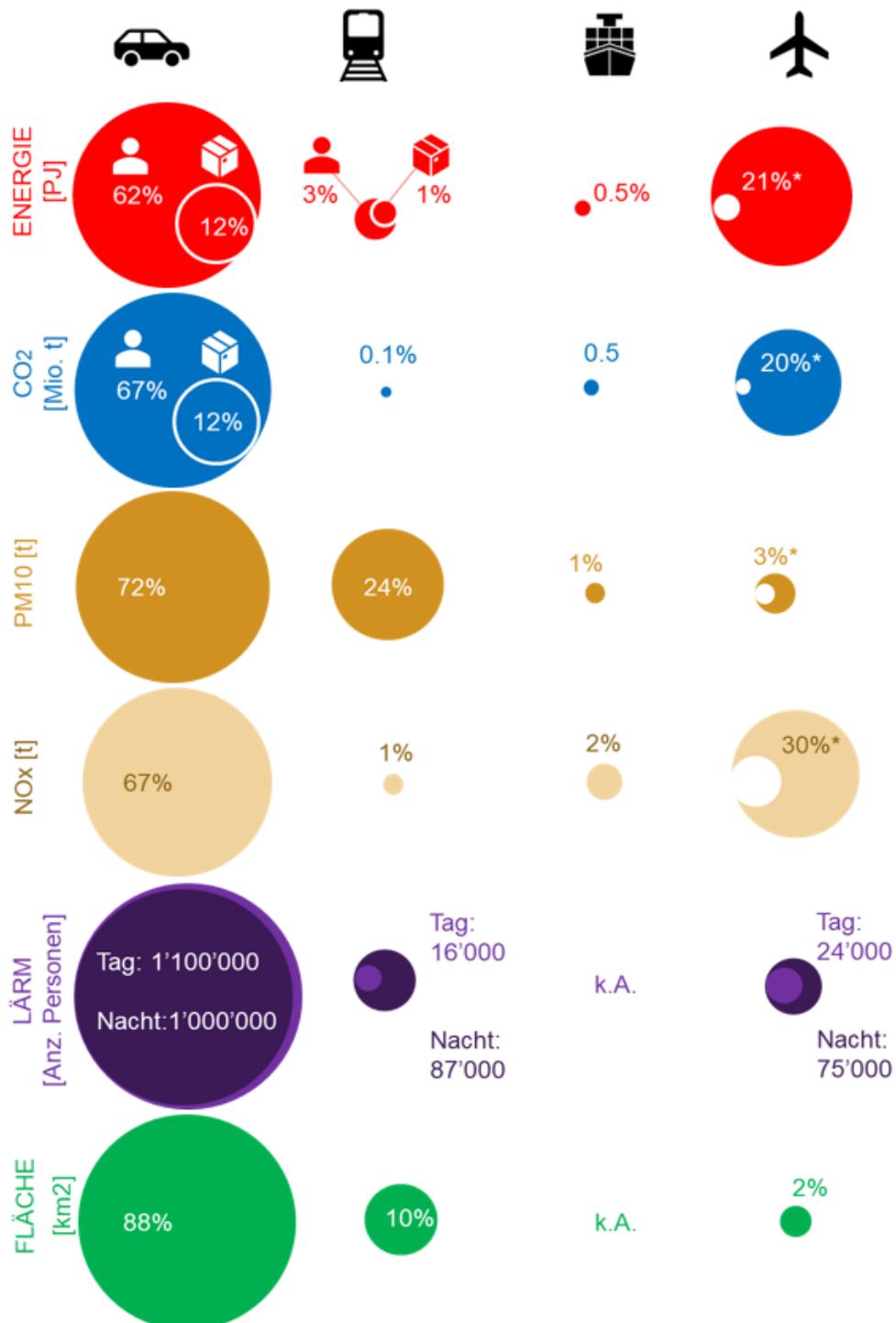


Relevante Faktoren für ein Mobilitätssystem mit geringen Umweltwirkungen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 17.12.2018



Impressum

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Sektion Umweltbeobachtung, CH-3003
Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer:

EBP Schweiz AG, Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon, Schweiz

Telefon +41 44 395 11 11

info@ebp.ch

www.ebp.ch

Autor(inn)en:

Dr. Peter de Haan

Isolde Erny

Dr. Sabine Perch-Nielsen

Dr. Lea Steurs

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Kernaussagen des Berichts

Umweltwirkungen reduzieren mit Fokus auf das technisch Machbare

Dieser Bericht thematisiert die Minimierung der Umweltwirkungen des Verkehrs. Dazu werden Ziel- und Richtwerte verschiedener Schweizer Strategien und Perspektiven zusammengeführt und Bedingungen zur Zielerreichung ergründet. Grundsätzlich können die Umweltwirkungen des Verkehrs reduziert werden, indem Verkehr vermieden, verlagert, oder verbessert wird. Da die Grundlagen primär Verbesserungen im Sinne technischer Massnahmen thematisieren, während Verlagerung und erst recht Vermeidung im Hintergrund stehen, liegt auch in diesem Bericht der Schwerpunkt auf technischen Massnahmen.

Starke Verkehrszunahme bis 2040

Der Personen- und der Güterverkehr nehmen bis 2040 stark zu, auf allen vier Verkehrsträgern: Strasse, Schiene, Wasser und Luft.

Hohe Umweltwirkungen, insb. vom Personenverkehr auf der Strasse

Der Verkehr verbraucht sehr viel Energie und verursacht über einen Drittel der CO₂-Emissionen der Schweiz. Er trägt massgeblich zu den Emissionen von Luftschadstoffen und Lärm bei. Zudem entfällt ein Drittel der Siedlungsfläche auf Verkehrsinfrastrukturen, die zudem die Landschaft zerschneiden. All diese Umweltwirkungen werden mit Abstand vom Verkehrsträger Strasse dominiert, in erster Linie vom Personenverkehr auf der Strasse.

Ein Zielsystem zur Reduktion der Umweltwirkungen bis 2040

Es bestehen für alle genannten Umweltwirkungen im Inland Ziele und Richtwerte zu deren erheblicher Reduktion, resp. Stabilisierung. Die Bezugs- und Zieljahre variieren zwar, aber es lässt sich ein Zielsystem für das Jahr 2040 mit dem Referenzjahr 2010 ableiten, welches in sich keine nennenswerten Widersprüche trägt. Da der Personenverkehr auf der Strasse die heutigen Umweltwirkungen dominiert, ist er auch wesentlich für die Zielerreichung.

Die Zielerreichung ist technisch machbar, es wird aber nicht «gemacht»

Die Zielerreichung wird im Bericht mit Schwerpunkt für die Reduktionsziele des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen diskutiert. Diese Ziele (und mit ihnen die für die meisten Luftschadstoffe, ausser PM₁₀) können insbesondere durch den Einsatz elektrischer Antriebe in Kombination mit Energie aus erneuerbaren Quellen (und umweltfreundlicher Herstellung von Batterien) erreicht werden. Allerdings ist die Zielerreichung aufgrund der zögerlichen Adaptionsraten von Elektroantrieben unwahrscheinlich.

Die Umweltwirkungen des Verkehrs wurden mit Ausnahmen der Luftqualität bisher gar nicht, resp. unwesentlich reduziert. Entsprechend ergeben sich immer höhere jährliche Verbesserungsraten bis 2040. Aber diese sind im Fall von CO₂-Emissionen rein technisch machbar. Obendrein könnten neue Technologien wie autonom fahrende Fahrzeuge im Fall eines generellen Sharing-Ansatzes die Zielerreichung (insbesondere Flächenverbrauch) erleichtern. Falls aber bei dieser neuen Technologie weiterhin der Eigenbesitz, sowie eine individuelle Nutzung im Zentrum stehen, wird die Zielerreichung

wesentlich schwieriger (z.B. Mehrverkehr aufgrund neuer Benutzergruppen wie Kinder und ältere Personen, Nutzen der Reisezeit zum Arbeiten, etc.).

Zeit, die Entwicklung an ihren Zielen zu messen – und zu handeln

Heute verfügbare Technologien haben grosse Potentiale zur Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrs in den Bereichen Klima und Lufthygiene und eingeschränkter beim Lärm. Deren selbstständige Verwirklichung hat sich aber als Illusion herausgestellt. Daher sollten einerseits die jährlichen Änderungsraten auf dem Weg zur Zielerreichung überprüft werden, aber auch die Umweltverträglichkeit neuer Technologien wie autonomer Fahrzeuge. Weiter sollten Rebound-Effekte und Zielkonflikte bestehender Politikinstrumente überprüft werden. Wenn die beobachteten Veränderungen der Umweltwirkungen vom Zielpfad abweichen – was sie heute tun – ist die Anpassung bestehender, respektive der Einsatz disruptiver Politikinstrumente zu prüfen.

Was wäre für die Lebenszyklusperspektive zu berücksichtigen?

Die Betrachtung der Umweltwirkungen des Verkehrs aus Lebenszyklusperspektive zeigt relevante Umweltwirkungen im Ausland. Wenn diese auch verringert werden sollen, sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen: Die Entwicklung der Personen und Tonnenkilometer des internationalen Flugverkehrs und der Hochseeschifffahrt, die Qualität importierter Energieträger fürs Laden von Fahrzeugen und die Umweltfreundlichkeit der Batterieherstellung für Elektrofahrzeuge und deren Lebensdauer.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	5
2.	Entwicklung der Mobilität bis 2040	7
3.	Ziele für die Umweltwirkungen der Mobilität	10
3.1	Heutige Umweltwirkungen der Mobilität	10
3.2	Ziele gemäss Strategien und Perspektiven	13
3.3	Aggregiertes Zielsystem der Umweltwirkungen	17
4.	Einflussfaktoren eines Mobilitätssystems mit geringen Umweltwirkungen	19
4.1	Elemente des Mobilitätssystems	19
4.2	Einflussfaktoren	24
5.	Fazit und mögliche Handlungsfelder	30
5.1	Indikatoren zur Zielerreichung definieren und überprüfen	31
5.2	Verträglichkeit für Mobilitätssystem und Umwelt nachweisen	33
5.3	Einbezug des Lebenszyklus- und Inlandsprinzips	33
5.4	Einbezug Rebound-Effekte, Fehlanreize und Zielkonflikte	34
5.5	Disruptive Politikinstrumente prüfen	34
6.	Literaturverzeichnis	36

1. Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Die heutige Mobilität hat grosse Umweltwirkungen. Sie verursacht über einen Drittel der Schweizer Treibhausgas-Emissionen, trägt massgeblich zu Lärm und Luftschadstoffen bei, nimmt sehr viel Fläche in Anspruch und führt zur Zerschneidung der Landschaft. Gemäss der Schweizerischen Verkehrsperspektiven (ARE, 2016) ist bis 2040 mit einer starken Zunahme des Strassen- und Schienenverkehrs zu rechnen. Die Perspektiven rechnen dennoch nur mit einem begrenzten Infrastrukturausbau, dank effizienterer Nutzung des vorhandenen Platzes. Bei einer gezielten Beseitigung der Engpässe der bestehenden Infrastruktur ist dies durchaus denkbar.

Wichtige Treiber der Verkehrszunahme sind das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum. Einen grossen Einfluss auf die Mobilität haben die Siedlungspolitik, sowie die Energie- und Klimapolitik in Bezug auf die Nutzung fossiler Energieträger. Dazu werden in den kommenden Jahrzehnten grössere technologische Veränderungen erwartet, z.B. die Verbreitung automatisierter Fahrzeuge.

Insgesamt ergeben sich für die Umwelt Chancen, aber auch Risiken. In der öffentlichen Debatte ist häufig eine optimistische Einstellung gegenüber den Auswirkungen neuer Technologien zu beobachten – z.B. hinsichtlich der Erwartung, dass dank automatisierter Fahrzeuge weniger Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden. Diese Fahrzeuge könnten aber auch zu deutlichem Mehrverkehr führen, womit sich die reduzierte Ressourceninanspruchnahme pro Fahrzeugkilometer aufhebt.

Ziel des Berichts

Es wird ein Mobilitätssystem beschrieben, das den verschiedenen Zielen des Bundesrats in Bezug auf die Umweltwirkungen gerecht wird. Wichtige Hebel zur Erreichung dieses Mobilitätssystems und mögliche Handlungsfelder werden identifiziert. Dabei wird eine integrierte Gesamtsicht möglichst aller relevanten Umweltbelastungen, auch hinsichtlich Lebenszyklusperspektive, eingenommen.

Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen wird in der nachfolgenden Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

WAS	BESCHREIBUNG
Zeitlich	Der vorliegende Bericht hat den Zeithorizont 2010 – 2040, analog zu den Energieperspektiven (BFE, 2012) UVEK-Orientierungsrahmen 2040 (UVEK, 2017B), sowie den Verkehrsperspektiven (ARE, 2016).
Räumlich	Abgrenzung gemäss Fussabdruck-Perspektive: Neben den Umweltbelastungen im Inland werden auch die Umweltbelastungen im Ausland aufgrund von importierten Produkten einbezogen. Wie in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung wird vom Inlandsprinzip ausgegangen: Betrachtet werden die Mobilitätsaktivitäten der gebietsansässigen Wirtschaftseinheiten (d. h. Unternehmen, Einheiten der öffentlichen Verwaltung, Non-Profit-Organisationen und private Haushalte), unabhängig davon, ob diese Aktivitäten im Inland oder im Ausland stattfinden (BAFU, 2014).
Umwelt-Wirkungen	Betrachtet werden alle relevanten Umweltwirkungen der Mobilität. Dazu gehören Energieverbrauch, Emissionen von Treibhausgasen, Luftschadstoffen und Lärm, Bodenverbrauch sowie Zerschneidung der Landschaft. Auf weitere Auswirkungen entlang des Lebenszyklus wie Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen und Schadstoffemissionen wird hingewiesen.
Verkehrszwecke	Betrachtet werden soll sowohl der Güter-, als auch der Personenverkehr. Bei letzterem sowohl öffentlicher Verkehr (ÖV), als auch Individualverkehr für alle Zwecke (Beruf, Freizeit, weitere).
Verkehrsträger und -mittel	Das Gesamtverkehrssystem ist von Interesse: Gemäss Sachplan Verkehr (UVEK, 2006) werden die vier Verkehrsträger Strassen (und Wege), Schiene (und liniengeführte Systeme), Wasser und Luft unterschieden. Damit werden alle Verkehrsmittel, sowie auch Fussverkehr abgedeckt.
Einbezogene Grundlagen	In Abstimmung mit dem BAFU werden Strategien und Perspektiven berücksichtigt, die sich mit der nachhaltigen Entwicklung allgemein auseinandersetzen, sowie im spezifischen mit Energie, CO ₂ , Luftschadstoffen, Lärm und Fläche. Die 15 berücksichtigten Grundlagen finden sich in Anhang A1 in Tabelle 6.

2. Entwicklung der Mobilität bis 2040

In diesem Kapitel werden zuerst die erwarteten Entwicklungen der Mobilität bis 2040 dargelegt. Anschliessend werden zur Illustration der Umweltwirkungen durch den Einsatz neuer und bewährter Technologien extrem gewählte Minimal- und Maximalszenarien beschrieben.

Bevölkerung und Bruttoinlandprodukt (BIP) nehmen im Zeitraum 2010–2040 stark zu. Für den Verkehr wird dennoch ein vergleichsweise moderates Wachstum erwartet, aufgrund der Annahme, dass sich die Nachfrage pro Kopf in der Schweiz stabilisiert¹. Im für die Verkehrsperspektiven 2040 (ARE, 2016) verwendeten mittleren BFS-Szenario wird die Schweizer Bevölkerung bis 2040 auf 10.044 Millionen Einwohner anwachsen. Gegenüber 2010 (7.870 Millionen Einwohner) ist das eine Zunahme um 28%. Das BIP wird im selben Zeitraum um 46% auf 887 Mrd. CHF steigen (real mit Basis 2010, ARE, 2016). Aufgrund dieser und weiterer Entwicklungen wird in den Verkehrsperspektiven das Verkehrswachstum prognostiziert. Dabei werden Aussagen gemacht für die Verkehrsträger Strasse und Schiene, unterteilt nach Personenverkehr (in Personenkm, Pkm) und Güterverkehr (in Tonnenkm, Tkm)². Für die Verkehrsträger Wasser und Luft machen die Verkehrsperspektiven keine Aussagen, für letztere finden sich allerdings Annahmen in der europäischen Luftfahrtstrategie (EC, 2015).

Eine Übersicht der Transportleistungen im Jahr 2010 und deren Wachstum bis 2040 findet sich in Abbildung 1 und Tabelle 2, die Erklärungen dazu folgen im Anschluss. Für den Luftverkehr wird über das Territorialprinzip hinaus zudem die Transportleistung des internationalen Flugverkehrs wiedergegeben (allerdings mangels Daten für 2010 angenähert und entsprechend überschätzt durch Daten von 2015). Dies ist für die Diskussion der Umweltwirkungen des Verkehrs interessant, da heute fast sämtlicher Personenverkehr von Schweizern im Ausland auf den Luftverkehr entfällt (80% der Pkm im Ausland im Jahr 2015; ARE, BFS, 2017)³. Aufgrund des Einbezugs des internationalen Luftverkehrs sind nicht nur die hier berechneten Pkm für 2010 und 2040 höher als in den Verkehrsperspektiven (ARE, 2016) sondern auch deren Wachstum in der betrachteten Periode.

Tabelle 2: Entwicklung der Transportleistung im Zeitraum 2010 – 2040 für die Verkehrsträger Strasse, Schiene, Wasser und Luft.
Heute: Strasse und Schiene: ARE, 2016. Luftverkehr: BFS, ARE, 2017, nur Daten aus 2015 vorhanden. Pkm wurden errechnet aus km pro Person und Bevölkerung im Jahr 2010.
2040: Hochgerechnet gemäss Prognosen von ARE, 2016 und EC, 2015.
 Angaben gemäss Territorialprinzip, für Personenverkehr in der Luft zusätzliche (*) Angaben inklusive internationalem Flugverkehr.

	STRASSE	SCHIENE	WASSER	LUFT	SUMME
2010	P: 93 Mrd. Pkm G: 17 Mrd. Tkm	P: 22 Mrd. Pkm G: 10 Mrd. Tkm	k.A.	P: 1.5 Mrd. Pkm *41 Mrd. Pkm G: k.A.	P: 117 Mrd. Pkm *156 Mrd. Pkm G: 27 Mrd. Pkm (ohne Luft)
2040	P: 111 Mrd. Pkm G: 22 Mrd. Tkm	P: 34 Mrd. Pkm G: 14 Mrd. Tkm	k.A.	P: 2.3 Mrd. Pkm *61 Mrd. Pkm G: k.A.	P: 147 Mrd. Pkm *206 Mrd. Pkm G: 37 Mrd. Pkm (ohne Luft)

¹ Eine Stabilisierung der Nachfrage im Inland ist denkbar. Daten des Mikrozensus Verkehr zeigen für die letzten Jahre ein geringes Nachfragewachstum in Inland und ein starkes im Ausland, insbesondere für Flüge (BFS, ARE 2007; 2012; 2017). Dieser Trend könnte sich bis 2040 fortsetzen (UVEK, Stand 2018).

² Abkürzungen gemäss Glossar von ARE, 2016.

³ Die Angaben umfassen Hin- und Rückweg, sowie vor Ort zurückgelegte Distanzen.

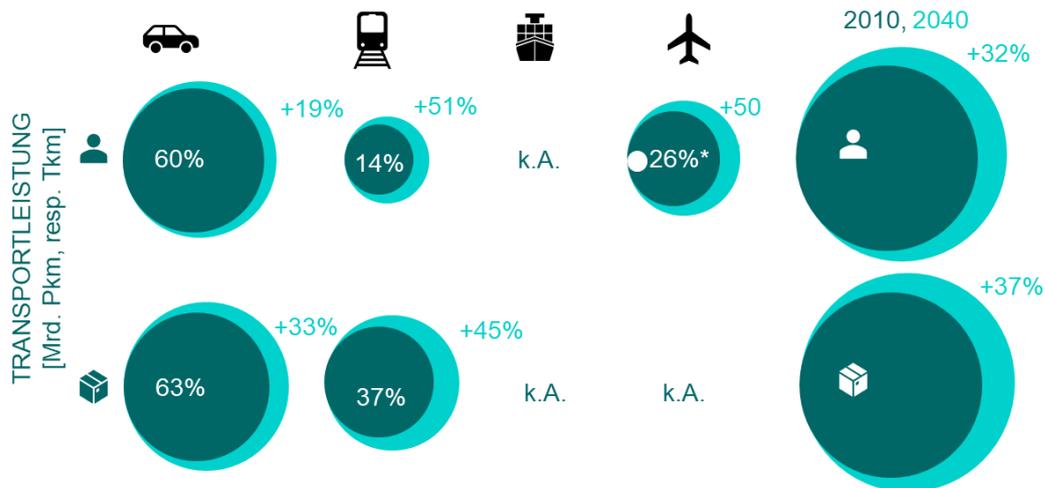


Abbildung 1: Entwicklung der Transportleistung im Zeitraum 2010 – 2040 für die Verkehrsträger Strasse, Schiene, Wasser und Luft gemäss Angaben in Tabelle 2. Die Zahlenangaben werden im Text erläutert.
 Angaben für Personen in Pkm, für Güter in Tkm
 Hinweis: Die Angaben der Pkm schliessen den Beitrag internationaler Flüge ein. Entsprechend ist die hier berechnete Zunahme des Verkehrs gegenüber den Verkehrsperspektiven (ARE, 2016), welche diesen nicht einschliessen, deutlich höher (32%, statt 26%).
 * weisser Kreis = Flug-Pkm gemäss Territorialprinzip.

- Der Personenverkehr auf der Strasse beinhaltet die Summe der Verkehrsleistung von Personenwagen (PW), Motorrädern und Velos, sowie der zu Fuss zurückgelegten Strecken. Die Pkm auf der Strasse dominieren den gesamten Personenverkehr mit einem Anteil von ca. 60% und nehmen um 19% zu (Der MIV nimmt um 18% zu, der Veloverkehr um 33% und der Fussverkehr um 23%).
- Der Güterverkehr auf der Strasse macht mit 63% einen Grossteil des gesamten Güterverkehrs (Angaben nur für Strasse und Schiene vorhanden) aus; die Tkm Strasse nehmen um 33% zu.
- Der Personenverkehr auf der Schiene hat einen Anteil von 14% am Personenverkehr; die Pkm nehmen um 51% zu. In den verwendeten Daten sind hierin auch Trolleybusse des ÖV beinhaltet, welche auf der Strasse fahren.
- Der Güterverkehr auf der Schiene macht mit 37% einen relevanten Teil des Güterverkehrs aus; die Tkm nehmen um 45% zu.
- Zur Schifffahrt liegen keine Daten vor.
- Die Verkehrsleistung des Flugverkehrs ist für das Jahr 2010 nicht bekannt; im Jahr 2015 macht dieser inklusive internationaler Flüge bezogen auf die Pkm ca. 26% des Personentransports aus. Zur Entwicklung liegen Daten zur Anzahl Flugbewegungen, zum Passagier- und Cargo-Aufkommen (Intraplan Consult, 2015), jedoch nicht zur Anzahl Pkm vor. Gemäss Luftfahrtstrategie der EU (EC, 2015) nehmen die Flüge in ganz Europa (Pkm und Tkm) um 50% zu. Insgesamt nimmt auf der Strasse und der Schiene der Personenverkehr im Zeitraum 2010 – 2040 um 26% zu (inkl. Velo- und Fussverkehr), der Güterverkehr um

37%. Wenn beim Personenverkehr die Zunahme des Luftverkehrs um 50% mitberücksichtigt wird, vergrössert sich die Zunahme der Pkm auf 32%. Grundsätzlich wird von einer Verlagerung des Strassenverkehrs auf die Schiene ausgegangen, daher nimmt letzterer überproportional zu.

Diverse Technologien könnten potenziell zur Minimierung der Umweltwirkungen der Mobilität beitragen. Von Bedeutung für das zukünftige Mobilitätssystem sind gemäss den untersuchten Strategien und Perspektiven insbesondere die Elektromobilität, die Automatisierung von Fahrzeugen, Drohnen und verschiedene Informations- und Kommunikations-Technologien. Zu letzteren gehören Technologien zur Routenplanung und Logistik, zur verkürzten Abstandhaltung, fürs Platooning, zur Planung, Reservierung, Authentifikation und Bezahlung von Mobilitätsdienstleistungen, sowie zur Bereitstellung von Shared-Mobility und inter- und multimodalen Mobilitätsangeboten. Die genannten Technologien können prinzipiell sowohl als Treiber, als auch als Hemmnisse für ein Mobilitätssystem mit minimalen Umweltwirkungen fungieren. Dies sollen zwei fiktive, bewusst extrem gewählte «low impact»- und «high impact»-Anwendungsfälle für das Jahr 2040 verdeutlichen:

Low-Impact-Anwendungsfall: Der Personen- und Güterverkehr findet weiterhin hauptsächlich auf Strasse und Schiene statt. Der Luftverkehr wurde in die klimapolitischen Instrumente integriert, was dessen Wachstum stark verlangsamt hat. Das ÖV-Angebot umfasst wie früher Züge, Trams und Busse, bezieht aber vermehrt auch Velo- und Car-Sharing-Angebote mit ein. Dank multimodalen Apps und Mobilitätsangeboten «aus einer Hand» legen die meisten Nutzer kurze Wege vorwiegend mit dem LV zurück und kombinieren die Verkehrsmittel oft. Flüge werden nur ein bis zwei Mal pro Person und Jahr genutzt, Hochgeschwindigkeitszüge verbinden weite Teile Europas. Die meisten Fahrzeuge sind elektrisch angetrieben. Aufgrund grosser Investitionen in den Ausbau, das zeitversetzte Laden und die Speicherung erneuerbarer Energien wird die Nachfrage zumeist im Inland gedeckt.

High-Impact-Anwendungsfall: Der Anteil des Luftverkehrs am Personen- und Güterverkehr hat sich deutlich gesteigert. Die Strassen sind gefüllt mit autonomen Personenwagen, welche meistens eine Person transportieren, oder sich auf eine Leerfahrt zurück zum Ausgangspunkt und einem freien Parkplatz befinden. Der Verkehr fliesst überwiegend in hohem Tempo und ist entsprechend laut. Aufgrund mangelnder Auslastung und hoher Kosten wurden Buslinien in Randgebieten und Randzeiten eingestellt. In den autonomen Fahrzeugen, welche sich mehrheitlich im Privatbesitz befinden, können die Fahrgäste vernetzt und in Ruhe arbeiten; die meisten Menschen verbringen drei bis vier Stunden pro Tag in den Fahrzeugen. Fussgänger und Radfahrer sind selten geworden. Zur Deckung des Strombedarfs importiert die Schweiz deutlich mehr Strom aus den Nachbarländern.

Die beiden Szenarien illustrieren, dass alle genannte Technologien sowohl Teil eines Mobilitätssystems mit grossen, als auch mit niedrigen Umweltwirkungen sein können. Die Zunahme autonomer Fahrzeuge oder der Multimodalität bringen nicht zwangsläufig Vorteile für die Umweltwirkungen des Verkehrssystems mit sich.

3. Ziele für die Umweltwirkungen der Mobilität

Dieses Kapitel beschreibt die heutigen Umweltwirkungen der Mobilität sowie Ziele, Richtwerte und daraus abgeleitete Entwicklungen zu den Umweltwirkungen der Mobilität bis 2040. Diese werden in einem Zielsystem zusammengeführt.

3.1 Heutige Umweltwirkungen der Mobilität

Wichtige Umweltwirkungen des Verkehrs sind dessen Energieverbrauch, die Emissionen von CO₂, Luftschadstoffen und Lärm, sowie der Flächenverbrauch und die Landschaftszerschneidung. Angaben dazu finden sich in Tabelle 3 und Abbildung 2. Die Umweltwirkungen werden, soweit es die Quellen zulassen, differenziert nach Verkehrsträgern, sowie Personen- und Güterverkehr und beziehen sich auf das Jahr 2010. Wo keine Daten für 2010 verfügbar sind, werden aktuell verfügbare Daten verwendet. Die Angaben beziehen sich auf das Territorialprinzip. Für den Luftverkehr liegen zudem Angaben zum internationalen Flugverkehr vor.

Tabelle 3: Heutige Umweltwirkungen pro Jahr gemäss verschiedener Quellen. Daten wo nicht anders spezifiziert gemäss Territorialprinzip. Die Daten beziehen sich soweit möglich auf das Jahr 2010. P = Personen, G = Güter.

	STRASSE	SCHIENE	WASSER	LUFT	SUMME
Energie	P: 180.5 PJ G: 35 PJ	P: 8.7 PJ G: 3.2 PJ	1.5 PJ	3.4 PJ Inkl. internat. Flugverkehr: 61 PJ	233 PJ Inkl internat. Flugverkehr: 291 PJ
Quellen:	BFE, 2012, Daten für das Jahr 2010, gleiche Systemgrenzen wie Transportleistung gemäss ARE, 2016. Daten für den Personenverkehr auf der Strasse korrigiert um den Tanktourismus (Methode gemäss INFRAS und ETHZ-CEPE 2010, Daten für 2010 gemäss Keller (2015)). Für das Jahr 2040 wenden wir in diesem Bericht keine Korrektur für den Tanktourismus an.				
CO ₂	P: 14.4 Mio. t G: 2.6 Mio. t	0.03 Mio. t	0.11 Mio. t	1.2 Mio. t Inkl. internat. Flugverkehr: 4.4. Mio. t	21.5 Mio. t
Quellen:	BAFU, 2017: Daten für 2010 für Strasse und Luft. Daten für Schiene und Wasser stammen aus BFS 2017A und beziehen sich auf das Jahr 2015.				
PM10 und NO _x (stellvertretend für Luftschadstoffe)	PM10: 3'740 t NO _x : 39'500 t	PM10: 1'260 t NO _x : 540 t	PM10: 50 t NO _x : 1'240 t	PM10: 30 t NO _x : 2'080 t Inkl internat. Flugverkehr: PM10: 150 t NO _x : 17'700 t	PM10: 5'090 t NO _x :43'350 t Inkl internat. Flugverkehr: PM10: 5'210 t NO _x :58'970 t
Quellen	BAFU, 2018B: Daten für 2010 (gerundet), aus Annex 1, Table 1. Für den Luftverkehr wird nicht nur «Landing und Take-off (LTO)» berücksichtigt, sondern auch «cruising».				
Lärm	Tag: 1.1 Mio P Nacht: 1 Mio P	Tag: 16'000 P Nacht: 87'000 P	Keine Angaben.	Tag: 24'000 P Nacht: 75'000 P	Keine Angaben.
Lärm	Angaben zu lärmbelasteten Personen (P) gemäss Immissionsgrenzwerten der Schweizer Lärmschutzverordnung (LSV) fürs Wohnen (Empfindlichkeitsstufe II): Schalldruckpegel tagsüber 60dB(A), nachts 50dB(A). Strassen, Schiene und Luftverkehr: BAFU, 2018A (Referenzjahr 2015). Zur Gesamtzahl lärmbelasteter Personen durch den Verkehr fehlen Angaben. Vielfach gibt es Mehrfachbelastungen rings um Flughäfen sowie entlang von Bahngleisen und Strassen. Die Angaben zur Lärmbelastung schliessen internationale Starts- und Landungen des Luftverkehrs ein.				
Fläche/Zerschneidung	838 km ²	95 km ²	k.A.	19 km ²	952 km ²
Quellen	Flächenverbrauch (BFS, 2017A, Daten für das Jahr 2009), keine Angaben für Landschaftszerschneidung.				
Anderes	Keine Angaben.				

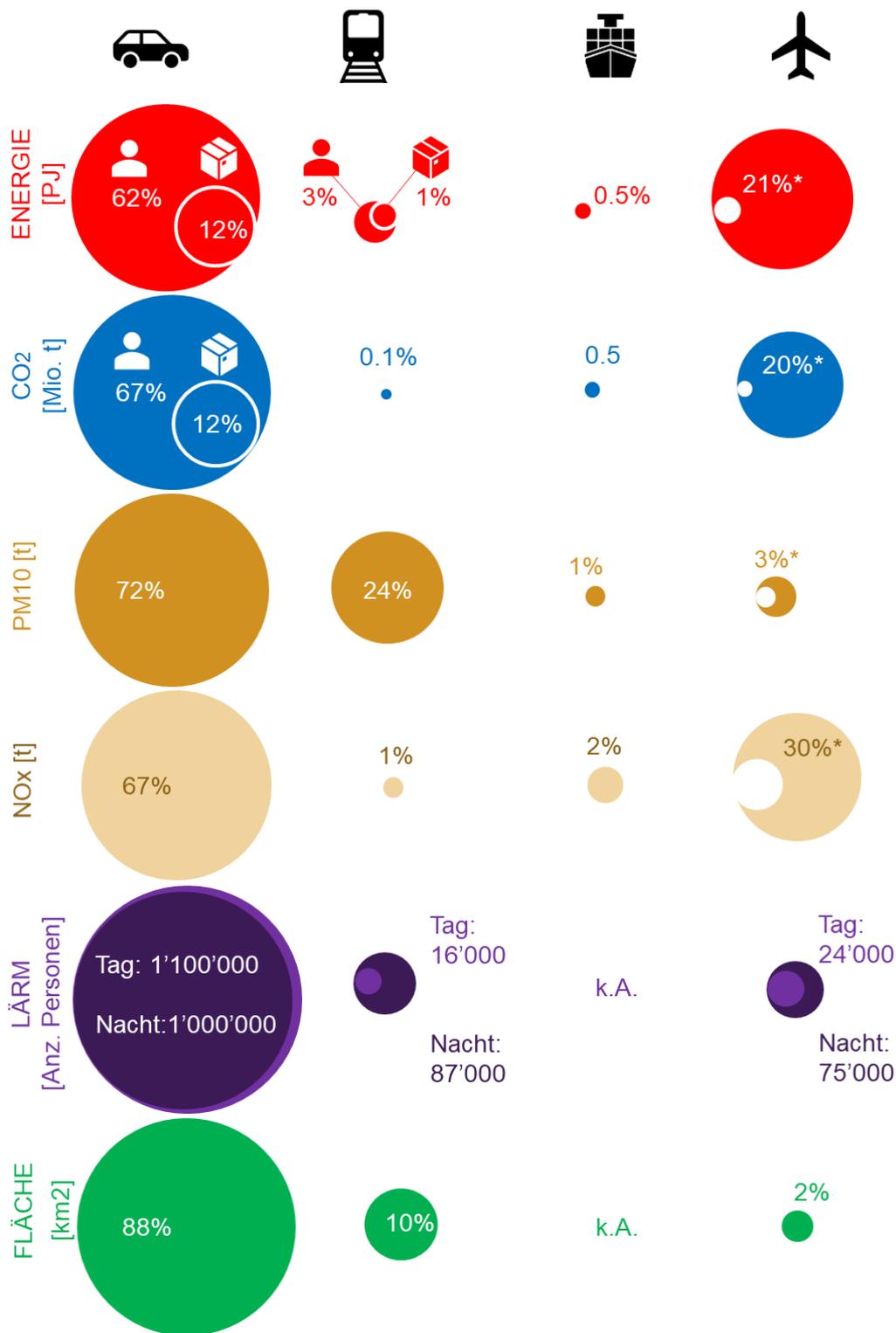


Abbildung 2: Heutige Umweltwirkungen für die Verkehrsträger Strasse, Schiene, Wasser und Luft. Angaben gem. Territorialprinzip. Beim Luftverkehr sind die Umweltwirkungen mit Ausnahme von Lärm und Fläche sowohl gemäss Territorial-, als auch Inlandsprinzip dargestellt (vgl. Tabelle 1). Energieverbrauch (rot), CO₂-Emissionen (blau), PM10 (braun), NO_x (beige), Anzahl lärmbelästigte Personen (violett)⁴, Flächenverbrauch (grün).

⁴ Keine prozentualen Angaben möglich da insgesamt betroffene Anzahl Personen nicht bekannt.

Der heutige Anteil des Personen- und Güterverkehrs je Verkehrsträger an den Umweltwirkungen wird im Folgenden diskutiert. Wo nicht anders spezifiziert, verwenden wir das Territorialprinzip. Quellenangaben finden sich in Tabelle 3.

Der *Strassenverkehr* ist der Hauptverursacher der aufgeführten Umweltwirkungen. Er verbraucht deutlich mehr Energie als die übrigen Verkehrsträger (total 74%), wobei der Personenverkehr mehr als das fünffache des Güterverkehrs verbraucht. Aufgrund der fast ausschliesslich fossilen Energieträger verursacht der Strassenverkehr einen Grossteil der CO₂- (79%) und NO_x-Emissionen (67%) und einen relevanten Anteil der Emissionen weiterer Luftschadstoffe (SO₂, volatile organische Kohlenstoffe und NH₃) (BAFU, 2018B). Auch bei PM10 ist der Beitrag des Strassenverkehrs gross (72%), dazu führen nebst dem Verbrennungsprozess auch Reifenabrieb und Aufwirbelung (BAFU, 2018B). Der Strassenverkehr ist ferner die grösste Lärmquelle (1.0 Mio belästigte Personen nachts) und der grösste Flächenverbraucher mit 88% Flächenanteil an allen Verkehrsinfrastrukturen.

Der Beitrag des Schienenverkehrs zu den Umweltwirkungen ist klein bis mittel. Der Energieverbrauch der Schiene beträgt 4% aller Mobilitätsenergie. Der Schienenverkehr wird fast ausschliesslich mit Strom betrieben (BFE, 2012) und die Energiebereitstellung erfolgt im Gegensatz zum Strassenverkehr mehrheitlich erneuerbar: Der Schweizer Produktionsmix besteht vereinfacht aus 60% Wasserkraft und 40% Nuklearstrom, der Bahnstrommix im 16²/₃-Hz-Netz hingegen im Jahr 2016 zu 90% aus Wasserkraft. Daher sind die CO₂-Emissionen über 500-mal geringer als die des Strassenverkehrs⁵. Der Schienenverkehr hat einen relevanten Anteil von 24% an den Emissionen von PM10, dagegen nur 1% an denen von NO_x. Er hat einen mittleren Beitrag an der Lärmbelastung (87'000 belästigte Personen nachts) und am Flächenverbrauch (10%).

Das Verkehrsaufkommen auf dem Wasser ist gering, die Umweltwirkungen wenig relevant. Bei nationalen Strategien für Klima, Lärm und Fläche ist die Mobilität auf dem Wasser meist nicht berücksichtigt.

Der Luftverkehr gemäss Territorialprinzip trägt nur wenig zu den Umweltwirkungen bei. Wenn aber der internationale Luftverkehr mitberücksichtigt wird, ist der Beitrag relevant; dies wird hier diskutiert. Der Gesamtenergieverbrauch des Luftverkehrs beträgt unter Einbezug des internationalen Luftverkehrs 21% und wird nur vom Personenverkehr auf der Strasse übertroffen. Die Energiebereitstellung erfolgt fossil, entsprechend bedeutend sind die CO₂-Emissionen (20%) und die NO_x-Emissionen (30%), sowie auch die Emissionen von SO₂ (BAFU, 2018B). Die Emissionen von PM10 sind dagegen gering (3%). Der Luftverkehr verursacht ferner eine relevante Lärmbelastung (75'000 belästigte Personen nachts). Der Flächenbedarf ist dagegen im Vergleich zum Strassen- und Schienenverkehr gering (2%).

Exkurs: Umweltwirkungen des internationalen Verkehrs

Rund 80% der internationalen Pkm entfallen auf den Luftverkehr, der hier berücksichtigt wird. Dies ist ein relevanter Teil des Energieverbrauchs sowie der CO₂- und NO_x-Emissionen des Personenverkehrs (Die Angaben umfassen Hin- und Rückweg, sowie vor Ort zurückgelegte Distanzen). Nicht betrachtet wird dagegen der internationale Güterverkehr. Personen- und Güterverkehr im Ausland

⁵ Aus historischen Gründen ist der Wasserkraft-Anteil des Bahnstroms hoch. Zudem strebt die Bahn gem. Positionspapier zur Energiestrategie (SBB, 2015) den Umstieg auf 100% erneuerbare Energie an.

haben pro Einheit (Pkm, resp. Tkm) in der Regel höhere Umweltwirkungen als im Inland, da die Vorschriften weniger streng oder Fahrzeugflotten im Durchschnitt etwas älter sind, oder Verkehrsanteile auf noch schwach regulierte Transporte entfallen (z.B. Schwefeldioxidemissionen der Hochseeschifffahrt).

3.2 Ziele gemäss Strategien und Perspektiven

Im Folgenden werden Ziele und Richtwerte von 15 wichtigen Strategien und Perspektiven in Bezug auf die Umweltwirkungen eines zukünftigen Mobilitätssystems beschrieben (siehe Übersicht in Anhang A1, Tabelle 6). Neben generellen Zielen und Richtwerten in Bezug auf die Umweltwirkungen des Verkehrs beinhalten die meisten Strategien und Perspektiven spezifische Angaben zum Energieverbrauch, zu CO₂- und weiteren Emissionen, zu Lärmemissionen und zur Inanspruchnahme von Fläche. Die Ziele und Richtwerte gelten im Allgemeinen nach dem Territorialprinzip. Eine Diskussion relevanter Umweltwirkungen gemäss Inlandsprinzip, respektive Lebenszyklusperspektive, findet sich am Ende des Kapitels in einem Exkurs. Eine Zusammenfassung der Umweltziele der untersuchten Strategien und Perspektiven findet sich in Anhang A1.

Umweltwirkungen allgemein

Mehrere Strategien und Perspektiven äussern allgemeine Ziele in Bezug auf die Umweltwirkungen. Das Verkehrssystem der Zukunft soll umweltverträglich sein (BR, 2016B). Bis 2030 (UVEK, 2016) resp. bis 2040 (UVEK, 2017B) sollen sich nachteilige Auswirkungen des Verkehrs (insb. durch Emissionen) auf Umwelt und Bevölkerung deutlich reduzieren. Gemäss dem Orientierungsrahmen 2040 (UVEK, 2017B) soll das UVEK weitere Massnahmen zur Reduktion von Emissionen ergreifen und so zur Verminderung der Belastung von Mensch und Umwelt, sowie zur Erhaltung und Steigerung der Lebensqualität beitragen. Dabei ist eine konsequenterere Umsetzung von Massnahmen an der Quelle anzustreben: Die Wege und das Verkehrsaufkommen sollen reduziert und eine bessere Nutzung bestehender Infrastrukturen gegenüber einem Kapazitätsausbau bevorzugt werden (BR, 2016B, UVEK, 2017B). In Bezug auf Verkehrsträger soll das Netz für Langsamverkehr (LV) sicher, attraktiv und leicht zugänglich werden (BR, 2016B). Die Anteile von LV und ÖV am Modalsplit sollen steigen, zudem sollen die Wege multimodaler werden (ARE, 2016; EC, 2016). Ferner soll Verkehr von der Strasse auf die Schiene verlagert werden (BR, 2016B). Nutzer sollen weitgehend für interne und externe Kosten aufkommen, damit das Verkehrssystem langfristig und verursachergerecht finanziert wird (UVEK; 2017B). Diese Ziele können als Beitrag zur Vision verstanden werden, die Belastbarkeitsgrenzen des Planeten zu respektieren, wie sie in der Strategie Nachhaltige Entwicklung (BR, 2016B) und den Massnahmen zur Grünen Wirtschaft (BAFU 2013, BAFU 2016) verankert sind.

Energieverbrauch

Die Energieeffizienz des Verkehrs soll erhöht und der Anteil nachhaltiger Energieträger erhöht werden (UVEK, 2017B). Das Neue-Energiepolitik-Szenario der Energieperspektiven (BFE, 2012) legt dar, welchen Beitrag der Verkehr leisten muss, um das Ziel von 1–1.5 t CO₂-Emissionen pro Person im Jahr 2050 zu erreichen: Im Zeitraum 2010–2040 muss der Energieverbrauch des Verkehrs um 49% reduziert werden (von 233 PJ auf 118 PJ) – dabei ist der internationale Luftverkehr

nicht berücksichtigt⁶. Das NEP-Szenario ist das ambitionierteste der drei Szenarien der Energieperspektiven; es ist die Grundlage für die im Energiegesetz festgehaltenen Richtwerte für das Jahr 2035 für den Energie- und den Stromverbrauch pro Kopf. Es ist zudem im Einklang mit internationalen Zielen (UN, 2015). Zur angestrebten Reduktion des Primärenergiebedarfs soll insbesondere der Personenverkehr auf der Strasse beitragen. Die Allokation des Energiebedarfs gemäss Energieperspektiven (BFE, 2012) auf die vier Verkehrsträger, sowie Personen- und Güterverkehr wird in Abbildung 3 dargestellt.

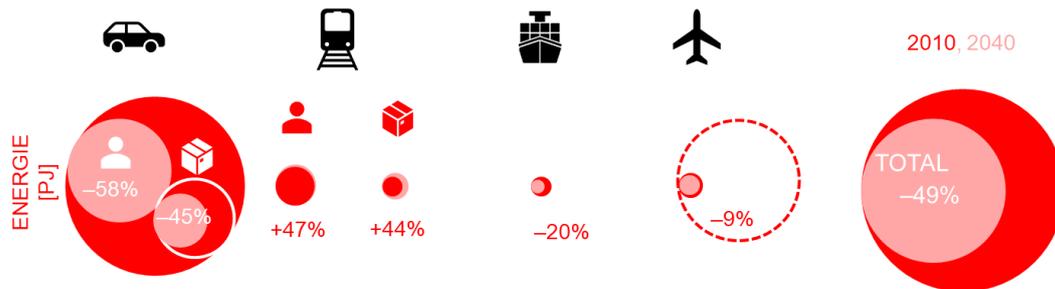


Abbildung 3: Reduktion des Energieverbrauchs je Verkehrsträger gemäss Territorialprinzip (Energieperspektiven, NEP-Szenario (BFE, 2012)).
Hinweis: Die Kreisgrössen von 2010, welche die Allokation des Energieverbrauchs je Verkehrsträger darstellen, schliessen zwecks Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Abbildungen den Beitrag internationaler Flüge ein (gestrichelter Kreis).

CO₂-Emissionen

Gemäss Schweizer Klimazielen sollen die Treibhausgas-Emissionen des Transports reduziert werden (2015B). Gemäss BAFU (2017) soll bis 2040 eine weitgehende CO₂-Neutralität erreicht werden. Im Einklang mit der Reduktion des Energiebedarfs des Verkehrs skizzieren die Energieperspektiven (BFE, 2012) im NEP-Szenario eine Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs um 75% im Zeitraum 2010 – 2040 (insgesamt sieht das NEP-Szenario für die gesamten energiebedingten Emissionen im selben Zeitraum eine Senkung um 59% vor). Die Energieperspektiven beziehen sich dabei auf das Territorialprinzip und berücksichtigen den internationalen Verkehr, bei dem insb. der Luftverkehr ins Gewicht fällt (vgl. Diskussion in Kap. 2) nicht. Dazu sollen emissionsfreie/ -arme Fahrzeuge zum Einsatz kommen (UVEK, 2006). Einzelne Verkehrsträger müssen dazu in Zukunft folgende Vorgaben einhalten:

- Strassenverkehr Personen: Neuwagen emittieren im Schnitt 35 g CO₂/ km (BFE, 2012)
- Strassenverkehr Güter: Neue Nutzeleichtfahrzeuge emittieren im Schnitt 85 g CO₂/ km (BFE, 2012)
- Flugverkehr: eine Reduktion der Emissionen wird angestrebt (BR, 2016B). Die Ziele der europäischen Union sind im Vergleich dazu ambitionierter: Im Zeitraum 2016 – 2050 sollen die Emissionen des Flugverkehrs je nach Szenario reduziert werden um 47 – 49%, wobei der Grossteil der Reduktion nach 2030 stattfinden soll (EC, 2016).

In Abbildung 4 wird die resultierende Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs gemäss NEP-Szenario der Energieperspektiven wiedergegeben. Für die einzelnen

⁶ Berechnung aus Angaben der Energieperspektiven zum NEP-Szenario (BFE, 2012, Kap. 8.4 und 8.5). Nicht berücksichtigt wurden Angaben zu «Offroad / Nicht-Verkehr»: z.B. Baumaschinen, Militär und Gartenpflege.

Verkehrsträger bestehen in den untersuchten Strategien und Perspektiven keine Richtwerte oder Ziele. Aus der Abbildung wird jedoch ersichtlich, dass primär der Verkehrsträger Strasse zur Emissionsreduktion beitragen kann (und muss), während die Entwicklung der anderen Verkehrsträger einen kleineren Einfluss haben.

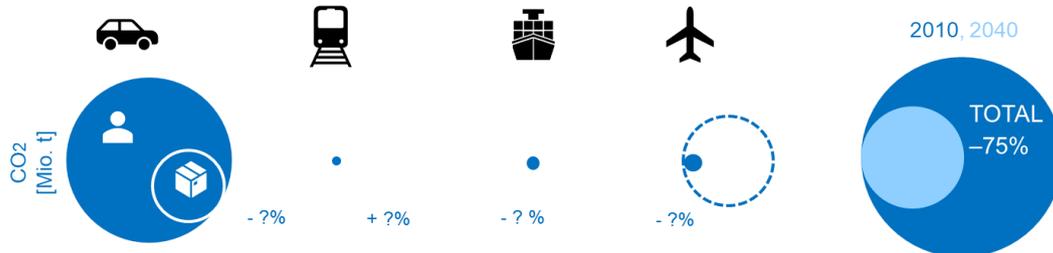


Abbildung 4: Reduktion der CO₂-Emissionen gemäss Territorialprinzip. Hinweis: Die Kreisgrößen von 2010, welche die Allokation der Emissionen je Verkehrsträger darstellen, schliessen den Beitrag internationaler Flüge ein (gestrichelter Kreis). Angaben zur Allokation der Reduktion auf die einzelnen Verkehrsträger fehlen (symbolisiert durch Fragezeichen).

Luftschadstoff-Emissionen

Luftverunreinigungen (und Lärm) werden grundsätzlich gemäss Umweltschutzgesetz (USG, Art. 11) bei der Quelle begrenzt und unabhängig der bestehenden Umweltbelastung vorsorglich so weit begrenzt, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Falls die bestehende Belastung übermässig ist, werden die Emissionsbegrenzungen verschärft.

Die Emissionen von Luftschadstoffen, respektive die daraus resultierende Umweltbelastung und Gesundheitsrisiken sollten reduziert werden (BR, 2016B; UVEK, 2017B; BAFU, Stand 2017; UN, 2015; EC, 2015). Genannt werden folgende quantitativen Reduktionsziele gegenüber 2005 (ohne Zieljahr) gemäss BR (2009):

- Stickoxide (NO_x): Reduktion der Emissionen um ca. 50% (dazu gehören Stickstoffmonoxid und -dioxid).
- Flüchtige organische Verbindungen: Reduktion der Emissionen um ca. 20% – 30% (dazu gehören Kohlenwasserstoffe HC).
- Feinstaub-Emissionen (PM₁₀, d.h. Partikel kleiner als 10 Mikrometer): Reduktion um ca. 45% (bezogen auf die Masse).
- Ammoniak-Emissionen: Reduktion um ca. 40%.
- Kanzerogene Stoffe wie z.B. Russ: die Emissionen sollen so weit wie technisch möglich und verhältnismässig reduziert werden.
- Schwefeldioxid: Ein Wiederanstieg der Emissionen soll verhindert werden.

Für die Zielerreichung massgebend sind die Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) (BR, 1985, Anhang 7). Quantitative Emissionsziele für einzelne Sektoren (wie den Verkehr) können daraus rechtlich nicht abgeleitet werden. Zur Annäherung wird hier aber angenommen, dass die obengenannten Ziele gleichermassen auch für die einzelnen Sektoren gelten.⁷

⁷ Die Quantifizierung ist als erste Näherung zu verstehen. In zweiter Näherung könnte eine Strasse mit überschrittenen Immissionsgrenzwerten (IGW) betrachtet werden. Dabei könnte die notwendige Emissionsreduktion des Verkehrs abgeschätzt werden, damit die IGW eingehalten werden.

Im Folgenden werden stellvertretend für die heterogene Gruppe der Luftschadstoffe PM₁₀ und NO_x betrachtet. Beide entstehen bei Verbrennungsprozessen; zusätzlich werden PM₁₀ bei Abrieb- und Aufwirbelungsprozessen freigesetzt.

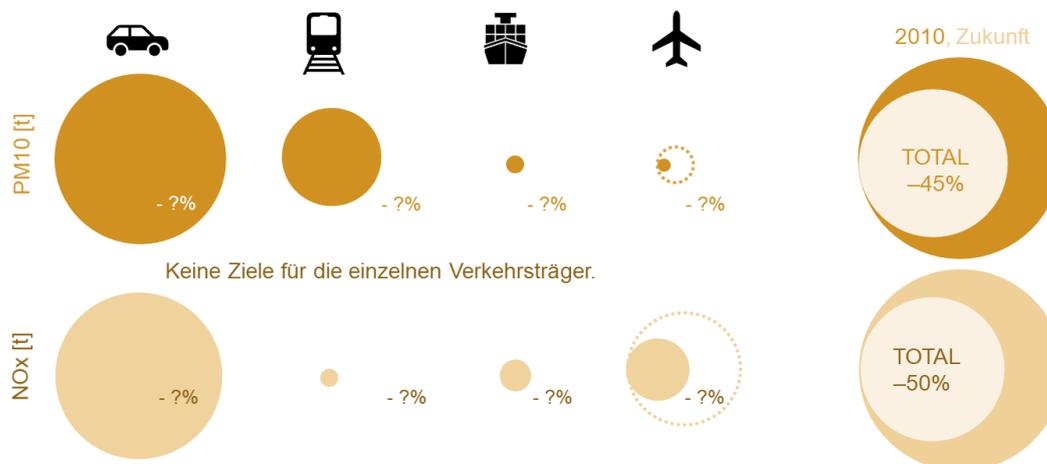


Abbildung 5: Reduktion der Emissionen von PM₁₀ und NO_x gemäss Territorialprinzip gegenüber 2005 (Das Zieljahr ist nicht bekannt). Hinweis: Die Kreisgrößen stellen die Allokation der Emissionen je Verkehrsträger für das Jahr 2010 dar. Sie schliessen den Beitrag internationaler Flüge ein (gestrichelter Kreis). Angaben zur Allokation der Reduktion auf die einzelnen Verkehrsträger fehlen (symbolisiert durch Fragezeichen).

Lärmemissionen

Die Bevölkerung soll vor schädlichem oder lästigem Lärm geschützt werden und die Lärmerzeugung soll vermindert, beziehungsweise vermieden werden, das gilt auch für den Verkehr (BR, 2016B; BAFU, 2018A), insbesondere im Strassen-, Schienen- und Luftverkehr (BR, 2015A; UN, 2015; EC, 2015). Bis 2030 soll die Lärmbelastung der Bevölkerung reduziert werden und die Belastungsgrenzwerte gemäss Schweizer Lärmschutzverordnung (LSV) sollen soweit möglich eingehalten werden (BR, 1986; UVEK, 2016). Ruhige Gebiete sollen erhalten und wo notwendig geschaffen werden. Die Belastungsgrenzwerte gemäss LSV (BR, 1986) betreffen die Planungswerte für künftige Anlagen, Immissionsgrenzwerte und Alarmwerte. Sie unterscheiden sich für die Bereiche Erholung, Wohnen, Wohnen/Gewerbe und Industrie.

Zur Erreichung dieser Ziele sollen die Lärmemissionen an der Quelle reduziert werden, insb. im Bereich Verkehr. Dazu soll das Verursacherprinzip gestärkt werden, um Anreize, z.B. bei der Besteuerung, für die Senkung der Lärmbelastung zu setzen. Weiter sollen lärmarme Technologien gefördert werden, z.B. lärmarme Beläge und Reifen, betriebliche Massnahmen. Weiter soll die Förderung von Ruhe und Erholung bei der Siedlungsentwicklung berücksichtigt werden. Zudem soll die Lärmbelastung überwacht werden und die Lärmbetroffenen, aber auch die Politik besser informiert werden: über die Entwicklungen und die gesundheitlichen Auswirkungen (BAFU, 2018A; BR, 2015A).

Flächenverbrauch und Landschaftszerschneidung

Für den Verkehr wird überwiegend versiegelte Fläche benötigt, insbesondere für Strassen, Wege, Schienen, Parkplätze, Flughäfen, Bahnhöfe und Haltestellen. Insgesamt entfällt ein Drittel der Siedlungsfläche auf die Verkehrsinfrastruktur (BFS, 2017A). Für die Verkehrsflächen werden aus den Strategien folgende Ziele abge-

leitet: Der Pro-Kopf-Flächenverbrauch soll stabilisiert, oder sogar verringert werden (BAFU, Stand 2017). Weiter wird das Ziel gesetzt, der Landschaftszerschneidung aufgrund wachsender Verkehrsflächen entgegenzuwirken (BR, 2016B, Schweizerische Eidgenossenschaft, 2012). Dazu sollen Flächen geschont und das bestehende System vor weiteren Aus- und Neubauten der Infrastruktur ausgeschöpft werden (UVEK, 2017B). Unter anderem soll dazu die Auslastung der Strassen steigen (ARE, 2016).

Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass in der Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012-2015 (BR, 2012) – also im Vorgängerdokument der aktuell gültigen Nachhaltigkeitsstrategie – quantitative Ziele zum Flächenverbrauch bestanden. Der Pro-Kopf-Flächenverbrauch inklusive Verkehrsinfrastrukturen sollte bei 400 m² stabilisiert werden (BR, 2012). Der beobachtete Pro-Kopf-Flächenverbrauch stieg im Zeitraum von 1985 bis 2009 stark an auf 407 m² (BFS, Stand 2013), mit Ausnahme von Gebieten mit starken Urbanisierungs- und Verdichtungstendenzen wie z.B. die Kantone Aargau und Waadt, wo er sich reduzierte. Die Bandbreite des Pro-Kopf-Flächenverbrauchs reicht von 138 m² in städtischen Gebieten, bis zu 827 m² in ländlichen Gebieten. Bei den Verkehrsinfrastrukturen fand seit 1970 ein sehr starker Ausbau insbesondere bei Autobahnen statt (BFS, 2017A), deren landschaftszerschneidende Wirkung tendenziell gross ist.

3.3 Aggregiertes Zielsystem der Umweltwirkungen

Das skizzierte Zielsystem sieht sehr grosse Reduktionen der Umweltwirkungen vor bezüglich Energieverbrauch und CO₂-Emissionen, gefolgt von den Luftschadstoffen. In Bezug auf Lärm ist das Ausmass der Reduktion nicht spezifiziert. Weiter soll der Flächenverbrauch pro Person stabilisiert, oder verringert werden – damit wird möglicherweise implizit toleriert, dass dieser aufgrund des Bevölkerungswachstums zunimmt.

In Tabelle 4 findet sich ein Zielsystem. Es besteht aus den vorgängig genannten Zielen und Richtwerten nach dem Territorialprinzip, sowie daraus resultierenden und näherungsweise abgeschätzten Umweltwirkungen der Mobilität bis 2040. Dargestellt sind Energie, CO₂, Luftschadstoffe, Lärm und Fläche, sowie Anderes. Letzteres steht als Platzhalter für potenziell wichtige weitere Umweltwirkungen, die hier nicht berücksichtigt wurden, wie z.B. nicht ionisierende Strahlung.

Eine Diskussion möglicher Zielkonflikte und Widersprüche zwischen den Strategien und Perspektiven findet sich im Anschluss an die Diskussion der Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der Mobilität in Kapitel 4.2.

Tabelle 4: Zielsystem zur Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrs im Zeitraum 2010–2040 (Territorialprinzip). P = Personen, G = Güter. Einstufung proportional zum Anteil an den Umweltwirkungen 2010: gross = >70%, mittel = 10–70%, klein = 2–10%, minim <= 1%. Wo Daten fehlen, werden qualitative Hinweise auf den Beitrag zur Zielerreichung gemacht.
 * Zunahme aufgrund des Ziels, die Personen-/Gütertransporte von der Strasse auf die Schiene zu verlagern
 ** CO₂-Reduktion: Wert für 2040 aus den Energieperspektiven, NEP-Szenario, Reduktionsziel für Strassenverkehr gemäss Anteil an Emissionen,
 *** PM10 und NO_x: Als Näherung verwendet wurde das Reduktionsziel gegenüber 2005 (Zieljahr nicht bekannt).
 **** Lärm: Für Strasse, Schiene und Luftverkehr gelten die LSV-Grenzwerte,
 ***** Fläche: Die Stabilisierung des Pro-Kopf-Flächenverbrauchs geht – bei einem Bevölkerungswachstum um 28% – mit einer Zunahme der Verkehrsflächen einher; für ihre Stabilisierung wäre eine entsprechende Reduktion des Pro-Kopf-Flächenverbrauchs nötig.

	STRASSE	SCHIENE	WASSER	LUFT	ALLE
Energie	P: -58% G: -45%	P: +47% * G: +44% *	-20%	-9%	-49%
CO ₂	Gross	Minim	Minim	Klein inkl. internat. Ver- kehr: mittel	-75%** (resultierender Wert)
PM10 und NO _x stv. für Luftschadstoffe	Gross	PM10: mittel NO _x : minim	Klein	Klein inkl. internat. Ver- kehr: für NO _x mittel	PM10: -45 NO _x : -50%*** (Näherung)
Lärm	Gross Einhaltung LSV	Klein - mittel Einhaltung LSV	k.A.	Klein Einhaltung LSV	Reduktion auf Grenzwerte LSV****
Fläche/ Zerschneidung	Gross	Klein	k.A.	Klein	Zunahme/ Stabilisierung *****
Anderes	Platzhalter für weitere zu minimierende Umweltwirkungen				

Exkurs: Zielsystem, Inlandsprinzip und Lebenszyklusperspektive

Dem Anspruch dieses Berichts, sämtliche Umweltwirkungen gemäss dem Inlandsprinzip einzubeziehen, kann das Konsenssystem mit den Strategien und Perspektiven des Bundes nicht gerecht werden. Das liegt vor allem daran, dass die meisten sich auf das Territorialprinzip beziehen. Damit beziehen sie die Auswirkungen von Ausländern in der Schweiz ein, die Auswirkungen der Schweizer Bevölkerung im Ausland jedoch nicht. Grosse Diskrepanzen zum Inlandsprinzip ergeben sich vor allem durch die Vernachlässigung des internationalen Luftverkehrs und des Güterverkehrs im Ausland. Das Zielsystem wird auch der Lebenszyklusperspektive nicht gerecht: Die Umweltwirkungen der Herstellung und Beseitigung von Fahrzeugen und Infrastruktur, sowie der Energiebereitstellung werden in den Strategien und Perspektiven nicht angesprochen.

Unter dieser Betrachtung zeigen sich mögliche Widersprüche zwischen den Zielen: So kann eine starke Zunahme der erneuerbaren Energieproduktion zur Versorgung des Verkehrs mit emissionsfreiem Strom gleichzeitig zu einer Zunahme des Flächenverbrauchs führen. Die Elektrifizierung des Verkehrs erhöht die Umweltwirkungen in der Vorkette (Herstellung von Batterien).

Kernaussagen dieses Kapitels

Die heutigen Umweltwirkungen des Verkehrs sind beträchtlich. Sie werden vom Personenverkehr auf der Strasse dominiert. Dieser ist ausschlaggebend für das Ziel einer starken Reduktion (oder zumindest Stabilisierung) der Umweltwirkungen bis 2040.

4. Einflussfaktoren eines Mobilitätssystems mit geringen Umweltwirkungen

In einem ersten Schritt werden die Elemente eines Mobilitätssystems mit geringen Umweltwirkungen identifiziert, indem die Summe aller Umweltwirkungen der Mobilität vereinfacht durch eine Formel dargestellt wird. Das Zusammenspiel der Elemente in der Formel wird im Rahmen zweier Beispiele verdeutlicht. Anschliessend werden für jedes Element der Formel systematisch Einflussfaktoren mit dem Potenzial zur Reduktion der Umweltwirkungen verdeutlicht.

4.1 Elemente des Mobilitätssystems

Die Elemente eines Mobilitätssystems mit geringen Umweltwirkungen können von der Kaya-Formel zur Berechnung der aggregierten Umweltwirkungen abgeleitet werden (Kaya & Yokobori, 1989; SCCER, 2017). Die Umweltbelastung des Personenverkehrs setzt sich grundsätzlich wie folgt zusammen:

- Anzahl Personen die unterwegs sind
- Anzahl Kilometer, die jede Person zurücklegt
- Anzahl Fahrzeugkilometer pro Personenkilometer (z.B. 1 FzKm/Pkm für ein Fahrrad, 0.6 FzKm/Pkm für ein Auto (berechnet aus der mittleren Belegung pro Fahrzeug in der Schweiz (BFS, ARE, 2017)) und 0.008 Km/Pkm für einen Zug (Berechnet aus Angaben der SBB (2018) für das Jahr 2017)).
- Umweltbelastungen pro Fahrzeugkilometer

Mit der Kaya-Formel können die gesamten Umweltwirkungen der Mobilität vereinfacht dargestellt werden als Summe aller im Zielsystem berücksichtigten Umweltwirkungen. Die Formel erlaubt es, das Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren auf das Mobilitätssystem mittels Überschlagsrechnungen zu diskutieren. Die zentralen Elemente (fett eingefärbt) werden im Folgenden beschrieben.

Die gesamten Umweltwirkungen (**UA**) des Personenverkehrs bestehen aus der Summe (**Σ**) der Umweltwirkungen auf allen vier Verkehrsträgern (Strasse (**Str**), Schiene (**Sch**), Wasser (**W**) und Luft (**L**)). Die Umweltwirkungen sind: Primärenergiebedarf (**Energie**), Emissionen von **CO₂**, **Luftschadstoffen** und **Lärm**, sowie Flächenverbrauch und Landschaftszerschneidung (**Fläche**) und weitere Umweltwirkungen (**Anderes**). Da nicht die beförderten Personen, sondern die Fahrzeuge zu Umweltwirkungen führen, werden die Umweltwirkungen pro Fahrzeugkilometer (**FzKm**) betrachtet. Die zurückgelegten Fahrzeugkilometer ergeben sich aus der Anzahl Personen (**P**) multipliziert mit der durchschnittlich gereisten Anzahl Personenkilometer (**Pkm**) und der Auslastung der Fahrzeuge (**FzKm/Pkm**). Eine mathematische Darstellung der beschriebenen Zusammenhänge ergibt folgende Formel; die Umweltwirkungen sind analog zum Zielsystem in Tabelle 4 eingefärbt:

$$UA(P) = \sum_{Str, Sch, W, L}^{Personen} P \cdot \frac{Pkm}{P} \cdot \frac{FzKm}{Pkm} \cdot \left(\frac{Energie}{FzKm} + \frac{CO_2}{Energie} + \frac{Luftschadstoffe}{FzKm} + \frac{Lärm}{FzKm} + \frac{Fläche}{FzKm} + \frac{Anderes}{FzKm} \right)$$

Die Umweltwirkungen des Güterverkehrs setzen sich zusammen aus der Summe der gesamten Tonnenkilometer (**Tkm**) auf Strasse, Schiene, Wasser und in der Luft, multipliziert mit den Umweltwirkungen pro Tonnenkilometer. Die Formel (und deren Einfärbung) ist analog zu derjenigen für den Personenverkehr aufgebaut:

$$UA(G) = \sum_{Str, Sch, W, L}^{Güter} Tkm \cdot \frac{FzKm}{Tkm} \cdot \left(\frac{Energie}{FzKm} \cdot \frac{CO_2}{Energie} + \frac{Luftschadstoffe}{FzKm} + \frac{Lärm}{FzKm} + \frac{Fläche}{FzKm} + \frac{Anderes}{FzKm} \right)$$

Kernaussagen der Formel

Die Umweltbelastung des Verkehrs lässt sich mathematisch vereinfacht darstellen. Grundsätzlich berücksichtigt man dafür alle zurückgelegten Personen- und Tonnenkilometer, die Ausnutzung der Passagier-, resp. Ladekapazität der Fahrzeuge und die Umweltbelastungen pro Fahrzeugkilometer.

Exkurs: Einbezug von Inlandsprinzip sowie Lebenszyklusperspektive

Die Formeln lassen es grundsätzlich zu, Umweltwirkungen nach Lebenszyklusperspektive und gemäss Inlandsprinzip einzusetzen, d.h. z.B. inklusive Frachtschifffahrt auf den Weltmeeren aufgrund von Schweizer Güternachfrage. Die Umsetzung ist allerdings aufwändig: Es müssen für jeden Verkehrsträger nicht nur die Personen- und Tonnenkilometer und die durchschnittliche Auslastung im Inland, sondern auch im Ausland erfasst werden. Weiter müssen die einzelnen Umweltwirkungen pro FzKm in den Ländern, in denen sie in relevantem Ausmass anfallen, erfasst werden.

Anhand von zwei Beispielen wird das Zusammenspiel der einzelnen Elemente der Kaya-Formel illustriert. Anschliessend werden die Elemente und deren Einflussfaktoren diskutiert.

4.1.1 Beispiel 1: Minimierung der CO₂-Emissionen durch technischen Fortschritt

Die Klimaauswirkungen des Personenverkehrs sind abhängig von folgenden Faktoren: der Anzahl Personen, den Kilometern, die jede Person zurücklegt, der Belegung des Fahrzeugs, des Energieverbrauchs pro Fahrzeugkilometer und der CO₂-Emissionen pro Energieeinheit. Gemäss Strategien und Perspektiven des Bundes ist unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums bis 2040 gegenüber 2010 mit einer Zunahme der Personenkilometer von 26% zu rechnen, d.h. sie betragen 2040 126% des Wertes von 2010 (Die Zunahme ist inkl. MIV, Velo- und Fussverkehr, ÖV und Flugverkehr im Inland). Für das Beispiel wird die Annahme getroffen, dass die CO₂-Emissionen um 75% gesenkt werden (entspricht dem NEP-Szenario der Energieperspektiven; d.h. die Emissionen des gesamten Verkehrs betragen 2040 25% des Wertes von 2010).

Die Gleichung illustriert, dass entsprechend die spezifischen CO₂-Emissionen (also das Produkt der verbleibenden Koeffizienten FzKm/ Pkm * Energie/ FzKm * CO₂/ Energie) stark reduziert werden müssen: um 80%.

$$CO_2(P) = \sum_{Str, Sch, W, L}^{Personen} P \times \underbrace{\frac{Pkm}{P}}_{+26\%} \times \underbrace{\frac{FzKm}{Pkm} \times \left(\frac{Energie}{FzKm} \times \frac{CO_2}{Energie} \right)}_{x = -80\%}$$

Berechnung:

$$Spez. Emissionen = \frac{FzKm}{Pkm} \times \left(\frac{Energie}{FzKm} \times \frac{CO_2}{Energie} \right) = \frac{CO_2(P)}{P \times \frac{Pkm}{P}} = \frac{25\% (im 2040)}{126\% (im 2040)} = 20\% (im 2040)$$

Damit die spezifischen CO₂-Emissionen im Jahr 2040 noch 20% des Wertes von 2010 betragen, müssen sie insgesamt um 80% reduziert werden. Wie die Formel zeigt, ergeben sich die spezifischen CO₂-Emissionen aus dem Produkt dreier Elemente: der Fahrzeugbelegung (FzKm/Pkm), der Energieeffizienz der Fahrzeuge (Energie/FzKm) und dem CO₂-Footprint des eingesetzten Energieträgers (CO₂/Energie). Eine Reduktion um 80% könnte daher wie folgt erreicht werden:

- **Stärker belegte Fahrzeuge.** Eine Verfünffachung der Auslastung (FzKm/Pkm reduzieren sich um 80%) ist wenig wahrscheinlich. Im Gegenteil, im MIV nahm der Besetzungsgrad in den letzten Jahren ab, derzeit sitzen im Mittel 1.6 Personen in einem Fahrzeug (BFS, ARE, 2017).
- **Effizientere Antriebe.** Eine Verfünffachung der Energieeffizienz (Energie/FzKm reduziert sich um 80%) ist nur teilweise realistisch. Gemäss heutiger Fortschrittsrate nimmt die Effizienz jährlich um ca. 1% zu. 2040 beträgt der Energieverbrauch pro FzKm dann noch ca. 74% des Werts von 2010, d.h. er hat sich um 26% verbessert.

Berechnung:

$$Wert\ neu = Wert\ alt * (1 + \text{jährl. Änderungsrate})^{Jahre}$$

$$\frac{E}{FzKm}(2040) = \frac{E}{FzKm}(2010) * (1 - 0.01)^{30} = 0.74$$

- **Emissionsärmere Energieträger.** Die prognostizierte Verlagerung von Personen- und Güterverkehr von der Strasse auf die Schiene (vgl. ARE, 2016 und Abbildung 1) trägt zwar zur Reduktion der CO₂-Emissionen bei. Für die Reduktion um 80% bis 2040 müssen aber die CO₂-Emissionen des auf der Strasse verbleibenden Verkehrs (dominiert vom MIV) reduziert werden. Dies ist durch Elektrifizierung der Fahrzeuge unter Sicherstellung einer erneuerbaren Energieversorgung technisch machbar. Die Adaptationsrate von Elektrofahrzeugen müsste allerdings entsprechend hoch ausfallen – dies ist derzeit nicht der Fall. Gemäss NEP-Szenario wird der Anteil Elektrofahrzeuge am Bestand 2040 knapp 37% betragen (EBP, 2017B; EBP, 2018). Unter der Annahme einer Effizienzsteigerung um 26% (d.h. der Energiebedarf pro FzKm beträgt 74% gegenüber 2010), müssten die Emissionen pro Joule um ca. 73% auf 26% des Wertes von 2010 gesenkt werden. Dies entspricht einer jährlichen Reduktion von 4.3%.

Berechnung:

$$\frac{CO_2}{Energie} = \frac{\frac{CO_2}{Pkm}}{\left(\frac{FzKm}{Pkm} \times \frac{Energie}{FzKm}\right)} = \frac{0.2 \text{ (im 2040)}}{(1 \text{ (im 2040)} \times 0.74 \text{ (im 2040)})} = 0.27$$

$$\text{jährl. Änderungsrate} = \sqrt[\text{Jahre}]{\frac{\text{Wert neu}}{\text{Wert alt}}} - 1$$

$$\text{jährl. Änderungsrate} = \sqrt[30]{\frac{0.27 \text{ (im 2040)}}{1 \text{ (im 2010)}}} - 1 = 0.43$$

Mit der beschriebenen kombinierten Verbesserung der Effizienz (jährlich 1%) und der eingesetzten Energieträger (jährlich 4.3%) würden sich die CO₂-Emissionen pro 100 FzKm um 80% reduzieren. Um dahin zu gelangen müssten sich in **den 30 Jahren von 2010 – 2040 die Emissionen pro 100 FzKm der Flotte jedes Jahr um 5.2% verbessern**. Liegen die Verbesserungsdaten hinsichtlich Energieeffizienz und Einsatz emissionsarmer Energieträger in den ersten Jahren unter den angegebenen Prozentsätzen – und das ist wahrscheinlich – so sind in den folgenden Jahren entsprechend höhere Verbesserungsdaten zu realisieren!

Sofern im Beispiel auch die Emissionen nach LCA-Perspektive einbezogen werden, ist das Ziel nur durch zusätzliche Bedingungen zu erreichen: Relevant sind insb. der Einsatz erneuerbarer Energien bei Importen von Strom zum Laden, sowie zur Herstellung von Batterien. Wichtig ist ferner eine Verlängerung der Lebensdauer von Batterien (TE, 2017).

Kernaussagen des Beispiels 1

Beispiel 1 zeigt, dass heute marktübliche technische Verbesserungen eine CO₂-Reduktion von 75% im Zeitraum 2010–2040 im Personenverkehr ermöglichen. Es zeigt aber auch, dass die bisherigen (bis 2017) jährlichen Änderungsdaten zur Zielerreichung nicht ausreichen.

Gemäss der Kaya-Formel gibt es vier Hebel zur Erreichung dieses Ziels – da bei den ersten drei Hebeln die Potenziale gering sind, müsste der vierte Hebel die Hauptwirkung entfalten:

- *Anzahl Pkm*: Eine Zunahme um 26% wird als gegeben angenommen.
- *Besetzungsgrad*: Wird wie diskutiert als nicht veränderlich angenommen.
- *Effizienz der Antriebe*: Verbessert sich jährlich um ca. 1% bei unveränderter Fahrzeuggrösse. Das allein reicht nicht zur Zielerreichung. Grössere Reduktionsraten würde etwas kleinere/schwächer motorisierte Fahrzeuge bedeuten.
- *Einsatz emissionsarmer Energieträger*: Die CO₂-Intensität muss sich, damit das unterstellte Reduktionsziel erreicht werden kann, stark um 73% verbessern, jährlich sind dies 4.3%.

Der massiv gesteigerte Einsatz emissionsarmer Energieträger ist technisch machbar durch Elektrifizierung der Fahrzeuge unter Sicherstellung einer erneuerbaren Energieversorgung. Allerdings ist die Adaptationsrate von Elektrofahrzeugen im Bestand zu gering – ohne wirklich wirksame Politikinstrumente enthält die Fahrzeugflotte 2040 lediglich 37% (statt der benötigten 73%) Elektrofahrzeuge (EBP, 2017B; EBP, 2018).

4.1.2 Beispiel 2: Minimierung der Umweltwirkungen durch Suffizienz

Die Reduktion der Umweltwirkungen aufgrund von Verhaltensänderungen wird in den untersuchten Strategien und Szenarien nicht berücksichtigt. Gemäss anderen Quellen sind Verhaltensänderungen aber unausweichlich. Der «Prosperity without growth»-Report (SDC, 2009) zeigt für die Vergangenheit eine durch technischen Fortschritt begründete Entkopplung der CO₂-Emissionen vom BIP: Im Zeitraum von 1975–2005 sank die CO₂-Intensität des BIP sowohl in Westeuropa, als auch weltweit um ca. 30% auf derzeit ca. 770 g CO₂/\$. Dies ist allerdings zur Erreichung der Klimaziele zu langsam: Zur Erreichung des 2°C-Ziels müsste die CO₂-Intensität des BIP künftig jährlich um 9% sinken auf einen Zielwert von ca. 14 g CO₂/\$ bis 2050. Dazu bedarf es gemäss Studie neben technischen Verbesserungen auch Verhaltensänderungen auf gesellschaftlicher und individueller Ebene.

Die Eckpunkte einer Gesellschaft, die suffizient ist hinsichtlich Ressourcen-Inanspruchnahme, werden hier wie folgt beschrieben:

- **Unveränderte Wirtschaftsleistung** mit geringerer Ressourcen-Inanspruchnahme und geringerem Konsum von materiellen Gütern.
- **Verschiebung der Konsummuster, in Richtung ressourcenextensive Sektoren:** z.B. mehr Bildung und klimaverträgliche Freizeitaktivitäten (z.B. lokale Aktivitäten mit wenig Infrastrukturbedarf wie Wandern, Musizieren, etc.), dagegen weniger (Flug-)Reisen und Ansprüche ans Wohnen.
- **Verschiebung zu «better instead of more» innerhalb der Sektoren:** z.B. mehr Ausgaben für sehr effiziente Häuser und Autos, anstatt für grosse Häuser und Autos. Damit ändern sich wesentliche Produkteigenschaften (im Gegensatz zur Effizienzsteigerung) wie z.B. m² Wohnfläche und Motorleistung eines Autos.

Der Einfluss von Suffizienz wird anhand der Gleichung aus Beispiel 1 für den Personenverkehr diskutiert. Es wird folgende Annahme getroffen:

- **Suffizienterer Fahrzeugkauf:** Aufgrund von Suffizienz-Überlegungen wird die durchschnittliche Motorleistung im MIV (der Hubraum) gegenüber heute reduziert: Für jede Fahrzeugkategorie wird jeweils die geringste angebotene Motorleistung gewählt (d.h. die Konsumenten kaufen keine kleineren Fahrzeuge, verzichten aber auf die heute damit gekoppelten Motorenleistungen⁸). Dadurch kann die Energieeffizienz des MIV unter Realbedingungen im Alltag ohne technische Verbesserungen pro FzKm um 30% gesteigert werden:

Durch diese Verhaltensänderungen wird es einfacher, mit den Massnahmen aus Beispiel 1 (nur technische Effizienzsteigerung und Energieträgerwechsel unter der Annahme von 26% Zunahme der Pkm und einer konstanten Belegung der Fahrzeuge) die Emissionen des Personenverkehrs gegenüber 2010 um 80% zu reduzieren:

- **Effizientere Antriebe.** Es wird angenommen, dass auch kleine Motoren jährlich ca. 1% effizienter werden. Zusammen mit der jährlichen Verringerung des Hub-

⁸ Heute verfügbare Fahrzeuge sind für die zugelassenen Anwendungen in der Schweiz übermotorisiert. So kann man z.B. auch mit der schwächsten Motorisierung jedes verfügbaren Fahrzeugmodells mit voller Besetzung Passstrassen fahren. Weiter ist das einzige Fahrzeug mit einer Höchstgeschwindigkeit unter 160 km/h der Smart.

raums wird damit die Effizienz insgesamt jährlich um 2% gesteigert: Der Energieverbrauch pro FzKm sinkt gegenüber 2010 auf 55%. Dadurch steigt die insgesamt erzielbare Effizienzsteigerung auf 51%.

- **Emissionsärmere Energieträger.** Der zu leistende Beitrag durch emissionsarme Energieträger ist kleiner als in Bsp. 1. Benötigt wird eine Reduktion der Emissionen pro Joule um ca. 64% auf 36% des Wertes von 2010.

Berechnung (mit den Annahmen aus Bsp. 1 und den oben diskutierten Werten):

$$CO_2(P) = \sum_{Str, Sch, W, L}^{Personen} P \times \frac{Pkm}{P} \times \frac{FzKm}{Pkm} \times \left(\frac{Energie}{FzKm} \times \frac{CO_2}{Energie} \right)$$

$$\frac{CO_2}{Energie} = \frac{CO_2(P)}{Pkm \times \frac{FzKm}{Pkm} \times \frac{Energie}{FzKm}} = \frac{0.25}{1.26 \times 1 \times (0.74 \times 0.74)} = 0.36$$

Auch hier ist eine Elektrifizierung von knapp 37% des Bestands bis 2040 (EBP, 2017B; EBP, 2018) unter Verwendung erneuerbare Energie nicht ausreichend. Die Elektrifizierung müsste schneller voranschreiten.

Sofern die Emissionen gemäss LCA-Perspektive mitbetrachtet werden, gilt dasselbe wie für Beispiel 1: Bei Stromimporten zum Laden von Fahrzeugen muss auf erneuerbare Herkunft geachtet werden, Batterien müssten mit erneuerbarem Strom hergestellt werden.

Kernaussagen des Beispiels 2

Beispiel 2 zeigt, wie suffiziente Kaufentscheidungen ermöglichen können, dass eine etwas geringere Adaptationsrate von elektrischen Fahrzeugen zur gewünschten CO₂-Reduktion von 75% im Zeitraum 2010–2040 im Personenverkehr führt.

Es gelten dieselben Hebel zur Erreichung dieses Ziels wie in Beispiel 1, aber technische Verbesserungen werden ergänzt um den Kauf von Fahrzeugen mit weniger Hubraum (bei gleichem Fahrzeuggewicht und Komfort). Entsprechend verbessert sich die Effizienz der Antriebe jährlich um ca. 2%. Daher muss sich der CO₂-Footprint der eingesetzten Energieträger um 64% (statt 73% wie in Bsp. 1) verbessern. Allerdings ist selbst für die Annahme suffizienter Kaufentscheidungen die heutige Adaptationsrate von Elektrofahrzeugen für die Zielerreichung bis 2040 zu gering. Selbstverständlich könnte sich eine wesentlich raschere Zielerreichung einstellen, wenn auf persönlicher Ebene bewusst das Zurücklegen von Personen-Kilometern mit dem Auto (und Flugzeug) reduziert würde.

4.2 Einflussfaktoren

Die beiden vorangehenden Beispiele illustrieren einige Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der Mobilität. Eine Übersicht der Einflussfaktoren auf die Elemente des Mobilitätssystems findet sich in Tabelle 5 (ohne Anspruch auf Vollständigkeit), anschliessend werden sie diskutiert. Hinweise auf Einflussfaktoren gemäss Lebenszyklus-Perspektive finden sich im Exkurs am Ende des Kapitels. Zur Vereinfachung werden Personen- und Güterverkehr zusammen betrachtet.

Tabelle 5: Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der Mobilität. Jede Zeile entspricht einem Element der abgewandelten Kaya-Gleichung (gleiche Farbgebung), jede Spalte einem Einflussfaktor. Kein Anspruch auf Vollständigkeit. Mögliche Zielkonflikte werden am Ende des Unterkapitels diskutiert.

ELEMENT	ANTRIEB & ENERGIETRÄGER	VERLAGERUNG	MASSNAHMEN AM FAHRZEUG	MASSNAHMEN AN DER INFRASTRUKTUR	WEITERE INKL. INLANDS-PERSPEKTIVE & LCA-PRINZIP
P	Einflussfaktoren auf die Bevölkerung sind nicht Gegenstand des Berichts. Eine Reduktion des Bevölkerungswachstums würde die Umweltwirkungen der Mobilität reduzieren.				
$\frac{P_{km}}{P}$	Einflussfaktoren auf Kilometer pro Person sind nicht Gegenstand des Berichts. Eine Reduktion der Pkm in der Schweiz und im Ausland aufgrund von z.B. kürzeren Wegen, Suffizienz oder persönlichen Prioritäten würde die Umweltwirkungen der Mobilität reduzieren. Siehe Bsp. 2 in Kapitel 4.1.				
$\frac{FzKm}{Pkm} / \frac{FzKm}{Tkm}$	Hohe Ausnutzung der Passagier-/Ladekapazität				
$\frac{Energie}{FzKm}$	Energieeffizienter Antrieb mit minimierter Leistung ZIELKONFLIKT	Verlagerung auf LV, ÖV (und Wasser)	Reduktion Gewicht, Roll- und Luftwiderstand	Reduktion Luft- und Rollwiderstand	Reduktion Tempo Anpassung Route, Flughöhe Energieeffizienz in der Vorkette
$\frac{CO_2}{Energie}$	Antrieb für erneuerbare Energieträger, Einsatz derselben ZIELKONFLIKT	Verlagerung auf LV und ÖV			Einsatz erneuerbarer Energie in der Vorkette
$\frac{Luftschadstoffe}{FzKm}$	Antrieb für emissionsfreie Energieträger, Einsatz derselben	Verlagerung auf LV oder ÖV	Verbesserung Abgasreinigung ZIELKONFLIKT		Emissionsarme Vorkette
$\frac{Lärm}{FzKm}$	Leiser Antrieb	Verlagerung auf LV	Reduktion Lärmstehung & -ausbreitung	Reduktion Lärmstehung & -ausbreitung	Reduktion Tempo Anpassung Route, Flughöhe
$\frac{Fläche}{FzKm}$	Hohe Ausnutzung verfügbarer Fahrzeuge	Verlagerung auf LV, Wasser, oder in die Luft ZIELKONFLIKT	Regelungs-Technik zur Abstandhaltung	Tunnels, Wildtierkorridore, etc..	Flächenschonende Vorkette
$\frac{W}{FzKm}$	Platzhalter für weitere zu minimierende Umweltwirkungen.				

$\frac{FzKm}{Pkm}$ resp. $\frac{FzKm}{Tkm}$ **Ziel: Auslastung erhöhen.**

Der Einflussfaktor hierauf ist die Ausnutzung der Passagier-, respektive Ladekapazität von Verkehrsmitteln. Dies bedeutet eine Maximierung des Besetzungsgrades von Fahrzeugen und eine Minimierung von Leerfahrten/ Leerflügen.

Ersteres ist angesichts heutiger Entwicklungen schwer vorstellbar, letzteres könnte mittels passender Politikinstrumente bewerkstelligt werden.

$\frac{Energie}{FzKm}$ **Ziel: Energiebedarf pro Fahrzeugkilometer senken.**

Eine Kombination aus den folgenden Einflussfaktoren kann dies bewirken:

- Antriebswechsel auf energieeffizientere Antriebe, z.B. Elektromotor statt Verbrennungsmotor, sowie Antriebe mit weniger Leistung.
- Verlagerung von Personen- und Tonnenkilometern auf Fuss- und Veloverkehr, sowie ÖV (Allenfalls auch auf das Wasser, wobei Schiffstyp und Geschwindigkeit ausschlaggebend sind). Die Verlagerung kommt z.B. in Frage für kurze

Pendel- und Freizeitwege, oder die Feinverteilung von Warenlieferungen durch Kuriere.

- Massnahmen am Fahrzeug wie Reduktion des Gewichts, aber auch Reduktion des Roll-, Luft- und Wasserwiderstands
- Massnahmen an der Infrastruktur können den Roll-, oder Luftwiderstand reduzieren, z.B. aufgrund des Strassenbelags, oder Tunnelquerschnitts.
- Wenn Fahrzeuge durchschnittlich langsamer fahren oder fliegen, energieoptimierte Routen fahren oder fliegen, sinkt der Energiebedarf pro FzKm, z.B. indem Flugzeuge ihre Flughöhe und den Sinkflug vor der Landung anpassen.

Wie die Beispiele in Kapitel 4.1 illustrieren, ist die Zielerreichung einer Reduktion des Energieverbrauchs des Verkehrs um 25% technisch möglich. Allerdings ist sie schwer erreichbar, denn die Adaptationsraten geeigneter Technologien sind gering und beim Fahrzeugkauf werden leistungsstarke Fahrzeuge bevorzugt.

$\frac{CO_2}{Energie}$ **Ziel: CO₂-Emissionen pro Energieeinheit senken.**

Eine Kombination aus den folgenden Einflussfaktoren kann dies bewirken:

- Antriebswechsel: Umstieg auf Elektromobilität, Antriebe mit Wasserstoff, oder synthetischen Treibstoffen, mit gleichzeitigem Ausbau CO₂-armer Stromerzeugung, sowie Ausbau der Herstellung synthetischer Treibstoffe, hergestellt aus erneuerbaren Energien, z.B. für Flugzeuge.
- Verlagerung von Personen- und Tonnenkilometern auf den Fuss- und Veloverkehr, sowie den ÖV.

Die Beispiele in Kapitel 4.1 illustrieren, dass die Zielerreichung einer Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrs um 75% technisch möglich ist – aber derzeit nicht wahrscheinlich (vgl. obenstehende Argumentation zum Energiebedarf).

$\frac{Luftschadstoffe}{FzKm}$ **Ziel: Emissionen pro Fahrzeugkilometer senken.**

Stellvertretend für Luftschadstoffe werden hier NO_x und PM10 betrachtet. Für diese werden, in erster Näherung, Reduktionen um 50% resp. 45% angestrebt. Massgebend ist die Einhaltung der LRV-Immissionsgrenzwerte sowie das Vorsorgeprinzip. Folgende Einflussfaktoren können kombiniert solche Emissionsreduktionen bewirken:

- Antriebswechsel: Umstieg auf Elektromobilität, oder Antriebe mit Wasserstoff, mit gleichzeitigem Ausbau emissionsarmer Stromerzeugung.
- Verlagerung von Personen- und Tonnenkilometern auf Fuss- und Veloverkehr, sowie ÖV.
- Massnahmen am Fahrzeug wie Abgasreinigung für Verbrennungsmotoren, z.B. bei Lastwagen oder Schiffen. Dies gilt je nach Zusammensetzung auch für synthetische Treibstoffe; nur Wasserstoff verbrennt/ oxidiert emissionsfrei.

PM10 aus Abrieb und Aufwirbelung von der Strasse werden nur durch den zweiten der obigen Einflussfaktoren reduziert.

Im Zusammenspiel mit Massnahmen, welche den Energiebedarf senken und die CO₂-Emissionen vermindern, könnten die Ziele aus technischer Sicht erreichbar sein. Durch eine Reduktion der Treibstoffverbrennung könnten die Emissionen (bis auf Feinstaub-Emissionen) massiv gesenkt werden. Allerdings müsste die Adaptationsrate neuer Technologien hoch genug sein.

$\frac{\text{Lärm}}{\text{FzKm}}$ **Ziel: Lärm-Emissionen pro Fahrzeugkilometer minimieren.**

Eine Kombination folgender Einflussfaktoren kann dies bewirken:

- Antriebswechsel: Leisere Antriebstechnologien wie z.B. Elektroantriebe bringen hörbare Verbesserungen bei PKW vor allem bei niedrigeren Geschwindigkeiten, z.B. im Stop-and-go-Verkehr und im Leerlauf. Bei höheren Geschwindigkeiten wird das Rollgeräusch zur dominanten Lärmquelle (siehe UBA 2013).
- Verlagerung von Personen- und Tonnenkilometern auf Fuss- und Veloverkehr.
- Massnahmen am Fahrzeug vermindern das Rollgeräusch, Luftrauschen und die Ausbreitung des Motorengeräuschs, z.B. Triebwerksverkleidung bei Flugzeugen, dünnere und somit leisere Reifen, kleinere und leichtere Fahrzeuge, leisere Turbinen
- Massnahmen an der Verkehrsinfrastruktur vermindern die Entstehung und Ausbreitung von Lärm, z.B. lärmarme Beläge, Überdachungen, Untertunnelungen von Siedlungsgebieten, glattere Schienen und leisere Drehgestelle für Zugwagons. Der Ausbau von Infrastruktur für Langsamverkehr in lärmempfindlichen Gebieten kann zur Verlagerung auf Fuss- und Veloverkehr beitragen.
- Wenn Fahrzeuge langsamer fahren, sinken die Lärmemissionen. Die Flughöhe und Flugerlaubnis von Luftfahrzeugen über besiedelten Gebieten kann je nach Tageszeit reguliert werden.

Die Zielerreichung ist nur teilweise durch technische Massnahmen realisierbar, sie hängt ebenso stark von Politikinstrumenten ab, wie z.B. die Begrenzung der Geschwindigkeit.

$\frac{\text{Fläche}}{\text{FzKm}}$ **Ziel: Flächenbedarf/ Landschaftszerschneidung pro Fahrzeugkilometer minimieren.**

Eine Kombination folgender Einflussfaktoren kann dies bewirken:

- Maximierung der Ausnutzung der Fahrzeuge: Minimierung ungenutzter Standzeiten und damit des Bedarfs an Parkfläche, sowie der Leerfahrten und damit des Bedarfs an Strassenfläche. z.B. durch Reduktion des Privatbesitzes von Autos zugunsten von mehr Car-Sharing.
- Verlagerung von Personen- (und Tonnenkilometern) auf Fuss- und Veloverkehr, sowie Verkehr auf dem Wasser. Damit wird deutlich weniger Fläche pro Pkm benötigt. Eine Verlagerung vom Strassen- hin zum Luftverkehr könnte ebenfalls flächenschonend sein, steht aber im Widerspruch zur angestrebten Zielerreichung der übrigen Umweltwirkungen.
- Automatisierte Fahrzeuge könnten mit reduzierten Folgeabständen verkehren und die Kapazität von Strassenabschnitten und Verkehrsknoten erhöhen.

- Um den Platzbedarf und die Landschaftszerschneidung pro Fahrzeugkilometer zu minimieren könnte der Anteil der unterirdisch geführten (oder zwecks Schaffung von Wildtierkorridoren überdachten) Infrastruktur für Verkehrswege und Parkplätze erhöht werden. Weiter können Strassen, Fahrradwege und Schienen zwecks Kapazitätserhöhung kreuzungsfrei gestaltet werden. Ferner kann das Angebot von Parkplätzen und Fahrbahnschienen verringert oder in Abhängigkeit der Auslastung verteuert werden, um Nutzer zum Umsteigen auf den ÖV oder LV zu motivieren.

Das Ziel einer Stabilisierung des Flächenbedarfs pro Kopf bis 2040 könnte gelingen angesichts des prognostizierten, verhältnismässig geringen Verkehrswachstums, welches von einer Stabilisierung der Verkehrsnachfrage pro Kopf ausgeht.

Zielkonflikte und Widersprüche zwischen den Strategien und Perspektiven.

Die Diskussion der Einflussfaktoren zeigt zwei weitere Zielkonflikte auf neben den im Exkurs von Kapitel 3.3 unter Berücksichtigung des LCA-Prinzips identifizierten (Vorteile erneuerbarer Energieträger für den Verkehr versus Flächenbedarf für deren Produktion, sowie Umweltwirkungen von Elektroantrieben in der Vorkette versus Vorteilen im Betrieb der Fahrzeuge).

- Zum einen sollte im Hinblick auf den Energiebedarf, aber auch die Verwendung emissionsarmer Energieträger, Verkehr von der Luft auf die Strasse und von dieser auf die Schiene und das Wasser verlagert werden. Zur Reduktion des Flächenbedarfs und der Zerschneidungswirkung könnte umgekehrt unter anderem eine Verlagerung von Verkehr in die Luft von Vorteil sein – woraus aber Nachteile für fast alle anderen Umweltwirkungen resultieren. Die Verlagerung von der Strasse auf die Schiene ist Bestandteil verschiedener Strategien und Perspektiven, wobei auch 2040 ein relevanter Anteil des Verkehrs auf der Strasse stattfinden wird. Die Verlagerung auf das Wasser ist mangels durchgängiger Wasserwege nur in sehr begrenztem Umfang möglich – und möglicherweise aufgrund der Belastung der Gewässer z.B. durch Schleusen und Ausbaggerung nicht wünschenswert. Indem in der Schweiz lediglich Verlagerung auf die Schiene propagiert wird, wird hinsichtlich verschiedener Umweltwirkungen ein Optimum angestrebt. Grundsätzlich verringern sich Zielkonflikte, wenn externe Umweltkosten möglichst vollständig internalisiert werden, so dass die Mittelallokation und Verkehrsmittelwahl volkswirtschaftlich optimal erfolgt.
- Ein weiterer relevanter Zielkonflikt betrifft die Abgasnachbehandlung von Verbrennungsmotoren. Diese benötigt zusätzliche Energie und setzt dadurch zusätzliches CO₂ frei. Gemäss Angaben eines Automobilherstellers wurden im Zeitraum Ende 1990 bis ca. 2005 (die Angaben der Jahre danach sind aufgrund angepasster Teststrecke nicht vergleichbar) die Effizienzsteigerungen der Motoren in Bezug auf Treibstoffverbrauch gerade aufgewogen durch die Einhaltung zunehmend strengerer Luftreinhaltevorgaben (Daimler, 2014). Dieser Zielkonflikt lässt sich vermeiden durch den Umstieg von Verbrennungsmotoren auf elektrische (nicht unbedingt aber auf mit Wasserstoff betriebene, da dessen Bereitstellung mit bedeutenden Energieverlusten einhergeht). Auch suffizientes Verhalten oder eine Anpassung des Fahrzeugangebots könnte dem Energieverbrauch der Abgasnachbehandlung entgegenwirken: Weniger leistungsstarke Motoren und/oder kleinere Fahrzeuge.

Exkurs: Einflussfaktoren, Inlandsprinzip und Lebenszyklusperspektive

Das Inlandsprinzip kann berücksichtigt werden, indem neben der Mobilitätsnachfrage im Inland auch die Mobilitätsnachfrage von Schweizern im Ausland betrachtet wird. Dabei sollten dieselben Einflussfaktoren betrachtet werden wie für das Territorialprinzip. Eine Berücksichtigung des Inlandsprinzips ist wichtig, um mögliche Fehlanreize zu vermeiden. Dies könnte z.B. ein Abflug von Waren oder Personen ab Frankfurt, statt ab Zürich sein.

Die LCA-Perspektive kann berücksichtigt werden, indem ergänzende Einflussfaktoren mit Bezug zur Vorkette berücksichtigt werden. Mit Vorkette sind sämtliche, dem direkten Fahrzeugeinsatz vor- und nachgelagerte Prozesse, welche Fahrzeuge, Energieträger und Infrastruktur betreffen, gemeint: Mining, Produktion, Transport, Bau, Unterhalt von Fahrzeugen und Infrastruktur, Rückbau und Abfallverwertung. Folgende Einflussfaktoren sind relevant:

- Energieeffizienz in der Vorkette, z.B. erneuerbar erzeugter Strom wird nicht zur Wasserstoffherstellung für Brennstoffzellenfahrzeuge (und anschliessenden Aufbereitung zu synthetischen Treibstoffen), sondern direkt zur Ladung von Fahrzeugbatterien eingesetzt.
- Einsatz erneuerbarer Energie in der Vorkette, z.B. zur Herstellung von Batterien oder Brennstoffzellen (PSI, EMPA, ETH, 2016).
- Emissionsarme Vorkette, z.B. Batterierecycling unter Einhaltung von Schweizer Umweltstandards. Verwendung von Sekundärmaterialien zur Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung wo möglich, da beim Rohstoffabbau relevante Umweltbelastungen wie z.B. Feinstaubemissionen entstehen.
- Flächenschonende Vorkette, z.B. Einsatz von recycelten Rohstoffen und Materialien statt Abbau in Minen und Primärproduktion.

Eine Berücksichtigung der LCA-Perspektive ist in Ansätzen bereits möglich. So haben z.B. einige Batteriehersteller die Notwendigkeit emissionsarmer Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien erkannt. Tesla plant eine Solarstromanlage für ihre Gigafactory in Kalifornien, BMW verweist auf eine Zweit-Nutzung der Batterien als Energiespeicher für Solar- und Windenergieanlagen.

Kernaussagen dieses Kapitels

Die Beispiele aus Kapitel 4.1 und das fiktive high-impact-Szenario aus Kapitel 2 illustrieren, dass es nicht genügt, wenn nur einige Einflussfaktoren für ein Mobilitätssystem mit niedrigen Umweltwirkungen gegeben sind. So erzeugt z.B. ein fast flächendeckender Einsatz von elektrischen Antrieben mit geringen CO₂- und Lärm-Emissionen pro FzKm, in Kombination mit einer Reduktion des Abstands von Fahrzeugen, sowie einer hohen Nutzung von Fahrzeugen nicht zwingend eine positive Umweltwirkung. Weitere Einflussfaktoren wie zusätzlich gefahrene Pkm und FzKm, hohe Geschwindigkeiten in besiedelten Gebieten und ein weitgehender Verzicht auf LV könnten die Vorteile zunichtemachen. Daher sollten zur Minimierung der Umweltwirkungen der Mobilität einzelne Einflussfaktoren wie z.B. reduzierte CO₂-Emissionen pro FzKm nicht isoliert betrachtet werden.

5. Fazit und mögliche Handlungsfelder

Die Mobilität führt – trotz Fortschritten namentlich bei den Luftschadstoff-Emissionen – weiterhin zu erheblichen Umweltwirkungen, und es ist wahrscheinlich, dass diese Umweltwirkungen zunehmen werden (Kapitel 2). Bis 2040 gehen die Prognosen von einem starken Bevölkerungs- und BIP-Wachstum aus, aber dennoch von einer nur moderaten Zunahme des Verkehrs. Dies impliziert eine Stabilisierung der Pro-Kopf-Verkehrsnachfrage, welche jedoch in den vergangenen Dekaden stetig zugenommen hat. Dennoch ist diese Entwicklung denkbar, da in den letzten Jahren das Wachstum der Verkehrsnachfrage zunehmend im Ausland stattfand und zwar beim Flugverkehr.

Es ist wahrscheinlich, dass die heutigen Politikinstrumente nicht ausreichen, um diese erhoffte Stabilisierung herbeizuführen – insbesondere nicht, wenn die in den letzten Jahren stark wachsende Mobilitätsnachfrage der Schweizer Bevölkerung im Ausland berücksichtigt wird. Einen grossen Einfluss auf die Mobilität haben die Siedlungs-, Energie- und Klimapolitik, sowie auch neue Technologien wie Elektromobilität, die Automatisierung von Fahrzeugen, sowie Drohnen. Diese bieten sowohl Chancen, als auch Risiken bezüglich der Umweltwirkungen des Verkehrssystems. Letztere sollten beobachtet und gegebenenfalls mittels geeigneter Instrumente eingedämmt werden.

Hinsichtlich der Umweltwirkungen der Mobilität bestehen Ziele und Richtwerte in verschiedenen Strategien und Szenarien des Bundesrats (Kapitel 3): Insbesondere hinsichtlich Energiebedarf, Emissionen von CO₂, Schadstoffen und Lärm, sowie Flächenbedarf, und Landschaftszerschneidung. Sie lassen sich zu einem Zielsystem für die Umweltwirkungen der Mobilität im Jahr 2040 zusammenführen. Dieses heutige Zielsystem berücksichtigt nur das Territorialprinzip.

Die Diskussion verschiedener Einflussfaktoren zur Minimierung der einzelnen Umweltwirkungen und zwei Beispiele illustrieren die Bedingungen zur Zielerreichung (Kapitel 4). Dabei wird auch ein möglicher Beitrag von suffizientem Verhalten berücksichtigt. Die Ziele in Bezug auf die Umweltwirkungen der Mobilität (insbesondere im Energie- und Klimabereich) könnten aufgrund vorhandener technischer Potenziale (noch) erreicht werden. Allerdings wäre dazu eine deutlich höhere Gangart als in der Vergangenheit notwendig. Dies deckt sich mit aktuellen Forschungsergebnissen (vgl. SCCER, 2017 und SDC, 2009). Eine Betrachtung nach Inlandsprinzip und Lebenszyklusperspektive würde aufgrund der im Ausland verursachten Mobilitätsnachfrage und Prozessen der Vorkette die Zielerreichung bis 2040 zusätzlich erschweren. Eine Zielerreichung wäre entsprechend nur unter der Einhaltung weiterer Bedingungen denkbar, wie z.B. der Minimierung der Emissionen zur Batterieherstellung.

Das beschriebene Zielsystem aus Kapitel 3 bildet nur den jeweiligen Zustand ab («Pressure» und «State»-Indikatoren im Sinne der DPSIR-Klassifizierung⁹). Es enthält jedoch keine Treiber («Driver»-Indikatoren). Es sollte deshalb aufgrund der diskutierten Einflussfaktoren aus Kapitel 4 ergänzt werden um ein Indikatorenset

⁹ DPSIR ist ein Modell zur Darstellung von Umweltbelastungen und Umweltschutzmassnahmen, welches z.B. von der Europäischen Umweltagentur verwendet wird. Das Akronym steht für Drivers, Pressures, State, Impact und Response.

welches Treiber abbildet: Insbesondere der mittlere Auslastungsgrad der Fahrzeuge, die Grösse und das Gewicht der Fahrzeuge in Relation zur Transportleistung, sowie die Anzahl der Leerfahrten scheinen hierfür geeignet. Ausserdem wären Indikatoren einzuführen, welche den Grad der Zielerreichung in Relation zum Zeitabstand bis zum Zieljahr setzen. Beispielsweise kann es sein, dass es zwar jährliche Fortschritte bei den Zustands-Indikatoren gibt, diese Fortschritte aber zu gering sind, um das Ziel rechtzeitig zu erreichen. So lässt sich insbesondere von Jahr zu Jahr bewerten, ob die Distance-to-Target zu-, oder abgenommen hat.

Ein ganzheitlicheres Zielsystem würde zudem die Umweltwirkungen aufgrund der Mobilitätsnachfrage von Schweizern im Ausland (Inlandsprinzip) einschliessen, und auch die Umweltbelastungen in der Vorkette (Lebenszyklusperspektive) abbilden. Es ist zu vermuten, dass bereits der Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) zum Stichjahr 2020 ein Verhältnis 50:50 von Personenmobilität im In- und Ausland (Flugkilometer!) zeigen wird. Daher sollten im MZMV erhobene Indikatoren zur Auslandmobilität qualitativ verbessert und ausdifferenziert werden: vollständige Erhebung der Auslandsreisen, sowie Dauer des Aufenthalts und Einsatz verschiedener Verkehrsmittel.

Aus den vorangehenden Erläuterungen folgt, dass zur Erreichung der Ziele und Richtwerte von Schweizer Strategien und Perspektiven in Bezug auf Umweltwirkungen des Verkehrs (und möglicherweise auch in Bezug auf das Verkehrswachstum selber) weitere Politikinstrumente in Ergänzung zu den bisherigen benötigt werden. Im Folgenden wird ein Spektrum von Handlungsfeldern aufgezeigt mit Beispielen. Die genannten Handlungsfelder sind als Diskussionsbeitrag ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu verstehen.

5.1 Indikatoren zur Zielerreichung definieren und überprüfen

Durch ein Set von Indikatoren könnte die Erreichung der Ziele und Richtwerte bezüglich Umweltwirkungen der Mobilität überprüft werden. Einerseits können so Warnsignale für zukünftige Entwicklungen der Nachfrage bemerkt werden. Indem jährliche Änderungsraten der Umweltwirkungen rapportiert werden und nicht nur absolute Änderungen, könnten zudem Abweichungen von den benötigten jährlichen Änderungsraten innert Jahresfrist bemerkt werden. Dazu müsste jeweils überprüft werden, ob die beobachtete Steigung dem «jährlichen Soll» entspricht, respektive um wie viel sich das verbleibende «jährliche Soll» erhöht. Nützliche Indikatoren könnten unter anderem die nachfolgend aufgeführten sein. Ist ein Indikator von Interesse, ist (jenseits vom politisch machbaren) zu prüfen, mit welchen Daten und Annahmen er mit welchem Aufwand berechnet werden könnte und zu welchen Vergleichen er sich eignet und zu welchen nicht:

- **Durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten im ÖV und MIV**, auf bestimmten Strecken oder in bestimmten Gebieten: Dies gibt Hinweise auf die künftige Veränderung der Nachfrage nach Personenkilometern. Bei einer Zunahme des Durchschnittstempos ist eine Zunahme der Nachfrage in Pkm wahrscheinlich (Hypothese des konstanten «Travel Time Budgets»). Zu beachten ist, dass letztlich die Zeitdauer für die gesamte Reise massgeblich ist, inklusive Vorbereitungs-, Warte- und Reservezeiten.
- **Hubraum, Grösse und Leistung von Personenwagen**: Damit lässt sich der Energieverbrauch pro FzKm der Flotte verfolgen; diese Daten können aus

ASTRA-Datenbanken (MOFIS und TARGA) abgeleitet werden. Der Energieverbrauch der zugelassenen Neuwagen liegt aufgrund des Kaufverhaltens (Trend hin zu SUV und zu Vierradantrieben) seit Jahren höher, als es die technologische Weiterentwicklung der Fahrzeuge und der Normverbrauch der angebotenen Modelle vermuten liessen (BFE, 2016; EBP, 2014; EBP, 2015; EBP, 2017A).

- **Auslastungsgrade von Fahrzeugen oder Anteil der Leerfahrten.** Leerfahrten gibt es nicht nur im Güterverkehr, sondern auch im Personenverkehr, wo bei Taxi-, Service- und Begleitfahrten die fahrende/ begleitende Person nicht mitzuzählen wäre – bei künftigen voll-autonomen Fahrzeugen wird es zudem zu Fahrten ohne Passagiere kommen. Damit könnten neue Mobilitätsservices beurteilt werden. Der Auslastungsgrad ist aussagekräftiger als die Jahreslaufleistung (FzKm/ Jahr), denn eine steigende Anzahl FzKm könnte sowohl durch vermehrtes Car-Sharing, als auch vermehrte Leerfahrten erzielt werden.
- **Mittlere Jahresfahrleistung und Lebensdauer.** Dieser Indikator könnte aus mehreren Gründen an Bedeutung gewinnen. So könnte eine Zunahme der Jahreslaufleistung gekoppelt mit verkürzter Lebensdauer ein Hinweis auf vermehrtes Car-Sharing sein – aber auch auf viele Leerfahrten. Der Indikator könnte aber aus einem weiteren Grund spannend sein: Im aktuellen Automarkt werden weitaus die meisten Fahrzeuge ersetzt aufgrund der insgesamt gefahrenen Kilometer, welche den mechanischen Verschleiss bestimmen. Falls in Zukunft Autos vermehrt rein aufgrund ihres Alters ersetzt würden (kalendarische Alterung der Batterie; sehr schnelle Entwicklung des automatisierten Fahrens; Nicht-Zulassung älterer Modelle auf bestimmten Strassen), nähmen die insgesamt gefahrenen Kilometer der Fahrzeuge, sowie auch deren Lebensdauer ab. Da auch die Herstellung und Entsorgung von Autos mit Umweltauswirkungen einhergeht, steigt deren Bedeutung mit zunehmender Effizienz in der Betriebsphase tendenziell. Diese Auswirkungen finden vor allem im Ausland statt. Wie bereits oben erwähnt ist der Indikator hinsichtlich Umweltwirkungen besonders dann spannend, wenn er gemeinsam betrachtet wird mit Auslastungsgrad und Anteil Leerfahrten.
- Wichtige Umweltwirkungen in der **Vorkette** wie z.B. Energiebereitstellung für Fahrzeuge, oder Energiebereitstellung für die Batterieherstellung, sowie Batterie-Wiederverwertung, respektive Entsorgung.
- Relevante Nachfrage von **Mobilität im Ausland**; insbesondere **Flüge** von Personen und Gütern.
- **Indikatoren zur «Flächeneffizienz»:** Flächenverbrauch bezogen auf die Leistung (FzKm, Tkm und Pkm) verschiedenen Verkehrsträger, Routen oder Verkehrsmittel. Eine Auswahl möglicher Ansatzpunkte und Vergleiche wird hier kurz angesprochen:
 - 1) Aggregierte Aussagen über alle Verkehrsträger, sowie Vergleich verschiedene Verkehrsträger: Ein solcher Indikator verlangt nach einer differenzierten und potentiell aufwändigen Betrachtung. Verschiedene Verkehrsträger übernehmen teilweise komplementäre Funktionen. Insbesondere ist die Feinverteilung von Gütern und Personen und der (flächenintensive) Anschluss einzelner

Gebäude nur über die Strasse möglich. Bei Vergleichen oder bei der Aggregation müssten also z.B. nur bestimmte Strassentypen mit der Schiene verglichen werden, oder eine Gewichtung zum Einsatz kommen.

2) Flächeneffizienz-Vergleiche für bestimmte Strassenklassen (z.B. Autobahn, Kantonsstrasse, etc.) oder Routen (A1 – Ost-West, A2/A13 – Nord-Süd). Eine Grundlage hierfür können die Verkehrsmodelle des Bundes bilden (ARE 2018).

3) Aussagen zur Auswirkung von Massnahmen auf die Flächeneffizienz bestimmter Verkehrswege. z.B. Verringerung des Flächenbedarfs von Strassen oder Wegen durch Geschwindigkeitsobergrenzen für PKW oder E-Bikes.

4) Vergleiche der Flächeneffizienz einzelner Verkehrsmittel je nach Einsatzzweck. z.B. Privatauto eines durchschnittlichen Haushalts, Taxi im ländlichen Raum, oder (fiktiv) ein autonomes Fahrzeug für einen Paketlieferservice.

5.2 Verträglichkeit für Mobilitätssystem und Umwelt nachweisen

Neue und disruptive Technologien, insbesondere autonomes Fahren, aber auch das Aufkommen von Drohnen, bergen viele Chancen, aber auch Risiken, in Bezug auf Umweltwirkungen. So könnten weitgehend automatisierte Fahrzeuge neue ÖV-Angebote ermöglichen und Carsharing massentauglich machen. Sie können aber auch zu Leerfahrten führen, welche Effizienzsteigerungen und einer Stabilisierung der Mobilitätsnachfrage in Pkm oder Tkm entgegenwirken.

Für zu bewilligende neue Mobilitätsprojekte könnten entsprechend Angaben verlangt werden, die die Verträglichkeit mit dem Mobilitätssystem und der Umwelt nachweisen. Sofern keine positive Gesamtwirkung erzielt wird, müsste das Projekt mit Auflagen bezüglich Monitoring, z.B. hinsichtlich der Auslastung und Leerfahrten von automatisierten Fahrzeugen rechnen.

5.3 Einbezug des Lebenszyklus- und Inlandsprinzips

Viele Ziele und Richtwerte von Strategien und Szenarien zu Umweltwirkungen der Mobilität orientieren sich weder am Lebenszyklus noch am Inlandsprinzip. Dies ist von Bedeutung, da sich z.B. im Strassenverkehr aufgrund steigender Präferenz für alternative Antriebe (EBP, 2017A) eine Verlagerung der Umweltbelastung von der Strasse hin zu Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge und der Bereitstellung der Energieträger zeigt (de Haan P, Zah R, Bernath K, Bruns F, 2013). Relevant ist dies für:

- Die Herstellung und Verwertung von Batterien für Elektromobilität, insb. in Bezug auf CO₂- und Feinstaubemissionen.
- Die Bereitstellung von Energieträgern. Je nach Herkunft und Prozessen zur Bereitstellung unterscheiden sich die Umweltbelastungen stark. So kann z.B. die Ökobilanz fossiler Treibstoffe aus mit grossem Energieaufwand erschlossenen Quellen besonders ungünstig ausfallen.
- Der internationale Flugverkehr von Personen und der Warentransport von Gütern im Ausland aufgrund von Schweizer Nachfrage. Dieser führt z.B. im Rahmen der Hochseeschifffahrt zu bedenklichen Schwefeldioxidemissionen.

Für dieses Handlungsfeld werden in einem ersten Schritt standardisierte Daten benötigt für relevante Prozesse aus LCA-Perspektive, sowie der Schweizer Nachfrage nach Mobilität gemäss Inlandsprinzip. Auf dieser Basis könnten Instrumente

konzipiert werden, wie z.B. Information zu Herstellern mit vergleichsweise umweltverträglichen Batterien.

5.4 Einbezug Rebound-Effekte, Fehlanreize und Zielkonflikte

Viele der in Kapitel 3 genannten Ziele werden voraussichtlich trotz technologisch machbarer Lösungen nicht erreicht. Einerseits kommen Rebound-Effekte zum Tragen (UBA, 2015; UBA, 2016). Andererseits bestehen diverse Zielkonflikte und Fehlanreize (EBP und Ecoplan, 2014). Dazu gehören unter anderem:

- Die Mineralölsteuer soll zur Finanzierung des Unterhalts der Nationalstrassen beitragen, aber der Steuerertrag geht zurück, wenn die Fahrzeuge energetisch effizienter werden, obwohl die Strassenabnutzung dadurch nicht abnimmt. Viele Umweltwirkungen (Lärm, Flächenverbrauch und Landschaftszerschneidung) verhalten sich aber proportional zur Kilometerleistung, nicht proportional zum Energieverbrauch. Aus Sicht der Umweltwirkungen wäre deshalb die Konstanz der Mineralölsteuer pro gefahrenen Kilometer anzustreben, d.h. eine gleichbleibende mittlere Steuerbelastung pro Verkehrsleistung, auch wenn sich die Energieeffizienz der Fahrzeuge verbessert.
- Die (kantonale) Besteuerung von Fahrzeugen, und namentlich die kantonal sehr unterschiedlich ausgestalteten Bonus-Malus-Systeme, spiegeln die CO₂-Emissionsvorschriften nicht wieder. Stattdessen basieren sie auf andere Kriterien wie Energieeffizienzklasse oder Euro-Klasse.
- Es bestehen namhafte Fehlanreize wie die zu hohe Anzahl an Pflichtparkplätzen bei Neu- oder Ausbau von Gebäuden oder die (zu niedrige) Anrechnung des geldwerten Vorteils der Privatnutzung von Geschäftsautos im Lohnausweis. Diese Fehlanreize fördern den MIV.
- Der Flugverkehr ist nahezu komplett steuerbefreit und damit im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern indirekt subventioniert.

Rebound-Effekte, Fehlanreize und Zielkonflikte könnten in einem ersten Schritt systematisch erfasst und thematisiert werden.

5.5 Disruptive Politikinstrumente prüfen

Die aktuellen Adaptationsraten von Technologien, welche potenziell zur Zielerreichung bezüglich Umweltwirkungen des Verkehrs bis 2040 beitragen, sind zu gering. Eine Auswahl an Instrumenten könnte diese Adaptationsraten gezielt steigern. Dazu gehören z.B.:

- Umstellung aller Busse im öffentlichen Verkehr auf Elektroantrieb in 10 bis 15 Jahren: Hohe Vorteile bei Umweltwirkungen (innerstädtischer Stop-and-Go-Verkehr). Bedingt aber Anpassungen von Beschaffungsabläufen, Betriebskonzepten und Infrastruktur. Die Städte Schaffhausen und Basel-Stadt haben entsprechende politische Ziele bereits verabschiedet.
- Elektrifizierung von Motorrädern: Technisch gesehen ist der Elektroantrieb für Motorfahräder (Mofa), Kleinmotorräder und Motorräder gut geeignet. Auch sind die Schadstoffemissionen der eingesetzten Zweitaktmotoren extrem hoch, und auch jene der Viertaktmotoren (bei grösseren Motorrädern) mehrfach höher als bei Personenwagen. Die Forderung gleicher Emissionswerte motorisierter

Zweiräder wie bei Personenwagen könnte daher zu einer Elektrifizierung führen. Dies wäre hinsichtlich sämtlicher Umweltwirkungen bis auf Fläche/ Landschaftszerschneidung klar positiv. In chinesischen Grossstädten sind Elektromotorräder bereits weit verbreitet.

- Einsatz nicht-monetärer Anreize oder Verbote zur Beeinflussung des Neuwagenkaufs (Vgl. UVEK, 2017A). Dazu gehören insbesondere kohärente Informationen für Konsumenten wie z.B. eine Anpassung der Energieetikette: Heute teilt die Energieetikette das verfügbare Fahrzeug-Angebot rein marktbezogen in Effizienzklassen ein – ohne Bezug auf Zielwerte wie z.B. die CO₂-Emissionsvorschriften für Personenwagen [95 CO₂/ km] und Lieferwagen [147 g CO₂/ km]. Neu könnte der Energieetikette ein Zielpfad zugrunde gelegt werden, welcher kompatibel ist zu den CO₂-Emissionsvorschriften. Weitergehende Instrumente könnten z.B. Nachtfahrverbote von Verbrennungsmotoren in Tempo-20 oder Tempo-30-Zonen aus Lärmgründen sein.

Die skizzierten Ideen müssten in einem ersten Schritt hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht werden – vielfach könnten dazu ähnliche Politikinstrumente aus dem Ausland herangezogen werden.

6. Literaturverzeichnis

ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (2016): Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040. Hauptbericht

ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (2018): Verkehrsmodellierung, Nationales Personen-Verkehrsmodell NPVM und Nationales Güterverkehrsmodell NGVM. Web-page: [Link](#)

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2013): Bericht an den Bundesrat. Grüne Wirtschaft: Berichterstattung und Aktionsplan

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2014): Entwicklung der weltweiten Umweltauswirkungen der Schweiz. Umweltbelastung von Konsum und Produktion von 1996 bis 2011 Raumentwicklung

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2016): Bericht an den Bundesrat. Grüne Wirtschaft: Massnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Stand 2017): Ziele und Stossrichtungen für den nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Grundlagen der Bundesverwaltung im Hinblick auf die Erarbeitung einer nationalen Bodenstrategie

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2017A): Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990 – 2015

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2018A): Lärmbelastung in der Schweiz. Ergebnisse des nationalen Lärmmonitorings sonBASE, Stand 2015.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2018B): Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat. Annex 1: [NFR Switzerland 2018](#)

BFE (Bundesamt für Energie) (2012): Schweizer Energieperspektiven bis 2050.

BFE (Bundesamt für Energie) (2016): Die Effizienzlücke beim Autokauf: Zielgruppenspezifische Gründe und Massnahmen. Download von BFE-Website: PDF

BFS (Bundesamt für Statistik) (Stand 2013): Siedlungsfläche pro Einwohner. Siedlungsfläche: Zustand und Veränderung. [Link](#) (abgerufen am 31.10.2017)

BFS, ARE (Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumentwicklung) (2007): Mobilität in der Schweiz. Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten.

BFS, ARE (Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumentwicklung) (2012): Mobilität in der Schweiz. Wichtigste Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010.

BFS, ARE (Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumentwicklung) (2017): Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015.

BFS (Bundesamt für Statistik) (2017A): Mobilität und Verkehr, Taschenstatistik 2017.

BR (Schweizer Bundesrat) (1985): 814.318.142.1. Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. Juni 2018)

BR (Schweizer Bundesrat) (1986): 814.41. Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. April 2018)

BR (Schweizer Bundesrat) (2009): Bericht Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes.

BR (Schweizer Bundesrat) (2012): Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012–2015.

BR (Schweizer Bundesrat) (2015A): Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastigung.

BR (Schweizer Bundesrat) (2015B): Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information.

BR (Schweizer Bundesrat) (2016A): Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen.

BR (Schweizer Bundesrat) (2016B): Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016–2019.

BR (Schweizer Bundesrat) (2017): Mobility Pricing, Bericht über die Abklärung zur Durchführung von Pilotversuchen.

Daimler (2014): Welchen Beitrag leistet die Abgasnachbehandlung zur CO2 Reduktion? Conference Paper.

de Haan P, Zah R, Bernath K, Bruns F (2013): Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. EBP und EMPA im Auftrag Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzungen der Akademien der Schweiz (TA Swiss). Download von vdf-Verlag: [Link](#)

EBP (2014): Barometer Auto und Mobilität von morgen 2014. EBP-Grundlagenbericht. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: [Link](#)

EBP und Ecoplan (2014): Fehlanreize im Mobilitätsbereich aus Sicht des Energieverbrauchs. Download von umverkehR.ch: [Link](#)

EBP (2015): Realverbrauch von Personenwagen im Alltag: Modellversion 2015. EBP-Hintergrundbericht. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: [Link](#)

EBP (2017A): Barometer Auto und Mobilität von morgen 2017. EBP-Grundlagenbericht. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: [Link](#)

EBP (2017B): Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2016. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: [Link](#)

EBP (2018): Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2018. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: [Link](#)

EC (European Commission) (2015): An Aviation Strategy for Europe.

EC (European Commission) (2016): A European Strategy for Low-Emission Mobility.

ETHZ-IED (2008). Spielmann M, de Haan P, Umweltindikatoren im Verkehr – Vergleich der Verkehrsmittel anhand CO2-Emissionen, Energieaufwand und übriger Umweltauswirkungen. Rüegger Verlag, Zürich, ISBN 978-3-7253-0894-1

Intraplan Consult (2016): Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit des Schweizer Luftverkehrs 2015.

INFRAS und ETHZ-CEPE (2010). Tanktourismus. Im Auftrag Bundesamt für Energie. Juni 2010, 102 Seiten

Kaya, Y., & Yokobori, K. (1998). Environment, Energy and Economy; Strategies for Sustainability. United Nations University Press.

Keller, M., 2015. Tanktourismus und Eurokurs. MK Consult in Auftrag Erdölvereinigung, 18. Dez. 2015, 34 Seiten

PSI, EMPA, ETH (Paul Scherrer Institut, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) (2016): Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles. Final report of the THELMA project in co-operation with the Swiss Competence Center for Energy Research "Efficient technologies and systems for mobility"

SBB (2015): Positionspapier Energiestrategie SBB. «Der Umstieg ist beschlossen. Bahnstrom aus 100% erneuerbarer Energie».

SBB (2018): Die SBB in Zahlen und Fakten 2017.

SCCER (Swiss Competence Center for Energy Research) Mobility (2017) Auf dem Weg zu einem energieeffizienten und klimafreundlichen Schweizer Mobilitätssystem. White Paper.

Schweizerische Eidgenossenschaft (2012): Strategie Biodiversität Schweiz

SDC (Sustainable Development Commission) (2009): Prosperity without growth? The transition to a sustainable economy.

TE (Transport and Environment) (2017): Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles.

UBA (Umweltbundesamt Deutschland) (2013). Position: Kurzfristig kaum Lärminderung durch Elektroautos. Fachgebiet: I 3.3 Lärminderung im Verkehr. 18. April 2013, Dessau-Roßlau. [Link](#)

UBA (Umweltbundesamt) (2015): Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik. Download von der Website des UBA: [Link](#)

UBA (Umweltbundesamt) (2016): Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Ein Handbuch für die umweltpolitische Praxis. Download von der Website des UBA: [Link](#)

UBA (Umweltbundesamt) (2016A): Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr. Bezugsjahr 2014.

UN (United Nations) (2015): Sustainable Development Goals (SDG). [Link](#) (abgerufen am 17.8.2017)

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) (2006): Sachplan Verkehr, Teil Programm.

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) (2016): Departementsstrategie UVEK 2016.

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) (2017A): Förderinstrumente für effiziente Fahrzeuge: Auswirkungen auf Kauf und Nutzung von Autos.

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) (2017B): Zukunft Mobilität Schweiz. UVEK-Orientierungsrahmen 2040. Stand 15.08.2017B

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) (Stand 2018, noch nicht veröffentlicht): Verkehr der Zukunft 2060: Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr.

Zukunft Mobilität (2015): Vergleich unterschiedlicher Flächeninanspruchnahmen nach Verkehrsarten (pro Person). [Link](#) (Abgerufen am 17.08.2017)

A1 Berücksichtigte Strategien und Perspektiven

Die Ziele und Richtwerte für die Umweltwirkungen des Verkehrs der berücksichtigten Strategien und Perspektiven (siehe Tabelle 6) werden im Folgenden kurz dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht berücksichtigter Strategien und Perspektiven für das Zielsystem der Umweltwirkungen der Mobilität

UMWELTWIRKUNG	BERÜCKSICHTIGTE STRATEGIEN UND PERSPEKTIVEN
Allgemein	1. Sustainable Development Goals (SDG) 2. Strategie Nachhaltige Entwicklung 3. Zukunft Mobilität Schweiz. UVEK-Orientierungsrahmen 2040 4. Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040 5. Sachplan Verkehr Programmteil 2006, 6. Mobility Pricing 7. Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen 8. An Aviation Strategy for Europe
Energie	9. Energieperspektiven 2050
CO ₂	10. Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information 11. A European Strategy for Low-Emission Mobility
Luftschadstoffe	12. Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes
Lärm	13. Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelästigung
Fläche	14. Strategie Biodiversität Schweiz 15. Ziele und Stossrichtungen für den nachhaltigen Umgang mit dem Boden.

1. Sustainable Development Goals, SDG (UN, 2015)

Die Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen werden auch von der Schweiz im Rahmen der Agenda 2030 mitgetragen. Sie sollen der Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene dienen. Transport und Verkehr haben kein eigenes Ziel, sind jedoch in anderen Zielen mitabgebildet:

- Ziel 3, Gesundes Leben für alle, sowie Ziel 11, Nachhaltige Städte und Siedlungen: Durch den Verkehr verursachte Gesundheitsrisiken sollen minimiert werden, insb. Unfälle auf der Strasse und Luftverschmutzung.
- Ziel 7, Nachhaltige und moderne Energie für alle, Ziel 13, Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen, Ziel 14, Ozeane erhalten, sowie Ziel 15, Landökosysteme schützen: Die Klimawirkungen und der Energieverbrauch des Verkehrs sind zu reduzieren, und nachhaltige Energieträger zu verwenden.
- Ziel 9, Widerstandsfähige Infrastruktur und nachhaltige Industrialisierung. Darunter fallen auch effiziente Transportmöglichkeiten auf dem Land, Wasser und in der Luft. (Anm. EBP: Das Ziel ist im Hinblick auf die Bedürfnisse bisher schlecht angeschlossener Länder zu verstehen).

2. Strategie Nachhaltige Entwicklung (Schweizer Bundesrat, 2016B)

Das Ziel der Strategie für Nachhaltige Entwicklung ist, auf Bundesebene eine kohärente Politik für die nachhaltige Entwicklung der Schweiz zu gewährleisten. Sie ist primär ein Instrument zur Koordination der Aktivitäten des Bundes, dient aber auch als Orientierungsrahmen für weitere Akteure.

- Abgestimmte Verkehrssysteme und Siedlungsentwicklung. Systematische Vernetzung und Ergänzung der Verkehrsträger. Das gesamte Verkehrssystem ist langfristig und verursachergerecht finanziert und umweltverträglich. Multifunktionale Zentren verknüpfen Arbeits-, Freizeit-, Wohn- und Konsumangebote und reduzieren damit Wege und Verkehrsaufkommen.
- Zuverlässige und sichere Grundversorgung an Mobilität für alle Bevölkerungsgruppen in allen Landesteilen.
- Die Absicherung der Mobilitätsbedürfnisse erfolgt effizient, wirtschaftlich und ökologisch durch ein intermodal vernetztes und optimal ausgelastetes Verkehrssystem: Durch MobilityPricing wird die Überlastung in Spitzenzeiten, Lärm und Emissionen angegangen.
- Sicheres, attraktives und leicht zugängliches Netz für Langsamverkehr
- Für Güterverkehr soll das Instrument der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (allenfalls zusätzlich Alpentransitbörse) die Verlagerung auf die Schiene weiter fördern, dank Internalisierung der Umwelt- und Unfallkosten.
- Generell wird die bessere Nutzung bestehender Infrastrukturen gegenüber einem Kapazitätsausbau bevorzugt.
- In der Luftfahrt wird gemäss ICAO-Aktionsplan eine Reduktion der CO₂-Emissionen der Schweizer Luftfahrt angestrebt bei gleichzeitigem Wachstum des Luftverkehrs (d.h. Lärm nimmt zu).
- Der Landschaftszerschneidung durch die Zunahme der Verkehrsflächen soll entgegengewirkt werden.

3. Zukunft Mobilität Schweiz. UVEK-Orientierungsrahmen 2040 (UVEK, 2017B)

Der UVEK-Orientierungsrahmen formuliert die angestrebte Mobilität in der Schweiz im Jahr 2040. Er soll durch kontinuierliches Monitoring der Ziele und Umsetzungsaktivitäten fortlaufend angepasst werden. Gemäss Überziel soll das Gesamtverkehrssystem der Schweiz 2040 in allen Aspekten effizient sein. Der gesellschaftliche Nutzen soll durch optimalem Einsatz der technischen Ressourcen und unter sparsamer Verwendung finanzieller und natürlicher Ressourcen maximiert werden. Operationalisiert wird das Überziel durch strategische Ziele; einige Ziele haben einen starken Bezug zu Umweltwirkungen:

- Ausschöpfung des bestehenden Systems vor weiterem Ausbau und Flächenschonung
- Nutzer sollen weitgehend für interne und externe Kosten aufkommen
- Erhöhte Energieeffizienz, weitgehende CO₂-Neutralität und Verzicht auf fossile Energien
- Reduktion der Umweltbelastung durch Emissionen

Bereits eingeleitete Massnahmen umfassen unter anderem Sharing-Economy Konzepte, Mobility Pricing, die Weiterführung/Verschärfung der CO₂-Politik und der Normen zur Umweltbelastung des Luftverkehrs. Das Monitoring sieht einen

jährlichen Austausch der beteiligten Ämter vor, nennt aber keine Indikatoren und Datenerhebungen.

4. Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040 (ARE, 2016)

Ergänzend zum UVEK-Orientierungsrahmen untersucht das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), anhand von einem Referenz- und drei Alternativszenarien, Auswirkungen des zukünftigen Mobilitätsverhalten im Personen- und Güterverkehr. Hierbei geht es vordergründig um die Entwicklung im Raumbedarf und Verkehrsaufkommen, weniger um den Ausstoss von Emissionen oder Lärm. Im Personenverkehr werden diese vor allem durch die demografische Entwicklung (Verkehrsmenge) und Raumentwicklung (Verteilung) bestimmt. Als Hebel in diesen Bereichen werden die Verteilung der Bevölkerung und deren Arbeitsplätze und Freizeitanlagen genannt. Die Kosten je Verkehrsträger beeinflussen massgeblich das Mobilitätsverhalten und können als Steuerungselement dienen. Im Pendlerverkehr ist der Preis weniger massgeblich, da teilweise ein Sachzwang besteht, im Freizeitverkehr hat der Preis dagegen einen grossen Einfluss. Die Nachfrage im Güterverkehr spiegelt die Einkommensverhältnisse und das Konsumverhalten. Allerdings sind die Unterschiede in Bruttotonnenkilometer zwischen den Szenarien nicht wesentlich und somit der politische Einfluss eher gering.

Im Mobilitätsverhalten von Privatpersonen wurden folgende Rückschlüsse für künftige Strategien und Perspektiven gezogen:

- Raumstruktur und Verkehrspolitik haben einen starken Einfluss auf die Fahr- und Verkehrsleistung und den Modal Split.
- Selbst unter Einhaltung der Energieperspektiven 2050 steigt die Auslastung der Strassen im gesamten Netz trotz einer Verschiebung zum ÖV.
- Politische Anreize zur nachhaltigen Mobilität, zur Unterdrückung der Zersiedelung der Schweiz und Verdichtung von Wohn- und Arbeitsflächen führen zu einer allgemeinen Verkehrsreduktion. Die öffentliche Hand muss hierbei einen guten Anschluss mit dem ÖV zwischen Arbeitsplatz und Wohnen garantieren. Wenn Fahrradwege ausgebaut werden, nimmt der Langsamverkehr, z.B. mit dem E-Bike, auch auf Kosten des ÖV zu.
- Die Kombination aus einer kompakten Raumstruktur, Ausgestaltung einer ÖV/LV-orientierten Verkehrspolitik sowie Unterstützung von Verhaltensänderungen im Verkehr (Sharing-Angebote, Homeoffice, etc.) weist Potenziale auf, die Verkehrsleistung zu senken, ohne den Mobilitätsbedarf (d.h. die Aufkommen) reduzieren zu müssen.
- Anreize zu privaten Fahrzeugen, z.B. autonome Fahrzeuge, können vor allem in Hinsicht auf die alternde Bevölkerung zu mehr Individualverkehr führen und somit zu einer weiteren Zersiedelung der Schweiz.
- Es wird zudem in den Szenarien deutlich, dass eine Strategie, die alleine die Urbanisierung bei wenig steuernder Verkehrspolitik betrachtet, nicht hinreichend ist, um den Verkehr zu reduzieren.

5. Sachplan Verkehr, Teil Programm (UVEK, 2006)

Der Sachplan Verkehr legt Ziele, Grundsätze und Prioritäten des Bundes für die Verkehrsinfrastrukturen fest und wird periodisch erweitert. Mit dem Hintergrund einer wachsenden Bevölkerung, zunehmender Verstädterung und wachsender Verkehrsentwicklung wurden neben anderen Zielen beschlossen, die Umweltbelastungen zu senken und natürliche Lebensgrundlagen zu schonen. Dies betrifft insbesondere Luftschadstoffe wie Klimagase. Hierbei stehen technischer Fortschritt und zunehmende Mobilität gegenüber. Daher sind folgende Ziele vorgesehen:

- Förderung einer sinnvollen Komplementarität der Verkehrsträger im Güter- und Personenverkehr.
- Agglomerationsentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Luftreinhaltung und Bodenschutzes.
- Entwicklung des Langsamverkehrs und der kombinierten Mobilität im Personenverkehr.
- Senkung der Umwelt- und Lärmbelastungen und des Energieverbrauchs durch Verkehrsmanagement, lärmarme Beläge und emissionsfreie/-arme Fahrzeuge.

6. Mobility Pricing (BR, 2017)

Mobility Pricing ist ein vom Bundesrat lancierter Vorschlag, um die Spitzenlasten in der Mobilität auf Strasse und Schiene während der Stosszeiten zu steuern. Da weiterhin mit einem Zuwachs in der Verkehrssituation gerechnet werden muss, sollen weitere, auch monetäre Anreize geschaffen werden, die Mobilität über den Tag zu verteilen. Hierbei soll das Mobilitätsverhalten der Endnutzer über zeit- und raumabhängige Abgaben gesteuert werden, indem Mehrkosten bei ungünstigem Verhalten entstehen. Eine Pilotphase der Kantone wurde ausser vom Kanton Zug gestoppt. Viele Kantone wünschen sich dagegen eher ein «Road Pricing», das diverse Strecken, z.B. in den Innenstädten, teurer macht, aber keine zeitliche Regelung. Vom Bundesrat wird eine weitergehende, konkretere Strategie zum Thema Mobility Pricing von den Kantonen erwartet.

7. Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen (BR, 2016A)

Sowohl im Individual- als auch im öffentlichen Verkehr gibt es viele Vorteile von automatisierten Fahrzeugen, wie z.B. Sicherheit, optimales Fahrverhalten, Reduktion von Emissionen und Erhöhung der Kapazitäten. Dies gilt vor allem, wenn die Fahrzeuge geteilt werden und das Fahrzeug durchgehend genutzt werden kann. Beschilderungen und Verkehrszeichen wie Ampeln werden überflüssig und eröffnen neue Möglichkeiten in der Raumplanung. Dagegen ist es wahrscheinlich, dass sich die Mobilitätsnachfrage, insbesondere durch den Zugang zur Mobilität von neuen Gruppen (ältere Menschen, Kinder) erheblich steigern wird und somit in einer höheren Verkehrsbelastung resultiert. Vor allem, wenn es nicht zu vermehrtem CarSharing Verhalten kommt, können Leerfahrten und Standzeiten eine erhebliche Belastung darstellen. Auch kann die vereinfachte Mobilität zur weiteren Zersiedelung der Schweiz beitragen. Daher werden folgende Aspekte zur Beeinflussung des Mobilitätsverhaltens aus politischer Ebene betrachtet:

- Stossrichtung festlegen: in welchem Umfang setzt die öffentliche Hand einen regulativen Rahmen in der Nutzung?

- Definition der neuen Zusammenarbeit zwischen Mobilitätsanbietern, Gemeinden und Privatpersonen bei "Mobility as a service", z.B. zum Datenaustausch und Vertrieb
- Datenschutz und Datenverfügbarkeit bei miteinander kommunizierenden Fahrzeugen und Infrastruktur
- Wissen & Forschung mit Pilotversuchen

8. An Aviation Strategy for Europe (EC, 2015)

Der Luftverkehr wird weiterhin stetig zunehmen und einen beträchtlichen Anteil zu Emissionen und Lärm beitragen. Er wird allerdings weiterhin ein wichtiger Bestandteil des internationalen Verkehrs stellen. Zusätzlich entsteht der Markt des Gütertransportes per Drohnen, was weitere Herausforderungen mit sich bringt. Hierbei setzt man hauptsächlich auf die Reduzierung von CO₂, NO_x und Klimagasen über den Einsatz von Biotreibstoffen, technischer Verbesserungen in den Antrieben und Fahrtraining von Piloten. Ziel ist es, die Emissionen stetig zu minimieren. Seit 2016 verfolgt die EU neue Lärmvorschriften für Flugzeuge für neue Grossflugzeuge.

9. Energieperspektiven 2050 (BFE, 2012)

Das aktuelle Energiegesetz beruht auf den Energieperspektiven 2050 aus dem Jahr 2012. Diese enthalten 3 Szenarien; die strengsten Ziele hat das Szenario «Neue Energiepolitik», das eine Senkung der CO₂-Emissionen bis 2050 auf 1–1.5 t pro Kopf anstrebt. Bezüglich Umweltwirkungen werden lediglich Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Für den Verkehr werden Strassenverkehr, Schiene, Schifffahrt und Flugverkehr, sowie «Nicht-Verkehr» (Maschinen für Bau, Acker-, Forst-, und Gartenbau, Industrie, Militär) berücksichtigt. Die Betrachtung erfolgt nach Territorialprinzip: Der internationale Flugverkehr, sowie weitere Mobilitätsnachfrage für Personen und Güter im Ausland sind davon ausgenommen.

Folgende Ziele gelten bis 2040:

- CO₂-Emissionen Verkehr: Reduktion bis 2040 um 75% gegenüber 2010.

Die Zielemissionen oder Emissionsreduktionen je Verkehrsträger werden nicht angegeben, aber die Reduktion des Primärenergieverbrauchs gegenüber 2010:

- Strassenverkehr Personen: –33%, Neuwagen emittieren im Schnitt 35 g CO₂/km. Anteil am Gesamtverkehr sehr gross: heute 58%, 2040 64%
- Strassenverkehr Güter –5%, Neue Nutzfahrzeuge emittieren im Schnitt 85 g CO₂/km. Anteil am Gesamtverkehr bedeutend: heute 11%, 2040 18%
- Schienenverkehr Personen +18%, Anteil am Gesamtverkehr klein: heute 3%, 2040 5%
- Schienenverkehr Güter +38%. Anteil am Gesamtverkehr sehr klein: heute 1%, 2040 2%
- Schifffahrt: –7%. Anteil am Gesamtverkehr sehr klein: heute 0.5%, 2040 1%
- Flugverkehr Inland: –3%. Anteil am Gesamtverkehr sehr klein: heute 1%, 2040 2%. Flugverkehr International hat heute bedeutenden Anteil von 19%!

Bedingungen:

- Verlagerung des alpenquerenden Güterverkehrs von der Strasse auf die Schiene gemäss Art. 84 BV (Alpenschutzartikel) bzw. Verlagerungsgesetz (die

im Gesetz vorgesehen Reduktion auf 650'000 alpenquerenden Lastwagenfahrten bis 2018 wird voraussichtlich nicht erreicht; 2016 fuhren 975'000 Lastwagen durch die Schweizer Alpen).

- Technologien: Nutzung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz, Vernetzung und Verkehrsflusssteuerung, mehr Emob (im Personen und Kurzstanzverkehr), Nutzung nachhaltiger Biomasse und erneuerbarer Energie ist begrenzt durch im Inland nachhaltig bereitstellbares Potenzial
- Gesellschaftlich: Lebens und Arbeitsbedingungen ändern sich so, dass etwas weniger Verkehrsleistungen in Anspruch genommen werden,
- Politisch: starke internationale Zusammenarbeit mit z.B. weltweitem Emissionshandel, weltweiter Technologieoffensive.
- Einflussfaktoren sind: Verkehrsaktivität (Fzgmt * Annahme zu Auslastung = Pers-km und Tonnen-km), spezifischer Energieverbrauch (l/100 km, Wh/BTkm), Substitutionseffekte (Segmente (von leicht zu schweres Nutzfahrzeug), Treibstoffe, Antriebsarten, Verkehrsträger), Fahrverhalten

10. Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information (BR, 2015B)

Die Schweiz setzt sich das Ziel, Treibhausgasemissionen bis 2030 um 50% gegenüber 1990 zu reduzieren. Im Verkehr werden der internationale Flugverkehr und internationale Schifffahrt derzeit nicht berücksichtigt. Für den Verkehr werden keine spezifischen Reduktionsziele genannt. Emissionsreduktionen bei Neuwagen und Kompensationsvorschriften für Treibstoffimporteure sollen zur Reduktion der Emissionen des Verkehrs beitragen.

11. A European Strategy for Low-Emission Mobility (EC, 2016)

Bis 2050 sollen die Emission von Treibhausgasen in Europa durch Transport um 60% im Vergleich zu 1990 reduziert und weiter Richtung null getrieben werden. Dies wird nicht allein durch EU Vereinbarungen gefördert, sondern auch horizontal durch Industrie und Investmentpolitik.

Daher wurden folgende Massnahmen beschlossen:

- Niedrig- und Nullemissionsfahrzeuge.
- Regulationen für Niedrigemissionsmobilität.
- Optimierung des Transportgewerbes und dessen Effizienzsteigerung aufgrund von Daten (Digitale Mobilitätslösungen, faires und effizientes Preismodell, Unterstützung von multmodalen Lösungen).
- Alternative Energien (Biotreibstoffe, erneuerbare Energien, Wasserstoff und Elektromobilität) und finanzielle Unterstützung durch die EU von der Bereitstellung der Lade- und Tankinfrastruktur von alternativen Energien.
- Verbesserung von Fahrzeugtests, um das Vertrauen der Bürger zurückzugewinnen.

12. Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes (BR, 2009)

Im Bericht werden die Auswirkungen der Luftverschmutzung dargelegt und im Zusammenspiel mit den Massnahmen zur Senkung des Energie- und Treibstoffverbrauchs Zielvorgaben gemacht. Berücksichtigt werden insbesondere Stickoxide,

flüchtige organische Verbindungen, Feinstaub, Ammoniak mit folgenden quantitativen Reduktionszielen gegenüber 2005 (ohne Zieljahr):

- Reduktion der Stickoxid-Emissionen um ca. 50 % (dazu gehören Stickstoffmonoxid und -dioxid)
- Reduktion der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen um ca. 20 – 30 % (dazu gehören Kohlenwasserstoffe HC)
- Reduktion der Feinstaub-Emissionen (PM10) um ca. 45 %. (zu PM10 gehören Partikel kleiner als 10 Mikrometer)
- Reduktion der Ammoniak-Emissionen um ca. 40 %

Zudem sollen die Emissionen kanzerogener Stoffe wie z.B. Russ so weit wie technisch möglich und verhältnismässig reduziert werden und ein Wiederanstieg der Schwefeldioxid-Emissionen verhindert werden (BR, 2009). Zu weiteren Luftschadstoffen wie Kohlenmonoxid sind keine Zielwerte genannt.

13. Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelästigung (BR, 2015A)

Die grösste Lärmquelle in der Schweiz ist der Strassenverkehr. Tagsüber ist jede fünfte Person, nachts jede sechste betroffen. (1.6 Millionen Menschen). Etwa gleich viele geben an, sich durch Lärm in der Nachbarschaft belästigt zu fühlen. Die volkswirtschaftlichen Kosten für Verkehrslärm werden auf 1.9 Mrd. CHF jährlich geschätzt, davon 1.1 Mrd. CHF auf Wertverluste von Immobilien und Liegenschaften und 793 Mio. CHF Gesundheitskosten. Dazu kommen Lärm durch Eisenbahnverkehr, Flugverkehr (jeweils rund 100 000 Personen) und Alltagslärm.

30 Jahre nach Inkrafttreten der Lärmschutzverordnung möchte man die Lärmbekämpfung über zusätzliche politische Massnahmen erweitern. Dabei sind Massnahmenpläne und Umsetzungsinstrumente für einzelne Lärmarten und für die Raumplanung erstellt worden. Zu wenige der heute umgesetzten Massnahmen greifen an der Quelle an, sondern an deren Ausbreitung (z.B. Lärmschutzwände). Zudem laufen den technischen Fortschritten, z.B. bei Elektromotoren und lärmarmen Reifen, die zuwachsende Bevölkerung und damit Besiedlungsdichte und deren Mobilitätsbedarf entgegen.

Dabei wurden folgende konkrete Massnahmen vereinbart:

- Überarbeitung des Regelungskonzeptes der Lärmbekämpfung von 1985 (USG und LSV) durchs BAFU.
- Weiterentwicklung der Verkehrslenkungsinstrumente.
- Wissenschaftliche Beurteilung von Lärm und Bereitstellung der Informationen.
- Neue Vorschriften zur Lärmbekämpfung in der Raumplanung durch BAFU und ARE.
- Förderung von leisen Fahrzeugen und lärmarmen Strassenbelägen durch BAFU, BFE und ASTRA.
- Modernisierung von Messgeräten und kontinuierliches Monitoring von Eisenbahn-, Flug- und Strassenverkehrslärm vom BAFU.
- Modernisierung Rollmaterial, Schienen und Lärmbegrenzungen beim Eisenbahnverkehr durch BAV, BAFU und BGLE.
- Senkung der Lärmbelastung durch Flugzeuge durch technische Möglichkeiten und Raumplanung.

- Reduktion der Lärmemissionen an der Quelle, vor allem im Bereich Verkehrsinfrastruktur (vor allem Umweltschutzgesetz USG).
- Förderung von Ruhe und Erholung in der Siedlungsentwicklung, Raumplanung und öffentliche Räume für Erholung.

14. Strategie Biodiversität Schweiz (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012)

Die Biodiversitätsstrategie hat zum Ziel die Biodiversität in der Schweiz und global langfristig zu erhalten und zu fördern. Das Oberziel wird durch zehn strategische Ziele umgesetzt. Für den Verkehr sind folgende Ziele bedeutend:

- Bei Eingriffen durch Bauten und Anlagen ist die Biodiversität zu berücksichtigen. Flächen die für die Erhaltung und Biodiversität notwendig sind, werden gesichert, Trennwirkungen sollen vermieden werden,
- Beeinträchtigte schützenswerte Lebensräume sollen wiederhergestellt oder ersetzt werden; z.B. durch Schaffung von Wildtierpassagen und Ersatzlebensräumen

15. Ziele und Stossrichtungen für den nachhaltigen Umgang mit dem Boden (BAFU, Stand 2017)

Die geplante Bodenstrategie verfolgt die Vision der langfristigen Erhaltung der Funktionen des Bodens, damit ihn auch zukünftige Generationen für ihre Bedürfnisse nutzen können. Für den Verkehr sind folgende Ziele relevant:

- Stabilisierung, resp. Verringerung des Pro-Kopf-Bodenverbrauchs, d.h. die Siedlungsfläche und die versiegelte Fläche pro Kopf von versiegeltem und besiedeltem Boden nimmt nicht mehr zu, resp. verringert sich
- Beim Verbrauch von Boden wird darauf geachtet, dass nicht unnötig guter Boden verbraucht wird
- Die Nutzung von Boden führt zu keinen physikalischen, chemischen und biologischen Belastungen, die zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und somit der Bodenfruchtbarkeit führen. In Bezug auf Verkehr werden insbesondere Stickstoffverbindungen genannt, die über atmosphärischen Eintrag Ökosysteme überdüngen und versauern.