehen sich auf Martin und Shaheen 2016
Veränderung Wegeaufkommen (induzierter Verkehr)	0.0% bis 18.5%			
	13.5% Wege stationsbasiert, 5% free-floating	Haefeli et al. 2006; Lutzenberger et al. 2018	CH	
	6–7% TNC-Fahrten	Lavieri und Bhat 2019; Circella et al. 2019	US	
	0.5% Pkm durch automatisierte Sharing-Angebote	Hörl et al. 2019	CH	

Aspekte	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Fzg.)	Wichtigste Quellen	Landesbezug	Kommentar
	0.0% bis 18.5%	ARE 2021	CH	Gesamteffekt (Alter und Verfügbarkeit Mobilitätswerkzeug)
Fzkm gesamt	-28% bis -20%			
	-23% bis -28% Fzkm bei Sharing mit automatisierten Fahrzeugen	Carreyre et al. 2024	DE	Je nach Ausgestaltung des Sharing-Systems
	-20% Fzkm	Hawkins und Kockelman 2024	USA	Dynamic Ride-Sharing
Elektrifizierung				
Verkehrsmittelkosten	+66% (im Vergleich zum Total)	Ecoplan 2024	CH	

Tabelle 11: Übersicht der für die Operationalisierung der Szenarien relevantesten in der Literatur zu finden - den Wirkungsstärken für den Personenverkehr (Quelle: ARE 2021, ergänzt)

3.2.2 Güterverkehr

3.2.2.1 Elektrifizierung Güterverkehr

Die Elektrifizierung des Strassengüterverkehrs gewinnt als wichtige Strategie zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels zunehmend an Bedeutung. Die Elektrifizierung ist aufgrund hoher Anforderungen an Distanz und Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge schwieriger als im Personenverkehr. Allerdings zeigen jüngste Forschungsergebnisse, dass batterieelektrische Lkw (BEV) auch im Schwerlastverkehr der Strasse ein erhebliches Potenzial für die Einführung haben. BEV können in Finnland 93% der Fahrten (55% der transportierten Tonnenkilometer) abdecken, wobei die Reichweite von 180 bis 400 km je nach Fahrzeugtyp und Batteriegrösse variiert (Samet et al. 2021). In einer weiteren Studie wurde festgestellt, dass die Reichweite von Elektro-Lkw in den kommenden Jahren durch Fortschritte in der Batterietechnologie auf bis zu 800 km pro Ladung steigen könnte, was die Attraktivität von BEV für Langstreckentransporte erhöht (Sathre und Gustavsson 2023). Auch in der Schweiz ist das Potenzial gross: Zwischen 28% und 54% der Neuzulassungen schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) könnten bis 2030 elektrisch sein (INFRAS 2025).

Die Kosten für batterieelektrische Lkw sind ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung ihrer wirtschaftlichen Rentabilität. Gegenwärtig liegen die Anschaffungskosten für batterieelektrische Lastwagen etwa 1.8 bis 2.2-mal so hoch wie die Anschaffungskosten dieselbetriebener Lkw, unter anderem aufgrund der hohen Batteriekosten (INFRAS 2025). Studien zeigen jedoch, dass die Betriebskosten für BEV langfristig durch niedrigere Energiekosten und geringere Wartungskosten etwa 10-15% unter denen von Diesel-Lkw liegen können (Peng et al. 2023). Ein weiterer Vorteil von BEV ist die

potenzielle Reduzierung von Emissionen: Der CO₂-Ausstoss kann bei der Nutzung von 100% erneuerbarer Energie auf nahezu null reduziert werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Elektrifizierung ist die Entwicklung der Ladeinfrastruktur. Mittelfristig ist vor allem Ladeinfrastruktur in den Depots von Unternehmen erforderlich, da ein Grossteil des Ladebedarfs langsam (Übernacht-Laden) und im Depot erfolgen kann (Plötz et al. 2021, INFRAS 2025). Zudem ist der Aufbau eines umfassenden Netzwerks von Schnellladeeinrichtungen ist notwendig, um die Reichweite von BEV zu optimieren und eine flächendeckende Abdeckung zu gewährleisten (INFRAS 2025). Studien haben gezeigt, dass der Ausbau der Ladeinfrastruktur für BEV an den Hauptverkehrswegen initiale Investitionen von bis zu 10 Mio. € pro 100 Kilometer Strasse erfordert (García et al. 2021). Trotz dieser hohen Anfangsinvestitionen können strategische Investitionen in die Ladeinfrastruktur langfristig die Gesamtkosten für den Betrieb von BEV senken und die Rentabilität verbessern.

Die aktuelle Forschung zeigt, dass die Elektrifizierung des Strassengüterverkehrs ein bedeutendes Potenzial für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und für den Übergang zu nachhaltigeren Transportlösungen bietet. Die anfänglichen Investitionskosten sind hoch, aber langfristige Einsparungen durch geringere Betriebskosten und Umweltvorteile können die wirtschaftliche Rentabilität von BEV unterstützen. Fortschritte in der Batterietechnologie und der Ausbau der Ladeinfrastruktur sind entscheidend, um die Reichweitenproblematik zu überwinden und die Verbreitung von batterieelektrischen Lkw voranzutreiben.

Die Kosten für elektrischen Strassengüterverkehr machten 2021 nur einen kleinen Anteil aus. Das zeigt die Untersuchung von Ecoplan (2024) zu Kosten und Finanzierung des Verkehrs 2021. Durch den geringen Bestand an elektrischen Fahrzeugen entfallen gerade einmal 0.01% der Verkehrsmittelkosten im Güterverkehr auf elektrische Fahrzeuge. Die Verkehrsmittelkosten pro Kilometer sind bei elektrischen Lkw niedriger als beim Total der Lieferwagen, die sich 2021 im Bestand befinden (hauptsächlich Verbrenner). Bei elektrischen Lieferwagen belaufen sich die Kosten auf 1.85 CHF/ Fzkm, im Total sind es 1.92 CHF/ Fzkm. Das ist v.a. auf die niedrigeren Unterhaltskosten zurückzuführen. Bei Lastwagen und Sattelschleppern sind die Verkehrsmittelkosten für elektrische Fahrzeuge 2021 höher als im Total der Bestandsflotte, was durch höhere Garagierungskosten (Abstellplatz für das Fahrzeug ist inkl. der Ladeinfrastruktur höher) zu begründen ist.

In der Schweiz liegt der Anteil der Steckerfahrzeuge im Güterverkehr (SNF und LNF) gemäss HBEFA (INFRAS 2024) aktuell bei rund 2% (ca. 10'000 Fahrzeuge). Verbrennerfahrzeuge machen einen Anteil von 98% aus. Bis 2050 wird der Anteil der Steckerfahrzeug signifikant zunehmen. Mit knapp 800'000 Fahrzeugen wird der Anteil bei 90% liegen. BEV sind dabei dominant, PHEV machen gerade einmal 1% aus. Gleichzeitig sinkt der Anteil der Verbrennerfahrzeuge auf 9% (83'000 Fahrzeuge).

3.2.2.2 Automatisierung Güterverkehr

Mit der Aggregierten Methode Güterverkehr (AMG) liegen Annahmen zu den Kosten im Güterverkehr für Strasse und Schiene für 2050 vor (Abbildung 12). Diese bilden vorliegend die Referenz.

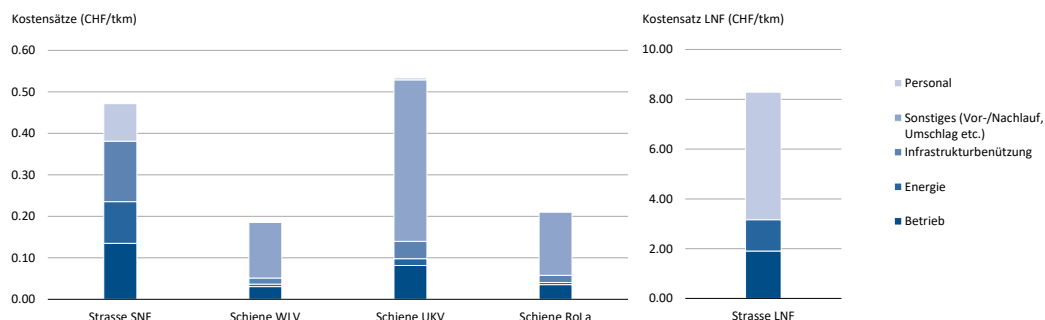


Abbildung 12: Zusammensetzung der Kosten im Güterverkehr

Personalkosten Strassengüterverkehr

In ARE (2021) wurde die Veränderung der Kostensätze aufgrund der Automatisierung im Güterverkehr für die verschiedenen Marktsegmente und Kostenkategorien geschätzt (Tabelle 12).

Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr aufgrund Automatisierung ggü. Referenz nach ARE (2021)

Kostenkategorie	Strasse (SNF)	WLW	UKV	ROLA
Personal	-50%	-75%	-75%	-75%
Betrieb	0%	0%	0%	0%
Energie	-10%	-10%	-10%	-10%
Infrastrukturbenutzung	0%	0%	0%	0%
Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)	0%	-15%	-20%	-15%
Gesamtkostensatz	-12%	-12%	-16%	-12%

Tabelle 12: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr aufgrund Automatisierung ggü. Referenz (Quelle: ARE 2021)

Personalkosten haben einen erheblichen Anteil an den Kosten im Güterverkehr auf der Strasse (Abbildung 12). Die Branche steht vor einem zunehmenden Fahrermangel, der durch schlechte Bezahlung und mangelnde Unterstützung bei der Ausbildung verschärft wird (Ji-Hyland und Allen 2020). Die Einführung automatisierter Fahrzeuge bietet erhebliches Einsparpotenzial, insbesondere auf langen Strecken. Vor allem auf Autobahnen könnten fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt werden, während Fahrer die Fahraufgabe auf der verbleibenden Strecke übernehmen, was zu einer Halbierung der Fahrerkosten führen könnte (Engholm et al. 2021). Langfristig könnte der Beruf des Fahrers sogar vollständig verdrängt werden, da Automatisierung und höhere Qualifikationsanforderungen das Aufgabenprofil der Berufskraftfahrer verändern (Phares und Balthrop 2021).

Der bestehende und sich verschärfende Fahrermangel unterstreicht die Dringlichkeit für Innovationen wie die Automatisierung von Lkw, um die Personalkosten zu senken und den Fachkräftemangel bei Fahrern zu reduzieren (Reagan und Saphores 2020; Phares und Balthrop 2021).

Anschaffung und Betrieb von Fahrzeugen

Die Basisversion eines herkömmlichen Lkw kostet in der Regel zwischen 100'000 und 150'000 €. Die Zusatzkosten für die Integration automatisierter Systeme, wie Sensoren, Lidar, Kameras, Radar und GPS-Systeme, belaufen sich auf weitere 50'000 bis 100'000 € pro Fahrzeug (BCG 2022; Fortune Business Insights 2023; McKinsey 2018). Dies entspricht einer Kostensteigerung zwischen 33% und 100%.

Neben den Hardwarekosten fallen erhebliche Ausgaben für die Softwareentwicklung und regelmässige Updates an, die notwendig sind, um die Systeme auf dem neuesten Stand zu halten und Sicherheitslücken zu schliessen (McKinsey 2018; Deloitte 2021). Darüber hinaus erfordert die Einführung automatisierter Lkw Investitionen in Kommunikationsnetzwerke für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (V2I) (McKinsey 2018; Transport Topics 2023).

Ein weiterer wesentlicher Kostenpunkt ist die Schulung und Ausbildung von Personal, um die neuen Systeme effektiv zu bedienen und zu warten. Dies umfasst initiale Schulungen sowie fortlaufende Weiterbildungen (Fortune Business Insights 2023; Transport Topics 2023). Genehmigungskosten für den regulären Betrieb automatisierter Lkw auf öffentlichen Strassen sind ebenfalls relevant. Dies umfasst etwa umfangreiche Tests und Validierungen, um sicherzustellen, dass die automatisierten Systeme den Sicherheitsstandards entsprechen (Deloitte 2021).

Die Versicherungskosten für fahrerlose Lkw könnten zunächst höher als für konventionelle Fahrzeuge ausfallen, da die neuen Technologien bisher nicht bekannte Risiken mit sich bringen (McKinsey 2018). Nach einer erfolgreichen Markteinführung ist allerdings wegen der mit der Automatisierung sinkenden Unfallkosten auch mit einer Abnahme der Versicherungsprämien im Vergleich zu konventionellen Lkw zu rechnen.

Die Studie von Lee et al. (2023) zeigt, dass automatisierte Lkw trotz hoher Anfangsinvestitionen erhebliche Einsparungen bei den Betriebskosten ermöglichen können, mit einer Reduktion der Gesamtkosten um bis zu 56%. Diese Einsparungen resultieren hauptsächlich aus geringeren Personalkosten und einer verbesserten Kraftstoffeffizienz. Tao et al. (2021) weisen darauf hin, dass automatisierte Lkw auch Chancen zur Kostensenkung bei der Wartung der Fahrzeuge mit sich bringen. Sie betonen, dass die Wartungskosten durch den Einsatz von automatisierten Lkw effizienter geplant und gesenkt werden können, was wirtschaftliche Risiken für Transportunternehmen reduziert. Truck-Platooning-Technologien könnten den Kraftstoffverbrauch um bis zu 10% senken, die Effizienz weiter steigern und die Lieferkosten um bis zu 30% reduzieren (Liu und Meidani 2023; ARE 2021).

Langfristig bieten fahrerlose Lkw erhebliche Vorteile in Bezug auf Effizienz und Kosteneinsparungen. Sie können die Betriebskosten senken und die Effizienz im Frachttransport verbessern, insbesondere auf langen Strecken, wo sie im Vergleich zu konventionellen Lkw längere Einsatzzeiten ermöglichen (BCG 2022; Transport Topics 2023). Trotz der hohen Anfangsinvestitionen stellen fahrerlose Lkw eine vielversprechende Technologie dar, die das Potenzial hat, die Logistik- und Transportbranche nachhaltig zu verändern.

Auslastung und Leerfahrten Strasse

Nach den in ARE (2021) aufgeführten Studien ist das Potenzial zur Verbesserung der Auslastung des Laderaums von Lkw bzw. einer Reduktion von Leerfahrten durch die Automatisierung begrenzt; hier erscheinen andere digitale Anwendungen vielversprechender. Der Wegfall der Fahrerkabine in vollständig automatisierten Lkw schafft Platz für zusätzliche Fracht und bietet neue Gestaltungsmöglichkeiten für das Fahrzeugdesign. Statt der Fahrerkabine können aerodynamische Strukturen eingeführt werden, die den Luftwiderstand und somit den Kraftstoffverbrauch reduzieren. Ebenso kann der gewonnene Raum genutzt werden, um das Ladevolumen zu erhöhen. Diese Designänderungen könnten den Kraftstoffverbrauch um bis zu 4.6% senken (Hahn 2022).

Die Automatisierung von Lkw hat insbesondere das Potenzial, die Betriebszeiten dieser Fahrzeuge zu maximieren. Eine wichtige Entwicklung ist die Routen- und Geschwindigkeitsoptimierung für automatisierte Lkw, die darauf abzielt, Emissions-, Kraftstoffkosten und Transportzeiten zu reduzieren. Diese Optimierungen ermöglichen es den Lkw, effizienter und länger auf der Strasse zu sein, wodurch die gesamte Betriebseffizienz gesteigert wird (Nasri et al. 2018).

Ein weiterer Faktor für die Erhöhung der Einsatzzeiten gegenüber konventionellen Lkw ist die Einführung von Fahrzeugzustandsmanagementsystemen. Diese Systeme helfen dabei, die Planung der Wartung der Fahrzeuge und wirtschaftliche Risiken zu optimieren, was zu einer Reduzierung der Ausfallzeiten und einer Erhöhung der Verfügbarkeit der Fahrzeuge führt (Tao et al. 2021).

Gesamtkostensätze Strasse Güterverkehr

In ARE (2021) findet sich eine Übersicht zu Studien, die sich szenarienbasiert mit den Wirkungen des automatisierten Fahrens im Güterverkehr auf der Strasse beschäftigen. In der Regel werden erhebliche Einsparungen von bis zu knapp 50% der Gesamtkosten errechnet. Auch die neuere Literatur kommt zu ähnlichen Aussagen.

Engholm et al. (2021) verwenden ein nationales Güterverkehrsmodell für Schweden, um die gross angelegte Einführung automatisierter Lkw zu simulieren. Die Untersuchung legt nahe, dass die Einführung von fahrerlosen Lkw abhängig von der Nutzung auf verschiedenen Strecken zu einer signifikanten Reduzierung der Gesamtbetriebskosten im Güterverkehr führen könnte. In einem Szenario mit vollständiger Einführung von automatisierten Trucks, die das gesamte Strassennetz befahren können, würden die jährlichen fahrzeugbezogenen Gesamtkosten im Vergleich zu einem Basisszenario ohne Automatisierung um 1.7 Mrd. € sinken, jedoch die Transportleistung (in Tkm) 22% und die Fahrleistung (in Fzkm) um 35% steigen. Dem gegenüber stellen die Autoren ein Szenario, in dem automatisierte Lkw nur auf Hauptstrecken zwischen Logistikzentren eingesetzt werden können. Hier würden die jährlichen fahrzeugbezogenen Gesamtkosten um 1.2 Mrd. € gegenüber dem Basisszenario sinken. Der Hauptgrund für die Kosteneinsparungen sind die deutlich reduzierten Personalkosten, da bei automatisierten Lkw keine Fahrer mehr benötigt werden. Engholm et al. (2021) verweisen ebenfalls auf frühere Studien, die zeigen, dass auch die Betriebskosten für automatisierte Lkw im Vergleich zu herkömmlichen Lkw um bis zu 40% niedriger sein könnten, hauptsächlich aufgrund der eingesparten Fahrerkosten. Als weitere Faktoren

nennen die Autoren eine erhöhte Kraftstoffeffizienz, höhere Auslastung der Fahrzeuge, geringere Ladezeiten, sowie geringere Unfall- und Versicherungskosten.

In der Studie von Lee et al. (2023) werden die wirtschaftlichen Auswirkungen der Einführung vollautomatisierter Lkw auf die Gesamtkosten (TCO) im Güterverkehr untersucht. Anhand einer Fallstudie aus Südkorea werden in der Studie Kosten-Nutzen-Analysen auf unterschiedliche Szenarien angewandt. Die Ergebnisse zeigen erhebliche Einsparungen bei den Betriebskosten in allen Szenarien, wobei die monatlichen TCO im Basisszenario für verschiedene Lkw-Grössen um 41.7% bis 56.3% sinken (Lee et al. 2023). Selbst im pessimistischsten Szenario wurden erhebliche Kostenreduktionen festgestellt. In der Studie wird hervorgehoben, dass die Einsparung der Lohnkosten für die Fahrzeugführer zwar ein wichtiger Faktor für die Kosteneinsparungen ist, dafür aber neuen Kosten für die notwendige Fernüberwachung (remote operation costs) entstehen.

Die Studie von Deineko et al. (2022) untersucht die Auswirkungen von fahrerlosen, automatisierten Fahrzeugen auf ein Logistiknetzwerk in Deutschland mit Hilfe von MATSim- und Jspit-Simulationen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduzierung der Logistikeinrichtungen von 35 auf 23 die Gesamttransportkosten nicht erhöht, aber zu einem Anstieg der Strassenkilometerleistung um 60% und der CO₂-Emissionen um 54.7% führt. Die wichtigsten Leistungsindikatoren zeigen einen Anstieg der Güterverkehrsnachfrage um 7%, einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs um 55% und eine Verringerung der Transportdurchlaufzeit um 28%. Die Personalkosten entfallen vollständig, aber der Anstieg der Umweltauswirkungen aufgrund des höheren Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen stellt eine grosse Herausforderung dar. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um die Kosten für die Streckenführung und die Wahl des Fahrzeugs zu optimieren, um diese negativen Auswirkungen auf die Umwelt abzumildern.

Kostensätze Schienengüterverkehr

Die Automatisierung bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs im Vergleich zum Strassengüterverkehr. Die Automatisierung hat das Potenzial, die Flexibilität und Zuverlässigkeit des Schienengüterverkehrs erheblich zu steigern. Vollständig automatisierte Züge, die zentral über fortschrittliche Kommunikationstechnologien gesteuert werden, bieten Vorteile in Bezug auf die Anpassungsfähigkeit und Betriebseffizienz. Diese Technologien umfassen unter anderem Hochgeschwindigkeitsinternet (5G), das Internet der Dinge (IoT) und künstliche Intelligenz (KI). Laut einer Studie können solche Technologien die Betriebskosten um bis zu 30% senken (Singh et al. 2021).

Automatisierte Systeme können die Effizienz und Optimierung des Transportlogistikprozesses erheblich verbessern. Durch die Einführung von automatisierten Routingssystemen und Planungssystemen wird die Transportlogistik auf ein neues Niveau gehoben. Diese Systeme ermöglichen es, die Transportkosten um bis zu 20% zu senken und die technischen und technologischen Kapazitäten der Fahrzeuge optimal zu nutzen (Dekhtryaruk et al. 2021).

Eine höhere Automatisierung (GoA) in verschiedenen Segmenten des Schienengüterverkehrs führt zu einer verbesserten Energieeffizienz und Kapazitätssteigerung. Intelligente Güterzüge und automatische Zugsteuerungssysteme können die Energieeffizienz um bis zu 25% steigern und die Betriebskosten um 15% senken (Zeiner et al. 2021). Darüber hinaus ermöglicht die Automatisierung neue Logistikkonzepte und eine verbesserte Netzbildungsfähigkeit im kombinierten Verkehr. Dies umfasst die Anwendung von Flügelkonzepten, bei denen Teilzüge für grosse Versender im Wagengruppen-Verkehr verwendet werden können, sowie den Aufbau von Hub-and-Spoke-Netzwerken. Laut Pollehn et al. (2021) könnten diese Massnahmen die Transportkosten um bis zu 10% reduzieren und die Zuverlässigkeit des Netzwerks um 20% erhöhen. Durch den Einsatz moderner Technologien können Logistikunternehmen ihre Transportprozesse effizienter gestalten und die Kosten um bis zu 15% reduzieren (Müller und Voigtländer 2019).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die (weitere) Automatisierung im Schienengüterverkehr Senkungen der Betriebskosten in Höhe von ca. 10 bis 30% zu erwarten sind.

Zeitkosten im Güterverkehr

Im Gegensatz zum Personenverkehr hat die Automatisierung keinen Effekt auf die Zeitkosten im Güterverkehr. Für die Herleitung makroökonomischer Effekte auf die Zeitkostensätze kann die aktuelle VSS Norm 41 823 herangezogen werden (Tabelle 13). Für leichte Nutzfahrzeuge ist kein Zeitkostensatz festgelegt. Dieser kann auf Basis der gesamten Betriebskosten oder Zahlungsbereitschaften der Kunden für eine frühere Zustellung des Transportguts festgelegt werden.

Zeitkosten im Güterverkehr (CHF/h, Preisstand 2005)

Verkehrsmittel	Alle Verkehrsarten	Binnenverkehr	Importverkehr	Exportverkehr	Transitverkehr
Schwere Nutzfahrzeuge	15.03	27.4	7.8	8.6	3.3
Leichte Nutzfahrzeuge	-	-	-	-	-

Tabelle 13: Zeitkostensätze im Güterverkehr

3.2.2.3 Sharing Güterverkehr

Kostenentwicklung Strasse und Schiene

Aufgrund der Kooperation im Güterverkehr geht ARE (2021) von Kostenreduktionen sowohl für die Strasse als auch Schiene aus (Tabelle 14.) Die Betriebskosten lassen sich aufgrund des Sharings der Ressourcen reduzieren. Durch den hohen Grad des Sharings bzw. der Kollaboration können auf der Strasse zudem die Personalkosten (Wegfall Fahrer/-in) und auf der Schiene die Kosten des Vor- und Nachlaufs reduziert werden.

Veränderung Kostensätze im Güterverkehr aufgrund von Kooperationen ggü. Referenz nach ARE (2021)

Kostenkategorie	Strasse (SNF)	WLK	UKV	ROLA
Personal	-25%	0%	0%	0%

Betrieb	-25%	-25%	-25%	-25%
Energie	0%	0%	0%	0%
Infrastrukturbenützung	0%	0%	0%	0%
Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)	0%	-15%	-20%	-15%
Gesamtkostensatz	-12%	-15%	-18%	-15%

Tabelle 14: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr aufgrund von Sharing/Kooperationen ggü. Referenz (Quelle: ARE 2021)

Das Konzept des Sharing in der Logistik, auch bekannt als kollaborative Logistik, hat sich als bedeutender Trend etabliert, um die Effizienz zu steigern, Kosten zu senken und die Umweltbelastung zu minimieren. Dieser Ansatz beinhaltet, dass mehrere Unternehmen oder Organisationen Ressourcen wie Transportfahrzeuge, Lagereinrichtungen und Lieferwege gemeinsam nutzen. Auch im Bereich des Güterverkehrs bietet Sharing erhebliche Vorteile. In den letzten Jahren hat sich der Fokus auf Sharing-Modelle verlagert, bei denen Ressourcen wie Transportfahrzeuge effizienter genutzt werden. Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass Unternehmen zunehmend Transportanfragen untereinander austauschen, um Überlastungen zu vermeiden und Leerkapazitäten zu nutzen (Gansterer et al. 2022).

Die Entwicklung der Sharing Economy hat neue Ideen für eine kooperative Distributionsstrategie in urbanen Logistiknetzwerken hervorgebracht. Durch die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen können Logistikunternehmen die Effizienz des Distributionsnetzwerks verbessern und Kosten effektiv senken. Eine Studie zeigt, dass eine gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen in einem urbanen Logistiknetzwerk zu einer Reduktion der Transportkosten um bis zu 16%, einer Verringerung der Fahrzeugkilometer um 13% und einer Minderung der CO₂-Emissionen um 12% führen kann (Grote et al. 2023).

Die Effizienz der Transport- und Logistikbranche kann durch den Einsatz moderner Informationstechnologien erheblich gesteigert werden. Echtzeit-Analysen, basierend auf dynamischen Informationen über den Zustand des Logistiknetzwerks, können die Kostenkontrolle in der Logistik verbessern. Standardisierte Dokumentation und direkte vertragliche Beziehungen zwischen den Beteiligten der Logistikkette tragen zur Rationalisierung und Kostensenkung bei. Yekimov (2023) zeigt, dass die Kosten durch die Einführung solcher Technologien um etwa 20% gesenkt werden können.

Kollaborative Logistikmodelle können durch Simulationen und Auktionsmechanismen optimiert werden, um die strategische Transportplanung zu verbessern. Diese Modelle ermöglichen eine flexible und nachhaltige Nutzung von Transportressourcen. In einer Simulation wurde festgestellt, dass durch diese Modelle die Gesamtkosten um 10-15% gesenkt und die Transporteffizienz erheblich gesteigert werden können (Bae et al. 2022).

Sharing in der Logistik stellt eine praktikable Lösung dar, um die Effizienz zu verbessern, Kosten zu senken und Umweltauswirkungen zu reduzieren. Besonders im Güterverkehr können durch das Teilen von Ressourcen und erhöhter Kapazitäten signifikante Verbesserungen erzielt werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung sind sorgfältige Planung, gerechte Kostenverteilungsvereinbarungen und aktive Teilnahme sowohl des privaten als auch des öffentlichen Sektors erforderlich.

3.2.2.4 Interdependenzen Digitalisierung und Elektrifizierung im Güterverkehr

Der Güterverkehr, insbesondere der durch privatwirtschaftlich agierende Akteure geprägte Strassengüterverkehr, ist stark kostenorientiert. Dementsprechend werden Neuerungen der Digitalisierung bereitwillig aufgegriffen, wenn sie Kostensenkungspotenziale bieten. Hierzu zählt künftig auch die Automatisierung des Güterverkehrs, die auf Einsparungen beim Fahrpersonal abzielt. Mit der Elektrifizierung des Güterverkehrs können in naher Zukunft ebenfalls Kostensenkungspotenziale realisiert werden. Beide Trends, die Digitalisierung und die Elektrifizierung, gehen zeitlich miteinander einher. Während die fortschreitende Digitalisierung eine breite technologische Entwicklung ist, die auf nahezu alle Lebensbereiche wirkt, ist der Ausgangspunkt für die Elektrifizierung des Güterverkehrs ein konkretes politisches Ziel: die von der Politik angestrebte Dekarbonisierung des Sektors.

Die Digitalisierung im weiteren Sinne kann dazu beitragen, Hürden bei der Elektrifizierung des Güterverkehrs zu überwinden. Aufgrund des Kostensenkungspotenzials beider Trends ist für die Zukunft ein sowohl automatisierter als auch elektrifizierter Güterverkehr zu erwarten. Dies spiegelt auch die gesichtete Literatur wider, die analog zum Personenverkehr entsprechende Szenarien-Analysen aufweist. Es werden aber keine direkten Interdependenzen zwischen Automatisierung und Elektrifizierung bzw. keine konkreten Rückwirkungen der Elektrifizierung auf die Digitalisierung festgestellt.

3.2.2.5 Herausforderungen/Erkenntnislücken Digitalisierung Güterverkehr

Die Digitalisierung bzw. Automatisierung bietet grosse Chancen für den Güterverkehr, bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich, die adressiert werden müssen. Zu diesen Herausforderungen zählen sich wahrscheinlich verändernde Geschäftsökosysteme sowie Unsicherheiten in der weiteren technologischen Entwicklung und deren Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit (Pernestål et al. 2020). Ein aktuell bedeutendes Problem ist der Fachkräftemangel. Einerseits kann der Bedarf an qualifizierten Fahrern durch bessere digital gesteuerte Planungen sinken. Andererseits sind die Anforderungen an das Berufsbild mit steigender Digitalisierung höher als früher. Hierfür müssen adäquate Umschulungsmassnahmen ergriffen werden (Tazhiyeva et al. 2023). Zudem stellt die Integration verschiedener Datenquellen und die Bewältigung der damit verbundenen Datenmengen noch eine Herausforderung dar.

Noch bestehende Erkenntnislücken betreffen ökologische und soziale Aspekte einer weitgehenden Automatisierung des Güterverkehrs (Verdeş und Mironescu 2023). Ausserdem fehlt es an Verhaltensforschung, insbesondere wie Fahrer und andere Mitarbeiter mit intelligenten Transportsystemen interagieren und wie dies die Gesamteffizienz beeinflusst (Johnson und Walker 2023).

Übersicht wichtigste Stellschrauben im Güterverkehr			
Aspekt	Bandbreite der Wirkung (im Vgl. zu konv. Lkw)	Wichtigste Quellen	Land
Automatisierung			
Leerfahrten Strasse	0%		

	Keine direkten Auswirkungen	Stölzle et al. 2018; Bruns et al. 2020	DE, AT, CH
Auslastung Strasse	0%		
	Keine direkten Auswirkungen	Stölzle et al. 2018; Bruns et al. 2020	DE, AT, CH
Investitionskosten Fahrzeug Strasse	+33% bis +100%	Fortune Business Insights 2023, BCG 2022	US
Fahrzeugkosten Strasse	-47% bis -23%		
	-23% (Betriebskosten Lkw)	Liu und Zhao 2019	US
	-47% (Betriebskosten Lkw)	Nowak et al. 2018	EU
Treibstoffkosten Strasse	-21% bis -2%		
	-2% bis 21%	Tsugawa et al. 2016	DE, JP, US
	-2% bis -13%	Janssen et al. 2015	EU
	-10% bis -15%	Bullis 2011	US
	-2% bis -4%	MAN et al. 2019	DE
	-4.6% durch Wegfall des Fahrerhauses	Hahn 2022	n.a.
Personalkosten Strasse	-60% bis -30%		
	-30% bis -60%	Del Duce et al. 2012	CH
	-50%	Flämig et al. 2020	DE
	-40%	Engholm et al. 2021, Lee et al. 2023	SWE, KR
Gesamtkosten Strasse	-75% bis -9%		
	-22% bis -40% (Platooning, fahrerlos)	Keese et al. 2018	US
	-9% bis -23% (Platooning, fahrerlos)	Flämig et al. 2020	DE
	bis -75% (KEP, letzte Meile)	Flämig et al. 2020	DE
	bis -37% (LEH, letzte Meile)	Flämig et al. 2020	DE
	- 42% bis -56% (je nach Fahrzeugklasse)	Lee et al. 2023	KR
Leerfahrten Schiene	Keine quantitativen Angaben		
Auslastung Schiene	Keine quantitativen Angaben		
Personalkosten Schiene	Senkung Fahrerkosten (nicht quantifiziert)	Bruns et al. 2020	CH
Gesamtkosten Schiene	-45.4% bis +3.4%		
	-5% bis -10% (im UKV)	Weidmann et al. 2017	CH
	+3.4% bis -34.7% (im WLV)	Bruns et al. 2020	CH
	-1.8% bis -45.4% (im UKV)	Bruns et al. 2020	CH
	-30% (Betriebskosten)	Singh et al. 2021	n.a.
	-20% (Betriebskosten)	Dekhtyaruk et al. 2021	n.a.
Sharing			
Auslastung und Leer- fahrten	-22% bis 0%		

Strasse	Zunahme Auslastung/Abnahme Leerfahr- ten (nicht quantifiziert)	Stölzle et al. 2018	DE, AT, CH
	Zunahme Auslastung/Abnahme Leerfahr- ten (nicht quantifiziert)	Deloitte 2017	Global
	-22% (Leerfahrten)	UBA 2023b	DE
	-13% (Fzkm)	Yang und Wang 2022	n.a.
Kosten Strasse	Keine quantitativen Angaben		
Kosten Schiene	Keine quantitativen Angaben		
Elektrifizierung			
Anschaffungskosten Lkw	+20% bis +40%	Reichmuth et al. 2021	n.a.
Betriebskosten Lkw	-10 bis -15%	Peng et al. 2023	USA

Tabelle 15: Übersicht der für die Operationalisierung der Szenarien relevantesten in der Literatur zu finden - den Wirkungsstärken für den Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, aktualisiert/ergänzt)

3.2.3 Auswirkungen der Automatisierung und Elektrifizierung auf die Infrastruktur

Der folgende Abschnitt fasst die zentralen Ergebnisse der Literaturrecherche zu den erwarteten Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen sowie weiteren Digitalisierungs- und Elektrifizierungselementen auf die Infrastruktur zusammen. Eine inhaltliche Trennung zwischen Personen- und Güterverkehr ist hierbei aufgrund der gemeinsamen Nutzung der entsprechenden Infrastrukturen weitestgehend nicht sinnvoll. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der flächendeckenden Elektrifizierung des Strassenverkehrs unterschiedliche Ladeinfrastrukturen für PW und Lkw erforderlich sind. Für den Langstreckenverkehr benötigen PW in der Regel Schnellladestationen, die kurze Ladezeiten ermöglichen. Im Gegensatz dazu erfordert der Lkw-Fernverkehr Megawatt-Charger, um die deutlich grösseren Batteriekapazitäten in akzeptablen Zeiten laden zu können. Die unterschiedlichen Anforderungen beider Segmente spiegeln sich also in spezialisierter Ladeinfrastruktur wider, die den jeweiligen Charakteristika des PW- und Lkw-Verkehrs gerecht wird (Bauer et al. 2021).

3.2.3.1 Leistungsfähigkeit der Strasseninfrastruktur aufgrund Automatisierung und Elektrifizierung der Fahrzeuge

Die fortschreitende Automatisierung und Elektrifizierung von Fahrzeugen verspricht langfristig bedeutende Verbesserungen der Leistungsfähigkeit der Strasseninfrastruktur. Diverse internationale Studien haben untersucht, welche Auswirkungen die Einführung automatisierter Fahrzeuge auf die Kapazität und Effizienz des Verkehrsnetzes haben könnte. In ARE (2021) wurde angenommen, dass mit der Automatisierung die Strassenkapazität steigt (Tabelle 16). Diesen Steigerungen der dynamischen Strassenkapazität liegen etwa verringerte Abstände zwischen automatisierten Fahrzeugen und über die Gesamtflotte optimierte Halte- und Abbiegevorgänge zugrunde (ARE 2021).

Faktoren zur Anpassung der Kapazität im NPVM in ARE (2021)

Strassentypen	Szenario 0 - Referenz	Szenario 1 - Automatisierung	Szenario 2 - Sharing	Szenario 3 - Servicewelt
Autobahn		1.76	1	1.76

Autostrasse	Werte gemäss	1.65	1	1.65
Hauptverkehrsstr. ausserorts	NPVM Referenz	1.65	1	1.65
Hauptverkehrsstr. innerorts		1.4	1	1.4
Übrige Strasse ausserorts		1.65	1	1.65
Übrige Strasse innerorts		1.4	1	1.4
Anschlussstellen		1	1	1
Autobahn Ausland		1.76	1	1.76
Hauptverkehrsstr. Ausland		1.65	1	1.65
übrige Strasse Ausland		1.4	1	1.4
Fähre, Autozug, Autoverlad		1	1	1

Tabelle 16: Zentrale Stellschrauben des NPVM Strasseninfrastrukturkapazität (Quelle: ARE 2021)

Frühere Studien zeigen, dass die Einführung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge zu erheblichen Kapazitätssteigerungen und Stauverringerungen führen kann. Beispielsweise schätzen Fagnant und Kockelman (2015), dass sich die Kapazität bei einer 90-prozentigen Penetrationsrate auf Autobahnen verdoppelt und Staus um 60% reduziert werden können, trotz eines Anstiegs der Fahrleistung (in Fahrzeugkilometern) um 9%. Im urbanen Raum erwarten sie eine Stauverringerung von etwa 15%. Klausner und Irtenkauf (2013) simulierten nahezu eine Verdoppelung der Kapazität durch den flächendeckenden Einsatz adaptiver Geschwindigkeitsregelanlagen (ACC) auf Autobahnen. Fitzpatrick et al. (2017) betonen die Variabilität der Kapazitätssteigerungen in verschiedenen Studien, die zwischen 40 und 400% liegen. Friedrich (2015) prognostiziert konservativere, aber dennoch signifikante Steigerungen von 78% bei rein automatisiertem Verkehr auf Autobahnen. Andere Studien, wie Milakis et al. (2017) und Kohli und Willumsen (2016), schätzen geringere Zuwächse. Im Bereich des Güterverkehrs erwarten Flämig (2015) und Janssen et al. (2015) eine Verdopplung der Strasseninfrastrukturkapazität durch effizientere Flächennutzung und gleichmässige Geschwindigkeiten, und berechnen im Platooning-Szenario eine Reduktion des Flächenverbrauchs um 46%.

Aktuelle Studien zeigen ebenfalls eine Strassenkapazitätssteigerung durch die Automatisierung des Verkehrs. Park et al. (2021) fanden, dass eine zunehmende AV-Durchdringung den Verkehrsfluss verbessert und die Strassenkapazität um bis zu 40% erhöht. Die durchschnittliche Verspätungszeit wurde um bis zu 31% reduziert, besonders auf Strecken mit drei oder vier Fahrspuren. Das städtische Strassennetz könnte bei einer 100-prozentigen AV-Durchdringung 40% mehr Verkehr aufnehmen.

Kim et al. (2021) untersuchten die Auswirkungen der Einführung vernetzter und automatisierter Fahrzeuge (AV und CAV) auf Autobahnkorridore in Virginia (USA). Im grundlegenden Autobahn-Testnetz, das einfache Autobahnabschnitte ohne komplexe Verkehrssituationen simuliert, erhöhten AVs die Strassenkapazität um 29%, während CAVs eine Steigerung von 91% erreichten. Im zusammenführenden Autobahn-Testnetz, das komplexere Verkehrssituationen mit zusammenführenden Fahrspuren

repräsentiert, konnten AV die Kapazität um 48% und CAV um 60% im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen erhöhen.

Eine weitere Untersuchung (Liu und Fan 2021) verwendet ein Mikrosimulationstool zur Analyse der Auswirkungen von CAV auf die Autobahnkapazität. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kapazität der Autobahnen mit höheren CAV-Durchdringungsraten und Geschwindigkeitsbegrenzungen zunimmt. Bei einer CAV-Durchdringung von 100% steigt die Kapazität von 4'859 Fahrzeugen pro Stunde bei 80 km/h auf 6'346 Fahrzeuge pro Stunde bei 120 km/h. Der rein manuelle Fall dient als Basisfall mit einer nominalen Kapazität von etwa 2'100 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen. Bei einem Durchdringungsgrad von 100% mit CAV kann die Autobahnkapazität bei Geschwindigkeitsbegrenzungen von 120, 104, 90 bzw. 80 km/h um 102.8%, 85.7%, 80.9% bzw. 69.5% erhöht werden.

Zhang et al. (2021) bewerten die Auswirkungen verschiedener Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge auf die Strassenkapazität, die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Reisezeit. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strassenkapazität um mehr als 30% erhöht und die Reisezeit um mehr als 23% reduziert werden kann, wenn die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge 100% beträgt. Die Kapazität beginnt sich deutlich zu verbessern, wenn die Durchdringungsrate 60% übersteigt, und erreicht bei einer 100-prozentigen Durchdringung eine maximale Steigerung von rund 33%. Die durchschnittliche Reisezeit beginnt zu sinken, wenn die Durchdringungsrate 20% übersteigt, und kann bei voller Durchdringung um 23.38% reduziert werden.

Zusammenfassend zeigt die bisherige Literatur, dass die Einführung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge das Potenzial hat, die Leistungsfähigkeit der Strasseninfrastruktur erheblich zu steigern und Staus zu verringern, wobei die genauen Effekte stark von den spezifischen Annahmen und Rahmenbedingungen abhängen. Studien zeigen Kapazitätserhöhungen von 30-91%, was zur Reduzierung von Staus und zur Verbesserung des Verkehrsflusses beiträgt. Von einer Elektrifizierung des Strassenverkehrs sind im Gegensatz dazu keinerlei Effekte auf die Kapazitäten der Infrastruktur zu erwarten.

3.2.3.2 Leistungsfähigkeit der Infrastruktur aufgrund Digitalisierung des Verkehrsmanagements

Zukünftig wird nicht nur durch die Automatisierung der Fahrzeuge, sondern auch durch neue digitale Technologien eine effizientere Nutzung der Verkehrsinfrastruktur erwartet. Diese Technologien führen zu einer besseren Ausnutzung der Strassenfläche, einem geringeren Bedarf an Verkehrsinfrastruktur (z.B. Ampeln, Beschilderung, Leitplanken) und flexibleren Nutzungsmöglichkeiten der Verkehrsinfrastruktur (z.B. durch dynamische Spurzuweisungen). Dies könnte den Bedarf an Verkehrsflächen reduzieren (Stead und Vaddadi 2019). Der Einsatz dynamischer Ampelschaltungen könnte beispielsweise zur Verflüssigung des Verkehrs beitragen (Pau et al. 2018).

Eine neuere Studie von Rakow et al. (2021) untersucht die systemweiten Effekte intelligenter Infrastrukturkonzepte auf den Modal Split, die Reisezeiten und die zurückgelegten Entfernungen im Raum Düsseldorf. Mithilfe mikroskopischer Simulationen

(SUMO) zur Ermittlung der Verkehrsflusskapazitäten an signalisierten Kreuzungen und mesoskopischer Simulationen (MATSim) zur Untersuchung langfristiger Effekte wurden verschiedene Szenarien mit variierenden Flusskapazitäten analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass erhöhte Flusskapazitäten an Kreuzungen zwar kurzfristig zu einer Reduzierung der Reisezeiten, langfristig jedoch zu einem Rebound-Effekt führen können, der die PW-Nutzung und die Gesamtfahrleistung erhöht.

Auch Bruns-Berentelg und Gilliard (2020) betonen, dass smarte Ampelsysteme, wartende PW registrieren und die Schaltung bedarfsgerecht optimieren können. Diese Systeme reduzieren zwar Verkehrsstaus, fördern aber den MIV, was zu einem erhöhten Stellplatzbedarf und einem Rebound-Effekt führen kann.

KI und maschinelles Lernen spielen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Verkehrssteuerung. Diese Technologien ermöglichen die Vorhersage von Verkehrsflüssen und die dynamische Anpassung von Verkehrsregelungen in Echtzeit. Die Studie von Olayode et al. (2020) geht davon aus, dass durch den Einsatz von KI die Effizienz von Verkehrsmanagementsystemen erheblich gesteigert werden kann, indem Verkehrsstaus vorhergesagt und vermieden werden. Das Ausmass dieser Steigerung ist jedoch schwer abzuschätzen.

Zusammenfassend zeigt die Literatur, dass digitale Technologien und intelligente Verkehrsmanagementsysteme das Potenzial haben, die Effizienz der Verkehrsinfrastruktur erheblich zu verbessern. Durch die Optimierung von Verkehrsflüssen und die flexible Nutzung von Verkehrsflächen können Reisezeiten reduziert und die Kapazität erhöht werden.

3.2.3.3 Infrastrukturanpassungen

Elektrifizierung

Die Bereitstellung einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur ist ebenfalls entscheidend. Das Whitepaper "Charging Up America: Assessing the Growing Need for U.S. Charging Infrastructure Through 2030" schätzt, dass in den USA bis 2030 2.4 Mio. öffentliche und Ladesäulen am Arbeitsplatz benötigt werden, um einen erwarteten EV-Bestand von 26 Mio. zu unterstützen. Dies umfasst 1.3 Mio. Ladestationen am Arbeitsplatz, 900'000 öffentliche Level-2-Ladestationen und 180'000 Gleichstrom-Schnellladestationen (Bauer et al. 2024). Die Höhe der dafür benötigten Investitionen in öffentliche Ladeinfrastruktur wird auf 28 Mrd. US-Dollar geschätzt.

Im nationalen Kontext soll der Aufbau der Ladeinfrastruktur in den nächsten 10 bis 15 Jahren stattfinden (BFE 2023a). Mindestens 3'400 Schnell-Ladestationen werden bis 2035 benötigt. Relevant ist hierfür neben den Ladestationen selbst auch der Ausbau der Stromversorgung. Lastspitzen müssen getragen werden können. Der Strombedarf 2050 wird für Personen- und Güterverkehr auf 17 TWh geschätzt. Es ist damit zu rechnen, dass der Ausbau im Jahr 2050 weitestgehend abgeschlossen sein wird.

Die Infrastrukturkosten haben Ecoplan (2024) für das Jahr 2021 analysiert. Im Personenverkehr belaufen sich die Kosten für elektrische Fahrzeuge auf 97 Mio. CHF (0.02%

der gesamten Infrastrukturkosten). Im Güterverkehr sind es 5.9 Mio. CHF (0.003% der gesamten Infrastrukturkosten).

Zhang et al. (2024) analysieren die Nutzung von Shared Autonomous Electric Vehicles (SAEV) in 374 kleinen und mittelgrossen urbanen Gebieten in den USA und fokussieren sich dabei auf Flotten- und Infrastrukturbedarfe. Die Studie zeigt signifikante räumliche Unterschiede in der SAEV-Nutzung und -Infrastruktur, die durch regional unterschiedliche Strassennetze und Reisegewohnheiten bedingt sind. Untersucht wurden dabei zwei Arten von Ladestationen: Level-2-Stationen, die Wechselstrom-Laden mit höheren Ausgangsleistungen bieten, und Level-3-Stationen, die durch Gleichstrom-Schnellladegeräte kürzere Ladezeiten ermöglichen. Level-3-Ladesäulen erweisen sich als effizienter, da sie weniger Stationen benötigen und mehr Fahrten pro Fahrzeug ermöglichen als Level-2-Ladesäulen. Diese Erkenntnisse sind entscheidend, um die Leistung von SAEV-Flotten zu optimieren und nachhaltige Transportsysteme zu fördern.

Die zunehmende Elektrifizierung, insbesondere durch rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge (BEV), erfordert Anpassungen an der Energie-Infrastruktur. Prognosen zeigen, dass die Elektrifizierung des Transportsektors die internationale Nachfrage nach Elektrizität in den kommenden Jahrzehnten verdreifachen könnte (Deloitte Insights 2023). Um diese erhöhte Nachfrage zu bewältigen und die Netzstabilität zu gewährleisten, sind umfangreiche Investitionen in Stromnetz-Upgrades und -erweiterungen notwendig, einschliesslich der Modernisierung bestehender Infrastruktur und des Baus neuer Leitungen und Umspannwerke (Deloitte Insights 2023). Gleichzeitig können BEV zur Stabilisierung des Stromnetzes genutzt werden. Insbesondere bei der Umstellung auf erneuerbare Energien besteht das Risiko, dass es saisonal Stromflauten oder Lastspitzen kommt. Diese können durch BEV abgefedert werden, indem sie bspw. als Speicher verwendet werden können (Bidirektionales Laden) oder über Smart Charging dann geladen werden, wenn es zu Lastspitzen im Stromnetz kommt. Diese Mechanismen werden unter dem Begriff «Vehicle-to-grid» (V2G) zusammengefasst (Štogl et al. 2024).

Digitalisierung

Die Digitalisierung des Verkehrs kann mit Anpassungen der Verkehrsinfrastruktur einhergehen. Einerseits kann die Einführung von Sharing-Angeboten und der Rückgang des privaten PW-Besitzes Potenziale für eine effizientere Nutzung vorhandener Flächen bieten, andererseits können aber auch neue Anforderungen an die Infrastruktur entstehen.

Benz (2021) stellt verschiedene bauliche Massnahmen zur Umsetzung eines aktiven, umweltsensitiven Verkehrsmanagements auf Basis der Digitalisierung vor, unterteilt in Umbau und Neubau. Der Umbau umfasst Massnahmen wie die Einrichtung von Busspuren, die Beschleunigung des ÖV, flexible Fahrspurmöglichkeiten, Zuflusssteuerung und Umleitungsmöglichkeiten für Fahrzeuge, elektronische Wechselverkehrszeichen, Anpassung von Lichtsignalanlagen sowie spezielle Liefer- und Logistikzonen. Zudem wird der Aufbau von Paketverteilboxen, einer Infrastruktur für E-Mobilität, barrierefreies Universal Design und der Ausbau von Fahrradwegen und Abstellmöglichkeiten für Fahrräder berücksichtigt. Der Neubau umfasst den Ausbau von

Netzwerken zur Sensorik und Datenübermittlung, die Errichtung von Mobilitätszentren und Flächen für die Sharing-Economy sowie den Aufbau von Güterverkehrszentren und Logistik-Hubs für die letzte Meile. Weitere Massnahmen sind die Entwicklung von Fahrwegen für automatisiertes Fahren und neue ÖV-Verkehrsmittel sowie die Schaffung von Parkplätzen in der Peripherie und der Ausbau von Park-and-Ride-Angeboten. Diese Massnahmen sollen durch die Digitalisierung des Verkehrsmanagements eine effizientere, umweltfreundlichere und nutzerfreundlichere Mobilitätsinfrastruktur schaffen.

Tengilimoglu et al. (2023) betonen die Notwendigkeit, die physische Strasseninfrastruktur für automatisierte Fahrzeuge anzupassen, indem sie für die Automatisierung relevante Elemente wie Strassenverläufe, Seitenstreifen und Notfallbuchten identifizieren. Sie unterstreichen die Bedeutung von Strassenmarkierungen, Schildern und Kreuzungslayouts sowie die Notwendigkeit einer internationalen Standardisierung und weiterer Forschung, um diese Elemente für den Betrieb autonomer Fahrzeuge zu optimieren. Die Überprüfung hebt auch potenzielle Herausforderungen für bestehende Strukturen wie Brücken und Tunnel hervor.

Im Falle von Shared Autonomous Vehicles (SAV) zeigt eine Studie aus Austin, Texas, dass die Auswahl und Dichte von Pick-up- und Drop-off-Standorten (PUDO) entscheidend für die Sicherheit, den Komfort und die Qualität der SAV-Dienste sind. Die Platzierung und Dichte der PUDO-Standorte haben einen grossen Einfluss auf die Effizienz und Nutzung von SAV. Weniger, aber strategisch günstig platzierte Haltepunkte, können die Gesamtzahl der benötigten Plätze reduzieren und die Nutzung der Fahrzeuge effizienter gestalten. Eine Modellierung in der Simulationsplattform POLARIS ergab, dass die Platzierung von PUDO aller drei Blocks anstatt an jedem Block zu einer Erhöhung der benötigten Plätze an jedem PUDO-Standort führt, jedoch die Gesamtanzahl der benötigten Plätze um 40% reduziert und die SAV-Nutzung um 6% verringert (Hunter et al. 2022). Silva et al. (2023) untersuchen ebenfalls die zukünftige Nutzung von SAV im urbanen Raum und entwickeln eine Methode zur Berechnung der Nachfrage und zur Lokalisierung von Pick-up-Punkten. Die Studie betont die Notwendigkeit, städtische Flächen für SAV-Dienste bereitzustellen, um Sicherheit und Komfort zu gewährleisten und den Verkehr zu entlasten.

Pudasaini et al. (2021) untersuchen die Auswirkungen automatisierter Lkw-Technologien auf Infrastrukturelemente wie Strassenschilder, Parkplätze und eigene Fahrspuren. Sie empfehlen gut sichtbare Strassenschilder und Markierungen sowie V2I-Konnektivität. Bei hohen Adoptionsraten bieten sich die Einführung eigener Fahrspuren an. Die Infrastruktur für Wartung und Inspektion muss aufgerüstet werden, und es sind weitere strassenseitige Geräte wie V2I-Technologie und 5G-Antennen erforderlich.

3.2.3.4 Herausforderungen/Erkenntnislücken Auswirkungen der Digitalisierung und Elektrifizierung auf die Infrastruktur

Die fortschreitende Digitalisierung und Elektrifizierung im Verkehrssektor birgt erhebliches Potenzial, ist aber auch mit Herausforderungen hinsichtlich der Gestaltung und Anpassung der Infrastruktur verbunden. Obwohl zahlreiche Studien den Nutzen

und die Machbarkeit dieser Technologien untersuchen, bleiben viele Fragen und Unsicherheiten bestehen. Insbesondere die langfristigen Potenziale alternativer Flächennutzungen und die Anforderungen an geeignete Infrastrukturen sind noch nicht abschliessend geklärt. Konkrete und belastbare Aussagen zu den Infrastrukturkosten fehlen weitgehend, und in der Literatur besteht bisher wenig Konsens über diese langfristigen Potenziale sowie die spezifischen Anforderungen an die Infrastruktur.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Digitalisierung das Potenzial hat, die Effizienz und Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur erheblich zu steigern. Es herrscht Einigkeit darüber, dass die erwarteten Kapazitätssteigerungen stark von den Penetrationsraten der Automatisierungsfunktionen sowie von der betrachteten räumlichen Situation und Durchschnittsgeschwindigkeit abhängen.

Trotz des hohen Potenzials digitaler Technologien bestehen noch erhebliche Herausforderungen und Erkenntnislücken, insbesondere hinsichtlich der langfristigen Wirkungen, der anfallenden Kosten und der spezifischen Infrastrukturanforderungen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen und die Infrastruktur für eine digitale und automatisierte Zukunft zu gestalten, sind umfassende und koordinierte Forschungsanstrengungen sowie eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Industrie und Wissenschaft erforderlich.

Tabelle 17, die ARE (2021) ergänzt und erweitert, fasst die wesentlichen Einflussfaktoren von Automatisierung, Sharing und Dekarbonisierung auf die Verkehrsinfrastruktur zusammen.

Übersicht der relevantesten in der Literatur zu findenden Wirkungsstärken hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur

Aspekt	Bandbreite der Wirkung	Quellen	Land	Kommentar
Kapazitätsänderungen durch automatisierte Fahrzeuge	Anstieg zwischen 40% bis 400%	Metastudie von Fitzpatrick et al. 2017, Ecoplan 2018	n.a./diverse	Annahmen oftmals nicht spezifiziert, teilweise unterschiedliche Annahmen zu Durchdringungsraten
Kapazitätsänderungen auf Autobahnen	Anstieg zwischen 30% bis 100%	Friedrich 2015, Krause et al. 2017, Klausner und Irtenkauf 2013, Dennisen et al. 2016, Perret et al. 2018, Axhausen et al. 2020	n.a./diverse	-
Kapazitätsänderungen im städtischen Umfeld	Anstieg zwischen 15% bis 30%	Friedrich 2015, Dennisen et al. 2016, Fischer et al. 2018, Perret et al. 2018	n.a./diverse	-
Kapazitätsänderungen auf Landstrassen/Nationalstrassen	Anstieg zwischen 0% bis 30%	Friedrich 2015, Dennisen et al. 2016, Perret et al. 2018, Axhausen et al. 2020	n.a./diverse	-

Kapazitäts-änderungen durch vernetzte Fahrzeuge (CAV)	29% Steigerung durch AV, 91% durch CAV	Kim et al. 2021	US	Höhere Steigerungen durch CAV im Vergleich zu AV
Kapazitäts-änderungen durch adaptives Verkehrsmanagement	nahezu Verdoppelung der Kapazität	Klausner und Irtenkauf 2013	DE	Einsatz adaptiver Geschwindigkeitsregelanlagen (ACC) auf Autobahnen führt zu hohen Kapazitätssteigerungen.
Kapazitäts-änderungen bei Kreisverkehren	Erhöhung der Kapazität um 20% bei 40% AV-Durchdringung	Boualam et al. 2021	HU	Untersuchung der Auswirkungen von AV auf Kreisverkehre.
Kapazitäts-änderungen an signalisierten Kreuzungen	Erhöhung um bis zu 45%	Adebisi et al. 2022	US	Untersuchung der Vorteile von CAV an signalisierten Kreuzungen.
Kapazitätssteigerungen im Strassenverkehr	Verbesserung um mehr als 30%, Reduktion der Reisezeit um mehr als 23%	Zhang et al. 2020	US	Untersuchung der Auswirkungen verschiedener AV-Durchdringungsraten.
Effizienzsteigerungen durch vernetzte Fahrzeuge	Verbesserung des Verkehrsflusses und der Kapazität um bis zu 40%	Park et al. 2021	US	Untersuchung der Auswirkungen von AV-Durchdringung auf städtische Strassennetze.
Flächenwirkung: ruhender Verkehr im PV	Reduktion von 67–94% der Parkplatzstellflächen im Strassenraum	Metastudie von Milakis et al. 2017, ITF 2015	n.a./diverse; PT	Resultate dürften nur für den urbanen Raum gelten.
Flächenwirkung: ruhender Verkehr im GV	Reduktion der Flächen für Park- und Rastplätze; keine quantitativen Angaben verfügbar	Fitzpatrick et al. 2017	n.a.	-
Infrastruktur-anpassungen für Sharing-Fahrzeuge	Flächenbedarf für Ein- und Ausstiegsszonen; keine quantitativen Angaben verfügbar	Stead und Vaddadi 2019, ITF 2020, Ecoplan 2018	diverse; FR, CH	-
Infrastruktur-anpassungen im Güterverkehr	Entstehung grosser Distributionszentren (Hubs) in der Nähe von urbanen Gebieten; keine quantitativen Angaben verfügbar	Deloitte 2017, Aboulkacem und Combes 2020	diverse; FR	-
Anpassungen der Infrastruktur für automatisierte Lkw	Auswirkungen automatisierter Lkw-Technologien auf Infrastrukturkomponenten	Pudasaini et al. 2021	Global	Empfehlungen für V2I-Konnektivität und spezifische Infrastrukturanpassungen.

Machbarkeit von Lkw-Platooning	Herausforderungen durch Steigungen, Tunnel und Winterbedingungen	Metallinos Log 2021	NO	Untersuchung der Machbarkeit von Lkw-Platooning auf hochstandardisierten Strassen.
Effizienzsteigerung durch digitale Technologien	Verbesserte Nutzung der Strassenfläche, Reduktion der Reisezeiten	Rakow et al. 2021	DE	Langfristige Effekte auf den Verkehrsfluss und potenzielle negative Nebenwirkungen müssen berücksichtigt werden.
Effizienzsteigerung durch smarte Ampelsysteme	Smarte Ampelsysteme können Verkehrsstaun reduzieren, aber auch den MIV begünstigen	Bruns et al. 2020	DE	Untersuchung der räumlichen Auswirkungen smarter Ampelsysteme.
Anpassung der städtischen Infrastruktur	Ein- und Ausstiegsszonen für Sharing-Fahrzeuge, Anpassung von Bushaltestellen	Stead und Vaddadi 2019	Global	Notwendigkeit spezifischer Anpassungen für die Integration neuer Technologien in städtischen Umgebungen.
Anpassung der physischen Infrastruktur für AV	Notwendigkeit von Standardisierung und weiterer Forschung zur Optimierung von Infrastruktur für AV	Tengilimoglu et al. 2023	Global	Untersuchung der Anpassung der physischen Strasseninfrastruktur für AV.
Reduktion des Verkehrs durch SAV	Nutzung von SAVs zur Reduktion des Verkehrs während Stosszeiten	Hunter et al. 2022	US	Untersuchung der Effekte von PUDO-Standorten und -Dichten auf den SAV-Betrieb.
Pick-up-Punkte für SAV	Zukünftige Nutzung von SAV im urbanen Raum und Entwicklung von Pick-up-Punkten	Silva et al. 2023	Global	Notwendigkeit, städtische Flächen für SAV-Dienste bereitzustellen.
Ladeinfrastruktur für SAEV	Untersuchung der Effizienz von Level-3-Ladegeräten im Vergleich zu Level-2-Ladegeräten	Zihe Zhang et al. 2022	US	Nutzung von SAEV in kleinen und mittelgrossen urbanen Gebieten.
Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge	Notwendigkeit erheblicher Investitionen in öffentliche Ladeinfrastrukturen	Bauer et al. 2021	US	Bewertung der wachsenden Anforderungen an Ladeinfrastruktur für Steckerfahrzeuge.

Tabelle 17: Übersicht der relevantesten in der Literatur zu findenden Wirkungsstärken hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur (Quelle: ARE 2021, aktualisiert/ergänzt)

3.3 Indirekte/Sekundäre Wirkungen: Gesundheit und Umwelt

3.3.1 Personenverkehr

Unfälle

In ARE (2021) wurde aufgezeigt, dass 90% der Strassenunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Durch vollständige Fahrzeugautomatisierung könnten Unfälle um 46 bis 90% reduziert werden, wobei das grösste Potenzial auf Autobahnen liegt. Eine Teilautomatisierung unter SAE-Level 4 kann das Unfallrisiko erhöhen, und eine Reduktion der Unfälle wird erst ab einem Anteil von 40% vollautomatisierter Fahrzeuge erwartet. Technische Fehler und Hackerangriffe bleiben Risiken. Im Schienenverkehr kann Automatisierung ungesicherte Rangierfahrten um 70% reduzieren. Das Teilen von Fahrten beeinflusst das Unfallaufkommen nicht, führt aber zu einer Verlagerung vom Langsamverkehr auf automatisierte Fahrten, wodurch der Gesundheitsnutzen um ca. 0.1 Mrd. CHF sinkt. Hierbei ist noch nicht die neue Studie zu den externen Kosten und Nutzen berücksichtigt (Ecoplan und INFRAS 2024).

Unsere neuen Erkenntnisse zeigen ebenfalls signifikante Auswirkungen der Automatisierung auf die Gesundheit, insbesondere in Bezug auf Unfallrisiken. Carreyre et al. (2024) schätzen, dass automatisierte Fahrzeuge die Unfallraten deutlich senken könnten, indem Konflikte, die ohne eine Reaktion der Verkehrsteilnehmer zu einer Kollision führen würden, auf Autobahnen um 82% bis 92% reduziert werden. Dies übertrifft die früheren Schätzungen in ARE (2021). Zudem wird durch die Vermeidung menschlicher Fehler eine 18-prozentige Reduktion von Kollisionen erwartet, was mit den vorherigen Erkenntnissen vergleichbar ist, die menschliches Versagen als Hauptursache für 90% der Unfälle identifizieren. Ein zusätzlicher Vorteil der Automatisierung, den Carreyre et al. (2024) hervorheben, ist die Reduzierung der Fahrdynamik und der Aufprallzeiten, was die Unfallschwere weiter verringern könnte. Diese detaillierte Betrachtung der Unfallreduzierung durch technologische Verbesserungen ergänzt die in ARE (2021) dargestellten allgemeinen Erwartungen und bietet eine präzisere Prognose der potenziellen gesundheitlichen Vorteile der Fahrzeugautomatisierung.

Luftverschmutzung und Klimawirkung

Bezüglich der Umweltauswirkungen wurden in ARE (2021) folgende Ergebnisse aufgezeigt: Die Digitalisierung im Verkehr führt zu Änderungen bei den Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen. Automatisierung verursacht durch mehr Verkehr und Leerfahrten höhere CO₂- und NO_x-Emissionen, aber gleichzeitig sinken die Emissionen durch eine effizientere Fahrweise. Sharing-Angebote erhöhen die Fahrzeugauslastung, was zu einer Reduktion der Fahrleistung (in Fzkm) und damit geringeren Emissionen führt. Zudem können durch Sharing der Ressourcenverbrauch und die Emissionen verringert werden, unter der Bedingung, dass eine Reduktion der Fahrzeuganzahl in der Flotte erzielt wird. Hierbei sind zwar die langfristigen Auswirkungen einer erhöhten Fahrzeugauslastung ebenfalls zu berücksichtigen, es liegen aber keine Studienergebnisse vor, die diesen Zusammenhang evaluieren. Darüber hinaus kann die Einführung MaaS-Angeboten den öffentlichen Verkehr sowie den Fuss-

und Veloverkehr stärken, was zu einem geringeren Flächenverbrauch und weniger CO₂-Emissionen führen könnte.

Unsere neuen Erkenntnisse verdeutlichen sowohl emissionsmindernde als auch emissionssteigernde Wirkungen der Digitalisierung im Personenverkehr. Bieser und Kriukelyte (2021) betonen, dass Sharing-Angebote durch effizientere Auslastung und besseren Zugang zu Mobilitätsangeboten die Emissionen senken können, aber auch zu mehr Individualverkehr führen könnten, wenn sie kosteneffiziente Alternativen darstellen. Dies spiegelt die Ergebnisse von ARE (2021) wider, die ebenfalls auf eine erhöhte Fahrzeugauslastung und damit verbundene Emissionsreduktionen hinweisen, jedoch auch die Möglichkeit von Mehrverkehr durch neue Nutzergruppen anführen. Carreyre et al. (2024) zeigen, dass automatisierte Fahrzeuge zunächst zu mehr gefahrenen Kilometern und Staus führen können. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus ARE (2021), wo ebenfalls festgestellt wurde, dass Automatisierung einerseits zu Mehrverkehr und damit höheren Emissionen führen kann. Andererseits können durch Sharing-Angebote Umwege reduziert und so der Energieverbrauch gesenkt werden. Dies hängt auch von der Ausgestaltung der Sharing Angebote ab. Dabei weist ein Stop-Based Routing ein höheres Potenzial zur Verringerung von Umwegen auf als Door-to-Door-Dienste.

Die Studie von Ecoplan und INFRAS (2024) zu den externen Effekten des Verkehrs 2021 zeigt externe Kosten für verschiedene Verkehrsmodi, sowie des Gesundheitsnutzen für den Velo- und Fussverkehr auf. Elektrisch angetriebene PW weisen insg. niedrigere externe Kosten auf als konventionelle PW.

Eine Studie von Accenture, digital switzerland und economiesuisse (2024) untersucht die Auswirkungen der Digitalisierung in mehreren Sektoren in der Schweiz. Für den Verkehr wurden zwei Entwicklungen der Digitalisierung genauer betrachtet: MaaS und Echtzeit-Routenoptimierung. Bei MaaS können durch Steigerung der Marktdurchdringung der Technologie von 2% heute auf 11% im Jahr 2030 (bei Standard-Digitalisierung) 1.5% der Sektoremissionen (0.3 Mt. CO₂eq) eingespart werden. Bei ambitionierterer Digitalisierung kann eine Marktdurchdringung von 37% erreicht werden und damit 7.1% (0.9 Mt. CO₂eq) der Sektoremissionen eingespart werden. Mit dem Einsatz von Echtzeit-Routenoptimierung kann bei Standard-Digitalisierung die Marktdurchdringung der Technologie von 38% auf 63% im Jahr 2030 gesteigert werden und 1.2% der Sektoremissionen (0.1 Mt. CO₂eq) eingespart werden. Bei ambitionierterer Digitalisierung kann die Durchdringung auf 83% gesteigert werden, was einer Einsparung von 2.1% der Sektoremissionen (0.2 Mt. CO₂eq) entspricht.

Insgesamt bestätigen die neuen Studien die in ARE (2021) identifizierten Trends.

3.3.2 Güterverkehr

Unfälle

Die in ARE (2021) ausgewertete Literatur geht auch für den Güterverkehr davon aus, dass eine umfassende Automatisierung die Anzahl und Schwere von Unfällen verringern kann. Es wird darauf hingewiesen, dass es in einer Übergangsphase mit Mischverkehr von automatisierten und konventionellen Fahrzeugen zunächst zu mehr Verkehrsunfällen kommen könnte. Die neuere Literatur bestätigt, dass vollautomatisierte Systeme im Güterverkehr menschliche Fehler minimieren und dadurch die Anzahl der Verkehrsunfälle reduzieren können. Zu möglichen Gesundheitswirkungen von Sharing-Ansätzen im Güterverkehr wird in ARE (2021) die Abwesenheit entsprechender Studien konstatiert. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der jüngsten Recherchen und ist auf die im Vergleich zum Personenverkehr bisher geringere Bedeutung geteilter Fahrzeugkapazitäten im Güterverkehr zurückzuführen. Die Elektrifizierung des Güterverkehrs hat keine erkennbaren Auswirkungen auf Unfallschwere und -häufigkeit.

Luftverschmutzung und Klimawirkung

Die früher bedeutsamen negativen Gesundheitswirkungen konventioneller Dieselfahrzeuge durch Emissionen von Stickoxiden und Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}) sind durch regulatorische Massnahmen wie die schrittweise Verschärfung der vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte heute kaum noch vorhanden. Dennoch ist Potenzial für diesbezügliche Verbesserungen durch emissionsfreie elektrische Antriebe für den Güterverkehr auf der Strasse gegeben. Auf der Schiene ist der Güterverkehr in der Schweiz nahezu vollständig elektrifiziert.

ARE (2021) zeigt, dass Platooning eine positive Rolle für die Umweltwirkungen der Automatisierung spielen kann. Es wird eine effizientere Fahrweise mit einem um 10% geringeren Kraftstoffverbrauch und in diesem Umfang reduzierten CO₂-Emissionen möglich. Neuere Studien wie Kern et al. (2023) bestätigen diese grundsätzliche Erkenntnis auch für eine weitergehende Automatisierung des Güterverkehrs. Hahn (2022) ermittelt darüber hinaus eine mögliche Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch aerodynamische Designänderungen aufgrund des Wegfalls der Fahrerkabine von bis zu 4.6%.

Studien wie Engholm et al. (2021) weisen jedoch darauf hin, dass diese positiven fahrzeugbezogenen Effekte der Automatisierung im Güterverkehr durch höhere Fahrleistungen überkompensiert werden können. In ihrem Szenario mit vollständig automatisierten Lkw, die das gesamte Strassennetz Schwedens befahren können, steigt die Fahrleistung (in Fzkm) um 35% an. In der Analyse von Deineko et al. (2022) zu den Auswirkungen von fahrerlosen, automatisierten Fahrzeugen in einem Logistiknetzwerk in Deutschland wird ein Anstieg der Fahrleistung um 60% sowie des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen um 55% ermittelt.

Im Gegensatz dazu sollten die Digitalisierung und Sharing-Ansätze im Güterverkehr durch eine bessere Auslastung vorhandener Ressourcen wie Transport- und Lagerkapazitäten zu geringeren CO₂-Emissionen führen, wie ARE (2021) festhält. Die Studie von Grote et al. (2023) zeigt, dass eine gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen in einem urbanen Logistiknetzwerk zu einer Verringerung der Fahrzeugkilometer um 13% und

einer Minderung der CO₂-Emissionen um 12% führen kann. Digitale Plattformen und Echtzeitdaten ermöglichen eine präzisere Planung und Verwaltung von Transportwegen, was zu einer Verringerung des Verkehrsaufkommens und damit verbundener Umweltbelastungen beitragen kann (Broich et al. 2021).

Mit einer weitgehenden Elektrifizierung des Güterverkehrs können dessen CO₂-Emissionen auf nahezu null gesenkt werden. In UBA (2023a) wird deshalb angeregt, eine Automatisierung im Strassenverkehr an den Einsatz elektrifizierter Lkw zu binden. Dies würde eine Überkompensation fahrzeugseitiger Verbesserungen durch erhöhte Fahrleistungen verhindern.

4 Beschreibung der Szenarien

4.1 Herleitung der Szenarien

Die volkswirtschaftlichen Wirkungen der Dekarbonisierung und der Digitalisierung in der Mobilität werden in Szenarien untersucht. Für die Analysen werden vier Szenarien betrachtet: ein Referenzszenario auf Basis der Verkehrsperspektiven 2050 des Bundes sowie drei Analyseszenarien für das Jahr 2050. Anschliessend werden jeweils die **Veränderung der verkehrlichen und ökonomischen Wirkungen in den Analyseszenarien im Vergleich zur Referenz** analysiert.

Das **Referenzszenario** bildet ein Weiter-wie-bisher Szenario ab. Die Analyseszenarien sollen den Raum möglicher zukünftiger Entwicklungen aufzeigen und sind explorative Szenarien («Was wäre wenn»). Sie haben nicht zum Ziel, möglichst realistische Zustände im Sinne von Prognosen abzubilden. Sie sind daher als Eckszenarien zu verstehen, die die Ecken möglicher Entwicklungen und deren Kombination ausleuchten. Der Zeithorizont der Szenarien ist das Jahr 2050. Für die Herleitung der Analyseszenarien sind drei Entwicklungen bzw. Trends relevant, die in Kapitel 2 näher erläutert wurden:

- Dekarbonisierung durch Elektrifizierung der Fahrzeuge (technologische Entwicklung)
- Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen (technologische Entwicklung)
- Sharing bzw. Teilen von Fahrzeugen und Fahrten (Entwicklung des Verhaltens im Personenverkehr bzw. der Kooperation im Güterverkehr)

Die **Analyseszenarien** sollen auf den bisherigen Arbeiten zur Digitalisierung (insbesondere Automatisierung) und Dekarbonisierung aufbauen (Jermann et al. 2020, ARE 2021, Angst et al. 2021). Die Analyseszenarien spiegeln drei relevante Entwicklungen wider, die im Forschungspaket zum Automatisierten Fahren, in der Studie zu den volkswirtschaftlichen Wirkungen der Digitalisierung in der Mobilität (ARE 2021) und dem NFP-Forschungsprojekt (Angst et al. 2021) analysiert wurden: Elektrifizierung (technologisch), Automatisierung und Vernetzung (technologisch) sowie Sharing (Verhaltensveränderung) bis hin zu Mobility as a Service (Digitalisierung). Das vorliegende Forschungsprojekt möchte dabei insbesondere die Kombination bzw. Interdependenzen der drei Entwicklungstrends untersuchen. Die Transformation bis zum Erreichen einer sehr hohen Automatisierung oder Elektrifizierung steht dabei nicht im Fokus der Forschungsarbeiten. Hierzu gibt es bereits Forschungsarbeiten wie beispielsweise zum Mischverkehr von automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen im Strassenverkehr.

Wir sehen daher drei Analyseszenarien vor, die aufeinander aufbauen:

- **Elektrifizierungsszenario (E-Mobilität):** Die Elektrifizierung im Personen- und Güterverkehr schreitet zügig voran. 2050 ist der MIV zu 99% elektrisch unterwegs. BEV dominieren, PHEV spielen eine untergeordnete Rolle. ICEV sind nur noch die Ausnahme (1%).

- **Technologieszenario (Automatisierte E-Mobilität):** Die Mobilität erfolgt zu 99% elektrisch und automatisiert. Das Teilen von Fahrten und Fahrzeugen steht hingegen nicht im Vordergrund. Die Wege sind v.a. monomodal. Die Gesellschaft ist wie bisher gern auch individuell und in privaten Fahrzeugen unterwegs. Es ist eine Weiterentwicklung des Szenarios A aus Jermann et al. 2020.
- **Mobility-as-a-Service-Szenario (Automatisierte, geteilte E-Mobilität):** Die Fahrzeuge sind elektrisch, automatisiert und vernetzt. Sharing hat sich stark durchgesetzt. Es hat sich eine Mobilitäts-Servicewelt entwickelt. Es ist eine Weiterentwicklung des Szenarios B aus Jermann et al. 2020.

Abbildung 13 zeigt die Szenarien und deren Herleitung in der Übersicht.

				Sharing Hohe Quote an Car-/ Ride-Sharing (3 private PW werden durch 1 PW ersetzt)
			Automatisierung 99 % der Fahrzeuge sind vollautomatisiert	Automatisierung 99 % der Fahrzeuge sind vollautomatisiert
	Referenz MIV: 80 % öV Strasse: 43 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 47 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %	Elektrifizierung MIV: 99 % öV Strasse: 83 % PV Schiene: 100 % GV Strasse: 90 % GV Schiene: 100 %
	Referenzszenario	Elektrifizierungs-Szenario	Technologie-Szenario	Mobility as a Service

Abbildung 13: Übersicht Referenz- und Analyseszenarien

4.2 Beschreibung der Szenarien

Die nachfolgenden Kapitel bieten eine detaillierte Darstellung der vier in dieser Forschungsarbeit betrachteten Szenarien. Damit die Kapitel in sich verständlich sind, wiederholen sich einzelne Beschreibungen zu den Annahmen, da die Analyseszenarien aufeinander aufbauen.

4.2.1 Referenzszenario

Das Referenzszenario basiert auf der Entwicklung gemäss dem Weiter-Wie-Bisher Szenarios (WWB) der Verkehrsperspektiven 2050 des Bundes (ARE 2022a)⁸ und damit dem Flottenmix nach Antriebstechnologien des Basisszenarios der Energieperspektiven (EP2050+, BFE 2021). Zusätzlich wurden die aktuellen retrospektiven verkehrlichen Entwicklungen gemäss BFS-Statistiken (BFS 2024b, BFS 2024c) für die

⁸ Ergänzend wurde geprüft, inwiefern auch das Basisszenario als Referenzszenario für die vorliegende Forschungsarbeit in Betracht käme. Da im Basisszenario jedoch bereits die Einführung von Massnahmen berücksichtigt wird, könnten sich die Annahmen in den Analyseszenarien überschneiden. Die Effekte wären nicht mehr voneinander differenziert zu analysieren, was dem Ziel der umfassenden Beleuchtung widersprechen würde.

Entwicklung bis 2024 berücksichtigt und mit dem Trend aus den Verkehrsperspektiven 2050 fortgeschrieben. Damit wird sichergestellt, dass die Entwicklung des Referenzszenarios möglichst nah an der bisherigen tatsächlichen Entwicklung ausgerichtet ist. Gleichzeitig führt die Ausrichtung an der retrospektiven Entwicklung dazu, dass das Referenzszenario der vorliegenden Forschungsarbeit nicht exakt dem WWB der Verkehrsperspektiven entspricht (Referenzjahr 2017).

Das WWB-Szenario projiziert die Entwicklungen der letzten 20 Jahre auf die kommenden 30 Jahre, berücksichtigt jedoch vorhersehbare Veränderungen. In diesem Szenario werden insbesondere folgende Entwicklungen bzw. Annahmen berücksichtigt:

- Fortführung des heutigen Zustands (2017) ohne Einführung weiterer Massnahmen oder Anpassung der Regularien.
- Dem bis 2017 erkennbaren Trend folgende technologische Entwicklungen.
- Leichte Abnahme der Anzahl der Wege pro Person (bedingt durch Home Office und Online-Shopping) und Anstieg Freizeitwege.
- Im Personenverkehr können sich On-Demand- und Sharing-Angebote nicht signifikant durchsetzen. On-Demand ist nicht vorhanden, Sharing verbleibt gleichbleibend mit 2017 in einer Nische.
- Im Güterverkehr wird keine Anpassung verkehrsbezogener Abgaben wie der LSVA (Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe) vorgenommen, aber eine leichte Erhöhung der Auslastungsgrade aufgrund von Effizienzgewinnen durch Digitalisierung.

Die zentralen Annahmen für das WWB im Jahr 2050 bilden vorliegend die Grundlage und Referenzentwicklung. Weitere Annahmen basieren auf der Literaturanalyse und insbesondere auf ARE (2021). Die zentralen Stellschrauben des Referenzszenarios werden in den folgenden Kapiteln differenziert für den Personen- und Güterverkehr beschrieben.

4.2.1.1 Personenverkehr

Die Verkehrsleistung nimmt in der Referenz um 15 Prozent zwischen 2024 und 2050 zu (Abbildung 14). Dabei steigt die Verkehrsleistung bei allen Modi. Den prozentual stärksten Anstieg verzeichnet der Veloverkehr, jedoch auf vergleichsweise geringem Niveau.

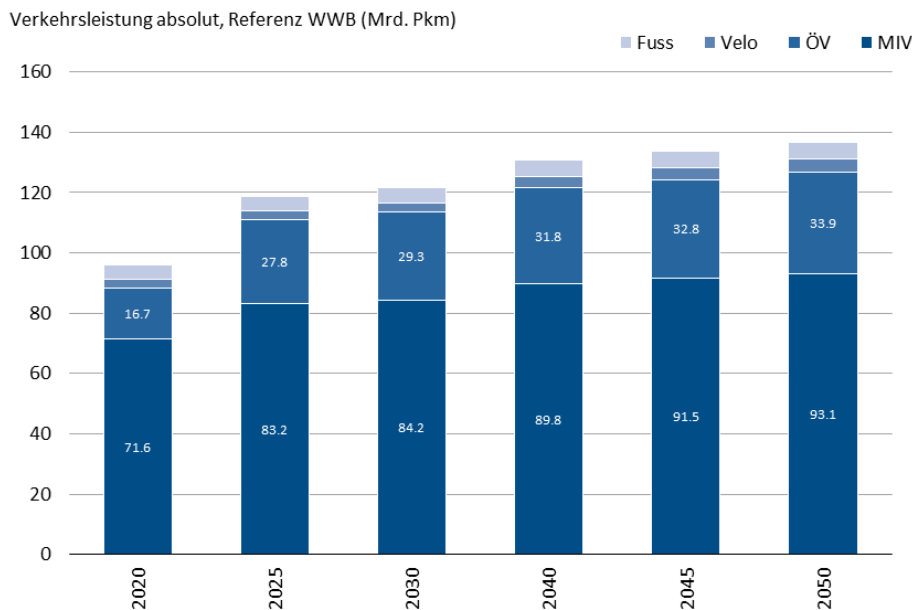


Abbildung 14: Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr im Referenzszenario bis 2050

Die Fahrleistung auf der Strasse steigt nach dem pandemiebedingten Einbruch ab 2020 wieder kontinuierlich an. Im Jahr 2050 werden rund 66 Mrd. Fzkm zurückgelegt.

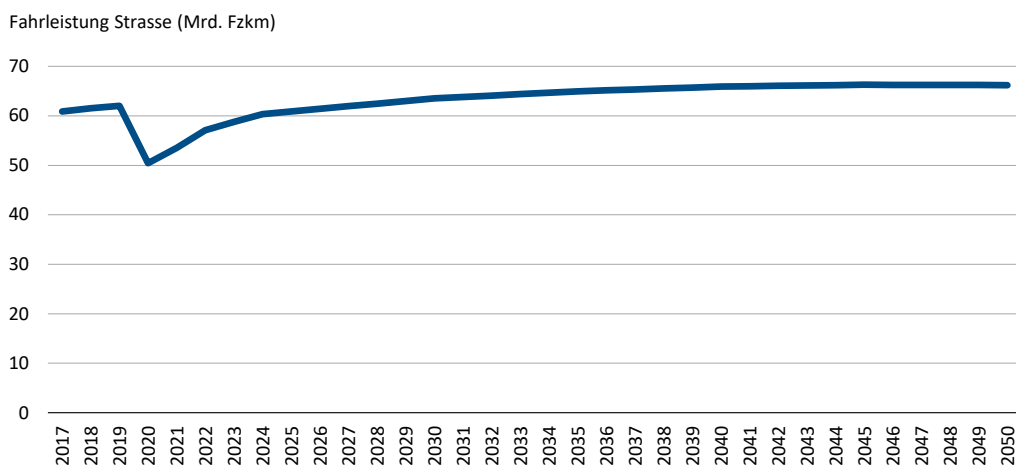


Abbildung 15: Entwicklung der Fahrleistung Strasse im Personenverkehr im Referenzszenario bis 2050

80% des MIV ist im Jahr 2050 elektrifiziert (fahrleistungsbezogen). Im strassengebundenen ÖV hat die Elektrifizierung eine Durchdringung von 43%. Auf der Schiene sind bereits 100% elektrifiziert. Der Anteil autonomer Fahrzeuge liegt bei 32% (ARE 2022).

Der Flottenmix im Referenzszenario basiert auf den Annahmen zu Elektrifizierung und Automatisierung im WWB-Szenario der Verkehrsperspektiven (ARE 2022a) und den Energieperspektiven 2050+ (BFE 2022) und damit u.a. auch den Energieperspektiven 2050+ (BFE 2022) sowie dem HBEFA (INFRAS 2022, INFRAS 2024).

Flottenmix MIV		
	Anteile im Referenzszenario	Quelle
Verbrenner gesamt	20%	BFE 2022, ARE 2022a
Benzin	8%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Diesel	12%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Elektro gesamt	80%	BFE 2022, ARE 2022a
autonome BEV	32%	BFE 2022, ARE 2022a
BEV (nicht autonom)	38%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
PHEV (nicht autonom)	10%	INFRAS 2022, INFRAS 2024

Tabelle 18: Referenzszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen

Die wichtigsten Stellschrauben im Referenzszenario werden im Folgenden genauer beschrieben.

Die **Mobilitätsrate (MR)** beschreibt die Anzahl Wege, die im Mittel von einer Person pro betrachtete Zeiteinheit (h) zurückgelegt werden. Sie werden nach Fahrtzweck differenziert. Für 2024 wird gemäss ARE (2022a) von folgenden MR ausgegangen:

- Arbeiten: 0.73
- Ausbildung: 0.28
- Einkaufen: 0.62
- Besorgung: 0.22
- Geschäft: 0.14
- Freizeit: 1.45
- Anderes: 0.28

Für 2050 werden die MR mit einer Trendfunktion basierend auf den Entwicklungen der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) fortgeschrieben, woraus sich folgende MR ergeben:

- Arbeiten: 0.63
- Ausbildung: 0.26
- Einkaufen: 0.61
- Besorgung: 0.22
- Geschäft: 0.12
- Freizeit: 1.61
- Anderes: 0.28

Der **Value of Time (VoT)** wird zwischen Verkehrsmodi (MIV und ÖV) differenziert. In 2024 können basierend auf der VSS Norm 41 822a (VSS 2019)⁹ Werte gemäss Tabelle 19 angenommen werden. Die Zeitkostensätze entsprechen dem Durchschnittswert der Fahrweite. Basierend auf dem NPVM und der Literatur wird keine Veränderung des VoT bis 2050 im Referenzszenario angenommen.

⁹ Es liegt eine neuere Studie des ARE (2024a) zum VoT vor. Die VSS-Normen werden in den kommenden Jahren darauf basierend angepasst werden.

Value of Time (Preisbasis 2007)

	MIV	ÖV
VoT in CHF/Pers-h		
	Pendelfahrt: 31.45	Pendelfahrt: 16.08
	Einkaufsfahrt: 20.72	Einkaufsfahrt: 12.32
	Nutzfahrt: 32.24	Nutzfahrt: 35.73
	Freizeitfahrt: 22.05	Freizeitfahrt: 12.01
	Alle Zwecke: 23.29	Alle Zwecke: 14.43

Tabelle 19: Stellschrauben Personenverkehr Referenzszenario, VoT (Quelle: VSS 2019)

Die **Kilometerkosten im MIV** beziehen sich auf die variablen Kosten des Fahrzeugbetriebs je Kilometer. Die Kosten basieren auf dem Kostentool des NPVM der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022). Die Kosten basieren auf dem Kostentool des NPVM der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a). Die Kosten werden nach Fahrzeugklasse (Kleinwagen, Mittelklasse, Oberklasse) und Antriebstechnologie differenziert (Benzin, Diesel, Elektro, Hybrid) und setzen sich aus folgenden Kostenbestandteilen zusammen: Anschaffung, Wertverlust, Erhaltung, Reifen, Treibstoff und Steuern. Die Kostensätze werden im Kostentool des NPVM für alle im Flottenmix genannten Antriebstechnologien ausser autonomen Elektrofahrzeugen angegeben. Für diese wird angenommen, dass die Kosten bis auf die Anschaffungskosten mit den Kosten für nicht-autonome Elektrofahrzeuge identisch sind. Bei den Anschaffungskosten wird angenommen, dass diese 10% höher als bei nicht-autonomen Elektrofahrzeugen sind. Die höheren Anschaffungskosten sind auf zusätzliche Fahrzeugteile (Sensoren, V2X-Komponenten etc.) zurückzuführen. Die globalen Kostensätze je Szenario werden als gewichtetes Mittel basierend auf Fahrleistungsanteilen je Antriebstechnologie gemäss Szenarioannahmen und HBEFA (2023) ermittelt (Flottenmix, vgl. Tabelle 18). Für 2024 betragen die Kilometerkosten im MIV im Mittel rund 0.27 CHF/Fzkm. Bis 2050 reduzieren sich diese Kosten trotz einer Automatisierung von 32% durch Skalen- und Technologieeffekte auf ca. 0.24 CHF/Fzkm.

Die **Preise im ÖV** entsprechen den Preisen der ÖV-Tarife. Der Durchschnittssatz pro Pkm beträgt in 2024 0.35 CHF (ARE 2022a). Bis 2050 ist keine Veränderung dieser Preise anzunehmen (ARE 2021).

Der **Besetzungsgrad (BG)** gibt die durchschnittliche Besetzung von PW an durchschnittlichen Werktagen (DWV) an. Auch hier wird nach Fahrzweck differenziert. Basierend auf den Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) werden folgende Werte für 2024 angenommen:

- Arbeit (qualifiziert): 1.08
- Arbeit (einfach): 1.06
- Bildung: 1.31
- Einkauf (kurzfristig): 1.31
- Einkauf (langfristig): 1.47
- Nutzfahrt: 1.15
- Freizeit (kurz): 1.44
- Freizeit (lang): 1.63

Die Besetzungsgrade werden im Referenzszenario mittels Trendfunktion bis 2050 fortgeschrieben.

Die **Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV** beläuft sich 2024 auf 45.2 km/h. Bis 2050 sinken die Geschwindigkeiten leicht auf 43.4 km/h (ARE 2021).

4.2.1.2 Güterverkehr

Analog dem Personenverkehr basiert das Referenzszenario im Güterverkehr auf den retrospektiven Entwicklungen bis 2023 und der Entwicklung gemäss WWB-Szenario der VP 2050 (ARE 2022a, BFS 2024a, BFS 2024b). Abbildung 16 zeigt die Referenzentwicklung der Verkehrsleistung bis 2050. Der Modal Split der Strasse an der Verkehrsleistung im Landverkehr beträgt im Jahr 2050 rund 62 Prozent.

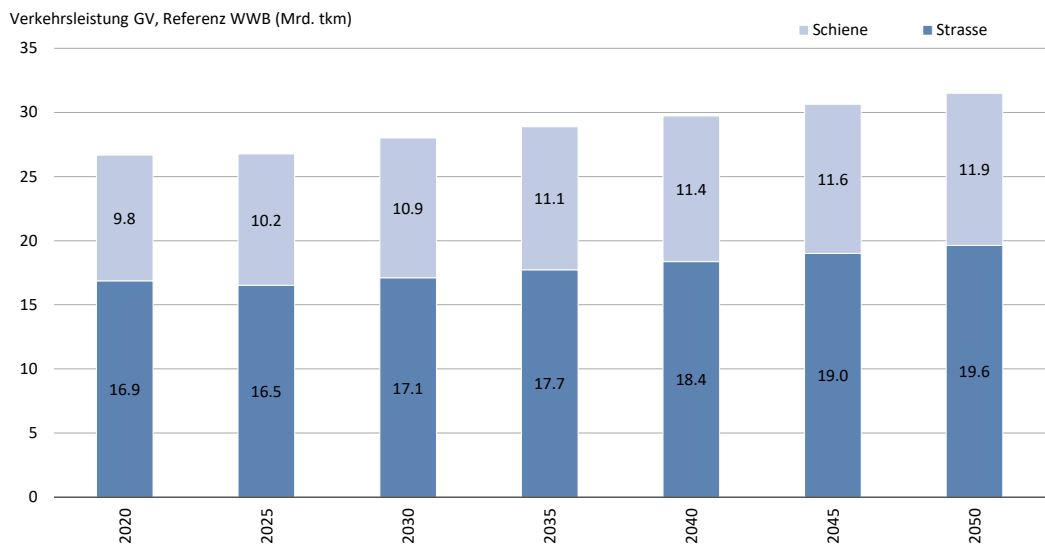


Abbildung 16: Referenzentwicklung der Verkehrsleistung im GV bis 2050 (Quellen: BFS 2024d, ARE 2022a)

Die Fahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) wächst deutlich; im Güterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ist die Zunahme geringer (Abbildung 17). Im Strassengüterverkehr werden im Jahr 2050 rund 40% der Fahrleistungen mit automatisierten Fahrzeugen erbracht.

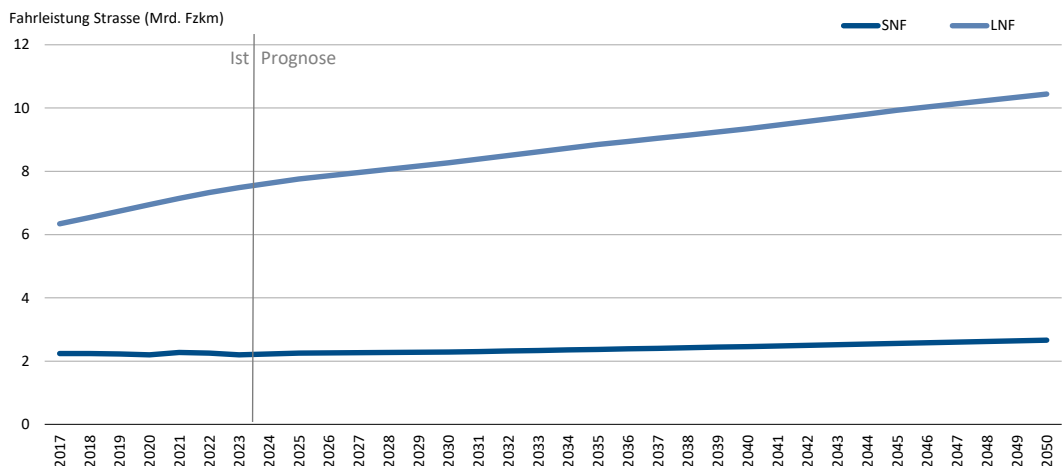


Abbildung 17: Referenzentwicklung der Fahrleistung im Strassengüterverkehr bis 2050 (Quelle: BFS 2024c, ARE 2022a)

Dem Referenzszenario liegen verschiedene Annahmen bzw. Referenzentwicklungen zugrunde. Die Kostensätze der Aggregierten Methode Güterverkehr (AMG) umfassen die transportrelevanten Kosten der Transport- und Eisenbahnverkehrsunternehmen und bilden die Referenz (vgl. auch Kapitel 3.2.2.1, Abbildung 12). Tabelle 20 zeigt die **Gesamtkostensätze** nach Marktsegmenten. Hierbei ist anzumerken, dass nicht die absolute Höhe der Kosten im Vordergrund steht, sondern jeweils die prozentuale Veränderung gegenüber der Referenz im jeweiligen Analyseszenario.

Kostensätze im Güterverkehr 2050 (Referenz)

Marktsegment	Gesamtkostensatz (CHF/Ntkm)
Strasse – LNF	8.28
Strasse – SNF	0.49
Schiene – WLW	0.19
Schiene – UKV	0.53
Schiene – ROLA	0.20

Tabelle 20: Kostensätze im Güterverkehr, Perspektive Transportunternehmen (Quelle: ARE 2021)

Die **durchschnittliche Beladung im Strassenverkehr** beträgt im 2050 rund 7 Tonnen (SNF) bzw. 0.12 Tonnen (LNF). Abbildung 18 zeigt die Ist-Entwicklung bis 2023 und ab 2024 die Entwicklung gemäss dem WBB-Szenario der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a).

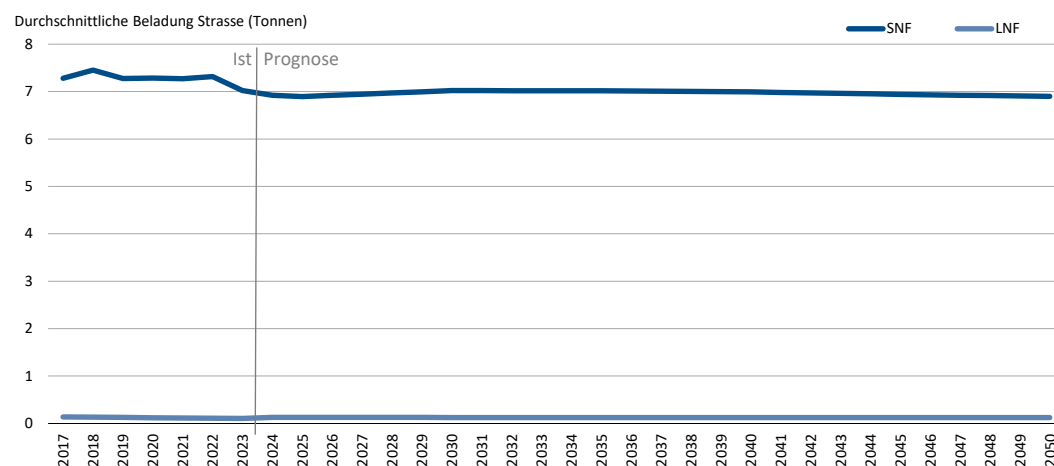


Abbildung 18: Referenzentwicklung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr bis 2050 (Quelle: BFS 2024c, ARE 2022a)

Die **durchschnittliche Geschwindigkeit** der LNF ist mit 35.4 km/h geringer als für SNF, die mit durchschnittlich rund 47.4 km/h unterwegs sind. In der Referenzentwicklung sind sowohl der durchschnittliche Beladungsgrad als auch die durchschnittliche Geschwindigkeit im 2050 ggü. 2023 nahezu konstant (ARE 2021).

Abbildung 19 zeigt die Referenzentwicklung der Anteile der Fahrleistungen der LNF und SNF nach Antriebstechnologie (BEV und PHEV als elektrisch, der Rest als fossil). Dieses basiert auf den Energieperspektiven 2050+ (EP 2050+, BFE 2022). Die Elektrifizierung im 2050 ist im Referenzszenario für die LNF bereits weit fortgeschritten.

Rund 75% der Fahrleistungen der LNF sind elektrifiziert. Hingegen kommt die Elektrifizierung der schweren Nutzfahrzeuge im Güterverkehr weniger schnell voran. Der Fahrleistungsanteil der elektrisch angetriebenen SNF beträgt im 2050 rund 34%.

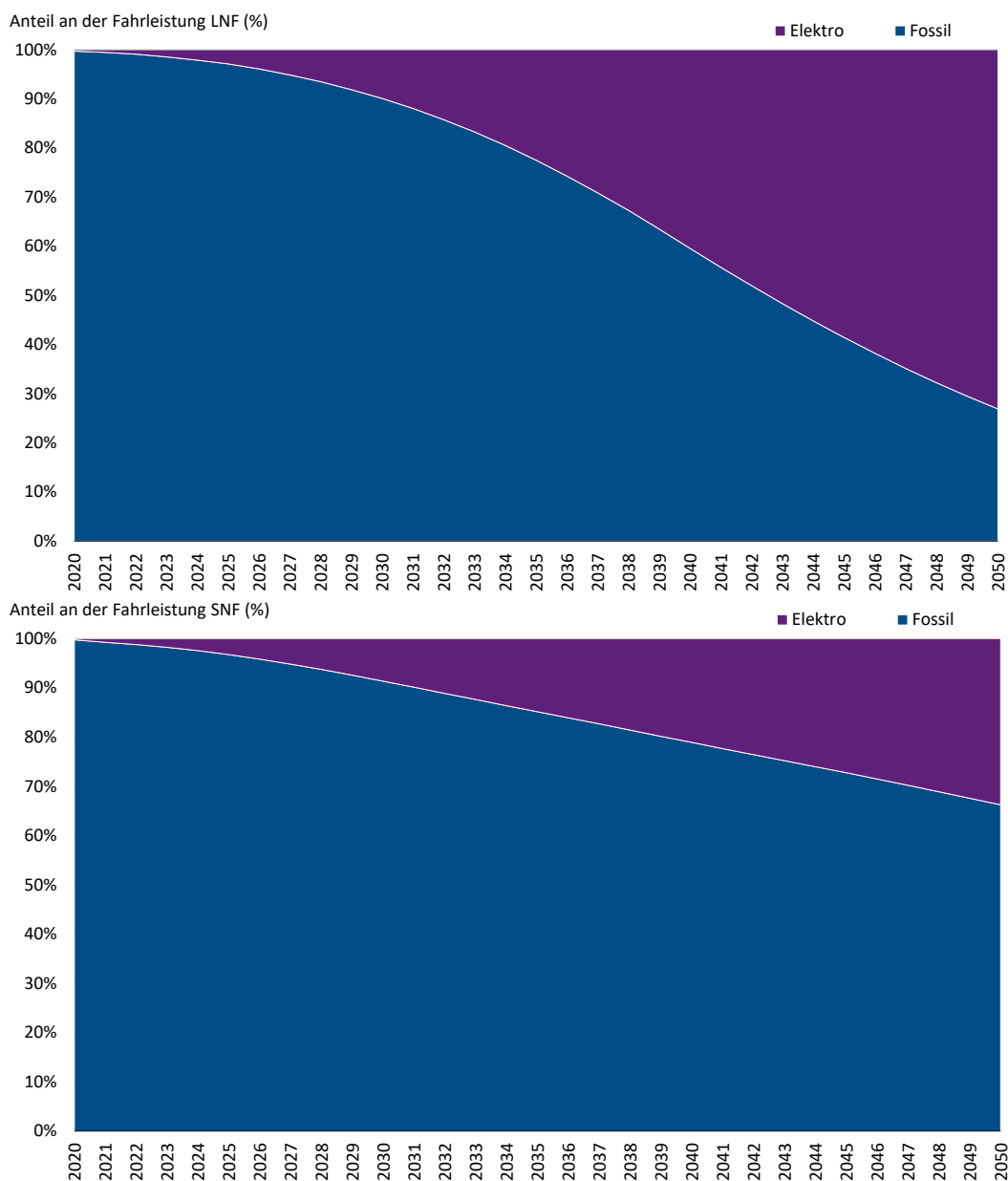


Abbildung 19: Flottenentwicklung im LNF (oben) und SNF (unten) nach Antriebstechnologie bis 2050 (BFE 2022)

In der AMG sind Preiselastizitäten je Marktsegment berücksichtigt, die im vorliegenden Bericht zugrunde gelegt werden (Abbildung 20).

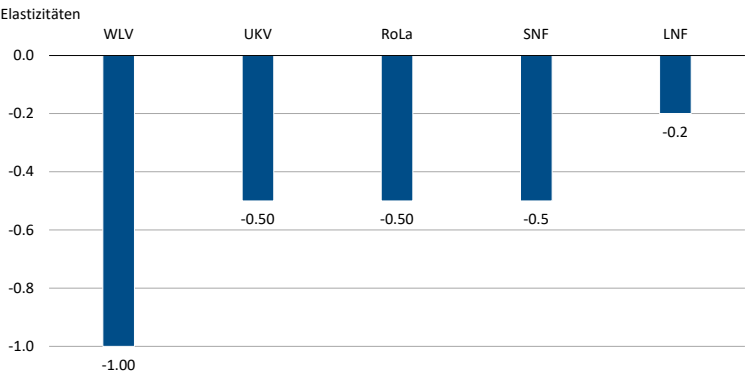


Abbildung 20: Elastizitäten der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

4.2.2 Elektrifizierungsszenario – E-Mobilität

Im Elektrifizierungsszenario wird von einer bis 2050 schnelleren Elektrifizierung des Personen- und Güterverkehrs im Vergleich zum Referenzszenario ausgegangen. Für die Analyseszenarien werden die aktuellen Elektromobilitätsszenarien auf Basis des HBEFA (INFRAS 2024) zugrunde gelegt.

4.2.2.1 Personenverkehr

Im Personenverkehr beträgt die Elektrifizierung im MIV 99%, im ÖV (Strasse) 83%. Die zunehmende Elektrifizierung hat keinen Einfluss auf den Schienenverkehr, da dieser bereits im Referenzszenario 100% elektrifiziert ist, sodass im Elektrifizierungsszenario keine Steigerung erfolgen kann. Die Automatisierung schreitet gleichschnell wie im Referenzszenario voran: 2050 fahren 32% der Fahrzeuge autonom.

Da der MIV durch die Elektrifizierung umweltfreundlicher ist, kann es zu Umstiegen vom ÖV auf den MIV kommen (verhaltensbedingte Rebound-Effekte). Da es hierzu keine empirisch gestützten Erkenntnisse gibt, können diese Effekte nicht quantifiziert werden. Aus diesem Grund werden diese nicht berücksichtigt. Der Flottenmix im Elektrifizierungsszenario basiert auf den Szenarioannahmen zur Elektrifizierung sowie dem HBEFA (INFRAS 2022, INFRAS 2024).

Flottenmix MIV (Anteile an der Fahrleistung)		
	Anteile	Quelle
Verbrenner gesamt	1%	Eigene Annahme
Benzin	0.5%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Diesel	0.8%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Elektro gesamt	99%	Eigene Annahme
autonome BEV	32%	Eigene Annahme
BEV (nicht autonom)	66%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
PHEV (nicht autonom)	1%	INFRAS 2022, INFRAS 2024

Tabelle 21: Elektrifizierungsszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen

Die wichtigsten Stellschrauben im Elektrifizierungsszenario werden im Folgenden diskutiert.

Die **Mobilitätsrate** und **Zeitkosten (VoT)** bleiben durch die Elektrifizierung unverändert (ARE 2021).

Die **KM-Kosten im MIV** basieren auf dem Kostentool des NPVM der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) (vgl. 4.2.1.1). Die Kosten sinken leicht, da die Betriebskosten bei elektrifizierten Fahrzeugen niedriger sind als bei Verbrennerfahrzeugen (siehe hierzu bspw. König et al. 2021).¹⁰ Der globale KM-Kostensatz im MIV sinkt von 0.24 CHF/km im Referenzszenario auf 0.23 CHF/km im Elektrifizierungsszenario ab.

Im **ÖV** bleiben die durchschnittlichen Preise unverändert bei 0.35 CHF/km. Hierbei nehmen wir an, dass sich der Kostendeckungsgrad im ÖV aufgrund der Dekarbonisierung in den Szenarien nicht ändert. Dies wäre eine politische Massnahme, die vorliegend nicht im Fokus steht.

Auch der **Besetzungsgrad** und die **Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV** bleiben unverändert. Diese Annahmen basieren jeweils auf ARE (2021). Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Annahmen.

Annahmen Elektrifizierungsszenario		
Indikator	Annahme	Quelle
Mobilitätsrate (MR)	Keine Veränderung ggü. Referenz- Eigene Annahme szenario	
Value of Time (VoT)	Keine Veränderung ggü. Referenz- Eigene Annahme szenario	
Kosten MIV	KM-Kostensatz (global): 0.25 CHF/km	NPVM-Kostentool (ARE 2022a); INFRAS 2022
Preise ÖV	Keine Veränderung ggü. Referenz- Eigene Annahme szenario	
Besetzungsgrade (BG)	Keine Veränderung ggü. Referenz- Eigene Annahme szenario	
Geschwindigkeit MIV	Keine Veränderung ggü. Referenz- Eigene Annahme szenario	

Tabelle 22: Annahmen Elektrifizierungsszenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario

4.2.2.2 Güterverkehr

Die Elektrifizierung ist lediglich für die Strasse relevant. Der Schienengüterverkehr ist bereits aktuell zu fast 100 Prozent elektrifiziert. Gegenüber dem Referenzszenario verändert sich daher nichts.

¹⁰ Eine Anpassung regulatorischer Massnahmen wird hierbei nicht berücksichtigt.

Die Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen im Strassengüterverkehr verläuft langsamer als für LNF. Es wird davon ausgegangen, dass die Elektrifizierung bis 2050 nahezu 100 Prozent entspricht. Abbildung 21 zeigt die Anteile der Fahrleistungen der LNF und SNF nach Antriebstechnologie im Elektromobilitätsszenario. Dieses berücksichtigt die retrospektive Ist-Entwicklung bis 2023 sowie aktuelle Abschätzungen zur künftigen Flottentwicklung der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge (v.a. BEV, FCEV) (INFRAS 2024).

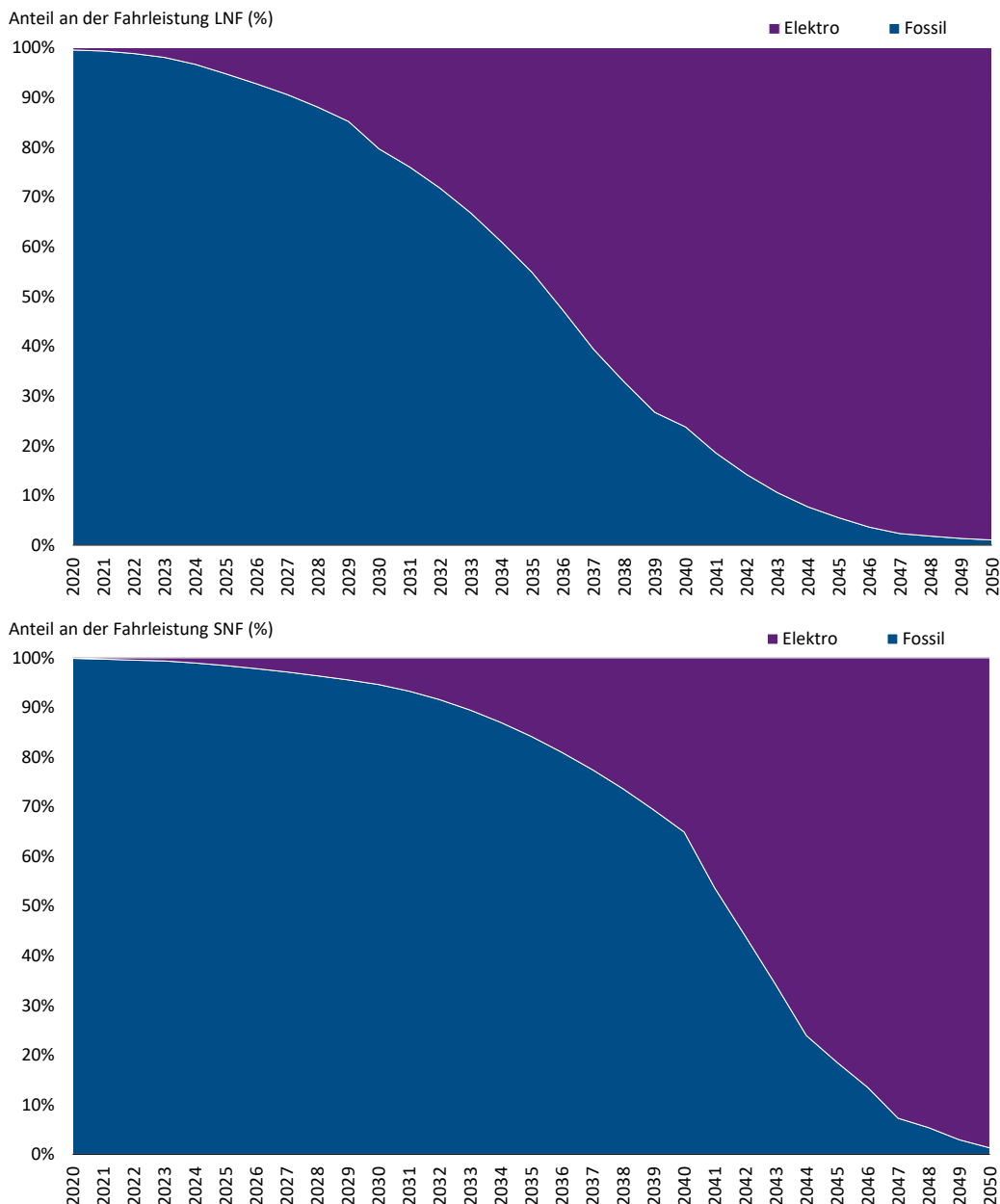


Abbildung 21: Flottenentwicklung nach Antriebstechnologien im LNF (oben) und SNF (unten) im Elektrifizierungsszenario bis 2050 (INFRAS 2024).

Im Güterverkehr sind mit der Elektrifizierung aktuell vor allem deutlich höhere Anschaffungskosten sowie niedrigere Betriebskosten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen verbunden (ASTAG 2024). Gleichzeitig werden die Anschaffungskosten langfristig aufgrund von Skalenvorteilen sinken. Die Veränderung der Betriebskosten aufgrund der Elektrifizierung werden auf Basis der Literaturanalyse auf rund -5% geschätzt, d.h. aufgrund des veränderten Flottenmixes reduzieren sich die Betriebskosten um rund 3% für SNF bzw. 1% für LNF. Hierbei berücksichtigt ist, dass im Referenzszenario bereits ein bedeutender Teil der Fahrleistungen im 2050 elektrifiziert ist. Die **durchschnittlichen Kosten** 2050 reduzieren sich insgesamt um rund 0.3% für LNF bzw. 0.9% für SNF ggü. der Referenz (Tabelle 23). Es werden die folgenden Kostenkategorien berücksichtigt: Personal, Betrieb, Energie, Infrastrukturbenutzung, Sonstiges (v.a. Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.).

Gesamtkostensatz Strasse 2050 (CHF/Ntkm)

	Referenz	Elektromobilitätsszenario	Veränderung (%)
LNF	8.28	8.26	-0.3%
SNF	0.49	0.49	-0.9%

Tabelle 23: Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Dabei werden die Kostenentwicklungen aufgrund der Elektrifizierung (höhere Anschaffungskosten etc.), nicht jedoch allfällige verkehrs- und finanzpolitische Massnahmen (z.B. Einführung neuer oder Anpassung bestehender Abgaben wie die LSVA) aufgrund der Dekarbonisierung berücksichtigt.

Annahmen wie die **durchschnittliche Geschwindigkeit** und **Beladung** bleiben gegenüber dem Referenzszenario unverändert. Dabei wird davon ausgegangen, dass elektrische SNF aktuell zwar tendenziell geringere Nutzlasten im Vergleich zu fossil betriebenen Fahrzeugen haben, diese sich aber langfristig aufgrund weiterentwickelter Batterietechnologien wieder angleichen. Zudem gelten Ausnahmen bei Gewichtsbeschränkungen für schwere E-Fahrzeuge. Bei den leichten Nutzfahrzeugen spielt die Nutzlast eine untergeordnete Rolle. Generell ist zu beachten, dass im Strassengüterverkehr in der Regel weniger das Transportgewicht, sondern vor allem auch das Volumen die begrenzende Grösse sind.

Ähnlich wie im Personenverkehr verändert sich der Value of Time im Güterverkehr durch die Elektrifizierung nicht.

4.2.3 Technologieszenario – Automatisierte E-Mobilität

Im Technologieszenario wird die grundlegende Annahme der Elektrifizierung analog dem Elektrifizierungsszenario beibehalten. Zusätzlich wird sich die Automatisierung mit hohen Durchdringungsraten durchsetzen.

4.2.3.1 Personenverkehr

Im MIV werden alle Elektrofahrzeuge automatisiert sein (99%). Zudem wird eine Automatisierung von 80 bis 100% im ÖV auf Strasse- und Schiene angenommen. Das entspricht einer Vollautomatisierung (Level 5 bzw. GoA 4).

Automatisierung im MIV führt zu Komfortgewinnen resp. niedrigeren Zeitkosten, da der Fahrer weniger oder keine Lenkzeit hat. Das mindert den Vorteil des ÖV, den dieser bisher in Hinsicht auf die alternativ nutzbare Zeit hatte. Gleichzeitig steigt die Produktivität im ÖV auf der Schiene und Strasse, da (Personal-)kosten reduziert werden können (siehe hierfür bspw. Kostrzewski et al. 2021). Allerdings steigen Investitionskosten in die MIV- und ÖV-Fahrzeuge aufgrund höherer Anschaffungskosten im Vergleich zu nicht-automatisierten Elektrofahrzeugen (KE-Consult 2018, Hörl et al. 2019). Die höheren Anschaffungskosten sind getrieben von Kosten für Sensoren und V2X-Elemente (Automatisierung) im Fahrzeug. Diese höheren Investitionskosten werden nach einem kurz-/mittelfristigen Anstieg langfristig aufgrund von Skaleneffekten wieder abnehmen und ein nur leicht höheres Niveau als zum Ausgangszeitpunkt haben. Da autonome Fahrzeuge schonender fahren, wird davon ausgegangen, dass sie weniger Wartung für konventionelle Fahrzeugkomponenten benötigen werden. Da die neuen Sensoren jedoch regelmässig gewartet werden müssen, wird von nur leicht niedrigeren Wartungskosten ausgegangen. Andere Kostenkomponenten des Fahrzeugbetriebs wie die Reinigung tragen zusätzlich, aber auch nur minimal, zu niedrigeren Betriebskosten bei (Bösch et al. 2018). Insgesamt gehen wir von 2% niedrigeren Betriebskosten bei automatisierten im Vergleich zu nicht-automatisierten Elektrofahrzeugen aus. Insgesamt sinken die Preise im ÖV (Strasse und Schiene). In diesem Szenario gehen wir davon aus, dass der Kostendeckungsgrad im ÖV gleichbleibt. Entsprechend wird ein Teil dieser Kostenreduktion bei fixem Kostendeckungsgrad an die Nutzenden weitergegeben. Das führt zu niedrigeren Billettpreisen.¹¹

Automatisierung führt in der Konsequenz zu verschiedenen verkehrlichen Effekten, welche sowohl auf die Gesamtnachfrage (Mobilitätsrate) als auch den Modal Split wirken. Zusätzlich entstehen durch Automatisierung neue Nutzergruppen im MIV, bspw. wenn junge oder mobilitätseingeschränkte Personen automatisierten MIV nutzen. Gleichzeitig kann Automatisierung eine Verlagerung vom ÖV auf dem MIV mit sich bringen (Modal Shift). Vermehrte Leerfahrten können zusätzlich zu einem Anstieg der Fahrleistung führen. Dadurch ist die Besetzung der Fahrzeuge (BG) niedriger. Die Präferenz für Sharing ist in diesem Szenario gemäss unseren Annahmen sehr gering. Die Individualisierung steht im Vordergrund. Neue Angebotsformen, die das Teilen von Fahrten (z.B. Ride-Pooling-Angebote) ergänzend zum ÖV anbieten, entfalten sich in diesem Szenario noch nicht.

Der Flottenmix im Technologieszenario basiert auf den Szenarioannahmen zur Elektrifizierung sowie dem HBEFA (INFRAS 2022, INFRAS 2024, Tabelle 24).

¹¹ Gemäss unserer Annahme eines fixen Kosten Kostendeckungsgrads wird eine Kostenreduktion anteilig an die Nutzenden weitergegeben (niedrigere ÖV-Billettpreise). Gleichzeitig führt die Kostenreduktion zu einer Reduktion der ÖV-Subventionen.

Alternative Entwicklungen wären (1) eine komplette Weitergabe der Kostenreduktion an die Nutzenden oder (2) eine komplette Weitergabe an den Subventionierer. In der vorliegenden Studie wurde sich dafür entschieden, den Status Quo beizubehalten (fixer Kostendeckungsgrad), um den Effekt der Technologisierung nicht mit weiteren Einflüssen zu vermischen.

Flottenmix MIV (Anteile an der Fahrleistung)

	Anteile	Quelle
Verbrenner gesamt	1%	Eigene Annahme
Benzin	0.5%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Diesel	0.8%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Elektro gesamt	99%	Eigene Annahme
autonome BEV	99%	Eigene Annahme
BEV (nicht autonom)	0%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
PHEV (nicht autonom)	1%	INFRAS 2022, INFRAS 2024

Tabelle 24: Technologieszenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen

Für die **Mobilitätsrate** wird eine Änderung über alle Fahrzwecke hinweg angenommen. Hierfür basieren wir auf ARE 2021. Weitere Literatur bestätigt steigende Wegeaufkommen (siehe Truong et al. 2017, Meyer et al. 2017, Ecoplan 2018, von Schmidt et al. 2022 und Sonnleitner et al. 2023). In ARE 2021 wurden für das Technologieszenario (dort: Szenario 1, Automatisierung) nach Alterskohorten differenzierte Annahmen getroffen. Bestehend aus einem Alterseffekt und der Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen ergibt sich ein Gesamteffekt. Dieser nach Alterskohorten differenzierte Gesamteffekt wurde mit den Anteilen der Alterskohorten an der Bevölkerung gewichtet (BFS 2025), und ein Gesamteffekt über alle Alterskohorten hinweg ermittelt. Insgesamt steigt die MR durch die Automatisierung um 2.7% ggü. den Referenzszenario an.

Veränderungen der **Zeitkosten (VoT)** werden nur im MIV angenommen, im ÖV entstehen keine Veränderungen des VoT (ARE 2021). Im Technologieszenario wird im MIV eine Änderung von -40% für alle Fahrzwecke angenommen.¹² Die Veränderungsraten basieren auf ARE 2021 und eigenen Annahmen. Die Literatur zu Veränderungen in der Bewertung der Reisezeit bestätigt abnehmende Reisezeitkosten (siehe v.a. Komarova et al. 2019 und Huda et al. 2023). Für die Veränderung des VoT über alle Zwecke werden die Aufkommensanteile des MIV nach Fahrzweck (MZMV 2021, BFS und ARE 2023) zur Gewichtung herangezogen. Die Angaben sind Tabelle 25 zu entnehmen.

Die **KM-Kosten im MIV** basieren auf dem Kostentool des NPVM der Verkehrsspektiven 2050 (ARE 2022a) (vgl. Kapitel 4.2.1.1). Die Kosten sind mehreren Effekten unterlegen: Einerseits steigen die Anschaffungskosten der Fahrzeuge (Bruns et al. 2020, Bösch et al. 2018, Carreyre et al. 2024, Mitropoulos et al. 2022), da diese bei automatisierten Fahrzeugen um 10% höher sind als bei nicht-automatisierten Elektrofahrzeugen. Gegenüber dem Referenzszenario entstehen aber gleichzeitig auch Kostenreduktionen aufgrund der niedrigeren Betriebskosten der Elektrofahrzeuge¹³ (Bösch et al. 2018, Mitropoulos et al. 2022). Der globale KM-Kostensatz im MIV beträgt insg. 0.20 CHF/km im Technologieszenario.

¹² Diese Annahme wurde basierend auf der Literatur (vgl. Tabelle 9/ARE 2021) diskutiert. Da die Veränderung des VoT sich zwischen den Fahrzwecken stark unterscheidet, wird ein pauschaler Ansatz von - 40% über alle Fahrzwecke hinweg angenommen.

¹³ Diese sind für automatisierte und nicht-automatisierte Elektrofahrzeuge gleich.

Im **ÖV** wirken ebenfalls zwei gegensätzliche Effekte auf die durchschnittlichen Preise: Einerseits steigen die Anschaffungskosten aufgrund der Automatisierung. Andererseits sinken die Betriebskosten aufgrund der wegfallenden Kosten für das Fahrpersonal. Da die Betriebskosten stärker ins Gewicht fallen und die Kostenreduktion anteilig an die Nutzenden weitergegeben wird, sinken die Preise im ÖV insg. um 6% gegenüber dem Referenzszenario (ARE 2021). Hierbei nehmen wir an, dass sich der Kostendeckungsgrad im ÖV aufgrund der Dekarbonisierung und Automatisierung in den Szenarien nicht ändert. Dies wäre eine politische Massnahme, die vorliegend nicht im Fokus stehen.

Die Automatisierung und individuelle Nutzung der Fahrzeuge hat einen starken Einfluss auf die **Besetzungsgrade**. Durch die Automatisierung kommt es zu mehr Leerfahrten, wodurch die Besetzungsgrade stark sinken (ARE 2021, Sessa et al. 2016, Soteropoulos et al. 2019, Truong et al. 2017, Meyer et al. 2017). Gleichzeitig können neue Nutzergruppen (junge Personen) allein unterwegs sein und müssen nicht mehr begleitet werden. Für den BG im Technologieszenario wird eine Reduktion ggü. dem Referenzszenario von 16.7% angenommen (ARE 2021).

Die **Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV** steigt aufgrund der Automatisierung, da die Kapazität auf der Strasse aufgrund der Automatisierung (Sensoren, V2X-Elemente etc.) und dadurch geringeren Abständen zwischen den Fahrzeugen steigt. Es wird eine Geschwindigkeitssteigerung um 8% im Vergleich zum Referenzszenario angenommen (ARE 2021).

Tabelle 25 gibt einen Überblick über die Annahmen.

Annahmen Technologieszenario		
Indikator	Annahme	Quelle
Mobilitätsrate (MR)	+2.7%	ARE 2021, BFS 2025
Value of Time (VoT)	MIV, alle Zwecke: - 40% ÖV keine Veränderung	VSS Norm 41822a; ARE 2021; eigene Annahme
Kosten MIV	KM-Kostensatz (global): 0.26 CHF/km	NPVM-Kostentool (ARE 2022a); HBEFA 2022
Preise ÖV	-6%	ARE 2021
Besetzungsgrade (BG)	-16.7%	ARE 2021
Geschwindigkeit MIV	+8%	ARE 2021

Tabelle 25: Annahmen Technologieszenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario

4.2.3.2 Güterverkehr

Für den Güterverkehr wird – wie im Personenverkehr – angenommen, dass im Technologieszenario sowohl der Strassen- als auch der Schienengüterverkehr nahezu vollständig hoch- bzw. vollautomatisiert (Level 4 + 5 bzw. GoA 4) sind. Der Elektrifizierungsgrad entspricht dabei dem Elektromobilitätsszenario (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

Die Elektrifizierung und Automatisierung wirken auf die **Kostensätze und -strukturen** sowohl im Strassen- als auch Schienengüterverkehr. Auf Basis der Literaturanalyse werden Annahmen zur Veränderung ggü. der Referenzentwicklung in der jeweiligen Kostenkategorie (Personal, Betrieb, Energie, Infrastrukturbenützung, Sonstiges v.a. Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.) getroffen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es nahezu keinen Mischverkehr mehr gibt. Die Annahmen zu den Veränderungen der einzelnen Kostenkategorien im Technologie-Szenario sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Die Herleitung wird im Folgenden erläutert. Tabelle 27 zeigt die resultierenden Kostensätze und deren Veränderung ggü. der Referenz.

Veränderung Gesamtkostensatz Strasse und Schiene 2050

	Strasse – LNF	Strasse – SNF	Schiene – WLW	Schiene – UKV	Schiene – ROLA
Personal	-17%	-50%	-75%	-75%	-75%
Betrieb	-1%	-2%	0%	0%	0%
Energie	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
Infrastruktur	0%	0%	0%	0%	0%
Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)	0%	0%	-15%	-20%	-15%
Gesamt	-12%	-12%	-11%	-16%	-11%

Tabelle 26: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr «Technologie» (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Gesamtkostensatz Strasse und Schiene 2050 (CHF/Ntkm)

	Referenz	Technologieszenario	Veränderung (%)
Strasse – LNF	8.28	7.28	-12%
Strasse – SNF	0.49	0.43	-12%
Schiene – WLW	0.19	0.17	-11%
Schiene – UKV	0.53	0.45	-16%
Schiene – ROLA	0.20	0.18	-11%

Tabelle 27: Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Mit der Automatisierung fallen insbesondere die **Kosten für Personal** (Fahrer/-in bzw. Lokführer/-in) weg. Das Ausmass der Reduktion der Personalkosten wird im Strassenverkehr auf -50% für SNF bzw. -17% für LNF geschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Zulieferverkehren mit LNF das Reduktionspotenzial geringer ist, weil das Fahrpersonal nicht nur Fahraufgaben übernimmt, sondern insbesondere auch das Be- und Entladen am Quell-/Zielort. Es wird auch weiterhin Personal für logistische Prozesse, wie das Be- und Entladen von Fahrzeugen oder das Zustellen an Kundinnen geben. Im Schienenverkehr gehen wir systembedingt (schienengebunden) von einer höheren Reduktion der Personalkosten um 75% aus, wobei diese aufgrund des geringen Anteils der Personal- an den Gesamtkosten kaum ins Gewicht fallen. Generell bestehen jedoch grosse Unsicherheiten, ob v.a. im Strassenverkehr Fahrer das Be- und Entladen und weitere Hilfsfunktionen übernehmen und zu welchem Anteil daher die Personalkosten des Fahrers bzw. der Fahrerin eingespарт werden können (ARE 2021).

Die **Betriebskosten** auf der Strasse sinken leicht, aber weniger stark als im Elektromobilitätsszenario. Diese Mehrkosten entstehen durch höhere Produktionskosten der automatisierten Fahrzeuge, die auf zusätzliche Ausstattungen zurückzuführen sind. Allerdings können diese Kosten teilweise ausgeglichen werden, da E-Fahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit fossilen Antrieben günstiger sind. Die Tourenplanung kann durch den Wegfall von Regelungen für Arbeitszeiten optimiert werden, wodurch ein erhöhter Einsatz der Fahrzeuge und damit eine Reduktion der Kosten ermöglicht wird. Allerdings bleibt das Optimierungspotenzial durch Nachtfahrverbote und Ladezeiten begrenzt. Für schienengebundene Verkehre wird davon ausgegangen, dass ein fahrerloser Betrieb mit Fernsteuerung national implementiert werden kann. Generell ist anzumerken, dass die Entwicklungen mit Unsicherheiten behaftet sind.

Die **Energiekosten** werden aufgrund der Digitalisierung und dadurch effizienteren bzw. energieschonenden, vorausschauenden Fahrens sowie Platoonings im Strassenverkehr reduziert werden. Auch auf der Schiene können die Energiekosten um rund 10% sinken (ARE 2021). Die **Kostensätze für die Infrastrukturbenutzung** werden als konstant angenommen. Es werden keine veränderten oder neuen Abgaben für die Infrastrukturnutzung berücksichtigt, d.h. vorliegend ist es nicht das Ziel, die Auswirkungen allfälliger politischer Massnahmen aufzuzeigen (ceteris paribus).

Im Schienenverkehr hat der Kostenblock «**Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)**» den mit Abstand grössten Anteil an den Gesamtkosten. Es ist davon auszugehen, dass Produktivitätssteigerungen insbesondere im UKV durch automatisierten Umschlag sowie generell für die Schiene (z.B. automatische Kupplung bei Rollmaterial) erzielt werden können. Im Technologieszenario wird angenommen, dass die sonstigen Kosten im WLV und für die ROLA um 15% bzw. im UKV um 20% reduziert werden können (ARE 2021).

Die Automatisierung auf der Schiene findet heute im Güterverkehr bereits statt. Im Referenzszenario werden gewisse Effekte (z.B. digitale automatische Kupplung, DAK) bereits berücksichtigt. Vorliegend wird davon ausgegangen, dass es noch weitere Kostensenkungspotenziale gibt, weil von einer sehr hohen Durchdringung automatisierter Züge ausgegangen wird.

Die **durchschnittliche Beladung** verändert sich nur minimal (Tabelle 28). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Automatisierung dazu führen kann, dass häufiger Fahrten durchgeführt werden, v.a. im Zulieferverkehr mit LNF (ARE 2021). Mit automatisierten Fahrzeugen sind theoretisch Leerfahrten möglich, ohne dass auf die Arbeitszeiten des Fahrpersonals Rücksicht genommen werden müsste. Der Effekt im Güterverkehr ist jedoch unklar. Zudem wird davon ausgegangen, dass Unternehmen auch bei automatisierten Fahrzeugen Leerfahrten weitestgehend aus wirtschaftlichen Gründen vermeiden werden.

Veränderung Auslastung Strasse 2050 (Tonnen)

	Referenz	Technologieszenario	Veränderung (%)
LNF	0.12	0.12	-0.7%
SNF	6.90	6.89	-0.1%

Tabelle 28: Veränderung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Die **durchschnittliche Geschwindigkeit** auf der Strasse erhöht sich aufgrund der Automatisierung (Tabelle 29). Mit der Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge können die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen massgeblich reduziert und damit die Kapazität erhöht werden (vgl. Tabelle 16 in Abschnitt 3.2.3.1). Hierbei wird auf den Ergebnissen von ARE (2021) und den durchgeführten Modellierungen mit dem NPVM aufgebaut.

Veränderung Geschwindigkeit Strasse 2050 (km/h)

	Referenz	Technologieszenario	Veränderung (%)
LNF	35.4	36.2	+2.3%
SNF	47.4	49.5	+4.5%

Tabelle 29: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021)

4.2.4 Mobility-as-a-Service-Szenario – Automatisierte, geteilte E-Mobilität

Im MaaS-Szenario¹⁴ bleiben die Annahmen zum Elektrifizierungs- und Automatisierungsgrad unverändert bestehen. Entgegen den Annahmen im Technologieszenario ist das Teilen von Ressourcen (Fahrzeugen und Fahrten) gesellschaftlich und von den Unternehmen akzeptiert und weit verbreitet. Es wirken also alle drei Trends (Elektrifizierung, Automatisierung und Sharing) gemeinsam und beeinflussen sich gegenseitig.

4.2.4.1 Personenverkehr

Der Grad der Elektrifizierung im PV entspricht dem Elektrifizierungsszenario und die Durchdringung der Automatisierung jener im Technologieszenario 99%. Die einfache Kombination von Verkehrsmitteln, sowie das Teilen von Fahrzeugen und Fahrten ist über eine App-basierte Plattform möglich. Ein Drittel der Fahrten im MIV sind gepoolt und der PW-Besitz verliert an Bedeutung: Drei privat genutzte PW werden durch einen kollektiv genutzten PW ersetzt. Da Fahrzeuge bereits nahezu vollständig elektrifiziert sind, sind die zusätzlichen, fahrleistungsbezogenen Emissionseinsparungen nur noch gering.¹⁵ Die Grenzen zwischen MIV und ÖV verschwimmen zunehmend. Die Mobilitäts-Servicewelt führt zu einer Verlagerung vom MIV und ÖV auf den öffentlichen Individualverkehr (ÖIV). Im MaaS-Szenario finden Verhaltensänderungen statt. Personen sind eher bereit, kollektive Transportmittel zu nutzen. Gleichzeitig führen neue Angebote (Ride-Pooling etc.) auf der ersten / letzten Meile dazu, dass die

¹⁴ Während der Begriff «MaaS» für den Personenverkehr geeignet ist, um das Szenario einer automatisierten und geteilten E-Mobilität zu beschreiben, ist er für den Güterverkehr eher ungeeignet. Im Güterverkehr wird dieses Szenario teilweise als «Mobilitäts-Servicewelt» bezeichnet. Auch «LaaS» (Logistics-as-a-Service) wäre eine alternative Bezeichnung. Um eine einheitliche Bezeichnung zu verwenden, wird der Begriff «MaaS» als übergeordnete Szenariobezeichnung beibehalten.

¹⁵ Vor- und nachgelagerte Effekte wie der Rückgang der Emissionen aus der Fahrzeugherstellung werden in Kapitel 6.1 berücksichtigt.

Multimodalität und somit auch der Bahnverkehr an Attraktivität gewinnt. Dies hat einen positiven Effekt auf die Nachfrage im ÖV. In der Folge kann die Effizienz im ÖV steigen.

Der Flottenmix im MaaS-Szenario basiert auf den Szenarioannahmen zu Elektrifizierung und Automatisierung sowie dem HBEFA (INFRAS 2022, INFRAS 2024). Der Flottenmix ist identisch mit dem des Technologieszenarios.

Flottenmix MIV(Anteile an der Fahrleistung)		
	Anteile	Quelle
Verbrenner gesamt	1%	Eigene Annahme
Benzin	0.5%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Diesel	0.8%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
Elektro gesamt	99%	Eigene Annahme
autonome BEV	99%	Eigene Annahme
BEV (nicht autonom)	0%	INFRAS 2022, INFRAS 2024
PHEV (nicht autonom)	0%	INFRAS 2022, INFRAS 2024

Tabelle 30: MaaS-Szenario Flottenmix im MIV, fahrleistungsbezogen

Die wichtigsten Stellschrauben im MaaS-Szenario werden im Folgenden diskutiert.

Für die **Mobilitätsrate** wird eine Änderung über alle Fahrzwecke hinweg angenommen. Hierfür basieren wir auf ARE 2021. In ARE 2021 wurden für das MaaS-Szenario (dort: Szenario 3, Mobilitäts-Servicewelt) nach Alterskohorten differenzierte Annahmen getroffen. Wie vorgängig beschrieben, wird ein Gesamteffekt über alle Altersgruppen und Fahrzwecke hinweg ermittelt. Durch Automatisierung und Sharing steigt die MR insg. um 5.4% ggü. den Referenzszenario an. V.a. die neuen Nutzergruppen sowie zusätzliche Fahrten führen zu diesem Anstieg.

Veränderungen der **Zeitkosten (VoT)** werden analog zum Technologieszenario nur im MIV angenommen, im ÖV entstehen keine Veränderungen des VoT (ARE 2021). Durch Automatisierung und Sharing sinken die Reisezeitkosten. Dieser Effekt ist im MaaS-Szenario aber schwächer als im Technologieszenario, da die Reisezeit im MIV durch Sharing weniger genutzt werden kann. Wir gehen von einer Reduktion der Zeitkosten von – 35% über alle Fahrtzwecke gegenüber dem Referenzszenario aus.¹⁶

Die **KM-Kosten im MIV** basieren wie gehabt auf dem Kostentool des NPVM der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) (vgl. 4.2.1.1). Die Kosten sind den gleichen Effekten wie im Technologieszenario unterlegen (höhere Anschaffungskosten für automatisierte Elektrofahrzeuge, gleichzeitig niedrigere Betriebskosten), sinken aber aufgrund der höheren Fahrleistung der Fahrzeuge erheblich. Es wird angenommen, dass drei private PW durch ein geteilten PW ersetzt werden. Die KM-Kosten sinken deutlich auf 0.14 CHF/km ab.

¹⁶ Diese Annahme wurde basierend auf der Literatur (vgl. Tabelle 8/ARE 2021) diskutiert. Da die Veränderung des VoT sich zwischen den Fahrzwecken stark unterscheidet, wird ein pauschaler Ansatz von – 35% über alle Fahrzwecke hinweg angenommen.

Auch im **ÖV** wirken die Effekte der Automatisierung auf die durchschnittlichen Preise (Beibehaltung des Kostendeckungsgrads; anteilige Weitergabe höherer Anschaffungskosten sowie deutlich niedrigerer Betriebskosten durch den Wegfall des Fahrpersonals). Die **durchschnittlichen Preise** sinken um 11% gegenüber dem Referenzszenario (ARE 2021).

Sharing beeinflusst die **Besetzungsgrade des MIV (inkl. ÖIV)** stark. Durch das Teilen der Fahrten sind die Fahrzeuge stärker ausgelastet (BMW et al. 2016, Mühlethaler et al. 2011, ITF 2015, Bruns et al. 2018, ITF 2020, ARE 2021). Wir gehen davon aus, dass der BG im Vergleich zum Referenzszenario um 6% steigt (ARE 2021).

Die **Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV** sind zum einen weiterhin durch die Automatisierung der Fahrzeuge höher als im Referenzszenario. Zusätzlich steigen die Geschwindigkeiten durch Sharing an, da weniger Fahrzeuge auf den Strassen unterwegs sind, wodurch schneller gefahren werden kann. Insg. steigt die Geschwindigkeit im MIV um 12% im Vergleich zum Referenzszenario (ARE 2021). **Tabelle 31** gibt einen Überblick über die Annahmen.

Annahmen MaaS-Szenario		
Indikator	Annahme	Quelle
Mobilitätsrate (MR)	+5.4%	ARE 2021, BFS 2025
Value of Time (VoT)	MIV: alle Zwecke: -35%	VSS Norm 41822a; ARE 2021; eigene Annahme
	ÖV: keine Veränderung	
Kosten MIV	KM-Kostensatz (global): 0.16 CHF/km	NPVM-Kostentool (ARE 2022a); HBEFA 2022, eigene Annahme
Preise ÖV	-11%	ARE 2021
Besetzungsgrade (BG)	+6%	ARE 2021
Geschwindigkeit MIV	+12%	ARE 2021

Tabelle 31: Annahmen MaaS-Szenario PV, absolute oder prozentuale Veränderung ggü. Referenzszenario

4.2.4.2 Güterverkehr

Es wird analog zum Technologie-Szenario angenommen, dass im MaaS-Szenario sowohl der Strassen- als auch der Schienengüterverkehr nahezu vollständig hoch- bzw. vollautomatisiert (Level 4 + 5 bzw. GoA 4) sind. Der Elektrifizierungsgrad entspricht wiederum dem Elektromobilitätsszenario (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Im Gegensatz zum Technologieszenario sind die Unternehmen bereit, ihre Ressourcen zu teilen. Kollaboration und Bündelung beziehen sich auf die gemeinsame Nutzung von Ressourcen, wodurch eine bessere Auslastung der Ressourcen und eine höhere Prozesseffizienz erzielt wird.

Die verschiedenen Effekte aufgrund der Elektrifizierung im Strassenverkehr, der Automatisierung und Vernetzung sowie der Kooperationen wirken sowohl im Strassen-

als auch Schienengüterverkehr auf die **Kostensätze und -strukturen**. Auf Basis der Literaturanalyse werden Annahmen zur Veränderung ggü. der Referenzentwicklung in der jeweiligen Kostenkategorie (Personal, Betrieb, Energie, Infrastrukturbenutzung, Sonstiges v.a. Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.) getroffen (Tabelle 32).

Veränderung Gesamtkostensatz Strasse und Schiene 2050

	Strasse – LNF	Strasse – SNF	Schiene – WLW	Schiene – UKV	Schiene – ROLA
Personal	-25%	-75%	-75%	-75%	-75%
Betrieb	-27%	-27%	-25%	-25%	-25%
Energie	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
Infrastruktur	0%	0%	0%	0%	0%
Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)	0%	0%	-30%	-40%	-30%
Gesamt	-23%	-24%	-27%	-34%	-26%

Tabelle 32: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr «Technologie» (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Tabelle 33 fasst die Veränderung der Kostensätze im MaaS-Szenario ggü. der Referenz zusammen. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

Gesamtkostensatz Strasse und Schiene 2050 (CHF/Ntkm)

	Referenz	MaaS-Szenario	Veränderung (%)
Strasse – LNF	8.28	6.36	-23%
Strasse – SNF	0.49	0.37	-24%
Schiene – WLW	0.19	0.14	-27%
Schiene – UKV	0.53	0.35	-34%
Schiene – ROLA	0.20	0.15	-26%

Tabelle 33: Veränderung der Kostensätze im Güterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Die Effekte der Elektrifizierung und Automatisierung gemäss Technologieszenario werden übernommen. Zusätzlich haben die hohe Kooperation und Kollaboration einen massgeblichen Einfluss auf die Kosten. Die **Kosten für Personal** im Strassenverkehr können v.a. durch Automatisierung reduziert werden. Die Kostenreduktionen aus dem Technologieszenario werden daher übernommen (insgesamt -75%, sowohl für die Strasse als auch die Schiene).

Die Auslastung der Ressourcen und Prozesseffizienz können erhöht und dadurch die **Betriebskosten** sowohl für die Strasse als auch die Schiene reduziert werden. Beispielsweise können leere Kapazitäten auf Plattformen angeboten und dadurch die bestehenden Kapazitäten und Ressourcen höher ausgelastet werden. Dies führt wiederum zu Kostensenkungen. Analog dem Technologieszenario wird eine Reduktion der **Energiekosten** von -10% angenommen.

Die **Kostensätze für die Infrastrukturbenutzung** werden weiterhin als konstant angenommen. Es werden keine veränderten oder neuen Abgaben für die

Infrastrukturnutzung berücksichtigt, d.h. vorliegend ist es nicht das Ziel, die Auswirkungen allfälliger politischer Massnahmen aufzuzeigen (*ceteris paribus*).

Für den Kostenblock «**Sonstiges (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.)**» im Schienenverkehr wird angenommen, dass diese massgeblich sinken. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Reduktionen der Automatisierung und Vernetzung (analog Technologieszenario) aufgrund der Kollaboration verdoppelt werden können, da der Vor-/Nachlauf und Umschlag weniger personalintensiv sein wird. Die Annahme aus dem Technologieszenario, dass die Produktivitätssteigerungen insbesondere im UKV durch automatisierten Umschlag sowie generell für die Schiene (z.B. automatische Kupplung bei Rollmaterial) erzielt werden können, ist ebenfalls im MaaS-Szenario relevant.¹⁷

Die **durchschnittliche Beladung** verändert sich bei den schweren Nutzfahrzeugen (Tabelle 34). Analog zum Technologieszenario können mit den LNF häufiger Fahrten durchgeführt werden, aber im MaaS-Szenario wird zusätzlich von einer besseren Auslastung ausgegangen (Reduktion Leerfahrten, z.B. Mitnahme Retouren-Sendungen). Für die LNF wird davon ausgegangen, dass sich diese Effekte kompensieren und die durchschnittliche Beladung unverändert bleibt. Mit der Kollaboration und Bündelung (digitale Spedition, Shared Logistics Resources) erhöht sich die Auslastung der SNF (v.a. Reduktion Leerfahrten). Analog zum Technologieszenario können auf der Schiene die Zugfolgezeiten gekürzt und Verspätungsminuten reduziert werden. Aufgrund durchgehender Trassierung sinken die Transportzeiten auf der Schiene. Die Erhöhung der Streckenkapazität könnte bis zu 20% betragen. Analog zum Technologieszenario führt die Automatisierung von verschiedenen Prozessen und Funktionen (z.B. automatische Kupplung, Bremsprobe) zur Reduktion von Transport- und Umschlagszeiten und damit zu einer Erhöhung von Geschwindigkeiten (ARE 2021). Damit verbundene Standardisierungen haben ebenfalls einen Effizienznutzen. Die Effizienzpotenziale sind je nach Transportgut, Distanz und weiteren Rahmenbedingungen unterschiedlich.

Veränderung Auslastung Strasse 2050 (Tonnen)			
	Referenz	MaaS-Szenario	Veränderung (%)
LNF	0.12	0.12	0%
SNF	6.90	7.34	+6.4%

Tabelle 34: Veränderung der durchschnittlichen Beladung im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021, eigene Annahmen)

Tabelle 35 zeigt die Veränderung der **durchschnittlichen Geschwindigkeit** auf der Strasse im MaaS-Szenario. Hierbei spielen zwei wesentliche Effekte zusammen: Erstens können mit der Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen massgeblich reduziert und damit die Kapazität erhöht werden (vgl. Tabelle 16 in Abschnitt 3.2.3.1). Gleichzeitig erhöht sich die Geschwindigkeit aber auch aufgrund der Erhöhung der Bereitschaft, Ressourcen zu teilen. Die verstärkte Kollaboration hat positive Wirkungen auf die durchschnittliche Auslastung und damit einer Reduktion der Verkehrsbelastung auf der Strasse zur Folge. Insgesamt führt dies zu einer deutlichen Erhöhung der durchschnittlichen

¹⁷ Auch hierzu sei angemerkt, dass dies Annahmen sind, um mögliche Entwicklungen darzustellen, die mit Unsicherheiten verbunden sind.

Geschwindigkeit auf der Strasse (Tabelle 35). Hierbei wird wiederum auf den Ergebnissen von ARE (2021) und den durchgeführten Modellierungen mit dem NPVM aufgebaut. Die höheren Geschwindigkeiten der SNF ggü. der LNF ist v.a. auf die unterschiedlichen Marktsegmente und damit der Nutzung verschiedener Strassenkategorien zurückzuführen. LNF verkehren insbesondere auch in urbanen Gebieten, für die geringere Geschwindigkeitsreduktionen angenommen wurden.

Veränderung Geschwindigkeit Strasse 2050 (km/h)

	Referenz	MaaS-Szenario	Veränderung (%)
LNF	35.4	37.1	+4.8%
SNF	47.4	54.7	+15.3%

Tabelle 35: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Strassengüterverkehr (Quelle: ARE 2021)

4.3 Übersicht zentrale Stellschrauben in den Analyseszenarien

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Stellschrauben werden für einen Quervergleich über alle Szenarien gegenübergestellt. Die Quellen sind in Kapitel 4.2 benannt und werden hier nicht nochmals erwähnt.

4.3.1 Personenverkehr

Tabelle 36 zeigt die zentralen Stellschrauben im PV für die Referenz und die drei Analyseszenarien. Zu einzelnen Indikatoren werden die Veränderungen in den Analyseszenarien zusätzlich in Grafiken gezeigt. Zusätzlich wird der fahrleistungsbezogene Flottenmix im MIV im Vergleich über die Szenarien gezeigt.

Zentrale Stellschrauben im Personenverkehr

	Referenzszenario	Elektrifizierungsszenario	Technologieszenario	MaaS-Szenario
Mobilitätsrate	Arbeiten: 0.63 Ausbildung: 0.26 Einkaufen: 0.61 Besorgung: 0.22 Geschäft: 0.12 Freizeit: 1.61 Anderes: 0.28	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	+2.7%	+5.4%
VoT MIV	Pendelfahrt: 31.45 Einkaufsfahrt: 20.72 Nutzfahrt: 32.24 Freizeitfahrt: 22.05 Alle Zweck : 25.57	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	Alle Zwecke: -40%	Alle Zwecke: -35%
VoT ÖV	Pendelfahrt: 16.08 Einkaufsfahrt: 12.32	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario

	Referenzszenario	Elektrifizierungsszenario	Technologieszenario	MaaS-Szenario
	Nutzfahrt: 35.73 Freizeitfahrt: 12.01 Alle Zwecke: 14.65			
KM-Kostensatz MIV (global)*	0.24 CHF/km	0.23 CHF/km	0.20 CHF/km	0.14 CHF/km
Preise ÖV	0.35 CHF/Pkm	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	-6%	-11%
BG MIV	Arbeit (qualifiziert): 1.08 Arbeit (einfach): 1.06 Bildung: 1.31 Einkauf (kurzfristig): 1.31 Einkauf (langfristig): 1.47 Nutzfahrt: 1.15 Freizeit (kurz): 1.44 Freizeit (lang): 1.63	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	-16.7%	+6%
Geschwindigkeit MIV	43.4 km/h	Keine Veränderung ggü. Referenzszenario	+8%	+12%

Tabelle 36: Überblick Stellschrauben im Personenverkehr im Vergleich zum Referenzszenario

*Keine Veränderung, absolute Werte.

Die **Besetzungsgrade im MIV** entwickeln sich in den Analyseszenarien sehr unterschiedlich (Abbildung 22). Während sie im Elektrifizierungsszenario ggü. der Referenz unverändert bleiben, sinken sie im Technologieszenario auf 1.16 ab. Im MaaS-Szenario ist der Besetzungsgrad durch das Teilen von Fahrten mit 1.48 höher als im Referenzszenario.

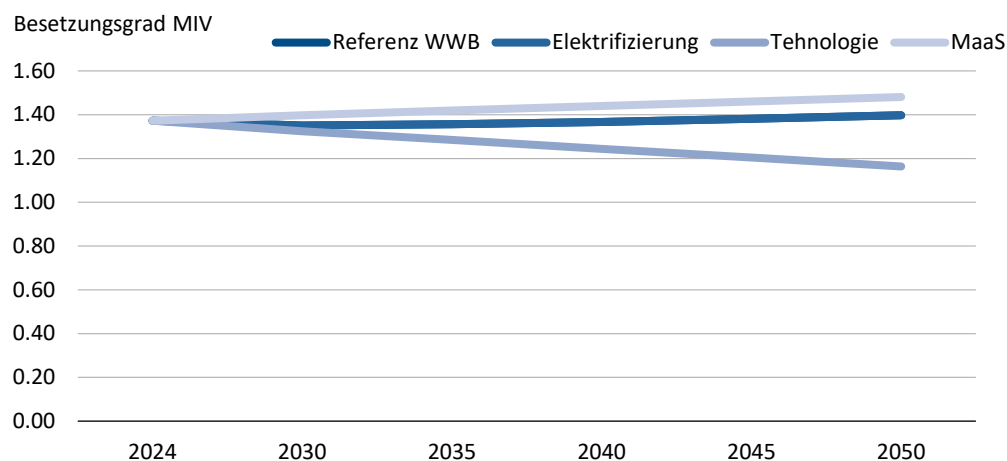


Abbildung 22: Entwicklung der Besetzungsgrade MIV in der Referenz und den Analyseszenarien

Die **Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV** bleibt im Elektrifizierungsszenario unverändert bei 43.4 km/h (Abbildung 23). Aufgrund von Kapazitätseffekten auf der Strasse steigt die Geschwindigkeit im Technologieszenario um 8% auf 46.7 km/h an. Aufgrund der Automatisierung und des Sharing im MaaS-Szenario sind weniger PW auf den Strassen unterwegs (ein geteilter PW ersetzt drei private PW), sodass die Geschwindigkeit auf 48.5 km/h steigt.

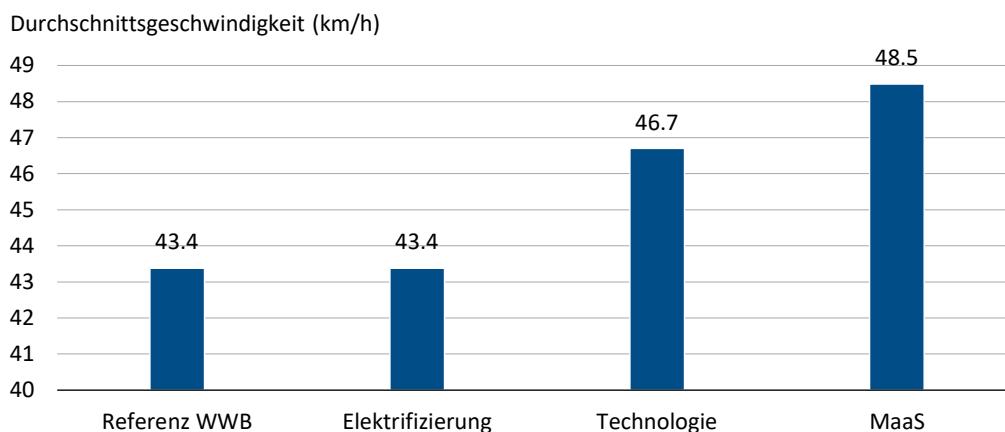


Abbildung 23: Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz im Quervergleich (Quelle: INF-RAS)

Die **Preise für ÖV und Gesamtkosten MIV** setzen sich additiv aus den jeweiligen Preisen/Kilometerkosten und den Zeitkosten zusammen (vereinfachte generalisierte Kosten). Abbildung 24 zeigt die Veränderungen in den Analyseszenarien ggü. dem Referenzszenario. Die Preise im ÖV bleiben im Elektrifizierungsszenario unverändert und sinken im Technologie- und MaaS-Szenario (niedrigere Preise im ÖV v.a. durch den Wegfall des Fahrpersonals bei der Automatisierung und attraktiveren ÖV durch Sharing; anteilige Weitergabe der Kostenreduktion an Nutzende, bei gleichbleibenden Kostendeckungsgrad). Im **MIV** sinken die Gesamtkosten pro Kilometer im Elektrifizierungsszenario leicht aufgrund niedrigerer Betriebskosten von Elektrofahrzeugen. Im Technologieszenario sinken die Zeitkosten stark, was zu einer Reduktion der Gesamtkosten von 10.2% führt. Im MaaS-Szenario sinken die Zeitkosten ebenfalls, wenn auch nicht so stark wie im Technologieszenario. Gleichzeitig sind aber die Kilometerkosten für die Fahrzeuge deutlich niedriger, was gesamthaft zu einem um 17.4% niedrigerem Kostensatz führt.¹⁸

¹⁸ Die hier verwendeten MIV-Kosten entsprechen den entscheidungsrelevanten Kilometerkosten. Sie sind nicht mit den Kosten in der KfV-Statistik (BFS 2024e) vergleichbar, da es sich bei der KfV um eine Vollkostenrechnung handelt. Für die vorliegende Analyse sind die Vollkosten hingegen nicht relevant.

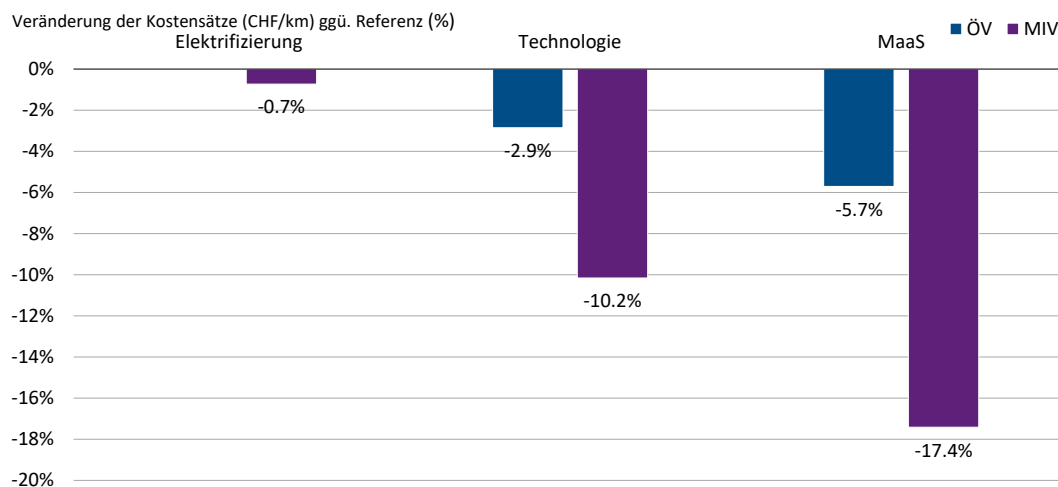


Abbildung 24: Kostensätze im MIV und ÖV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz im Quervergleich (Quelle: INFRAS)

Der **Flottenmix** dient als Grundlage in den Szenarien und wird in **Tabelle 37** nochmals in der Übersicht aufgezeigt.

Flottenmix MIV				
	Referenz-szenario	Elektrifizierungsszenario	Technologie-szenario	MaaS-Szenario
Verbrenner gesamt	20%	1%	1%	1%
Benzin	8%	0.5%	0.5%	0.5%
Diesel	12%	0.8%	0.8%	0.8%
Elektro gesamt	80%	99%	99%	99%
autonome BEV	32%	32%	99%	99%
BEV (nicht autonom)	38%	66%	0%	0%
PHEV (nicht autonom)	10%	1%	0%	0%

Tabelle 37: Überblick Flottenmix im Personenverkehr, fahrleistungsbezogen

Neben den Annahmen zu den Stellschrauben im PV wird übergeordnet von einer **Preiselastizität** von -0.3 ausgegangen. Eine Preiselastizität von -0.3 bedeutet, dass sich die Verkehrsnachfrage um 3% verringert, wenn sich der Preis um 10% erhöht. Wir differenzieren dabei nicht zwischen kurz- und langfristigen Preiselastizitäten. Rebound-Effekte sind in den Elastizitäten bereits enthalten. Der Wert von -0.3 basiert auf einer Schätzung gestützt auf einer Literaturrecherche (INFRAS 2019).

4.3.2 Güterverkehr

Tabelle 38 fasst die verschiedenen Stellschrauben in den Analyseszenarien und der Referenz gemäss den Erläuterungen in den vorangegangenen Kapiteln nochmals zusammen. Nachfolgend werden zudem die Veränderungen ggü. der Referenz aufgezeigt. Eine Veränderung des Aufkommens – analog der Veränderung der Mobilitätsrate im Personenverkehr – ist im Güterverkehr nicht zu erwarten. Das Güterverkehrsaufkommen ist eine abgeleitete Nachfrage. Das Angebot automatisierter, vernetzter und geteilter Dienstleistungen wird das Aufkommen nicht verändern. Ergänzend sei auch erwähnt, dass der Gütertransport mit Binnenschiff und in Rohrfernleitungen nicht betrachtet wird (vgl. Kapitel 1.3).

Zentrale Stellschrauben im Güterverkehr

	Referenz	Elektrifizierungsszenario	Technologieszenario	MaaS-Szenario
Gesamtkosten (CHF/tkm)				
Strasse – LNF	8.28	8.26	7.28	6.36
Strasse – SNF	0.49	0.49	0.43	0.37
Schiene – WLW	0.19	0.19	0.17	0.14
Schiene – UKV	0.53	0.53	0.45	0.35
Schiene – ROLA	0.20	0.20	0.18	0.15
Ø Beladung Strasse (Tonnen)				
LNF	0.12	0.12	0.12	0.12
SNF	6.90	6.90	6.89	7.34
Ø Geschwindigkeit (km/h)				
LNF	35.4	35.4	36.2	37.1
SNF	47.4	47.4	49.5	54.7

Tabelle 38: Überblick Veränderung Stellschrauben im Güterverkehr in den Analyseszenarien ggü. Referenz

Die Veränderungen der Kosten im Güterverkehr auf der Strasse und Schiene hat verschiedene Gründe. Im MaaS-Szenarien sind die Effekte sowohl auf Strasse als auch Schiene am stärksten (Abbildung 25).

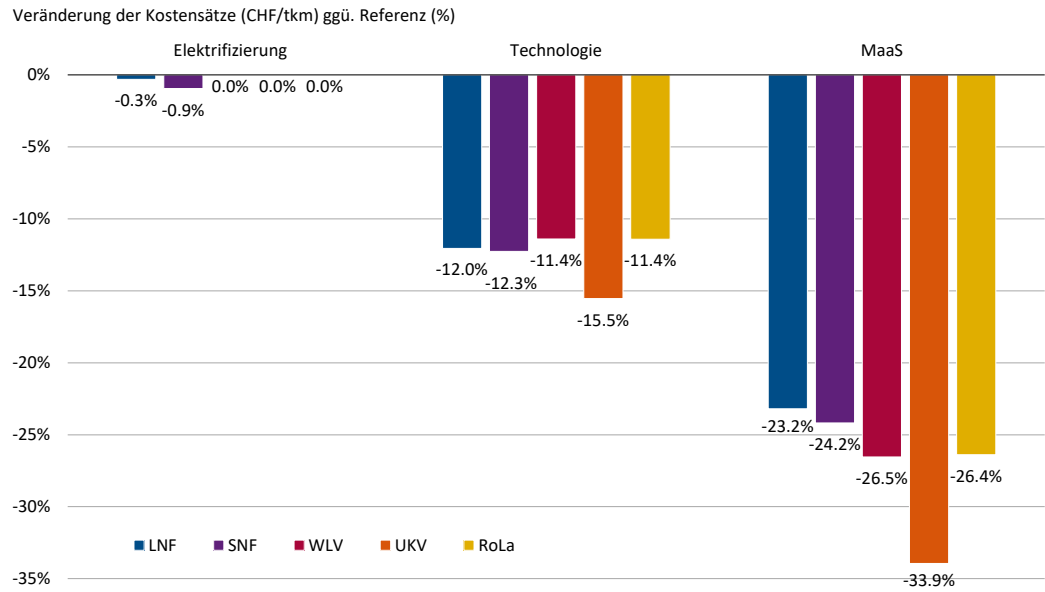


Abbildung 25: Veränderung der Gesamtkosten GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz

Die **durchschnittliche Beladung** erhöht sich im MaaS-Szenarien, weil das Teilen von Ressourcen bzw. die Kollaboration positive Effekte auf die Auslastung der Fahrzeuge und dem Leerfahrtenanteil hat (Abbildung 26).

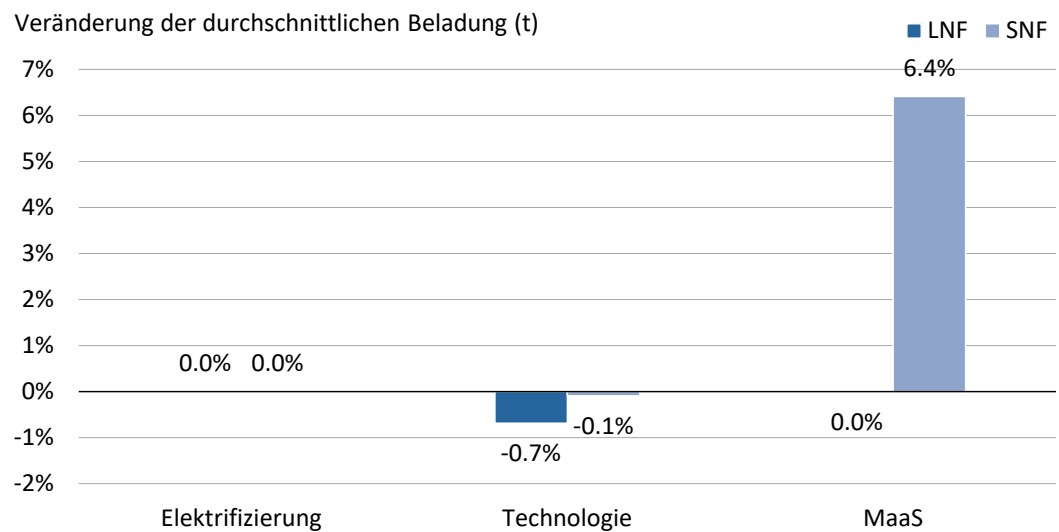


Abbildung 26: Veränderung der durchschnittlichen Beladung GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz

Auf der Strasse erhöhen sich die **Geschwindigkeiten** im MaaS-Szenarien am stärksten, da sowohl die Automatisierung und Vernetzung und damit einhergehende Kapazitätseffekte auf der Strasse als auch das Teilen von Ressourcen zu einer Entlastung der Strasse und damit Erhöhung der Geschwindigkeiten führen.

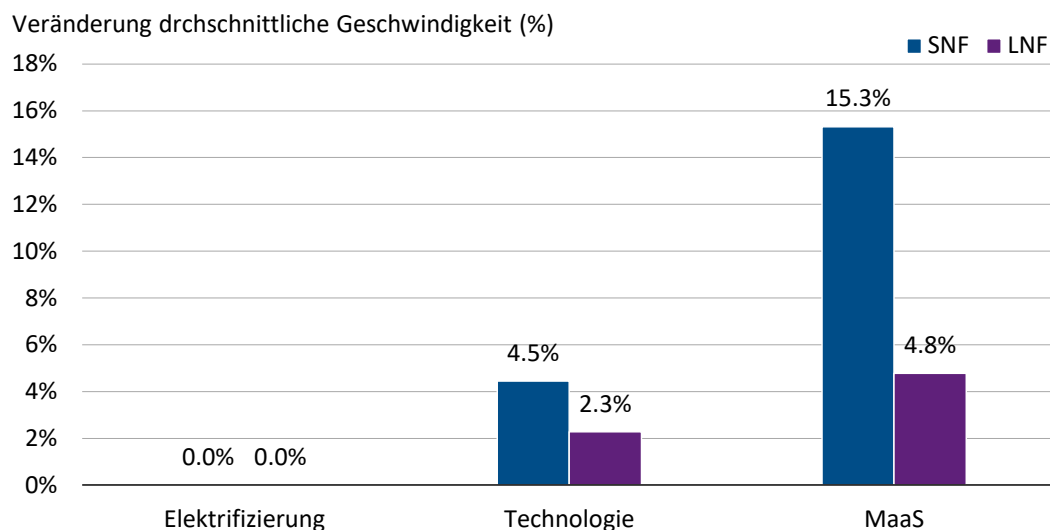


Abbildung 27: Veränderung der durchschnittlichen Geschwindigkeit im GV in den Analyseszenarien ggü. der Referenz

Die Elastizitäten sind in den Szenarien unverändert und vom ARE bzw. aus der AMG übernommen (Abbildung 28). Auch die Zeitkostensätze (Value of Time) verändern sich im Güterverkehr in den Szenarien – im Gegensatz zum Personenverkehr – nicht.

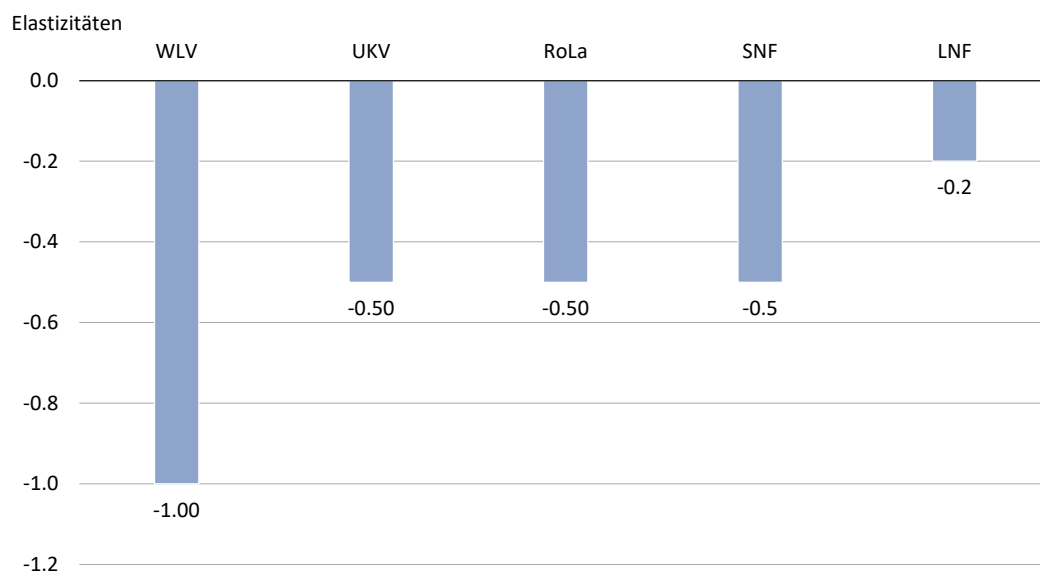


Abbildung 28: Elastizitäten im GV

5 Verkehrliche Wirkungen

Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der verkehrlichen Wirkungen in den Analyseszenarien zusammen. Es baut auf der Literaturanalyse (Kapitel 3) und dem Referenzszenario sowie den aus der Literaturanalyse abgeleiteten Stellschrauben der Analyseszenarien auf (Kapitel 4). Im Folgenden zeigen wir zunächst die verkehrlichen Wirkungen für den Personenverkehr (Kapitel 5.1) und dem Güterverkehr (Kapitel 5.2). Kapitel 5.3 fasst die Ergebnisse nochmals zusammen.

Wir legen den Fokus auf die Veränderungen im Verkehr in den Analyseszenarien ggü. der Referenz im Jahr 2050. Die Analyseszenarien sollen den Raum möglicher zukünftiger Entwicklungen aufzeigen und sind explorative Szenarien («Was wäre wenn»). Es handelt sich also um Eck-Szenarien, die nicht als Prognosen zu verstehen sind. Im Vordergrund stehen daher nicht die absoluten Angaben zu Verkehrsaufkommen und -leistung sowie Fahrleistung auf der Strasse, sondern jeweils die Veränderung ggü. der Referenz. Es handelt sich um vereinfachte Abschätzungen auf Basis von Wirkungsmodellen von INFRAS, die weiterentwickelt und vor allem aktualisiert worden.

5.1 Verkehrliche Wirkungen im Personenverkehr

5.1.1 Vorgehen im Personenverkehr

Für die Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen wurde auf der von INFRAS entwickelten aggregierte Methode Personenverkehr (AMP) aufgebaut. Das zugrundeliegende Wirkungsmodell ist angelehnt an die «klassischen» Stufenmodelle der Verkehrsplanung. Anstatt eines Quell-Ziel-basierten Mengengerüsts sind aggregierte Daten auf nationaler Ebene Gegenstand der AMP. Gegenüber klassischen Verkehrsmodellen für ein Basisjahr ist dieses aggregierte Modell in der Lage, Trends über die Zeit zu erfassen.¹⁹ Eine Disaggregation erfolgt nach Fahrtzwecken.

Die AMP besteht aus folgenden Stufen:

- Gesamtmodale Nachfrage
- Verkehrsmittelwahl
- Verkehrsleistung (sowie zusätzlich beim MIV auch die Fahrleistung)

Einen Überblick über die AMP gibt Abbildung 29. Die roten Elemente zeigen die Stellschrauben, die in den Analyseszenarien angepasst werden (können).

¹⁹ Im Gegensatz dazu beinhalten klassische Verkehrsmodelle «nur» einen zeitlichen Querschnitt. Langfristige Entwicklungen über die Zeit finden dann über entsprechend extern angepasste Inputdaten Berücksichtigung (bspw. bei den Mobilitätsraten oder Kostenveränderungen).

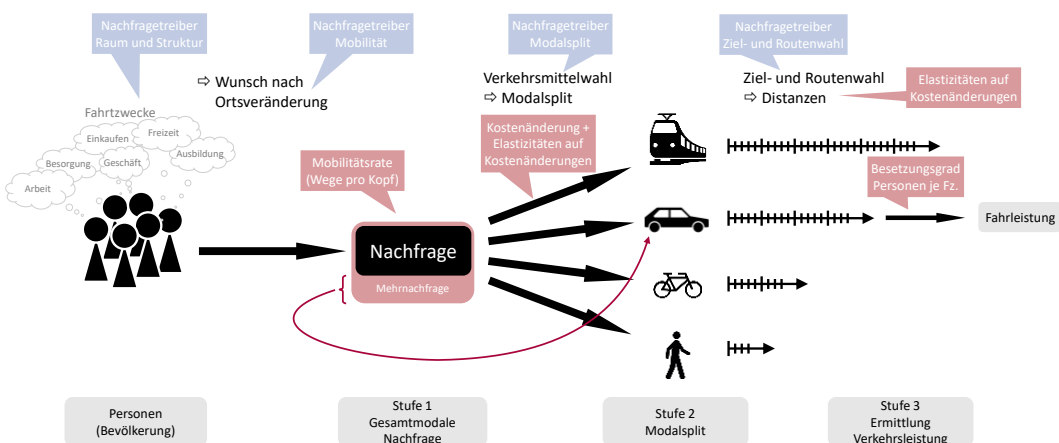


Abbildung 29: Wirkungsmodell Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

In einem ersten Schritt wird die gesamtmodale Nachfrage mittels Mobilitätsraten bestimmt. Basis sind die gemäss MZMV 1994 – 2021 fahrtzweckspezifisch ermittelten Mobilitätsraten (angepasst bzw. kalibriert an BFS 2024g). Diese werden im Referenzszenario analog der Entwicklung des Basisszenarios der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) fortgeschrieben.

Der aufkommensbezogene Modal Split orientiert sich im Basisjahr an BFS (2024g). Die AMP differenziert analog der Datenbasis im Mikrozensus bis zu acht Modi.²⁰ Im Referenzszenario wird die retrospektive Anteilsentwicklung mittels einer Trendfunktion basierend auf dem WWB-Szenario der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022a) fortgeschrieben. Mittels Kostenveränderungen und modalen Nachfrageelastizitäten können Modal Split Effekte auf Ebene des Verkehrsaufkommens aber auch der -leistung (bzw. der Durchschnittsdistanz) modelliert werden. Erfahrungsgemäss reagiert die Modalwahl bzgl. Aufkommen deutlich elastischer als die Ziel- und Routenwahl.

Im Referenzszenario werden die retrospektiven modalen Distanzentwicklungen mittels einer Trendfunktion basierend auf der Entwicklung des WWB-Szenarios (ARE 2022a) fortgeschrieben. Im AMP wird auf Basis der Verkehrsleistung im MIV und hinterlegten Besetzungsgraden Fahrleistungen im MIV abgeleitet. Mittels hinterlegter Durchschnittsgeschwindigkeiten werden Fahrzeugstunden MIV abgeschätzt. Im Maas-Szenario setzt sich der MIV aus dem privaten MIV und dem öffentlichen Individualverkehr (ÖIV) zusammen. Die neue Angebotsform des ÖIV führt zu einer veränderten Nutzung. Aufbauend auf den Ergebnissen für den MIV erfolgt abschliessend in Kapitel 5.1.2.6 eine vereinfachte Differenzierung des Verkehrsaufkommens und der -leistung in privatem MIV und ÖIV.

5.1.2 Ergebnisse Personenverkehr

Die verkehrlichen Wirkungen werden zuerst übergeordnet je Szenario zusammengefasst. Danach präsentieren wir die Ergebnisse entlang der verschiedenen Indikatoren, d.h. Veränderungen von Verkehrsaufkommen und -leistung im Personenverkehr sowie Fahrleistungen und Fahrzeugstunden im MIV ggü. dem Referenzszenario.

²⁰ 1: Bahn. 2: Tram, Bus, Trolley, sonstiger ÖV. 3: Reisecar. 4: Auto. 5: Motorrad, Kleinmotorrad. 6: Mofa, E-Bike 45. 7: Velo, E-Bike, FäG. 8: zu Fuss

Ride-Pooling und Ride-Sharing/Car-Pooling-Angebote werden zusammengefasst und als öffentlicher Individualverkehr (ÖIV) definiert. Im ÖIV werden Fahrten bedarfsgerecht gebündelt und sind daher kollektiv (Sharing). Dabei ist zu beachten, dass die neue Angebotsform ÖIV in der AMP nicht abgebildet ist. Der ÖIV wurde in der Diskussion um die Stellschrauben zum MIV implizit mitberücksichtigt. Die Ergebnisse der Modellierung werden zunächst für den ÖV und den MIV einschliesslich ÖIV präsentiert. Basierend auf den Modellergebnissen haben wir mögliche verkehrliche Entwicklungen für den privaten, individuell genutzten MIV und die neue, bedarfsgesteuerte Angebotsform ÖIV grob geschätzt. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 5.1.2.6 zusammengefasst.

5.1.2.1 Übersicht verkehrliche Wirkungen

Die verkehrlichen Wirkungen zeigen sich in Änderungen des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung sowie der Fahrleistung und Fahrzeugstunden im MIV. Tabelle 39 gibt einen Überblick über die Veränderung der jeweiligen Indikatoren ggü. der Referenz im Quervergleich über alle Analyseszenarien.

Im **Elektrifizierungsszenario** sind nur marginale verkehrliche Wirkungen vorhanden. Das Verkehrsaufkommen steigt im MIV leicht an (+0.1%), und sinkt dafür im ÖV, Velo- und Fussverkehr (jeweils -0.1%). Gleiches gilt für die Verkehrsleistung. Beides ist auf eine leichte Reduktion der Kosten im MIV durch die Elektrifizierung zurückzuführen, die zu einer Mehrnachfrage im MIV führt. Daraus resultiert ein (sehr geringer) Anstieg der durchschnittlichen Wegedistanz und Fahrzeugstunden im MIV (+0.1%). Die Bedeutung des ÖIV bleibt aufgrund der geringen Präferenz für Sharing wie im Referenzszenario sehr gering.

Im **Technologieszenario** resultiert die Nachfrage von neuen Nutzergruppen in einem höheren Verkehrsaufkommen (+2.7%). Die höhere Produktivität der MIV-Nutzenden steigert deren Anteil am Modal Split. Die gestiegenen Wegedistanzen (+4.7%) aufgrund der produktiveren Nutzung der Reisezeit im MIV und das höhere Aufkommen resultieren in einer Verkehrsleistung von +7.5%. Die geringeren durchschnittlichen Besetzungsgrade sowie längere Wegedistanzen im MIV führen zu einer hohen Zunahme der Fahrleistung (+34.6%) im Vergleich zur Verkehrsleistung (+12.3%) des MIV. Der ÖV verliert leicht an Bedeutung, weil das Angebot der automatisierten Fahrzeuge im Verhältnis zum ÖV attraktiver wird (-2.5%). Die generalisierten Kosten des MIV nehmen insgesamt ab, weil der VoT sowie die KM-Kosten im MIV sinken. Der ÖIV bleibt weiterhin unbedeutend.

Im **MaaS-Szenario** steigt das Verkehrsaufkommen durch neue Nutzergruppen um 5.4%. Durch die geringeren Kosten der Nutzung des MIV (inkl. ÖIV), der produktiveren Nutzung der Fahrzeit und neue Nutzergruppen steigt das Verkehrsaufkommen des MIV (inkl. ÖIV) (+15.8%) und zusätzlich aufgrund längerer Distanzen auch die Verkehrsleistung im MIV (+19.1%). Die Fahrleistung im MIV (inkl. ÖIV) steigt hingegen mit 12.2% etwas weniger, was auf höheren Besetzungsgrad der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Diese Zunahme ist auf einen starken Anstieg des ÖIV zurückzuführen, der 2050 im MaaS-Szenario 25.9% der Fahrleistung des MIV plus ÖIV ausmacht.

Veränderungen im Personenverkehr ggü. der Referenz			
	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
Verkehrsaufkommen (Wege)	0.0%	2.7%	5.4%
MIV (inkl. ÖIV)	0.1%	9.5%	15.8%
<i>Davon MIV privat/Individuell bzw. exkl. ÖIV</i>	<i>0.1%</i>	<i>9.5%</i>	<i>-22.8%</i>
Anteil ÖIV an MIV total	-	-	33.0%
ÖV	-0.1%	-2.5%	-2.3%
Veloverkehr	-0.1%	-3.0%	-3.5%
Fussverkehr	-0.1%	-3.1%	-3.7%
Verkehrsleistung (Pkm)	0.1%	7.5%	12.2%
MIV (inkl. ÖIV)	0.1%	12.3%	19.1%
<i>Davon MIV privat/Individuell bzw. exkl. ÖIV</i>	<i>0.1%</i>	<i>12.3%</i>	<i>-20.6%</i>
Anteil ÖIV an MIV total	-	-	33.0%
ÖV	-0.1%	-2.3%	-1.9%
Veloverkehr	-0.1%	-3.1%	-3.6%
Fussverkehr	-0.1%	-3.1%	-3.6%
Durchschnittliche Wegedistanz (km)	0.1%	4.7%	6.5%
MIV (inkl. ÖIV)	0.1%	2.5%	2.9%
ÖV	0.0%	0.2%	0.4%
Veloverkehr	0.0%	-0.1%	-0.1%
Fussverkehr	0.0%	0.1%	0.1%
Fahrleistung MIV (inkl. ÖIV) (Fzkm)	0.1%	34.6%	12.2%
Anteil ÖIV an MIV total (gleiche Wegelänge)	-	-	25.9%
Durchschnittlicher Besetzungsgrad MIV privat/individuell	0.0%	-16.7%	6.0%
Durchschnittlicher Besetzungsgrad MIV öffentlich/kollektiv (ÖIV)			51.4%
Fahrzeugstunden MIV (h)	0.1%	25.0%	0.4%
Durchschnittsgeschwindigkeit MIV (inkl. ÖIV)	0.0%	7.7%	11.8%

Tabelle 39: Veränderungen im Personenverkehr ggü. der Referenz (Quelle: INFRAS)

5.1.2.2 Veränderung des Aufkommens

Das Verkehrsaufkommen steigt aufgrund des verbesserten Zugangs zu Mobilität bzw. Mobilitätswerkzeugen im Technologie- und MaaS-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario. Die höheren Mobilitätsraten resultieren aus zwei Effekten:

- Der Anstieg im Technologie- und MaaS-Szenario ist auf die Automatisierung zurückzuführen (Zugang von älteren Personen sowie Kindern und Jugendlichen zum MIV einschliesslich ÖIV).
- Im MaaS-Szenario erhöht sich die Mobilitätsrate aufgrund des Zugangs zu geteilten PW (Sharing).

Aufgrund dessen ist der Anstieg des Verkehrsaufkommens im MaaS-Szenario, in dem sowohl der Effekt der Automatisierung als auch des Sharings relevant ist, am höchsten. Im Elektrifizierungsszenario entspricht das Aufkommen dem Referenzszenario.

Das MIV-Aufkommen ändert sich im Elektrifizierungsszenario kaum. Im Technologieszenario steigt es um 10% auf einen Anteil von 48% an. Im MaaS-Szenario ist der Anstieg mit insg. 16% (11% MIV, 5% ÖIV) auf einen Modal Split von 50% nochmals stärker. Das Aufkommen im ÖV sowie dem Velo- und Fussverkehr bleibt im Elektrifizierungsszenario erneut nahezu unverändert. Im Technologieszenario sinkt der Anteil von ÖV und Velo nur marginal, der des Fussverkehrs um 3%. Im MaaS-Szenario sinkt das Aufkommen von ÖV ebenfalls leicht. Das Aufkommen des Velo- und Fussverkehrs sinkt im Vergleich zum Referenzszenario um jeweils knapp 4%. Der Veloverkehr hat damit einen Anteil von 7% am Modal Split, der Fussverkehr 27%.

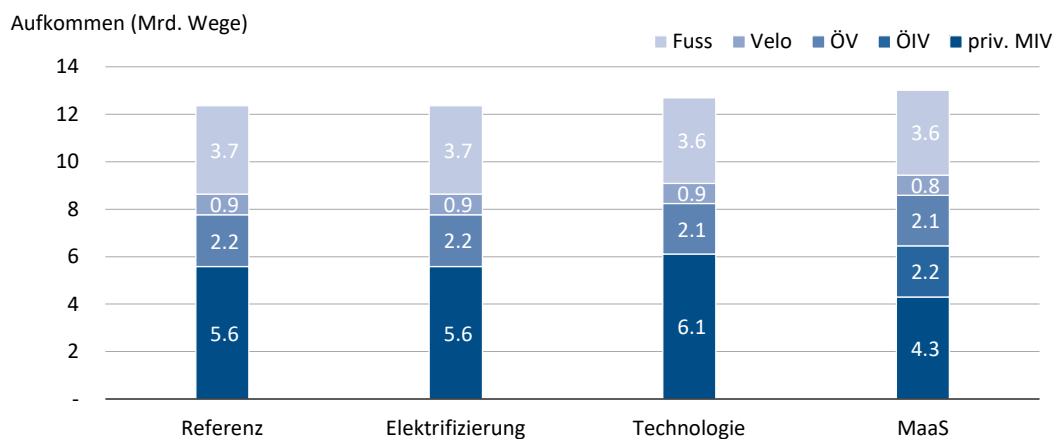


Abbildung 30: Verkehrsaufkommen im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

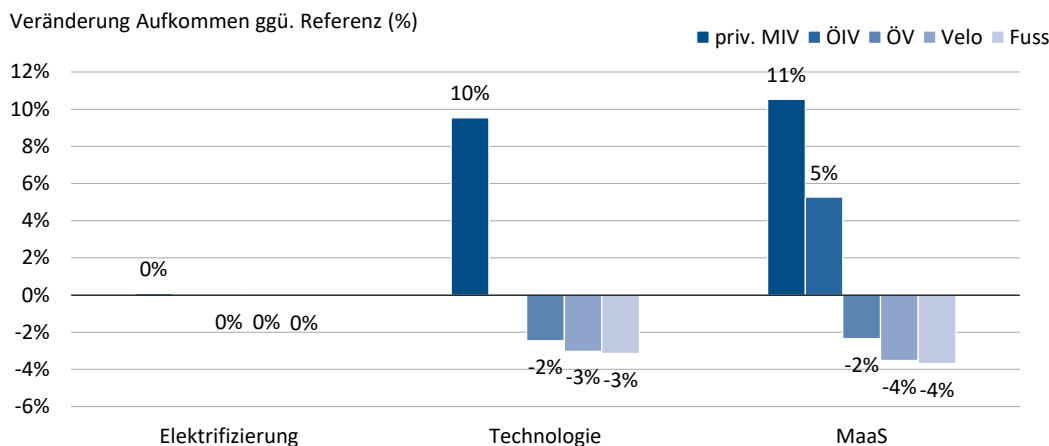


Abbildung 31: Veränderung des Verkehrsaufkommens im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

5.1.2.3 Veränderung der Verkehrsleistung

Die Verkehrsleistung steigt in allen Analyseszenarien stärker an als das Aufkommen, das heisst es werden tendenziell längere Wege zurückgelegt. Die durchschnittliche Weglänge nimmt aufgrund des gesunkenen VoT im MIV (inkl. ÖIV) und im MaaS-Szenario zusätzlich aufgrund der gesunkenen Kosten im MIV (inkl. ÖIV) zu. Im ÖV nimmt die Weglänge nur leicht zu. Daraus resultieren Verlagerungen vom ÖV auf den MIV (inkl. ÖIV) v.a. bei längeren Fahrten.

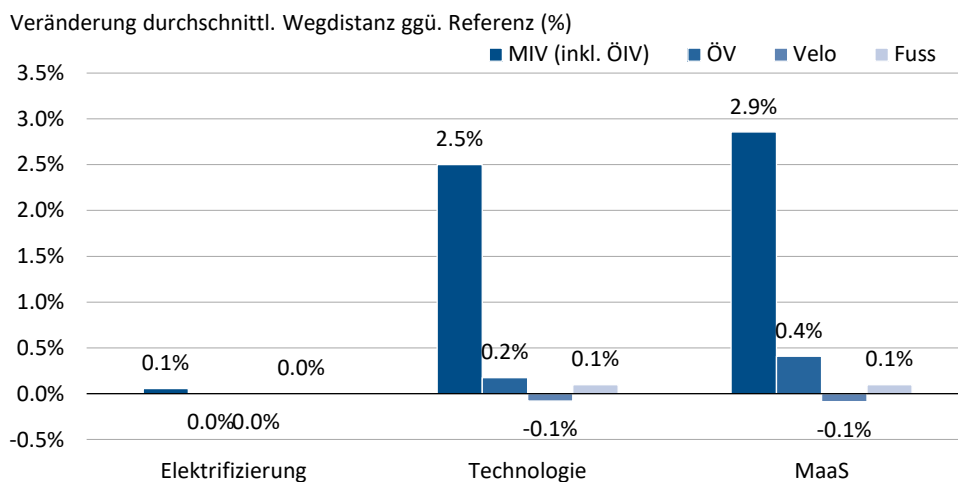


Abbildung 32: Veränderung der durchschnittlichen Wegdistanz im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

Im Elektrifizierungsszenario erhöht sich die Verkehrsleistung um 0.1%, im Technologieszenario um 7.5% und im MaaS-Szenario um 12.2% gegenüber der Referenz. Die Reduktion der Reisezeitkosten und im Technologie- und MaaS-Szenario auch der MIV-KM-Kosten führen dazu, dass die Verkehrsleistung v.a. im MIV steigt. Die Reduktion der ÖV-Preise kann diese Effekte im MIV nicht kompensieren. Deswegen sinkt die Verkehrsleistung im ÖV und der ÖV verliert Anteile an der gesamten Verkehrsleistung. Die Verkehrsleistungen im Velo- und Fussverkehr sinken im Technologie- und MaaS-Szenario aufgrund des Rückgangs im ÖV.

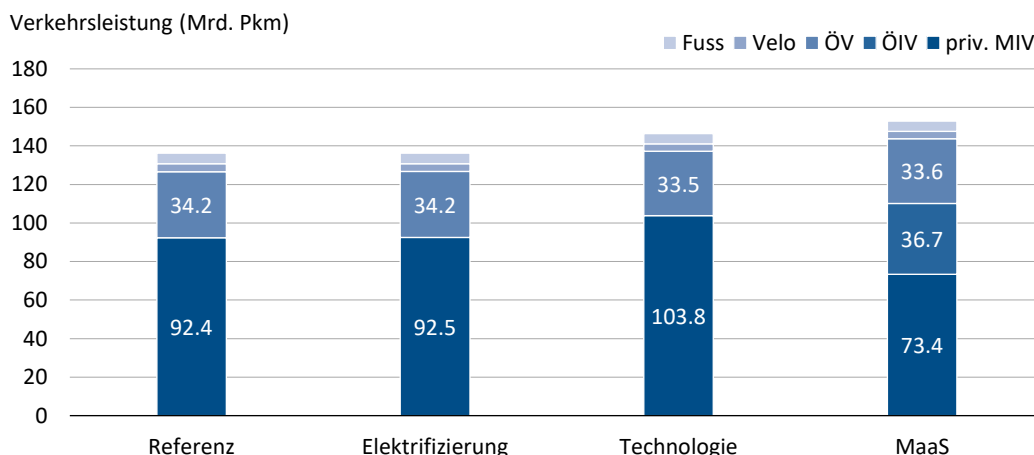


Abbildung 33: Verkehrsleistung im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

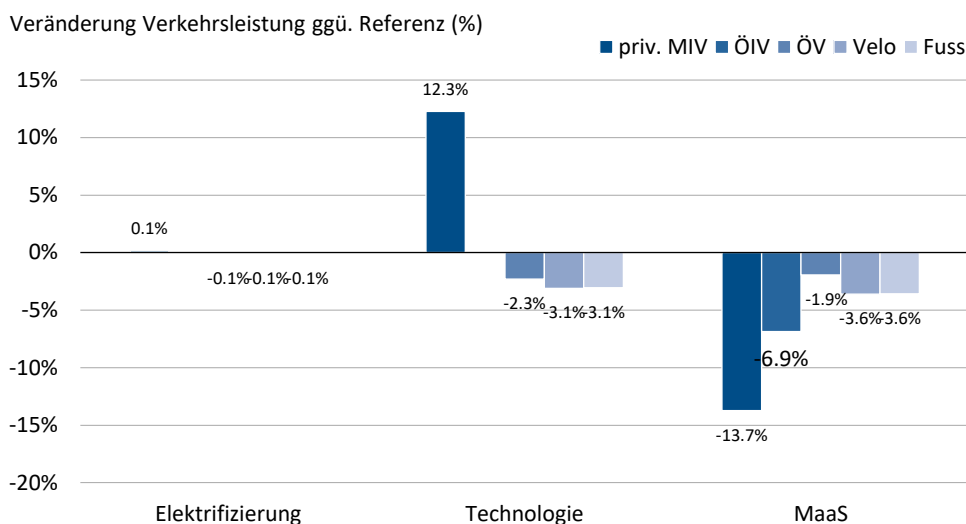


Abbildung 34: Veränderung der Verkehrsleistung im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

5.1.2.4 Veränderung der Fahrleistung MIV

Im Referenzszenario beträgt die Fahrleistung rund 66 Mrd. Fzkm. Im Elektrifizierungsszenario steigt sie marginal um 0.1% an.

Im Technologieszenario ist der Anstieg der Fahrleistung im Vergleich zum Referenzszenario am höchsten. Aufgrund des Zugangs neuer Personengruppen zum MIV, der Reduktion der Besetzungsgrade sowie der Erhöhung der durchschnittlichen Weglänge steigen die Fahrleistungen im MIV (inkl. ÖIV) um rund 35%. Der Anstieg der Fahrzeugstunden um 25% ist ebenfalls beträchtlich, jedoch niedriger als die Zunahme der Fahrleistungen. Dies bedeutet, dass durch Kapazitätserhöhungen auf den Strassen infolge der Automatisierung die durchschnittliche Geschwindigkeit gesteigert werden kann.

Im Gegensatz dazu resultieren im MaaS-Szenario – trotz induziertem Verkehr im MIV und der Erhöhung der durchschnittlichen Weglänge – aufgrund der Erhöhung der Besetzungsgrade (einschliesslich neuer Angebotsformen im ÖIV) zusätzliche Fahrleistungen in deutlich niedrigerem Umfang (+12.2%). Die Fahrzeugstunden steigen nur leicht an (+0.4%), was bedeutet, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit im Vergleich zum Referenzszenario steigt. Trotz einer deutlichen Erhöhung der Verkehrsleistung im MIV (inkl. ÖIV) im MaaS-Szenario (+19%) ist der Anstieg der Fahrleistungen bzw. Fahrzeugstunden im Vergleich zum Technologieszenario geringer. Daraus lässt sich schliessen, dass die Erhöhung der Besetzungsgrade aufgrund geteilter Fahrten einen positiven Effekt hat.

Fahrleistung MIV/ÖIV pro Jahr (Mrd. Fzkm)

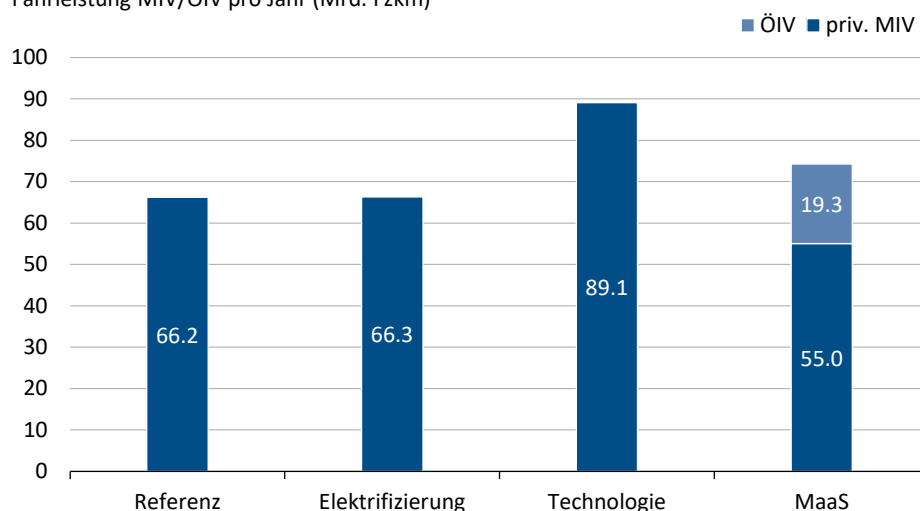


Abbildung 35: Fahrleistung privater MIV und ÖIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

Veränderung Fahrleistung ggü. Referenz (%)

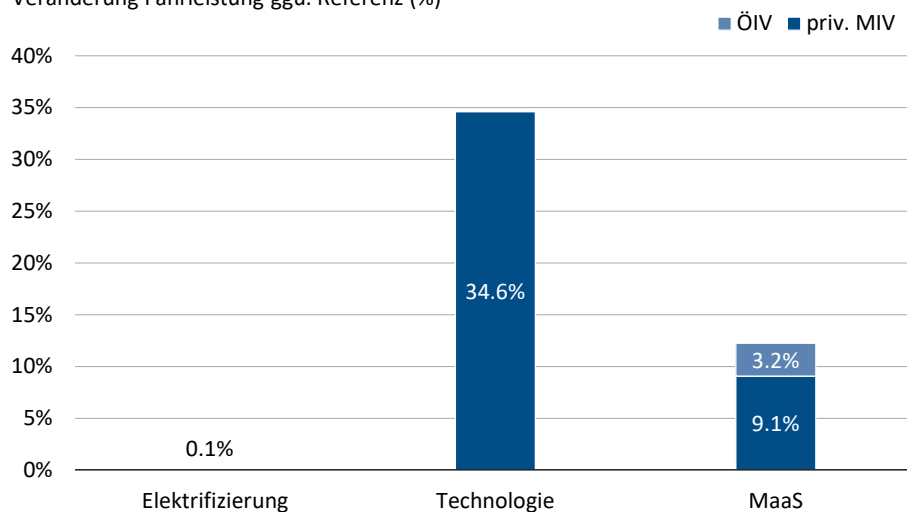


Abbildung 36: Veränderung der Fahrleistung privater MIV und ÖIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

5.1.2.5 Veränderung von Fahrzeugstunden im MIV

Aufgrund der angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeiten und der Fahrleistungen können die Fahrzeugstunden MIV abgeleitet werden. In den Szenarien «Technologie» und «MaaS» steigt die durchschnittliche Geschwindigkeit aufgrund der Kapazitätserhöhungen auf den Strassen durch die Automatisierung.

Die Fahrzeugstunden pro Jahr liegen im Referenzszenario bei rund 1.5 Mrd. Im Elektrifizierungsszenario steigen diese leicht an (+0.1%), was auf leicht niedrigere MIV-Kilometerkosten zurückzuführen ist. Im Technologieszenario steigen die Fahrzeugstunden mit 25% am stärksten an. Im MaaS-Szenario steigen sie nur leicht um 0.4%.

Der Veränderung der Fahrzeugstunden liegen mehrere teilweise entgegengewirkende Effekte zugrunde:

- Im Technologie- und MaaS-Szenario steigt das Verkehrsaufkommen und Modal Split des MIV (inkl. ÖIV) und damit auch tendenziell die Fahrzeugstunden. Ausserdem steigen die zurückgelegten Distanzen, was ebenfalls zu einer Erhöhung der Fahrzeugstunden führt.
- Kapazitätseffekte auf der Strasse durch Automatisierung und Sharing führen zu einer Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeiten in den Szenarien Technologie und MaaS.

Im Technologie- und MaaS-Szenario steigen die Fahrzeugstunden insgesamt an, was auf den Anstieg des Aufkommens und des Modal Split MIV zurückzuführen ist.

Fahrzeugstunden Jahr (Mio. FzgStd.)

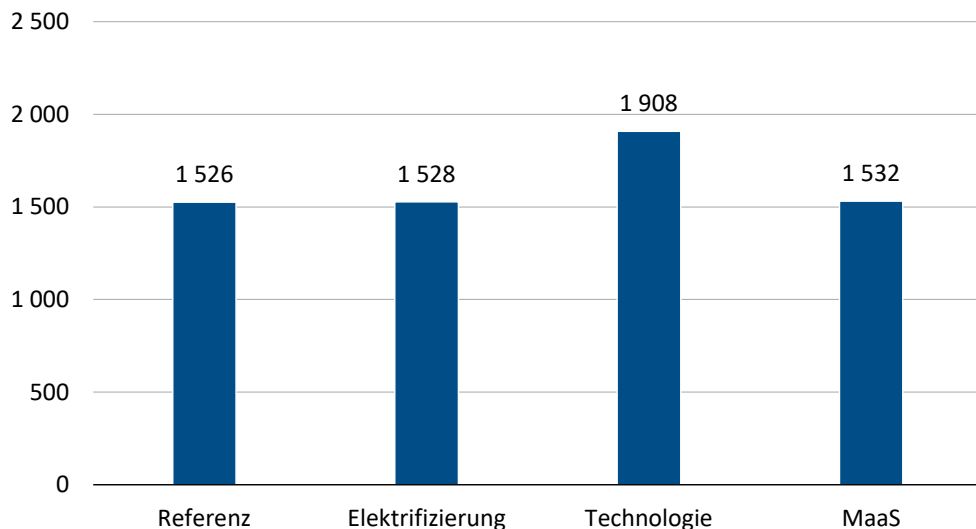


Abbildung 37: Fahrzeugstunden MIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

Veränderung Fahrzeugstunden ggü. Referenz (%)

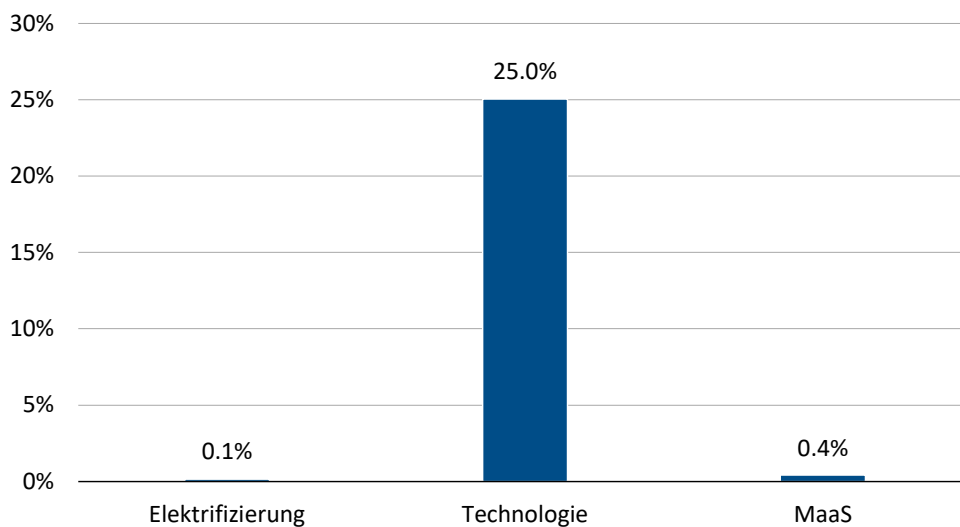


Abbildung 38: Veränderung der Fahrzeugstunden MIV im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)

5.1.2.6 Abschätzungen zu neuen Angebotsformen im MIV

Die AMP (wie auch das NPVM) unterscheidet im MIV nicht nach neuen Angebotsformen, die durch Sharing an Bedeutung gewinnen. Um die Wirkungen ebensolcher neuer Angebote abzuschätzen, wurden die Modellergebnisse für den MIV weiter differenziert und in privatem MIV und ÖIV aufgeteilt. Gemäss Szenarioannahmen gewinnt Sharing im MaaS-Szenario an Bedeutung. Für die anderen Analyseszenarien ist diese Differenzierung nicht relevant. Im MaaS-Szenario gehen wir davon aus, dass ein Drittel der PW-Fahrten geteilt werden. Dafür werden Besetzungsgrade je Angebotsform differenziert und dem Szenario zugrunde gelegt. Die Fahrleistung wird basierend auf den durchschnittlichen Wegelängen abgeschätzt.

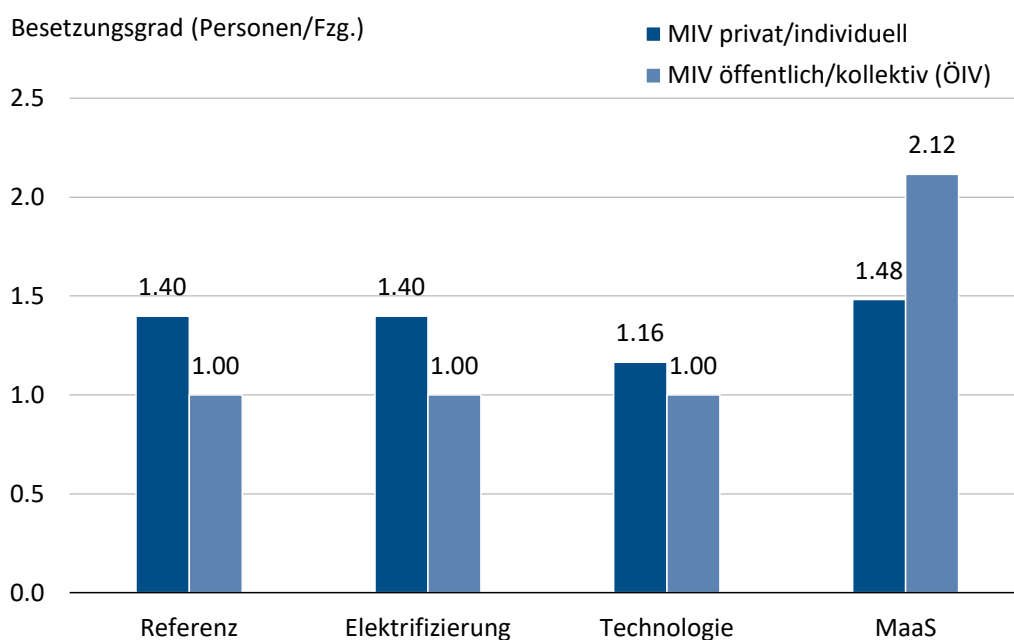


Abbildung 39: Durchschnittliche Besetzungsgrade im MIV und ÖIV (Quelle: INFRAS)

Wenn die gleiche durchschnittliche Wegelänge zugrunde gelegt wird (17 km/Weg im MaaS), ergibt sich ein Fahrleistungsanteil des ÖIV von rund 26%. Wird eine um 20% höhere durchschnittliche Wegelänge für privat genutzt PW angenommen (20.4 km/Weg) und eine entsprechend kürzere im ÖIV (7.6 km/Weg), so resultiert ein Fahrleistungsanteil im ÖIV von 15% bzw. rund 28.5 Mrd. Fzkm im MaaS-Szenario.

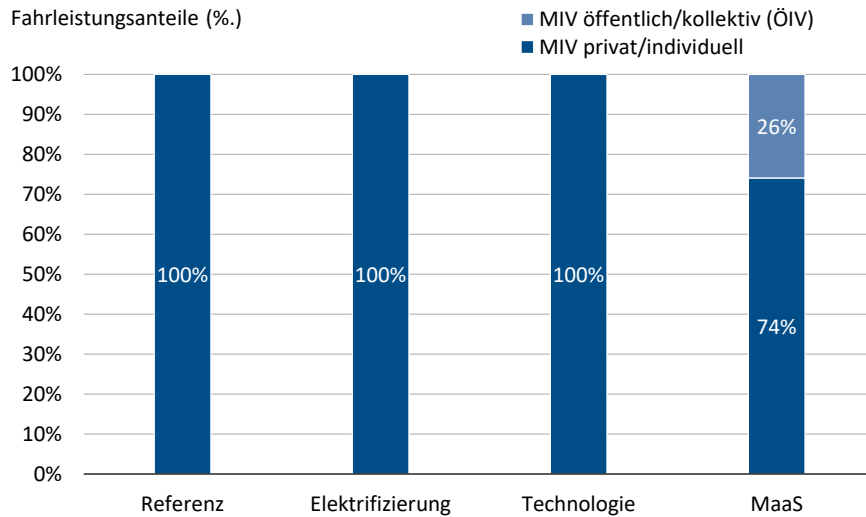


Abbildung 40: Fahrleistungsanteile MIV und ÖIV (Quelle: INFRAS)

Der Anteil des ÖIV an der Verkehrsleistung macht im MaaS-Szenario 19% aus. Aufgrund der neuen Angebotsform sinkt v.a. der Anteil des privaten MIV an der Verkehrsleistung (-11.8%). Da der ÖV im Zubringerverkehr durch den ÖIV substituiert wird, sinkt auch der Anteil ÖV (-1.9%).

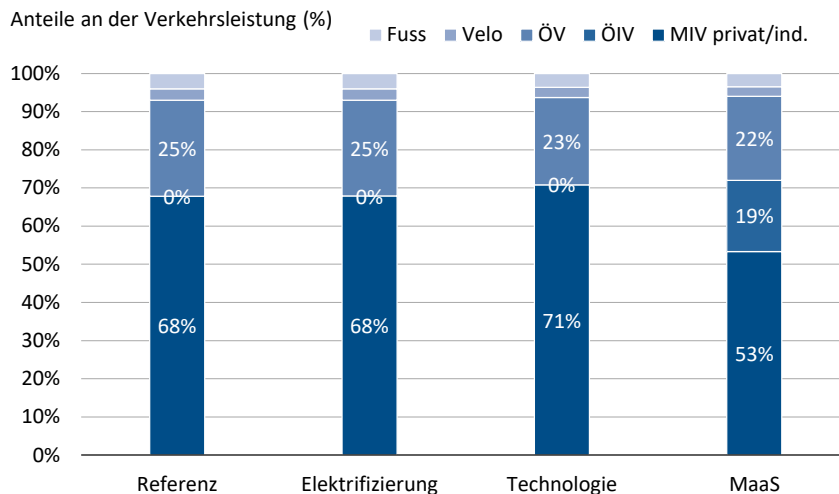


Abbildung 41: Anteil an der Verkehrsleistung (Quelle: INFRAS)

5.2 Verkehrliche Wirkungen im Güterverkehr

5.2.1 Vorgehen im Güterverkehr

Die verkehrlichen Wirkungen werden auf Basis des Referenzszenarios (Kapitel 4.2.1.2) sowie den Stellschrauben in den Analyseszenarien (Kapitel 4.2.2.2, 4.2.3.2 sowie 4.2.4.2) mit einem vereinfachten aggregierten Wirkungsmodell für den Güterverkehr abgeschätzt (Abbildung 42). Im Güterverkehr liegt der Fokus auf der Verkehrsleistung auf Strasse und Schiene und den Fahrleistungen Strasse. Dabei wird insbesondere auf den Ergebnissen aus ARE 2021 und den darin berücksichtigten Grundlagen aufgebaut.

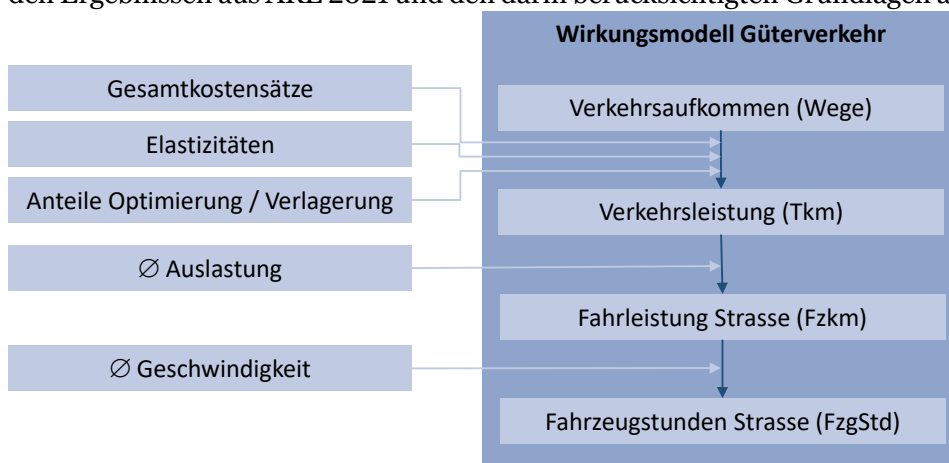


Abbildung 42: Wirkungsmodell Güterverkehr (Quelle: INFRAS)

5.2.2 Ergebnisse im Güterverkehr

Nachfolgend fassen wir die Ergebnisse der verkehrlichen Wirkungen im Güterverkehr zusammen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das gesamte Verkehrsaufkommen aufgrund der Elektrifizierung sowie Digitalisierung nicht verändert und daher nicht betrachtet wird. Der Fokus liegt auf der Verkehrsleistung (Kapitel 5.2.2.2) und der Fahrleistung sowie den Fahrzeugstunden Strasse (Kapitel 5.2.2.2).

5.2.2.1 Übersicht verkehrliche Wirkungen

Die verkehrlichen Wirkungen zeigen sich in Änderungen des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung, der Wegedistanz sowie der Fahrleistung und Fahrzeugstunden. Tabelle 40 gibt einen Überblick über die Veränderung der jeweiligen Indikatoren ggü. der Referenz im Quervergleich der Analyseszenarien.

Veränderungen im Güterverkehr ggü. der Referenz			
	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
Verkehrsleistung (Tkm)	0.0%	0.9%	1.6%
Strasse	0.0%	0.5%	1.1%
Verkehrsleistungsanteil Strasse	62.3%	62.1%	62.0%
Schiene	0.0%	1.4%	2.6%
Verkehrsleistungsanteil Schiene	37.7%	37.9%	38.0%
Fahrleistung (Fzkm)	0.0%	1.6%	0.8%

LNF	0.0%	1.9%	2.3%
SNF	0.0%	0.6%	-5.1%
Fahrzeugstunden (h)	0.0%	-0.9%	-4.8%
LNF	0.0%	-0.4%	-2.3%
SNF	0.0%	-3.7%	-17.7%

Tabelle 40: Veränderungen im Güterverkehr ggü. der Referenz (Quelle: INFRAS)

5.2.2.2 Verkehrsleistung und Modal Split

Die Verkehrsleistung verändert sich in den Analyseszenarien kaum, da sich die Kostenveränderungen sowohl auf Strasse als auch Schiene beziehen. Die Verkehrsleistung steigt im Technologieszenario insgesamt um 0.9% und im MaaS-Szenario um 1.6% (Abbildung 43, Abbildung 44).

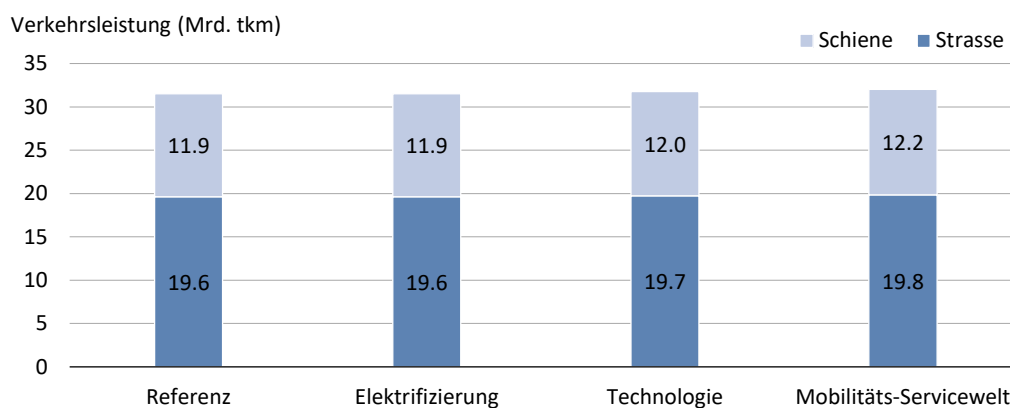


Abbildung 43: Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

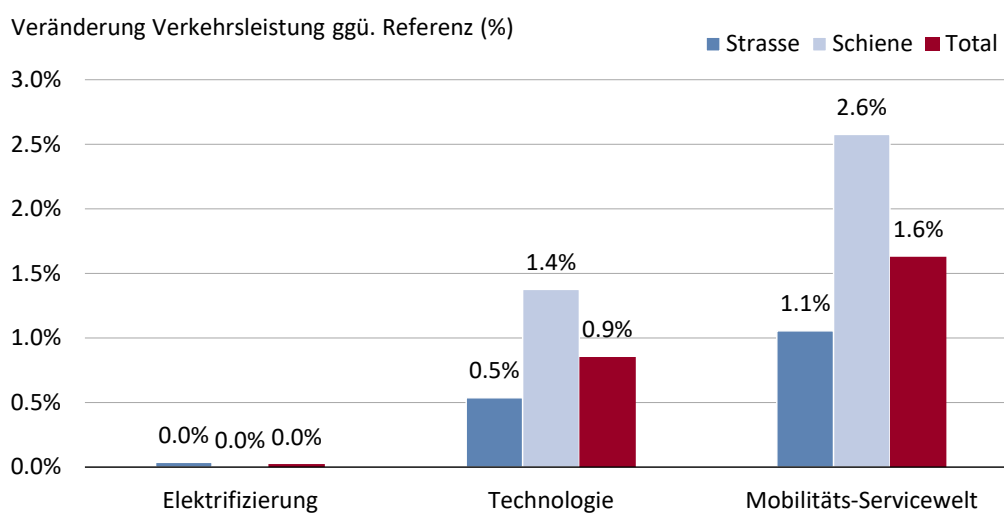


Abbildung 44: Veränderung der Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

Der Anteil des Strassengüterverkehrs am Modal Split des GV bezogen auf die Verkehrsleistung liegt in der Referenz bei rund 62% und reduziert sich in den Szenarien «Technologie» und «MaaS» nur leicht (Abbildung 45). Der Strassengüterverkehr macht im

MaaS-Szenario einen Anteil von rund 62% der gesamten Verkehrsleistung im Güterverkehr (Landverkehr) aus. Die Modal Split bleibt also nahezu unverändert.

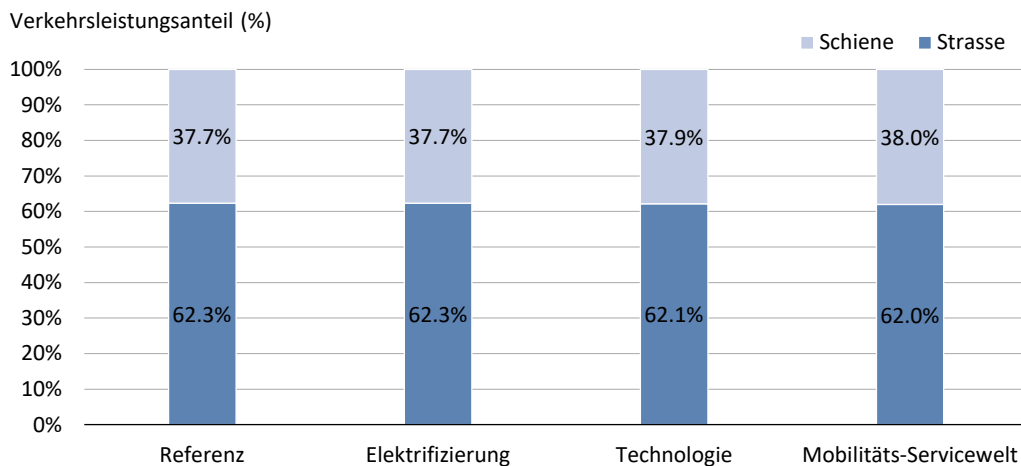


Abbildung 45: Modal Split Verkehrsleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

5.2.2.3 Fahrleistung und Fahrzeugstunden Strasse

Die Elektrifizierung hat keinen Effekt auf die Fahrleistung oder die Fahrzeugstunden auf der Strasse (Abbildung 46). Die Fahrleistung auf der Strasse steigt im Technologieszenario ggü. der Referenz sowohl für leichte Nutzfahrzeuge aber auch für schwere Nutzfahrzeuge. Mit der Automatisierung (Technologieszenario) steigt die Attraktivität der Strasse und die durchschnittliche Beladung nimmt leicht ab. Beide Effekte führen zu einer leichten Zunahme der Fahrleistungen. Die Automatisierung kombiniert mit einer verbreiteten Kollaboration steigert die Auslastung der SNF, weswegen die Fahrleistung abnimmt (MaaS-Szenario). Bei den LNF steigt die Auslastung nicht (auch aufgrund der begrenzten Nutzlast), weswegen die Fahrleistungen steigen.

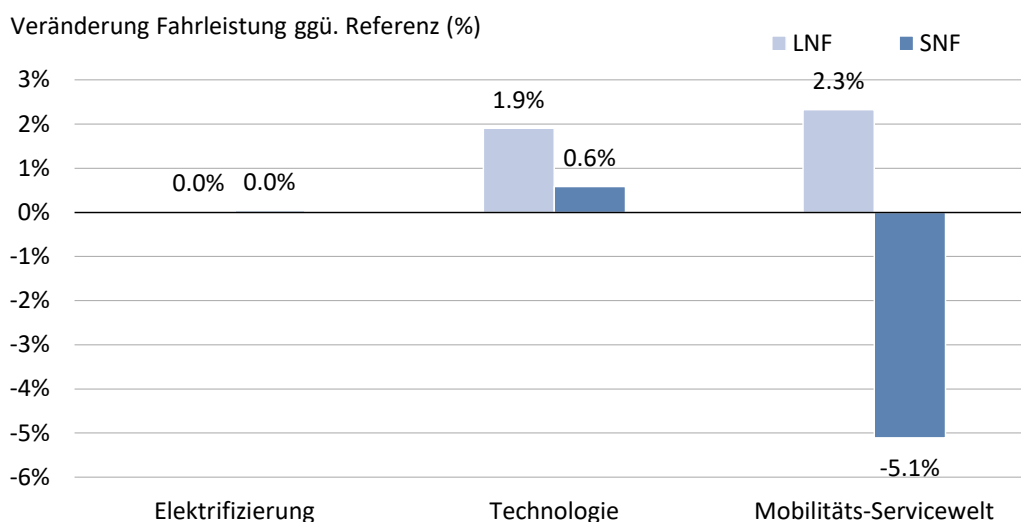


Abbildung 46: Veränderung der Fahrleistung Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

Mit Veränderung der Fahrleistung und der Erhöhung der Geschwindigkeiten reduzieren sich die Fahrzeugstunden der LNF und SNF (Abbildung 47, Abbildung 48).

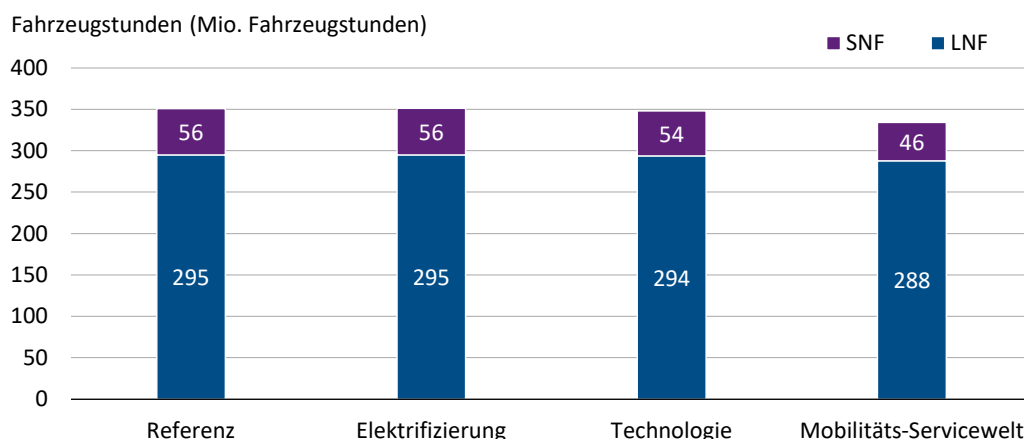


Abbildung 47: Fahrzeugstunden Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

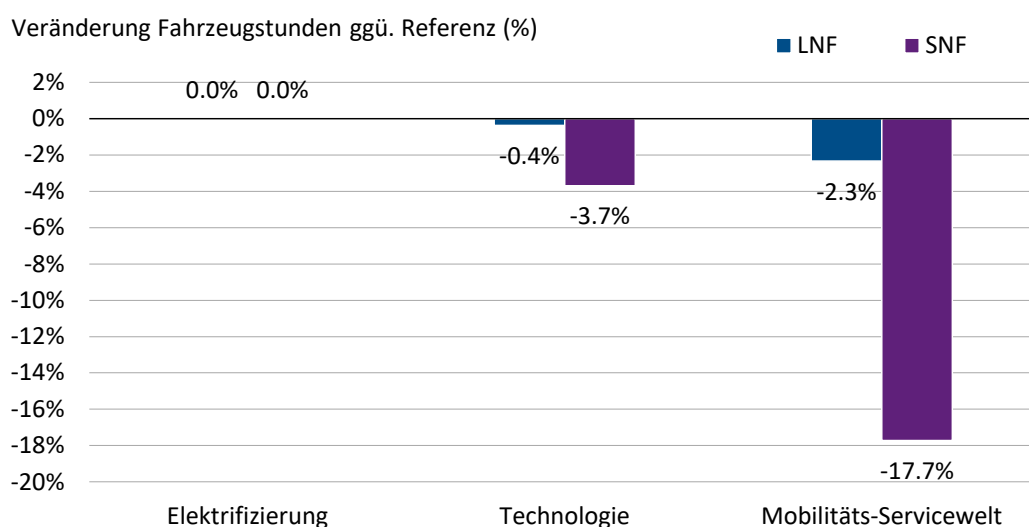


Abbildung 48: Veränderung der Fahrzeugstunden Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)

5.3 Fazit verkehrliche Wirkungen

Im **Elektrifizierungsszenario** wird im Personenverkehr ein Elektrifizierungsgrad von 99% im MIV und 83% im ÖV auf der Strasse und 100% im ÖV auf der Schiene angenommen. Automatisierung erfolgt auf dem gleichen Niveau wie im Referenzszenario (32%) und Sharing spielt keine bedeutende Rolle. Die verkehrlichen Wirkungen im Personenverkehr sind nur marginal, da lediglich die Kosten im MIV leicht sinken (niedrigere Betriebskosten) und die anderen Stellschrauben weitgehend unverändert bleiben. Im Güterverkehr wird ein Elektrifizierungsgrad von 90% auf der Strasse und 100% auf der Schiene angenommen. Die Verkehrsleistungen auf der Strasse und Schiene sowie der Modal Split bleiben unverändert. Ausserdem hat die Elektrifizierung keinen Effekt auf die Fahrleistung oder den Fahrzeugstunden auf der Strasse.

Für das **Technologieszenario** wird im Personenverkehr auf den Annahmen der Elektrifizierung aufgebaut (siehe oben). Zusätzlich schreitet die Automatisierung voran: Alle Elektrofahrzeuge im MIV (99%) sind automatisiert und vernetzt. Das führt dazu, dass der MIV neue Nutzergruppen (junge und mobilitätseingeschränkte

Personen) gewinnt. Die Besetzungsgrade sind durch die Automatisierung (Leerfahrten) niedriger. Zudem sinken die Reisezeitkosten (VoT) im MIV, da die Zeit nun nicht mehr als Lenkzeit, sondern als produktive Zeit genutzt werden kann. Auch die Km-Kosten im MIV sinken, da automatisierten Fahrzeuge zwar höhere Anschaffungskosten, jedoch niedrigere Betriebskosten haben. Der ÖV hingegen verliert an Attraktivität. Es findet ein Modal Shift hin zu MIV statt. Das zeigt sich auch im Anstieg von Aufkommen und Verkehrsleistung, v.a. im MIV (inkl. ÖIV). Beim ÖV geht Aufkommen und Verkehrsleistung zurück. Es werden zudem längere Wege zurückgelegt, die Verkehrsleistung im MIV nimmt zu. trotz Geschwindigkeitszunahme im MIV werden mehr Stunden im Fahrzeug verbraucht. Im Güterverkehr sind sowohl der Strassen- als auch der Schienengüterverkehr nahezu vollständig automatisiert (99%). Die Verkehrsleistung steigt im Technologieszenario insgesamt um 0.9% während der Modal Split nahezu unverändert bleibt. Die Fahrleistung auf der Strasse steigt ggü. der Referenz sowohl für LNF aber auch für SNF. Durch die Veränderung der Fahrleistung und die Erhöhung der Geschwindigkeiten reduzieren sich die Fahrzeugstunden der LNF und SNF.

Im **MaaS-Szenario** wird im Personenverkehr wiederum an den Annahmen zur Elektrifizierung und Automatisierung festgehalten. Hinzu kommt, dass sich Sharing, also das Teilen von Fahrzeugen und Fahrten, stark durchsetzt. Ein Drittel aller PW-Fahrten wird geteilt/gepoolt. Dadurch sinken die Kosten im MIV erheblich (starker Anstieg der Jahresfahrleistung). Die Besetzungsgrade sind durch das Teilen von Fahrten höher als im Technologieszenario. Verkehrsaufkommen und Leistung steigen insgesamt an. Allerdings gibt es durch den hohen Anteil Sharing eine Verlagerung vom MIV hin zum ÖIV. Beim individuell genutzten MIV sinkt die Verkehrsleistung folglich gegenüber dem Referenzszenario. Der ÖIV macht knapp 20% der Verkehrsleistung aus, der individuelle MIV nur noch 53%. Auch im ÖV nimmt die Verkehrsleistung ab. Es erfolgt also eine Verlagerung vom individuellen MIV und dem ÖV hin zum ÖIV. Im Güterverkehr sind die Unternehmen bereit, ihre Ressourcen zu teilen. Die Verkehrsleistung steigt im MaaS-Szenario insgesamt um 1.6% während der Modal Split nahezu unverändert bleibt. Mit einer verbreiteten Kollaboration steigt die Auslastung der SNF, weswegen die Fahrleistung abnimmt. Bei den LNF steigt die Auslastung hingegen nicht (auch aufgrund der begrenzten Nutzlast), weswegen die Fahrleistungen steigen. Durch die Veränderung der Fahrleistung und der Erhöhung der Geschwindigkeiten reduzieren sich die Fahrzeugstunden für LNF und SNF, jedoch viel stärker für die SNF mit 17.7% ggü. Referenz.

6 Ökonomische Wirkungen

Kern der Studie ist die Abschätzung der ökonomischen Effekte der Dekarbonisierung und Digitalisierung in der Mobilität für die drei Analyseszenarien jeweils im Vergleich zur Referenz. Es werden drei Fragen beantwortet:

1. Wie hoch sind die relevanten Kosten-Nutzen-Elemente (mikroökonomische Betrachtung)?
2. Welches sind die gesamtwirtschaftlichen Folgen (makro- bzw. mesoökonomische Betrachtung)?
3. Welches Vorzeichen und welche Grössenordnung weist der Saldo der Wertschöpfungswirkung plus der Veränderung der monetarisierten externen Kosten aus (ressourcenökonomische Makrosicht)?

Kapitel 6.1 zeigt die mikroökonomischen Wirkungen und beantwortet Frage 1. Die meso- und makroökonomischen Wirkungen sind in Kapitel 6.2 erläutert.

6.1 Mikroökonomische Wirkungen

6.1.1 Vorgehen

Auf Basis der Beschreibung zentraler Stellschrauben (Kapitel 4) und den verkehrlichen Wirkungen für das Jahr 2050 (Kapitel 5) werden die Kosten bzw. Nutzen der Dekarbonisierung und Digitalisierung für die drei Analyseszenarien geschätzt. Im Fokus steht die Differenz im Vergleich zur Referenz, d.h. die Veränderung der Kosten und Nutzen. Die absoluten Kosten oder Nutzen stehen dagegen nicht im Fokus. Die Analyse fokussiert einerseits auf die direkten Wirkungen der Dekarbonisierung und Digitalisierung sowie andererseits die indirekten Effekte. Die **direkten Effekte** beziehen sich auf die Auswirkungen auf die unveränderte Verkehrsnachfrage wie im Referenzszenario (*ceteris paribus*). Das bedeutet, dass die Verkehrsmenge bzw. -leistung (Nachfrage) in allen Szenarien konstant bleibt; die Kostensätze bzw. Preise ändern sich. Im Folgenden wird hierfür der Begriff Basisverkehr verwendet.²¹ Die **indirekten Effekte** berücksichtigen Nachfrageänderungen (Neuverkehr, Modal Shifts etc.) und die daraus resultierenden Effekte auf Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten. Für die Monetarisierung greifen wir unter anderem auf Annahmen zu den Stellschrauben sowie weitere Grundlagen zurück. Analog der KNA-Norm VSS 41 828 für den Strassenverkehr werden die externen Kosten für die Ermittlung indirekter Umwelt- und Gesundheitseffekte berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsteilnehmenden bereit sind, ihre privaten Zusatzkosten zu tragen und diesen Kosten entsprechende Nutzen gegenüberstehen. Im Folgenden fassen wir die Ergebnisse für den Personenverkehr (Kap.6.1.2) und den Güterverkehr (Kap. 6.1.3) zusammen.

²¹ Dieser Begriff wurde gewählt, weil es sich nicht um Stammverkehr im Sinne der Nachhaltigkeitsindikatoren für Strassenprojekte (NISTRA) handelt. Stammverkehr gemäss NISTRA ist die vom Projekt nicht veränderte Verkehrsmenge pro Zeiteinheit, d.h. die Verkehrsmenge, die sowohl mit als auch ohne Projekt auf einer Relation von i nach j fährt (d.h. Minimum der Fahrten mit bzw. ohne Projekt).

6.1.2 Effekte im Personenverkehr

6.1.2.1 Übersicht zu den direkten und indirekten Effekten im Personenverkehr

Im Personenverkehr resultieren direkte und indirekte Effekte der Dekarbonisierung und Digitalisierung, die wir auf Basis der verkehrlichen Wirkungen und Annahmen zu den Kostenentwicklungen geschätzt haben. Die Ergebnisse fassen wir in diesem Kapitel zusammen. Details und Beschreibung der Herleitung sowie Grundlagendaten sind in den Kapiteln 4.2 und 5.1 beschrieben.

Direkte Effekte im Personenverkehr (ceteris paribus)
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Kilometerkosten bzw. Preise
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Bewertung der Reisezeit
Indirekte Effekte im Personenverkehr
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Verkehrsnachfrage (Veränderung des Aufkommens aufgrund neuer Nutzende, Verkehrsverlagerung und Routen-/Zielwahländerungen)
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Fahrzeugstunden im Strassenpersonenverkehr (MIV inkl. ÖIV)
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Unfallkosten
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Gesundheits- und Umweltkosten
Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung des externen Gesundheitsnutzens

Abbildung 49: Übersicht direkte und indirekte Effekte im Personenverkehr (Quelle: ARE 2021/INFRAS)

Tabelle 41 zeigt die direkten und indirekten Effekte im Personenverkehr im Überblick. Insgesamt resultiert in allen Szenarien Zusatznutzen.

Zusatzkosten und -nutzen im Personenverkehr (Mrd. CHF p.a.)

	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
Direkter Effekt	0.8	25.9	29.8
Veränderung Kilometerkosten bzw. Preise	0.8	0.1	7.2
Veränderung Bewertung der Reisezeit	0.0	25.8	22.6
Indirekte Effekte	0.0	-1.5	7.9
Veränderung Aufkommens (Neue Nutzende)	0.0	0.5	1.5
Veränderung Fahrzeugstunden MIV (inkl. ÖIV)	0.0	-3.6	5.5
Veränderung Unfallkosten	0.0	2.8	2.8
Veränderung Gesundheits- und Umweltkosten	0.0	-1.0	-1.6
Veränderung externen Gesundheitsnutzen	0.0	-0.2	-0.3
Total	0.8	24.4	37.7

Tabelle 41: Übersicht Zusatzkosten und -nutzen im Personenverkehr (Quelle: INFRAS)
Zusatznutzen (+) / Zusatzkosten (-). Differenzen in den Summen durch Rundungen.

6.1.2.2 Direkte Effekte (ceteris paribus Wirkungen)

Im Personenverkehr werden zwei direkte Effekte berücksichtigt:

- Die Veränderung der Kilometerkosten der Betriebsmittel im MIV inkl. ÖIV bzw. den Tarifen im ÖV.
- die Veränderung der Bewertung der Reisezeit im MIV (einschliesslich der Berücksichtigung des ÖIV).

Zeitkostenersparnisse in der Tür-zu-Tür-Betrachtung im MIV aufgrund der Automatisierung werden nicht berücksichtigt, da wir davon ausgehen, dass der Ersparnis der Wegzeiten zum oder vom Parkplatz nun Wartezeiten gegenüberstehen. Zusätzliche Leerfahrten aufgrund automatisierter Fahrzeuge werden über die Besetzungsgrade einbezogen und nicht als direkter Effekt ausgewiesen.

Veränderung der Kilometerkosten

Die mikroökonomischen Effekte der Veränderung der **Kilometerkosten im MIV** ist je nach Szenario unterschiedlich. Im Elektrifizierungsszenario führt die Reduktion der Kosten (niedrigere Betriebskosten von Elektrofahrzeugen) zu einem zusätzlichen Nutzen i.H.v. 0.78 Mrd. CHF. Im Technologieszenario resultieren hingegen Zusatzkosten (0.58 Mrd. CHF), da die Kilometerkosten durch die Automatisierung der Fahrzeuge, und die damit verbundenen höheren Anschaffungskosten höher sind als im Referenzszenario. Im MaaS-Szenario ist mit einem hohen Zusatznutzen von knapp 6 Mrd. CHF zu rechnen. Das geht auf die stark reduzierten Kilometerkosten im MIV zurück.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) MIV (Mrd. CHF)

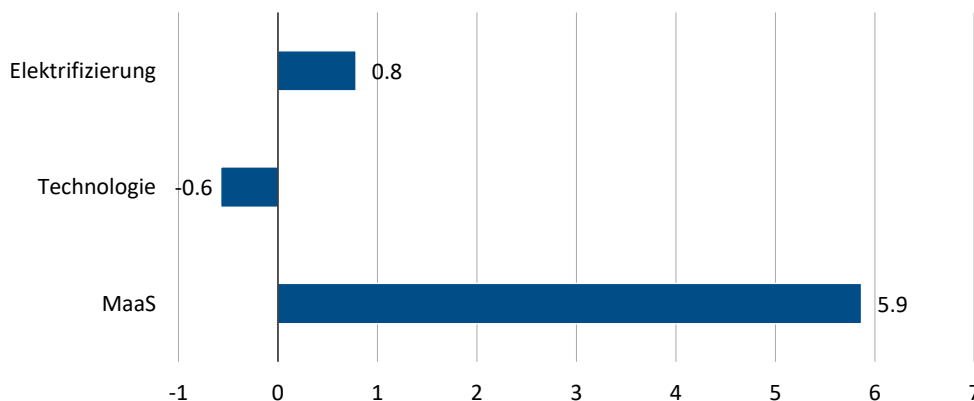


Abbildung 50: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Kostenänderung MIV (Quelle: INFRAS)

Die distanzbasierten **durchschnittlichen Preise im ÖV** bleiben im Elektrifizierungsszenario unverändert und sinken im Technologie- und MaaS-Szenario. Die sinkenden Preise sind eine Folge der gesunkenen Kosten aufgrund der niedrigeren Personalkosten aufgrund der Automatisierung (bei gleichbleibendem Kostendeckungsgrad).

Zur Monetarisierung der Zusatznutzen basieren wir die in Tabelle 42 gelisteten Grundlagen. Der durchschnittliche ÖV-Preis beträgt laut ARE 2022a 0.35 CHF/Pkm. In Anlehnung an die Methodik in ARE 2021 wird geschätzt, dass etwa 60% der Verkehrsleistung im ÖV auf GA oder Verbund-Abo Besitzer entfallen, 20% auf Halbtax-Besitzer und 20% auf Vollzahler. Der durchschnittliche ÖV-Tarif wurde je Szenario berechnet und die Zusatznutzen unter Berücksichtigung der Personenverkehrsleistung quantifiziert. Da keine Änderung des Fahrtpreises für GA und Verbund-Abos angenommen wurde, ändern sich die Kosten für diese Nutzer im ÖV nicht. Wegen der grössten Reduktion der ÖV-Tarife im MaaS-Szenario sind die Nutzen in diesem Szenario am höchsten.

Preise im ÖV aus Sicht der Nutzenden (CHF/Pkm)

	Referenz	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
GA/Verbundabo (unverändert) (60%)	0.07	0.07	0.07	0.07
Halbtax (20%)	0.10	0.10	0.09	0.08
Vollzahler (20%)	0.18	0.18	0.17	0.16
Total	0.35	0.35	0.33	0.31

Tabelle 42: Preise im ÖV aus Sicht der Nutzenden (Quelle: INFRAS)

In der Folge entsteht ein Zusatznutzen durch die sinkenden Kosten im Technologie- und MaaS-Szenario. Während der Zusatznutzen im Technologieszenario knapp 70 Mio. CHF beträgt, ist er im MaaS-Szenario mit 135 Mio. CHF fast doppelt so hoch.

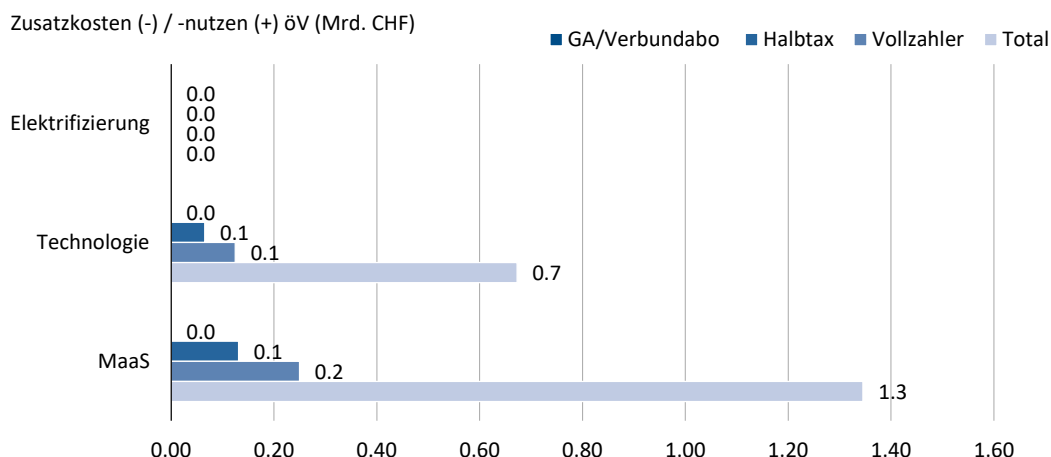


Abbildung 51: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Kostenänderung ÖV (Quelle: INFRAS)

Dieser Analyse sei angemerkt, dass eine Abschätzung der Nutzen auf Basis der heutigen Tarifstrukturen und des heutigen Abo-Besitzes für das Jahr 2050 generell zu hinterfragen sind. Es stellt sich ausserdem die Frage, wie sich der Kostendeckungsgrad im ÖV durch die neuen Angebotsformen erhöhen könnte. Die vorgenommenen Schätzungen dienen daher ausschliesslich des Vergleichs zwischen den Analyseszenarien.

Veränderung der Bewertung der Reisezeit im MIV

Die Veränderung der Bewertung der Reisezeit im MIV (inkl. ÖIV) ist im Elektrifizierungsszenario nicht relevant. Im Technologieszenario kommt es zu einem Komfortgewinn, da im MIV aufgrund der Automatisierung ein grösserer Teil der Reisezeit produktiv (Arbeit, Lesen, Telefonieren, Essen) genutzt werden kann. Durch die Automatisierung sinkt der Value of Time also erheblich.

Im MaaS-Szenario wirken zwar immer noch die gleichen Effekte wie im Technologieszenario (mehr produktive, weniger Lenkzeit), allerdings verändert sich die Bewertung der Reisezeit aufgrund des Teilens von Fahrzeugen und Fahrten. Der VoT geht entsprechend weniger zurück als im Technologieszenario.

Die daraus resultierenden Zusatznutzen wurden basierend auf dem Mengengerüst des Referenzszenarios hergeleitet, wobei die Veränderung für den Basisverkehr quantifiziert wurde. Die Anzahl der Personenstunden wurde vereinfachend aus den Fahrzeugstunden und den durchschnittlichen Besetzungsgraden im MIV (inkl. ÖIV) gemäss Referenzszenario abgeschätzt.

Die direkten Wirkungen basieren auf Zeitkostensätzen nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel der VSS Norm 41 822a und den Veränderungen je Wegzweck in den jeweiligen Analyseszenarien (Annahmen siehe Kapitel 4). Die Werte wurden auf die Preisbasis 2021 angepasst.

Value of Time im MIV (CHF/Pers-h, Preisbasis 2021)

	Referenz (VSS Norm)	Elektrifizie- rung	Technologie	MaaS
Pendlerfahrt	35.38	35.38	21.23	23.00
Einkaufsfahrt	23.31	23.31	13.98	15.15
Nutzfahrt	36.27	36.27	21.76	23.57
Freizeitfahrt	24.80	24.80	14.88	16.12
Total (aufkommensge- wichtet)	28.77	28.77	17.26	18.70

Tabelle 43: Value of Time im MIV, Fortschreibung auf Preisbasis 2021 mit dem Nominallohnindex (Quelle: INFRAS)

Die Zeitkostenersparnis aufgrund der Automatisierung (Komfortgewinn im MIV) führt zu einem Zusatznutzen im Technologie- und MaaS-Szenario, wobei dieser im Technologieszenario am höchsten ist. Dieser Zusatznutzen beträgt knapp 23 Mrd. CHF im Technologieszenario und 20 Mrd. CHF im MaaS-Szenario.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) VoT (Mrd. CHF)

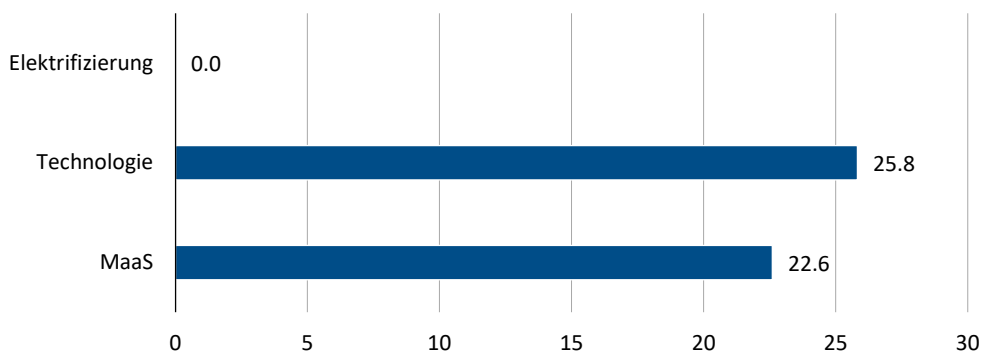


Abbildung 52: Direkte Effekte im Personenverkehr durch Änderung VoT im MIV (Quelle: INFRAS)

6.1.2.3 Indirekte Effekte

Veränderung der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage (Verkehrsleistung) verändert sich aufgrund von zwei Effekten:

- Aufkommenszuwachs aufgrund neuer Nutzergruppen
- Verkehrsverlagerung von Fuss-, Veloverkehr und ÖV auf den MIV (inkl. ÖIV) und von Routen-/Zielwahländerungen.

Der erste Effekt, die **Veränderung des Aufkommens**, wird durch die Automatisierung im Technologie- und MaaS-Szenario ausgelöst. Insbesondere ältere Personen, aber auch Kinder und Jugendliche sowie mobilitätseingeschränkte Personen haben neu oder verbesserten Zugang zur Mobilität, was zu einem Anstieg des Verkehrsaufkommens führt (sowie auch zu einer Reduktion der Besetzungsgrade aufgrund von Leerfahrten und dem Wegfall von Begleitfahrten). Im MaaS-Szenario führen zusätzlich neue Angebote aufgrund des Teilens von Fahrten bzw. Fahrzeugen zu einem Anstieg des Aufkommens jüngerer Nutzende (bis 44 Jahre).

Die Schätzung des daraus resultierenden Zusatznutzens basiert auf der Zunahme der Verkehrsleistung im MIV (inkl. ÖIV). Diese Schätzung berücksichtigt die durchschnittliche Distanz im Referenzszenario sowie das zusätzliche Verkehrsaufkommen durch neue Personengruppen ohne Modal Shift, d.h. die Nettozunahme aufgrund zusätzlicher Wege. Die Zahlungsbereitschaft wird in Anlehnung an ARE (2021) mit 0.30 CHF pro Pkm bewertet. Dies entspricht der Zahlungsbereitschaft einer Freizeitfahrt im ÖV. Zur Ermittlung des Kostensatzes pro Pkm wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV (inkl. ÖIV) der Referenz und ein Besetzungsgrad von 1 zugrunde gelegt. Die Zusatzkosten entsprechen den Fahrzeugkosten im jeweiligen Szenario. Werden die Zusatznutzen und -kosten addiert, ergibt sich insgesamt ein Zusatznutzen im Technologie- und MaaS-Szenario.

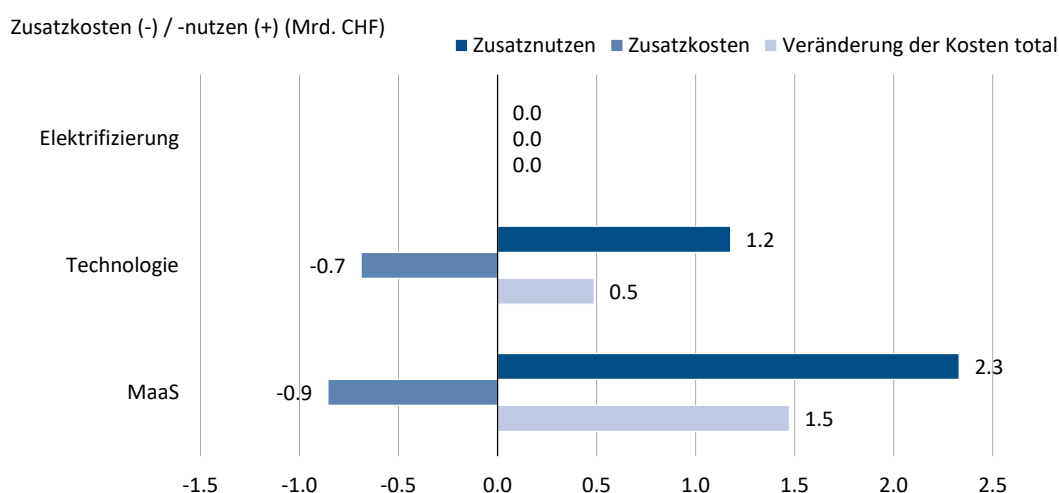


Abbildung 53: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung des Aufkommens im MIV inkl. ÖIV (Neuverkehr aufgrund neuer Nutzende) (Quelle: INFRAS)

Beim zweiten Effekt, der **Veränderung der Verkehrsnachfrage aufgrund Verkehrsverlagerung und Routen-/Zielwahländerungen**, treten einerseits modale Verkehrsverlagerungen aufgrund veränderter entscheidungsrelevanter Parameter wie z.B. der Änderung der Kilometerkosten oder des VoT auf. Dies führt zu einer Zunahme des MIV (inkl. ÖIV). Andererseits ergeben sich aus den gleichen Gründen Änderungen der Routen- und Zielwahl. Es wird angenommen, dass die Zusatzkosten für diese Effekte mindestens dem Zusatznutzen entsprechen müssen, da ansonsten keine Veränderungen eingetreten wären.

Veränderung der Fahrzeugstunden im MIV (inkl. ÖIV)

Die zusätzlichen Kosten und Nutzen durch die Veränderung der Fahrzeugstunden im Basisverkehr (gemäss Referenzszenario) wurden vereinfacht berechnet. Auf Grundlage der durchschnittlichen Änderung der spezifischen Fahrzeugstunde pro Pkm im Referenzszenario und der Änderung der Durchschnittsgeschwindigkeiten im Technologie- und MaaS-Szenario wurde die Veränderung der Fahrzeugstunde pro Pkm für den im Referenzszenario bestehenden MIV-Verkehr grob geschätzt. Diese Änderung der Personenstunden wurde mit dem aufkommensgewichteten VoT des jeweiligen Szenarios bewertet.

Im Elektrifizierungsszenario gibt es keine Veränderung gegenüber der Referenz. Für das Technologieszenario entstehen Zusatzkosten, da die Fahrzeugstunden steigen. Hingegen wird im MaaS-Szenario ein Zusatznutzen durch sinkende Fahrzeugstunden generiert.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

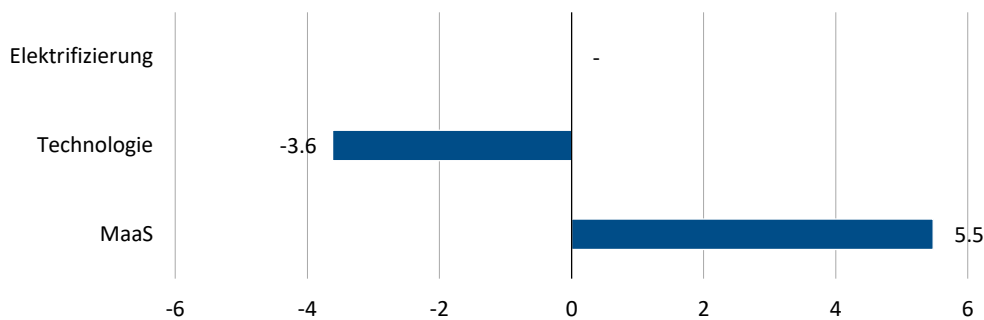


Abbildung 54: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Fahrzeugstunden im Basisverkehr des MIV inkl. ÖV (Quelle: INFRAS)

Veränderung der Unfallkosten

Die Digitalisierung im Verkehr beeinflusst die Unfallkosten durch zwei Effekte: Zum einen erhöhen **Änderungen der Verkehrsleistungen und modale Verlagerungen** die Unfallkosten im MIV und senken sie für den ÖV, Fuss- und Veloverkehr. Für die Berechnung werden die spezifischen externen Unfallkosten pro Pkm für das Jahr 2021 der KfV-Statistik zugrunde gelegt (Ecoplan / INFRAS 2024). Es wurde keine Veränderung des Wertschöpfungsanteils angenommen. Insgesamt steigen die Unfallkosten im Technologie- und MaaS-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

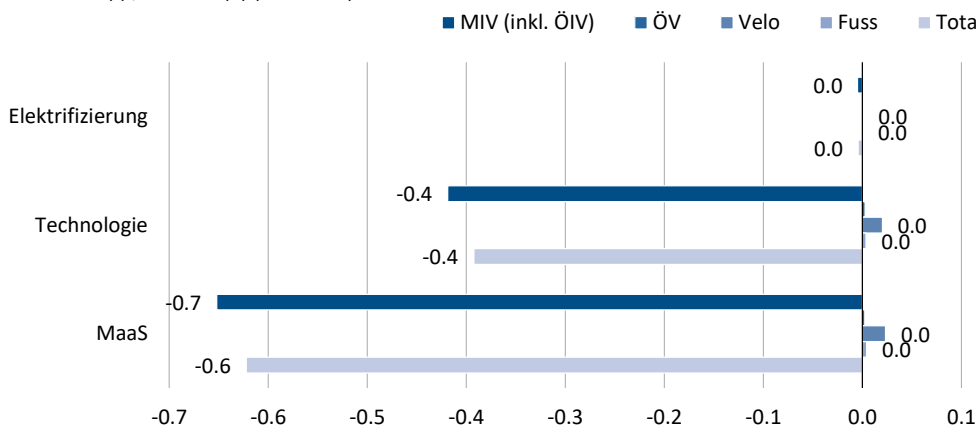


Abbildung 55: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Unfallkosten aufgrund der Änderung der Verkehrsleistung und des Modal Split (Quelle: INFRAS)

Zum anderen ist die **Reduktion der Unfälle im MIV** ein wesentlicher Nutzen der Automatisierung. Die im Referenzszenario angenommenen Unfallkostensätze ändern sich, wenn dieser Effekt der Automatisierung berücksichtigt wird. Angesichts unserer Annahmen zur Automatisierung im Technologie- und MaaS-Szenario wird eine hohe

Reduktion der Unfälle erwartet. Für den MIV wird eine Reduktion von 80% angenommen; ebenso für den ÖV-Strasse mit Autobussen. Für den Fuss- und Veloverkehr wurde angenommen, dass die Automatisierung im MIV ebenfalls Auswirkungen hat, wobei hier nur der Anteil der Unfälle im Velo- und Fussverkehr abgeschätzt wurde, der auf einen Pkw zurückzuführen ist. Für den Schienenverkehr wurde keine Veränderung angenommen. Die Unfallkostensätze verringern sich daher am stärksten im MIV. Insgesamt ergibt sich im Technologie- und MaaS-Szenario ein Zusatznutzen aufgrund der Automatisierung.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

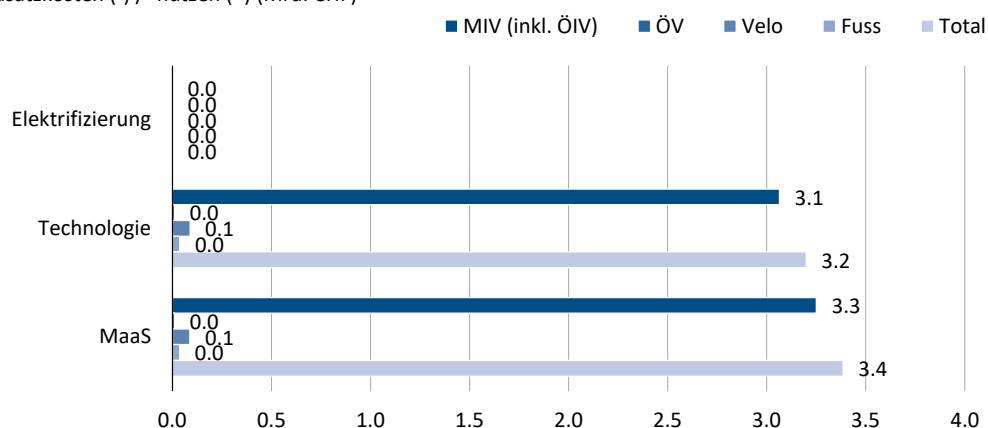


Abbildung 56: Zusatznutzen aus der Veränderung der Unfallkosten aufgrund der Automatisierung (Quelle: INFRAS)

Werden beide Effekte der Unfallkosten zusammengeführt, ist im Technologie- und MaaS-Szenario ein Zusatznutzen zu verzeichnen. Das heisst, der Automatisierungseffekt überwiegt die Unfallkosten, die durch die Zunahme der Verkehrsleistung entstehen.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

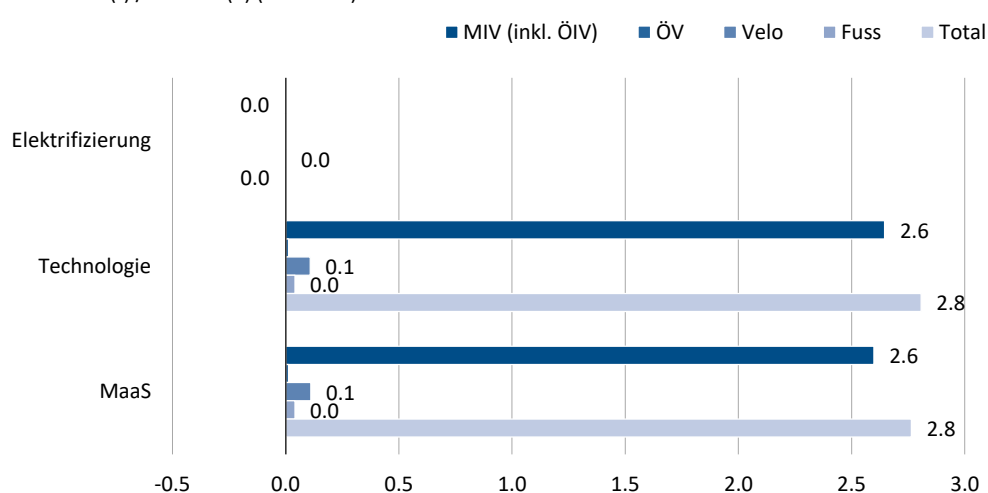


Abbildung 57: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Unfallkosten gesamt (Quelle: INFRAS)

Veränderung der Umwelt- und Gesundheitskosten

Die Umwelt- und Gesundheitskosten steigen aufgrund der Veränderung der Verkehrsleistungen, einschliesslich modaler Verschiebungen. Das bedeutet eine Zunahme des MIV (inkl. ÖIV) zulasten des Anteils des ÖV im Technologie- und MaaS-Szenario. Die Veränderung dieser Kosten wurde auf Basis der Kostensätze pro Pkm und der Veränderung der Verkehrsleistung je Szenario abgeschätzt (Mengeneffekt). Die Kostensätze sind abhängig von der Elektrifizierung und daher in allen Analyseszenarien gleich.

Die Kostensätze basieren auf der Publikation zu den externen Kosten des Verkehrs 2021 (Ecoplan / INFRAS 2024, ARE 2025). Darin werden die externen Kosten in den Bereichen Biodiversitätsverluste Luft, Bodenschäden, Ernteaussfälle Luft, Gebäude Luft, Gesundheit Luft, Waldschäden Luft, Klimakosten, Kosten in Bezug auf Natur und Landschaft, Unfälle, vor- und nachgelagerte Prozesse, Lärmkosten sowie der Gesundheitsnutzen monetarisiert. Die Kostensätze werden differenziert nach Verkehrsmittel und Antriebstechnologie (elektrisch/fossil/sonstige). Die Veränderung der Umwelt- und Gesundheitskosten wird über die Veränderung der Kostensätze (CHF/Pkm) aufgrund der Elektrifizierung sowie der Veränderung der Verkehrsleistung hergeleitet.

Im Elektrifizierungsszenario sind die Effekte nur marginal. Im Technologie- und MaaS-Szenario entstehen Zusatzkosten aufgrund der Zunahme der Verkehrsleistung im MIV (inkl. ÖIV).

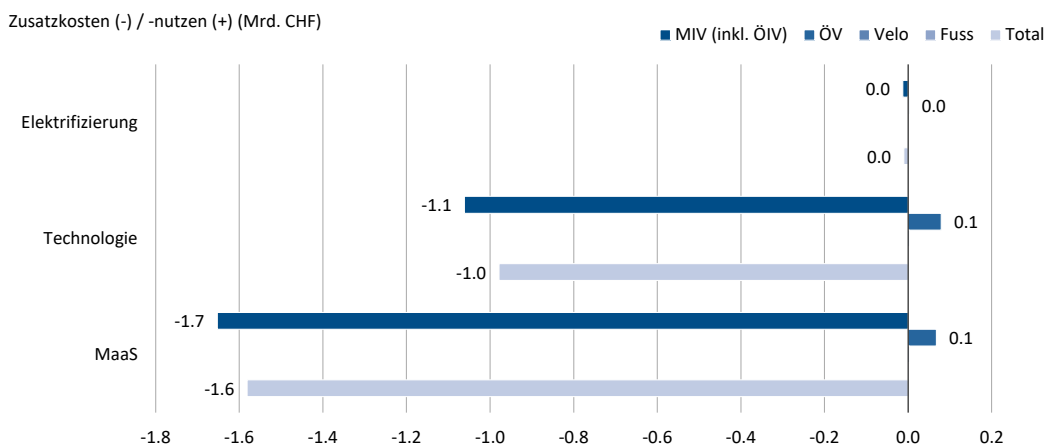


Abbildung 58: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung der Umwelt und Gesundheitskosten (Quelle: INFRAS)

Veränderung des externen Gesundheitsnutzens im Fuss- und Veloverkehr

Durch die Reduzierung des Fuss- und Veloverkehrs verringert sich der externe Gesundheitsnutzen, da sich die Bevölkerung weniger bewegt. Die Abschätzung basiert ebenfalls auf den Kostensätzen (CHF/Pkm) (Ecoplan/INFRAS 2024, ARE 2025) und der Änderung der Verkehrsleistung (Pkm) im jeweiligen Szenario im Vergleich zur Referenz.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

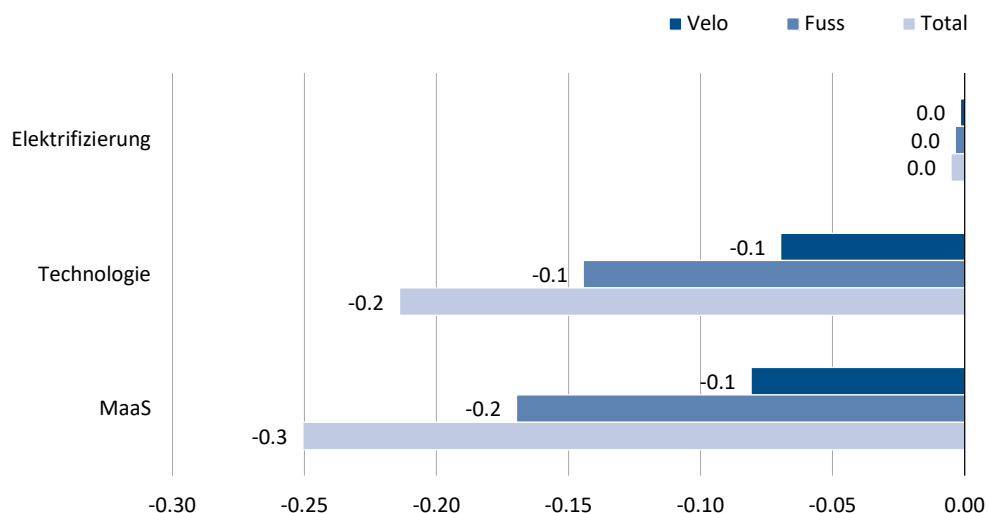


Abbildung 59: Zusatzkosten/-nutzen aus der Veränderung des ext. Gesundheitsnutzens (Quelle: INFRAS)

6.1.3 Effekte im Güterverkehr

6.1.3.1 Übersicht zu den direkten und indirekten Effekten

Im Güterverkehr werden – analog zum Personenverkehr – die direkten und indirekten Effekte auf Basis der verkehrlichen Wirkungen im Güterverkehr (Kapitel 5.2) und den Annahmen zur Entwicklung der Stellschrauben für den Güterverkehr für die drei Analyseszenarien (Kapitel 4.2) abgeschätzt. Abbildung 60 zeigt die betrachteten Effekte in der Übersicht (ARE 2021).

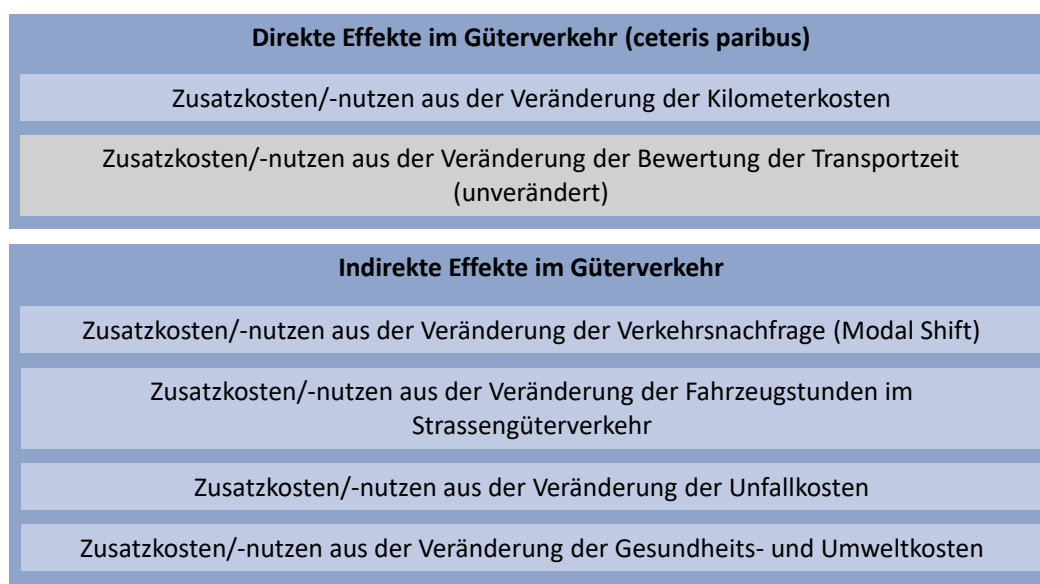


Abbildung 60: Übersicht mikroökonomischer Effekte im Güterverkehr

Als direkter Effekt werden die veränderten Gesamtkostensätze berücksichtigt. Da sich die Zeitkostensätze (VoT) in den betrachteten Szenarien nicht ändern, werden veränderte Zeitkosten lediglich als indirekter Effekt berücksichtigt (Kapitel 6.1.3.2). Bei den

indirekten Effekten werden die Veränderung der Verkehrsleistung bzw. Fahrleistung, den veränderten Zeitkosten sowie die Änderung der Unfall, Umwelt- und Gesundheitskosten im Strassengüterverkehr monetarisiert (Kapitel 6.1.3.3).

Tabelle 44 zeigt die Ergebnisse in der Übersicht. Insgesamt resultieren Zusatznutzen. Die mikroökonomischen Wirkungen sind im Technologie- und MaaS-Szenario am höchsten.

Zusatzkosten und -nutzen im Güterverkehr 2050 (Mrd. CHF p.a.)

	Elektrifizierung	Technologie	MaaS
Direkter Effekt			
Kilometerkosten	0.1	3.0	6.1
Indirekte Effekte			
Veränderung der Verkehrsleistungen	0.0	-0.2	-0.3
Veränderung der Fahrzeugstunden Strasse	0.0	0.1	0.4
Veränderung der Unfallkosten	0.0	0.4	0.4
Veränderung der Gesundheits- und Umweltkosten	1.1	1.0	1.1
Total	1.2	4.3	7.7

Tabelle 44: Übersicht Zusatzkosten und -nutzen im Güterverkehr 2050 (Quelle: INFRAS)
Zusatznutzen (+) / Zusatzkosten (-). Differenzen in den Summen durch Rundungen.

6.1.3.2 Direkte Effekte (ceteris paribus Wirkungen)

Die Veränderung der Gesamtkosten führt insbesondere zu Zusatznutzen von rund 3 Mrd. Franken im Technologieszenario und rund 6.1 Mrd. Franken im MaaS-Szenario (Abbildung 61).

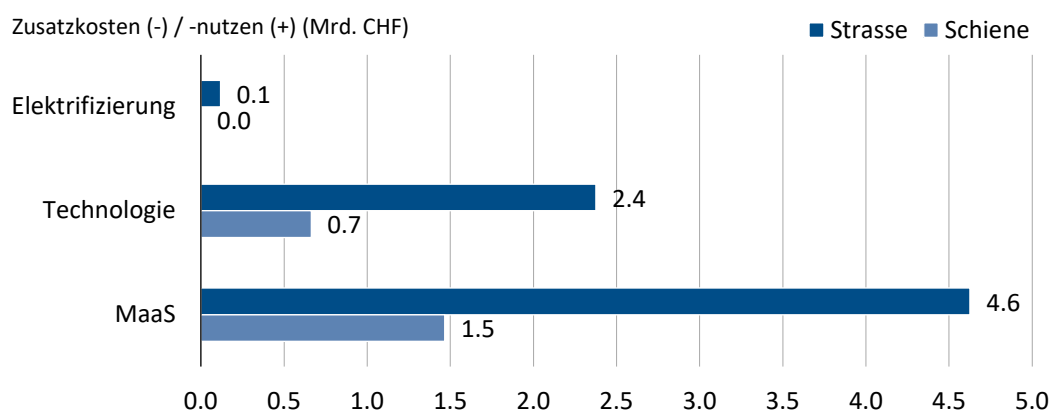


Abbildung 61: Direkter Effekt Veränderung Kilometerkosten im GV

6.1.3.3 Indirekte Effekte

Die Zusatzkosten bzw. -nutzen aus der **Veränderung der Nachfrage bzw. Verkehrsleistung** und den im jeweiligen Szenario angenommenen Kilometerkosten für

die Strasse (SNF, LNF) und die Schiene (WLV, UKV, RoLa) sind in Abbildung 62 zusammengefasst.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

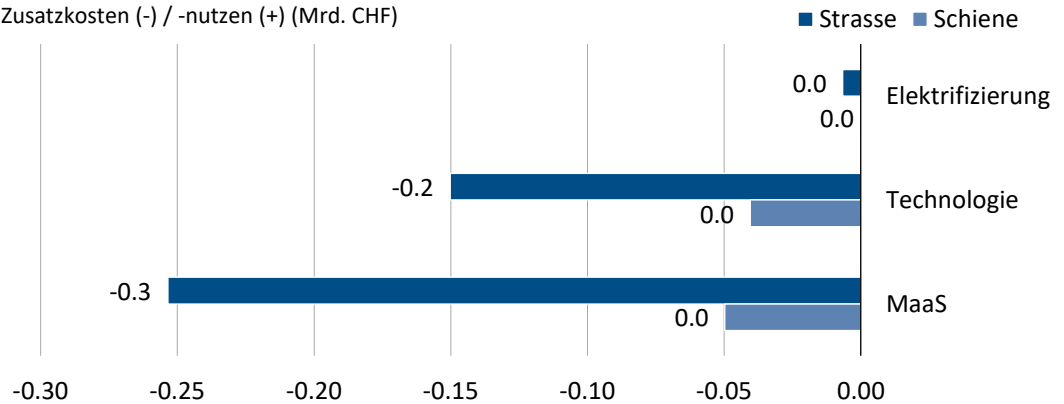


Abbildung 62: Indirekter Effekt Veränderung Nachfrage im GV

Für die Monetarisierung der **Zeitkosten** (der Ladung) aufgrund der Veränderung der Fahrzeugstunden auf der Strasse werden Zeitkostensätze zugrunde gelegt. Diese sind in allen Szenarien gleich. Für die SNF liegen mit der Norm VSS 41 823 Zeitkostensätze vor (vgl. Tabelle 13 in Kapitel 3.2.2.1). Der durchschnittliche Zeitkostensatz für SNF beträgt rund 21.25 CHF pro Stunde (Preisbasis 2021). Die Zeitkosten für die LNF werden für die Infrastrukturbewertung nach NISTRA nicht separat ausgewiesen, sondern sind Bestandteil der Kilometerkosten bzw. Betriebskosten gemäss VSS 41 827 (Betriebskosten von Strassenfahrzeugen).²² Zur Abschätzung der Zeitkosten wird vereinfachend angenommen, dass der Zeitkostensatz für LNF rund 18.50 CHF pro Stunden beträgt. Dieser wurde auf Basis des Zeitkostensatzes für SNF sowie dem Verhältnis der Betriebskosten LNF / SNF gemäss VSS 41 827 hergeleitet. Dies ist eine sehr vereinfachende Annahme. Die Ergebnisse zur Veränderung der Zeitkosten (der Ladung) sind in Abbildung 63 zusammengefasst.

Zusatzkosten (-) / -nutzen (+) (Mrd. CHF)

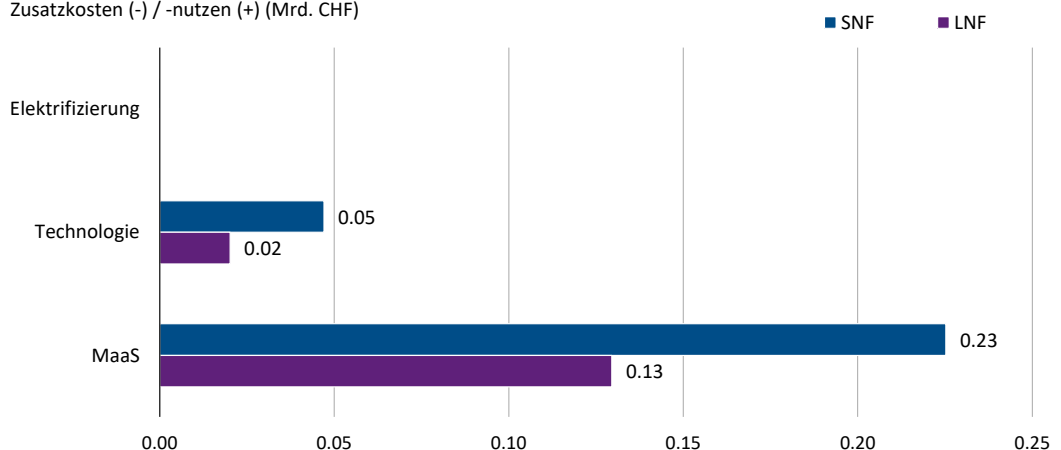


Abbildung 63: Indirekter Effekt Veränderung Zeitkosten im GV

²² Die Betriebskosten für Lieferwagen betragen demnach 48.90 CHF/h (Preisstand 2016). Das fahrleistungsgegewichtete Mittel für schwere Nutzfahrzeuge beträgt im Vergleich 58.93 CHF/H (Preisstand 2016).

Bei den **Zusatznutzen bzw. -kosten aus der Veränderung der Unfallkosten** werden zwei Effekte berücksichtigt. Erstens wird die Veränderung der Unfallzahlen aufgrund der Veränderung der Nachfrage (Mengeneffekt) berücksichtigt. Die spezifischen externen Unfallkosten pro Tkm für das Jahr 2021 werden für die Berechnung zugrunde gelegt (Ecoplan / INFRAS 2024, ARE 2025).²³ Dieser Mengeneffekt ist in allen drei Szenarien im Vergleich zur Referenz vernachlässigbar (Abbildung 64).

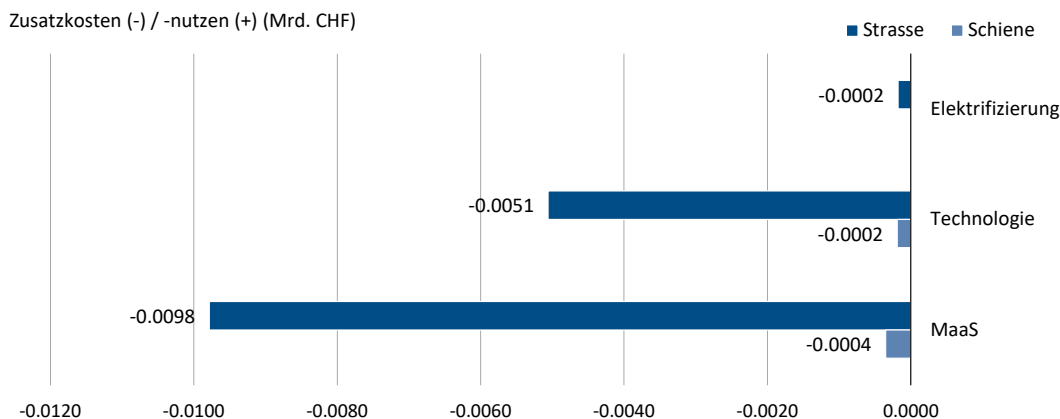
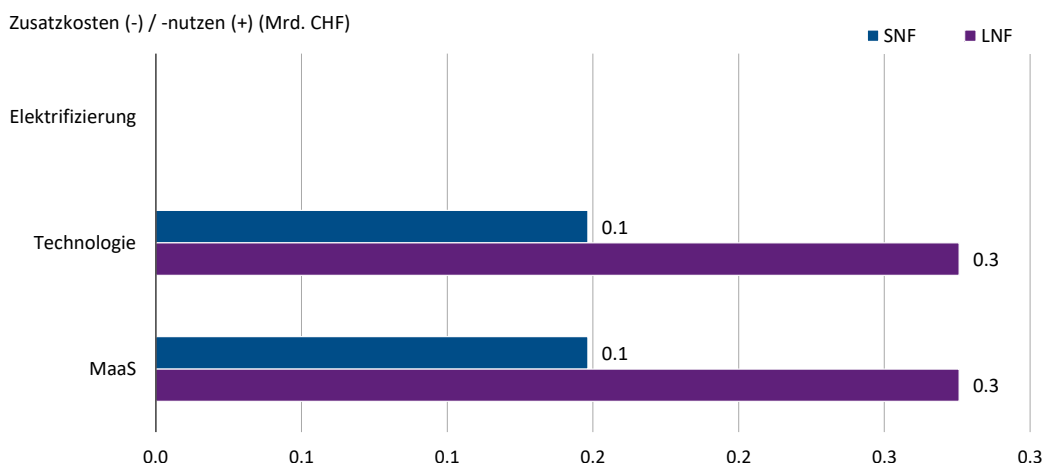


Abbildung 64: Indirekter Effekt Veränderung Unfallkosten (Mengeneffekt) im GV

Als ein wichtiger Nutzen der Automatisierung wird die Reduktion der Unfälle auf der Strasse angeführt (Kapitel 3.3). Die Unfallkostensätze verändern sich, wenn dieser Effekt der Automatisierung berücksichtigt wird. Wir bezeichnen diese vorliegend vereinfachend als Preiseffekt, um diesen Effekt vom oben aufgeführten Effekt abzugrenzen. Für die Strasse legen wir analog ARE (2021) und nach Diskussion mit der Begleitkommission eine Reduktion der Unfälle von 80% bei Automatisierung auf der Strasse zugrunde. Wir nehmen zudem an, dass es keine Veränderung für die Schiene gibt. Insgesamt resultiert ein Zusatznutzen für Strasse aufgrund der Automatisierung und der damit erhöhten Sicherheit (Abbildung 65). Diese Annahmen sind mit sehr grossen Unsicherheiten verbunden.



²³ Hierbei wurde keine Veränderung der Entwicklung der Unfälle pro Tkm, deren Struktur (Getötete, Schwer- und Leichtverletzte) sowie den Kosten pro Personenschaden bzw. Unfall zwischen 2021 und 2050 berücksichtigt.

Abbildung 65: Indirekter Effekt Veränderung Unfallkosten (Preiseffekt) im GV

Aufgrund der verkehrlichen Wirkungen und des unterschiedlichen Flottenmixes in der Referenz vs. der Analyseszenarien können zudem die veränderten **Umwelt- und Gesundheitskosten** geschätzt werden. Hierbei wird sowohl der Preis- als auch der Mengeneffekt berücksichtigt, d.h. die veränderten Umwelt- und Gesundheitskosten resultieren aus der Veränderung der Nachfrage (Mengeneffekt) und der veränderten Kostensätze aufgrund der Elektrifizierung im Strassenverkehr (Preiseffekt). Die Umwelt- und Gesundheitskosten des Strassengüterverkehrs nehmen aufgrund der Veränderung des Flottenmixes ab. Für die Schiene ergeben sich keine nennenswerten Veränderungen, da deren Umweltkosten pro Tkm sehr tief sind. Die Kostensätze basieren auf der Publikation zu den externen Kosten des Verkehrs 2021 (Ecoplan/INFRAS 2024) sowie den Daten des ARE (2025) zu den externen Effekten, welchen die Lärmkosten entnommen werden. Die Kostensätze werden differenziert nach Verkehrsmodi und Antriebstechnologie (elektrisch/fossil/sonstige).

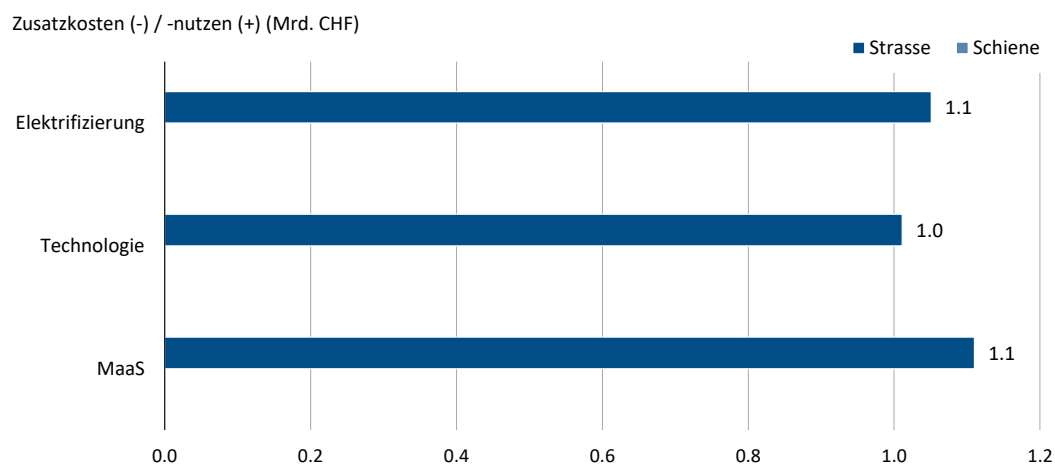


Abbildung 66: Indirekter Effekt Veränderung Umwelt- und Gesundheitskosten im GV

6.1.4 Fazit Personenverkehr

Die mikroökonomische Analyse zeigt, dass Dekarbonisierung und Digitalisierung im Personenverkehr sowohl zu direkten als auch indirekten Kosten- und Nutzeneffekten führen. Während die Wirkungen im Elektrifizierungsszenario primär über tiefere Kilometerkosten entstehen und sich damit ein vergleichsweise kleiner Zusatznutzen ergibt, dominieren im Technologie- und MaaS-Szenario vor allem Effizienz- und Komfortgewinne.

Die direkten Effekte sind insbesondere durch veränderte Betriebskosten sowie durch die Neubewertung der Reisezeit im MIV geprägt. Im Technologieszenario führt die Automatisierung zu einer markanten Reduktion des Value of Time, wodurch hohe Zusatznutzen entstehen. Im MaaS-Szenario verstärken tiefere Kilometerkosten und sinkende ÖV-Tarife die positiven Wirkungen, wenngleich die Bewertung der Reisezeit hier weniger stark sinkt als im Technologieszenario.

Die indirekten Effekte umfassen zusätzliche Verkehrsleistungen durch neue Nutzergruppen, Veränderungen bei Fahrzeugstunden, Unfallkosten sowie Umwelt- und Gesundheitswirkungen. Während steigende Verkehrsleistungen zu Mehrbelastungen bei Umwelt- und Gesundheitskosten führen, kompensieren die deutlichen Sicherheitsgewinne durch Automatisierung diese Effekte in den meisten Szenarien. Insgesamt resultierten im Technologieszenario Zusatzkosten, im MaaS-Szenario ein signifikanter Zusatznutzen.

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich damit, dass die mikroökonomischen Effekte der Dekarbonisierung und Digitalisierung des Personenverkehrs mehrheitlich positiv ausfallen. Besonders stark sind die gesamtwirtschaftlichen Zusatznutzen im MaaS-Szenario ausgeprägt, wo Automatisierung und neue Angebotsformen kombiniert werden.

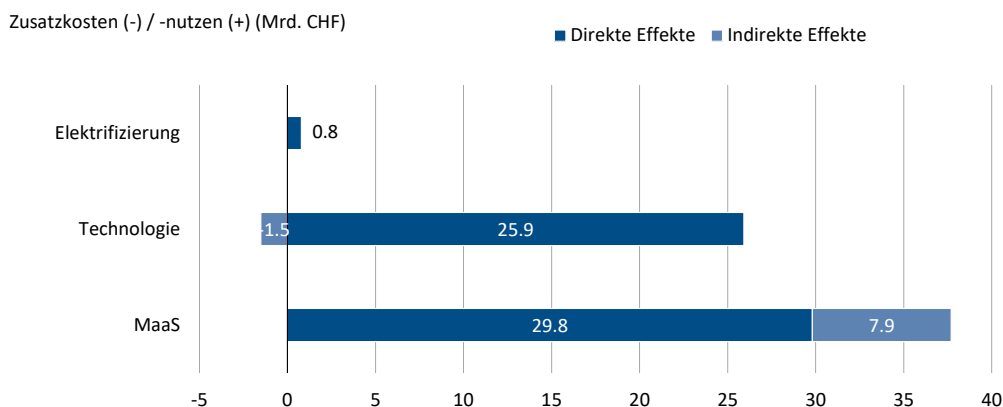


Abbildung 67: Mikroökonomische Effekte im Personenverkehr (gesamt)

Güterverkehr

Wie im Personenverkehr entstehen auch im Güterverkehr direkte und indirekte Kosten- und Nutzeneffekte. Im Elektrifizierungsszenario entstehen die Wirkungen primär über höhere Gesundheits- und Umweltnutzen aufgrund der Veränderung des Flottenmixes. Im Technologie- und MaaS-Szenario kommen zudem Zusatznutzen in Form veränderter Unfall-, Zeit- und Kilometerkosten hinzu.

Die direkten Effekte sind insbesondere durch veränderte Personalkosten im Strassengüterverkehr und sonstige Kosten (Vor-/Nachlauf, Umschlag etc.) im Schienengüterverkehr geprägt. Während die direkten Effekte im Elektrifizierungsszenario einen vergleichsweise geringen Zusatznutzen ergeben, führen die Veränderungen der Gesamtkosten zu einem Zusatznutzen von rund 3 Mrd. CHF im Technologieszenario und von rund 6.1 Mrd. CHF im MaaS-Szenario.

Die indirekten Effekte umfassen zusätzliche Verkehrsleistungen, Veränderungen bei Fahrzeugstunden, Unfallkosten sowie Umwelt- und Gesundheitswirkungen. Während steigende Verkehrsleistungen im Technologie- und MaaS-Szenario zu Zusatzkosten führen, kompensieren die deutlichen Sicherheitsgewinne durch Automatisierung diese Effekte. Ausserdem tragen die Veränderung der Fahrzeugstunden im Strassengüterverkehr sowie die Veränderung der Umwelt- und Gesundheitskosten zu signifikanten Zusatznutzen bei.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mikroökonomischen Effekte der Dekarbonisierung und Digitalisierung des Güterverkehrs mehrheitlich positiv ausfallen. Wie im Personenverkehr sind die gesamtwirtschaftlichen Zusatznutzen im MaaS-Szenario besonders stark.

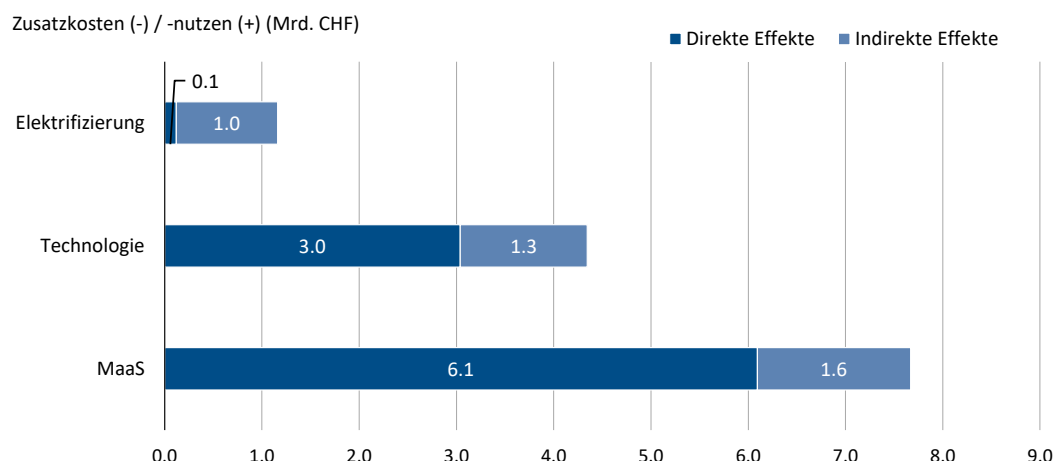


Abbildung 68: Mikroökonomische Effekte im Güterverkehr (gesamt)

6.2 Makroökonomische Wirkungen

6.2.1 Vorgehen

Die makroökonomische Analyse baut auf der Literaturanalyse (Kapitel 3), der verkehrlichen Wirkungen (Kapitel 5) und der Kosten-Nutzen-Analyse (Kapitel 6.1) auf. Die makroökonomischen Wirkungen werden mit einem Input-Output-Modell analysiert. Das ökonomische Modell erlaubt Aussagen über die Wirkung auf die Wirtschaftsstruktur (relative und absolute Bedeutung der einzelnen Wirtschaftssektoren für die Gesamtwirtschaft) unter Berücksichtigung aller relevanten Verknüpfungen zwischen den Branchen in der Produktion (Wertschöpfungsstufen). Produktionsseitige Veränderungen der Produktivität oder der Kapital- und Beschäftigungsintensität können ebenso untersucht werden. Input-Output-Modelle geben weiter Aufschluss über die Auswirkungen auf den Endkonsum im Inland (privater und staatlicher Konsum, Investitionen, fiskalische Veränderungen) und dem Ausland (Export und Import von Vorleistungen bzw. Endverwendungsgütern, Wirtschaftsverflechtung mit dem Ausland). Der Prozess der Input-Output-Modellierung ist iterativ und berücksichtigt dynamische Entwicklungen. Das Vorgehen bzw. die Grundlogik der makroökonomischen Analyse ist in Abbildung 69 dargestellt.

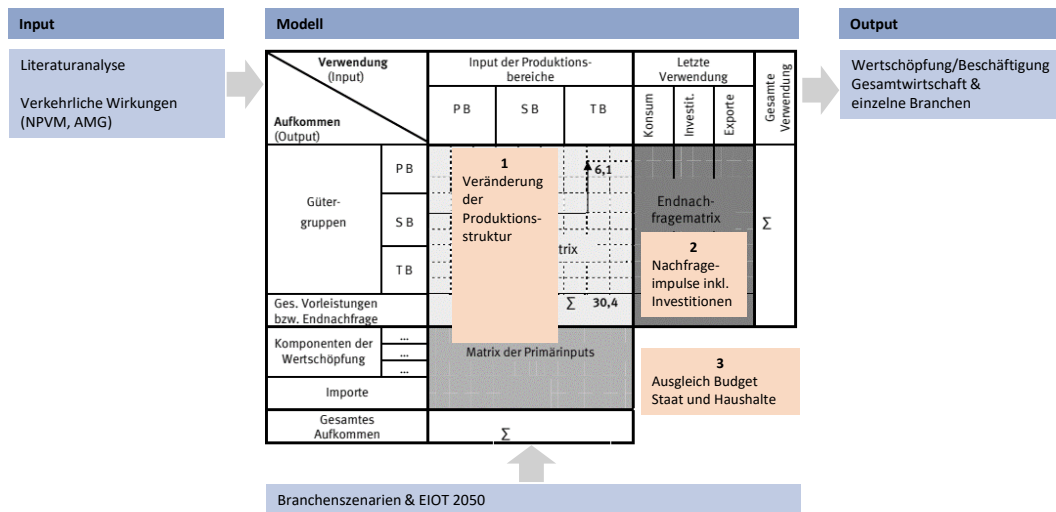


Abbildung 69: Grundlogik der Input-Output-Analyse

Die Ausgangslage für das Input-Output-Modell bildet die Energie- und verkehrsdifferenzierte Input-Output-Tabelle der Schweiz für das Jahr 2014 (Nathani et al. 2019) und deren Wirtschaftsstrukturen. Diese ist die zum Zeitpunkt der durchgeführten Analyse aktuelle Version der Schweizer Input-Output-Tabelle, für die der Verkehr in gewünschter Differenzierung verfügbar ist. Diese Differenzierungen umfassen den Schienenverkehr (PV und GV), den restlichen ÖV im Landverkehr, den Strassengüterverkehr, die Luft- und Schifffahrt sowie die Bereitstellung der Verkehrsinfrastrukturen. Als Basis für die Analyseszenarien erfolgt in einem ersten Schritt eine Hochrechnung der IOT auf das Jahr 2050 (Referenz). Diese ist im nachfolgenden Kapitel 6.2.2.1 dargestellt. Der Fokus der vorliegenden Analyse liegt auf der Schweiz, die mit dem Ausland über Import- und Exportbeziehungen verbunden ist.

Im Input-Output-Modell werden verschiedene Wirkungsebenen und Wirkungskanäle differenziert. Jede mögliche Wirkung ordnen wir einem erstbetroffenen Akteur (Haushalt, Unternehmen, Staat) zu. Anschliessend werden die erfassten Wirkungen analytisch nach drei verschiedenen Wirkungsebenen unterschieden:

1. Veränderung der Produktionsstruktur: Die Dekarbonisierung und Digitalisierung in der Mobilität beeinflusst jene Unternehmen, welche Fahrzeuge herstellen, verkaufen, reparieren oder unterhalten, Vorleistungsgüter für diese Produktion anbieten, Mobilitätsdienstleistungen erbringen oder Plattformbasierte Vermittlungen von Dienstleistungen anbieten. Insbesondere betrachten wir Änderungen in der Personal- und Kapitalintensität der Herstellung, Veränderung der Produktivität, Veränderung der Struktur und Gewichtung von Vorleistungen und Veränderungen in der Wertschöpfungstiefe der einzelnen mit dem Mobilitätsmarkt verbundenen Sektoren.

2. Nachfrageimpulse inkl. Investitionen: Eine dekarbonisierte und digitalisierte Mobilität bringt Veränderungen auf der Nachfrageebene mit sich. Das betrifft die Veränderung der Import- und Exportströme, die Veränderung der Konsumstruktur (z.B. die Substitution von Mineralöl durch Strom im Rahmen der Elektrifizierung) und des Konsumniveaus im Inland. Grundsätzlich umfassen diese Veränderungen auch die Veränderungen der Investitionshöhe und -struktur. Wir gehen in der vorliegenden

Analyse jedoch davon aus, dass in keinem der Szenarien zusätzliche Infrastrukturinvestitionen nötig sind und die notwendige Infrastruktur ohnehin bereitgestellt wird.

3. Budgetausgleich Haushalte und Staat: Steigt z.B. der Bedarf an öffentlichen Mitteln, kann der Staat entweder andere Investitionen aufschieben oder über eine Erhöhung der Steuerlast das verfügbare Einkommen der Haushalte verringern. Letzteres mindert das frei verfügbare Einkommen der Haushalte mit entsprechenden Rückkopplungsfolgen in der Volkswirtschaft über eine Veränderung des Sparens und des privaten Konsums. Weiter berücksichtigen wir Verschiebungen der Haushaltsausgaben, wenn z.B. durch das Teilen von PW weniger Ausgaben für die Mobilität anfallen, die woanders ausgegeben werden können. In allen drei Szenarien wird ein Rückgang der Mineralölsteuereinnahmen aufgrund der Elektrifizierung durch eine analoge Abgabe auf E-Fahrzeuge ersetzt. Die Steuereinnahmen je km Fahrleistung bleiben daher gleich.

Ein Input-Output-Modell, wie es in dieser Analyse verwendet wird, bietet verschiedene Vorteile. Es bildet ökonomische Zusammenhänge innerhalb einer Volkswirtschaft konsistent und umfassend ab. Der zentrale Vorteil liegt in der vollständigen Erfassung der Verflechtung zwischen Produktionssektoren, Haushalten und dem Ausland. Dadurch lassen sich sowohl direkte als auch indirekte ökonomische Effekte von Nachfragänderungen oder politischen Massnahmen nachvollziehen. Im Gegensatz zu partiellen Analysen oder mikroökonomischen Modellen bilden IOT-Modelle die gesamte Produktionskette ab. Sie eignen sich daher für Was-wäre-wenn-Analysen, wie wir sie im vorliegenden Projekt durchführen.

Zudem sind Input-Output-Tabellen, die die Grundlage von Input-Output-Modellen bilden, empirisch stark fundiert, da sie auf offiziellen volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen basieren und eine hohe Transparenz in den Annahmen und Ergebnissen bieten. Letzteres stellt auch einen wesentlichen Unterschied zu Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen dar, deren Resultate oft nur schwer nachvollziehbar sind («Black-Box»).

Gleichzeitig sind Input-Output-Modelle mit gewissen Limitationen verbunden. Sie beruhen auf fixen technischen Koeffizienten und unterstellen somit grundsätzlich konstante Produktionsfaktoren, lineare Zusammenhänge und keine Substitutionsmöglichkeiten. Preis- und Verhaltensanpassungen werden in der Regel nicht endogen berücksichtigt. Wie in Abbildung 69 dargestellt, modellieren wir in unserer Input-Output-Analyse die veränderten Produktionsfaktoren und können diese Limitation somit beheben.

6.2.2 Entwicklung der Wertschöpfung und Beschäftigung

6.2.2.1 Referenzszenario

Im Referenzszenario entwickelt sich die Schweizer Wirtschaft (Produktion, Beschäftigung, Endnachfrage und Aussenhandel) insgesamt gemäss den Branchenszenarien des Bundes von 2020 (Cretegny und Müller 2020). Zum Zeitpunkt der Berechnungen war

diese Version die aktuelle Grundlage.²⁴ Für die Mobilität gibt es jedoch verschiedene zukünftige Entwicklungen, die in den Branchenszenarien nicht abgebildet sind und die es zu berücksichtigen gilt. Die übergeordnete Wirkungskette ist in Abbildung 70 dargestellt.

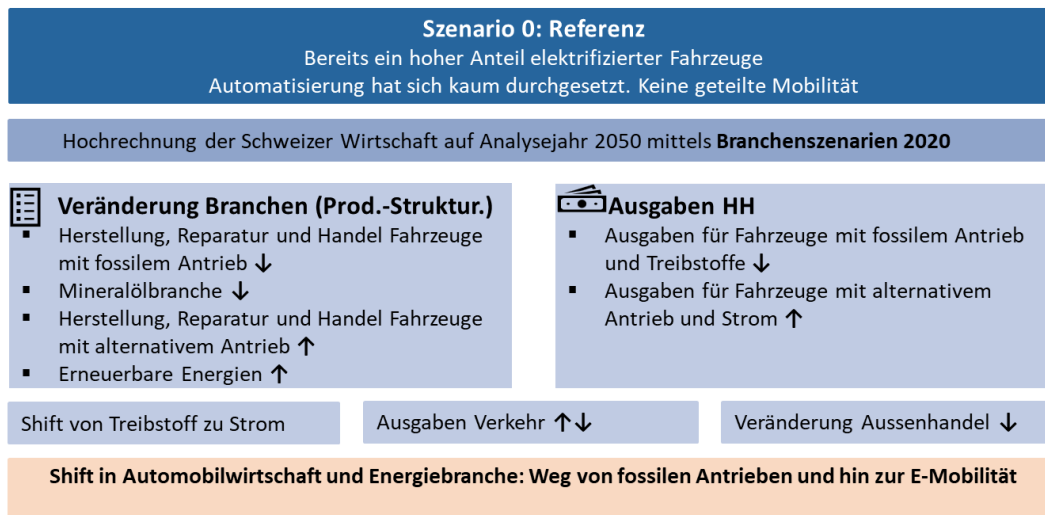


Abbildung 70: Wirkungskette der Referenzentwicklung

Im Referenzszenario geht der Anteil der Fahrzeuge mit fossilem Antrieb (Benzin und Diesel) im Bestand bis 2050 bereits stark zurück. Plug-in-Hybride Fahrzeuge werden zwar wichtiger, ersetzen die fossilen Antriebe aber nur in geringem Masse. Die Elektrifizierung der Flotte ist bereits weit fortgeschritten und batterieelektrische Fahrzeuge machen im MIV bereits 70% des Bestandes aus. Auch weitere alternative Antriebe gewinnen an Relevanz, insbesondere im Güterverkehr. Im Personenverkehr ist zudem bereits die Hälfte der elektrisierten Fahrzeuge autonom unterwegs, d.h. ohne Person am Steuer. Haushalte kaufen in der Referenz keinerlei Fahrzeuge mit fossilen Antrieben mehr (Benzin, Diesel und Plug-in-Hybride). Lediglich im ÖV und Güterverkehr findet noch ein Absatz von Fahrzeugen statt, die auf fossile Treibstoffe angewiesen sind – jedoch auf einem tiefen Niveau. 2050 sind alle Fahrzeuge im Bestand – fossil und alternativ betrieben – zudem sehr effizient und der Energieverbrauch je gefahrenem Kilometer geht zurück. Insgesamt steigt die Verkehrsleistung im Personenverkehr für MIV, ÖV und Velo. Gleiches gilt im Güterverkehr: es werden mehr Tonnen transportiert als noch im Ausgangszeitpunkt.

Das veränderte Mobilitäts- und Kaufverhalten im Personen- und Güterverkehr beeinflusst die Schweizer Wirtschaft. So sehen sich die Automobil- und die Energiewirtschaft im Referenzszenario einer grundlegenden Transformation gegenüber. Der Absatz von Fahrzeugen mit fossilem Antrieb spielt nur noch im GV und ÖV eine kleine Rolle und bricht im MIV ganz ein (sowohl importierte als auch lokal produzierte Fahrzeuge). Die Neuzulassungen und damit die Verkaufszahlen alternativ-betriebener Fahrzeuge steigen hingegen stark an. So wird die Produktion von Fahrzeugen mit fossilem Antrieb beinahe vollständig durch die Herstellung von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb

²⁴ Nach Abschluss der Berechnungen wurde eine Aktualisierung veröffentlicht (Cretegnny und Müller 2025), deren Ergebnisse relativ ähnlich sind.

substituiert.²⁵ Es gilt zu betonen, dass die inländische Fahrzeugherstellung in der Schweiz eine kleine Rolle spielt (selbst unter der Definition gemäss Fussnote 27). Wichtiger für die gesamtwirtschaftliche Analyse ist die Veränderung der Importe. Diese sind durch den Shift von fossilen zu alternativen Antrieben jedoch nicht betroffen, da wir von gleichen Importquoten – unabhängig vom Antrieb – ausgehen. Die Verschiebung hin zu E-Fahrzeugen hat auch Auswirkungen auf wichtige Vorleistungsbranchen der batterieelektrischen Fahrzeugbranche, wie die Elektrotechnik, die die Elektromotoren an die Fahrzeugherstellung liefert.

Ein ähnlicher Shift erfolgt in der Energiewirtschaft – weg von fossiler Energie hin zu Strom. Der Verkauf fossiler Treibstoffe bricht folglich ein und wird durch Strom für E-Fahrzeuge ersetzt. Durch die Abkehr von Benzin und Diesel sinkt die Abhängigkeit der Volkswirtschaft von Energieimporten, da der Strom im Vergleich zu den fossilen Treibstoffen zu grösserem Anteil im Inland produziert wird. Damit einher geht auch der Ersatz des lokalen Tankstellennetzes durch eine E-Ladeinfrastruktur (privat, öffentlich und gewerblich).

Insgesamt steigt die Bruttowertschöpfung in der Referenzentwicklung mit durchschnittlich rund 1.45% pro Jahr. Das ist leicht höher als die langfristigen gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten in den Branchenszenarien, was auf eine positive Wirkung der Elektrifizierung hindeutet. Die Beschäftigung wächst in der Referenzentwicklung um rund 0.3% pro Jahr. Die Wirtschaft wird folglich deutlich effizienter und die Arbeitsproduktivität steigt.

6.2.2.2 Elektrifizierungsszenario – E-Mobilität

Nachfolgend sind die Resultate für das Elektrifizierungsszenario dargestellt. Alle Veränderungen beziehen sich auf den Zeitpunkt 2050 und sind relativ zum Referenzszenario zu verstehen.²⁶ Im Elektrifizierungsszenario haben sich batterieelektrische vollständig etabliert. Es gibt nur noch einen kleinen Bestand an Fahrzeugen mit fossilem Antrieb und keinerlei fossile Neuzulassungen mehr. Autonomes Fahren hat sich hingegen nicht durchgesetzt.

Abbildung 71 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Wirkungskette für das Elektrifizierungsszenario im Jahr 2050 relativ zur Referenz, also wie sich die Dekarbonisierung auf die Schweizer Volkswirtschaft und ihre Branchen auswirken. Wir unterscheiden wiederum zwischen drei verschiedenen Wirkungsebenen: Produktion, Haushalte und Budget.

²⁵ Wir verstehen unter «Produktion von Fahrzeugen» die Herstellung von Motorfahrzeugen zur Personen- und Güterbeförderung, gemäss NOGA- Kategorie 29 (BFS, 2008). Das beinhaltet ferner die Herstellung verschiedener Teile und Zubehör, ebenso wie die Herstellung von Anhängern und Sattelanhängern.

²⁶ Das gilt für alle Analyseszenarien.

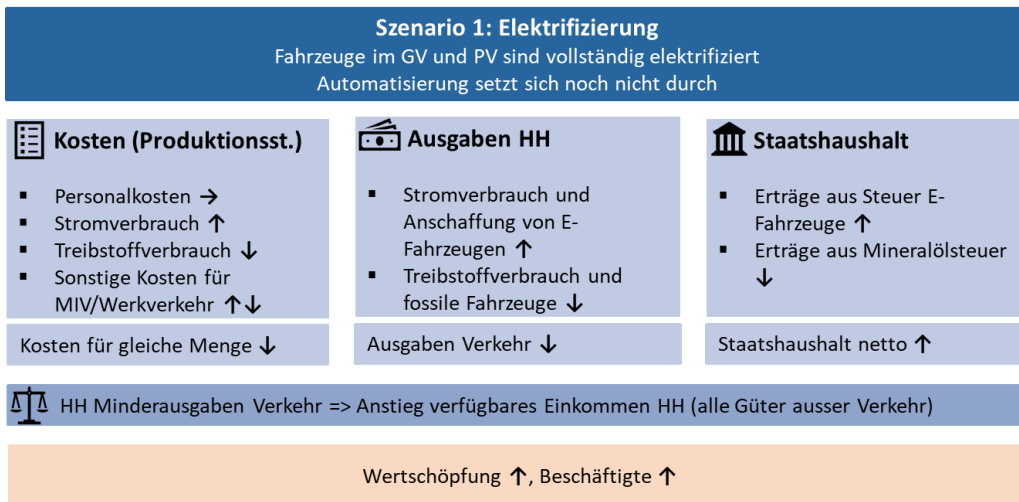


Abbildung 71: Wirkungen für Elektrifizierungsszenario

Das Elektrifizierungsszenario hat im Vergleich zum Referenzszenario hauptsächlich zwei Auswirkungen auf die Schweizer Volkswirtschaft. Einerseits findet eine endgültige Transformation der Autowirtschaft statt – weg von fossilen Antrieben hin zu einer Fahrzeugflotte, die primär batterieelektrisch angetrieben wird. Andererseits folgt darauf die Abkehr von fossilen Treibstoffen zugunsten der Stromwirtschaft. Auf die Verkehrsleistung hat die Elektrifizierung weder im PV noch im GV einen massgebenden Einfluss. Es handelt sich also um ein Eckszenario, das davon ausgeht, dass sich das Mobilitätsverhalten der Haushalte nur geringfügig verändert.

Die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte hat folglich verschiedene Implikationen für die Schweizer Produktion. Der Trend aus der Referenzentwicklung wird fortgesetzt. Im Elektrifizierungsszenario gibt es im Jahr 2050 keine Schweizer Herstellung von Fahrzeugen mit fossilem Antrieb mehr. Es werden nur noch batterieelektrische Fahrzeuge produziert und importiert. Der höhere Anteil von E-Fahrzeugen an der gesamten Fahrzeugflotte senkt die Produktionskosten der Unternehmen in der gesamten Wirtschaft, da diese tiefere Unterhaltskosten (Betrieb, Reparatur, Versicherung) aufweisen. Diesem Effekt wirken die höheren Anschaffungskosten der E-Fahrzeuge entgegen, die höhere Kapitalkosten mit sich bringen.²⁷ Ob in einer Branche die tieferen Unterhaltskosten oder höheren Anschaffungskosten überwiegen, hängt davon ab, wie relevant der Werkverkehr bzw. der Anteil der E-Mobilität (inkl. Geschäftswagen) in dieser Branche ist. Branchen mit hohen Unterhaltskosten in der Referenzentwicklung profitieren damit stärker von der Elektrifizierung als solche, für die Fahrzeugkosten insgesamt weniger relevant sind.

Die zunehmende Elektrifizierung beeinflusst auch die Energiewirtschaft. Der Absatz der fossilen Treibstoffe bricht ein und der Umsatz der Mineralölbranche geht zurück, genauso wie die Importe. Gleichzeitig wächst die Stromproduktion stark, um die höhere Nachfrage nach Strom befriedigen zu können. Wir gehen dabei davon aus, dass der Strom durch eine Vielzahl an verschiedenen Energiequellen bereitgestellt wird, wie

²⁷ Die Entwicklung der Anschaffungskosten basiert auf den Annahmen für die Szenarien, die in Kapitel 4 beschrieben sind. Diese Annahmen sind mit Unsicherheiten verbunden.

das bereits in der Referenz der Fall ist. Wie im Referenzszenario nehmen wir an, dass der Anteil der heimischen Energieproduktion konstant bleibt. In der Summe liegen die Ausgaben zur Befriedigung des Primärenergiebedarfs relativ zur Referenzentwicklung aber tiefer. Diese Effizienzsteigerung erlaubt es den Unternehmen günstiger zu produzieren.

Wie in Kapitel 5.1.2 illustriert ist, ändert sich das Mobilitätsverhalten zwischen Referenz- und Elektrifizierungsszenario kaum und die Fahrleistungen im ÖV, MIV und Fuss- und Veloverkehr sind de facto unverändert. Die Ausgaben der Haushalte für die Mobilität sind folglich hauptsächlich durch tieferen Benzin- und Dieserverbrauch bei gleichzeitig höheren Stromausgaben beeinflusst. In der Summe führt der Ersatz fossiler Treibstoffe durch günstigeren, lokal produzierten Strom dazu, dass die mobilitätsbedingten Ausgaben der Haushalte im Elektrifizierungsszenario tiefer sind als in der Referenz. Der höhere Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im Bestand, die günstiger im Unterhalt und weniger häufig repariert werden müssen als fossil angetriebene Fahrzeuge, senkt die Ausgaben der Haushalte zusätzlich.

Aufgrund der freiwerdenden Mittel durch die geringeren Mobilitätsausgaben steigt das verfügbare Einkommen der Haushalte, die ihren Konsum folglich erhöhen. Wir nehmen an, dass die Haushalte ihren Konsum proportional über alle nicht-mobilitätsbezogenen Ausgabenkategorien anheben. Der Substitutionseffekt von fossilen Antrieben zu E-Fahrzeugen und von Mineralöl hin zu Strom wird also von einem Einkommenseffekt begleitet, der den Konsum und die Produktion als Ganzes erhöht. Über Vorleistungsverflechtungen steigt dann die Produktion der gesamten Wirtschaft wieder an. Wie zuvor erläutert, sind keine zusätzlichen Infrastrukturinvestitionen nötig und die wegfallenden Mineralölsteuereinnahmen werden durch ein analoges Instrument für die E-Fahrzeuge ersetzt. Es sind daher lediglich leicht höhere Steuereinnahmen aufgrund der minim höheren Fahrleistung zu erwarten und es bedarf keiner Veränderung der Steuerbelastung der Haushalte zur Finanzierung neuer Ausgaben.

Gesamtwirtschaftlich hat das Elektrifizierungsszenario einen leicht positiven Effekt auf Schweizer Volkswirtschaft. Das BIP liegt 2050 mit 0.25% höher als im Referenzszenario, wie Tabelle 45 zeigt.

Szenario Elektrifizierung – Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung

	Absolut «Elektrifizierung» 2050	Absolut «Referenz» 2050	Δ Referenzentwicklung	CH absolut heute 2023
Reale Wertschöpfung (Mrd. CHF)	1'069	1'065	0.25%	800
Beschäftigung (VZÄ)	4'460'000	4'460'000	0.1%	4'300'000

Tabelle 45: Szenario Elektrifizierung - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INFRAS)

Die Elektrifizierung senkt in einem ersten Schritt die Kosten der Produktion, was sich positiv auf die Wirtschaft auswirkt. Weiter führt es zu einem Rückgang der Mobilitätsausgaben, was aufgrund des verfügbaren Einkommens höhere Ausgaben für andere Güter ermöglicht, was wiederum zum Wirtschaftswachstum beiträgt. Die reduzierte Abhängigkeit von Energieimporten trägt ebenfalls zur positiven Wirtschaftsentwicklung bei. Die Beschäftigung steigt aufgrund der Elektrifizierung der Mobilität hingegen im Vergleich zur Referenz etwas weniger stark als die Wertschöpfung. Insgesamt führt das Eckszenario folglich zu einer steigenden Produktivität in der Schweizer Volkswirtschaft.

Ein Blick auf die Veränderungen der einzelnen Branchen bietet Hinweise für die Gründe dieser Wertschöpfungs- und Beschäftigungsentwicklung. Diese sind nachfolgend anhand der Branchen mit den grössten positiven wie negativen Veränderungen dargelegt:

- Im Zuge einer nahezu vollständigen Elektrifizierung der Mobilität bis 2050 verlagert sich die Wertschöpfung deutlich – weg von fossilen hin zu strombasierten, technologieintensiven Branchen. Naturgemäss profitieren Sektoren wie die Elektrizitätserzeugung und -verteilung, sowie Branchen im Umfeld von elektrischen Fahrzeugtechnologien und Infrastruktur am stärksten. Diese Sektoren erfahren durch den steigenden Strombedarf und die erhöhte Nachfrage nach E-Fahrzeugen ein Wachstum. Die Tatsache, dass die Haushalte aufgrund der sinkenden Mobilitätsausgaben mehr konsumieren können, wirkt sich zudem positiv auf konsumintensive Branchen des Dienstleistungssektors aus. Die resultierende höhere Produktion dieser Branchen führt auch zu positiven Beschäftigungseffekten.
- Besonders negativ betroffen sind dagegen die Branchen rund um den Verbrennungsmotor, allen voran die Herstellung²⁸, der Handel und der Unterhalt von fossilen Fahrzeugen. Die Mineralölbranche nimmt ebenfalls ab. Alle verlieren durch die sinkende Nachfrage nach fossilen Treibstoffen und wartungsintensiven Fahrzeugen an Bedeutung. Der Handel, Reparatur und Service von fossilen Fahrzeugen sowie der Detailhandel (über den Wegfall der Tankstellen), sind zudem sehr beschäftigungsintensive Branchen, weshalb der Rückgang in der Nachfrage und der Produktion auf die Beschäftigungszahlen durchschlägt – auch wenn dies im Falle vom Detailhandel ein Rückgang von lediglich rund 1.5% bedeutet. Der Wegfall der Nachfrage nach Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden als Input für die Mineralölbranche führt zu einem spürbaren Beschäftigungsrückgang.

Das Elektrifizierungsszenario hat leicht positive Wertschöpfungseffekte zur Folge. Der allgemeine Anstieg der Beschäftigung aufgrund der positiven Wirtschaftsentwicklung vermag den genannten Rückgang einzelner Branchen aufzufangen, insgesamt steigt die Beschäftigung jedoch weniger stark als die Wertschöpfung. Somit steigt also die Effizienz der Schweizer Volkswirtschaft. Die Ersparnisse der Haushalte aufgrund des Wechsels von fossilem Antrieb zu batterieelektrischem Antrieb ermöglichen den Konsum alternativer Güter, was die Wohlfahrt im Vergleich zur Referenzentwicklung ansteigen lässt.

²⁸ Es gilt zu beachten, dass die inländische Fahrzeugherstellung fossiler Antriebe in der Schweiz absolut nur einen marginalen Beitrag zur nationalen Wirtschaftsleistung beiträgt. Dies ist bereits in der Referenzentwicklung der Fall und akzentuiert sich in den Analyseszenarien weiter. Prozentual ist der Rückgang aber substantiell.

6.2.2.3 Technologieszenario – Automatisierte E-Mobilität

Im Technologieszenario haben sich hochautomatisierte Fahrzeuge im Güter- und Personenverkehr vollständig durchgesetzt. Diese sind zudem nahezu alle elektrifiziert. Fahrzeuge müssen nicht mehr gelenkt werden und es muss niemand im Fahrzeug anwesend sein. Die Fahrzeuge befinden sich überwiegend im Privatbesitz und die Mobilität ist immer noch sehr individualisiert. Fahrzeuge werden nicht geteilt und neue Angebotsformen (z.B. Ride-Pooling) haben sich nicht durchgesetzt.

Abbildung 72 zeigt die Wirkungskette für das Technologieszenario, also wie sich die verkehrlichen Wirkungen auf die schweizerische Volkswirtschaft und ihre Branchen auswirken.

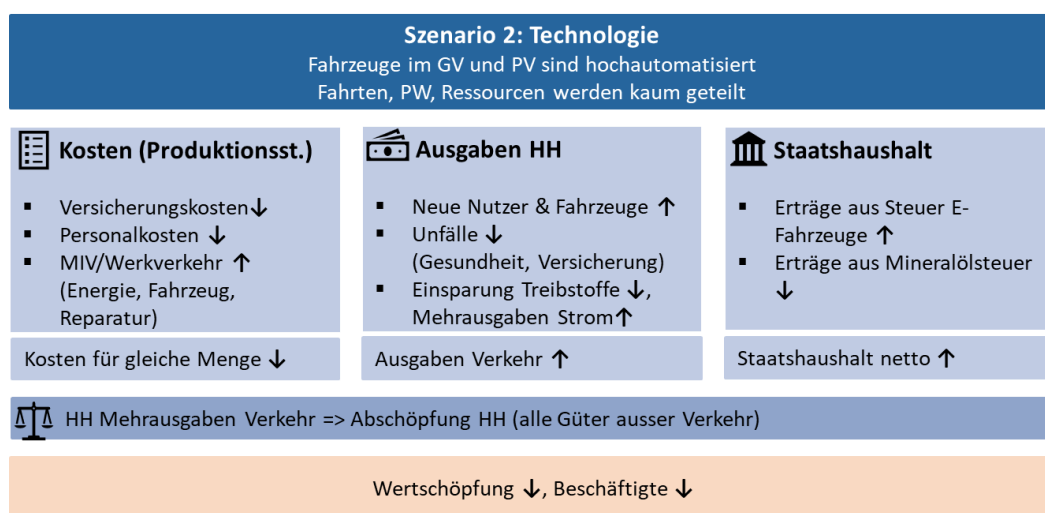


Abbildung 72: Wirkungskette für Technologieszenario

Im Güterverkehr auf Strasse und Schiene sinken die Personalkosten aufgrund der Automatisierung und damit wegfallenden Fahrpersonals stark. Es findet kaum eine Verlagerung der Verkehrsleistung und des Verkehrsaufkommens von der Strasse auf die Schiene statt. Im ÖV, im Güterverkehr und teilweise auch im MIV (d.h. Geschäftsreisen) sinken die Arbeitskosten aufgrund der Möglichkeit, Personal zu sparen und Arbeit während der Fahrt zu erledigen. Die zunehmenden Kapitalkosten aufgrund der in der Anschaffung teureren automatisierten Fahrzeuge wirken dagegen kostensteigernd. Diese liegen noch einmal höher als im Elektrifizierungsszenario.²⁹ Die grösste Veränderung stellt jedoch die Reduktion der Personalkosten dar, welche die Mehrkosten bei der Fahrzeugbeschaffung überkompensiert. Insbesondere im öffentlichen Verkehr und im Güterverkehr ist weniger Fahrpersonal (GV-Strasse ca. -50%, GV-Schiene -75%) notwendig, wodurch diese Unternehmen substanzielle Personalkosten einsparen können. Dadurch steigt die Effizienz im Automatisierungsszenario und ermöglicht es den Unternehmen, die gleiche Menge an Mobilitätsdienstleistungen zu geringeren Kosten zu produzieren.

²⁹ Dies widerspiegelt die Annahmen zu den Anschaffungskosten aus Kapitel 4. Diese sind mit Unsicherheiten verbunden und können je nach Entwicklung der Produktionskosten in Zukunft auch tiefer liegen.

Die Ausgaben der Haushalte für die Mobilität steigen im Automatisierungsszenario, obwohl der Preis im ÖV sinkt. Dies ist insbesondere durch die Mobilisierung neuer Nutzergruppen (Kinder und ältere Personen) im MIV zu erklären. Auch die Zunahme der Leerfahrten spielt eine Rolle. Gleichzeitig sinkt der Value of Time, da die Fahrzeit für produktive Tätigkeiten genutzt werden kann. Die Nachfrage nach MIV steigt im Szenario entsprechend um rund 34%. Die Anzahl der Unfälle und der damit verbundenen Kosten nehmen in diesem Eckszenario ab, was zu Einsparungen bei Gesundheits- und Versicherungsausgaben der Haushalte führt.

Im Technologieszenario steigen die Steuereinnahmen des Staates aus dem MIV, da mit pro gefahrenen Kilometer die stark zunehmende Mobilitätsnachfrage der Haushalte direkt steuerwirksam wird. Trotz sinkender Preise im öffentlichen Verkehr geben die Haushalte insgesamt deutlich mehr für Mobilität aus als in der Referenz. Aufgrund der Annahme eines ausgeglichenen Haushaltsbudgets reduzieren sie im Gegenzug ihre Ausgaben für andere Güter.³⁰

Trotz hoher Effizienzsteigerungen in der Produktion durch die Automatisierung liegt die gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung im Jahr 2050 unter dem Niveau der Referenzentwicklung. Grund dafür ist, dass ein erheblicher Teil der zusätzlichen Nachfrage nach automatisierten E-Fahrzeugen über Importe gedeckt wird und die inländische Produktionsstruktur durch die Automatisierung arbeitsärmer wird. Die gesunkene Arbeitsnachfrage mindert die inländische Wertschöpfungsintensität, während durch die Importe Einkommen ins Ausland abfließt. Die erhöhte Nachfrage nach MIV muss zudem mit Verzicht auf nicht-mobilitätsbedingten Konsum finanziert werden, was die Wertschöpfung aus diesen Sektoren dämpft.

Tabelle 46 zeigt die Veränderung von Wertschöpfung und Beschäftigung durch die Automatisierung der Fahrzeuge im Jahr 2050 (absolut und relativ) im Vergleich zur Referenz. Die Beschäftigung geht dabei stärker zurück als die Wertschöpfung, was auf einen Anstieg der Produktivität aufgrund von Effizienzgewinnen hindeutet.

³⁰ Wie bereits im Szenario „Elektrifizierung“ gehen wir davon aus, dass es im Eckszenario keine zusätzlichen ausserordentlichen Infrastrukturinvestitionen braucht und die notwendige Infrastruktur über selbstständige Investitionsprozesse zustande kommt.

Szenario Technologie – Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung

	Absolut «Technologie» 2050	Absolut «Referenz» 2050	Δ Referenz -entwicklung	CH absolut heute 2023
Reale Wertschöpfung (Mrd. CHF)	1'062	1'065	-0.3%	800
Beschäftigung (VZÄ)	4'410'000	4'460'000	-1.1%	4'300'000

Tabelle 46: Szenario Technologie - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INF-RAS)

Auf Branchenebene zeigen sich deutliche Strukturverschiebungen. Die grösste Zunahme von Wertschöpfung und Beschäftigten ist wieder in der Auto- und Energiewirtschaft zu finden. Die Effekte sind dabei um ein Vielfaches grösser als im Elektrifizierungsszenario: Im Technologieszenario steigt die Nachfrage nach MIV stark an. Entsprechend wächst die Nachfrage nach Strom, und der Umsatz der Branchen der Stromproduktion und des Stromhandels nimmt stark zu. Gleiches gilt für die Nachfrage und damit die Ausgaben der Haushalte für Anschaffung, Unterhalt und Reparatur von Fahrzeugen (fossil und elektrisch). Gleichzeitig gehen die Ausgaben für fossile Mobilität weiter zurück. Da die Fahrzeugherstellungsbranche – unabhängig vom Antrieb – eine hohe Importintensität aufweist, fliesst ein beträchtlicher Teil dieser zusätzlichen Nachfrage nach MIV ins Ausland ab.

Branchen mit der grössten Abnahme von Wertschöpfung und Beschäftigten:

- Die Nachfrage im ÖV sinkt, da der MIV aufgrund der Automatisierung im Vergleich zum ÖV attraktiver wird. Zusammen mit den Effizienzgewinnen aufgrund des wegfallenden Fahrpersonals führt das zu sinkenden Ausgaben für Bahn, Bus und Tram. Die Branchen verlieren an wirtschaftlicher Bedeutung; Wertschöpfung sowie Beschäftigung sind rückläufig. Die Taxibranche erfährt ebenfalls eine starke Reduktion der Beschäftigung und damit einhergehenden Wertschöpfung, da kein Fahrpersonal mehr nötig ist.
- Der Güterverkehr auf Strasse und Schiene erfährt durch den teilweisen Wegfall des Fahrpersonals ebenfalls eine starke Effizienzsteigerung in der Produktion. Die Kosten pro Tonnenkilometer sinken deutlich. Trotz dieser Effizienzgewinne verliert der Güterverkehr an inländischer Wertschöpfung. Die eingesparten Personalkosten führen dazu, dass die Leistungen insgesamt günstiger angeboten werden. Der damit verbundene Produktionsanstieg vermag den Rückgang jedoch nicht zu kompensieren. Die absolute Beschäftigung und Wertschöpfung reduziert sich, erhöht jedoch die Produktivität (gemessen als Wertschöpfung je Vollzeitäquivalent) deutlich.

Zusammenfassend führt die Automatisierung also zu einer starken Erhöhung der Nachfrage im MIV und einer Effizienzverbesserung im ÖV und im Güterverkehr aufgrund des stark reduzierten Personalbedarfs. Es resultiert eine geringere inländische Wertschöpfung und Beschäftigung als in der Referenzentwicklung, da wachsende,

importintensive Branchen (v.a. Fahrzeugproduktion) zulasten inländischer, personalintensiver Sektoren expandieren. Der Anstieg in der Wertschöpfung und Beschäftigung der Stromproduktion und des Stromhandels vermag diesen Effekt nicht auszugleichen.

Für die Haushalte werden Mobilitätsdienstleistungen aufgrund der Automatisierung deutlich günstiger. Sie können denselben Nutzen zu geringeren Kosten erlangen und nutzen die Einsparungen für zusätzliche Fahrten, was sich in der stark ansteigenden Fahrleistung im MIV widerspiegelt. Aufgrund der Budgetrestriktion finanzieren die Haushalte die steigenden Ausgaben für Mobilität durch geringere Ausgaben in anderen Konsumbereichen. Da automatisierte Mobilität jedoch mit tieferen Kosten, höherem Komfort und zusätzlichem Zeitnutzen einhergeht, steigt der Wert des Konsums insgesamt. Die Haushalte erhalten für dieselbe Einkommenshöhe mehr Mobilitätsnutzen, was sich wohlfahrtssteigernd auswirkt – auch wenn der Anteil inländischer Wertschöpfung sinkt.

6.2.2.4 Mobility-as-a-Service – Automatisierte, geteilte E-Mobilität

Das MaaS-Szenario baut auf dem Elektrifizierungs- und Technologieszenario auf. Im Vergleich zum Technologie-Szenario verliert der private Besitz an Relevanz; das Teilen ist akzeptiert. Fahrzeuge befinden sich nur noch zu einem kleinen Teil in Privatbesitz; Fahrten und Ressourcen werden geteilt. Nahezu alle Fahrzeuge im Güter- und Personenverkehr sind hochautomatisiert und elektrifiziert.

Abbildung 73 zeigt, wie sich die zugrundeliegenden Annahmen vom MaaS-Szenario auf die Wirtschaft und ihre Akteure auswirken.

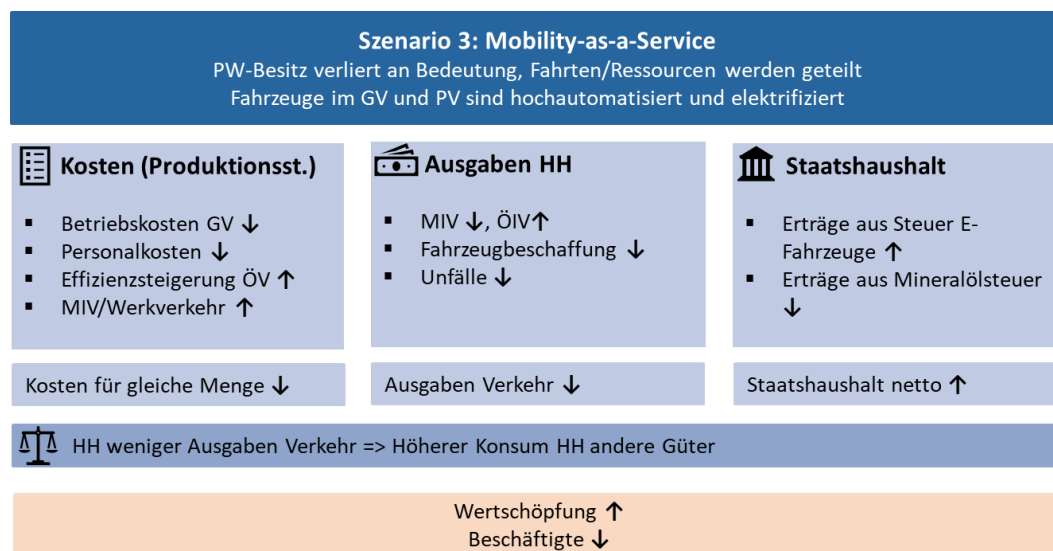


Abbildung 73: Wirkungskette für MaaS-Szenario

Die Unternehmen im Güterverkehr und im ÖV verzeichnen eine hohe Effizienzsteigerung, da sie Ressourcen teilen und Personal reduzieren können. Die Produktion der

gleichen Menge wird günstiger. Das führt dazu, dass die Preise für Mobilitätsdienstleistungen sinken und Haushalte für gleiche Leistungen weniger bezahlen müssen. Das setzt Einkommen frei, das sie für mehr Konsum anderer Güter verwenden können. Eine Wertschöpfungszunahme im Vergleich zur Referenzentwicklung ist die Folge.

Im MaaS-Szenario werden Fahrzeuge geteilt (Flottenfahrzeuge), weshalb der Fahrzeugbestand deutlich sinkt. Es findet eine Verschiebung der Nachfrage zum ÖIV statt. Zusätzlich werden durch die Automatisierung und den neuen Angeboten neue Nutzergruppen angesprochen. Wir gehen davon aus, dass der ÖIV privatwirtschaftlich angeboten wird und der Taxibranche ähnelt. Die gesteigerte Nachfrage nach Mobilität erhöht auch die Einnahmen für den Staat aus der Mineralölsteuer und einer analogen Abgabe für E-Fahrzeuge.³¹ Wie bereits im Technologieszenario sinkt die Anzahl der Unfälle und folglich die Gesundheits- und Versicherungskosten. Ausserdem erhöht die Elektrifizierung der automatisierten Fahrzeugflotte die Nachfrage nach Strom und batterieelektrischen Fahrzeugen. Die tiefere Fahrzeugnachfrage kompensiert die Mehrausgaben der erhöhten Mobilitätsnachfrage. Insgesamt liegen die Haushaltsausgaben in der Mobilität im MaaS-Szenario tiefer als im Referenzszenario.

Die Produktionsgewinne aufgrund der Automatisierung und der effizientere Einsatz von Ressourcen durch Sharing führen dazu, dass die Anzahl der Beschäftigten im Verkehr und in der Gesamtwirtschaft im MaaS-Szenario tiefer ist als in der Referenzentwicklung. Die durch tiefere Mobilitätskosten freiwerdende Nachfrage verlagert sich auf andere Konsumbereiche. Diese sind jedoch im Durchschnitt weniger arbeitsintensiv als die Verkehrsbranchen, weshalb die gesamtwirtschaftliche Beschäftigung trotz steigender Gesamtnachfrage leicht zurückgeht. Weil durch die Substitution von MIV durch ÖIV und das Sharing weniger importierte Fahrzeuge benötigt werden, steigen die Importe im Szenario im Vergleich zum Referenzszenario nur leicht an.

Die gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung liegt im MaaS-Szenario leicht über der Referenz. Die Effizienzgewinne durch Automatisierung und geteilte Nutzung senken die Kosten der Mobilitätsproduktion deutlich. Dadurch sinken die Preise für Mobilitätsdienstleistungen, was die reale Kaufkraft der Haushalte erhöht und zusätzliche Nachfrage in anderen Konsumbereichen auslöst. Trotz dieser Nachfrageverlagerung liegt die Beschäftigung um 0.7% unter dem Referenzwert. Der Rückgang der Arbeitsnachfrage in den Verkehrsbranchen wird durch den Zuwachs in konsumorientierten Dienstleistungen nicht vollständig kompensiert.

In der folgenden Tabelle 47 sind die absoluten und relativen Veränderungen im MaaS-Szenario im Jahr 2050 im Vergleich zur Referenz dargestellt.

Szenario Mobility-as-a-Service – Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung

Absolut 2050	Absolut «Referenz» 2050	Δ Referenzentwicklung	CH absolut heute 2023
--------------	-------------------------	-----------------------	-----------------------

³¹ Es sind wiederum keine ausserordentlichen Investitionen für das Eckszenario «Mobility-as-a-Service» modelliert. Diese sind als ordentliche Anpassungsprozesse der Infrastruktur implizit angenommen.

Reale Wertschöpfung (Mrd. CHF)	1'070	1'065	0.4%	800
Beschäftigung (VZÄ)	4'430'000	4'460'000	-0.7%	4'300'000

Tabelle 47: Szenario Mobility-as-a-Service - Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft im Vergleich zur Referenzentwicklung (Quelle: INFRAS)

Ein Blick auf die Branchen mit den grössten Veränderungen (positiv wie negativ) hinsichtlich der Wertschöpfung und Beschäftigung zeigt folgendes Bild. Der ÖIV und Stromsektor profitieren vom Teilen der automatisierten Fahrzeuge:

- Der ÖIV etabliert sich als wertschöpfungsrelevanter Sektor. Die Zunahme der Nachfrage und damit verbundene Produktion kompensiert die Reduktion der Arbeitskosten, weil nun kein Bedarf nach Fahrpersonal mehr vorhanden ist. Die Beschäftigung liegt aber deutlich tiefer.
- Die Nachfrage nach ÖIV führt trotz Rückgang im MIV zu einer Zunahme des Strombedarfs und damit verbunden zu einem Wachstum des Stromsektors, sowohl hinsichtlich inländischer Wertschöpfung und Beschäftigung.
- Die wegfallenden Ausgaben für die Mobilität erlauben höheren Konsum insbesondere im Dienstleistungssektor und stärkt deren Produktion.

Rückläufige Branchen sind besonders folgende:

- Der Güterverkehr erfährt durch Automatisierung (Wegfall von Personalbedarf) und die gemeinsame Nutzung von Ressourcen eine deutliche Effizienzsteigerung. Auch der öffentliche Verkehr kann seine Effizienz durch die stärkere Vernetzung von Angeboten und die Reduktion von Personalkosten erheblich verbessern. Der Güterverkehr und der öffentliche Verkehr bieten ihre Leistungen folglich zu tieferen Preisen an, was die Nachfrage nach Transportleistungen erhöht. Diese Nachfrage vermag den Rückgang der arbeitsbedingten Wertschöpfung in beiden Fällen nicht kompensieren. In der Folge sinken die inländische Wertschöpfung und Beschäftigung dieser Sektoren im Vergleich zur Referenz stark.
- Zudem führt das vermehrte Teilen von Fahrten zu einer höheren Auslastung der Fahrzeuge und damit zu einem sinkenden Fahrzeugbestand und Neuzulassungen. Dies dämpft Nachfrage nach Gütern und damit Produktion der Branchen der Fahrzeugherstellung und des Fahrzeughandels.

Zusammengefasst baut das MaaS-Szenario auf den Annahmen des Elektrifizierungs- und Technologieszenarios auf, unter Annahme einer zusätzlichen Verhaltensänderung: die geteilte Nutzung von Fahrzeugen wird gesellschaftlich relevant und ist weit verbreitet. Dadurch werden zwei zentrale Effizienzsteigerungen (Automatisierung und effizientere Nutzung der Ressourcen) kombiniert und der Nutzen der Digitalisierung ausgeschöpft. Damit können die volkswirtschaftlichen Nachteile einer starken Fahrleistungszunahme aus dem Technologieszenario vermieden werden.

Die Fahrzeugnutzung und Fahrten finden geteilt und automatisiert statt. Dies führt im Vergleich der drei Eckszenarien zur höchsten Effizienzsteigerung in der Mobilität. Es resultiert eine tiefere Beschäftigtenzahl im Vergleich zur Referenz; die Wertschöpfung ist jedoch höher. Das MaaS-Szenario ist das Szenario mit dem grössten

Wertschöpfungsgewinn relativ zur Referenzentwicklung. Es folgt ausserdem ein Wohlfahrtszuwachs, weil die Haushalte in der Schweiz wegen der günstigeren (effizienter hergestellten) Mobilität einen grösseren Warenkorb konsumieren können.

6.2.3 Fazit

Die aggregierten Ergebnisse zu realen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten der drei Eckszenarien zur dekarbonisierten und digitalisierten Mobilität und der Vergleich mit der Referenzentwicklung werden in diesem Kapitel zusammengefasst. Die Effekte je Eckszenario gelten immer für das Jahr 2050 und im Vergleich zur Referenz.

Für die drei Szenarien resultieren folgende Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigte im Vergleich zur Referenz 2050, wie Tabelle 48 zeigt.

Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Effekte (Veränderung zum Referenzszenario 2050)

	Elektrifizierung	Technologie	Mobility-as-a-Service
Wertschöpfung	↗	↘	↗
Beschäftigung	↗	↘	↘

Tabelle 48: Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse (Veränderung zum Referenzszenario 2050) (Quelle: INFRAS); ↗ leichte Zunahme; ↘ leichte Abnahme

Im Elektrifizierungsszenario elektrifiziert sich die Schweizer Mobilität. Die Autowirtschaft stellt vollständig auf batterieelektrische Fahrzeuge um, fossile Treibstoffe werden durch Strom ersetzt und der Energieverbrauch sinkt insgesamt dank höherer Effizienz der Fahrzeuge. Die Mobilitätsnachfrage bleibt weitgehend unverändert. Unternehmen profitieren von tieferen Betriebs-, Unterhalts- und Energiekosten, und Haushalte verfügen durch geringere Ausgaben für Treibstoffe und Fahrzeugunterhalt über mehr verfügbares Einkommen. Dieses setzen sie für andere Güter ein. Dadurch steigt die inländische Wertschöpfung leicht, während die Abhängigkeit von Energieimporten sinkt. Insgesamt führt die Elektrifizierung zu einer höheren Produktivität und einer leicht steigenden gesamtwirtschaftlichen Leistung, bei weniger stark zunehmender Beschäftigung.

Im Technologieszenario haben sich hochautomatisierte, elektrische Fahrzeuge im Güter- und Personenverkehr durchgesetzt. Sie fahren ohne Fahrpersonal, befinden sich aber mehrheitlich im Privatbesitz, wodurch die Mobilität weiterhin stark individualisiert bleibt. Die Automatisierung senkt die Produktionskosten, insbesondere im ÖV und im Güterverkehr, da Personalkosten stark zurückgehen. Trotzdem verlieren die Verkehrsbranchen an inländischer Wertschöpfung, da die eingesparten Arbeitsleistungen die Kostensenkung überkompensieren und die arbeitsintensiven Faktoren in geringerem Umfang in die Bruttowertschöpfung einfließen. Die stark steigende Fahrleistung führt zu einem deutlichen Anstieg des Strombedarfs und zu einem Wachstum der Stromproduktion und des Stromhandels. Für die Haushalte wird Mobilität günstiger und komfortabler; neue Nutzergruppen gewinnen Zugang, und Fahrzeiten können produktiv genutzt werden. Die Wohlfahrt steigt entsprechend, während die inländische Wertschöpfung aufgrund höherer Fahrzeugimporte leicht unter der Referenz

liegt. Insgesamt resultiert eine höhere Produktivität bei leicht sinkender Beschäftigung und geringerer inländischer Wertschöpfung.

Im MaaS-Szenario werden Elektrifizierung und Automatisierung durch eine umfassende geteilte Nutzung ergänzt. Fahrzeuge befinden sich nur noch zu geringen Teilen in Privatbesitz und werden über digitale Plattformen gemeinsam genutzt. Dadurch sinkt der Fahrzeugbestand deutlich, während die Fahrleistung zunimmt und der Strombedarf – trotz höherer Effizienz pro Fahrzeug – weiter ansteigt. Die Verkehrsbranchen (ÖV, Güterverkehr, Fahrzeugproduktion und -handel) profitieren zwar von starken Effizienzgewinnen, verlieren jedoch an inländischer Wertschöpfung und Beschäftigung, da weniger Fahrzeuge und Arbeitskräfte benötigt werden. Stromwirtschaft und digitale Dienstleistungen gewinnen an Bedeutung.

Für die Haushalte sinken die Mobilitätsausgaben spürbar. Das dadurch grössere verfügbare Einkommen wird für andere Konsumbereiche eingesetzt, was die inländische Produktion ausserhalb des Verkehrssektors stärkt. Die reale Kaufkraft und die Wohlfahrt steigen entsprechend. Insgesamt führt das MaaS-Szenario zu den höchsten Effizienz- und Produktivitätsgewinnen aller Szenarien – bei rückläufiger Beschäftigung im Verkehrssektor, leicht steigender Gesamtwertschöpfung und höherem gesamtwirtschaftlichem Wohlstand.

Tabelle 49 und Tabelle 50 zeigen die Veränderung der Wertschöpfung und der Beschäftigung verkehrsnaher Branchen im Jahr 2050 für die drei Eckszenarien. In beiden Fällen beziehen sich die Grössen jeweils auf die inländische Wertschöpfung bzw. Beschäftigung. Es gilt zu betonen, dass es sich bei den Modellierungen um *Was-wäre-wenn*-Analysen handelt, welche die Wirkungen der drei Eckszenarien jeweils relativ zu einer hypothetischen Referenzentwicklung im Jahr 2050 abschätzen. Die absoluten Werte in der Referenzspalte dienen ausschliesslich der Illustration der relativen Grössenordnungen der einzelnen Branchen und sind nicht als absolute Prognosen zu interpretieren. Der Fokus liegt auf den Vorzeichen und relativen Veränderungen der einzelnen Branchen für die drei Szenarien.

Veränderung der Wertschöpfung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zum Referenzszenario

Branchen	NOGA	Absolute nominale Werte in Mio. CHF; Referenz 2050	Elektrifizierung	Technologie	Mobility-as-a-Service
öffentlicher Verkehr (Strasse + Schiene)	49ad	6'870	0.9% ↗	-15.9% ↓	-19.0% ↓
Güterverkehr Schiene	49b	600	0.6% ↗	-79.0% ↓	-79.6% ↓
Güterverkehr Strasse	49f	5'150	-2.4% ↘	-35.1% ↓	-52.5% ↓
Taxi / öffentlicher Individualverkehr (für Szenario 1 und 2 noch reine Taxi-Branche)	49e	1'320	0.3% ↗	-51.1% ↓	47.35% ↑
Mineralölbranche	19	200	-44.8% ↓	-44.6% ↓	-26.7% ↓
Stromhandel	35j	4'140	7.5% ↗	26.9% ↑	11.2% ↑
Fahrzeugherstellung fossile Antriebe	29a	8	-100.0% ↓	-100.0% ↓	-100.0% ↓
Fahrzeugherstellung elektrische Antriebe	29b	650	0.4% ↗	20.3% ↑	-12.4% ↓
Verkauf und Reparatur (fossiler Antrieb)	45a	2'800	-12.7% ↓	-0.7% ↘	-17.6% ↓
Verkauf und Reparatur (elektrischer Antrieb)	45b	8'330	0.7% ↗	11.6% ↑	-9.7% ↘
Verkauf und Reparatur (ÖV & GV)	33	2'570	0.7% ↗	-5.6% ↘	-7.4% ↘
Versicherung	65	75'280	-0.0% ↘	0.6% ↗	0.0% ↗
Gesundheitswesen	86	71'270	0.0% ↗	0.0% ↗	-0.3% ↘
Total			0.3%	-0.3%	0.4%

Tabelle 49: Veränderung der Wertschöpfung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zum Referenzszenario (Quelle: INFRAS);
 ↑ Starke Zunahme; ↓ Starke Abnahme; ↗ leichte Zunahme; ↘ leichte Abnahme

Veränderung der Beschäftigung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zum Referenzszenario

Branchen		NOGA Absolute Beschäftigung (VZÄ); Referenz 2050	Szenario 1 – Elektrifizie- rung	Szenario 2 – Technologie	Szenario 3 – Mobility-as-a- Service
öffentlicher Verkehr (Strasse + Schiene)	49ad	45'150	0.7% ↗	-21.5% ↓	-24.1% ↓
Güterverkehr Schiene	49b	3'500	0.3% ↗	-75.6% ↓	-75.8% ↓
Güterverkehr Strasse	49f	37'710	-2.5% ↘	-48.2% ↓	-71.7% ↓
Taxi / öffentlicher Individualverkehr (für Szenario 1 und 2 noch reine Taxi- Branche)	49e	9'030	0.1% ↗	-74.3% ↓	-49.1% ↓
Mineralölbranche	19	410	-45.4% ↓	-47.6% ↓	-30.1% ↓
Stromhandel	35j	12'690	7.4% ↗	26.7% ↑	11.0% ↑
Fahrzeugherstellung fossile Antriebe	29a	34	-100.0% ↓	-100.0% ↓	-100.0% ↓
Fahrzeugherstellung elektrische Antriebe	29b	3'570	7.4% ↗	20.3% ↑	-12.5% ↓
Verkauf und Repa- ratur (fossiler An- trieb)	45a	22'190	-12.7% ↓	-0.7% ↘	-17.6% ↓
Verkauf und Repa- ratur (elektrischer Antrieb)	45b	65'940	0.7% ↗	11.7% ↑	-9.8% ↘
Verkauf und Repa- ratur (ÖV & GV)	33	2'570	0.5% ↗	-8.4% ↘	-9.7% ↘
Versicherung	65	75'280	-0.1% ↘	0.2% ↗	-0.3% ↘
Gesundheitswesen	86	71'270	0.0% ↗	-0.1% ↘	-0.3% ↘
Total			0.1%	-1.1%	-0.7%

Tabelle 50: Veränderung der Beschäftigung verkehrsnaher Branchen 2050 im Vergleich zur Referenzszenario (Quelle: INFRAS); 1 Starke Zunahme; ↓ Starke Abnahme; ↗ leichte Zunahme; ↘ leichte Abnahme

Folgende Effekte sind auf Ebene der verkehrsnahen Branchen zu beobachten:

- Der **öffentliche Verkehr** verliert in den Technologie- und MaaS-Szenarien an gesamtwirtschaftlicher Bedeutung. Zwar steigen Produktivität und Effizienz infolge des Wegfalls von Fahrpersonal, dennoch sinken die Wertschöpfung und Beschäftigung deutlich. Der Effekt der Elektrifizierung ist dagegen leicht positiv aufgrund tieferer Betrieb- und Energiekosten im Vergleich zu fossilen Antrieben.
- In allen Szenarien nimmt die inländische Wertschöpfung im **Strassengüterverkehr** ab, insbesondere wenn automatisierte Fahrzeuge Standard sind. Weil der Bedarf für Fahrpersonal wegfällt, sinkt auch die Beschäftigung substanziell. Im **Schienengüterverkehr** sind ähnliche Effekte zu verzeichnen, wenn auch weniger akzentuiert.
- Im Technologieszenario verliert die klassische **Taxibranche** markant an Bedeutung, da kein Personal mehr benötigt wird. Im MaaS-Szenario entsteht der **ÖIV** hingegen als neue, digital organisierte Verkehrsform mit stark wachsender Wertschöpfung, da geteilte automatisierte Fahrzeuge den MIV ersetzen und neue Nutzergruppen anziehen.
- Die **Mineralölbranche** verliert in allen Szenarien weiter an Bedeutung, weil fossile Treibstoffe weitgehend durch Strom ersetzt werden. Aufgrund des bereits tiefen Niveaus in der Referenz ist der Effekt auf die Gesamtwirtschaft marginal. Es gilt jedoch zu beachten, dass auch die Importe nach Mineralöl stark zurückgehen, mit entsprechend positiven Effekten für die Gesamtwirtschaft und die Energieunabhängigkeit.
- Die **Stromwirtschaft** profitiert in sämtlichen Szenarien von der Elektrifizierung des Verkehrs. Der Stromabsatz und die damit verbundene Wertschöpfung nehmen zu – am stärksten im Technologieszenario, in dem die Fahrleistung stark steigt. Im MaaS-Szenario wird der Mehrbedarf durch effizientere Fahrzeugnutzung leicht gedämpft.
- Die **Produktion fossiler Fahrzeuge** entfällt vollständig, wobei die Branche bereits in der Referenz eine kleine Rolle spielte. Wie beim Mineralöl ist der analoge Wegfall der Importe gesamtwirtschaftlich relevanter. Die **Herstellung elektrischer Fahrzeuge** nimmt im Technologieszenario deutlich zu, da die Nachfrage nach automatisierten Fahrzeugen steigt. Im MaaS-Szenario sinkt die Wertschöpfung dagegen, weil durch geteilte Nutzung weniger Fahrzeuge benötigt werden.
- In der **fossilbasierten Reparatur- und Handelsbranche** gehen Umsatz und Beschäftigung in allen Szenarien zurück. Bei elektrischen Fahrzeugen steigen Verkauf und Reparatur zunächst leicht (Elektrifizierung) bzw. deutlich (Technologie), sinken aber im MaaS-Szenario deutlich, da der Fahrzeugbestand stark abnimmt.
- Die Wartungs- und Reparaturleistungen im **öffentlichen Verkehr und im Güterverkehr** nehmen in den Technologie- und MaaS-Szenarien ab. Automatisierte Fahrzeuge sind effizienter und benötigen weniger Unterhalt; durch das Teilen von Ressourcen fällt die Gesamtzahl der Fahrzeuge dann tiefer aus.
- Die **Versicherungswirtschaft** zeigt nur geringe Veränderungen. Im Technologieszenario führt die höhere Fahrleistung zu leicht steigender Wertschöpfung, während sie im MaaS-Szenario wegen tieferer Unfallraten und geringerer Schadensvolumen tendenziell stagniert.

- Das **Gesundheitswesen** bleibt in allen Szenarien nahezu unverändert. Zwar sinken die Unfallzahlen und damit verbundene Heilungskosten stark, doch sind die gesamtwirtschaftlichen Effekte gemessen am Umfang der Gesundheitsleistungen gering.

7 Synthese und Handlungsansätze

Kapitel 7 fasst die zentralen Ergebnisse der verkehrlichen und ökonomischen Wirkungsanalysen zusammen und zeigt, welche Chancen und Risiken mit den unterschiedlichen Szenarien verbunden sind und welche Handlungsansätze sich daraus für verschiedene Akteure ergeben. Ziel ist es, die Massnahmen zu identifizieren, die verfolgt werden müssten, wenn ein Trend bzw. ein Szenario gefördert werden soll. Es ist weiterhin zu beachten, dass die quantifizierten Aussagen zur Zukunft auf verschiedenen Annahmen basieren und nicht als Prognosen zu interpretieren sind. Zudem steht der Vergleich der Veränderungen in den Analyseszenarien ggü. dem Referenzszenario im Vordergrund und keine absoluten Entwicklungen.

7.1 Elektrifizierungsszenario

Verkehrliche und volkswirtschaftliche Wirkungen

Im Elektrifizierungsszenario sind die verkehrlichen Effekte im Vergleich zum Referenzszenario minim. Zu beachten ist, dass im Referenzszenario bereits eine Elektrifizierung bis 2050 stattfindet. Die mikroökonomische Analyse zeigt einen jährlichen Zusatznutzen von rund 1.9 Mrd. Franken, während sich makroökonomisch die Wertschöpfung um 2.8 Mrd. Franken (+0.3%) und die Beschäftigung um rund 8'400 Personen (+0.2%) erhöhen. Damit ist die Elektrifizierung aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll, auch wenn der mikroökonomische Zusatznutzen im Vergleich zu den anderen beiden Analyseszenarien moderat ausfällt.

Chancen/Risiken und Handlungsansätze

Das Szenario ist mit Chancen und Risiken aus Sicht der Haushalte, der Wirtschaft und insbesondere den Transportunternehmen sowie der öffentlichen Hand verbunden. **Tabelle 51** stellt diese gegenüber.

Chancen und Risiken des Elektrifizierungsszenarios nach Akteursgruppen

	Chancen	Risiken
Haushalte	- Geringere Betriebskosten (Energie, Wartung) - Bessere Luftqualität und Gesundheitsnutzen	Höhere Anschaffungskosten für Fahrzeuge und/oder Ladeinfrastruktur
Unternehmen/ Wirtschaft	- Aufbau neuer Wertschöpfungsketten (z. B. Batterieproduktion, Ladeinfrastruktur) - Ausbau der Stromwirtschaft - Kostensenkungspotenziale im Betrieb von Flottenfahrzeugen	- Umstellung bestehender Geschäftsmodelle verlangt Anpassung; Risiko, dass Unternehmen ohne klare Strategie zurückfallen - Hohe Investitionen für Transformation nötig

	Chancen	Risiken
Transportunternehmen	• Kostensenkungspotenziale v.a. bei den Betriebskosten	• Hohe Investitionskosten in Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur
Staat/Gesellschaft	• Reduktion Gesundheitskosten aufgrund geringere Luftschadstoffemission Gesundheitseffekte	• Finanzierungslücke bei Infrastruktur- oder Stromnetzausbau aufgrund des Rückgangs der Einnahmen aus der Mineralölsteuer, wenn keine Abgabe E-Fahrzeuge eingeführt wird

Tabelle 51: Chancen und Risiken des Elektrifizierungsszenarios nach Akteursgruppen

Im **Elektrifizierungsszenario** zeigt sich, dass die wichtigsten Wirkungen nicht allein technologischer Natur sind, sondern insbesondere von der Abstimmung zwischen Energie- und Verkehrspolitik abhängen. Eine frühzeitige, gesamthaft abgestimmte Planung der Ladeinfrastruktur (Ausbau Stromnetz, öffentliche Ladeinfrastruktur, Flächensicherung für ebendiese) ist Voraussetzung für die Elektrifizierung. Die Elektrifizierung führt zu einem Wegfall der Einnahmen aus der Mineralölsteuer, weswegen diese sinkenden Einnahmen kompensiert werden müssen, um die Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur aufrechtzuerhalten. Die Einführung einer Abgabe auf E-Fahrzeuge hat – neben anderen Faktoren – wiederum Einfluss auf die Geschwindigkeit der Elektrifizierung. Für die Industrie kann der Technologiewandel Chance und Risiko zugleich sein: Wenn Qualifizierungs- und Umschulungsprogramme für betroffene Berufsbilder systematisch umgesetzt werden, dann lassen sich die notwendigen Anpassungen in Produktion, Wartung und Netzbetrieb sozialverträglich gestalten; bleiben diese Programme aus, droht Arbeitslosigkeit und es können Engpässe bei Fachkräften und Verzögerungen im Hochlauf der Elektromobilität entstehen.

Um die Chancen der Elektrifizierung nutzen zu können, sollten geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Der Ausbildung und Information kommen dabei eine wichtige Rolle zu. In einem ersten Schritt wären die folgenden potenziellen Massnahmen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und Wirksamkeit in diesem Kontext zu prüfen:

- Regulatorische und ordnungspolitische Massnahmen:
 - Verankerung eines Rechts auf Laden in Mehrfamilienhäuser (MFH)
- Finanzielle Massnahmen
 - Einführung einer Abgabe auf E-Fahrzeuge, um die wegfallenden Einnahmen aus der Mineralölsteuer zu kompensieren
 - Förderung von Ladeinfrastruktur in MFH (einschliesslich Stromanschluss), da viele Parkplätze in MFH aktuell über keine Ladestation verfügen
 - Prüfung einer Weiterführung der Förderprogramme der Gemeinden, Kantone und des Bundes (u.a. Branchenprogramm ASTAG) zur Anschaffung von Elektrofahrzeugen und/oder Ladeinfrastruktur
 - (Mit-)Finanzierung der Anschaffung elektrifizierter Fahrzeuge bei den Transportunternehmen im ÖV durch die Besteller
- Ausbildung und Information
 - Anpassung der Ausbildungen von Hochschulen (z.B. EPFL und ETHZ) an die neuen Anforderungen am Arbeitsmarkt

- Kooperation mit Berufsbildung (Lehre, Weiterbildung) zur Definition neuer Ausbildungsgänge rund um Elektromobilität (Ladetechnologie, Netzmanagement etc.)
- Auf- und Ausbau spezifischer Umschulungsprogramme für Elektro-Technik (Mechanik, Hochvolttechnik, Netztechnik)
- Weiterführung der Unterstützung mit Informationen rund um das E-Fahrzeug, um insbesondere die Flottenumstellung zu unterstützen (z.B. LadenPunkt von Bundesamt für Energie / EnergieSchweiz)

7.2 Technologieszenario

Verkehrliche und volkswirtschaftliche Wirkungen

Mit der Automatisierung im Technologieszenario steigen im Personenverkehr Aufkommen und Verkehrsleistung im MIV. Weglänge und Fahrzeugstunden nehmen im Personenverkehr zu; die Geschwindigkeitszunahme kann dies nicht kompensieren. Im Güterverkehr steigen Verkehrs- und Fahrleistung. Die Fahrzeugstunden reduzieren sich aufgrund der Veränderung der Fahrleistung und erhöhter Geschwindigkeit.

Das Szenario weist einen hohen mikroökonomischen Zusatznutzen von rund 28.7 Mrd. Franken pro Jahr auf. Die Zusatznutzen entstehen v.a. aus Zeitkostengewinnen, Effizienzsteigerungen und Komforteffekte. Gleichzeitig zeigen sich auf makroökonomischer Ebene gegenläufige Effekte: Die Wertschöpfung sinkt um 3.5 Mrd. Franken (-0.3%) und die Beschäftigung reduziert sich um rund 49'500 Beschäftigte (-1.1%). Ursache ist der Strukturwandel im Arbeitsmarkt aufgrund der Automatisierung.

Chancen/Risiken und Handlungsansätze

Das Szenario ist mit Chancen und Risiken aus Sicht der Haushalte, der Wirtschaft und insbesondere den Transportunternehmen sowie der öffentlichen Hand verbunden. Tabelle 52 stellt diese gegenüber. Die Chancen und Risiken der Elektrifizierung sind nicht nochmals aufgeführt (vgl. hierzu **Tabelle 51**).

Chancen und Risiken des Technologieszenarios nach Akteursgruppen

	Chancen	Risiken
Haushalte	• Zugang neuer Nutzergruppen zum MIV • Zeitkostengewinn durch automatisiertes Fahren • Höhere Sicherheit, weniger Unfälle und damit niedrigere Versicherungsprämien • Komfortgewinne • Positive Erreichbarkeitseffekte, v.a. in intermediären Räumen	• Höhere Kosten im MIV • Datenschutz- und Haftungsunsicherheit • Gefahr von Mehrverkehr (Rebound) durch günstigere oder bequemere Mobilität • Sinkender Gesundheitsnutzen aufgrund der Abnahme des Fuss- und Veloverkehrs • Geringere Auslastung im ÖV kann v.a. in ländlichen Regionen zu einer Reduzierung des Angebots führen. • Beschäftigungsverluste (z. B. Fahrpersonal im ÖV und GV, Taxibranche)

	Chancen	Risiken
Unternehmen/ Wirtschaft	• Neue Märkte für Sensorik/Software und die Herstellung von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb sowie Ladeinfrastruktur • Wertschöpfungspotenziale im Stromhandel • Potenziale für den Innovationsstandort Schweiz in neuen Technologien für Automatisierung	• Unsicherheit und Adaption beim Datenschutz/Cyber Security
Transportunternehmen	• Effizienzsteigerung (z. B. automatisierte Flotten, geringere Personalkosten) • Neue Geschäftsmodelle • Kapazitätsgewinn im Strassen- und Schienennetz	• Wertschöpfungsrückgang v.a. im Güterverkehr (Strasse und Schiene) und im Taxigewerbe
Staat/Gesellschaft	• Höhere Sicherheit, weniger Unfälle und damit Unfallkosten	• Regulatorische Herausforderungen in Bezug auf automatisierte Fahrzeuge (Zulassung, Haftung, Daten) • Risiko einer Importabhängigkeit (Fahrzeuge, Technologien) • Zielkonflikt mit ressourcenschonender Mobilität

Tabelle 52: Chancen und Risiken des Technologieszenarios nach Akteursgruppen

Die Automatisierung des Verkehrs im **Technologieszenario** erfordert rechtliche Rahmenbedingungen für Zulassung, Haftung und Datennutzung, die über den bisherigen Rechtsrahmen für Zulassungen bis Level 3 und für Pilotanwendungen hinaus gelten. Diese stellen sicher, dass die Effizienz- und Sicherheitspotenziale automatisierter Systeme realisiert werden können. Ohne klare regulatorische Vorgaben besteht dagegen das Risiko von Insellösungen, Rechtsunsicherheit und Vertrauensverlust in der Bevölkerung. Zudem sollte die MIV-Nachfrage, die aufgrund der Automatisierung steigt, gelenkt werden. Parallel dazu ist die Qualifizierung von Personal in den Bereichen Software, Datenanalyse und Systemintegration keine Nebensache: Wenn Aus- und Weiterbildungsstrukturen die neuen Qualifikationsanforderungen adressieren, dann besteht die Chance, dass Beschäftigte aus traditionellen Tätigkeitsfeldern für neue Profile geschult werden; andernfalls werden von strukturellen Beschäftigungsproblemen und regionale Anpassungsschwierigkeiten bestehen.

Um die Chancen der Automatisierung optimal nutzen zu können, sollten – zusätzlich zu den in Kap. 7.1 genannten Aspekten – geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. In einem ersten Schritt wären die folgenden potenziellen Massnahmen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und Wirksamkeit in diesem Kontext zu prüfen:

- Regulatorische und ordnungspolitische Massnahmen
 - Weiterentwicklung des Rechtsrahmens für die Zulassung von automatisierten Fahrzeugen für gewerbliche Zwecke.
 - Datenschutz- und Sicherheitsvorgaben für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2X) sowie digitale Infrastruktur
 - Aufbau weiterer Test- und Pilotregionen, insbesondere für vollständig automatisierte Fahrzeuge (ohne Begleitperson) auf definierten Routen, unter Einbindung der Kantone

- Governance-Strukturen für Datenplattformen etablieren, die Verkehrsdaten zwischen Fahrzeugherstellern, ÖV-Unternehmen und Behörden strukturieren, um Verkehrsplanung und -steuerung datenbasiert effizienter zu machen.
- Lenkung der MIV-Nachfrage, um die höhere Nachfrage bewältigen zu können.
- Finanzielle Massnahmen
 - Innovationsförderung für Unternehmen, die automatisierte Fahrsysteme und Sicherheitslösungen entwickeln (z. B. Sensorik, KI, Kontrollzentren).
- Ausbildung und Information
 - Förderung der Weiterbildung oder Umschulung für bestehendes Fahrpersonal, Disponent/-innen und Technik/-innen, damit sie auf automatisierte Systeme umsteigen oder sich in andere Berufe einarbeiten können.
 - Hochschulen (v.a. jene mit technischem Fokus, i.e. EPFL und ETHZ) könnten ihre Curricula auf die neuen Anforderungen am Arbeitsmarkt anpassen (bspw. zu Automatisierung in der Mobilität oder Cyber Security in Transportsystemen). Ebenso könnten Kooperationen zwischen ETHZ/EPFL und Fahrzeugherstellern/Softwarefirmen systematisch gestärkt werden.
 - Qualifizierungsprogramme für neue Berufsbilder wie Remote-Operator/-innen oder Flottenmanager/-in für automatisierte Mobilitätsdienste.

7.3 MaaS-Szenario

Verkehrliche und volkswirtschaftliche Wirkungen

Im MaaS-Szenario ist die Mobilität automatisiert, elektrifiziert und Fahrzeuge sowie Fahrten werden zu einem hohen Anteil geteilt. Im Personenverkehr steigen Verkehrsaufkommen und -leistung. Es findet eine Verlagerung vom MIV und ÖV auf den ÖIV statt. Im Güterverkehr steigt die Verkehrsleistung, die Fahrleistung nimmt bei SNF ab, bei LNF steigt sie. Die Fahrzeugstunden nehmen zu, v.a. bei SNF.

Das Szenario weist mit Abstand den höchsten mikroökonomischen Zusatznutzen von **rund 45.4 Mrd. Franken pro Jahr** auf. Die makroökonomischen Wirkungen sind gemischt: Die **Wertschöpfung steigt um 4.1 Mrd. Franken (+0.4%)**, während die **Beschäftigung um 28'600 Personen (-0.6%)** zurückgeht. Der hohe gesamtwirtschaftliche Nutzen resultiert insbesondere aus Effizienzgewinnen aufgrund des Teilens von Ressourcen und sinkenden Kosten für Nutzer/-innen.

Chancen/Risiken und Handlungsansätze

Das Szenario ist mit Chancen und Risiken aus Sicht der Haushalte, der Wirtschaft und insbesondere den Transportunternehmen sowie der öffentlichen Hand verbunden. Tabelle 53 stellt diese gegenüber. Die Chancen und Risiken der Elektrifizierung sind nicht nochmals aufgeführt (vgl. hierzu **Tabelle 51**).

Chancen und Risiken des MaaS-Szenarios nach Akteursgruppen

	Chancen	Risiken
Haushalte	• Zusatznutzen durch geringere Mobilitätskosten aufgrund des Sharings • Zeitkostengewinne aufgrund der Automatisierung • Verbesselter Zugang zur Mobilität • Bessere Erreichbarkeit, v.a. in intermediären Räumen	• Digitale Exklusion möglich (wenn Plattformen/Apps zentral) • Abhängigkeit von Mobilitätsdienstleistern • Unsicherheit bezüglich Datenschutz • Geringere Gesundheitsnutzen durch Rückgang von Fuss- und Veloverkehr
Unternehmen/Wirtschaft	• Aufbau neuer, plattformbasierter Geschäftsmodelle • Sektorkopplung/Kooperationen zwischen Verkehr, Energie und IT • Wertschöpfungspotenziale v.a. für ÖIV und Stromhandel	• Negative Wertschöpfungseffekte v.a. im Fahrzeugbau (elektr. Antriebe) • Beschäftigungsverluste (z. B. Fahrpersonal im ÖV, der Taxibranche und dem GV)
Transportunternehmen	• Aufbau neuer, plattformbasierter Geschäftsmodelle und Einbindung in den ÖV bzw. Vernetzung mit dem ÖV • Effizienzgewinne und somit tiefere Kosten durch Kooperation und Teilen von Ressourcen (v.a. im GV)	• Keine Integration des ÖIV mit dem klassischen ÖV • Umstellung bestehender Geschäftsmodelle
Staat/Gesellschaft	• Bessere Auslastung von Fahrzeugen • Flächenpotenziale durch weniger Fahrzeuge (v.a. für den ruhenden Verkehr und in städtischen Gebieten) • Ausgleich regionaler Disparitäten (städtisch vs. ländlich)	• Anforderungen an Daten-Governance und Plattformregulierung • Sicherstellung sozialer Teilhabe

Tabelle 53: Chancen und Risiken des MaaS-Szenarios nach Akteursgruppen

Im **MaaS-Szenario** ist entscheidend, dass organisatorische und datenpolitische Rahmenbedingungen den Erfolg geteilter, automatisierter Mobilität unterstützen. Wenn Datenstandards, interoperable Schnittstellen und klare Governance-Regeln geschaffen werden, dann werden Plattformangebote integrierbar und wettbewerbsfähig, und die erwarteten volkswirtschaftlichen Zusatznutzen können erzielt werden. Komplementär gilt: Wenn Anreize für geteilte Mobilität (beispielsweise bevorzugte Flächennutzung, flexible Tarifmodelle) gesetzt sowie Datenschutz und Transparenz gewährleistet sind, dann steigt die Akzeptanz in der Bevölkerung und die Nutzungsbereitschaft von automatisierten Fahrzeugen.

Um die Chancen der automatisierten, geteilten Mobilität bestmöglich nutzen zu können, sollten – zusätzlich zu den in Kap. 7.1 und 7.2 genannten Aspekten – geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. In einem ersten Schritt wären die folgenden potenziellen Massnahmen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und Wirksamkeit in diesem Kontext zu prüfen:

- Regulatorische und ordnungspolitische Massnahmen

- Überprüfung des Konzessionsrechts und der Integration von ÖIV-Angeboten in den ÖV (inkl. Tarifierung)
- Einführung verbindlicher Regularien für Transparenz und Wettbewerb von Mobilitätsplattformen (z. B. Offenlegung von Algorithmen, faire Tarife, Transparenz der Preispolitik).
- Mobilitätsdateninfrastruktur fördern, um die Entwicklung eines Mobilitäts-Ökosystems zu fördern.
- Mobilitäts-Hubs in Städten und Regionen fördern (z. B. Kombination von ÖV, Car-Sharing, Ladestationen).
- Finanzielle Massnahmen
 - Fördermittel oder Anreize für MaaS-Transportangebote, insbesondere in ländlichen Räumen, um die Marktentwicklung zu beschleunigen.
- Ausbildung und Information
 - Hochschulen (v.a. jene mit technischem Fokus, i.e. EPFL und ETHZ) könnten ihre Curricula auf die neuen Anforderungen am Arbeitsmarkt anpassen (bspw. zu Plattformökonomien im Verkehr oder Mobility Data Management). Ebenso könnten Fachhochschulen praxisorientierte Programme in den Bereichen Flottensteuerung automatisierter, geteilter Fahrzeuge oder Multimodale Betriebsplanung entwickeln.

7.4 Fazit

Die Studie bestätigt die Ergebnisse bisheriger Forschung zur Digitalisierung und Dekarbonisierung in der Mobilität. Sie erweitert den bestehenden Wissensstand um eine systematische volkswirtschaftliche Betrachtung und Abschätzung der Kosten- und Nutzeneffekte sowie der Wertschöpfungs- und Beschäftigungswirkungen. Dabei wird auch deutlich, dass technologische und organisatorische Innovationen mikro- und makroökonomische Wirkungen entfalten, die weit über den Verkehrssektor hinausreichen.

Alle drei Analyseszenarien zeigen einen mikroökonomischen Zusatznutzen (Abbildung 74). Im Elektrifizierungsszenario ist dieser am kleinsten, im MaaS-Szenario mit einem Zusatznutzen von mehr als 45 Mrd. CHF am grössten. Die makroökonomischen Effekte (Wertschöpfung, Beschäftigung) steigen im Elektrifizierungsszenario an. Das Technologieszenario ist aufgrund sinkender Wertschöpfung und Beschäftigung makroökonomisch nachteilig. Im MaaS-Szenario steigt die Wertschöpfung stärker als im Elektrifizierungsszenario, gleichzeitig ist aber mit negativen Beschäftigungseffekten zu rechnen. Aus mikroökonomischer Sicht und vor dem Hintergrund der Wertschöpfungseffekte ist das MaaS-Szenario insgesamt am vorteilhaftesten. Gleichzeitig geht dies auch mit den grössten Beschäftigungswirkungen einher, die es aufzufangen gilt.

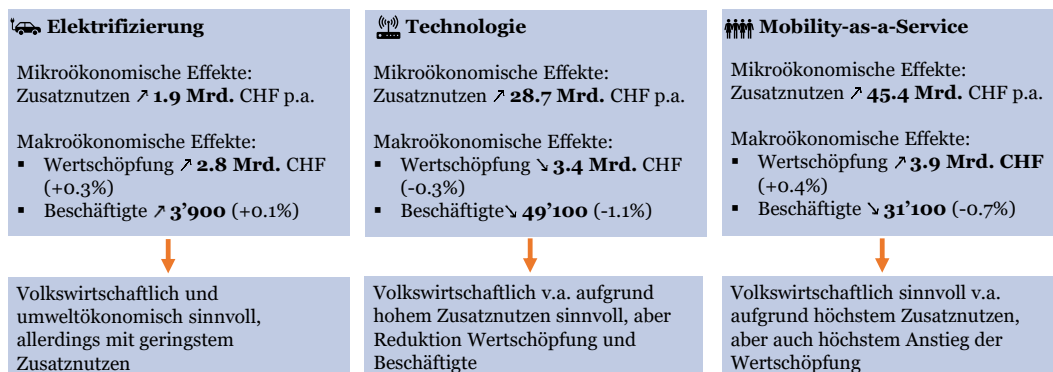


Abbildung 74: Ökonomische Wirkungen im Vergleich zur Referenz

Die ökonomischen Wirkungen der Digitalisierung und Dekarbonisierung können erreicht werden, wenn technologische Innovationen und Verhaltensänderungen mit gezielten regulatorischen, ordnungsrechtlichen, finanziellen und beschäftigungsbezogenen Massnahmen gefördert werden. Aus den jeweiligen Handlungsansätzen lassen sich verschiedene Handlungsprioritäten ableiten. Am wichtigsten – auch im Hinblick auf das volkswirtschaftlich beste Szenario – ist die Umschulung von Personal, welches aufgrund der Automatisierung traditionelle Arbeitsplätze bspw. als Chauffeure verlieren. Diese sind für neue Berufe wie z.B. Operatoren zu qualifizieren. Gleichzeitig ist die Ausbildung auf die neuen Anforderungen und v.a. technologischen Entwicklungen auszurichten. Diese Chancen der Transformation sind zu nutzen und gut zu begleiten.

7.5 Weiterer Forschungsbedarf

Die Wirkungsanalyse konzentriert sich auf «Was-wäre-wenn»-Szenarien. Es werden verschiedene Annahmen getroffen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. In einem nächsten Schritt sind empirische Analysen von Pilotprojekten v.a. im automatisierten Fahren und der Akzeptanz von geteilten Fahrzeugen im ÖIV (z.B. Ride-Pooling) erforderlich. Dies wird im Rahmen von aktuellen Ausschreibungen von Forschungsprojekten angegangen.

Weiterhin sind gesellschaftliche und arbeitsmarktbezogene Auswirkungen weiter zu erforschen. Die Studie zeigt relevante Beschäftigungseffekte, doch es fehlen belastbare Erkenntnisse zu regionalen Auswirkungen, zu Qualifikationsbedarfen und zu Übergangsprozessen in betroffenen Branchen. Forschungsbedarf besteht auch zu sozialen Aspekten wie digitaler Teilhabe, Zugangsgerechtigkeit und Verteilungswirkungen.

Glossar

Begriff	Beschreibung/Definition	Quelle(n)
Automatisierung	Automatisierung bedeutet, dass bestimmte Abläufe oder Tätigkeiten automatisiert mit Hilfe von neuen digitalen Technologien ablaufen. Automatisierung ermöglicht den selbständigen Betrieb von Maschinen. In Bezug auf die Mobilität spielt das automatisierte Fahren eine zentrale Rolle.	angelehnt an Eco-plan (2018)
Car-Pooling	Car-Pooling wird teilweise synonym sowohl für → Ride-Pooling als auch → Ride-Sharing verwendet, im Folgenden wird Ride-Pooling als Ride-Sharing verstanden	Mogge 2018, BMW 2019
Car-Sharing	Organisierte gemeinschaftliche Nutzung eines Fahrzeugs. Die Nutzung des Fahrzeugs findet nacheinander (sequenziell) statt. Das Angebot kann stationsgebunden (fixer Start- und Zielort) oder Free Floating (Start- und Zielort nach Bedarf) organisiert sein. Das Angebot auf kommerzieller oder privater Basis stattfinden.	BMW 2019
Digitalisierung	Ganzer oder teilweiser Ersatz der analogen Leistungserbringung durch Leistungserbringung in einem digitalen, computerhandhabbaren Modell.	Wolf und Strohschen 2018
Intermodalität	Das Verwenden von verschiedenen Verkehrsmodi während einer Reise von A nach B (sogenannte intermodale Mobilitätskette); Form der → Multimodalität.	UVEK 2018
Mobility as a Service (MaaS)	Ganzheitliche Mobilitätslösungen, in denen physische Verkehrsangebote in Verbindung mit digitalen Angeboten ein hochwertiges, nahtloses und über eine einheitliche Kundenschnittstelle zugängliches Mobilitätsangebot schaffen, so dass multimodale Reisen auch ohne eigenes Fahrzeug geplant und durchgeführt werden können.	UVEK 2018, ITS 2018
Multimodalität	Die Nutzung von verschiedenen Verkehrsmitteln innerhalb eines bestimmten Zeitraums, z.B. innerhalb eines Tages oder einer Reise. Diese Definition weicht ab von der gängigen Definition, wonach innerhalb eines Zeitraums verschiedene Verkehrsmodi genutzt werden.	UVEK 2018, ITS 2018
Platooning	Fahren von mehreren Fahrzeugen in Kolonne, mit einem sehr geringen Abstand untereinander aufgrund Vernetzung und Automatisierung der Fahrzeuge	angelehnt an Jer-mann et al. 2020
Ride-Hailing	Teilen eines Fahrzeuges und eine Fahrt nach exklusivem Wunsch des Kunden. Der Kunde bucht die Fahrt über eine App/Vermittlungsplattform und legt den Start und das Ziel der Fahrt fest. Wird auch Ride-Selling genannt.	BMW 2019
Ride-Pooling	Teilen eines Fahrzeugs und bedarfsorientierte Bündelung verschiedener Fahrtwünsche von Personen, die Umwege/längere Fahrzeiten in Kauf nehmen (i.d.R. Fahrzeuge und Lenker kommerzieller Anbieter mit oder ohne Gewinnorientierung).	angelehnt an SOB und EBP 2018
Ride-Sharing	Teilen eines Fahrzeugs und einer Fahrt, die ohnehin stattfinden würde, von Personen mit gleichen Fahrtwünschen (i.d.R. Mitfahrgelegenheiten auf privater Basis (private PW und Lenker)	BMW 2019
Sharing (in der Mobilität)	Gemeinschaftliche Nutzung von Verkehrsmitteln und Fahrten (sequenziell → Car-Sharing; simultan → Car-Pooling, Ride-Sharing, Car-Pooling, Ride-Pooling).	

Literaturverzeichnis

Aarhaug, J. (2023). *Digitalisation in mobility: How digital technologies can influence sustainability transitions in urban passenger mobility*. Doctoral dissertation. TIK Centre for Technology, Innovation and Culture, Faculty of Social Sciences, University of Oslo. <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/103639/PhD-Aarhaug-2023.pdf>. letzter Zugriff am 11.07.2024

Aboulkacem, E. M., Combes, F. (2020). *May autonomous vehicles transform freight and logistics*. In TRB'20, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Adebisi, A., Guo, Y., Schroeder, B., Ma, J., Cesme, B., Bibeka, A., Morgan, A. (2022). *Highway capacity manual capacity adjustment factor development for connected and automated traffic at signalized intersections*. Journal of transportation engineering. Part A: Systems, 148(3), 04021121.

Agora Verkehrswende (2022). *Elektro-Lkw schneller auf die Strasse bringen*. In Kooperation mit Transport and Environment, Berlin, Oktober 2022.

Angst, V., Colesanti Senni, C., Maibach, M., Peter, M., Reidt, N., van Nieuwkoop, R. (2021). *Economic impact of decarbonization scenarios of the Swiss passenger transport sector*. Nationales Forschungsprogramm 73 "Nachhaltige Wirtschaft", Schweizerischer Nationalfonds, ETHZ Economic Working Paper Series, 21/352, Mai 2021.

ARE (2020). *Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017*, Schlussbericht, Bundesamt für Raumentwicklung, erarbeitet durch TransOptima, TransSol, PTV und Strittmatter Partner Bern, Mai 2020.

ARE (2021). *Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Digitalisierung in der Mobilität*, Bundesamt für Raumentwicklung, Schlussbericht, erarbeitet durch INFRAS und DLR, Bern, Oktober 2021.

ARE (2022a). *Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050*, Bundesamt für Raumentwicklung, Schlussbericht, Bern, April 2022.

ARE (2022b). *Kosten der Überlastung der Transportinfrastruktur (KÜTI)*. Bundesamt für Raumentwicklung, erarbeitet durch INFRAS/EBP. Schlussbericht, Bern, Oktober 2022.

ARE (2024a). *Analysis of the Stated Preference Survey 2021 on Mode Route and Department Time Choices*, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, Juni 2024.

ARE (2025). *Externe und soziale Effekte im Verkehr. Ergebnistabelle 2021*. Basierend auf Ecoplan / INFRAS 2024. Bern, September 2025.

ASTAG (2024). *Selbstkosten für Nutzfahrzeuge im Strassentransport*. 15. Auflage. 2024.

Axhausen, K.W., Livingston, C., Hörl, S., Bruns, F., Fischer, R., Tasnady, B. (2020). *Auswirkungen des Automatisierten Fahrens: Teilprojekt 2, Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf*. Forschungsprojekt ASTRA 2018/002.

Bae, K., Mustafee, N., Lazarova-Molnar, S., Zheng, L. (2022). *Hybrid modeling of collaborative freight transportation planning using agent-based simulation, auction-based mechanisms, and optimization*, SIMULATION, 98, 753 – 771, <https://doi.org/10.1177/00375497221075614>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

BAFU (2024). *CO₂-Statistik*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Klima. Bern, April 2024.

BAFU (2025). *Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Schweiz seit 1990*. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern, April 2025.

Bauer, G., Hsu, C. W., Nicholas, M., Lutsey, N. (2021). *Charging up America: Assessing the growing need for US charging infrastructure through 2030*. White Paper ICCT.

BAV (2022). *Automatisierung im Schienengüterverkehr der Schweiz, beginnend mit der Migration zur digitalen automatischen Kupplung*, Bundesamt für Verkehr, Konzeptbericht, Bern, Oktober 2022.

BaZ (2024). *Basel, Bern und Zürich stoppen gemeinsames 18-Millionen-Projekt*. <https://www.bazonline.ch/basel-bern-und-zuerich-begraben-gemeinsame-mobilitaets-app-709774217906>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Benz, M. (2021). *Digitalisierung der Mobilität und deren Einfluss auf die bauliche Infrastruktur*. Bautechnik 98, Nr. 7 ;524–30. <https://doi.org/10.1002/bate.202100039>.

BFE (2022). *Energieperspektiven 2050+*. Technischer Bericht. Gesamtdokumentation der Arbeiten. Dezember 2021. Aktualisiert am 12. April 2022.

BFE (2023a). *Verständnis Ladeinfrastruktur 2050. Wie lädt die Schweiz in Zukunft?* Bundesamt für Energie, im Auftrag von EnergieSchweiz, bearbeitet von EBP, Bern, Mai 2023.

BFE (2023b). *Gesamtkosten von Personenwagen (TCO)*. Schlussbericht, erarbeitet von EBP, Bern, März 2023.

BFS und ARE (2023). *Mobilitätsverhalten der Bevölkerung - Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021*, Neuchâtel 2023.

BFS (2024a). *Transportgut der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen).* November 2024. <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/33129618/master>, letzter Zugriff 02.06.2025.

BFS (2024b). *Öffentlicher Verkehr (inkl. Schienengüterverkehr) - detaillierte Zeitreihen.* Dezember 2024. <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/32866968/master>, letzter Zugriff 02.06.2025

BFS (2024c). *Fahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen).* November 2024. Fahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen) - 1950-2023 | Tabelle. Letzter Zugriff am 06.06.2025

BFS (2024d). *Transportleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen).* November 2024. Transportleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen) - 1950-2023 | Tabelle. Letzter Zugriff am 06.06.2025

BFS (2024e). *Kosten und Finanzierung des Verkehrs. Kilometerkosten des motorisierten Verkehrs. Kilometerkosten des motorisierten Verkehrs - 2010-2021 | Tabelle.* Letzter Zugriff am 06.06.2025

BFS (2024f). *Unfall-, Umwelt- und Gesundheitskosten des motorisierten Verkehrs. Unfall-, Umwelt- und Gesundheitskosten des motorisierten Verkehrs - 2010-2021 | Tabelle* Letzter Zugriff am 06.06.2025

BFS (2024g). *Verkehrsleistungen im Personenverkehr – detaillierte zeitreihen.* Dezember 2024. URL: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.assetdetail.32866969.html>, letzter Zugriff 08.06.2025.

BFS (2025). *Ständige Wohnbevölkerung nach Geschlecht und Altersklasse, am Ende des Jahres,* STATPOP, Februar 2025.

Bieser, J. C. T., Kriukelyte, E. (2021). *The digitalization of passenger transport : Technologies, applications and potential implications for greenhouse gas emissions.* <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-305425>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

BMW, DLR, DB Rent GmbH, Landeshauptstadt München, Universität der Bundeswehr München, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2016). *Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil).* Abschlussbericht. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Bokolo A. (2023). *Data enabling digital ecosystem for sustainable shared electric mobility-as-a-service in smart cities-an innovative business model perspective*, Research in Transportation Business & Management, Volume 51, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101043>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Bösch, P.M., Becker, F., Becker, H., Axhausen, K.W. (2018). *Cost-based analysis of autonomous mobility services*, Transport Policy, 64, S. 76-91.

Bostan, S., Güney, C., Köse, Ü., Aslan, S., Kamaşak, M. (2022). *Distribution Planning and Route Optimization in Cargo Delivery*, 2022 7th International Conference on Computer Science and Engineering UBMK, 257-262, <https://doi.org/10.1109/UBMK55850.2022.9919508>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Boston Consulting Group (2022). *Mapping the Future of Autonomous Trucking*, <https://www.bcg.com/publications/2022/mapping-the-future-of-autonomous-trucks>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Boualam, O., Attila, B., Csaba, K., Nagy, V. (2022). *Impact of Autonomous Vehicles on Roundabout Capacity*. Sustainability 14, no. 4; 2203. <https://doi.org/10.3390/su14042203>.

Bruns, F., Abegg, C., Pahud-Schiesser, N. (2020). *Verkehr der Zukunft 2060: Wechselwirkungen Verkehr und Raum*, Forschungsprojekt SVI 2017/002.

Buffat, M., Sommer, H., Amacher, M., Mohagheghi, R., Beckmann, J., Brügger, A. (2018). *Individualisierung des ÖV-Angebots - Analyse der Auswirkungen der Individualisierung und weiterer angebots- und nachfragerrelevanten Trends auf die zukünftige Ausgestaltung des ÖV- Angebots*. Ecoplan, Bern, Forschungsprojekt auf Antrag der SVI 1633.

Bullis, K. (2011). *How vehicle automation will cut fuel consumption - Cars that park themselves and automatically convoy with other cars could reduce congestion and emissions*. MIT's Technology Review. [How Vehicle Automation Will Cut Fuel Consumption | MIT Technology Review](https://www.technologyreview.com/2011/04/07/400222/how-vehicle-automation-will-cut-fuel-consumption/), letzter Zugriff am 07.04.2020.

Bundesrat (2016). *Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen*, Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Leutenegger Oberholzer 14.4169 «Auto-Mobilität», Bern, 21. Dezember 2016.

Canitez, F. (2021). *Transition to Autonomous Vehicles: A Socio-Technical Transition Perspective*, Alphanumeric Journal, 9(2), 143-162, <https://doi.org/10.17093/alphanumeric.847241>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Carreyre, F., Chouaki, T., Coulombel, N., Berrada, J., Bouillaut, L., Hörl, S. (2024). *On-Demand Autonomous Vehicles in Berlin: A Cost–Benefit Analysis*; Transportation Research Record, 2678(5), 13-30, <https://doi.org/10.1177/03611981231186988>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

CCAM-TAC (2024). *Does the Collapse of Maas Global and the Whim Travel App Signify the End for Maas?* <https://www.ccam-tac.org/news/does-the-collapse-of-maas-global-and-the-whim-travel-app-signify-the-end-for-maas/>, letzter Zugriff am 23.05.2025.

Circella, G., Handy, S. (2019). *Panel Study of Emerging Transportation Technologies and Trends in California: Phase 2 Data Collection*. UC Davis: National Center for Sustainable Transportation, 2019.

Clelow, R., Mishra, G.S. (2017). *Disruptive Transportation: The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride-Hailing in the United States*. Forschungsbericht. Davis: Institute of Transportation Studies, University of California.

Cretegný L. und Müller, A. (2020). Scénarios par branche et leur régionalisation. KMPG Australia und Ecoplan im Auftrag von ARE, BFE und SECO. <https://www.bk.admin.ch/dam/bk/de/dokumente/strategische-fuehrungsunterstuetzung/Wirtschaftsszenarien/branchenszenarien-2017-bis-2060.pdf.download.pdf/Branchenszenarien%202017%20bis%202060.pdf>, letzter Zugriff am 09.10.2025.

Deineko, E., Thaller, C., Liedtke, G. (2022). *Assessing Long-Term Impacts of Automation on Freight Transport and Logistics Networks: Large-Scale LRP Integrated in Microscopic Transport Simulation*, Transportation Research Procedia, Volume 62, 2022, Pages 624-631, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.077>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Dekhtyaruk, M. T., Shao, M., Yang, S., Kontrobayeva, Z. D., Vashchilina, E. (2021). *Automated system of freight traffic optimisation in the interaction of various modes of transport*, Periodicals of Engineering and Natural Sciences PEN, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Del Duce, A., Trachsel, T., Hoerler, R. (2020). *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 6: Räumliche Auswirkungen*, Forschungsprojekt ASTRA 2018/006.

Deloitte (2017). *Global Truck Study 2016: The truck industry in transition*. [us-manufacturing-global-truck-study-the-truck-industry-in-transition.pdf](https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/autonomous-trucks-lead-the-way.html), letzter Zugriff am 06.06.2025.

Deloitte Insights (2020). *Driverless autonomous trucks lead the way*, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/autonomous-trucks-lead-the-way.html>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Deloitte Insights (2023). *Electric Vehicle Transformation*, <https://www2.deloitte.com/xen/en/insights/industry/retail-distribution/consumer-behavior-trends-state-of-the-consumer-tracker/ev-electric-vehicle-transformation.html>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Dennisen, T., Kritzinger, S., Altenburg, S., Auf der Mauer, A., Mayer, N. (2016). *Gesellschaftliche Trends und technologische Entwicklungen im Personen- und Güterverkehr bis 2040*, Schlussbericht zum Projekt im Kontext der Schweizerischen Verkehrsperspektiven 2040. Prognos im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Bern.

Deutsch, V. (2019). *Mehr oder weniger Autos: Car-Sharing-Betriebsformen und Auswirkungen auf die Autoabschaffung*, in: Strassenverkehrstechnik 63, 3, S. 177–80.

Diaz-Cachinero, P., Muñoz-Hernandez, J., Contreras, J., Muñoz-Delgado, G. (2020). *An Enhanced Delivery Route Operational Planning Model for Electric Vehicles*. IEEE Access, 8, 141762-141776, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013144>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Dong, C., Akram, A., Andersson, D., Arnäs, P., Stefansson, G. (2021). *The impact of emerging and disruptive technologies on freight transportation in the digital era: current state and future trends*, The International Journal of Logistics Management, <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2020-0043>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Econcept (2024). *Mehr als nur von A nach B: Wie wir unsere Reisezeit nutzen*. Im Auftrag des SVI, Zürich, September 2024, https://www.svi.ch/media/upload/publications_de/012591f3_5_Moser_MeeyerSVI_Tagung_Reisezeit_pp_FHNW_econcept_final.pdf, letzter Zugriff am 20.11.2025.

Ecoplan (2018). *Abschätzung der ökonomischen Folgen der Digitalisierung in der Mobilität*. Machbarkeitsstudie zuhanden des Bundesamtes für Raumentwicklung. Bern: Ecoplan, July 2018. <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/publikationen/abschätzung-der-okonomischen-folgen-der-digitalisierung-in-der-mobilitat.pdf.download.pdf/abschätzung-der-okonomischen-folgen-der-digitalisierung-in-der-mobilitat.pdf>

Ecoplan / INFRAS (2024). *Externe Effekte des Verkehrs 2021*. Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekte des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs. Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung. Bern, Dezember 2024.

Engholm, A., Kristoffersson, I., Pernestål, A (2021). *Impacts of large-scale driverless truck adoption on the freight transport system*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 154, Pages 227-254.

ETHZ (2024). *Autonomes Fahren*, <https://ee.ethz.ch/de/d-itet-erleben/fuehrungen/autonomes-fahren.html>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Europäische Kommission (2024). *Commission report under Article 12(3) of Regulation (EU) 2019/631 on the evolution of the real-world CO2 emissions gap for*

passenger cars and light commercial vehicles and containing the anonymised and aggregated real-world datasets referred to in Article 12 of Commission Implementing Regulation (EU) 2021/392, Brussels, March 2024.

Fagnant, D.J., Kockelman, K.M. (2015). *Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations for capitalizing on Self-Driven vehicles*, in: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 77, S. 1–20.

Fischer, R., Perret, F., Bruns, F. (2018). *Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz*, EBP Schweiz AG, Zürich, Schlussbericht.

Fitzpatrick, D., Cordahi, G., O'Rourke, L., Ross, C., Kumar, A., Bevy, D. (2017). *Challenges to CV and AV Applications in Truck Freight Operations*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, D.C.: National Academies of Sciences, April 15, 2017. <https://doi.org/10.17226/24771>.

Flämig, H., Lunkeit, S., Fieltsch, P., Müller, S., Thaller, C., Liedker, G., Voigtländer, F., Janke, C. (2020). *ATLaS: Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik -Chancen für mehr Wertschöpfung*. Projektbericht des Verbundvorhabens. Hamburg, 2020.

Fortune Business Insights (2024). *Autonomous Truck Market Size, Share & Industry Analysis*, <https://www.fortunebusinessinsights.com/autonomous-truck-market-103590>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Friedrich, B. (2015). *Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge*, in: Maurer et al. (Hrg.) *Autonomes Fahren*, Berlin, Heidelberg: Springer, S. 331-350

Gansterer, M., Hartl, R., Tzur, M. (2022). *Transportation in the Sharing Economy*, *Transp. Sci.*, 56, 567-570, <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.1143>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

García, A., Monsalve-Serrano, J., Lago Sari, R., Martinez-Boggio, S. (2022). *Energy assessment of an electrically heated catalyst in a hybrid RCCI truck*, *Energy*, Elsevier, vol. 238PA, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121681>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

GFEI (2023). *Trends in the global vehicle fleet 2023*, Global Fuel Economy Initiative, November 2023.

Grote, M., Cherrett, T., Oakey, A., Martínez-Sykora, A., Aydemir, I. (2023). *Benefits of Shared-Fleet Horizontal Logistics Collaborations: A Case Study of Patient Service Vehicles Collecting Pathology Samples in a Public Sector Healthcare Setting*, *Future Transportation*, <https://doi.org/10.3390/futuretransp3010011>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Guo, X., Peng, Y., Ashraf, S., Burris, M. W. (2020). *Performance analyses of information-based managed lane choice decisions in a connected vehicle environment.* Transportation Research Record, 2674(11), 120-133.

Haefeli, U., Matti, D., Schreyer, C., Maibach, M. (2006). *Evaluation Car-Sharing.* Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schlussbericht.

Hahn, R. (2022). *New exterior design options for improving the efficiency of fully autonomous heavy duty vehicles,* Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology SMART, Cassino, Italy, 2022, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/SMART55236.2022.9990543>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Harb, M., Stathopoulos, A., Shiftan, Y., Walker, J.L. (2021). *What do we (Not) know about our future with automated vehicles?*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 123, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102948>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Hawkins, J., und Kockelman, K. (2024). *Supporting decarbonization through vehicle rightsizing, automation, and ridesplitting.* Carbon Footprints 2024;3:4. <https://dx.doi.org/10.20517/cf.2023.46>, letzter Zugriff am 12.07.2024.

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., Axhausen, K.W. (2019). *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge – Eine Abschätzung,* Forschungsprojekt SVI 2016/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI), ETH Zürich, Februar 2019.

Huang, Y., Kockelman, K.M., Quarles, N. (2019). *How will self-driving vehicles affect U.S. megaregion traffic? The case study of the Texas-Triangle,* the 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Conference Paper.

Huda, F.Y., Currie, G., Kamruzzaman L. (2023). *Understanding the value of autonomous vehicles – an empirical meta-synthesis,* Transport Reviews 43(3):1-25, <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2189324>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Hunter, C. B., Kockelman, K. M., Djavadian, S. (2022). *Curb allocation and pick-up drop-off aggregation for a shared autonomous vehicle Fleet,* <https://doi.org/10.1177/01600176231160498>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

INFRAS (2019). *Finanzielle Auswirkung von Abgaben auf Brennstoffe, Treibstoffe und Flugtickets: Rechenbeispiele für ausgewählte Haushalte,* Studie im Auftrag von Swisscleantech, Zürich.

INFRAS (2022). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA),* Version 4.2, Stand: April 2022.

INFRAS (2024). *Elektromobilitätsszenarien*. Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA), Aktualisierte Prognosen für die Schweiz, Stand: September 2024.

INFRAS (2025). *Swiss e-Cargo. Entscheidungsgrundlagen und nationale Szenarien für die Elektrifizierung der schweren Nutzfahrzeuge in der Schweiz*. In Kooperation mit PSI, Schweizerische Post, Designwerk, subventioniert vom Bundesamt für Energie BFE, Zürich, November 2025 (noch unveröffentlicht).

ITF (2015). *Urban Mobility System Upgrade: How self-driving cars could change city traffic*. OECD Publishing.

ITF (2020). *Shared Mobility Simulations for Lyon - Case-specific policy analysis*, OECD Publishing, Nr. 74, Paris.

ITF (2022). *Decarbonising Europe's Trucks. Hot to Minimise Cost Uncertainty*. OECD Publishing, Paris.

ITS (2018). *Mobilitäts-Plattformen*, Abschlussbericht Arbeitsgruppe, September 2018.

Ivanova, L., Kurkin, A., Ivanov, S. (2021). *Methods for optimizing routes in digital logistics*. E3S Web of Conferences, <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202125802015>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Janssen, R., Zwijnenberg, H., Blankers, I., de Kruijff, J. (2015). *Truck Platooning. Driving the future of transportation*, TNO Whitepaper, <https://publications.tno.nl/publication/34616035/dLljFM/janssen%E2%80%902015%E2%80%90truck.pdf>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Jarašūnienė, A., Čižiūnienė, K., Petraška, A. (2022). *Sustainability Promotion by Digitalisation to Ensure the Quality of Less-Than-Truck Load Shipping*, Sustainability, Vol. 1419, pages 1-20, October, <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v14y2022i19p12878-d937235.html>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Jehanfo, H., Kaparias, I., Preston, J. (2023). *Analyzing the Impact of Traffic Volumes on Key Performance Metrics for Connected Autonomous Truck-Enabled Highways*. 2023 8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems MT-ITS, 1-7. <https://doi.org/10.1109/MT-ITS56129.2023.10241591>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Jermann, J., Steinle, M., Luisoni, A., Bohne, S., Schweizer, N., Schmid, T. (2020). *Auswirkungen des automatisierten Fahrens*; Teilprojekt 4: Neue Angebotsformen, Rapp Trans AG, Forschungsprojekt ASTRA 2018/004 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA), November 2020.

Ji-Hyland, C., Allen, A. (2020). *What do professional drivers think about their profession? An examination of factors contributing to the driver shortage*, <https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1052&context=buschmanart>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Johnson, L., Christie, L., Walker, A. (2023). *Digital technology in freight*, <https://doi.org/10.58248/pn692>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Kato, H., Sanko, N., Ishibe, M., Sakashita A. (2024). *Value of travel time savings for leisure trip in autonomous vehicles: Case study from the Tokyo Metropolitan Area*, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 24, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101080>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Keese, S., Aulbur, W., van Marwyk, K., Rentzsch, W. (2018). *Shifting up a gear. Automatisierung, Elektrifizierung und Digitalisierung in der Logistikbranche*, Roland Berger, München.

KE-Consult (2018). *Autonomes Fahren - Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse*, Studie für den Deutschen Industrie- und Handelskammertag e.V., Köln, April 2018.

Kim, B., Heaslip, K., Aad, M., Fuentes, A., Goodall, N. (2021). *Assessing the Impact of Automated and Connected Automated Vehicles on Virginia Freeways*. *Transportation Research Record* 2675, no. 9 (September 1, 2021): 870–84. <https://doi.org/10.1177/03611981211004979>.

Klausner, S., Irtenkauf, P. (2013). *Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen: Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss*. Masterarbeit, Universität Stuttgart.

Kohli, S., Willumsen, L. (2016). *Traffic Forecasting and Autonomous Vehicles*, Beitrag auf der European Transport Conference 2016, Barcelona.

Kolarova, V., Cherchi, E. (2021). *Impact of trust and travel experiences on the value of travel time savings for autonomous driving*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 131, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103354>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Kolarova, V., Cyganski, R., Lenz, B. (2019). *Activities while travelling? Travel time perception and time use in an era of automated driving*, in: Ben-Elia (Hrsg.) *The evolving impact of ICT on activities and travel behavior*. *Advances in Transport Policy and Planning*, 3. Elsevier, S. 171-206.

Kolleck, A. (2021). *Does Car-Sharing Reduce Car Ownership? Empirical Evidence from Germany*, *Sustainability* 13, 7384, <https://doi.org/10.3390/su13137384>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

König, A., Nicoletti, L., Schröder, D., Wolff, S., Waclaw, A., Lienkamp, M. (2021). *An overview of parameter and cost for battery electric vehicles*, World Electric Vehicle Journal, 12(1), 21.

König, A., Gebhardt, L., Stark, K., Schuppan, J. (2022). *A Multi-Perspective Assessment of the Introduction of E-Scooter Sharing in Germany*. Sustainability, 14, 2639, <https://doi.org/10.3390/su14052639>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Krail, M., Hellekes, J., Schneider, U., Dütschke, E., Schellert, M., Rü diger, D., Steindl, A., Luchmann, I., Wassmuth, V., Flämig, H., Schade, W., Mader, S. (2019). Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Strassenverkehr. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV AG, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Haburg - VPL, MFive.

Krause, S., Motamedidehkordi, N., Hoffman, S., Busch, F., Hartmann, M., Vortisch, P. (2017). *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur*, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.

Lavieri, P.S., Bhat, C.R. (2019). *Investigating objective and subjective factors influencing adoption, frequency and characteristics of ride-hailing trips*, in: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 105, S. 100–125.

Lee, S., Cho, K., Park, H., Cho, D. (2023). *Cost-Effectiveness of Introducing Autonomous Trucks: From the Perspective of the Total Cost of Operation in Logistics*, Applied Sciences. <https://doi.org/10.3390/app131810467>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). *Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies*. Proceedings of the IEEE, 101(11), 2409–2427.

Liu, P., Fan, W. (2020). *Exploring the Impact of Connected and Autonomous Vehicles on Freeway Capacity Using a Revised Intelligent Driver Model*. Transportation Planning and Technology 43 (March 2, 2020): 1–14. <https://doi.org/10.1080/03081060.2020.1735746>.

Liu, T., Meidani, H. (2023). *Artificial Intelligence for Optimal Truck Platooning: Impact on Autonomous Freight Delivery*, <https://purr.purdue.edu/publications/4359/1>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Liu, T., Zhao, C. (2019). *Study the Impacts of Freight Consolidation and Truck Sharing on Freight Mobility*, Oklahoma State University.

Loose, W. (2016). *Mehr Platz zum Leben – wie Car-Sharing Städte entlastet*. Ergebnisse des bcs-Projektes ‚Car-Sharing im innerstädtischen Raum – eine Wirkungsanalyse‘. Berlin: bcs.

Lutzenberger, M., Trinker, U., Federspiel, E., Frölicher, J., Georgi, D., Ulrich, S., Wozniak, T. (2018). *Shared Economy und der Verkehr in der Schweiz*, Swiss Economics und HSLU, Forschungsprojekt auf Antrag des SVI 1641.

MAN, DB Schenker, Hochschule Fresenius (2019). *EDDI - Elektronische Deichsel - Digitale Innovation*, Kurzbericht mit Ergebnispräsentation, https://www.truck.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/2019_5/190510_MTB_Platooning_EDDI_Zusammenfassung.pdf, letzter Zugriff am 07.04.2020.

Martin, E., Shaheen, S. (2016). *The Impacts of Car2go on Vehicle Ownership, Modal Shift, Vehicle Miles Traveled, and Greenhouse Gas Emissions: An Analysis of Five North American Cities*. University of California, Berkeley, tsrc working paper.

McKinsey & Company (2018). *Distraction or disruption? Autonomous trucks gain ground in US logistics*, <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/distraction-or-disruption-autonomous-trucks-gain-ground-in-us-logistics>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Meyer, J., Becker, H., Bösch, P.M., Axhausen, K.W. (2017). *Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities?*, in: *Research in Transportation Economics*, Bd. 62, S. 80–91.

Milakis, D., Snelder, M., van Arem, B., van Wee, B. (2017). *Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: Scenarios for 2030 and 2050*, in: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17:1, S. 63–85.

Mitropoulos, L., Kouretas, K., Kepaptsoglou, K. (2022). *Developing a Total Cost of Ownership Model for Semi-Automated, Automated and Electric Vehicles*. SN COMPUT. SCI. 3, 322, <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01214-w>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Mitteregger, M., Bruck, E., Soteropoulos, A., Stickler, A., Berger, M., Dangschat, J.S., Scheu-vens, R., Banerjee, I. (2020). *AVENUE21. Automatisierter und vernetzter Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Mogge, K. (2018). *Abgrenzung und Begriffsbestimmung neuer Mobilitätskonzepte, Analyse des Begriffs- und Konzeptverständnis von Bürgern bezüglich neuer, bedarfsorientierter Mobilitätsangebote*, Masterarbeit, 26. Juli 2018.

Mouratidis, K., Peters, S., van Wee, B. (2021). *Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 92, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102716>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Mühlethaler, F., Axhausen, K.W., Ciari, F., Tschannen-Süess, M., Gertsch-Jossi, U. (2011). *Potenzial von Fahrgemeinschaften*, Forschungsauftrag ASTRA 2008/017 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen Dezember 2011.

Müller, S., Voigtländer, F. (2019). *Automated Trucks in Road Freight Logistics: The User Perspective*. Advances in Production, Logistics and Traffic, https://www.researchgate.net/publication/333943192_Automated_Trucks_in_Road_Freight_Logistics_The_User_Perspective, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Nasri, M.I, Bektaş, T., Laporte, G. (2018). *Route and speed optimization for autonomous trucks*, Computers & Operations Research, Volume 100, 2018, Pages 89-101, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.015>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Nathani, C., Zandonella, R., van Nieuwkoop, R., Brandes, J., Schwehr, T., Killer, M., Sutter, D. (2019). *Energiebezogene Differenzierung der Schweizerischen Input-Output-Tabelle 2014*. Schlussbericht an das Bundesamt für Energie. Rüschlikon/Zürich/Thun, <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=43188>

Noussan, M., Tagliapietra, S. (2020). *The effect of digitalization in the energy consumption of passenger transport: An analysis of future scenarios for Europe*, Journal of Cleaner Production, 258, 120926, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120926>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Nowak, G., Kauschke, P., Viereckl, R., Starke, F. (2018). *The era of digitized trucking - Charting your transformation to a new business model*. PwC Strategy&, <https://www.strateg-yand.pwc.com/gx/en/insights/2018/the-era-of-digitized-trucking/the-era-of-digitized-trucking-charting-your-transformation.pdf>, letzter Zugriff am 15.05.2020.

Núñez, C., Tirachini, A. (2023). *Connected and automated vehicles: effects on pricing*. In: Tirachini, A., Hörcher, D. Verhoef, E.T. (eds) Handbook on Transport Pricing and Financing. Edward Elgar Publishing, <https://doi.org/10.4337/9781800375550.00020>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Olayode, O. I., Tartibu, L. K., Okwu, M. O. (2020). *Application of Artificial Intelligence in Traffic Control System of Non-autonomous Vehicles at Signalized Road Intersection*. Procedia CIRP, 91, 194-200.

Park, J. E., Byun, W., Kim, Y., Ahn, H., Shin, D. K. (2021). *The impact of automated vehicles on traffic flow and road capacity on urban road networks*. Journal of Advanced Transportation, 2021(1), 8404951.

Pau, G., Campisi, T., Canale, A., Severino, A., Collotta, M., Tesoriere, G. (2018). *Smart pedestrian crossing management at traffic light junctions through a fuzzy-based approach*. Future Internet, 10(2), 15.

Paul Scherrer Institut (2020). *Mobilität von Morgen*. 5232 Das Magazin des Paul Scherrer Instituts, S. 16/17, Villigen, Januar 2020.

Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G. (2018). *Charge scheduling for electric freight vehicles*, Transportation Research Part B: Methodological, <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2018.07.010>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Peng, D., Wu, G., Boriboonsomsin, K. (2023). *Energy-Efficient Dispatching of Battery Electric Truck Fleets with Backhauls and Time Windows*, SAE Int. J. Elec. Veh. 131:107-123, 2024, <https://doi.org/10.4271/14-13-01-0009>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Pernestål, A.; Engholm, A.; Bemler, M.; Gidofalvi, G. (2021). *How Will Digitalization Change Road Freight Transport? Scenarios Tested in Sweden*. Sustainability 2021, 13, 304, <https://doi.org/10.3390/su13010304>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Perret, F., Arnold, T., Fiescher, R., de Haan, P., Häfeli, U. (2020). *Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?*, TA-SWISS Publikationsreihe (Hrsg.): TA 71/2020, vdf, Zürich, 2020

Phares, J., Balthrop, A. (2021). *Investigating the role of competing wage opportunities in truck driver occupational choice*. Journal of Business Logistics, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jbl.12285>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Plötz, P., Hacker, F., Jöhrens, J., Speth, D., Gnann, T., Scherrer, A., Burghard, U. (2021). *Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr: Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier*, Fraunhofer ISI, Öko-Institut, ifeu, Karlsruhe, Berlin, Heidelberg, Juni 2021.

Pollehn, T., Ruf, M., König, R. (2021). *Evaluating the effects of automation components in service networks of rail freight*. J. Rail Transp. Plan. Manag., 20, 100267, <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100267>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Pudasaini, B., Shahandashti, S. M. (2021). *A Review on Impacts of Autonomous Trucking on Freight Transportation Infrastructure*. <https://doi.org/10.1061/9780784483534.034>.

PTV, Fraunhofer ISI, MFive (2019). *Verlagerungswirkungen und Umwelteffekte veränderter Mobilitätskonzepte im Personenverkehr*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Karlsruhe.

Raimund, W. (2023). *Rebound-Effekte in der Mobilität*, Kurzstudie im Rahmen des Projekts „Nachhaltige Mobilitätswende“ (NaMoW), Im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland, Wien 2023.

Rakow, C., Kaddoura, I., Nippold, R., Wagner, P. (2021). *Investigation of the System-Wide Effects of Intelligent Infrastructure Concepts with Microscopic and*

Mesoscopic Traffic Simulation. Hamburg, Germany. <https://doi.org/10.1/KoMoD-next-ITS-Hamburg-2021.pdf>.

RAlpin AG. (2025). *Die ‚Rollende Autobahn‘ wird Ende 2025 eingestellt*. In *Medienmitteilung*. https://ralpin.com.pagesystem.ch/sites/default/files/2025-05/2025_05_05_RAlpin_MM_DE_Final.pdf

Rashidi, T.H., Waller, T., Axhausen, K. (2020). *Reduced value of time for autonomous vehicle users: Myth or reality?*, *Transport Policy*, Volume 95, Pages 30-36, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.003>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Rastani, S., Yuksel, T., Çatay, B. (2020). *Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Cargo Weight*, 175-190. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61947-3_12, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Reichmuth, D., Dunn, J., Anair, D. (2022). *Driving Cleaner: Electric Cars and Pickups Beat Gasoline on Lifetime Global Warming Emissions*, <https://doi.org/10.47923/2022.14657>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Riegler, S., Juschten, M., Hössinger, R., Gerike, R., Rösssgger, L., Schlag, B., Mant, W., Rentschler, C., Kopp, J. (2016). *Carsharing 2025 - Nische oder Mainstream?*. ifmo.

Samet, M., Liimatainen, H., Vliet, O., Pöllänen, M. (2021). *Road Freight Transport Electrification Potential by Using Battery Electric Trucks in Finland and Switzerland*, *Energies*, <https://doi.org/10.3390/EN14040823>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Sathre, R., Gustavsson, L. (2023). *Lifecycle climate impact and primary energy use of electric and biofuel cargo trucks*, *GCB Bioenergy*, 15, 508 – 531, <https://doi.org/10.1111/gcbb.13034>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Schaller, B. (2019). *The New Automobility: Lyft, Uber and the Future of American Cities*. New York: Schaller Consulting.

Schröder, D., Kirn, L., Kinigadner, J., Loder, A., Blum, P., Xu, Y., Lienkamp, M. (2023). *Ending the myth of mobility at zero costs: An external cost analysis*, *Research in transportation economics*, 97, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101246>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Seebauer, S., C. Fruhmann und V. Kilmer (2018). *Dynamik und Prävention von Rebound-Effekten bei Dynamik und Prävention von Rebound-Effekten bei Mobilitätsinnovationen*, Bericht an das BMVIT im Rahmen des Programms Mobilität der Zukunft, Graz.

Sessa, C., Alessandrini, A., Flament, M., Hoadley, S., Pietroni, F., Stam, D. (2016). *The Socio- Economic Impact of Urban Road Automation Scenarios*.

CityMobil2 Participatory Appraisal Exercise. In: Meyer und Beiker (Hrsg.) Road Vehicle Automation 3. Springer International Publishing, S. 163-186.

Singh, P., Dulebenets, M., Pasha, J., Santibanez Gonzalez, E. D. R., Lau, Y.-Y., Kampmann, R. (2021). *Deployment of Autonomous Trains in Rail Transportation: Current Trends and Existing Challenges*, IEEE Access, 9, 91427-91461, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3091550>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Singleton, P.A. (2019). *Discussing the “Positive Utilities” of Autonomous Vehicles: Will Travellers Really Use Their Time Productively?*, in: Transport Reviews, 39:1, S.50–65.

Silva, D., Földes, D., Csiszár, C. (2023). *Pick-up Points for Shared Autonomous Vehicle-based Mobility Services in Urban Areas: Demand Calculation and Locating Method*. Transportation Research Procedia, 72, 2628-2635.

smartrail 4.0 (2019). Expertenbericht zuhanden des Bundesamts für Verkehr (BAV), Dezember 2019.

smartrail 4.0 (2020). Wichtigste Fragen und Antworten zu smartrail 4.0 und dem Ergebnis der Konzeptphase (2017-2019), verabschiedet vom LA vom 7. April 2020. <https://www.smartrail40.ch/service/download.asp?mem=o&path=\download\downloads\Management%20Summary%20Ergebnis%20Konzeptphase.pdf>, letzter Zugriff am 18.8.2020

SOB und EBP (2018). *Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz*, Schlussbericht Modul 3c «Mögliche Angebotsformen im kollektiven Verkehr (ÖV und ÖIV)», definitive Fassung, im Auftrag des Basler Fonds, Schweizerischer Städteverband und weitere Partner, Zürich, 19. April 2018.

Sonnleitner, J., Friedrich, M. & Richter, E. (2022). *Impacts of highly automated vehicles on travel demand: macroscopic modeling methods and some results*. Transportation 49, 927–950, <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10199-z>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Soteropoulos, A., Stickler, A., Sodl, V., Berger, M., Dangschat, J.S., Pfaffenbichler, P., Emburger, G., Frankus, E., Braun, R., Schneider, F., Kaiser, S., Wakolbinger, H., Mayerthaler, A. (2019). *SAFiP - Systemszenarien Automatisiertes Fahren in der Personenmobilität*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Wien, Abschlussbericht.

Suel, E., Xin, Y., Wiedemann, N., Nespoli, L., Medici, V., Danalet, A., & Raubal, M. (2024). *Vehicle-to-grid and car sharing: Willingness for flexibility in reservation times in Switzerland*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 126, Article 104014. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104014>

Stead, D., Vaddadi, B. (2019). *Automated vehicles and how they may affect urban form: A review of recent scenario studies.* Cities, 92, 125-133.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.020>.

Stede, J., Treperman, J., Iglauder, T., Nemec, B., Geilhardt, G., Garber, H., Araujo Sosa, A., Lautermann, C., Schöpflin, P., Schmelzle, F., Bluhm, H., Wehde, L., Nosova, M. (2024). *Metastudie Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung. Eine Auswertung aktueller Studien zur (quantitativen) Bemessung der Umwelteffekte durch die Digitalisierung*, Berlin,
https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2024/Metastudie_Nachhaltigkeitseffekte-der-Digitalisierung_Stede-et-al-2024.pdf, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Stinson, M., Zou, B., Briones, D., Manjarrez, A., Mohammadian, A. (2023). *Vehicle ownership models for a sharing economy with autonomous vehicle considerations.* Transportation Letters, 15(1), 1-17,
<https://doi.org/10.1080/19427867.2021.2007681>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Štogl, O., Miltner, M., Zanocco, C., Traverso, M., & Starý, O. (2024). *Electric vehicles as facilitators of grid stability and flexibility: A multidisciplinary overview.* Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 13(5), e536.

Stölzle, W., Schmidt, T., Kille, C., Schulze, F., Wildhaber, V. (2018). *Digitalisierungswerkzeuge in der Logistik: Einsatzpotenziale, Reifegrad und Wertbeitrag. Impulse für Investitionsentscheidungen in die Digitalisierung – Erfolgsgeschichten und aktuelle Herausforderungen*, Universität St. Gallen - Institut für Supply Chain Management, Göttingen, 2018.

Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg (2021). *Autonomes Fahren im Liefer- und Güterverkehr*, Empfehlungspapier der Arbeitsgruppe B im Themenfeld 5, https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/PM_Anhang/210505_ANHANG_Empfehlungspapier_A_G_B_autonomes_Fahren_im_LGV.pdf, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Strategy& (2022). *The Dawn of Electrified Trucking.* Oktober 2022.

Tajaddini, A., Vu, H. L. (2023). *Modeling the long-term regional impacts of autonomous vehicles: a case study of Victoria, Australia;* in: Journal of Intelligent Transportation Systems: technology, planning, and operations, 27(4), 459-470.
<https://doi.org/10.1080/15472450.2022.2053528>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Tao, X., Mårtensson, J., Warnquist, H., Pernestål, A. (2021). *Short-term Maintenance Planning of Autonomous Trucks for Minimizing Economic Risk*, ArXiv, abs/2106.01871. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108251>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Tazhiyeva Z., Tazhiyev R., Baimukhanbetova E., Kozhakhmetova A. (2023). *Application of marketing digital technologies in high-tech road freight transportation projects*. Materials of the International scientific-practical conference “The Paradigm of Sustainable Economic Development in the Context of Global Change: Challenges, Consequences, Opportunities”. <https://doi.org/10.26577/se-dgch.2023v1ca15>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Tengilimoglu, O., Carsten, O., Wadud, Z. (2023). *Implications of automated vehicles for physical road environment: A comprehensive review*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 169 (January):102989. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102989>.

Transport Topics (2023). *Autonomous Trucks Reshaping the Freight Industry*, <https://www.ttnews.com/articles/autonomous-trucks-reshaping-freight-industry><https://www.ttnews.com/articles/autonomous-trucks-reshaping-freight-industry>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Truong, L.T., De Gruyter, C., Currie, G., Delbosc, A. (2017). *Estimating the trip generation impacts of autonomous vehicles on car travel in Victoria, Australia*, in: Transportation, 44:6, S. 1279– 1292.

Tsugawa, S., Jeschke, S., Shladover, S.E. (2016). *A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings*, in: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 1:1, S. 68–77.

UBA (2023a). *Digitalisierung im Verkehr - Vorschläge für Regelungskonzepte und Rahmenbedingungen zur Realisierung einer nachhaltigen Mobilität*, UBA-Texte 133/2023, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/133_2023_texte_digitalisierung_im_verkehr_1.pdf, letzter Zugriff am 11.07.2024.

UBA (2023b). *Digitalisierung im Verkehr - Potenziale und Risiken für Umwelt und Klima*, UBA-Texte 150/2023, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/150_2023_texte_digitalisierung_im_verkehr_o.pdf, , letzter Zugriff am 11.07.2024.

UVEK (2018). *Multimodale Mobilitätsleistungen – Massnahmenpläne: Mobilitätsdaten und Öffnung Vertrieb weiterer Mobilitätsanbieter ausserhalb des öV*, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern, 7. Dezember 2018.

VDE (Hrsg.) (2016). *Studie Mobilität 2025: Koexistenz oder Konvergenz von IKT für Automotive?*, Anforderungen der vernetzten Mobilität von morgen an Fahrzeuge, Verkehrs- und Mobilfunkinfrastruktur, BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, Januar 2016.

Verdes, C.A., Mironescu, A.-A. (2023). *The Future of Logistics: A Literature Review of Digitalization Trends*, Communications of International Proceedings, Vol. 2023 4, <https://doi.org/10.5171/2023.4126623>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

von Engelhardt, S., Wangler, L., Wischmann, S. (2017). *Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen*, eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin, März 2017.

von Stokar, T., Peter, M., Zandonella, R., Angst, V., Pärli, K., Hildesheimer, G., Scherrer, J., Schmid, W. (2018). *Sharing Economy – teilen statt besitzen*, im Auftrag der Stiftung für Technologiefolgen-Abschätzung (TA-Swiss), vdf Hochschulverlag AG, 68.

VSS (2019). *VSS Norm 41 822a. Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr*. Ausgabe 2019-03.

Wang, Y., et al. (2021). "Impact of ride-hailing usage on vehicle ownership in the United States." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 101: 103085.

Weidmann, U., Bruckmann, D., Dennisen, T., Ghandour, S., Khaligh, P., Kienzler, H.P., Labinsky, A., Mertel, R., Sondermann, K.U., Vetter, M., Wölfert, C. (2017). *Innovationen im Intermodalen Verkehr*, ETH Zürich, November 2017.

Wellik, T. K., Griffin, J. R., Kockelman, K. M., Mohamed, M. (2021). *Utility-transit nexus: Leveraging intelligently charged electrified transit to support a renewable energy grid*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110657>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Winter, K., Cats, O., Martens, K., Van Arem, B. (2020). *Identifying user classes for shared and automated mobility services*. *European Transport Research Review*, 12, 1-11, <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00420-y>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Wolf, T., Strohschen, J.H. (2018). *Digitalisierung: Definition und Reife – Quantitative Bewertung der digitalen Reife*, In: *Informatik-Spektrum*, 41:1, S. 56–64

Yan, H. (2022). *Intelligent Analysis of Logistics Information Based on Network Dynamic Data*, *J. Control. Sci. Eng.*, 2022, 1-7, <https://doi.org/10.1155/2022/6016072>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Yang, T., Wang, W. (2022). *Logistics Network Distribution Optimization Based on Vehicle Sharing*, *Sustainability*, <https://doi.org/10.3390/su14042159>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Yekimov, S. (2023). *Improving the efficiency of the transport and logistics sector*, E3S Web of Conferences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337604004>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Zeiner, M., Landgraf, M., Smoliner, M., Veit, P. (2021). *Higher automation - methods to increase energy efficiency in railway operation*, Road and Rail Infrastructure VI, <https://doi.org/10.5592/co/cetra.2020.1159>, letzter Zugriff am 11.07.2024.

Zhang, H., Sheppard, C. J., Lipman, T. E., Zeng, T., Moura, S. J. (2020). *Charging infrastructure demands of shared-use autonomous electric vehicles in urban areas*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 78, 102210.

Zhang, J., Chang, C., Li, S., Ban, X. (Jeff), Li, L. (2024). *Unleashing the Two-Dimensional Benefits of Connected and Automated Vehicles via Dedicated Intersections in Mixed Traffic*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 160 (March 1, 2024): 104501. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104501>.

Zhong, H., Wei, L., Burris, M.W., Talebpour, A., Sinha, K.C. (2020). *Will autonomous vehicles change auto commuters' value of travel time?*, Transportation Research Part D (83), S. 1 - 14.

Datenverwendung

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden keine primär erhobenen Daten verwendet, sondern ausschliesslich sekundäre, modellbasierte und berechnete Daten. Die Datengrundlagen stammen überwiegend aus öffentlich zugänglichen Statistiken und Modellen von Bundesstellen sowie aus bestehenden wissenschaftlichen Studien und vorangegangenen Modellierungsarbeiten. Die Daten werden zur Abschätzung verkehrlicher sowie ökonomischer Wirkungen im Rahmen eigener Modellrechnungen weiterverarbeitet; fehlende Parameter werden auf Basis der Literaturanalyse durch transparente Annahmen ergänzt. Die Daten liegen in digitaler, überwiegend Excel-basierter tabellarischer Form vor. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts erzeugten Datensätze sind nicht in einer öffentlichen Datenbank abgelegt. Die erzeugten Modellresultate sind mit dem vorliegenden Bericht publiziert und damit öffentlich zugänglich.

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: 15.12.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: MB4_20_03B_01
Projekttitel: Digitalisierte und dekarbonisierte Mobilität in der Schweiz – volkswirtschaftliche Potenziale möglicher Szenarien 2050
Enddatum: 30.06.2026

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Forschungsprojekt untersucht die verkehrlichen und ökonomischen Wirkungen der Digitalisierung und Dekarbonisierung der Schweizer Mobilität 2050 anhand einer Szenarioanalyse. Dazu werden drei Analyseszenarien (Elektrifizierung, Technologieszenario, MaaS-Szenario) einem Referenzszenario gegenübergestellt. Die Szenarien folgen einem additiven Ansatz, d.h. die Entwicklungen bauen aufeinander auf. Die Resultate der Analyse sind als Schätzung, nicht als Prognose zu interpretieren.

Im Elektrifizierungsszenario ist der Fahrzeugbestand im Personen- und Güterverkehr nahezu komplett elektrifiziert. Die verkehrliche Analyse zeigt, dass die Wirkungen beim Elektrifizierungsszenario marginal sind. Mikroökonomisch entsteht ein Zusatznutzen von rund 1.9 Mrd. Franken, während sich makroökonomisch die Wertschöpfung um 2.8 Mrd. Franken (+0.3%) und die Beschäftigung um rund 3'900 Personen (+0.1%) erhöhen. Damit ist die Elektrifizierung aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll, auch wenn der mikroökonomische Zusatznutzen im Vergleich zu den anderen Szenarien moderat ausfällt.

Mit der Automatisierung der Elektrofahrzeuge im Technologieszenario steigen im Personenverkehr Aufkommen und Verkehrsleistung im MIV. Weglänge und Fahrzeugstunden nehmen zu, trotz der Geschwindigkeitszunahme. Im Güterverkehr steigen Verkehrs- und Fahrleistung. Die Fahrzeugstunden reduzieren sich aufgrund der Veränderung der Fahrleistung und erhöhter Geschwindigkeit. Das Szenario weist einen hohen mikroökonomischen Zusatznutzen von rund 28.7 Mrd. Franken pro Jahr auf. Die Haupttreiber sind Zeitkostengewinne, Effizienzsteigerungen und Komforteffekte. Gleichzeitig zeigen sich auf makroökonomischer Ebene gegenläufige Effekte: Die Wertschöpfung sinkt um 3.4 Mrd. Franken (-0.3%), und die Beschäftigung reduziert sich um rund 49'100 Beschäftigte (-1.1%). Ursache ist v.a. die steigende Automatisierung in Transport- und Dienstleistungsprozessen, der damit verbundene Strukturwandel im Arbeitsmarkt und erhöhte Haushaltsnachfrage nach Mobilität.

Im MaaS-Szenario ist die Mobilität automatisiert, elektrifiziert und Fahrzeuge sowie Fahrten werden zu einem hohen Anteil geteilt. Im Personenverkehr steigen Verkehrsaufkommen und -leistung. Es findet eine Verlagerung vom MIV und ÖV auf den öffentlichen Individualverkehr (ÖIV) statt. Im Güterverkehr steigt die Verkehrsleistung, die Fahrleistung nimmt bei SNF ab, bei LNF steigt sie. Die Fahrzeugstunden nehmen zu, v.a. bei SNF. Das Szenario weist mit Abstand den höchsten mikroökonomischen Zusatznutzen von rund 45.4 Mrd. Franken pro Jahr auf. Die makroökonomischen Wirkungen sind gemischt: Die Wertschöpfung steigt um 3.9 Mrd. Franken (+0.4%), während die Beschäftigung um 31'100 Personen (-0.7%) zurückgeht. Der hohe gesamtwirtschaftliche Nutzen resultiert insbesondere aus Effizienzgewinnen aufgrund des Teilens von Ressourcen und sinkenden Kosten für Nutzer/-innen.

Im Ergebnis der Arbeit wurden Handlungsansätze abgeleitet, die die bestmögliche Entwicklung der jeweiligen Trends ermöglichen. Im Elektrifizierungsszenario steht der gezielte Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie die Sicherstellung der Netzstabilität im Fokus. Im Technologieszenario ist ein klar definierter Rechtsrahmen für automatisiertes Fahren sowie ein verlässliches System für Daten- und Cybersicherheit prioritär zu behandeln. Zusätzlich ist die erhöhte Nachfrage auf der Strasse zu steuern. Im MaaS-Szenario ist die Schaffung eines fairen, transparenten und interoperablen Plattformrahmens zentral, insbesondere hinsichtlich Datenzugang, Tarifstrukturen und Schnittstellenstandards.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Das Ziel der Forschungsarbeit, die verkehrlichen und ökonomischen Wirkungen der Digitalisierung und Dekarbonisierung abzuschätzen, konnte erreicht werden.

Trotz umfassender Literaturanalyse konnten einige Stellschrauben, die relevant für die Modellierung der verkehrlichen Wirkungen und damit auch ausschlaggebend für die Abschätzung der ökonomischen Wirkungen waren, nur geschätzt werden. Hierfür wurden Hinweise aus der Literatur mit der Begleitkommission diskutiert und nach Möglichkeit ein Konsens für die weitere Bearbeitung gefunden. Aus diesem Grund wurde wiederholt betont, dass die Ergebnisse der Forschungsarbeit zwar eine grobe Schätzung der Wirkungen geben, jedoch nicht als Prognosen zu verstehen sind.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die modellierten Wirkungen geben einen Hinweis darauf, welche verkehrlichen und ökonomischen Effekte die verschiedenen Trends im Jahr 2050 haben könnten. Dies kann als Entscheidungsgrundlage zu der Frage dienen, welche Trends gesellschaftlich, wirtschaftlich und politisch zu verfolgen sind. Die Handlungsansätze beschreiben mögliche Massnahmen, die für eine optimale und nutzenmaximierende Umsetzung der jeweiligen Trends erforderlich sind.

Publikationen:

Greinus A., Zwankhuizen A., Zimmermann M., Heikkilä R., Winter M., Jäkel K.: Digitalisierte und dekarbonisierte Mobilität in der Schweiz – volkswirtschaftlichen Potenziale möglicher Szenarien 2050

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Greinus

Vorname: Dagny Anne

Amt, Firma, Institut: INFRAS 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:

Die Forschungsergebnisse basieren auf einer umfassenden sowie sauber aufbereiteten Grundlagenanalyse und geben einen guten Überblick über theoretisch mögliche Entwicklungen des Verkehrssystems und deren ökonomischen Auswirkungen.

Auf Unsicherheiten in Bezug auf die getroffenen Annahmen - die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen - wird transparent eingegangen.

Die Begleitkommission wurde im Rahmen der Bearbeitung bedürfnisgerecht einbezogen und bestätigt, dass die Forschungsarbeit den qualitativen Anforderungen entspricht und die Forschungsziele erreicht wurden.

Umsetzung:

Die Forschungsergebnisse liefern der öffentlichen Hand eine Grundlage dazu, Chancen und Risiken in Zusammenhang mit der Entwicklung des Verkehrssystems zu kennen und basierend darauf notwendige Richtungsentscheide zu fällen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Durchführung empirischer Analysen von Pilotprojekten mit automatisierten Fahrzeugen und neuen Angebotsformen im ÖIV.

Vertiefung der gesellschaftlichen und arbeitsmarktbezogenen Auswirkungen (z.B. regionale Auswirkungen, Qualifikationsbedarfe und Übergangsprozessen).

Erforschung sozialer Aspekte wie digitale Teilhabe, Zugangsgerechtigkeit und Verteilungswirkungen.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsarbeit hat keinen Einfluss auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Kilcher

Vorname: Daniel

Amt, Firma, Institut: ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Kilcher Daniel
AGSVQL

Digital unterschrieben von Kilcher
Daniel AGSVQL
Datum: 2026.02.18 12:21:56 +01'00'