



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication  
DETEC

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen**

**Transports de l'avenir ?  
Moteurs et carburants pour la mobilité de demain**

**What drives us on?  
Drives and fuels for the mobility of tomorrow**

**Ernst Basler + Partner AG**  
**Frank Bruns**  
**Katrin Bernath**  
**Stefan Brendel**  
**Peter de Haan**

**Mobilitätsakademie**  
**Jörg Beckmann**

**Forschungsauftrag ASTRA 2009/009 auf Antrag des Bundesamtes für  
Strassen ASTRA**

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

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

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen**

**Transports de l'avenir ?  
Moteurs et carburants pour la mobilité de demain**

**What drives us on?  
Drives and fuels for the mobility of tomorrow**

**Ernst Basler + Partner AG**  
**Frank Bruns**  
**Katrin Bernath**  
**Stefan Brendel**  
**Peter de Haan**

**Mobilitätsakademie**  
**Jörg Beckmann**

**Forschungsauftrag ASTRA 2009/009 auf Antrag des Bundesamtes für  
Strassen ASTRA**

**April 2011**

**1334**

## Impressum

### Forschungsstelle und Projektteam

#### Projektleitung

Frank Bruns  
Jörg Beckmann

#### Mitglieder

Katrin Bernath  
Stefan Brendel  
Peter de Haan

### Begleitkommission

#### Präsident

Rudolf Dieterle (Bundesamt für Strassen)

#### Mitglieder

Martin Buck (SVI)  
Thomas Bucheli (Bundesamt für Umwelt)  
Thomas Gasser (Bundesamt für Strassen)  
Peter Hofer (EMPA)  
Kurt Infanger (Bundesamt für Raumentwicklung)  
Martin Pulfer (Bundesamt für Energie)  
Lorenz Raymann (BaslerFonds)  
Helmut Schad (Hochschule Luzern)  
Thomas Volken (Bundesamt für Energie)

### KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

BaslerFonds  
Mobilitätsakademie

### Antragsteller

Bundesamt für Strassen

### Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>12</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>15</b>
	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>33</b>
1.1	Ausgangslage .....	33
1.2	Aufgabenstellung und Untersuchungsaufbau.....	33
1.2.1	Übersicht.....	33
1.2.2	„Back-Casting“: Zukunftsbilder .....	34
1.2.3	Auswirkungen auf die nachhaltige Entwicklung.....	35
1.2.4	Handlungsbedarf je Zukunftsbild .....	35
1.3	Systemabgrenzung.....	35
1.4	Berichtsaufbau .....	36
<b>2</b>	<b>Treiber für Alternativen</b> .....	<b>39</b>
2.1	Verfügbarkeit Ressourcen .....	39
2.1.1	Erdöl.....	39
2.1.2	Weitere fossile Energieträger .....	42
2.1.3	Biogene Treibstoffe.....	43
2.1.4	Weitere Ressourcen .....	46
2.2	Politische Rahmenbedingungen .....	46
2.3	Kundenanforderungen .....	47
<b>3</b>	<b>Elemente der Zukunftsbilder</b> .....	<b>49</b>
3.1	Vordergrund und Hintergrund .....	49
3.2	Bildhintergrund.....	50
3.3	Vordergrund: Antriebe und Treibstoffe .....	52
3.3.1	Übersicht und Vorgehen .....	52
3.3.2	Treibstoffe.....	54
3.3.3	Antriebe.....	58
<b>4</b>	<b>Die Zukunftsbilder</b> .....	<b>65</b>
4.1	Verkehrs- und Energieperspektiven des Bundes .....	65
4.1.1	Verkehrsperspektiven und Fahrleistungen .....	65
4.1.2	Energieperspektiven .....	66
4.2	Übersicht zu den Zukunftsbildern .....	67
4.3	Business-As-Usual (BAU).....	68
4.3.1	Hintergrund und Fahrleistung .....	68
4.3.2	Fahrzeugklassen und Flottenstruktur .....	68
4.3.3	Infrastruktur Treibstoffversorgung.....	70
4.4	Verbesserter Verbrennungsmotor (ICI) .....	70
4.4.1	Hintergrund und Fahrleistung .....	70
4.4.2	Fahrzeugklassen und Flottenstruktur .....	70
4.4.3	Infrastruktur Treibstoffversorgung.....	73
4.5	Elektrofahrzeuge mit Batterien (BEV).....	73
4.5.1	Hintergrund und Fahrleistung .....	73
4.5.2	Fahrzeugklassen und Flottenstruktur .....	73
4.5.3	Infrastruktur Treibstoffversorgung.....	75
4.6	Fahrzeuge mit Brennstoffzellen (FCV) .....	77

4.6.1	Hintergrund und Fahrleistung .....	77
4.6.2	Fahrzeugklassen und Flottenstruktur .....	78
4.6.3	Infrastruktur Treibstoffversorgung.....	79
4.7	Muskelkraft und öffentlicher Verkehr (HP+PT) .....	80
4.7.1	Hintergrund und Fahrleistung .....	80
4.7.2	Fahrzeugklassen und Flottenstruktur .....	81
4.7.3	Infrastruktur .....	83
4.8	Vergleich der Zukunftsbilder bezüglich Energieverbrauch .....	83
4.8.1	Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel.....	83
4.8.2	Energieverbrauch für den Betrieb der Fahrzeuge ("Tank-to-Wheel") .....	84
4.8.3	Primärenergiebedarf ("Well-to-Wheel") .....	87
4.8.4	Folgerungen für Infrastruktur Energieerzeugung.....	91
4.8.5	Fazit: Zuordnung Mobilitätswelten zu Antrieben und Treibstoffen .....	93
<b>5</b>	<b>Auswirkungen der Zukunftsbilder .....</b>	<b>95</b>
5.1	Vorgehen .....	95
5.2	Zielsystem.....	96
5.3	Umwelt .....	98
5.3.1	U1 Umweltbelastung senken .....	98
5.3.2	U2 Klima schützen .....	101
5.3.3	U3 Ressourcen schonen .....	106
5.3.4	U4 Natürliche Vielfalt fördern.....	111
5.4	Wirtschaft .....	112
5.4.1	W1 Kosten minimieren.....	112
5.4.2	W2 Wertschöpfung erhöhen .....	122
5.4.3	W3 Indirekte wirtschaftliche Effekte verbessern.....	123
5.4.4	W4 Versorgungssicherheit gewährleisten .....	124
5.5	Gesellschaft .....	126
5.5.1	G1 Gesundheit und Wohlbefinden fördern .....	126
5.5.2	G2 Gesellschaftliche Solidarität fördern .....	130
5.6	Exkurs: Auswirkungen der Zukunftsbilder auf die Verkehrsnachfrage.....	130
5.7	Fazit .....	132
<b>6</b>	<b>Handlungsbedarf je Zukunftsbild.....</b>	<b>135</b>
6.1	Alle Zukunftsbilder (inkl. Business-As-Usual, BAU) .....	135
6.2	Verbesserter Verbrennungsmotor (Internal Combustion Improved, ICI).....	138
6.3	Batterieelektrifahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV) .....	140
6.4	Fahrzeuge mit Brennstoffzellen (Fuel Cell Vehicles, FCV) .....	144
6.5	Muskelkraft und öffentlicher Verkehr (HP+ PT) .....	146
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
7.1	Empfehlungen zu den Zukunftsbildern .....	149
7.2	Ausblick: Welche Entwicklungen zeichnen sich ab? .....	150
 <b>Anhänge</b>		
A1	Beschreibung Mobilitätswelten .....	151
A2	Teilnehmer Expertengespräche .....	158
A3	Annahmen und Resultate Energieverbrauch .....	160
A4	Berechnungsmodelle BEV .....	163
A5	Luftschadstoffe im Verkehr.....	167
A6	Grundlagen und Resultate Treibhausgasemissionen .....	170

A7	Spezifische Verbrauchsfaktoren neuzugelassener Fahrzeuge im Jahr 2035 und 2050.....	173
A8	Teilnehmer des Workshops vom 05. November 2010.....	174
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>175</b>
	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>179</b>
	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>180</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b>	<b>183</b>

## Zusammenfassung

### Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund globaler wirtschafts-, umwelt- und energiepolitischer Entwicklungen zeichnet sich gegenwärtig ein Strukturbruch im Verkehrssektor ab. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage nach der Sicherstellung der Mobilität im Kontext sich verknappender fossiler Energieträger und globaler klimapolitischer Herausforderungen. Diese Forschungsarbeit untersuchte die folgenden übergeordneten Fragestellungen:

1. Welche Zukunftsbilder zeichnen sich innerhalb des Verkehrs- und Energiesektors vor dem Hintergrund der Ausdifferenzierung des Antriebsstrangs ab?
2. Welche Konsequenzen erwachsen daraus für eine ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltige Entwicklung?
3. Welche Handlungsoptionen bzw. welcher Handlungsbedarf entsteht seitens der unterschiedlichen Akteure bei einer Realisierung bestimmter Zukunftsbilder?

Diese Forschungsarbeit liefert einen Beitrag zur Beantwortung der Fragen und bereitet Grundlagen zu Alternativen und deren Wirkung im Bereich des motorisierten Individualverkehrs auf.

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen werden hier bewusst polarisierende Zukunftsbilder gezeichnet. Damit werden Potenziale sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien ermittelt und beschrieben. Die Potenzialermittlungen erfolgten auf Basis von Literaturrecherchen, Expertengesprächen und eigenen Abschätzungen.

### Beschreibung der Zukunftsbilder

Für diese Untersuchung wurden fünf Zukunftsbilder entwickelt. Tabelle 1 enthält die Eckwerte bezüglich Fahrleistungen sowie Anteilen verschiedener Antriebe und Treibstoffe. Die Zukunftsbilder lassen sich kurz wie folgt beschreiben:

*BAU = Business as Usual:* Dieses Bild dient als Referenzbild, welchem die übrigen Bilder gegenübergestellt werden. Im BAU steigen die Fahrleistungen im Personenverkehr weiter an. Die Effizienz der Fahrzeuge steigt, es werden aber keine technologischen Durchbrüche unterstellt. Die Fahrzeuge werden mit fossilen Treibstoffen angetrieben.

*ICI = Verbrennungsmotoren optimiert (inkl. konventionelle Hybride):* Gegenüber BAU werden deutlich verstärkte Effizienzsteigerungen unter anderem durch kleinere bzw. leichtere Fahrzeuge und konventionelle Hybride unterstellt. Neben fossilen Treibstoffen werden zusätzlich biogene Treibstoffe eingesetzt.

*BEV = Elektrofahrzeuge mit Batterien (inkl. Plug-in Hybride):* Fahrleistungen entsprechend dem BAU-Zukunftsbild werden vor allem mit Fahrzeugen mit Elektromotoren und Batterie erbracht. Aufgrund der auch in Zukunft bestehenden kleineren Reichweiten der Fahrzeuge mit einer Batterieladung und aufgrund der Ladedauer werden neben Strom auch weiterhin kleinere Mengen an fossilen Treibstoffen eingesetzt.

*FCV = Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen:* In diesem Zukunftsbild werden die Fahrleistungen mit Fahrzeugen mit Elektromotor und Brennstoffzellen erbracht, in denen Wasserstoff in Strom umgewandelt wird.

*HP+PT = Muskelkraft und öffentlicher Verkehr („BEV Light“):* Dieses Zukunftsbild beinhaltet neben den technischen auch soziale Innovationen. Ein Wertewandel führt dazu, dass sich der Lebensstil der Menschen entschleunigt und sie bei gleich hoch bewerteter Lebensqualität dichter wohnen. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Zukunftsbild die Fahrleistungen in etwa wie heute realisiert werden. Diese werden aber im Gegensatz zu heute vermehrt innerstädtisch erbracht, weshalb hier verstärkt auch elektrische Kleinstfahrzeuge eingesetzt

werden. Verbleibende Überlandfahrten werden in Fahrzeugen mit Range Extendern absolviert (oder mit dem ÖV). Als Treibstoffe werden Strom und fossile Treibstoffe eingesetzt.

### **Wesentliche Resultate**

Die Zukunftsbilder wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Kriterien einer nachhaltigen Entwicklung aus den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft untersucht. Die Ergebnisse sind im Bericht dokumentiert. Einzelne numerische Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei werden Spannweiten aufgrund unterschiedlicher Annahmen zur Energieerzeugung dargestellt. Hier werden wesentliche Resultate zusammengefasst:

- Gleichbleibende und steigende Fahrleistungen in der Schweiz können durch technische und gesellschaftliche Innovationen so erbracht werden, dass der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich sinken.
- Eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs muss einhergehen mit einer Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern. Dieses Ziel ist im Kontext des gesamten Energie- und Verkehrssystems zu erreichen.
- Aktuell bestehen grosse Preisunterschiede bei den Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebstechnologien. Herausfordernd sind die Reduktion der Fahrzeugkosten und der Aufbau der Infrastruktur in der Einführungsphase. Langfristig nähern sich die Nutzerkosten von BEV und FCV an die Kosten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in einem finanzierbaren Rahmen an.
- Die Verfügbarkeit von Rohstoffen, die es beispielsweise für Elektromotoren oder Batterien braucht, ist beschränkt und der steigende Bedarf lässt die Ressourcen merklich schwinden. Es sind aber grundsätzlich ausreichend Ressourcen vorhanden. Das Risiko der Abhängigkeit wird – unterschiedlich nach Zukunftsbild – weiterhin bestehen.
- Zur Schonung der natürlichen Ressourcen und zur langfristigen Sicherstellung der Versorgung ist das Recycling der eingesetzten Rohstoffe notwendig.

Auf einem Workshop wurden je Zukunftsbild Massnahmen zur Realisierung des Zukunftsbildes gesammelt. Je nach Marktreife und Verbreitung der Technologien stehen in den einzelnen Zukunftsbildern unterschiedliche Massnahmen im Vordergrund: bei ICI angebots- und nachfrageorientierte Massnahmen zur Förderung effizienter Fahrzeuge, bei BEV Massnahmen in den Bereichen Infrastruktur und Markteinführung und bei FCV in erster Linie Forschung und Entwicklung. Bei HP+PT werden zusätzlich Massnahmen zur Unterstützung des Wertewandels sowie in den Bereichen Raumplanung und öffentlicher Verkehr genannt.

Ziel der Zukunftsbilder ist es, fünf mögliche Zustände zu analysieren; sie wurden bewusst zugespitzt und zeichnen sich je durch eine klare technologische Hauptvariante aus. So werden Vor- und Nachteile der Antriebsvarianten sichtbar. Die Realität wird sich aber zwischen den Zukunftsbildern bewegen, die wahrscheinliche künftige Entwicklung ist eine Mischung aus mehreren Zukunftsbildern, wobei die Ausgangslage die Entwicklung gemäss dem Business as Usual „BAU“ ist. In der weiteren Entwicklung sind unterschiedliche Kombinationen oder auch eine Abfolge von verschiedenen Zukunftsbildern denkbar.

Das Forschungsteam erwartet eine Entwicklung, welche von BAU ausgehend unter dem Einfluss höherer Ölpreise, internationaler Klimaschutzverpflichtungen, der Internalisierung externer Kosten und einem gewissen Wertewandel stark in Richtung des Zukunftsbildes ICI geht, um dann in eine Kombination aus ICI und BEV überzugehen. Dazu sind im Vergleich zum BAU politische Massnahmen notwendig wie beim ICI-Zukunftsbild beschrieben; wir erwarten, dass solche oder ähnliche Massnahmen aufgrund von Energiepreisen und CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sowie einem teilweisen Wertewandel politisch umgesetzt werden. Ein Wertewandel wie er für die Realisierung des Zukunftsbildes für HP+PT notwendig wäre, erwarten wir vor dem Hintergrund verfügbarer technischer Alternativen nicht. Die Potenziale von Elektromobilen, werden ein Wachstum erlauben, welches über dem europäischen Schnitt liegen dürfte, die Marke von 100'000 Elektromobilen in der Schweiz im 2020 aber knapp verfehlen dürfte. Ab 2016 ist mit der breiten Verfügbarkeit von batteriebetriebenen Fahrzeugen mit Range Extender (serielle Hybride) zu rechnen.



		„Heute“ 2010	BAU	ICI	Zukunftsbilder 2050		HP+PT (ohne ÖV)
					BEV	FCV	
<b>Unterstellte Eckwerte der Zukunftsbilder (Input für die Auswirkungsanalyse)</b>							
Fahrleistung Personenverkehr [Mrd. Pw-km/a]		59	73	73	73	73	57
Antriebe (Anteil Fahrleistung in %)	Verbrennungsmotor (inkl. konventionelle Hybride)	100	100	100	0	0	0
	Plug-In Hybride	0	0	0	53	0	30
	Elektromotoren mit Batterie	0	0	0	47	0	70
	Elektromotoren mit Brennstoffzelle	0	0	0	0	100	0
Treibstoffe (Anteil am Verbrauch)	Fossil (Benzin, Diesel, Erdgas)	100	100	90	33	0	9
	Biogen	0	0	10	0	0	0
	Strom	0	0	0	67	0	91
	Wasserstoff	0	0	0	0	100	0
<b>Ergebnisse der Auswirkungsanalyse für „Heute“ und für das Jahr 2050</b>							
Primärenergieverbrauch Well-to-Wheel [Mrd. kWh/a] Minimalwert/Grundwert/Maximalwert		54	37/37/60	23/25/47	16/31/44	36/87/120	8/17/24
CO <sub>2</sub> -Emissionen Well-to-Wheel [Mio. t-CO <sub>2</sub> -Äquivalente/a] Minimalwert/Grundwert/Maximalwert		13	9/9/15	6/6/9	1/3/13	0/5/36	0/1/7
Investitionsausgaben für Ladestationen bzw. Tankstellen (ohne Energieerzeugung und überörtliche Verteilung [Mrd. CHF]		-	.	.	0.7-4.3	2.5-2.8	0.6-3.6

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen keine Angaben für 2010 vor. Die Fahrleistung heute musste deshalb ebenfalls geschätzt werden (Zum Vergleich: Im Jahr 2008: 52 Mrd. PW-km/a)

Tabelle 1: Unterstellte Eckwerte für die Zukunftsbilder und Ergebnisse der Auswirkungsanalyse

## Résumé

### Exposé de la tâche

Dans le cadre de l'évolution globale en matière de politique économique, de l'environnement et de l'énergie, le secteur du trafic se trouve actuellement confronté à une rupture structurelle. La question fondamentale est celle relative au maintien de la mobilité face à une raréfaction prévisible des agents énergétiques fossiles, alliée aux défis présentés par la politique climatique. Ce travail de recherche examine les questions liées à ces problèmes :

1. Quels modèles d'avenir se dessinent-ils en matière de trafic et d'énergie dans le contexte de la différenciation des énergies motrices ?
2. Quelles en sont les conséquences pour un développement durable sur le plan écologique, économique et social ?
3. Quelles sont les possibilités d'action et les besoins d'intervention de la part des différents acteurs dans la réalisation d'un certain modèle d'avenir ?

Ce travail de recherche est sensé apporter une contribution pour répondre à ces questions et préparer les bases pour la définition d'alternatives et de leurs effets sur le trafic motorisé individuel.

Contrairement à d'autres études, nous présentons intentionnellement des modèles d'avenir polarisés, en cernant les avantages et inconvénients inhérents aux différentes technologies. A cet effet, les potentiels ont été déterminés sur la base de recherches bibliographiques, de discussions avec des experts et de nos propres estimations.

### Description des modèles d'avenir

Pour nos recherches, nous avons développé cinq modèles d'avenir. Le Tableau 1 décrit des paramètres liés aux prestations ainsi qu'aux différents modes de propulsion et carburants. Ces modèles peuvent être décrits succinctement comme suit :

*BAU = Business as Usual* : Ce modèle sert de référence de comparaison pour les autres modèles. Dans BAU, l'amélioration des prestations dans le trafic individualisé se poursuit. Le rendement des véhicules augmente, sans toutefois qu'aucune percée technologique ne se manifeste. Les véhicules sont mus par des agents énergétiques fossiles.

*ICI = Moteurs à combustion optimisés (y compris hybrides classiques)* : Comparativement au modèle BAU, celui-ci se caractérise par des rendements énergétiques nettement supérieurs, dus notamment à des véhicules plus légers et au mode hybride classique. Outre les carburants fossiles, des carburants biogènes sont mis en oeuvre.

*BEV = Véhicules électriques à batteries (y compris Plug-in Hybride)* : Les prestations relatives au modèle d'avenir BAU sont essentiellement assurées par des véhicules électriques à batterie. En raison de l'autonomie réduite des véhicules électriques par charge de batterie et de la durée de charge, inconvénients qui perdureront, de petites quantités de carburants fossiles resteront utilisées parallèlement au courant électrique.

*FCV = Véhicule à hydrogène avec piles à combustible* : Dans ce modèle, les prestations sont assurées par les véhicules à moteurs électriques avec piles à combustible, qui convertissent l'hydrogène en courant électrique.

*HP+PT = Force musculaire et transports publics (« BEV Light »)* : Ce modèle reflète des innovations aussi bien d'ordre technique que social. Un changement de valeurs entraîne un ralentissement du mode de vie de la population, s'accompagnant d'une densification de l'habitat, cela à qualité de vie égale. Nous partons de l'hypothèse que dans ce modèle les prestations assurées resteront proches de celles d'aujourd'hui. Contrairement à la situation actuelle, ces prestations se concentreront principalement dans les centres des villes, avec une mise en circulation accrue de mini véhicules électriques. Les grandes distances résiduelles sont franchies avec des véhicules à autonomie accrue (ou avec les TP), électriques ou à carburant fossile.

## Résultats clés

Ces modèles d'avenir ont été évalués du point de vue de leurs effets sur des critères de développement durable dans les domaines environnementaux, économiques et sociétaux. Les résultats sont présentés dans le rapport. Quelques résultats numériques figurent dans le tableau 1. Les autonomies sont ici présentées en fonction de différentes hypothèses relatives à la production d'énergies. Les principaux résultats sont résumés ci-après :

- Des prestations équivalentes ou croissantes peuvent être assurées en Suisse grâce à des innovations techniques et sociales, tout en abaissant la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>.
- L'électrification de la propulsion doit se faire parallèlement à une production d'énergie à partir d'agents énergétiques renouvelables. Ce but doit être réalisé dans le contexte d'un système énergétique et de transport global.
- A l'heure actuelle, d'importantes différences de prix sont constatées parmi les véhicules équipés de différents modes de propulsion. La réduction du coût des véhicules et la construction d'une infrastructure dans la phase d'introduction sont des défis à relever. A long terme, les frais d'usage des BEV et FCV se rapprocheront des coûts de véhicules avec moteurs à combustion dans un cadre finançable.
- La disponibilité de matières premières telles que celles utilisées pour les moteurs électriques ou les batteries est limitée et les besoins croissants pourraient épuiser les ressources. Toutefois, les ressources disponibles sont fondamentalement suffisantes. Le risque de dépendance – variable selon le modèle – reste présent.
- Pour la protection des ressources naturelles et l'assurance à long terme des disponibilités, le recyclage des matières premières est indispensable.

Les mesures à mettre en oeuvre en fonction des différents modèles ont été examinées dans le cadre d'un atelier. Selon la maturité et la diffusion des technologies, différentes mesures en fonction du modèle sont mises en évidence : pour ICI avec des mesures portant sur l'offre et la demande pour la promotion de véhicules plus efficaces sur le plan énergétique, pour BEV avec des mesures au niveau de l'infrastructure et de la mise sur le marché, et pour FCV portant en première ligne sur la recherche et le développement. Pour HP+PT, des mesures supplémentaires sont envisagées pour un changement des mentalités, dans le domaine de l'aménagement des espaces vitaux et des transports publics.

Le but de ces modèles d'avenir est d'analyser cinq états possibles. Ceux-ci sont intentionnellement pointus et se caractérisent par des variantes technologiques clairement affirmées. Les avantages et inconvénients des différents modes de propulsion sont ainsi mis en évidence. Toutefois, la réalité fluctuera entre les modèles, les développements futurs s'inspirant de différents modèles à partir de la situation initiale du développement, à savoir le modèle « BAU ». Différentes combinaisons et aussi successions de différents modèles sont parfaitement envisageables à l'avenir.

Sous l'effet de hausses du prix du pétrole, des obligations internationales en matière de protection du climat, de l'internalisation de coûts externes et d'un certain changement de valeurs, l'équipe de recherche s'attend à un développement partant du modèle BAU et s'orientant de façon décisive en direction du modèle ICI, avant de s'infléchir vers une combinaison des modèles ICI et BEV. Comparativement au modèle BAU, des mesures politiques sont nécessaires à cet effet, telles que celles décrites pour le modèle ICI ; nous estimons que de telles mesures ou des mesures similaires seront mises en oeuvre sur le plan politique en fonction des prix de l'énergie, des coûts de compensation du CO<sub>2</sub> et d'un changement partiel de mentalités. Vu les alternatives techniques disponibles, nous ne nous attendons pas à une évolution telle que celle qui serait nécessaire pour réaliser le modèle HP+PT. Le potentiel des voitures électriques autorisera une certaine croissance, qui devrait surpasser la moyenne européenne, mais la marque de 100'000 voitures électriques en Suisse à l'horizon 2020 devrait être ratée de peu. A partir de 2016, on peut s'attendre à une plus grande diffusion de véhicules propulsés par batterie avec Range Extender (hybrides sérielles).

		« Aujourd'hui »	Modèles d'avenir 2050				
		2010	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT (sans TP)
<b>Paramètres des modèles d'avenir (valeurs d'entrée pour analyse des effets)</b>							
Prestations du trafic individuel [mrd. voitures-km/a]		59	73	73	73	73	57
Propulsion (part de la puiss. du véhicule en %)	Moteur à combustion (y c. hybride classique)	100	100	100	0	0	0
	Plug-In Hybride	0	0	0	53	0	30
	Moteurs électriques avec batteries	0	0	0	47	0	70
	Moteurs électriques avec piles à combustibles	0	0	0	0	100	0
Carburants (part de la consommation)	Agents fossiles (essence, diesel, gaz naturel)	100	100	90	33	0	9
	Biogène	0	0	10	0	0	0
	Courant électrique	0	0	0	67	0	91
	Hydrogène	0	0	0	0	100	0
<b>Résultats de l'analyse des effets pour « aujourd'hui » et pour l'an 2050</b>							
Consommation d'énergie primaire de la source à la roue [mrd. kWh/a] Valeur minimale/valeur de base/valeur maximale		54	37/37/60	23/25/47	16/31/44	36/87/120	8/17/24
Emissions de CO <sub>2</sub> de la source à la roue [mio. t-CO <sub>2</sub> équivalentes/a] Valeur minimale/valeur de base/valeur maximale		13	9/9/15	6/6/9	1/3/13	0/5/36	0/1/7
Investissements pour stations de charge ou stations service (sans production de l'énergie et distribution régionale [mrd. CHF]		-	.	.	0.7-4.3	2.5-2.8	0.6-3.6

Tableau 1: Paramètres des modèles d'avenir et résultat de l'analyse des effets.

## Summary

### **Nature of the task**

Against the backdrop of global, environmental and energy policy developments, a structural break is emerging in the transportation sector at the present time. At the heart of the matter is the question of securing mobility within the context of an increasing shortage of fossil fuels and global climate policy challenges. This research work examined the following overriding issues:

1. What future scenarios are emerging within the transportation and energy sector against the background of differentiation in the drive-train?
2. Which consequences arise from this for an ecological, economic and socially sustainable development?
3. Which courses or needs for action arise on the part of the various players in the implementation of specific future scenarios?

This research work makes an attempt to answer these questions and prepares foundations for alternatives and their effects within the realm of motorised private transport.

In contrast to other investigations, polarising future perspectives are deliberately portrayed here. As a result, the future potential as well as advantages and disadvantages of the separate technologies are determined and outlined. The determination of potential was done on the basis of research of the literature, discussions with experts and one's own assessments.

### **Description of the future scenarios**

Five future scenarios were devised for this investigation. Table 1 contains the key values for mileage as well as proportions of various drive-trains and fuels. The future scenarios can be summarised as follows:

*BAU = Business as Usual:* This scenario serves as a reference perspective against which the other scenarios are contrasted. In the BAU case, the mileages in private transportation continue to rise. The efficiency of vehicles increases but no technological breakthroughs are assumed. The vehicles are propelled by fossil fuels.

*ICI = Optimised Internal Combustion Engines (incl. conventional hybrids):* In contrast to BAU, significant improvements in efficiency are assumed due to smaller or lighter vehicles and conventional hybrids among other things. Besides fossil fuels, biogenic fuels are also used.

*BEV = Battery Electric Vehicles (incl. plug-in hybrids):* Mileages corresponding to the BAU future scenario are yielded, especially with vehicles with electric motors and batteries. Since these vehicles will even in the future continue to have a shorter range on a single battery charge, and because of the charging duration, small amounts of fossil fuels will continue to be used in addition to electricity.

*FCV = Fuel Cell Vehicles with hydrogen fuel cells:* In this future scenario, the mileages are achieved with vehicles with an electric motor and fuel cells in which hydrogen is converted into electricity.

*HP+PT = Muscle Power and Public Transport ("BEV Light"):* This future scenario comprises social innovations as well as the technical ones. Changing values lead to people's lifestyles slowing down and they live closer together while quality of life is valued equally important. In this future scenario it is assumed that mileages will be roughly the same as today. However, in contrast to today, these will increasingly be inner-city mileages, which is why small electric vehicles are also increasingly being used. The remaining cross-country trips will be done in vehicles with range extenders (or by public transport). Power is obtained from electricity and fossil fuels.

### Basic findings

The future scenarios were examined with regard to their effects on criteria of sustainable development for the environment, economy and society. The results are documented in the report. Detailed numerical results are listed in Table 1. The ranges of values are presented on the basis of different assumptions for the production of energy. The basic findings are summarised here:

- Unchanging and increasing mileages in Switzerland can be achieved through technical and societal innovations in such a way that energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions fall significantly.
- An electrification of the drive-train must go hand in hand with energy production from renewable sources of energy. This goal must be reached within the context of the overall energy and transport system.
- Currently, there are large price differences between vehicles with differing drive technologies. Challenges ahead are the reduction in vehicle costs and the building up of the infrastructure during the introductory phase. In the long term, the user costs of BEV and FCV converge on the costs of vehicles with internal combustion engines, within a financially feasible framework.
- The availability of raw materials, such as those needed for electric motors or batteries, is limited, and increasing demand causes resources to disappear noticeably. In principle though, sufficient resources are available. The risk of dependency will continue to exist – varying according to the future scenario.
- To go easy on natural resources and safeguard supplies in the longer term, it will be necessary to recycle the raw materials used.

For each future scenario, the measures needed for its realisation were gathered and noted down at a workshop. The measures to the fore in the separate future scenarios vary according to the maturity of the market and prevalence of the technologies: with ICI, supply and demand oriented measures to promote more efficient vehicles, with BEV, measures in the realm of infrastructure and market introduction, and with FCV, primarily research and development. With HP+PT, additional measures are cited in the spatial planning and public transport spheres and in support of changing values.

The goal of the future scenarios is to analyse five possible states; a sharp differentiation has been chosen intentionally and each has a distinct technological main variant. The advantages and disadvantages of the drive variants are evident as a result. The reality though will move between the future scenarios, and the probable future development is a mix of several of them, where the initial situation is evolution as per Business as Usual "BAU". In future evolution, different combinations or even a sequence of various future scenarios is conceivable.

The research team expects an evolution that is influenced by higher oil prices, international climate protection obligations, internalisation of external costs and an undoubted change in values. Starting out at BAU it will move strongly in the direction of scenario ICI and then migrate towards a combination of ICI and BEV. In comparison with BAU, political measures like those described for the ICI future scenario are needed for this; we expect such measures or similar ones to be implemented politically on account of energy prices, CO<sub>2</sub> avoidance costs and, in part, changing values. Against the background of available technical alternatives, we do not expect a change in values of the kind that would be needed to implement future scenario HP+PT. The potential of electro mobiles will permit growth that ought to lie above the European average but will probably just miss the mark of 100,000 electric vehicles in Switzerland in 2020. From 2016 on, widespread availability of battery-powered vehicles with a range extender (serial hybrids) is to be expected.

		"Today"	Future scenarios 2050				
		2010	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT (without PT)
<b>Assumed key values of the future scenarios (Input for the effects analysis)</b>							
Mileage of private transport [Bln passenger car km/a]		59	73	73	73	73	57
Drives (Share of mileage in %)	Internal combustion engine (incl. conventional hybrids)	100	100	100	0	0	0
	Plug-in hybrids	0	0	0	53	0	30
	Electric motors with battery	0	0	0	47	0	70
	Electric motors with fuel cells	0	0	0	0	100	0
Fuels (Share of consumption)	Fossil fuel (petrol, diesel, natural gas)	100	100	90	33	0	9
	Biogenic	0	0	10	0	0	0
	Electricity	0	0	0	67	0	91
	Hydrogen	0	0	0	0	100	0
<b>Results of the effects analysis for "today" and for year 2050</b>							
Primary energy consumption Well-to-Wheel [Bln. kWh/a] Minimum value/Basic value/Maximum value		54	37/37/60	23/25/47	16/31/44	36/87/120	8/17/24
CO <sub>2</sub> emissions Well-to-Wheel [Mln. t-CO <sub>2</sub> -equivalent/a] Minimum value/Basic value/Maximum value		13	9/9/15	6/6/9	1/3/13	0/5/36	0/1/7
Investment spending for charging stations or filling stations (without energy production and regional distribution [bln Swiss francs])		-	.	.	0.7-4.3	2.5-2.8	0.6-3.6

Table 1: Assumed key values for the future scenarios and results from the effects analysis



## Kurzfassung

### **Ausgangslage: Versorgungssicherheit und Klimawandel als wichtige Treiber**

Vor dem Hintergrund globaler wirtschafts-, umwelt- und energiepolitischer Entwicklungen zeichnet sich gegenwärtig ein Strukturbruch im Verkehrssektor ab. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage nach der Sicherstellung der Mobilität im Kontext sich verknappender fossiler Energieträger und globaler klimapolitischer Herausforderungen. Die starke Abhängigkeit von einem Energieträger und die damit verbundenen negativen Auswirkungen werden insbesondere bezüglich des motorisierten Individualverkehrs diskutiert:

- **Versorgungssicherheit:** Die hohen Erdölpreise im ersten Halbjahr 2008 haben die Abhängigkeit vom Erdöl in der breiten Bevölkerung bewusst gemacht.
- **Umweltbelastungen:** Mit dem Erdölverbrauch sind u.a. hohe Treibhausgasemissionen verbunden. Auch aufgrund weiterer Umweltbelastungen wie zum Beispiel Lärm wird vor allem der motorisierte Individualverkehr kritisch betrachtet.

Der notwendige „Ablösungsprozess“ gegenüber dem Erdöl geht im motorisierten Individualverkehr mit einer Ausdifferenzierung des automobilen Antriebsstrangs einher. Für die weitere Zukunft erscheint am Horizont eine gänzlich post-fossile Mobilität möglich, dank des Einsatzes von alternativen Energieträgern. Neben neuen Antrieben und Treibstoffen für den motorisierten Individualverkehr sind bei Zukunftsbetrachtungen auch die Möglichkeiten der Fortbewegung durch eigene Muskelkraft (Human Powered Mobility) und des öffentlichen Verkehrs zu beachten.

### **Aufgabenstellung und Untersuchungsaufbau**

Angesichts dieses Umfelds und der dabei bestehenden Ansprüche unterschiedlicher Akteure sowie der Auswirkungen auf natürliche Systeme sind Entscheidungsgrundlagen und eine Gesamtschau zu möglichen zukünftigen Entwicklungen im Verkehrsbereich erforderlich. Als Orientierung dienen die folgenden übergeordneten Fragestellungen:

1. Welche Zukunftsbilder zeichnen sich innerhalb des Verkehrs- und Energiesektors vor dem Hintergrund der Ausdifferenzierung des Antriebsstrangs ab?
2. Welche Konsequenzen erwachsen daraus für eine ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltige Entwicklung?
3. Welche Handlungsoptionen bzw. welcher Handlungsbedarf entsteht seitens der unterschiedlichen Akteure bei einer Realisierung bestimmter Zukunftsbilder?

Diese Forschungsarbeit liefert einen Beitrag zur Beantwortung der Fragen und bereitet Grundlagen zu Alternativen und deren Wirkung im Bereich des motorisierten Individualverkehrs auf. Mit dieser Arbeit liegen erstmals konkret folgende Resultate für die Schweiz vor:

- Vergleichende Darstellung alternativer Antriebe und Treibstoffe;
- Ermittlung der jeweiligen technischen Potenziale;
- Ermittlung des zukünftigen Energiebedarfs im motorisierten Individualverkehr auf Basis der Verkehrsperspektiven des Bundes für alternative Antriebs- und Treibstoffkonzepte;
- Aufbereitung der Kosten und Nutzen für die gesamte Volkswirtschaft;
- Systematische Aufbereitung der Vor- und Nachteile hinsichtlich relevanter Zielbereiche der Nachhaltigen Entwicklung.

Neben den technologischen Entwicklungen wird auch ein Zukunftsbild betrachtet, welches neben einem Technologiewandel auch von einem gesellschaftlichen Wandel ausgeht.

## Vorgehen

Die folgende Abbildung 1 zeigt den Kontext der Fragestellungen dieser Forschungsarbeit im Überblick. Ausgehend von der heutigen Situation werden ein Business-As-Usual-Bild und vier mögliche Zukunftsbilder dargestellt (1). Für jedes dieser Bilder werden die Konsequenzen für eine Nachhaltige Entwicklung untersucht (2). Aus der Frage, wie der Weg von der heutigen Situation in die Zukunft gestaltet werden kann, wird der Handlungsbedarf abgeleitet (3).

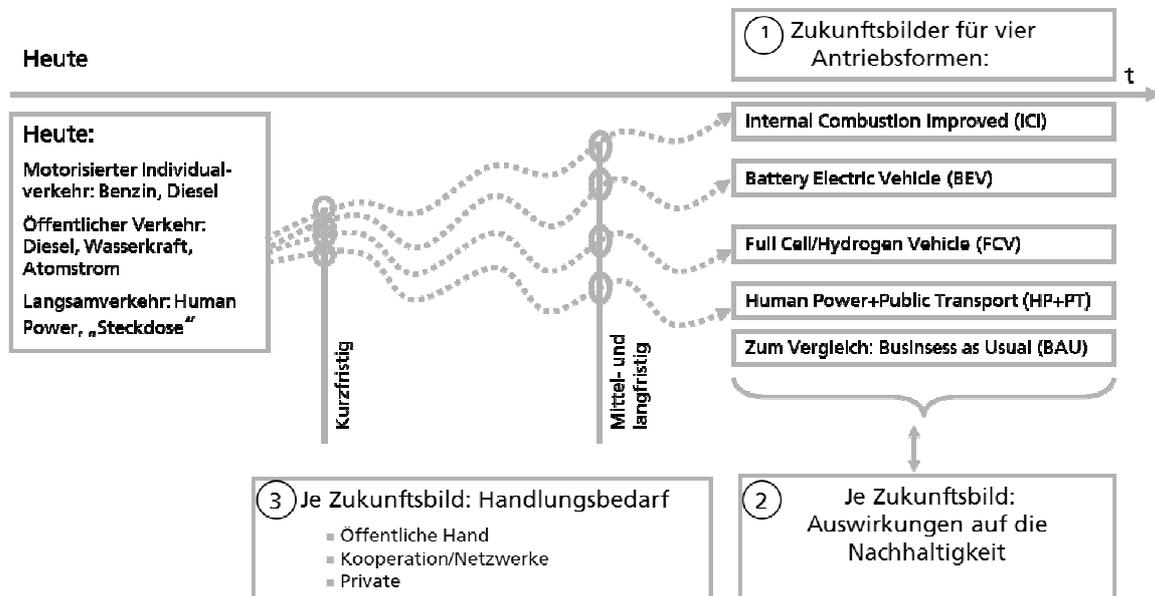


Abbildung 1: Übersicht und Kontext der Fragestellungen

Hier werden bewusst polarisierende Zukunftsbilder gezeichnet. Damit werden Potenziale sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien ermittelt und beschrieben. Die Potenzialermittlungen erfolgten auf Basis von Literaturrecherchen, Expertengesprächen und eigenen Abschätzungen.

## Gegenstand der Untersuchung

Diese Forschungsarbeit ist wie folgt abgegrenzt:

**Räumliche Systemabgrenzung:** Im Fokus steht die Schweiz, da für diese auch der Handlungsbedarf aufgezeigt werden soll. Dabei werden internationale Entwicklungen wie zum Beispiel im Bereich der Fahrzeugtechnologien oder der Energieerzeugung mit einbezogen.

**Zeitliche Systemabgrenzung:** 2035 und 2050: Die Zukunftsbilder beschreiben Zustände, die erst in einem langfristigen Zeitpunkt realisierbar sind. Für solche Perspektiven und Visionen wird momentan oftmals das Jahr 2050 als Zeitpunkt verwendet. Dies signalisiert aber eher die Langfristigkeit, als dass es sich um einen genauen Zeitpunkt handelt. Für das Jahr 2035 werden mögliche Zwischenzustände beschrieben. Um die Auswirkungen auch quantitativ einschätzen zu können, werden Grundlagen wie Szenarien zur Bevölkerungs- und Verkehrsentwicklung berücksichtigt. Diese liegen für den Verkehr für das Jahr 2030 vor und werden für das Jahr 2035 und 2050 extrapoliert.

**Sachliche Systemabgrenzung:** Im Fokus der Untersuchung steht der motorisierte Personenverkehr. Für diesen werden unterschiedliche Antriebsformen untersucht. In Bezug auf die Verkehrsnachfrage werden die Perspektiven Personenverkehr des UVEK zugrunde gelegt. Der Güterverkehr wird insoweit berücksichtigt, als beim Handlungsbedarf geprüft wird, ob es hier zwingende Bedingungen oder Restriktionen aus Sicht des Güterverkehrs gibt.

### **Beschreibung der Zukunftsbilder**

Für diese Untersuchung wurden fünf Zukunftsbilder entwickelt. Tabelle 2 enthält die diesbezüglich festgelegten Eckwerte. Die Zukunftsbilder lassen sich kurz wie folgt beschreiben:

#### *BAU = Business as Usual:*

Das BAU-Zukunftsbild basiert auf den Verkehrsperspektiven des Bundes<sup>1)</sup> und den spezifischen Verbräuchen entsprechend dem aktuellen Handbuch für Emissionsfaktoren des BAFU (mit eigenen Fortschreibungen bis 2050). Im BAU steigen die Fahrleistungen im Personenverkehr weiter an. Die Effizienz der Fahrzeuge steigt, es werden aber keine technologischen Durchbrüche unterstellt. Die Fahrzeuge werden mit fossilen Treibstoffen angetrieben.

#### *ICI = Verbrennungsmotoren optimiert (inkl. konventionelle Hybride):*

Das ICI-Zukunftsbild entspricht in mehreren Punkten dem BAU-Zukunftsbild. Allerdings werden deutliche Effizienzsteigerungen unter anderem durch kleinere bzw. leichtere Fahrzeuge und konventionelle Hybride unterstellt. Neben fossilen Treibstoffen werden zusätzlich biogene Treibstoffe eingesetzt.

#### *BEV = Elektrofahrzeuge mit Batterien (inkl. Plug-in Hybride):*

In diesem Zukunftsbild werden die Fahrleistungen entsprechend dem BAU-Zukunftsbild vor allem mit Fahrzeugen mit Elektromotoren und Batterie erbracht. Aufgrund der auch in Zukunft bestehenden kleineren Reichweiten der Fahrzeuge mit einer Batterieladung und aufgrund der Ladedauern werden für längere Fahrten Fahrzeuge mit Range Extender eingesetzt. Neben Strom werden in diesem Zukunftsbild deshalb auch weiterhin kleinere Mengen an fossilen Treibstoffen eingesetzt.

#### *FCV = Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen:*

In diesem Zukunftsbild werden die Fahrleistungen mit Fahrzeugen mit Elektromotor und Brennstoffzellen erbracht, in denen Wasserstoff in Strom umgewandelt wird.

#### *HP+PT = Muskelkraft und öffentlicher Verkehr („BEV Light“)*

Dieses Zukunftsbild beinhaltet neben den technischen auch soziale Innovationen. Ein Wertewandel führt dazu, dass sich der Lebensstil der Menschen entschleunigt und sie bei gleich hoch bewerteter Lebensqualität dichter wohnen. Ein grosser Teil des Wirtschaftens findet lokal statt. Entsprechend den Auftragsvorgaben wird hier davon ausgegangen, dass in diesem Zukunftsbild die Fahrleistungen in etwa wie heute (d.h. im Gegensatz zu den anderen Zukunftsbildern wird kein Anstieg bis 2050 unterstellt) werden. Diese werden aber im Gegensatz zu heute vermehrt innerstädtisch erbracht, weshalb hier verstärkt auch elektrische Kleinstfahrzeuge eingesetzt werden. Verbleibende Überlandfahrten werden in Fahrzeugen mit Range Extendern absolviert (oder mit dem ÖV). Als Treibstoffe werden Strom und fossile Treibstoffe eingesetzt.

---

1) Vgl. Bundesamt für Raumentwicklung: Perspektiven des schweizerischen Personenverkehrs bis 2030, Bern, 2006.

		„Heute“ 2010	BAU	ICI	Zukunftsbilder 2050		
					BEV	FCV	HP+PT
Fahrleistung Personenverkehr [Mrd. Pw-km/a]		59	73	73	73	73	57
Antriebe (Anteil Fahrleistung in %)	Verbrennungsmotor (inkl. konventionelle Hybride)	100	100	100	0	0	0
	Plug-In Hybride	0	0	0	53	0	30
	Elektromotoren mit Batterie	0	0	0	47	0	70
	Elektromotoren mit Brennstoffzelle	0	0	0	0	100	0
Treibstoffe (Anteile am Verbrauch)	Fossil (Benzin, Diesel, Erdgas)	100	100	90	33	0	9
	Biogen	0	0	10	0	0	0
	Strom	0	0	0	67	0	91
	Wasserstoff	0	0	0	0	100	0

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen keine Angaben für 2010 vor. Die Fahrleistung heute musste deshalb ebenfalls geschätzt werden (Zum Vergleich: Im Jahr 2008: 52 Mrd. PW-km/a)

Tabelle 2: *Unterstellte Eckwerte für die Zukunftsbilder*

## Wesentliche Resultate

Die Zukunftsbilder wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Kriterien einer Nachhaltigen Entwicklung aus den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft untersucht. Die Ergebnisse sind im Bericht dokumentiert. Hier werden wesentliche Resultate zusammengefasst.

### Energie und CO<sub>2</sub>

*Gleichbleibende und steigende Fahrleistungen in der Schweiz können durch technische und gesellschaftliche Innovationen so erbracht werden, dass der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich sinken*

Bei der Berechnung des gesamten Energieverbrauchs werden der Abbau von Primärenergieträgern und die Herstellung des Treibstoffs einbezogen. Der Primärenergiebedarf ist einerseits von der Endnachfrage und andererseits vom Energieaufwand bei der Treibstoffproduktion und -bereitstellung abhängig. Letzterer ist stark davon abhängig, welche Primärenergieträger und welche Herstellungsprozesse eingesetzt werden. Zusätzlich zu einem durchschnittlichen Wert wird deshalb eine Bandbreite von minimalem bis maximalem Energiebedarf aufgezeigt.<sup>2)</sup> Die folgende Abbildung 2 zeigt das Resultat der Berechnungen.

Bereits bei einer Entwicklung entsprechend BAU ist mit einer Reduktion des Energieverbrauchs gegenüber heute zu rechnen. Bei den Zukunftsbildern ICI, BEV und HP+PT sinkt dieser nochmals. Beim FCV ist der Primärenergieverbrauch bei durchschnittlichen Annahmen zum Energieverbrauch (Wasserstoff produziert mittels Elektrolyse mit dem Schweizer Strom-Verbrauchsmix des Jahres 2007) knapp 70% höher als im Jahr 2010. Auch wenn der Wasserstoff vollständig mit Strom aus Wasserkraft produziert würde, liegt der Wert noch fast so hoch wie beim Zukunftsbild BAU mit durchschnittlichen Annahmen zum Energiebedarf der Vorketten. Wird der Wasserstoff via Dampfreformierung aus Erdgas produziert, ist der Primärenergiebedarf für das FCV leicht höher als beim BAU.

---

2) Die Bandbreiten beim Energiebedarf beruhen auf folgenden Eckwerten zu den verschiedenen Treibstoffen:

*Benzin und Diesel:* Als durchschnittlicher Wert wird der heutige Primärenergiebedarf betrachtet. Das Maximum entspricht einem 60% höheren Energiebedarf bei der Rohöl-Förderung aus sogenannten unkonventionellen Quellen (era 2009).

*Strom:* Abweichungen vom Schweizer Verbrauchsmix (=durchschnittlicher Wert im Jahr 2007) nach oben (Atomkraft) und nach unten (Wasserkraft), was jeweils dem Maximum bzw. dem Minimum der verschiedenen Technologien entspricht (ESU-Services 2008).

*Wasserstoff:* durchschnittlicher Wert basiert auf Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse mit durchschnittlichem Schweizer Strom-Verbrauchsmix. Maximaler bzw. minimaler Wert entspricht der Herstellung mittels Elektrolyse und Strom aus Atomkraft bzw. Wasserkraft.

*Biogene Treibstoffe:* der minimale Wert entspricht Biogas aus Abfallstoffen, wobei Primärenergie aus Abfall nicht berücksichtigt wird (ESU-Services 2008), das Maximum entspricht der Herstellung von Biodiesel (BtL) aus Holz (ESU-Services 2007).

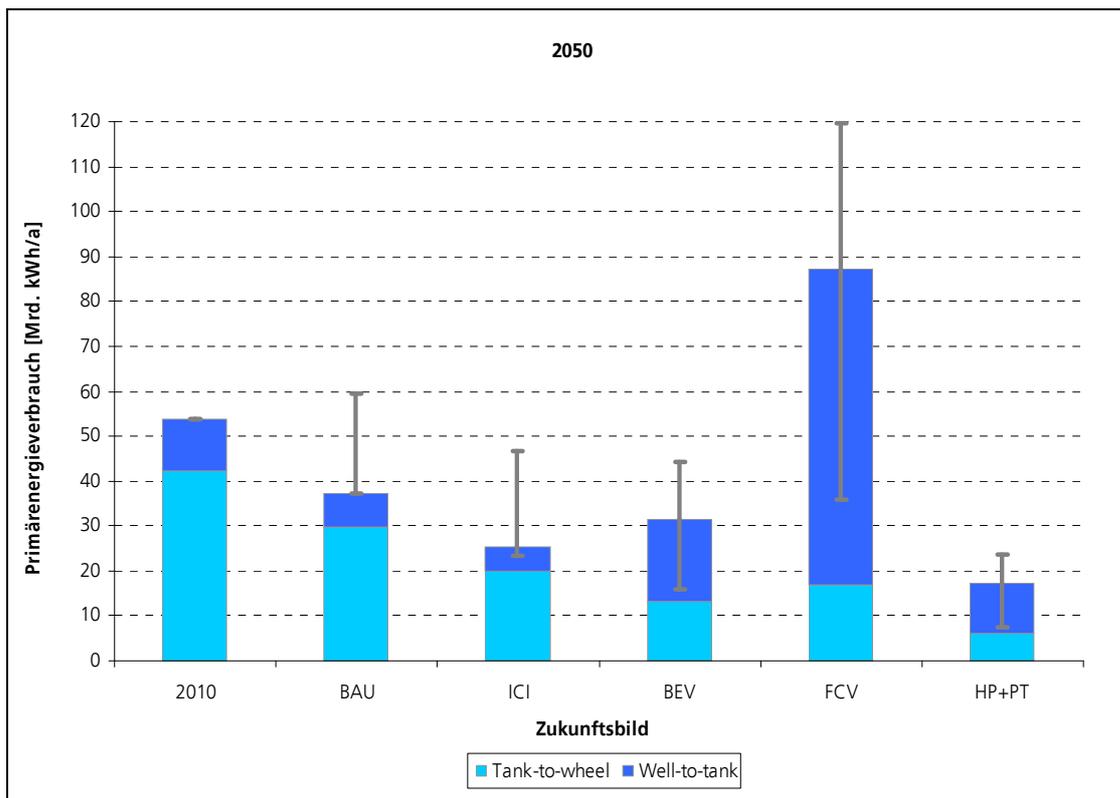


Abbildung 2: Primärenergieverbrauch ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050 <sup>3), 4)</sup>

Der Primärenergieverbrauch im BEV-Zukunftsbild liegt über demjenigen in ICI, wenn ein Primärenergiefaktor gemäss dem heutigen Strommix (Schweizer Verbrauchsmix 2007) unterstellt wird. Dieser Primärenergiefaktor liegt deutlich über denjenigen für Benzin oder Diesel (gemäss heutiger Erdöl-Förderung). Allerdings ist bei letzterem bis 2050 gegenüber heute ein Anstieg des Energiebedarfs für die Erdölförderung zu erwarten und der Primärenergiebedarf kann innerhalb der angegebenen Bandbreite steigen.<sup>5)</sup> Im BEV-Zukunftsbild ist es möglich, den Primärenergiebedarf unterhalb desjenigen für ICI zu senken, wenn der Anteil an Strom aus erneuerbaren Energien steigt.

In allen Zukunftsbildern besteht das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Eine wichtige Voraussetzung ist jedoch, dass der Strom mit CO<sub>2</sub>-armen Technologien produziert wird. Dies gilt insbesondere im FCV-Zukunftsbild mit einem hohen Energiebedarf (vgl. die folgende Abbildung 3). Die Berechnungen berücksichtigen für jedes Zukunftsbild die Treibhausgasemissionen, die beim Betrieb der Fahrzeuge und bei der Bereitstellung der Energie ausgestossen werden ("Well-to-Wheel").

3) Zu Grunde gelegte Fahrleistungen:

2010: 59 Mrd. Fzkm; BAU, ICI, BEV, FCV: 72.7 Mrd. Fzkm; HP+PT: 56.6 Mrd. Fzkm

4) Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

5) Der obere Wert der angegebenen Bandbreite bildet die Situation ab, bei dem der fossile Treibstoffe vollständig aus unkonventionellen Quellen stammt. Aus heutiger Sicht ist nicht absehbar, wie viel Erdöl im Jahr 2050 aus konventionellen Quellen stammt, der angegebene Wert ist in diesem Sinne als Maximalwert zu verstehen.

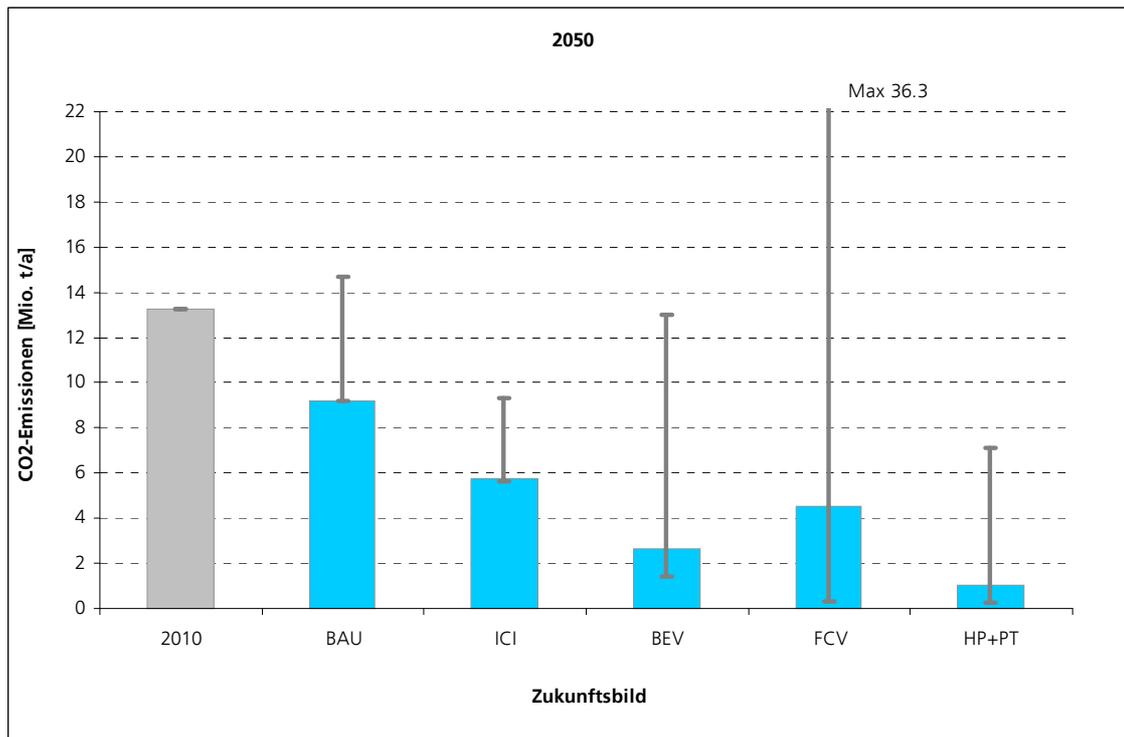


Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Emissionen angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente total ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050<sup>6), 7)</sup>

Das *Zukunftsbild* ICI bringt aufgrund der verbesserten Energieeffizienz eine Verbesserung gegenüber dem BAU. Klar am tiefsten sind die Treibhausgasemissionen beim *Zukunftsbild* HP+PT, auch hier sind die Emissionen aber unterschiedlich hoch, je nachdem wie der benötigte Strom erzeugt wird.

Werden die Elektrofahrzeuge im *Zukunftsbild* BEV im Jahr 2050 mit Strom entsprechend dem heutigen Schweizer Strom (Verbrauchsmix CH; fetter Balken im Diagramm) betrieben, so sind die Treibhausgasemissionen deutlich tiefer als im BAU und auch tiefer als im *Zukunftsbild* ICI. Werden allerdings die BEV mit CO<sub>2</sub>-intensivem Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken betankt, so werden die Emissionen das BAU oder sogar die heutigen Emissionen übertreffen. Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Entsorgung der Batterien wurden bei den Berechnungen nicht berücksichtigt. Verschiedene Ökobilanzen zeigen jedoch, dass dieser Beitrag klein ist.

Die Bandbreite beim *Zukunftsbild* FCV ist besonders gross, weil die Herstellung von Wasserstoff energieintensiv und die eingesetzte Primärenergie deshalb besonders relevant ist. Bei CO<sub>2</sub>-intensiver Stromproduktion ist mit einem deutlichen Anstieg gegenüber heute oder dem BAU zu rechnen (mehr als eine Verdoppelung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem worst-case des BAU). Wird der Wasserstoff mittels Dampfreformierung erstellt, so sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen tiefer als beim BAU, doch für das *Zukunftsbild* FCV 2050 würden dazu rund 22 TWh/a an Erdgas benötigt, was rund 50% der Diesel- und Benzinnachfrage im Jahr 2010 entspricht.

Im Jahr 2050 wird die Bandbreite bei den *Zukunftsbildern* mit hohen Anteilen Strom oder Wasserstoff sehr gross. Entscheidend ist, wie dieser Strom und Wasserstoff produziert werden (vgl. Tabelle 3).

6) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

7) Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Strommix [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	2050		
	BEV	FCV	HP+PT
Wasserkraft	1.4	0.3	0.2
Atomkraft	1.5	0.5	0.3
<b>Prognose eurelectric "Power Choices"</b>	<b>1.5</b>	<b>0.8</b>	<b>0.3</b>
CH Produktionsmix	1.6	0.8	0.3
Windkraft	1.6	0.8	0.3
Photovoltaik	2.1	2.6	0.7
<b>Prognose eurelectric "Baseline"</b>	<b>2.5</b>	<b>3.9</b>	<b>0.9</b>
<b>CH Verbrauchsmix</b>	<b>2.7</b>	<b>4.5</b>	<b>1.0</b>
Gas (GuD)	5.6	14.2	2.9
UCTE Produktionsmix	6.5	17.4	3.5
Kohle	12.2	36.3	7.0

Tabelle 3: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT für das Jahr 2050 je nach Art des eingesetzten Strommixes<sup>8)</sup>

In der obigen Aufstellung zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen werden neben den verschiedenen Primärenergiequellen und dem heutigen Produktions- und Verbrauchsmix auch zwei Szenarien zur zukünftigen CO<sub>2</sub>-Intensität des europäischen Strommix berücksichtigt (Eurelectric 2010).<sup>9)</sup> Im Szenario "Baseline" liegen die Emissionen in der gleichen Grössenordnung wie mit dem heutigen Schweizer Verbrauchsmix. Werden die im Szenario "Power Choices" gesetzten Ziele erreicht, liegen die Emissionen in allen Zukunftsbildern am unteren Ende der in Abbildung 3 angegebenen Bandbreiten.

*Eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs muss einhergehen mit einer Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern. Dieses Ziel ist im Kontext des gesamten Energie- und Verkehrssystems zu erreichen.*

Die vorhergehenden Ausführungen zeigen, welche Bedeutung die Art der Energiebereitstellung für die Elektrifizierung des Antriebsstranges hat. Die Nachfrage nach Strom beträgt im Zukunftsbild BEV bis ins Jahr 2050 rund 14% des heutigen Schweizer Strom-Endverbrauchs und im Zukunftsbild FCV ca. rund 50% des heutigen Verbrauchs, wenn Wasserstoff via Elektrolyse erstellt wird. Für die Deckung des zusätzlichen Bedarfs bis 2050 (rund 8 TWh jährlich für das BEV-Zukunftsbild resp. rund 26 TWh jährlich für FCV-Zukunftsbild) sind entweder deutliche Effizienzmassnahmen in anderen Bereichen, ein Ausbau der Produktionskapazitäten oder zusätzliche Stromimporte notwendig. Vergleichswerte für Anlagen und weitere Vergleichsgrössen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Alle Technologien zur Stromproduktion sind mit negativen Auswirkungen aus ökologischer, ökonomischer oder gesellschaftlicher Perspektive verbunden. Damit diese reduziert und der Strom gemäss den Zielen der Nachhaltigen Entwicklung möglichst optimal produziert werden kann, ist die Elektrifizierung des Antriebsstranges mit einer zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energieträger zu koppeln.

8) Der UCTE Produktionsmix entspricht dem in Europa produzierten Strommix (UCTE = Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity)

9) Im Szenario "Baseline" wird unterstellt, dass die bisher beschlossenen Massnahmen weitergeführt werden, so z.B. das Emissionshandelsystem. Im Szenario "Power Choices" wird das Ziel verfolgt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt um 75% zu reduzieren. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, soll einerseits die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien und aus Atomkraft gesteigert werden und andererseits Kohlenstoff abgeschieden und gespeichert werden soll (CCS).

Zukunftsbild	Strombedarf 2050	Anteil an Strom-Endverbrauch 2009 <sup>10)</sup>	Anzahl Kernkraftwerke (Typ Leibstadt <sup>11)</sup> )	Anzahl Gaskraftwerke (GuD) à 550 MW <sup>12)</sup>	Fläche der PV-Anlage CH heute (120 kWh/m <sup>2</sup> )	Anzahl Windparks (8 Windräder à 2 MW mit ~27 GWh/a <sup>13)</sup> )
<b>BEV</b>	8 TWh/a	14%	1	2 - 3	66.4 km <sup>2</sup> (~6'700 Anlagen wie Stade de Suisse <sup>14)</sup> )	~ 300 solche Windparks
<b>FCV</b>	29 TWh/a	50%	3	8 - 9	204 km <sup>2</sup> (~20'000 Anlagen wie Stade de Suisse)	~ 1'100 solche Windparks

Tabelle 4: Vergleiche zur möglichen Abdeckung der Stromnachfrage

### Fahrzeuge und Infrastruktur

Aktuell bestehen grosse Preisunterschiede bei den Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebstechnologien. Herausfordernd sind die Reduktion der Fahrzeugkosten und der Aufbau der Infrastruktur in der Einführungsphase. Langfristig nähern sich die Nutzerkosten von BEV und FCV an die Kosten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in einem finanzierbaren Rahmen an.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist das Ziel, die gegebenen Fahrleistungen wirtschaftlich, das heisst mit möglichst niedrigen Kosten zu erreichen. Dazu sollen die Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten möglichst tief gehalten werden. Hierbei sind die Kosten der Fahrzeuge und die Kosten der Infrastruktur zu unterscheiden.

### Fahrzeugkosten

Bezüglich der Fahrzeugkosten haben die Recherchen folgendes ergeben:

- Im Jahr 2010 sind die Anschaffungskosten eines vergleichbaren Fahrzeugs (vom Typ BMW 5.er) mit BEV-Antrieb um 70% und mit FCV-Antriebe um 350% höher als die Kosten eines Fahrzeugs mit Dieselmotor.
- Bei Massenproduktion und weiterer Entwicklung bleiben die Anschaffungskosten eines vergleichbaren Fahrzeugs mit BEV-Antrieb um 7-13% und mit FCV-Antriebe um 10-17% höher als die Kosten eines Fahrzeugs mit Dieselmotor.

Hinsichtlich des Kaufverhaltens der Verbraucher ist festzuhalten, dass die Anschaffungsentscheide für ein bestimmtes Autos nur zu einem geringen Teil vom Kaufpreis abhängig sind. Status, Prestige und Wünsche an die Ausstattung von Fahrzeugen führen heute schon zu erheblichen Preisunterschieden von Fahrzeugen eines gleichen Modells. Deshalb sind die Mehrkosten kein Ausschlusskriterium für teurere Fahrzeuge in einzelnen Zukunftsbildern.

10) 57.5 TWh im Jahr 2009, Elektrizitätsstatistik des BFE

11) 1'165 MW Leistung, Jahresproduktion 9'400 GWh

12) Ann: 6'200 Betriebsstunden Vollast (in Analogie zu BFE Energieperspektiven). -> Jahresproduktion ca. 3'400 GWh

13) Entspricht der erwarteten Jahresproduktion der neusten 8 Windräder auf dem Mont Croisin: [http://www.bkw-fmb.ch/bkwfmb/de/home/thema\\_energie\\_und/Energieproduktion/Wind/juvent\\_sa.html](http://www.bkw-fmb.ch/bkwfmb/de/home/thema_energie_und/Energieproduktion/Wind/juvent_sa.html)

14) Jahresproduktion Stade de Suisse ca. 1.2 GWh/a mit ca. 12'000 m<sup>2</sup> Dachfläche

Die folgenden Abbildungen 4 und 5 zeigen die festen und variablen Fahrzeugkosten je Zukunftsbild insgesamt und je Fahrzeugkilometer. Die Spannweiten ergeben sich aus Annahmen zu oberen und unteren Energiepreisen. Die Energiepreise beinhalten keine Steuern.

Im Jahr 2050 sind die Kosten in den Zukunftsbildern BEV und FCV deutlich höher als diejenigen des BAU. Sowohl die variablen als auch die fixen Kosten sind höher. Die fixen Kosten aufgrund der höheren Kosten bei den Fahrzeugen, die variablen Kosten aufgrund der Preisentwicklung des Stroms gegenüber Benzin/Diesel (ohne Steuern und Abgaben). Die in der Literatur<sup>15)</sup> oftmals dargestellten Vorteile von BEV-Fahrzeugen gegenüber benzingetriebenen Fahrzeugen beruhen zum Teil auf einer Betrachtung mit Steuern und Abgaben. Im Rahmen der Diskussion um Mobility Pricing ist von deren längerfristigen Existenz aber nicht auszugehen und eine steuerliche Gleichbehandlung von Antrieben und Treibstoffen zu unterstellen.

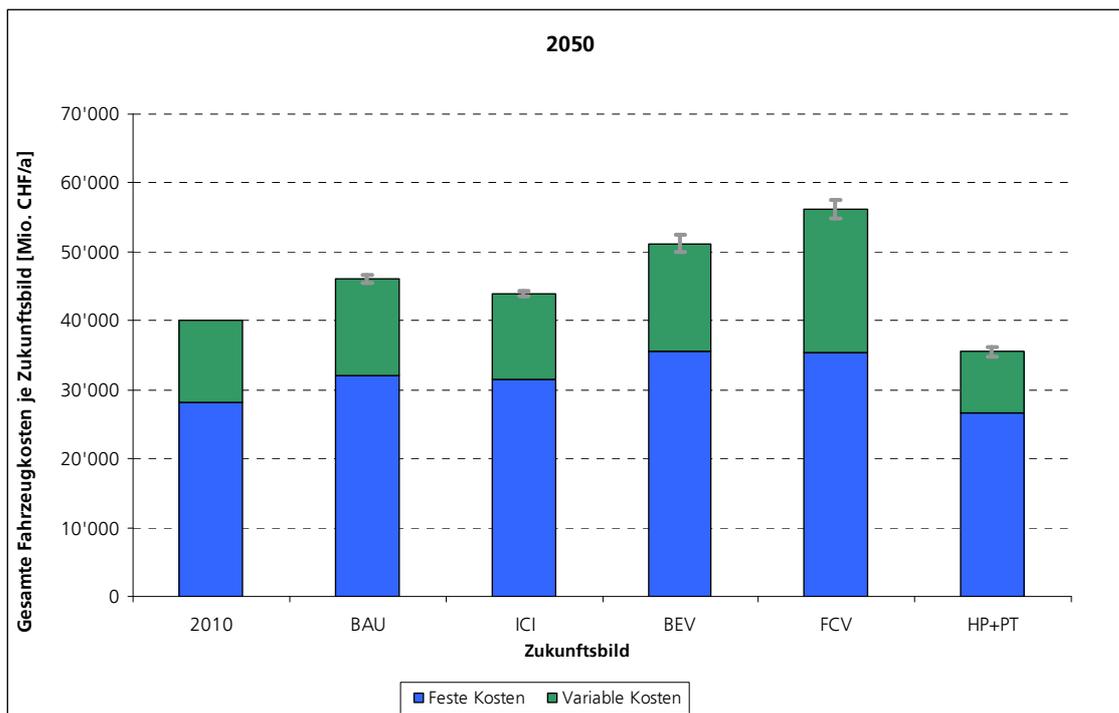


Abbildung 4: Gesamte Fahrzeugkosten je Jahr und Zukunftsbild<sup>16) 17)</sup>

15) Vgl. bspw. Frondel/Peistrup (2009)

16) Zu Grunde gelegte Fahrleistungen 2050:

2010: 59 Mrd. Fzkm; BAU, ICI, BEV, FCV: 72.7 Mrd. Fzkm; HP+PT: 56.6 Mrd. Fzkm

17) Anmerkungen: Kosten ohne Steuern und Abgaben. Spannweiten aufgrund oberer und unterer Werte für die Treibstoff- und Energiepreise. Im Jahr 2010 haben die Treibstoffkosten ohne Steuern und Abgaben an den gesamten variablen Kosten einen Anteil von ca. 30%. HP+PT: Ohne Zusatzkosten öffentlicher Verkehr

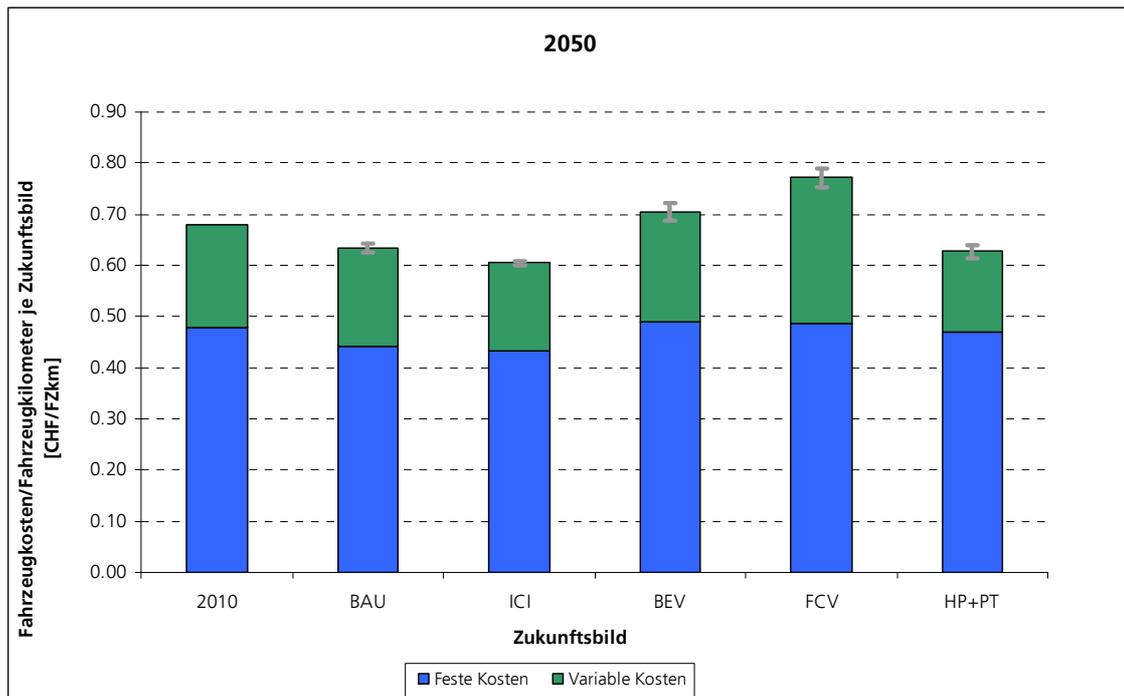


Abbildung 5: Gesamte Fahrzeugkosten je Fahrzeugkilometer und je Zukunftsbild<sup>(16), (17)</sup>.

Hieraus ergibt sich das folgende Ergebnis der Auswirkungsanalyse:

- Die Kostensenkungen durch Verbrauchsoptimierung bzw. Verhaltensänderungen ergeben Vorteile für die Zukunftsbilder ICI und HP+PT. Für das Zukunftsbild HP+PT ist zu beachten, dass dieses ein stark verbessertes Angebot im öffentlichen Verkehr vorsieht. Diese Kosten konnten hier nicht ermittelt werden.
- FCV ist teurer als BEV, auch wenn eine deutliche Reduktion der Fahrzeugpreise unterstellt wird.

BEV kommt zu ähnlichen Resultaten wie das BAU-Szenario. Hinzukommen zudem noch die anfänglich hohen Aufwendungen für die Weiterentwicklung der Technologie wie auch die Kosten bis zur Realisierung der Massenproduktionsvorteile.

#### Kosten der Infrastruktur

In den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT sind neue Infrastrukturen notwendig. Im Rahmen dieser Studien wurden die Kosten für Ladestationen (BEV, HP+PT) und für Tankstellen mit Wasserstoff ermittelt:

- Bei BEV und HP+PT wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge zu Hause mit Wall-Boxes beladen werden können. Es ist nur eine geringe Anzahl öffentlicher Ladestationen vorgesehen, da für weitere Fahrten Fahrzeuge mit Range Extendern eingesetzt werden. Die Angaben für das Zukunftsbild HP+PT berücksichtigen hier ebenfalls nicht die Kosten des stark verbesserten Angebot im öffentlichen Verkehr.
- Bei FCV ist das Tankstellennetz mit Wasserstofftankstellen umzurüsten bzw. auszubauen. Die Kosten sind stark abhängig von der genauen Ausgestaltung des Zukunftsbildes, weshalb hier Spannbreiten angegeben werden. Die folgende Tabelle 5 zeigt die Kosten in der Übersicht.

Zukunftsbild	Investitionsausgaben für Ladestationen bzw. Tankstellen [Mrd. CHF]
BEV: 2,5 Mio. private und 250 öffentliche Ladestationen	0.7 bis 4.3
FCV: 3700 Tankstellen	2.5 bis 2.8
HP+PT: 2,1 Mio. private und 250 öffentliche Ladestationen; Ohne Kosten öffentlicher Verkehr	0.6 bis 3.6

*Tabelle 5: Investitionsausgaben für Ladestationen und Wasserstofftankstellen (ohne Energieerzeugung und überörtliche Verteilung)*

### Rohstoffe

Der Fahrzeugbau gehört zu den rohstoffintensiven Branchen. Neben den klassischen Metallen wie Stahl, Aluminium und Kupfer gewinnen die seltenen Metalle (auch Elektronikmetalle genannt) wie Neodym<sup>18)</sup>, Platin und Kobalt ständig an Bedeutung. Insbesondere im Elektrofahrzeugbau werden diese metallischen Rohstoffe immer wichtiger (z.B. Platin für Brennstoffzellen, Kobalt für Lithium-Ionen-Akkus oder Neodym für Permanentmagnete in Elektro- und Hybridfahrzeugen). Die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ist beschränkt und der steigende Bedarf lässt die Vorräte im Boden merklich schwinden. Unter den Gesichtspunkten einer Nachhaltigen Entwicklung entscheidend sind die handelspolitische Verfügbarkeit der Ressourcen, gute Arbeitsbedingungen sowie die Reduktion der Umweltbelastungen beim Rohstoffabbau und der Weiterverarbeitung.

*Die Verfügbarkeit von Rohstoffen, die es beispielsweise für Elektromotoren oder Batterien braucht, ist beschränkt und der steigende Bedarf lässt die Ressourcen merklich schwinden. Es sind aber grundsätzlich ausreichend Ressourcen vorhanden. Das Risiko der Abhängigkeit wird – unterschiedlich nach Zukunftsbild – weiterhin bestehen.*

In der zusammenfassenden Beurteilung der Verfügbarkeit und der Abhängigkeit von Rohstoffen zeigt sich kein einheitliches Bild. Die Ausgangslage ist bei jedem einzelnen Rohstoff etwas anders. Grundsätzlich sind ausreichende Reserven vorhanden. Bei allen Zukunftsbildern werden jedoch Rohstoffe eingesetzt, deren Verfügbarkeit durch Exportbeschränkungen problematisch sein kann. Diese geopolitischen Risiken sind für die Schweiz als rohstoffarmes Land schwierig einschätzbar.

*Zur Schonung der natürlichen Ressourcen und zur langfristigen Sicherstellung der Versorgung ist das Recycling der eingesetzten Rohstoffe notwendig.*

Auch hinsichtlich der ökologischen Beurteilung des Bedarfs von knappen metallischen Rohstoffen und der damit einhergehenden, energieintensiven Steigerung der Fördermengen zeigt sich in allen Zukunftsbildern kein eindeutiges Ergebnis. Zum einen sind unterschiedliche Metalle verschieden zu beurteilen, zum anderen sind die Auswirkungen von den Recyclingkonzepten abhängig. Die Möglichkeiten zum Recycling sind bei den genannten Rohstoffen grundsätzlich gegeben, da sie in den Fahrzeugen in konzentrierter Form eingesetzt werden und nicht über diffuse Einträge in das Ökosystem gelangen. Die Rückgewinnung und das Recycling der Stoffe am Ende der Nutzungsdauer der Fahrzeuge oder einzelner Komponenten wie Batterien sind für eine Nachhaltige Nutzung der Rohstoffe unerlässlich.

18) Neodym (Nomenklaturempfehlung war zeitweise: Neodymium) ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Nd und der Ordnungszahl 60. Im Periodensystem steht es in der Gruppe der Lanthanoide und zählt damit auch zu den Metallen der seltenen Erden. Die Elementbezeichnung leitet sich von den griechischen Worten neos für „neu“ und didymos für „Zwilling“ (als Zwilling von Lanthan) ab. Es wird zur Herstellung stärkster Magnete verwendet.

### **Handlungsbedarf, Fazit und Ausblick**

Auf einem Workshop wurden je Zukunftsbild Massnahmen zur Realisierung des Zukunftsbildes gesammelt. Je nach Marktreife und Verbreitung der Technologien stehen in den einzelnen Zukunftsbildern unterschiedliche Massnahmen im Vordergrund. Im Folgenden fassen wir die gesammelten Empfehlungen zum Handlungsbedarf je Zukunftsbild zusammen.

**Zukunftsbild BAU – Business As Usual.** Dieses Zukunftsbild steht für die Richtung, in der wir uns bewegen, und den Zustand des Mobilitätssystems, den wir ohne zusätzliche, neue politische Massnahmen erreichen werden. Es werden aber dennoch viele Massnahmen notwendig sein – so wie bis anhin. Namentlich die heutige Situation und die bereits vorhandenen Trends<sup>19)</sup> erfordern Massnahmen, um das resultierende Verkehrswachstum überhaupt bewältigen zu können. Dazu gehören vor allem Massnahmen zum Kapazitätsmanagement auf den Strassen (Telematik) und ein Mobility Pricing. Zudem ist die aktive Sicherheit der Fahrzeuge zu erhöhen, damit kleinere und leichtere Fahrzeuge sicherer werden und damit eine höhere Marktakzeptanz erzielen. Zum BAU-Szenario gehört auch die Übernahme der 130g CO<sub>2</sub>/km-Regelung für PW-Neuzulassungen.

**Zukunftsbild ICI – Internal Combustion Improved.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbildes liegt auf der sozio-ökonomischen Seite, nicht auf der technischen. Die Fahrzeuge und die notwendige Technik sind sozusagen schon heute vorhanden und weitestgehend erprobt. Die Herausforderung ist es, diese Best-Available-Technology (BAT) zum Kunden zu bringen. Hierzu wird konzeptionell ein klassischer Policymix notwendig sein. Zu betonen ist, dass die Massnahmen griffig und teilweise hart sein müssten, ausser wenn die Erdölpreise so ansteigen, dass dadurch eine Entwicklung hin zu ICI induziert wird. Zum Policymix würden sowohl regulatorische Massnahmen (unilaterale Zulassungsverbote von energie-ineffizienten Fahrzeugen) als auch marktbasierende Massnahmen (progressive Besteuerung ineffizienter Fahrzeuge; CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Treibstoffen, höhere Treibstoffsteuern und zusätzlich Mobility Pricing; Anreizsysteme beim Neuwagenkauf), flankiert mit angebotsorientierten Ansätzen (Zielvereinbarungen mit Generalimporteuren; Übernahme der gCO<sub>2</sub>/km-Zielwert-Weiterentwicklung der EU für 2020) und Informationsmassnahmen gehören.

**Zukunftsbild BEV – Battery Electric Vehicles.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbildes BEV ist ein verbindliches Commitment der Politik und der Gesellschaft: Die Schweiz will zu jenen Industrieländern mit dem schnellstem Anstieg bei der Elektromobilität gehören. Dazu müsste die Schweiz verstärkt Fördermittel bereitstellen. Notwendig ist auch die Gewährleistung eines nachhaltigen marginalen Strommixes durch die Elektrizitätsbranche, sowie eine koordinierte Planung, Kommunikation und Aufbau eines Netzes an Elektrotankstellen für die Schweiz. Sodann soll die Schweiz ihre Stärken als Experimentierfeld für sozioökonomische Innovation im Mobilitätsverhalten, im CarSharing und in der kombinierten Mobilität verwenden. Neue Geschäftsmodelle (Energieversorgungsunternehmen als Elektromobilitätsanbieter, Kauf von Fahrleistung statt von Fahrzeugen), die Förderung der Kopplung mit Photovoltaikmodulen sowie die Förderung und Bevorzugung (z.B. Parkplätze auf öffentlichem Grund und bei Bahnhöfen) von Elektro-CarSharing sind notwendig.

**Zukunftsbild FCV – Fuel Cell Vehicles.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbildes liegt, im Gegensatz zu ICI und gar zu BEV, auf der technischen Seite. Solange die nachhaltige Herstellung von Wasserstoff nicht in grossem Massstab möglich ist, lässt sich dieses Zukunftsbild nicht erreichen. Da sich die übrigen Technologien auch weiter entwickeln werden, müssen für die Wasserstoffherstellung sehr grosse Effizienzsprünge eintreten. Ansonsten kann sich wasserstoffbasierte Mobilität allenfalls in Nischenanwendungen etablieren, aber nicht als Hauptenergieträger. Die Massnahmen für dieses Zukunftsbild umfassen deshalb die Forschung und Entwicklung in der Wasserstoffherstellung, aktuell jedoch kaum in der weiteren Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

---

19) Motorisierungsgrad steigt, wenn auch dank des gut ausgebauten ÖV-Systems niedriger als in den umliegenden Ländern; hohe Kaufkraft führt zu Neuwagenflotten mit dem jeweils höchsten Treibstoffverbrauch in Europa; Bevölkerungswachstum

**Zukunftsbild HP+PT – Human Power + Public Transport.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbildes liegt im notwendigen Wertewandel. Hier steht die sozio-ökonomische Herausforderung erneut im Vordergrund (wie bei ICI und BEV), jedoch nochmals deutlich grösser. Das Ziel einer Plafonierung oder Stabilisierung der Fahr- oder Verkehrsleistung ist schon seit langem „Wunschzustand“ vieler Akteure; die reale Entwicklung war aber eine andere. Die aktuellen Trends sind dem Zukunftsbild HP+PT entgegengesetzt. Für dessen Realisierung sind demnach Massnahmen nötig, welche anders und schärfer sind als bisherige Massnahmen. Sie müssen aber demokratisch legitimiert werden. Ein Wertewandel ist deshalb Voraussetzung. Für das Erreichen des Zukunftsbildes HP+PT stehen deshalb zunächst wertebeeinflussende Massnahmen im Vordergrund. Zu betonen ist, dass für dieses Zukunftsbild die Mobilität generell deutlich teurer werden müsste, die Mobilität sich nicht weiter beschleunigen sollte (bis hin zum gewollten Bestehenlassen von Engpässen), und kombinierte Mobilität teilweise "erzwungen" werden müsste (z.B. Sperrung des Zugang zu Stadtzentren für MIV). Es ist möglich, dass Massnahmen, welche sinnvoll sind für den Weg in Richtung der Zukunftsbilder ICI, BEV (und ggf. FCV), im Widerspruch stehen zu solchen für den Weg in Richtung HP+PT. Zu betonen ist die Kostenseite: Das Zukunftsbild HP+PT kommt mit weniger Investitionen in Energiebereitstellung und -verteilung sowie Strasseninfrastruktur aus. Hingegen werden hohe Investitions- und Betriebskosten im öffentlichen Verkehr notwendig werden.

#### **Ausblick: Welche Entwicklungen zeichnen sich ab?**

Ziel der Zukunftsbilder ist es, fünf mögliche Zustände zu analysieren; sie wurden bewusst zugespitzt und zeichnen sich je durch eine klare technologische Hauptvariante aus. So werden Vor- und Nachteile der Antriebsvarianten sichtbar. Die Realität wird sich aber zwischen den Zukunftsbildern bewegen, die wahrscheinliche künftige Entwicklung ist eine Mischung aus mehreren Zukunftsbildern, wobei die Ausgangslage die Entwicklung hin zu BAU ist. Die weitere Entwicklung kann auch zunächst in Richtung eines Zukunftsbildes (z.B. zunächst mehr ICI) und anschliessend zu einem anderen Zukunftsbild übergehen (z.B. BEV).

Die Kombination aus mehreren Zukunftsbildern wird sich auch deshalb ergeben, weil damit vor allem in der Übergangsphase die Vorteile mehrerer Systeme kombiniert und die Nachteile reduziert werden können.

Das Forschungsteam erwartet eine Entwicklung, welche von BAU ausgehend unter dem Einfluss höherer Ölpreise, internationaler Klimaschutzverpflichtungen, der Internalisierung externer Kosten und einem gewissen Wertewandel stark in Richtung des Zukunftsbildes ICI geht, um dann in eine Kombination aus ICI und BEV überzugehen. Dazu sind im Vergleich zum BAU politische Massnahmen notwendig wie beim ICI-Zukunftsbild beschrieben; wir erwarten, dass solche oder ähnliche Massnahmen aufgrund von Energie- und CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sowie einem teilweisen Wertewandel politisch umgesetzt werden. Ein Wertewandel wie er für die Realisierung des Zukunftsbildes für HP+PT notwendig wäre, erwarten wir vor dem Hintergrund verfügbarer technischer Alternativen nicht. Mehrheitlich aus Kostengründen wird ICI gegenüber BEV in den nächsten 20 Jahren im Vorteil sein. Die kommenden sehr effizienten Fahrzeuge mit internem Verbrennungsmotor werden reduzierte Umweltbelastungen aufweisen, welche mit Elektromobilität mit einem Standard-Strommix vergleichbar sind – aber zu geringeren Kosten. Die Potenziale von Elektromobilen namentlich für Kleinstfahrzeugen, Kurzstreckenmobilität, Freizeitmobilität und bei der Verbindung mit erneuerbaren Energien (Speicherfähigkeit), sowie die hohe Zahlungsbereitschaft eines grösseren Teils des Schweizer Neuwagenmarkts für umweltschonende Technik, werden ein Wachstum erlauben, welches über dem europäischen Schnitt liegen dürfte, die Marke von 100'000 Elektromobilen in der Schweiz im 2020 aber knapp verfehlen dürfte. Ab 2016 ist mit der breiten Verfügbarkeit von batteriebetriebenen Fahrzeugen mit Range Extender (serielle Hybride) zu rechnen. Solche Fahrzeuge bleiben teurer als künftige sehr effiziente, kleine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, welche im realen Verkaufspreis günstiger als heute werden könnten.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Moderne Gesellschaften sind mobile Gesellschaften. Ein funktionierendes, modernes Mobilitätssystem ist die Grundvoraussetzung für eine leistungsfähige Wirtschaft und die Sicherstellung einer hohen Lebensqualität. Vor dem Hintergrund globaler wirtschafts-, umwelt- und energiepolitischer Entwicklungen zeichnet sich gegenwärtig ein Strukturbruch im Verkehrssektor ab. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage nach der Sicherstellung der Mobilität im Kontext sich verknappender fossiler Energieträger und eines sich ändernden Klimas. Die starke Abhängigkeit von einem Energieträger und die damit verbundenen negativen Auswirkungen werden insbesondere bezüglich des motorisierten Individualverkehrs diskutiert:

- Versorgungssicherheit: Die hohen Erdölpreise im ersten Halbjahr 2008 haben die Abhängigkeit vom Erdöl in der breiten Bevölkerung bewusst gemacht. Möglichkeiten zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs und Alternativen zum Auto wurden in diesem Zusammenhang auch in der breiten Öffentlichkeit diskutiert.<sup>20)</sup> Verstärkt wird die Diskussion durch die Peak Oil Thematik: Einige Autoren sagen die maximale Menge an gefördertem Erdöl bereits für das Jahr 2011 voraus.<sup>21)</sup>
- Umweltbelastungen: Mit dem Erdölverbrauch sind hohe Treibhausgasemissionen verbunden. Entsprechend den politischen Zielen auf nationaler und internationaler Ebene sind diese zu senken. Auch aufgrund weiterer Umweltbelastungen wie zum Beispiel Lärm wird vor allem der motorisierte Individualverkehr kritisch betrachtet.

Der notwendige „Ablösungsprozess“ gegenüber dem Erdöl geht im motorisierten Individualverkehr mit einer Ausdifferenzierung des automobilen Antriebsstrangs einher. Schon heute kommen zunehmend mehr zu Benzin und Diesel alternative Treibstoffe aus fossilen (z.B. Erdgas) und regenerativen Energiequellen zum Einsatz. Für die nähere Zukunft zeichnet sich dank Plug-in Hybriden und vollelektrischen Fahrzeugen eine fortschreitende Elektrifizierung des Antriebsstrangs ab. Für die weitere Zukunft erscheint am Horizont eine gänzlich post-fossile Mobilität möglich, dank des Einsatzes von alternativen Energieträgern. Neben neuen Antrieben und Treibstoffen für den motorisierten Individualverkehr sind bei Zukunftsbetrachtungen auch die Möglichkeiten der Fortbewegung durch eigene Muskelkraft (Human Powered Mobility) und des öffentlichen Verkehrs zu beachten.

Ein Ergebnis dieser umfassenden Transformation des Mobilitätssektors kann sein, dass sich etablierte Akteurskonstellationen auflösen und neue entstehen. Schon heute treten beispielsweise im Vorfeld der Elektromobilität mit den Stromerzeugern neue einflussreiche Akteure in den Verkehrsmarkt ein. Diese Unternehmen werden künftig die Verkehrspolitik mit beeinflussen.

## 1.2 Aufgabenstellung und Untersuchungsaufbau

### 1.2.1 Übersicht

Angesichts dieses Umfelds und der dabei bestehenden Ansprüche unterschiedlicher Akteure sowie der Auswirkungen auf natürliche Systeme sind Entscheidungsgrundlagen und eine Gesamtschau zu möglichen zukünftigen Entwicklungen im Verkehrsbereich erforderlich. Diese

---

20) vgl. z.B. "Umsteigen wegen hohem Benzinpreis", Blick (22.5.2008)

21) Vgl. Markgraf, Thomas/Wagner, Michael: Mobilität im Umbruch, in: Der Nahverkehr, Heft 9/2008, S. 18-22, hier S. 19.

Forschungsarbeit soll dazu einen Beitrag liefern und Grundlagen zu Alternativen im Bereich des konventionellen motorisierten Individualverkehrs aufarbeiten. Als Orientierung dienen die folgenden übergeordneten Fragestellungen:

1. Welche neuen strukturbildenden Prozesse und Zukunftsbilder zeichnen sich innerhalb des Verkehrs- und Energiesektors vor dem Hintergrund der Ausdifferenzierung des Antriebsstrangs ab?
2. Welche Konsequenzen erwachsen daraus für eine ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltige Entwicklung?
3. Welche Handlungsoptionen bzw. welcher Handlungsbedarf entsteht seitens der unterschiedlichen Akteure bei einer Realisierung bestimmter Zukunftsbilder?

Die folgende Abbildung 6 zeigt den Kontext der Fragestellungen dieser Forschungsarbeit im Überblick. Ausgehend von der heutigen Situation werden ein Business-As-Usual-Bild und vier mögliche Zukunftsbilder dargestellt (1). Für jedes dieser Bilder werden die Konsequenzen für eine Nachhaltige Entwicklung untersucht (2). Aus der Frage, wie der Weg von der heutigen Situation in die Zukunft gestaltet werden kann, wird der kurzfristige sowie der mittel- und langfristige Handlungsbedarf abgeleitet (3).

Hier werden bewusst polarisierende Zukunftsbilder gezeichnet. Damit wird das Potenzial der Technologien ermittelt und in ihren Auswirkungen beschrieben. Damit liegen Informationen dazu vor, welches die Konsequenzen sind, wenn die Politik in eine bestimmte Richtung möchte und welche Handlungen in Bezug auf das Zukunftsbild zu ergreifen sind. Diese Transformation wird je nach politischem Gestaltungswillen und Gestaltungskraft mehrere Jahre bis Jahrzehnte benötigen, und es wird Zwischenzustände geben, die aus dem Nebeneinander der verschiedenen Technologien bestehen.

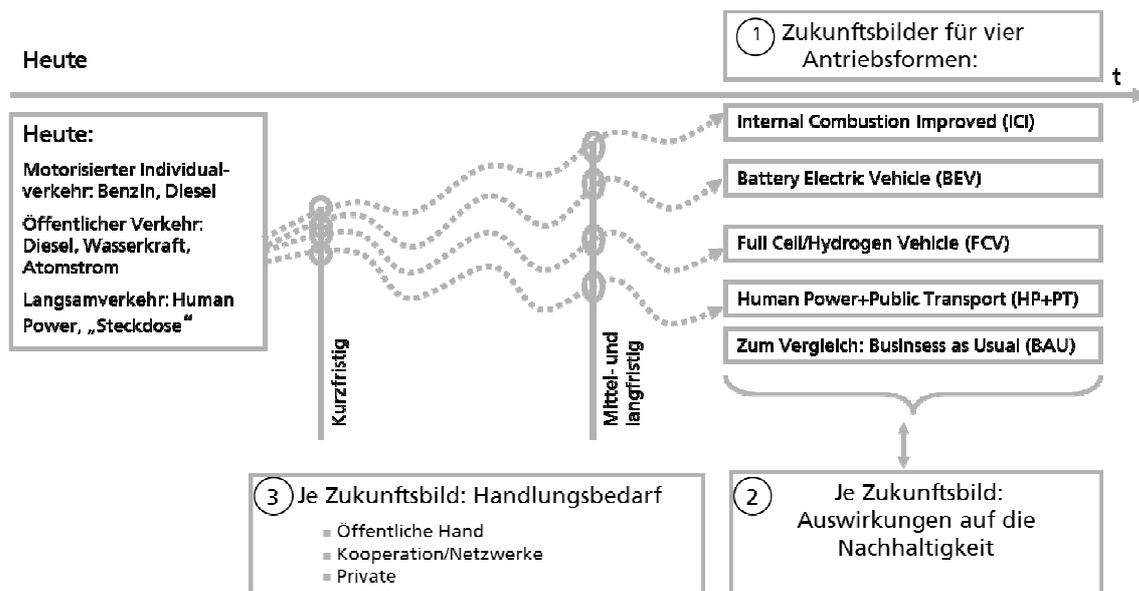


Abbildung 6: Übersicht und Kontext der Fragestellungen

### 1.2.2 „Back-Casting“: Zukunftsbilder

Die in der vorliegenden Untersuchung betrachteten Zukunftsbilder sind normative Szenarien, d.h. Beschreibungen eines möglichen (und gegebenenfalls auch wünschbaren) Stands des Mobilitäts- und Energiesystems Schweiz in den Jahren 2035/2050. Die Zukunftsbilder gehen zwar von der heutigen Situation aus, verwenden aber nicht die blosse Extrapolation, sondern berücksichtigen auch mögliche radikale Innovationsschritte. Die Stärke der Zukunftsbilder besteht darin, vom Zukunftszeitpunkt aus zurück in die Gegenwart zu schauen ("back-Casting")

und auf diese Weise "von der Zukunft zu lernen" und Handlungspotenziale für die nahe Zukunft zu identifizieren.

Die Zukunftsbilder wurden in der ersten Phase des Projektes entwickelt und beschrieben. Die einzelnen Zukunftsbilder orientieren sich je an einem der Schwerpunkte „Verbesserung der Verbrennungsmotoren (ICI)“, „Elektroantrieb (BEV)“, „Brennstoffzelle (FCV)“ und „Muskelkraft und öffentlicher Verkehr (HP+PT)“. Die Zukunftsbilder umfassen stets die Beschreibung der Mobilitätsenergie in dem Set der Antriebstechnologien. Darauf aufbauend werden die entsprechenden Charakteristika der Fahrzeuge, der Infrastrukturen (im Verkehr und im Energiebereich) sowie der Verkehrsnachfrage (und daraus folgend der Energienachfrage) beschrieben.

Die Zukunftsbilder mit jeweiligem Schwerpunkt bei einer Antriebsform stellen exemplarisch die Entwicklungen in unterschiedliche Richtungen dar. Hier werden zunächst die Potenziale jeder einzelnen Technologie berücksichtigt. Soweit die ermittelten Potenziale dies ermöglichen, werden die Zukunftsbilder möglichst „extrem“ gezeichnet. In einer Übergangszeit sind jedoch gemischte Formen mit einem Nebeneinander verschiedener Technologien zu erwarten.

### 1.2.3 Auswirkungen auf die nachhaltige Entwicklung

In weiterer Folge werden die Auswirkungen der in den Zukunftsbildern beschriebenen Ausgestaltung der individuellen Mobilität beurteilt. Als Leitlinie dienen dabei die Ziele für eine nachhaltige Entwicklung.<sup>22)</sup> Dabei sind unter anderem die folgenden Fragen zu beantworten:

- Welches sind die energiewirtschaftlichen Auswirkungen dieser Entwicklungen? Welcher Energiebedarf entsteht?
- Welches sind absehbare volkswirtschaftliche und soziale Auswirkungen bei einem Umbau des Verkehrssystems?
- Welches sind absehbare Auswirkungen auf die Umwelt?
- Welche Investitionen in Infrastrukturen sind zu tätigen?

Neben den direkten Auswirkungen werden auch positive und negative Nebenwirkungen betrachtet.

### 1.2.4 Handlungsbedarf je Zukunftsbild

Aus der Beschreibung der Zukunftsbilder und der jeweiligen Auswirkungen auf die Nachhaltige Entwicklung lässt sich für jedes Zukunftsbild der Handlungsbedarf aufzeigen. Für vier Zukunftsbilder wird der Handlungsbedarf im Vergleich zum Business-As-Usual-Szenario vertieft dargelegt.

## 1.3 Systemabgrenzung

Diese Forschungsarbeit ist in Abstimmung mit der Begleitgruppe wie folgt abgegrenzt:

- *Räumliche Systemabgrenzung:* Im Fokus steht die Schweiz, da für diese auch der Handlungsbedarf aufgezeigt werden soll. Dabei werden internationale Entwicklungen wie zum Beispiel im Bereich der Fahrzeugtechnologien oder der Energieerzeugung mit einbezogen.

---

22) vgl. Strategie "Nachhaltige Entwicklung" des Bundesrates,  
<http://www.are.admin.ch/themen/nachhaltig/00262/00528/index.html?lang=de>

- *Zeitliche Systemabgrenzung: 2010, 2035 und 2050*
  - Zukunftsbilder: Die Zukunftsbilder beschreiben Zustände, die erst in einem langfristigen Zeitpunkt realisierbar sind. Für solche Perspektiven und Visionen wird momentan oftmals das Jahr 2050 als Zeitpunkt verwendet. Dies signalisiert aber eher die Langfristigkeit, als dass es sich um einen genauen Zeitpunkt handelt.
  - Auswirkungsermittlung: Um die Auswirkungen auch quantitativ einschätzen zu können, werden Grundlagen wie Bevölkerungs- und Verkehrsprognosen berücksichtigt. Diese liegen für den Verkehr für das Jahr 2030 vor und werden für das Jahr 2035 und 2050 extrapoliert.
- *Sachliche Systemabgrenzung:*
  - Verkehr:
    - Im Fokus der Untersuchung steht der motorisierte Personenverkehr. Für diesen werden unterschiedliche Antriebsformen untersucht. In Bezug auf die Verkehrsnachfrage werden die Perspektiven Personenverkehr<sup>23)</sup> des UVEK zugrunde gelegt.
    - Der Güterverkehr wird insoweit berücksichtigt, als dass beim Handlungsbedarf geprüft wird, ob es hier zwingende Bedingungen oder Restriktionen aus Sicht des Güterverkehrs gibt.
  - Energie: Hinsichtlich der Energieerzeugung und -bereitstellung für den Individualverkehr werden alle relevanten Formen der Energieerzeugung berücksichtigt:
    - Für den Personenverkehr wird je Zukunftsbild der Energiebedarf für die zugrunde gelegten Antriebs- und Treibstoffart berechnet.
    - Für den Güterverkehr und den öffentlichen Verkehr wird der Energiebedarf entsprechend den Energieperspektiven BFE Szenario 3 und 4 verwendet.

## 1.4 Berichtsaufbau

Die Zukunftsbilder werden normativ erstellt und dementsprechend „gemalt“. Das Vorgehen und die Erkenntnisse zu den einzelnen Zukunftsbildern sind im vorliegenden Bericht wie folgt dokumentiert (vgl. Abbildung 7):

- Kapitel 2 beschreibt das Motiv zum Malen der Bilder. Hier werden die Treiber für Alternativen zu heutigen Antriebsformen und Treibstoffen erläutert.
- In Kapitel 3 werden die Elemente der Zukunftsbilder dargestellt:
  - Bildhintergrund der Zukunftsbilder, bestehend aus den generellen gesellschaftlichen Entwicklungen, innerhalb derer sich die Mobilität abspielt.
  - Vordergrund und „Thema“ der Zukunftsbilder werden durch die technologischen und wirtschaftlichen Potenziale der Antriebe und Treibstoffe gegeben.
- In Kapitel 4 werden die Bilder beschrieben:
  - Die Bildgrösse wird festgelegt durch die Entwicklung der Verkehrsleistungen gemäss ARE-Perspektiven des Personenverkehrs.
  - Dann werden die Bilder hinsichtlich ihres Hintergrunds, der Fahrzeuge und der eingesetzten Treibstoffe beschrieben und mögliche Konsequenzen bezüglich Verkehrs- und Energienachfrage sowie der Infrastruktur diskutiert.
- In Kapitel 5 werden die Auswirkungen der Zukunftsbilder dargestellt.
- Kapitel 6 fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und zeigt Thesen zum Handlungsbedarf mit Vorschlägen zu Massnahmen auf.
- Im abschliessenden Kapitel 7 wird ein Fazit zu den einzelnen Zukunftsbildern gezogen und in einem Ausblick die Frage diskutiert, wie wahrscheinlich deren Realisierung ist.
- In den Anhängen sind weitere Details und Hintergrundinformationen dargestellt.

---

23) Vgl. ARE (Bundesamt für Raumentwicklung): Perspektiven des schweizerischen Personenverkehrs bis 2030, Bern, 2006.

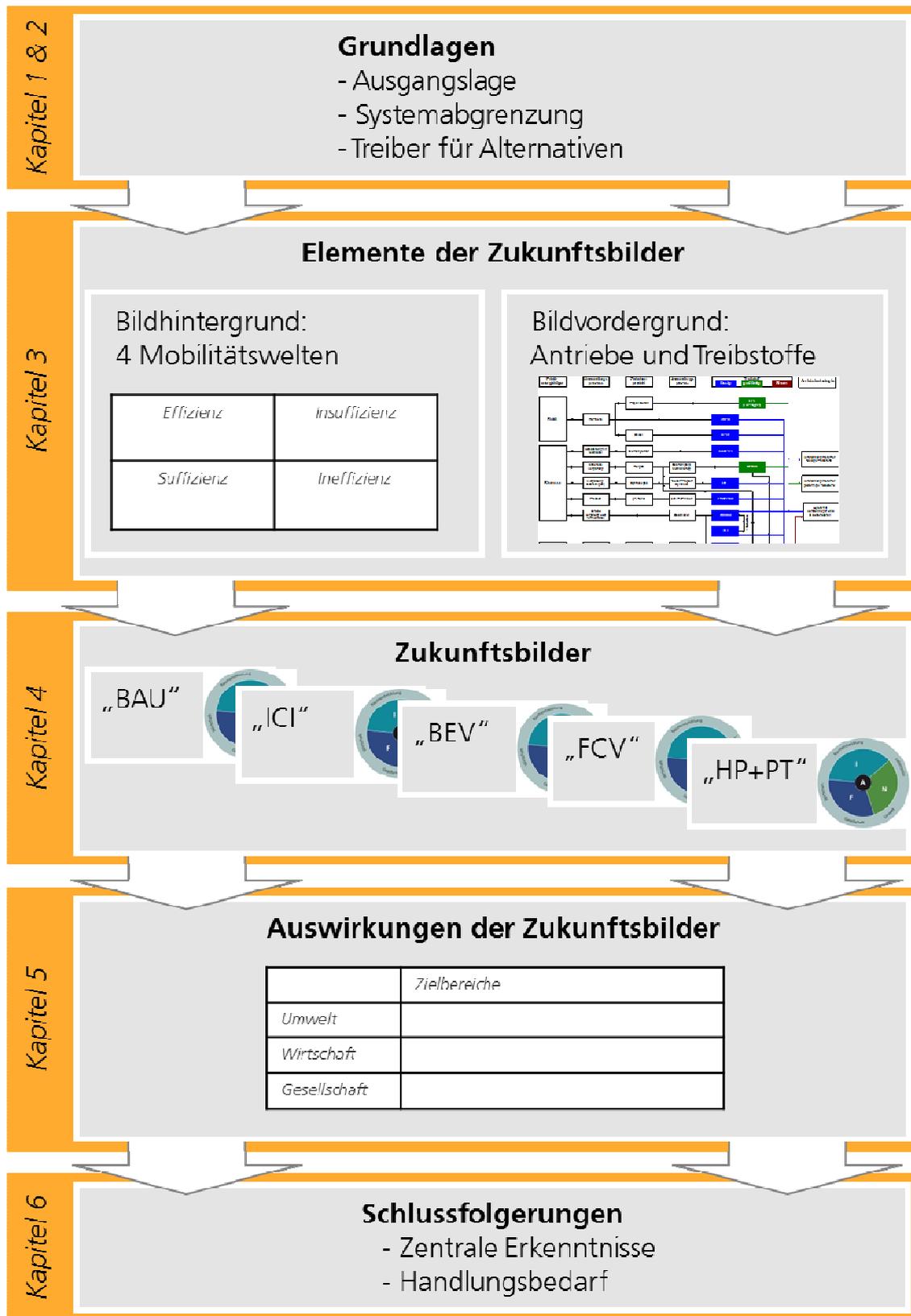


Abbildung 7: Berichtsstruktur im Überblick



## 2 Treiber für Alternativen

Die Entwicklung von Alternativen bei den Antrieben und Treibstoffen im motorisierten Personenverkehr werden durch folgende Aspekte vorangetrieben:

- Verfügbarkeit von Ressourcen und dabei vor allem von Erdöl (Kapitel 2,1)
- Politische Ziele in den Bereichen Luftreinhaltung, Energieeffizienz und insbesondere zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (Kapitel 2,2)
- Veränderte Kundenanforderungen hinsichtlich Ökologie und Verbrauch (Kapitel 2,3)

Diese Punkte werden im Folgenden behandelt.

### 2.1 Verfügbarkeit Ressourcen

#### 2.1.1 Erdöl

##### Heutiger Verbrauch und Fördermengen

Erdöl ist der wichtigste Energieträger weltweit und in der Schweiz, insbesondere im Transportbereich (IEA 2009, BFE 2009):

- Der Anteil am Gesamtenergieverbrauch liegt bei 35% weltweit und in der Schweiz bei 55%.
- Bei Transport liegt der Anteil global bei 94% und in der Schweiz bei 96%.

Nur in wenigen Ländern werden grössere Mengen Erdöl gefördert. Die Fördermenge von total rund 80 Mio. Fass<sup>24)</sup> pro Tag verteilt sich ungleichmässig auf verschiedene Regionen (BP 2009):

- Mittlerer Osten: 32% (davon 13.1% Saudi Arabien, 5.3% Iran)
- Europa/Eurasien: 22% (davon Russland 12.4%, Norwegen 2.9%, Kasachstan und GB je 1.8%)
- Nordamerika: 16%
- Afrika: 12%
- Asien/Pazifik: 10% (davon China 4.8%)
- Süd-/Zentralamerika: 8.5% (davon Venezuela 3.4%, Brasilien 2.4%)

Die 28 Länder mit einer Fördermenge von mehr als 0.5 Mio. Fass Rohöl pro Tag teilen sich auf in 12 OPEC- und 16 Nicht-OPEC-Länder (SATW 2008). Die OPEC (Organisation of Petroleum Exporting Countries) koordiniert seit 1960 die Fördermengen der Mitgliedstaaten und kann so den Ölpreis beeinflussen. Da die OPEC-Länder über die grösseren Reserven verfügen, spielt die Organisation eine wichtige Rolle im Erdölmarkt.

---

24) 1 Fass (Barrel) entspricht rund 159 Litern. Die jährliche Fördermenge liegt somit bei rund 4'640 Mia. Litern.

## Reserven

Die weltweit identifizierten Reserven<sup>25)</sup> konzentrieren sich auf den mittleren Osten und liegen in der folgenden Bandbreite (BP 2009, BGR 2009a):

- Mittlerer Osten: 60% (davon Saudi Arabien 21%, Iran /Irak/Kuwait je ca. 10%) bis 64%
- Europa/Eurasien: 11% (davon Russland 6.3%, Kasachstan 3.2%) bis 12%
- Afrika: 8% bis 11%
- Süd- und Mittelamerika: 6% bis 15% (davon Venezuela 8%)

Wie lange das Erdöl ausreichen wird, die Nachfrage zu decken, ist unter Experten umstritten und es liegen keine gesicherten Daten zu den wirtschaftlich und technisch förderbaren weltweiten Reserven vor. Neben Unsicherheiten bei den Messverfahren und einer mangelnden Transparenz ist dies auf unterschiedliche Abgrenzungen zwischen Reserven und Ressourcen zurückzuführen. Erdölressourcen sind im Gegensatz zu den Reserven aus heutiger Sicht aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht förderbar. Welche Formen von Ölvorkommen (Rohöl, Ölsand, Ölschiefer) genutzt werden können und welche Fördertechniken zukünftig zur Verfügung stehen, wird unterschiedlich bewertet.

Die Erdölvereinigung (2006) geht davon aus, dass bereits die aktuell gesicherten Erdölreserven ausreichen, um den gegenwärtigen Verbrauch weitere 40 Jahre zu decken. Die Energy Watch Group (2008) prognostiziert einen deutlichen Rückgang der weltweiten Ölförderung. Die Fördermenge von 84 Mio. Fass pro Tag im Jahr 2008 (IEA 2009) wird nach diesen Berechnungen bis ins Jahr 2030 halbiert. Zudem weist die Studie anhand der Daten von Ländern in denen das Fördermaximum bereits überschritten wurde, auf einen steilen Rückgang der Ölförderung nach dem Peak hin.

Auch die Frage, ob das Ölfördermaximum ("Peak Oil") bereits erreicht wurde oder nicht ist stark umstritten (SATW 2008). Unausweichlich ist hingegen, dass ein Maximum der Förderung bei steigender Nachfrage erreicht wird und danach mit sinkender Förderung zu rechnen ist (BGR 2009a). Die Aspö (Association for the Study of Peak Oil and Gas) weist auf verschiedene Unsicherheiten bei der Bestimmung des Zeitpunktes des Fördermaximums hin. Aus einer Vielzahl von Studien und Angaben der Erdölproduzenten folgert die Aspö, dass seit 2004 ein Plateau erreicht ist, das Schwankungen unterliegt (Bitzer 2010). Gemäss der Projektion der Deutschen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Abbildung 8) setzt der Rückgang bei den konventionellen Erdölreserven<sup>26)</sup> etwa ab 2025 ein und unter der Berücksichtigung von zusätzlichen Funden und Technologien rund 10 Jahre später.

Zu einer Verschärfung der Situation beitragen können Unsicherheiten bei der Reservenbewertung in den OPEC-Ländern oder Konflikte in teilweise politisch instabilen Gebieten, in denen sich grosse Anteile der konventionellen Erdölreserven befinden. Zum sogenannt unkonventionellen Erdöl gehören beispielsweise Rohöl aus Teersand und Ölschiefer. Der Aufwand zur Gewinnung von unkonventionellem Erdöl ist höher, was sowohl mit erhöhten Kosten als auch mit erhöhten Umweltbelastungen verbunden ist (era 2009).

---

25) Reserven sind die Mengen eines Energierohstoffes, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können (BGR 2009a).

26) Erdölvorkommen werden als konventionell bezeichnet, wenn eine Gewinnung mit den klassischen Explorations-, Förder- und Transporttechniken möglich ist. Zum nicht-konventionellen Erdöl zählt Schwerstöl, das aufgrund seiner hohen Viskosität nur schwer fließfähig ist sowie gebundenes Erdöl in Ölsanden und Ölschiefen. (BGR 2009b)

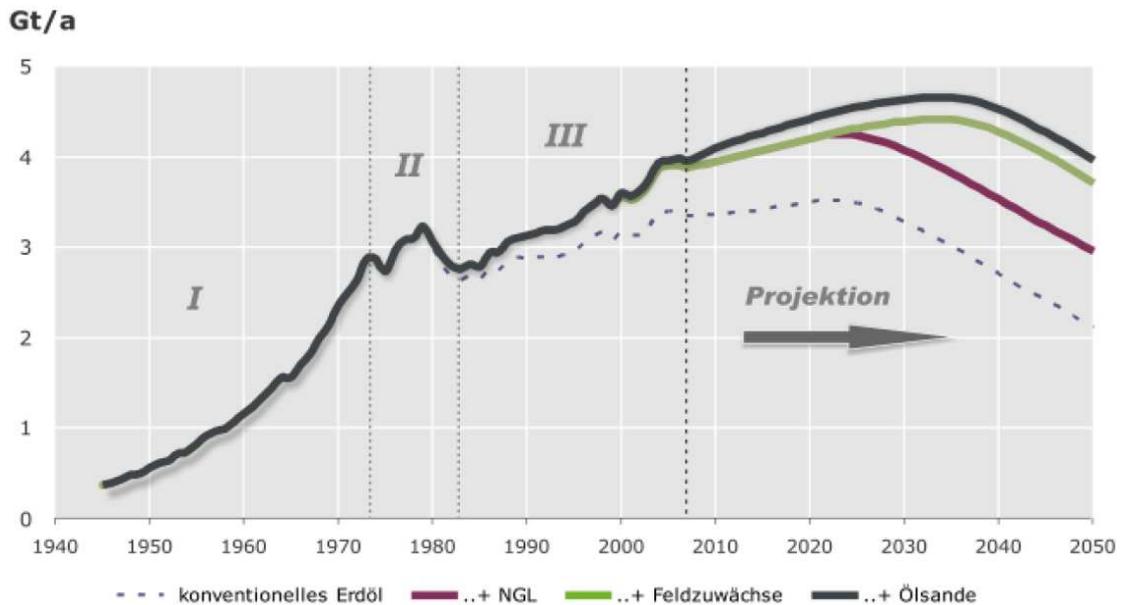


Abbildung 8: Historische Entwicklung der Erdölproduktion und projizierter Produktionsverlauf für konventionelles Erdöl mit und ohne Kondensat (NGL) und mit Kondensat und Ölsanden unter Berücksichtigung von Reservenzuwächsen (Field Growth)<sup>27, 28)</sup>

**Fazit:** Auch auf einen Zeitpunkt 2050 hin kann davon ausgegangen werden, dass Erdöl zur Verfügung steht und fossile Treibstoffe auch auf diesen Zeithorizont eine Rolle im Verkehr haben können. Bei der zu erwartenden steigenden weltweiten Nachfrage und absehbaren Abnahme der Reserven ist von steigenden Preisen auszugehen. Die Verfügbarkeit wird auch ihren politischen Preis haben, und die Abhängigkeiten von einzelnen Ländern oder Regionen werden verstärkt werden. Mit steigenden Preisen werden jedoch Alternativen zur Substitution von Erdöl attraktiver, was dämpfend auf die Nachfrage- und Preissteigerung wirkt.

### Erdölpreis

Der Erdölpreis ist grossen Schwankungen unterworfen, wie die Entwicklung in den vergangenen Jahren zeigt. Nachdem im Juli 2008 ein Rekordpreis von 145 US\$ pro Fass erreicht wurde, sank der Preis auf 40 US\$ pro Fass im Dezember 2008 und schwankt in der ersten Jahreshälfte 2010 um rund 80 US\$.<sup>29)</sup>

Wichtige Einflussfaktoren sind die Bereitstellung ausreichender Förder- und Raffineriekapazitäten, das Verhalten der OPEC und die allgemeine Entwicklung der Weltwirtschaft. Die Internationale Energieagentur geht in ihren Prognosen von unterschiedlichen Szenarien aus.<sup>30)</sup> Die Preise für das Jahr 2030 liegen nominal zwischen 150 US\$ und 190 US\$ pro Fass (Abbildung 9). Dies entspricht real (bezogen auf das Jahr 2008) zwischen 90 und 115 US\$. Im "450 Szenario" wird von einer abgeschwächten Nachfrage und demzufolge tieferen Preisen ausgegangen.

27) Quelle: BGR (2009b)

28) Epochen der historischen Erdölproduktion: Epoche der internationalen Ölkonzerne: (I), Epoche der OPEC (II), Epoche der Globalisierung (III).

29) <http://www.tecson.de/prohoel.htm> (Stand 11. Juni 2010)

30) Die Szenarien basieren auf einer Reihe von Annahmen bezüglich der Energienachfrage und des Angebots. Das **Referenzszenario** geht von einer Entwicklung gemäss den bisherigen Trends aus. Das **450 Szenario** unterscheidet sich in erster Linie durch eine koordinierte globale Klimapolitik, mit dem Ziel, die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre auf 450 ppm CO<sub>2eq</sub> zu stabilisieren. Dieses Ziel soll über ein Bündel an politischen Massnahmen erreicht werden (vgl. IEA 2009).

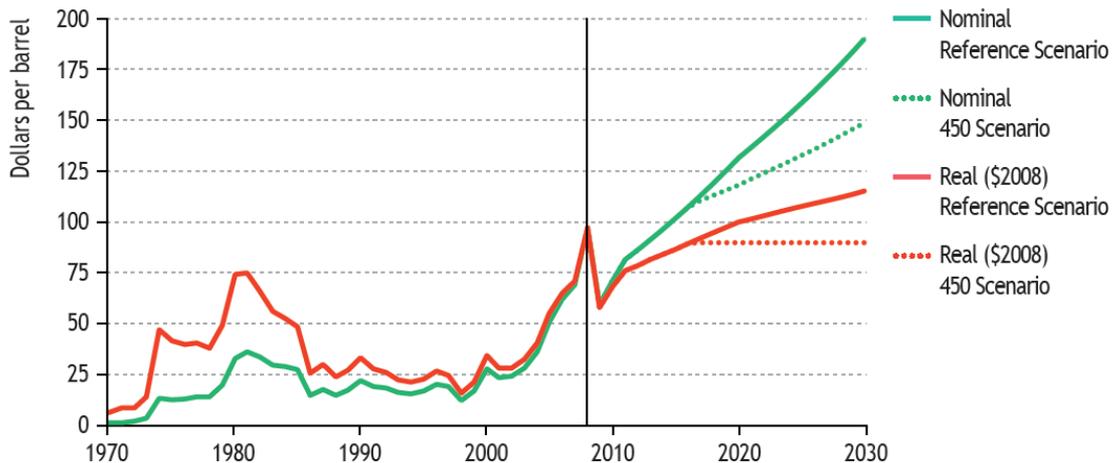


Abbildung 9: Nominale Entwicklung des durchschnittlichen Rohölpreises gemäss IEA (2009)

Bis 2050 ist vor dem Hintergrund des in Abbildung 8 dargestellten Rückgangs der Erdölproduktion ab ca. 2030 mit einem grossen Preisanstieg zu rechnen, wenn die Nachfrage preisunelastisch ist und weiterhin gleich gross bleibt. Die in der vorliegenden Studie getroffenen Annahmen zu den Energiepreisen sind in Kapitel 5.4.1 dargestellt.

## 2.1.2 Weitere fossile Energieträger

### Kohle

Mit einem Anteil von 27% am Primärenergieverbrauch ist Kohle der weltweit zweitwichtigste Energieträger (IEA 2009). Für den Transportbereich hingegen ist Kohle kaum relevant, auch wenn die Umwandlung in flüssigen Treibstoff ("Kohleverflüssigung", Coal-to-Liquid) mittels Fischer-Tropsch-Synthese oder die Herstellung von Wasserstoff aus Kohle ("Kohlevergasung") technisch möglich ist. Der Vorteil von Kohle gegenüber Erdöl sind die grossen weltweiten Reserven. Die Verfügbarkeit von Kohle ist noch über viele weitere Jahrzehnte gewährleistet (BGR 2009b). Die Reserven sind regional weniger konzentriert als die Erdölreserven und liegen zu je rund einem Drittel in Europa/Eurasien, Asien/Pazifik und Nordamerika (BP 2009). Aufgrund der klimapolitischen Ziele ist ein verbreiteter Einsatz von Kohle für den Verkehr kaum denkbar.

### Erdgas

An dritter Stelle des globalen Primärenergieverbrauchs steht Erdgas mit einem Anteil von 21% (IEA 2009). Erdgas tritt häufig in ähnlichen Gebieten wie Erdöl auf, weil es auf ähnliche Weise entsteht. So ist die regionale Verteilung wie beim Erdöl sehr ungleichmässig. Die Weltproduktion 2008 verteilt sich folgendermassen (BP 2009):

- Europa/Eurasien: 35% (davon 19% Russland)
- Nordamerika: 27%
- Asien: 13% (v.a. China, Indonesien, Malaysia)
- Mittlerer Osten: 12% (v.a. Iran, Katar, Saudi Arabien)
- Afrika: 7% (v.a. Algerien, Ägypten, Nigeria)

Mit den heute bekannten Reserven kann der Bedarf für mehrere Jahrzehnte auch bei steigender Nachfrage gedeckt werden. Mögliche regionale Engpässe (z.B. auf dem nordamerikanischen Erdgasmarkt) könnten voraussichtlich durch Lieferungen von verflüssigtem Erdgas aus anderen Märkten kompensiert werden (BGR 2009b). Die Versorgung in Europa ist jedoch stark

von russischem Erdgas und den beiden Transitländern Ukraine und Weissrussland abhängig (BFE 2010).

Der Erdgaspreis ist gebunden an den Erdölpreis. Wie die Entwicklung der durchschnittlichen Heizenergiepreise zeigt, ist jedoch eine gewisse Entkoppelung zu beobachten (BFE 2010). Teilweise sind die Preise jedoch im Rahmen langfristiger Verträge an den Erdölpreis gekoppelt, und auch beim langfristigen Trend ist eine mehr oder weniger parallele Entwicklung zu erwarten. Die spezifischen Transportkosten sind deutlich höher als bei Erdöl und Kohle (BGR 2009b). In der Schweiz wird der Erdgaspreis von den rund 100 Gasversorgungsunternehmen individuell festgelegt. Es gibt keinen Einheitspreis. Die vom Bundesamt für Statistik erhobenen landesweiten Durchschnittswerte zeigen, dass die Entwicklung der Erdgaspreise jeweils mit etwas Verzögerung den Ölpreisen folgt (Abbildung 10).

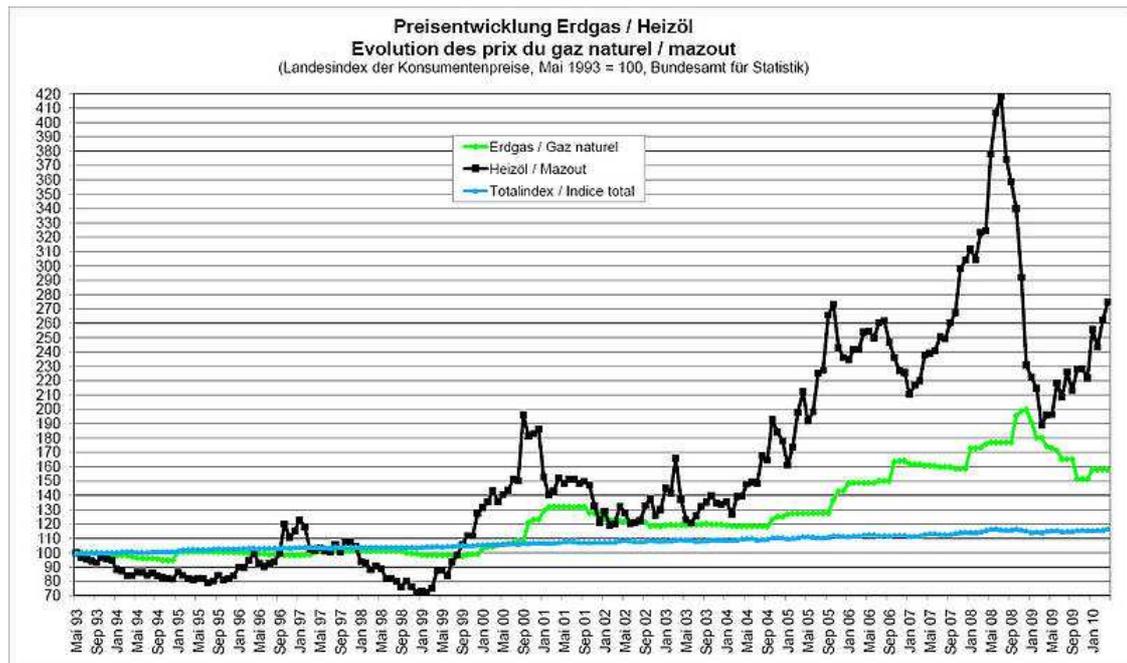


Abbildung 10: Preisentwicklung Heizöl und Erdgas<sup>31)</sup>

### 2.1.3 Biogene Treibstoffe

Unter verschiedenen Ansätzen, den oben beschriebenen Herausforderungen zu begegnen, wurden in den vergangenen Jahren grosse Hoffnungen in die sogenannten Biotreibstoffe gesetzt, d.h. in Treibstoffe, die aus Biomasse<sup>32)</sup> hergestellt werden. Auf den ersten Blick weisen diese zahlreiche Vorteile gegenüber fossilen Treibstoffen auf, sowohl in Bezug auf die Klimawirkungen als auch in Bezug auf die Abhängigkeiten von längerfristig unsicheren Versorgungsquellen.

Diese positiven Aspekte werden jedoch bei umfassenden Betrachtungen der mit der staatlichen Förderung ausgelösten Entwicklungen und in vertieften Untersuchungen zu den Umwelt- und Klimawirkungen vermehrt in Frage gestellt. In der öffentlichen Diskussion hat sich das Bild von Biotreibstoffen innert kurzer Zeit von einer Problemlösung zu einem Problemverursacher gewendet. Die Erfahrungen in betroffenen Gebieten und Forschungsergebnisse verschiedener Studien (z.B. Zah et al. 2006, Crutzen et al. 2008), zeigen, dass die ökologischen und sozialen

31) <http://www.erdgas.ch/de/energietraeger-erdgas/preise/entwicklung.html> (Zugriff am 11. Juni 2010)

32) Sämtliches durch Fotosynthese direkt oder indirekt erzeugtes organisches Material, das nicht über geologische Prozesse verändert wurde. Hierzu gehören auch sämtliche Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus der Biomasse stammt (BFE, BLW, ARE, BAFU 2009)

Effekte differenziert zu betrachten sind. Eine bedeutende Rolle bei einer umfassenden Beurteilung ist den indirekten Effekten beizumessen, die beispielsweise durch Landnutzungsänderungen entstehen und sowohl unter ökologischen als auch sozialen Aspekten mit gravierenden Folgen verbunden sein können.

Eine der zentralen Fragen in der öffentlichen Diskussion ist, ob es ethisch vertretbar ist, Treibstoffe aus Rohstoffen herzustellen, die als Nahrungsmittel verwendbar sind. Aufgrund von Meldungen über wieder zunehmenden Hunger in vielen Ländern sind die heute verwendeten Biotreibstoffe der ersten Generation unter Kritik geraten. Darüber hinaus wird auch kritisiert, dass der Beitrag zum Klimaschutz von Treibstoffen aus Nahrungsmitteln oftmals negativ ist.

Deshalb ruhen die Erwartungen nun auf Treibstoffen aus biogenen Ressourcen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Als Rohstoffe kommen Abfallstoffe in Frage, wie beispielsweise bei der Produktion von Biogas. Für Biotreibstoffe der zweiten Generation können auch Pflanzenreste und zellulosehaltige Pflanzenteile, wie beispielsweise Stroh, Holz oder überständiges Gras, verwendet werden, indem die pflanzliche Zellulose in Alkohole oder Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird. Die meisten der verwendeten Rohstoffe und Landflächen haben jedoch bereits heute eine Verwendung, und so bleibt das Thema der Nutzungskonkurrenz weiterhin aktuell. Über die Suche nach Ersatzstoffen und neuen Flächen können sich indirekte Konkurrenzen und negative Umweltauswirkungen ergeben.

#### **Was sind Biotreibstoffe der 2. Generation?**

In der Literatur werden unterschiedliche Verfahren und Technologien unter dem Begriff der Biotreibstoffe der zweiten Generation zusammengefasst. Eine gängige Abgrenzung zu den Biotreibstoffen der ersten Generation ist das Kriterium der technologischen Marktreife: Biotreibstoffe der 2. Generation sind noch weitgehend in der Phase von Forschung und Entwicklung und die entsprechenden Verfahren stehen noch nicht in grossem Massstab zur Verfügung. Diese Definition umfasst einerseits Optimierungen der bei der 1. Generation verwendeten Verfahren und Rohstoffe und andererseits die Entwicklung neuer Produktionsverfahren:

- Optimierungen heutiger Verfahren  
Beispiele: Zellulose-Ethanol (Umwandlung von pflanzlicher Lignozellulose in Alkohole oder Kohlenwasserstoffe), Biodiesel aus Algen, gentechnisch veränderte Energiepflanzen etc..
- Neue Produktionsverfahren  
Beispiele: BtL (Biomass to Liquid), Bio-SNG (Biological Synthetic Natural Gas), Biobutanol, Bakterienkulturen etc..

Eine andere Abgrenzung der Biotreibstoffe der 2. Generation beruht auf dem Kriterium der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Mit dieser Definition werden diejenigen Biotreibstoffe der zweiten Generation zugeordnet, die sich von den in den heute in grossem Massstab produzierten Biotreibstoffen aus stärke-, zucker- oder ölhaltigen Pflanzen (Mais, Zuckerrüben, Raps usw.) unterscheiden und einen Beitrag zur Reduktion der Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion leisten. Dementsprechend wird auch ins Erdgasnetz eingespeistes und als Treibstoff verwendetes Biogas – produziert aus Hofdünger, biogenen Abfällen oder zellulosereichen Energiepflanzen – zu den Treibstoffen der zweiten Generation gezählt. Dies, obwohl es schon entsprechende Anlagen gibt.

#### **Und die 3. Generation?**

Aus Algen produzierte Treibstoffe werden teilweise als Biotreibstoffe der dritten Generation bezeichnet (z.B. SATW 2009). Diese befinden sich noch im Entwicklungsstadium und werden erst in Pilotanlagen produziert. Auch hier sind die Abgrenzung und die Verwendung des Begriffs nicht eindeutig.

Bisher werden Biotreibstoffe der zweiten oder dritten Generation nur in Versuchs- oder Demonstrationsanlagen hergestellt. So ist die Frage ungeklärt, ob und unter welchen Bedingun-

gen eine wirtschaftliche Produktion dieser Treibstoffe möglich ist. Zudem ist unklar, inwieweit die neuen Möglichkeiten mit der nachfolgenden Generation von Biotreibstoffen dazu beitragen, die Risiken in ökologischen und sozialen Bereichen zu mindern. Diesen Fragestellungen wird aktuell in zahlreichen Forschungsarbeiten nachgegangen.<sup>33)</sup>

### **Potenziale global**

Biotreibstoffe decken heute global knapp 2% des Treibstoffverbrauchs (IEA 2009: 87). Für die Produktion der Rohstoffe werden weltweit rund 1 Prozent (rund 14 Millionen Hektar) der ackerbaufähigen Flächen genutzt. Die OECD/FAO (2008) schätzt, dass die weltweite Produktion von Biodiesel und Bioethanol bis 2017 zwei- bis dreimal höher sein wird als 2007. Damit könnten rund 3% des globalen Dieserverbrauchs und 11% des Benzinverbrauchs durch biogene Treibstoffe gedeckt werden.

Im Referenzszenario geht die IEA im Outlook 2009 von einem Anteil von 5% im Jahr 2030 aus. Gegenüber den Prognosen in früheren Jahren wurde dieser Anteil nach unten korrigiert. Rund ein Viertel soll dabei mit Biotreibstoffen der 2. Generation gedeckt werden. Im Szenario mit zusätzlichen klimapolitischen Massnahmen ("450 Szenario") wird von einer doppelt so grossen Menge Biotreibstoffe ausgegangen und gleichzeitig von einer Nachfrage, die 10% unter dem Referenzszenario liegt. Damit liegt der Anteil der biogenen Treibstoffe bei 9% im Jahr 2030. Die zusätzlichen Potenziale gegenüber dem Referenzszenario sind hauptsächlich auf technologische Entwicklungen bei den Biotreibstoffen der 2. Generation zurückzuführen.

Die Potenziale von Biotreibstoffen der 2. Generation aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen werden in einer anderen Untersuchung der IEA (2010) folgendermassen eingeschätzt:

- Deckung von 5-6% des prognostizierten globalen Treibstoffverbrauchs 2030, wenn 10% der Reststoffe für die Biodieselproduktion verwendet werden,
- Deckung von 10-15% des prognostizierten globalen Treibstoffverbrauchs 2030, wenn 25% der Reststoffe für die Biodieselproduktion verwendet werden.

### **Potenziale Schweiz**

Die Schweiz vertritt eine sehr restriktive Haltung gegenüber Biotreibstoffen, die Nahrungsmittelproduktion hat Vorrang<sup>34)</sup> und auch bezüglich Reststoffe sind die Potenziale beschränkt. Im Jahr 2008 deckten biogene Treibstoffe gerade einmal 0.25% des Treibstoffverbrauchs.

Gemäss einer groben Abschätzung der Biomassepotenziale für das Jahr 2020 in der Schweiz wäre ein Anteil biogener Treibstoffe am Gesamtverbrauch von 8% möglich. Zusätzlich könnten je 5% des Strom- und des Wärmebedarfs mit Energie aus Biomasse gedeckt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Politik einheimische Energieproduktion aus Biomasse massiv fördern würde und alle Biomassefraktionen sowie die dabei entstehenden Nebenprodukte energetisch genutzt werden (Angele 2006).

Eine andere Untersuchung (Kampa & Wolfensberger 2007) schätzt die folgenden Potenziale für Biotreibstoffe aus in der Schweiz angebauten agrarischen Rohstoffen:

- Potenzial für Biodiesel oder Pflanzenöltreibstoff aus Raps (Anbaufläche von 25'000 ha): 30 Mio. Liter pro Jahr. Dies entspricht 0.4% des Benzin- und Dieserverbrauchs im Jahr 2008.
- Potenzial für Bioethanol aus Zuckerrüben (mit einer Verdoppelung der Anbaufläche): 135 Mio. Liter Bioethanol (1.9% des Treibstoffverbrauchs). Weiter könnten auch Mais, Kartoffeln und Getreide für die Produktion von Bioethanol verwendet werden.

Durch den Bedarf von Flächen für die Raps- bzw. Zuckerrübenanbau würde die Biodieselproduktion mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren. Zudem schneiden Biotreibstoffe aus

---

33) Resultate der TA-Swiss Studie «Treibstoffe aus Biomasse – zweite Generation» sind demnächst zu erwarten.  
[http://www.ta-swiss.ch/d/them\\_biot\\_fuel.html](http://www.ta-swiss.ch/d/them_biot_fuel.html)

34) [http://www.bio-sprit.ch/Portals/0/Positionspapier\\_biogene\\_Treibstoffe\\_positionspapier\\_BFE.pdf](http://www.bio-sprit.ch/Portals/0/Positionspapier_biogene_Treibstoffe_positionspapier_BFE.pdf)

Raps, Zuckerrüben und anderen in der Schweiz angebauten Pflanzen in Ökobilanzen im Vergleich zu herkömmlichen fossilen Treibstoffen nicht viel besser oder sogar schlechter ab (z.B. Zah et al. 2007). Aus diesen Gründen wird das Potenzial der Biotreibstoffproduktion aus Agrarrohstoffen in der Schweiz als sehr klein eingestuft.

Auch der Import von Biotreibstoffen ist in der Schweiz bisher gering, obwohl sie seit Juli 2008 von der Mineralölsteuer befreit sind. Als Voraussetzung für die Steuerbefreiung sind ökologische und soziale Mindestanforderungen zu erfüllen.<sup>35)</sup> Trotzdem wurden im Jahr 2009 nur knapp 2 Mio. Liter Bioethanol in der Schweiz abgesetzt.<sup>36)</sup> Deshalb hat der Bundesrat im Januar 2010 administrative und technische Hürden gelockert. Gemäss der entsprechenden Medienmitteilung des Bundes wird das langfristige Jahrespotenzial von Bioethanol in der Schweiz auf 200 Mio. Liter geschätzt. Dies entspricht knapp 3% des Benzin- und Dieserverbrauchs 2008. Die Entwicklung in der Schweiz ist stark von den politischen Rahmenbedingungen abhängig. Technologische Fortschritte bei den Biotreibstoffen der 2. Generation könnten sich positiv auswirken auf die ökologischen und sozialen Aspekte der Biotreibstoffproduktion und damit zu erhöhten Importen führen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird nur im Zukunftsbild mit optimierten Verbrennungsmotoren eine bedeutende Zunahme von biogenen Treibstoffen angenommen. In diesem Zukunftsbild gehen wir davon aus, dass der Anteil der biogenen Treibstoffe gemessen am Gesamtverbrauch bei 8% im Jahr 2035 und bei 10% im Jahr 2050 liegt. Bei den anderen Zukunftsbildern nehmen wir an, dass die Bedeutung der biogenen Treibstoffe vernachlässigbar bleibt.

#### 2.1.4 Weitere Ressourcen

Bezüglich neuer Antriebe und Treibstoffe wird auch diskutiert, inwieweit die Ressourcen für Batterien (z.B. Lithium) oder für Brennstoffzellen (z.B. Platin) in ausreichenden Mengen verfügbar sind und inwieweit die Verwendung dieser Ressourcen zu neuen Abhängigkeiten von etwaigen Lieferländern führen kann. Diese Themen werden bei den entsprechenden Zukunftsbildern und deren Auswirkungen auf eine Nachhaltige Entwicklung angesprochen.

## 2.2 Politische Rahmenbedingungen

Die Entwicklungen von Fahrzeugtechnologien und Treibstoffen sind von den politischen Rahmenbedingungen und rechtlichen Grundlagen geprägt. Im Vordergrund stehen dabei einerseits Anforderungen bezüglich Sicherheit und andererseits Vorgaben der Umwelt-, Energie- und Klimapolitik. Der Einsatz der verschiedenen Fahrzeugtechnologien und das Mobilitätsverhalten werden durch die Raumentwicklungspolitik geprägt.

In der Vergangenheit standen Ziele der **Luftreinhaltung** im Vordergrund, die beispielsweise zur Einführung des Katalysators geführt haben. Grundlage dafür bildet das Umweltschutzgesetz (USG), dessen Zweck der Schutz von Menschen, Tieren und Pflanzen vor schädlichen Einwirkungen ist. Das Ziel ist die Begrenzung von Luftverunreinigungen durch Massnahmen bei der Quelle (USG Art. 11). Damit sollen in erster Linie die lokalen Umweltbelastungen reduziert werden.

Ein grundlegendes in der Bundesverfassung festgehaltenes Ziel der **Energiepolitik** ist der sparsame und rationelle Energieverbrauch (BV Art. 89). Im Unterschied zu bindenden Vorgaben bei der Luftreinhaltung soll dieses Ziel gemäss der aktuell geltenden Politik über Anreize und freiwillige Massnahmen erreicht werden. Dazu gehören beispielsweise die Energieetikette oder EcoDrive-Fahrkurse. Neben der Energieeffizienz ist die Versorgungssicherheit ein wichti-

---

35) Treibstoffökobilanz-Verordnung vom 3. April 2009, TrÖbiV

36) Bessere Rahmenbedingungen für Bioethanol in der Schweiz. Medienmitteilung vom 27.1.2010  
<http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=31331>

ges energiepolitisches Ziel. Der Strassenverkehr ist durch die Abhängigkeit von Erdöl Risiken ausgesetzt, wie beispielsweise die Abhängigkeiten von einer endlichen Ressource und von instabilen Verhältnissen in vielen Exportländern.

Eng verbunden mit der Energiepolitik ist die **Klimapolitik** als weiterer wichtiger Treiber in der aktuellen Debatte. Neben den nationalen Grundlagen sind hier internationale Abkommen von Bedeutung, mit deren Ratifizierung sich die Schweiz zur Reduktion der Treibhausgasemissionen verpflichtet. Auf internationaler Ebene verpflichtete sich die Schweiz im Rahmen des Kyoto-Protokolls, die Treibhausgas-Emissionen um 8 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Im CO<sub>2</sub>-Gesetz ist das Teilziel festgehalten, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Treibstoffe bis zum Jahr 2010 gegenüber 1990 ebenfalls um 8 Prozent zu senken.

Die aktuellen Zahlen der Treibhausgasstatistik weisen darauf hin, dass die inländischen Emissionen im Treibstoffbereich angestiegen sind und die genannten Ziele nur mit Kompensationsleistungen im In- und Ausland erreicht werden können. Die Emissionen aus Treibstoffen haben im Jahr 2008 gegenüber dem Vorjahr um 2 Prozent zugenommen.<sup>37)</sup> Aktuell stehen verschiedene politische Vorstösse zur Debatte, wie die Klimaziele im Verkehrsbereich erreicht werden sollen. Im Parlament hängig ist beispielsweise der Vorschlag des Bundesrates, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von neu immatrikulierten Personenwagen bis 2015 auf 130 g/km zu senken.<sup>38)</sup> Dieser Vorschlag orientiert sich an den Zielen der EU. Weiter steht die Einführung eines Bonus-Malus-Systems für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge zur Diskussion.

Die Entwicklungen im Verkehrsbereich sind auch durch die **Raumentwicklungspolitik** geprägt. Zu den wichtigsten Veränderungen des Raums in der bisherigen Entwicklung gehören die Verstädterung und die Zersiedlung (ARE 2008). Ein zentrales Ziel der Agglomerationspolitik des Bundes ist die Förderung einer konzentrierten Siedlungsentwicklung (ARE 2009). Die Siedlungsentwicklung nach innen wirkt sich direkt und indirekt auf die Bilder der zukünftigen Mobilität aus (vgl. dazu auch Kapitel 3.2).

## 2.3 Kundenanforderungen

Ein zentraler Treiber für die Entwicklungen im Automobilmarkt ist letztlich das Wachstum unseres Wohlstands. Unsere Autos sind grösser und besser geworden, weil unsere Volkswirtschaft leistungsfähiger geworden ist. Dies äussert sich in einem stetig verbesserten Angebot für stetig wachsende Anforderungen der Kunden. Kriterien beim Autokauf sind beispielsweise Kosten, Sicherheit, Treibstoffverbrauch, Reichweite, Beschleunigung, Umweltverträglichkeit, Platz, Komfort, Markenprestige, Design, Service.<sup>39)</sup>

Aktuelle Untersuchungen zu Kundenpräferenzen beim Fahrzeugkauf weisen darauf hin, dass ökologische Kriterien an Bedeutung gewinnen (Wallentowitz et al. 2010). Bereits im Jahr 2007 ist eine Studie unter dem Titel "Auto und Umwelt" (Wyman 2007) zum Schluss gekommen, dass die Klimadebatte das Kaufverhalten verändert. Von den 3'600 befragten Kunden in der EU und in den USA wollen

- 80% den ökologischen Aspekt stärker berücksichtigen,
- 30% auf einen umweltfreundlicheren Antrieb wechseln,
- 18% das Öko-Modell einer Baureihe erwerben,
- 12% ein Fahrzeug mit kleinerer Motorisierung erwerben.

---

37) BAFU: Treibhausgasemissionen gemäss Klimakonvention  
<http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/09574/index.html?lang=de> (Juni 2010)

38) Botschaft zur Volksinitiative «Für menschenfreundlichere Fahrzeuge» und zu einer Änderung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes. (BBl 2010 973)

39) vgl. z.B. Referat von Roger Löher, Vizedirektor TCS, Schweizer Forum Elektromobilität, 27. Januar 2010

Auch wenn davon auszugehen ist, dass zwischen dem beabsichtigten und dem tatsächlich realisierten Verhalten eine gewisse Diskrepanz besteht, weisen die Ergebnisse doch auf ein gewisses Umdenken hin.

Die Bedeutung verschiedener Kriterien wurde in Deutschland mittels eines ökonometrischen Modells für den Zeitraum 1995 bis 2005 geschätzt. Die nachfolgende Tabelle 7 zeigt die ermittelten Einflussfaktoren mit den jeweiligen Koeffizienten (Elastizitäten) und Signifikanz. Die Signifikanz der Faktoren Neuwagenpreis, Fahrzeugsteuern und die Treibstoffkosten zeigen, dass die Kaufentscheidung deutlich von Kosten abhängen. Die grosse Bedeutung der Dummy-Variablen „Manuelle Schaltung“ und „Deutscher Hersteller“ zeigen aber, dass auch emotionale Aspekte bei der Anschaffung eines Fahrzeugs eine Rolle spielen.

Variable	Koeffizient
Neuwagenpreis	-0.323
Kfz-Steuer	-0.002
Treibstoffkosten je km	-0.006
Motorleistung	0.001
Hubraum	0.000
Fahrzeuggrösse (Länge*Breite)	0.000
Dummy: „Manuelle Schaltung“	0.974
Dummy: „Deutscher Hersteller“	1.510

Anmerkung: Die Koeffizienten geben an, um wie viel Prozent sich die Nachfrage verändert, wenn sich die Variable um 1% ändert.

*Tabelle 6: Einflussfaktoren auf den Kaufentscheid bei Fahrzeugen in Deutschland (Ökoinstitut 2008, S. 26)*

Eine Untersuchung des Fraunhofer Instituts ISI beurteilt die folgenden Aspekte von Elektrofahrzeugen kritisch für die Kundenakzeptanz: hohe Batteriekosten sowie Befürchtungen und Unsicherheiten bezüglich Reichweite und Lebensdauer der Batterie. Die Nutzung einer neuen Technologie und ein positives Image von Elektrofahrzeugen werden hingegen positiv beurteilt.<sup>40)</sup>

40) vgl. Pressemitteilung vom 22. Juni 2010 von auto-schweiz  
[http://www.auto-schweiz.ch/Pressemitteilung\\_Die\\_Autos\\_von\\_morgen.html](http://www.auto-schweiz.ch/Pressemitteilung_Die_Autos_von_morgen.html) (Stand Oktober 2010)

## 3 Elemente der Zukunftsbilder

### 3.1 Vordergrund und Hintergrund

Wer spekuliert nicht gerne? Wer malt sich nicht gerne mal die Zukunft aus in der Hoffnung, sein Handeln in der Gegenwart auf das abzustimmen, was da denn kommen möge? Mit etwas Glück wird aus einem solchen Unterfangen dann eine selbsterfüllende Prophezeiung und aus der eigenen Wunschzukunft dann tatsächlich auch Realität. Wahrheiten lassen sich mit Zukunftsbetrachtungen – und mögen sie methodisch noch so ausgereift sein – schlichtweg nicht generieren. Allenfalls Einblicke in mögliche Zukünfte.

Derartige Einblicke in die Schweizer Verkehrswelt der Jahre 2035 und 2050 lassen sich in einer ersten Näherung mittels Zukunftsbildern entwickeln. Für die vorliegende Studie charakterisieren wir die betrachteten Zukunftsbildern über ihren "Vordergrund" und ihren "Hintergrund":

- Im Bildvordergrund stehen die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens näher zu betrachtenden motorischen Antriebsarten in Kombination mit verschiedenen Treibstoffarten. Diese Bildelemente werden in Kapitel 3.3 beschrieben.
- Im nachstehenden Kapitel 3.2 geht es aber zuerst um die Merkmale des Bildhintergrundes. Dieser Bildhintergrund der Jahre 2035 und 2050 unterscheidet sich nicht grundsätzlich von dem des Jahres 2010, sondern weist die gleichen Elemente, Strukturen und Kompositionen auf. Nur das Zusammenspiel der Hintergrundmerkmale verschiebt sich<sup>41)</sup>.

Die Zukunftsbilder orientieren sich an den folgenden Grundlagen:

- ARE-Verkehrsperspektiven mit zwei alternativen Verkehrsentwicklungen für das Jahr 2030:
  - Alternativszenario "Städtenetz und Wachstum" mit ca. 65 Mrd. Fzkm je Jahr.  
Das Alternativszenario Städtenetz und Wachstum schreibt in etwa den bisherigen Wachstumstrend der Mobilität fort.
  - Alternativszenario "Ressourcenknappheit" mit ca. 55 Mrd. Fzkm je Jahr.  
Das Alternativszenario Ressourcenknappheit geht von in etwa konstanten Fahrleistungen im Vergleich zu heute aus, trotz Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum.
- BFE-Energieperspektiven: Hier wurde bewusst auf die Vorgabe eines Szenarios verzichtet, da der Energieverbrauch abhängig ist von den Antrieben und Treibstoffen. Die Zukunftsbilder orientieren sich grundsätzlich an den Energieperspektiven, weichen aber dort ab, wo eigene Berechnungen zum Energieverbrauch vorgenommen werden.

In einem ersten Schritt wird das Spektrum erweitert, um den Bildhintergrund mit verschiedenen Mobilitätswelten kontrastreicher zu zeichnen. Dabei wurden auch die entsprechenden Annahmen zu allgemeinen Trends aus den Verkehrsperspektiven und der Untersuchung „Vision Verkehr Stadt Zürich 2050“ berücksichtigt. Diese werden aber nicht eins-zu-eins übernommen, da hier Verkehr- und Energieannahmen zusammenzuführen sind. Elektro- oder Brennstoffzellenantriebe sind dort nicht vorgesehen, weshalb hier der gesellschaftliche Rahmen entsprechend zu zeichnen ist.

---

41) Verdeutlichen liesse sich diese Vorstellung vom Wandel des „Mobilitätshintergrund“ vielleicht anhand des (in der Klimakommunikation beinahe schon klassischen) Vergleichs von Aufnahmen des Aletschgletschers aus den 20er Jahren mit einer des Jahres 2010: Das Alpenpanorama weist mit Licht, Luft, Stein, Erde, Wasser und Eis in beiden Jahren klar die gleichen Elemente auf. Trotzdem dürfte es keinem Betrachter verborgen bleiben, dass sich die Aletschwelt in den letzten 90 Jahren drastisch verändert hat.

## 3.2 Bildhintergrund

Im Folgenden geht es um das Zusammenspiel von hintergründigen Aspekten künftiger Verkehrswelten. Dazu werden die grossen Einflussumfelder (quasi die Elemente des Hintergrundes der mobilen Zukunftsbilder) der Mobilitätsentwicklung betrachtet:

1. die **politischen Rahmensetzungen** auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene;
2. die **gesellschaftliche Entwicklung** insgesamt;
3. die **alltagsweltlichen und kulturellen Veränderungen** und die daraus resultierenden neuen Strukturen bei der Alltagsorganisation;
4. die **gesamtwirtschaftlichen Perspektiven**, welche sich vor dem Hintergrund wachsender Unsicherheiten auf allen Teilmärkten dieser Welt ergeben;
5. die **technischen Innovationen** im Bereich der Fahrzeuge und Infrastrukturen und die **sozialen Innovationen** bezüglich Nutzungs- und Besitzformen;
6. die **energiesystemischen Umwälzungen** vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit und des Klimawandels.

Diese hier genannten Einflussumfelder mit ihren jeweiligen Einflussfaktoren sind als die qualitativen Determinanten der Mobilitätsentwicklung zu verstehen. In Anlehnung an bisherige Zukunftsforschungen im Rahmen der Schweizer Verkehrsforschungen bieten sich hier zwei Einfluss- bzw. Messgrössen an: die im Individualverkehr benötigte Energiemenge (in kWh pro Jahr) und die Fahrleistung (in Fahrzeugkilometern pro Jahr). Werden diese beiden Grössen in einer Matrix zusammengeführt, ergeben sich die folgenden Konstellationen (Abbildung 11):

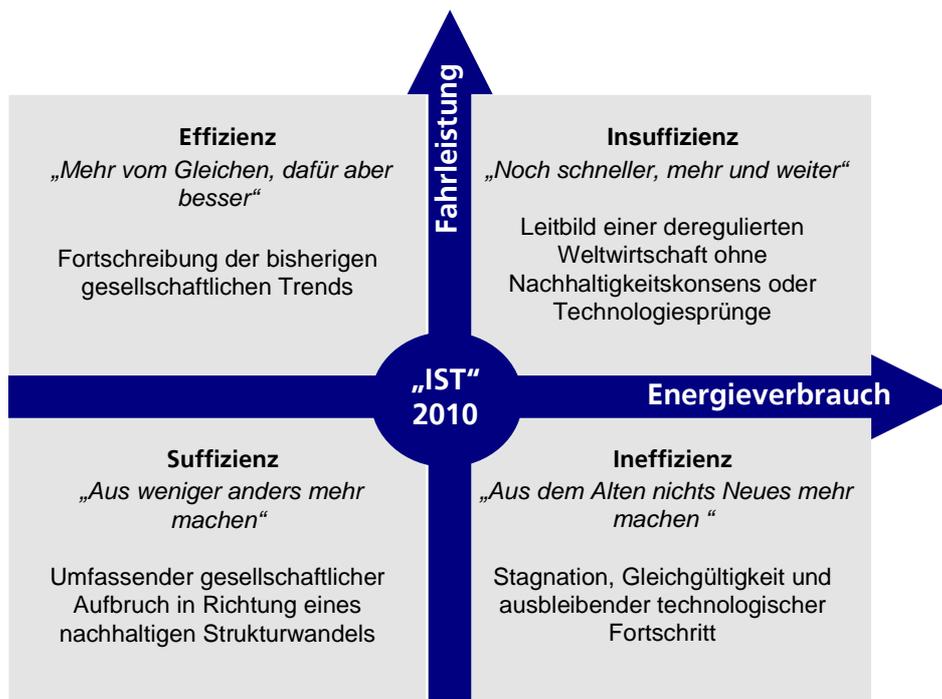


Abbildung 11: Die vier Mobilitätswelten im Überblick

Die vier Mobilitätswelten werden nun charakterisiert, weitere Details hinsichtlich der Einflussfelder sind im Anhang A1 beschrieben.

### Effiziente Mobilitätswelt: mehr vom gleichen, dafür aber besser

Wesentliches Merkmal einer künftigen, effizienten Mobilitätswelt ist die Fortschreibung gegenwärtiger Trends in Richtung einer umfassenden ökologischen Modernisierung des Verkehrssektors. Heutige Schwerpunkte dieses Modernisierungsprozesses werden auch in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Ausgestaltung verkehrsplanerischer und -politischer Handlungsinstru-

mente spielen. Wichtige Entwicklungen sind die technischen Fortschritte im Bereich der Fahrzeugentwicklung, des Motorenbaus und des Verkehrswegemanagements. Die technikdeterminierte Modernisierung des Verkehrs wird insbesondere durch neue energiewirtschaftliche und raumplanerische Rahmenbedingungen politisch und administrativ begleitet. Die klassischen ordnungs- und finanzpolitischen Instrumente zur Beeinflussung der Verkehrsnachfrage werden weiterentwickelt und noch stärker in den Dienst der Nachhaltigkeit gestellt. Insgesamt erfolgt bei der Mobilitätsentwicklung keine Trendumkehr oder Trendwende, im Rahmen derer mit massiven Veränderungen im Mobilitätsverhalten zu rechnen wäre. Als Konsequenz verändern die Verkehrsträger ihre Anteile am Modal Split nur geringfügig. Allen motorisierten Verkehrsträgern gemein ist ein wesentlich effizienterer, ressourcenschonenderer und emissionsärmerer Einsatz von Energie.

### **Suffiziente Mobilitätswelt: aus weniger anders mehr machen**

Anders als in einer effizienten Mobilitätswelt, in der durch den Einsatz effizienzsteigernder Technologien der Fahrleistungszuwachs vom Energieverbrauch entkoppelt wird, sinken in der suffizienten Welt Fahrleistung und Energieverbrauch gleichermaßen. Während sich in der effizienten Welt das Mobilitätsgeschehen entlang eines bereits heute eingeschlagenen Modernisierungspaths bewegt, erfolgt in der suffizienten Welt ein weitreichender Strukturwandel, der etablierte Produktions-, Distributions- und Konsummuster in hochindustrialisierten Staaten grundsätzlich in Frage stellt und stark auf eine regionalisierte und weniger transportintensive Ökonomie setzt. Im Mittelpunkt dieser trendverschiebenden Suffizienzrevolution steht auch gerade die Frage nach der Ausgestaltung der Alltagsmobilität. Die gesellschaftlichen Diskurse, in denen klassische, wachstumsorientierte ökonomische Modelle zunehmend in Kritik geraten, eröffnen der Verkehrspolitik neue Handlungsspielräume. Soziale und technische Innovationen im Verkehrsbereich werden in den Dienst einer umfassenden Entschleunigung des Alltagslebens gestellt; Verkehrswegerückbau, Energieeinsparungen, ein Paradigmenwechsel bei der Bepreisung von Verkehr, und massive Verdichtungen in den Siedlungsflächen verringern die individuellen Verkehrsaufwände ohne Einbussen bei der Lebensqualität.

### **Insuffiziente Welt: schneller, mehr und weiter**

In einer insuffizienten Zukunft bestimmt ein neuerstandener ungebremster Fortschrittsglaube, wie er bereits zu Mitte des 20. Jahrhunderts die westlichen Industrienationen erfasst hatte, im weiteren Sinne das Verkehrsgeschehen. Der Nachhaltigkeitskonsens des frühen 21. Jahrhunderts hat sich als „Modetrend“ erwiesen. Der Klimawandel findet zwar statt, wirft für viele globale Unternehmen aber auch enorme Profite ab und steigert somit gleichsam das BIP vieler etablierter und aufstrebender Industrienationen. Diese profitablen Anpassungen an den Klimawandel verhindern im MIV die Abkehr von fossilen Antrieben und schaffen keine weiteren Anreize zur Einführung effizienzsteigernder Massnahmen im Verkehr. Die Frage der Energieversorgung sollte als gelöst gelten. Individualfahrzeuge werden wieder grösser und schwerer, Pendlerdistanzen auf allen Verkehrsträgern wachsen, Bahngeschwindigkeiten erhöhen sich weiter, der nationale und internationale Flugverkehr nimmt nochmals drastisch zu, und die Teilräume der Schweiz werden noch stärker zersiedelt. Die Schweiz befindet sich damit inmitten einer globalen „Hypermobilisierungswelle“.

### **Ineffiziente Mobilitätswelt: aus dem Alten nichts mehr Neues machen**

Eine ineffiziente Mobilitätswelt von morgen erscheint zuerst vielleicht wie ein „schwarzer Schimmel“, stellt sie doch scheinbar physikalische Gesetzmässigkeiten auf den Kopf, indem sie von weniger Verkehr bei wachsendem/stagnierendem Energieaufwand ausgeht. Jedoch stellt unter Umständen die Vision von einer „immobileren Schweiz“ ohne gleichzeitige Energieeinsparungen nur die konsequente Fortführung gegenwärtiger Sub-Trends dar. In der ineffizienten Schweizer Mobilitätswelt von morgen haben Überalterung und hoher Wohlstand ein Klima der Stagnation geschaffen. Aus der „sicheren Schweiz“ heraus reagiert man gelassen bis gleichgültig auf die globalen ökonomischen, ökologischen und sozialen Veränderungen, welche anderenorts auch den Verkehrsbereich erfasst haben. In der Schweiz hingegen sehen sowohl die politischen Entscheidungsträger als auch die Bürger und Bürgerinnen kaum die Notwendigkeit, von ihren „Mobilitätstraditionen“ abzurücken – weder in Richtung einer verkehrsintensiven Erweiterung ihrer Aktionsräume noch in Richtung einer effizienteren Nutzung von Energie. Niemand beansprucht hierzulande eine Technologie- oder Ideenführerschaft in

Sachen einer Neuen Mobilität, und die Mehrheit der Schweizer und Schweizerinnen vertraut auf altbewährte, ineffiziente Verkehrsangebote im MIV und ÖV, die bei gleichem Energieaufwand weniger Mobilität bieten als die in anderen Märkten stark nachgefragten nachhaltigen Verkehrsinnovationen.

### **3.3 Vordergrund: Antriebe und Treibstoffe**

#### **3.3.1 Übersicht und Vorgehen**

Im Vordergrund der zu malenden Bilder stehen verschiedene Antriebe und Treibstoffe mit jeweils unterschiedlichen Anteilen. In diesem Kapitel werden die technischen und wirtschaftlichen Potenziale verschiedener Treibstoffe und Antriebe dargestellt. Die Potenziale basieren auf Angaben zum Stand der Technik, zum spezifischen Verbrauch, den Nutzungsdauern, sowie zu Preisen der Fahrzeuge als einem wesentlichen Merkmal der Fahrzeuge. Diese Angaben wurden wie folgt ermittelt:

- Literaturrecherche
- Expertengespräche: Die Liste der befragten Experten und der Gesprächsleitfaden sind in Anhang A2 enthalten.
- Eigene Erfahrungen aus Tätigkeiten für die Automobilindustrie.

Für die Verwendung in Fahrzeugen kommen flüssige und gasförmige Treibstoffe sowie Strom in Frage. Mögliche Herstellungspfade der Treibstoffe und Kombinationen mit Antriebstechnologien sind in Abbildung 12 dargestellt.

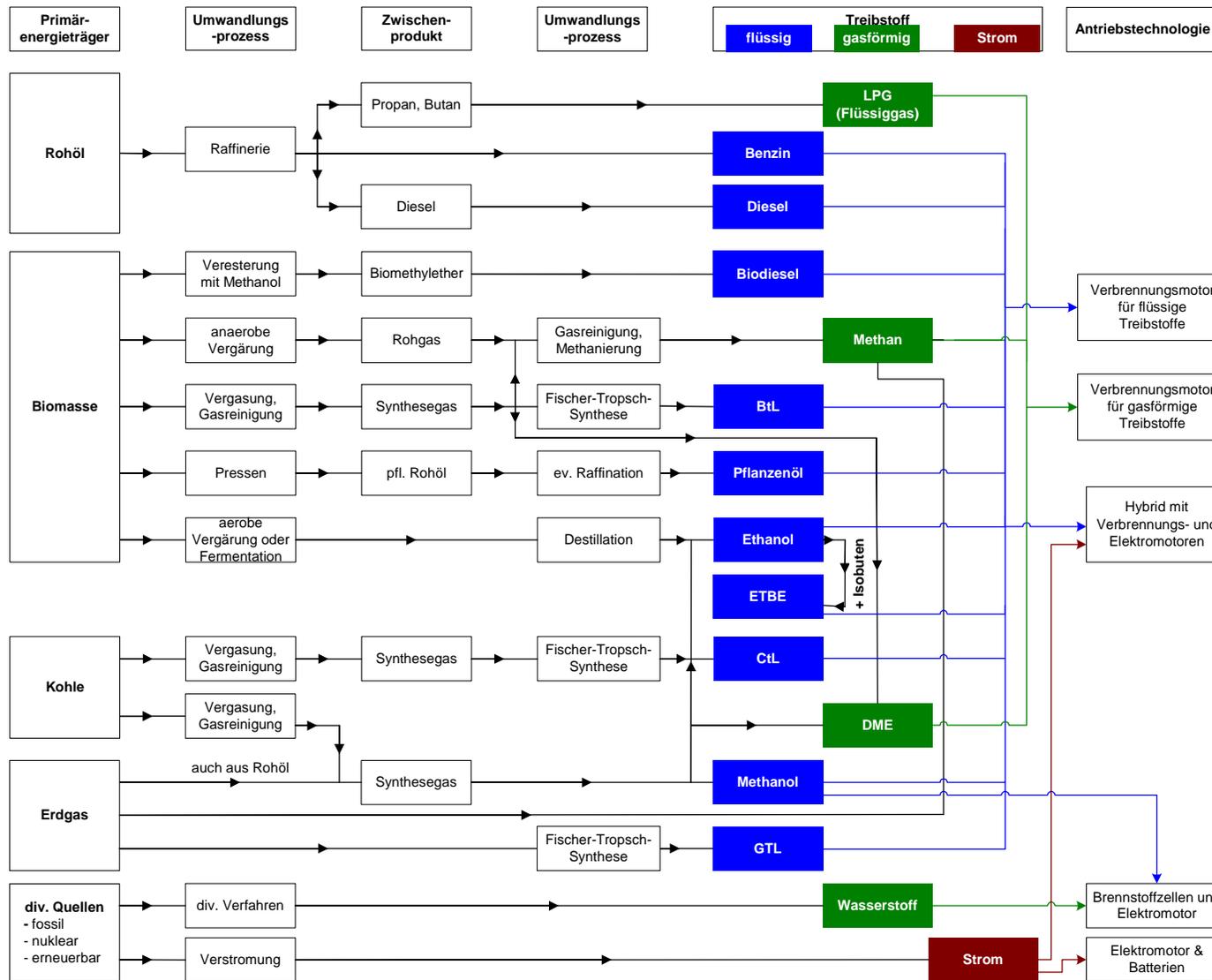


Abbildung 12: Treibstoffpfade (EBP 2009, leicht angepasst)

Als Primärenergiequelle dienen Öl, Biomasse, Kohle, Erdgas und insbesondere bei der Stromproduktion diverse andere Quellen (z.B. Uran, Sonne etc.). Die flüssigen oder gasförmigen Treibstoffe werden über diverse Umwandlungsprozesse und Zwischenprodukte produziert. Schliesslich werden sie in Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebstechnologien verwendet.

Bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb sind unterschiedliche Möglichkeiten zur Energiespeicherung im Fahrzeug möglich. Neben der elektrischen (Kondensatoren) und der chemischen Energiespeicherung (Batterie, Wasserstoff, flüssige oder gasförmige Kohlenwasserstoffe) gibt es Möglichkeiten der mechanischen bzw. kinetischen Speicherung: Schwungräder und Druckluft. Solche Antriebe i.S. von alleinigen Systemen werden im Rahmen dieses Dokumentes nicht betrachtet, können jedoch einen Beitrag zur zusätzlichen Effizienzsteigerung bei den Verbrennungsmotoren leisten. Laut Meinung der befragten Experten sind diese Technologien zu ineffizient. Druckluft hat in bestimmten Industriebereichen aus Sicherheitsgründen durchaus auch zukünftig seine Berechtigung. Insofern wird es auch zukünftig Bestrebungen für die Optimierung der entsprechenden Technik geben. Im MIV ist ihr Einsatz als alleinige Antriebsart aber durch den zu hohen Aufwand und einen geringen Wirkungsgrad nicht attraktiv. Als mögliche Ergänzung zum Verbrennungsmotor i.S. des „Downsizing“ könnten sie aber eine Bedeutung haben.

### 3.3.2 Treibstoffe

Die Treibstoffe werden in der folgenden Tabelle 7 kurz charakterisiert. Ausserdem ist dargestellt, inwieweit sie bei der Bildung von Zukunftsbildern eine Rolle spielen. Alle gasförmigen Kohlenwasserstoffe (Erdgas, Biogas, LPG) werden in den Zukunftsbildern nicht getrennt ausgewiesen. Sie weisen zwar bereits heute gewisse Marktanteile auf, und gemäss den meisten Prognosen werden sie auch in den nächsten Dezennien noch am Markt vorhanden sein. Es ist aber nicht mit namhaften Änderungen und Unterschieden zwischen den Zukunftsbildern zu rechnen. Die Gasantriebe sind jeweils im Total der Benzinantriebe enthalten (Gasmotoren sind leicht adaptierte Benzinmotoren).

Treibstoff	Charakterisierung	Bedeutung für Zukunftsbilder
Benzin	Benzin wird durch Erdölraffination hergestellt und als Treibstoff in Ottomotoren eingesetzt. Aufgrund der Endlichkeit der Ressource ist mit zunehmender Verknappung und mit einer Verteuerung des Benzins zu rechnen. Derzeit ist es der am weitesten verbreitete Treibstoff.	Gross in Bildern mit Verbrennungsmotoren, Potenziale vorhanden (vgl. Kapitel 2.1)
Diesel	Diesel wird ebenfalls aus Erdöl produziert, hat jedoch eine andere chemische Zusammensetzung. Es ist in Mitteleuropa der zweithäufigste Treibstoff. Die Aussage zur Verknappung gilt gleichermassen wie beim Benzin.	Gross in Bildern mit Verbrennungsmotoren, Potenziale vorhanden (vgl. Kapitel 2.1)

Tabelle 7: Treibstoffe und ihr Potenzial für Zukunftsbilder 2050 (Fortsetzung nächste Seite)

Treibstoff	Charakterisierung	Bedeutung für Zukunftsbilder
Pflanzenöle	Pflanzenöle werden durch das Pressen von Pflanzen, bzw. deren Samen gewonnen (z.B. Raps). Der Treibstoff wird in entsprechend angepassten Dieselmotoren eingesetzt. Da zu Biodiesel weiterverarbeitetes Öl herkömmlichem Benzin beigemischt werden kann, ist nicht mit einer grösseren Verbreitung von Pflanzenöl als Treibstoff zu rechnen.	Mässige Bedeutung, biogene Treibstoffe werden berücksichtigt in den Zukunftsbildern mit optimierten Verbrennungsmotoren, gemäss in Kapitel 2 beschriebenen Potenzialen
Biodiesel	Biodiesel (Fettsäuremethylester, FAME) wird durch Veresterung von Pflanzenölen erzeugt. Biodiesel wird erdölbasiertem Diesel beigemischt (z.B. B5, B10) oder in reiner Form als Treibstoff für Dieselmotoren verwendet (B100). Bei grösserer Beimischung sind je nach Motor Anpassungen nötig. Derzeit ist Biodiesel auf dem Schweizer Treibstoffmarkt ein Nischenprodukt. Langfristig dürfte Biodiesel durch effizientere Biotreibstoffe der 2. Generation abgelöst werden.	
Ethanol	Ethanol wird meist aus Biomasse hergestellt (sog. Bioethanol) und kann Benzin beigemischt werden (z.B. E5) oder den Hauptbestandteil des Treibstoffes bilden (z.B. E85, E100). In den konventionellen Verfahren wird Bioethanol durch die Spaltung von Kohlenhydraten mithilfe von Mikroorganismen hergestellt. Auch hier werden neuer Verfahren entwickelt. Bei der 2. Generation von Bioethanol wird die Herstellung aus Lignozellulose angestrebt.	
Synthetische Treibstoffe	Synthetische Treibstoffe werden aus den Synthesegasen von Biomasse (biomass to liquids, BtL), Gas (gas to liquid, GtL) oder Kohle (coal to liquid, CtL) hergestellt. Synthetische Treibstoffe erfordern keine oder nur geringfügige Änderungen am Verbrennungsmotor. Sie bieten grundsätzlich das Potenzial, neue Primärenergieträger für das Verkehrssystem einzubinden, aber aus ihnen jene Sekundärenergieträger (flüssige Kohlenwasserstoffe) herzustellen, für welche die Infrastruktur und Motorentechnologie bereits vorhanden ist. Derzeit laufen Entwicklungen, um synthetische Treibstoffe in Grossanlagen zu produzieren.	Mässige Bedeutung, BtL wird bei biogenen Treibstoffen (s. oben) berücksichtigt
<b>Legende</b>		
	Grosse Bedeutung in Zukunftsbildern	
	Mässige Bedeutung, wird als Beimischung/Anteil von fossilen Treibstoffen berücksichtigt	
	Geringe Bedeutung, wird nicht berücksichtigt in Zukunftsbildern	

Tabelle 7: Treibstoffe und ihr Potenzial für Zukunftsbilder 2050 (Fortsetzung nächste Seite)

Treibstoff	Charakterisierung	Bedeutung für Zukunftsbilder
Methanol	Methanol wird aus Erdgas oder Kohle hergestellt. Es hat eine hohe Klopfestigkeit und daher kraftstoffverbessernde Eigenschaften und wird Benzin oder Diesel beigemischt (sog. Additiv). Frühere Vorstellungen, Methanol als eigenständigen Treibstoff einzusetzen, sind nicht weiterverfolgt worden.	Abgeleitet aus Erdgas und Kohle, kein eigenes Bild
ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether)	ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether) wird aus Ethanol und Isobutylen hergestellt. Es wird herkömmlichem Benzin beigemischt. Ethanol und ETBE haben beide den Vorteil einer hohen Oktanzahl. ETBE hat in den letzten Jahren mehr und mehr MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether) als Benzin-Additiv verdrängt, das vergleichbare Stoffeigenschaften hat, jedoch aus Erdgas und Isobutylen hergestellt wird.	Abgeleitet aus Erdgas und Kohle, kein eigenes Bild
Erdgas/Methan	Methan ist der Hauptbestandteil von als Treibstoff eingesetztem Erdgas und der aus Biomasse über Vergärung (Biogas) oder Vergasung und Methanisierung (synthetic natural gas, SNG) produzierten Gase. Aufgrund der geringen Verunreinigungen verbrennt es verhältnismässig sauber. Es wird in komprimierter Form als CNG Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas) verwendet.	Mässige Bedeutung (vgl. unten); in den Zukunftsbildern sind Gasantriebe jeweils im Total der Benzinantriebe enthalten (Gasmotoren sind leicht adaptierte Benzinmotoren)
Flüssiggas	Flüssiggas besteht meist überwiegend aus Propan und Butan und ist ein Nebenprodukt der Erdölraffination. Unter Druck verflüssigt wird das Gas in Verbrennungsmotoren eingesetzt. Dazu bedarf es einer Umrüstung des Tank- und Treibstoffleitungssystems. Während Flüssiggas als Treibstoff z.B. in den Niederlanden und Italien verbreitet ist (aufgrund steuerlicher Förderung), wird für die Schweiz nicht von einer grösseren Verbreitung ausgegangen.	Abgeleitet aus Erdgas und Kohle, kein eigenes Bild
<b>Legende</b>		
	Mässige Bedeutung, wird als Beimischung/Anteil von fossilen Treibstoffen berücksichtigt	
	Geringe Bedeutung, wird nicht berücksichtigt in Zukunftsbildern	

Tabelle 7: Treibstoffe und ihr Potenzial für Zukunftsbilder 2050 (Fortsetzung nächste Seite)

Treibstoff	Charakterisierung	Bedeutung für Zukunftsbilder
gasförmiges DME	Das gasförmige DME wird üblicherweise direkt aus Synthesegas hergestellt und enthält noch geringe Mengen Methanol und Wasser. Als Quelle für das Synthesegas sind wie bei den synthetischen Treibstoffen BtL, GtL und CtL insbesondere Biomasse, Erdgas und Kohle geeignet. Dimethylether hat ähnliche Stoffeigenschaften wie Flüssiggas und gute Brenneigenschaften. Es kann nach Umrüstung mit neuem Tank und Treibstoffleitungssystem in Dieselmotoren eingesetzt werden. Derzeit ist DME als Treibstoff noch kaum verbreitet.	Abgeleitet aus Erdgas und Kohle, nicht separat betrachtet
Wasserstoff	Wasserstoff kann elektrolytisch aus Wasser, sowie thermochemisch oder durch chemische Reformierung aus Biomasse oder fossilen Quellen produziert werden. Es verbrennt schadstofffrei. Die CO <sub>2</sub> -Bilanz ist davon abhängig, wie die zur Produktion des Wasserstoffs benötigte Energie gewonnen wird. Wasserstoff kann in Brennstoffzellen eingesetzt werden. Der Einsatz in Verbrennungsmotoren wird durch die befragten Experten nicht als Option für die Zukunft gesehen. Die Herausforderungen bestehen bei der emissionsarmen Produktion, der Distribution und der Speicherung des Wasserstoffes.	Bedeutung in Zukunftsbild "Brennstoffzelle/H <sub>2</sub> " gross; Potenzial unklar, zu untersuchen aufgrund der Anstrengungen insbesondere der Automobilwirtschaft
Strom	Strom dient als Antrieb für Elektromotoren. Die eigentliche Fahrt ist schadstofffrei. Die CO <sub>2</sub> - und Umweltbilanz ist davon abhängig, wie die Elektrizität produziert wird. Die Herausforderungen bestehen bei der emissionsarmen Produktion, der Distribution (Übertragungsverluste) und der Speicherung (Batterien).	Bedeutung in Zukunftsbildern mit Plug-in-Hybriden und reinen Elektroautos gross
<b>Legende</b>		
	Grosse Bedeutung in Zukunftsbildern	
	Mässige Bedeutung, wird als Beimischung/Anteil von fossilen Treibstoffen berücksichtigt	
	Geringe Bedeutung, wird nicht berücksichtigt in Zukunftsbildern	

Tabelle 7: Treibstoffe und ihr Potenzial für Zukunftsbilder 2050

Zwei Energieformen werden wegen ihrer Bedeutung hervorgehoben:

### Erdgas

Erdgas wird in heutigen Verbrennungsmotoren eingesetzt. Via Erdgasreformierung kann auch Wasserstoff aus Erdgas hergestellt werden. Die zunehmende Verbreitung von Erdgas-Verbrennungsmotoren erfolgt heute auf niedrigem Niveau. Ein Potenzial besteht für Erdgas vor allem in einer Nach-Erdölzeit (oder bei sehr hohen Preisen). Zwar reichen die Erdgasvorräte gemäss den nachgewiesenen und abbaubaren Vorräten bei unverändertem Verbrauch länger als die Rohölvorräte. Der Erdgasverbrauch nimmt aber für stationäre Anwendungen stark zu, und es wäre voraussichtlich effizienter, stationäre Anwendungen (Feuerungen, Industrie, Stromerzeugung) von Öl auf Gas umzustellen als mobile Anwendungen. Für automobiler Anwendungen sind grundsätzlich flüssige Kohlenwasserstoffe vorteilhafter. Hier wird Erdgas vor allem als Option zur Verlängerung des Einsatzes von Verbrennungsmotoren mit fossilen Treibstoffen gesehen. In den Zukunftsbildern sind Gasantriebe deshalb im Total der Benzinantriebe enthalten (Gasmotoren sind adaptierte Benzinmotoren).

### Wasserstoffherstellung

Weil Wasserstoff für das Zukunftsbild FCV (Brennstoffzelle/Wasserstoff) eine grosse Rolle spielt, wird im Folgenden kurz auf mögliche Herstellungsarten von Wasserstoff eingegangen. Im Vergleich mit fossilen Treibstoffen und biogenen Treibstoffen muss Wasserstoff in relativ energieaufwändigen Verfahren hergestellt werden. Im Vordergrund stehen die folgenden Prozesse:

- Via Elektrolyse, d.h. mittels Elektrizität aus Wasser
- Durch Reformierung aus Erdgas
- Durch Vergasen aus Steinkohle
- Durch Vergasen aus Biomasse (z.B. Restholz oder Energiepflanzen)

Mittels Elektrolyse und Erdgasreformierung kann Wasserstoff sowohl in Kleinanlagen bei der Tankstelle (onsite, dezentral) wie auch zentral in Grossanlagen erstellt werden. Vergasen von Kohle oder Biomasse ist nur in zentralen Anlagen möglich. Wird der Wasserstoff zentral erstellt, so muss er für den Transport noch verflüssigt werden, was einen zusätzlichen Energieinput benötigt.

In einer umfassenden Studie für Deutschland zum Thema "Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050" (BMVBS, 2009) wird die Erdgasreformierung nur kurzfristig und in einer Übergangsphase als geeignete Herstellungsart beurteilt. Langfristig (Horizont 2050) steht gemäss dieser Studie – v.a. wegen der begrenzten Verfügbarkeit von Erdgas - die Herstellung aus Kohle mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS-Technologie) und die Elektrolyse mit Strom aus Windkraft im Vordergrund. Die H<sub>2</sub>-Herstellung aus Kohle ist aus Klimaschutzgründen nur sinnvoll, wenn CCS-Technologien wirklich ausgereift sind. Diesbezüglich bestehen derzeit aber noch grosse Unsicherheiten.

Im vorliegenden Bericht werden für das Zukunftsbild FCV die beiden Varianten Elektrolyse und Erdgasreformierung betrachtet.

### 3.3.3 Antriebe

Die oben beschriebenen Treibstoffe können in Fahrzeugen unterschiedlicher Grösse und mit unterschiedlichen Antriebstechnologien eingesetzt werden. Zur Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Potenziale der Antriebe werden drei Fahrzeugklassen unterschieden. In Klammern sind dabei beispielhaft Fahrzeuge genannt, die für diese Klassen entsprechend einer Studie zur Bereitstellung von Planungsgrundlagen für den Bund als repräsentativ unterstellt werden:<sup>42)</sup>

- „Kleinwagen“ (z.B. Smart Fortwo)
- „Kompaktklasse“ inklusive untere Mittelklasse (z.B. VW Golf)
- „Mittelklasse“ inkl. Oberklasse (z.B. BMW 5er): Der BMW5er entspricht einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse.

Ferner wurden die Kenndaten für ein Kleinstfahrzeug mit Elektroantrieb erhoben. Dieses Fahrzeug entspricht einem CityEL FactFour.

#### Verbrennungsmotor

Die technischen Entwicklungspotenziale hinsichtlich des spezifischen Verbrauchs bis 2035 werden auf Basis des Handbuchs für Emissionsfaktoren 3.1 ermittelt. Dabei werden Fahrzeuge mit dem Verbrauch der Schadstoffklasse Euro-6 als effizient angesehen, solche mit der Schadstoffklasse kleiner 6 als gering effizient bezeichnet. Dabei sind wir uns bewusst, dass die Euro-Abgasnormen nur für die regulierten Schadstoffe (Partikel, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe) Grenzwerte vorschreiben, nicht jedoch für den Energieverbrauch. Dem Handbuch Emissionsfaktoren 3.1 liegt aber ein Energieverbrauch-Absenkungspfad zugrunde. Nur deshalb, weil die Euro-6-Fahrzeuge zeitlich nach den Euro-5-Fahrzeugen in den Markt eintre-

---

42) So beispielsweise auch für die Ermittlung von Betriebskostensätzen von Fahrzeugen für Kosten-Nutzen-Analysen entsprechend VSS SN 641 820 ff (vgl. EBP (2007).

ten, wird angenommen, dass sie auch energieeffizienter sein werden. Aufgrund der Expertengespräche werden noch Potenziale für weitere Senkungen des Energieverbrauchs gesehen. Deshalb werden bei den Zukunftsbildern auch hocheffiziente Verbrennungsmotoren (ICI = internal combustion engine improved) betrachtet. Für die Ermittlung des technischen Entwicklungspotenzials werden drei Klassen unterschieden:

- Effizienz gering: entspricht einem um 10% höheren Verbrauch als "Effizienz mittel";
- Effizienz Mittel: entspricht dem Verbrauch der Schadstoffklasse Euro-6 gemäss dem Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1;
- Effizienz hoch: Berücksichtigt weitere Entwicklungspotenziale mit -10% im Vergleich zu "Effizienz mittel".

Der angesetzte Verbrauchsrange von plus und minus 10 Prozent auf den mittleren Effizienzwert zur besseren bzw. schlechteren Effizienzklasse entspricht der Spannweite aktueller Verbrauchswerte repräsentativer Modelle (DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH 2010). Die Möglichkeit zur Entwicklung hoch effizienter Fahrzeuge kann wie folgt begründet werden:

- Verbrauchsoptimierungen bringen nennenswerte Einsparpotenziale, da die Steigerungen weniger durch Optimierungsmassnahmen erreicht werden, sondern durch den Einsatz neuer Konzepte, die derzeit noch in Entwicklung sind bzw. zukünftig durch die Entwicklung neuer Werkstoffe umgesetzt werden können.
- Zukünftige Verbrauchsoptimierungen werden signifikant im Endverbrauch sichtbar und werden nicht durch neue elektrische Zusatzaggregate kompensiert.
- Sogenannte „konventionelle Hybridfahrzeuge“ (ohne Plug-In-Hybride) mit Gewinnung von Rekuperationsenergie, gezieltes Bordnetzmanagement mit Verbraucherabschaltung und Schnellladespeicher kommen zum Einsatz. Zusätzlich zum Verbrennungsmotor werden Energiespeicher wie Akkus und Kondensatoren eingesetzt.

Die folgenden Tabelle 8 und 9 zeigen die gemäss diesem Vorgehen ermittelten und den Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Treibstoffverbrauchsfaktoren. Diese stellen effektive Fahrverbräuche dar (und nicht Normverbräuche). Dabei wird der durchschnittliche Flottenverbrauch je Segment dargestellt. Im Anhang A7 sind die Verbrauchsfaktoren für die neuzugelassenen Fahrzeuge in den Jahren 2035 und 2050 ausgewiesen.

Für die Fortschreibung 2035 bis 2050 wird der spezifische Treibstoffverbrauch für die einzelnen Fahrzeugklassen und Treibstoffe anhand der mittleren jährlichen Absenkrate von 2012 - 2035 hochgerechnet. Die so ermittelten Werte ordnen wir der Kategorie "Effizienz mittel" zu.

	2035			2050		
	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch
Kleinwagen (<1.4l)	4.9	4.5	4.0	4.4	4.0	3.6
Kompaktklasse (1.4-2l)	6.1	5.5	5.0	5.2	4.8	4.3
Mittel- / Oberklasse (>2l)	7.7	7.0	6.3	6.6	6.0	5.4
Verbrauch in l/100km						

Tabelle 8: Entwicklung spezifischer Treibstoffverbrauch Benzin (Flottenverbrauch je Segment; Effektiver Fahrverbrauch)

	2035			2050		
	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch
Kleinwagen (<1.4l)	3.3	3.0	2.7	2.9	2.7	2.4
Kompaktklasse (1.4-2l)	4.9	4.4	4.0	4.3	3.9	3.5
Mittel-/Oberklasse (>2l)	5.8	5.3	4.8	5.1	4.6	4.1
verbrauch in l/100km						

Tabelle 9: Entwicklung spezifischer Treibstoffverbrauch Diesel (Flottenverbrauch je Segment Effektiver Fahrverbrauch)

Diese spezifischen Treibstoffverbräuche wurden auf einem Workshop als konservativ und wenig ambitiös eingestuft. Da die Verbräuche letztlich für die gesamte Fahrzeugflotte zugrunde gelegt werden, besteht die Herausforderung vor allem darin, eine entsprechende Marktdurchdringung zu realisieren. Dies zeigen die früheren Beispiele zu verbrauchsarmen Fahrzeugen (z.B. VW Lupo). Im Sinne des Vorsichtsprinzips bei solchen Betrachtungen haben wir hier deshalb bewusst konservative Annahmen getroffen.

Neben den technischen Kenndaten wurden für den Vergleich von Zukunftsbildern wirtschaftliche Kennzahlen erhoben. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 10 aufgeführt. Die Preise werden entsprechend den verkehrswirtschaftlichen Bewertungsverfahren des UVEK real konstant gehalten. Eine reale Senkung der Kosten für Neuwagen z.B. aufgrund neuer asiatischer oder indischer Anbieter haben wir ebenfalls im Sinne einer Betrachtung nach dem Vorsichtsprinzip nicht unterstellt. Die Angaben gelten somit für 2010, 2035 und 2050. Die Annahmen zu den Preisen für die Energieträger werden in Kapitel 5.4.1 dargestellt.

	[CHF]	Benzin			Diesel		
		Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse	Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse
Listenpreis		20'000	40'000	78'000	22'000	43'000	81'000
Nutzungsdauer	[a]	10	10	10	10	10	10

Quellen:

- Listenpreis: TCS (Nov. 2006): Durchschnittspreis aller Ausführungen der Modelle innerhalb einer Gruppe
- Eigene Preisanpassung 2005 gemäss Quelle auf 2006 (2%/a) und Rundung
- Nutzungsdauer: TCS (2006)

Tabelle 10: Wirtschaftliche Kennzahlen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor 2010, 2035 und 2050 (Preisstand 2010, real konstante Preise)

**Verbrennungsmotor für gasförmige Treibstoffe**

Der Einsatz von Erdgasmotoren - und als Weiterentwicklung der Erdgashybrid - stellt eine Möglichkeit dar, CO<sub>2</sub>-Emissionen auf einfache, effiziente Weise zu verringern (Bach 2010). Namhafte Marktanteile erreichen die gasförmigen Treibstoffe nur, wenn sie steuerlich begünstigt werden oder eine massive Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Emissionen-Grenzwerte erfolgt. Dann können Erdgasfahrzeuge eine sofort umsetzbare Lösung zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei Mittelklasse- und Gewerbefahrzeugen darstellen (Bach 2010). Andere Experten kamen in den Interviews zum Schluss, dass Benzin und Diesel nicht durch gasförmige Kohlenwasserstoffe abgelöst werden. Ferner spielen sie auch keine bedeutende Rolle in den Planungsgrundlagen des Bundes: In dem Handbuch für Emissionsfaktoren haben Erdgasfahrzeuge einen sehr geringen Marktanteil im Jahr 2030. Hier wird Erdgas vor allem als Option zur Verlängerung des Einsatzes von Verbrennungsmotoren mit fossilen Treibstoffen gesehen. In den Zukunftsbildern sind Gasantriebe deshalb im Total der Benzinantriebe enthalten (Gasmotoren sind adaptierte Benzinmotoren).

### Hybrid mit Verbrennungs- und Elektromotor

Hybridfahrzeuge kombinieren Verbrennungs- und Elektromotor. Dabei sind „konventionelle Hybridfahrzeuge“ und „Plug-In-Hybridfahrzeuge“ zu unterscheiden. Die konventionellen Hybride (wie die bisherigen Modelle des Prius) werden als eine mögliche Form der Erhöhung der Effizienz der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gesehen und dort berücksichtigt.

Unter der Bezeichnung Plug-In-Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge mit einer Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor, einer Komponente zur Speicherung elektrischer Energie und der Möglichkeit zur Zuführung elektrischer Energie von aussen über eine Schnittstelle (Plug-In) zusammengefasst (z.B. Opel Ampera, neues Prius-Modell). Plug-In-Hybridfahrzeuge werden momentan nur in sehr geringen Mengen produziert. Dieses System wird sich in Kombination mit Batterien zur Verlängerung der Fahrtweiten durchsetzen. In den entsprechenden Zukunftsbildern werden diese Fahrzeuge separat in der Kategorie *Hybridfahrzeuge* ausgewiesen. Im Mittelklasse- und Kompaktsegment sind dies ausschliesslich serielle Hybride, d.h. die Dieselmotoren kommen als Range Extender zum Einsatz (vgl. Anhang A4).

Range Extender geben ihre Energie nicht direkt an den Antriebsstrang weiter, sondern erzeugen über einen zwischengeschalteten Generator Strom (serieller Hybrid). Ihren optimalen Wirkungsgrad erreichen sie in einem sehr engen Drehzahlbereich bei gleichbleibend hohem Belastungsmoment. Diesellaggregate liefern bereits bei geringen Drehzahlen ein hohes Moment und halten dieses ggf. über einen weiten Drehzahlbereich. Des Weiteren besitzt Diesel als Energieträger einen höheren Energiegehalt als Benzin. Insofern ist der Einsatz von Range Extendern auf Dieselmotorbasis, auf Grund der höheren Energieausbeute und des günstigeren technischen Betriebsbereiches (Selbstzünder etc.), flächendeckend wahrscheinlich. Das Prinzip ist von Schiffsantrieben hinreichend bekannt und ausgereift.

Die technischen und wirtschaftlichen Potenziale sind wie folgt abgeschätzt: Ein Hybridauto ist im Vergleich zu einem Benzin- bzw. Dieselfahrzeug teurer (sowohl konventionelle als auch Plug-In-Hybride). Neben einem Verbrennungsmotor werden zusätzlich ein Elektromotor und eine leistungsstarke Batterie eingebaut, was zu höheren Kosten führt. Es ist davon auszugehen, dass die Plug-In-Hybride auch nach deutlicher Kostenreduktion ca. 4000 Franken teurer als Dieselfahrzeuge sind.<sup>43)</sup>

Die Nutzungsdauer des Fahrzeuges wurde unabhängig vom Antriebssystem auf zehn Jahre angesetzt. Die folgende Tabelle zeigt die technischen und wirtschaftlichen Annahmen zu den Fahrzeugen (Preise real).

Annahmen für Verbrauchswerte bei Plug-In-Hybridfahrzeugen gehen davon aus, dass ein Teil der Energie über die Steckdose nachgetankt wird. Dies gilt insbesondere für kürzere Strecken. Der Verbrennungsmotor bzw. Range Extender wird nur gelegentlich, z.B. bei längeren Wochenendfahrten genutzt. Der spezifische Verbrauch der Plug-In-Hybridfahrzeuge entspricht demjenigen von reinen Elektrofahrzeugen, wenn sie nur mit Strom betrieben werden. Der spezifische Dieserverbrauch wird unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades zur Umwandlung in Strom berechnet. Die Verbrauchswerte sind ebenfalls in der folgenden Tabelle 11 dargestellt, die Annahmen zur Aufteilung zwischen Strom und Diesel bei der Beschreibung der Zukunftsbilder in Kapitel 4.

---

43) Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010), S. 56.

		Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse
Listenpreis	[CHF]	26'000	48'000	85'000
Batteriekapazität	[kWh]	4	15	19
Nutzungsdauer	[a]	10	10	10
	[kWh/100km]	10.0	15.0	19.4
Verbrauch	[l/100km]	2.3	3.4	4.4

Quellen:

- Listenpreis: Preis für Dieselfahrzeuge plus 4000 CHF entsprechend Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010); Plausibilisiert durch Extrapolation von Grundlage von Kiley (2008)
- Batteriekapazität: Eigene Annahme auf Basis von Kiley (2008)
- Nutzungsdauer: In Anlehnung an TCS (2006)
- Verbrauch: Basierend auf Verbrauch Elektromotor und Wirkungsgrad von 45% bei der Umwandlung von Diesel zu Strom (vgl. Berechnungen im Anhang A4)

Tabelle 11: Parameter für Plug-In-Hybride 2035 und 2050

### Elektromotor und Batterie

Das Feld der Elektrofahrzeuge ist momentan stark in Bewegung. Hier werden grosse Spannweiten bei den technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeiten diskutiert und angekündigt. Annahmen zu den Preisen der Fahrzeuge haben wir auf Basis von Kenndaten für Fahrzeuge für die Pilotregion Goms ermittelt. Aufgrund der Batterien sind diese Fahrzeuge teurer als heutige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dieser Befund ist auch einer aktuellen Untersuchung zu entnehmen, welche nachfolgend verwendet wird.<sup>44)</sup>

		Kleinstwagen	Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse
Listenpreis	[CHF]	14'300	25'000	46'000	87'000
Reichweite	2035 [km]	100	150	-	-
	2050 [km]	120	200	400	400
Batteriekapazität	2035 [kWh]	5	15	-	-
	2050 [kWh]	6	20	60	78
Nutzungsdauer	[a]	10	10	10	10
Verbrauch	[kWh/100km]	5.0	10.0	15.0	19.4

Quellen:

- Listenpreis Kleinstwagen: <http://www.smiles-world.de/cityel-preise>, 22.06.2010
- Listenpreise Kleinwagen, Kompaktklasse: Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010), S. 91 und S. 93. Verwendung Mittelwert ohne Ladestation. Umrechnung in Franken unter Berücksichtigung der generell höheren Preise in der Schweiz (30%) und eines Wechselkurses von 1 EUR zu 1,35 CHF. Mittelklasse eigene Hochrechnung: Preis Dieselfahrzeug Mittelklasse \* Kompaktklasse BEV / Kompaktklasse Diesel.
- Reichweite wurde in Anlehnung an die Expertengespräche festgelegt.
- Batteriekapazität: Wurde über die Reichweite errechnet.
- Nutzungsdauer: In Anlehnung an TCS 2006, AutoInfo TCS (CD)
- Verbrauch: Eigene Annahmen auf Basis effektiv gemessener Verbrauchswerte publiziert in EIWeb: Das Informationsnetzwerk für Elektrofahrzeugfahrer [http://www.elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=verbrauchswerte\\_von\\_elektrofahrzeugen](http://www.elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=verbrauchswerte_von_elektrofahrzeugen), 22.06.2010
- Unterschiede zwischen Herstellerangaben und Realbetrieb: <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/smart-fortwo-electric-drive-unterwegs-im-elektroauto-erstling-1781859.html>
- Fiat 500 E: <http://adacemobility.wordpress.com/2010/08/27/adac-testtabelle-karabag-500-e/http://www.dreifels.ch/page.asp?DH=28>
- Mitsubishi iMiEV: <http://www.motorvision.de/artikel/das-passende-haus-zum-elektroauto-mitsubishi-i-miev-und-weber-haus-kooperieren,2002.html>
- Tesla Roadster S: <http://www.teslamotors.com/roadster/technology>
- Twike: <http://www.dreifels.ch/page.asp?DH=28>

Tabelle 12: Parameter für Elektrofahrzeuge 2035 bzw. 2050

An einem Workshop wurden vor allem die spezifischen Verbräuche als optimistisch eingestuft. Die in Tabelle 12 angesetzten Verbrauchswerte in kWh pro 100 Kilometer beruhen auf effektiven, durch Verbraucher gemessenen Verbrauchswerten. Diese sind in der angegebenen Quelle dokumentiert. Hier wurden Mittelwerte von entsprechenden Fahrzeugtypen einer Klasse

44) Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010).

verwendet. Diese Werte berücksichtigen somit – wie die Verbräuche der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor – effektive Fahrverbräuche. Weitergehende Verbrauchssenkungen haben wir aus Gründen der Vorsicht nicht unterstellt. Entgegen den Aussagen am Workshop sind damit die Verbräuche eher als pessimistisch einzustufen.

Die Expertengespräche weisen darauf hin, dass reine Elektrofahrzeuge vornehmlich im Bereich der Kurzstrecken- und Cityfahrten bis 150 Kilometer zu finden sein werden, d.h. reine Elektrofahrzeuge werden hauptsächlich im Kleinwagensegment zu finden sein. Technisch wird aber auch die Möglichkeit zu Fahrten über 150 km möglich werden. Für Reichweiten im klassischen Bereich zwischen 400 bis 800 Kilometer werden sich in der Kompakt- und Mittelklasse Plug-In-Hybridfahrzeuge etablieren.

### Elektromotor und Brennstoffzelle

Im Zukunftsbild FCV wird angenommen, dass die Brennstoffzellentechnik in ihrer Entwicklung ausgereift ist (Tabelle 13). Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass sich die Kosten von derzeit 280'000 CHF für einen BMW 5er bis 2035 bei ca. 20% über denen eines vergleichbaren Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor bewegen werden. Hier werden die Preise entsprechend einer aktuellen Studie für das Jahr 2035 zugrunde gelegt.<sup>45)</sup> Der Verbrauch von Brennstoffzellenautos richtet sich nach den Angaben des TCS (2009).

		Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse
Listenpreis	[CHF]	24'000	50'000	95'000
Nutzungsdauer	[a]	10	10	10
Verbrauch	[kg/100km]	0.5	0.6	0.8

#### Quellen:

- Listenpreis: Listenpreise Kleinwagen, Kompaktklasse: Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010), S. 91 und S. 93. Umrechnung in Franken unter Berücksichtigung der generell höheren Preise in der Schweiz (30%) und eines Wechselkurses von 1 EUR zu 1,35 CHF. Mittelklasse eigene Hochrechnung: Preis Dieselfahrzeug Mittelklasse \* Kompaktklasse FCV / Kompaktklasse Diesel. Eigene Annahmen auf der Basis der Expertenbefragungen.
- Nutzungsdauer: In Anlehnung an TCS 2006, AutoInfo TCS (CD)
- Verbrauch: In Anlehnung an TCS (2009)

Tabelle 13: Parameter für Brennstoffzellenfahrzeuge im Jahr 2035/2050

45) Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010)



## 4 Die Zukunftsbilder

Wichtige Grundlagen für die Zukunftsbilder, die Verkehrs- und Energieperspektiven des Bundes, werden einleitend beschrieben. Die prognostizierten Fahrleistungen gemäss Verkehrsperspektiven bestimmen die Bildgrösse. Die Einordnung der Zukunftsbilder in diese Bildgrösse und die Verbindung zwischen Bildhintergrund und -vordergrund wird anschliessend in einem Überblick dargestellt. Weiter werden die einzelnen Zukunftsbilder zunächst anhand von Fahrzeugklassen, Flottenstruktur und Treibstoffmix charakterisiert und Folgerungen bezüglich Verkehrsnachfrage, wirtschaftlicher Aspekte und Infrastruktur diskutiert. Schliesslich wird der Energiebedarf für den MIV in den einzelnen Zukunftsbildern analysiert.

### 4.1 Verkehrs- und Energieperspektiven des Bundes

#### 4.1.1 Verkehrsperspektiven und Fahrleistungen

Als Grundlage für diese Forschungsarbeit werden die Verkehrsperspektiven des Bundes berücksichtigt.<sup>46)</sup> Sowohl bei den Bevölkerungszahlen als auch beim Motorisierungsgrad wird von einem Wachstum ausgegangen. Gemäss aktuelleren Prognosen des Bundesamtes für Statistik ist bis 2030 mit einer noch höheren Einwohnerzahl zu rechnen. Die gemäss Verkehrsperspektiven ausgewiesenen Fahrleistungen dürften deshalb noch unterschätzt werden. Für die Zukunftsbilder wurden deshalb die Annahmen gemäss der Perspektive „Städtenetz und Wachstum“ oder gemäss „Regionaler Ausgleich und Ressourcenknappheit“ verwendet. Die in der folgenden Tabelle 14 dargestellten Verkehrs- und Fahrleistungen der Perspektiven Personenverkehr bilden eine wichtige Grundlage für die Zukunftsbilder.

	Verkehrsleistung [Mrd. Personenkilometer/a]			Besetzungsgrad [Personen/PW]			Fahrleistungen [Mrd Fzkm/a]		
	Analyse	Städtenetz und Wachstum	Ressourcen- knappheit	Analyse	Städtenetz und Wachstum	Ressourcen- knappheit	Analyse	Städtenetz und Wachstum	Ressourcen- knappheit
Fahrtzweck	2000	2030	2030	2002	2030	2030	2002	2030	2030
Pendler	17.96	18.51	14.64	1.14	1.11	1.12	15.8	16.7	13.1
Ausbildung									
Nutzverkehr	6.26	9	6.83	1.29	1.23	1.24	4.8	7.4	5.5
Einkauf	9.91	10.39	9.19	1.71	1.53	1.56	5.8	6.8	5.9
Tourismus	12.02	15.23	11.51	2.38	2.23	2.24	5.1	6.9	5.1
Freizeit	40.76	50.06	47.65	2.01	1.89	1.91	20.2	26.6	25.0
Summe ohne Ausbildung	86.91	103.19	89.82				51.7	64.3	54.7

*Tabelle 14: Verkehrs- und Fahrleistungen im motorisierten Individualverkehr nach Fahrtzwecken für die hier zu betrachtenden Perspektiven (Bundesamt für Raumentwicklung 2006)*

Für die Jahre 2035 und 2050 haben wir die Fahrleistungen mittels linearer Extrapolation ermittelt. Im Jahr 2035 resultieren die folgenden Fahrleistungen:

- Städtensetz und Wachstum: 67.8 Mrd. Fzkm je Jahr
- Ressourcenknappheit: 56.5 Mrd. Fzkm je Jahr

Die Fahrleistungen im Jahr 2050 lauten:

- Städtensetz und Wachstum: 72.7 Mrd. Fzkm je Jahr
- Ressourcenknappheit: 56.6 Mrd. Fzkm je Jahr

46) Vgl. Bundesamt für Raumentwicklung (2006): Perspektiven des schweizerischen Personenverkehrs bis 2030, Bern

Die Angaben für den motorisierten Individualverkehr beziehen sich dabei immer auf Personewagen, Motorräder und Cars. Im Folgenden wird vereinfacht davon ausgegangen, dass alle Fahr- und Verkehrsleistungen im motorisierten Individualverkehr mit dem Personewagen erbracht werden. Motorräder und Cars machen nur einen geringen Anteil aus<sup>47)</sup> und werden in den Perspektiven nicht separat ausgewiesen.

Bezüglich der Verkehrsnachfrage bestehen also eine grosse Bildgrösse (Wachstum) und eine kleinere, bei dem sich die Fahrleistungen gegenüber heute nur geringfügig verändern (Ressourcenknappheit). Bei der Beschreibung der Zukunftsbilder werden diese Fahrleistungen mit den Mobilitätswelten kombiniert, und es wird aufgezeigt, mit welchen Antrieben und Treibstoffen die Fahrten zurückgelegt werden.

### 4.1.2 Energieperspektiven

Die Energieperspektiven des Bundesamts für Energie (BFE 2007a, BFE 2007b) entwerfen für die Schweiz für das Jahr 2035 mögliche Zukünfte der Energieproduktion, -versorgung und -nachfrage. Es werden je zwei massnahmenorientierte und zwei zielorientierte Szenarien formuliert. Im ersten Fall (Szenario I und II) werden Massnahmen für die Ziele Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit festgelegt. Daraus werden der Zielerreichungsgrad sowie die Auswirkungen auf die volkswirtschaftlichen Kosten sowie auf Einkommens- und Vermögensverteilung abgeleitet. Im zweiten Fall (Szenario III und IV) werden Zielgrössen quantitativ festgelegt und mögliche Massnahmen iterativ verschärft, bis die Zielgrössen erreicht werden. Berechnet wird im Bottom-up-Ansatz der Energieverbrauch je Sektor (Verkehr, Industrie, Haushalte usw.). Modellrechnungen lassen auch auf die volkswirtschaftlichen Kosten sowie deren Auswirkungen auf die Einkommens- und Vermögensverteilung schliessen. Zu diesem Zweck werden verschiedene Modelltypen eingesetzt (Bottom-up- Modelle, Gleichgewichtsmodelle).

Die folgenden vier Szenarien werden betrachtet:

- Das Business-as-Usual-"Szenario I",
- das über eine "verstärkte Zusammenarbeit" zwischen Staat und Wirtschaft gekennzeichnete "Szenario II",
- das mit "Neue Prioritäten" überschriebene Szenario III, sowie
- das als "Weg hin zur 2000W-Gesellschaft" benannte Szenario IV.

Die angewendete Szenarienmethode stellt mit quantitativen Modellen sicher, dass die vielen Elemente, welche die Energiezukunft bestimmen, miteinander verknüpft sind. Rückwirkungen, wie jene der Energiepreise auf Energieangebot und -nachfrage, werden berücksichtigt. Die Ergebnisse sind keine Prognosen, sondern Wenn-Dann-Analysen.

Mit den Szenarien wird ein Teil der „Wirklichkeit“ abgebildet. Im Vordergrund steht die Frage, wie sich Energiepreise, Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum (Rahmenentwicklungen) sowie Vorschriften, preisliche Instrumente und Förderinstrumente (Politikinstrumente) auf das Energiesystem auswirken. Rahmenentwicklungen können allerdings anders als erwartet verlaufen, die Wirkung der Politikinstrumente ist unsicher. Szenarien kann man nicht wählen; entscheiden kann man sich jedoch für Politikinstrumente und entsprechende Rechtsgrundlagen.

In den Energieperspektiven wurden keine Katastrophen-Szenarien oder technische Revolutionen betrachtet. Ausgegangen wird von langfristigen Trenderwartungen. In Ergänzung zum Fächer, welcher durch die vier Szenarien aufgespannt wird, zeigen Sensitivitätsrechnungen, wie das Energiesystem auf ein höheres Wirtschaftswachstum, auf konstant hohe Energiepreise oder auf die Klimaerwärmung reagiert und welche Folgen Hitze- und Kältewellen für die Stromversorgung haben.

---

47) Der Anteil beträgt seit 1990 sehr konstant ca. 4,5% (vgl. BFS (November 2009))

Der Bezug zu den Energieszenarien wird bei der Beschreibung der einzelnen Zukunftsbilder hergestellt. Die Energienachfrage im Verkehr ergibt sich aus den verwendeten Treibstoffen und Antrieben. Sie ist also ein Ergebnis der gezeichneten Zukunftsbilder. Dabei ist offen, ob die Energienachfrage steigt oder sinkt.

## 4.2 Übersicht zu den Zukunftsbildern

Für die Bildung der Zukunftsbilder stehen somit die folgenden Elemente zur Verfügung (vgl. folgende Abbildung 13):

- Vier Mobilitätswelten (Hintergrund)
- Vier Antriebskonzepte und fünf Treibstoffarten (Vordergrund)
  - Antriebe: Verbrennungsmotor, Plug-In Hybride, Elektroantrieb mit Batterie, Elektroantrieb mit Brennstoffzelle
  - Treibstoffe: Benzin, Diesel, Strom, Wasserstoff, biogene Treibstoffe
- Zwei Bildgrößen (Fahrleistungen gemäss Verkehrsperspektiven).

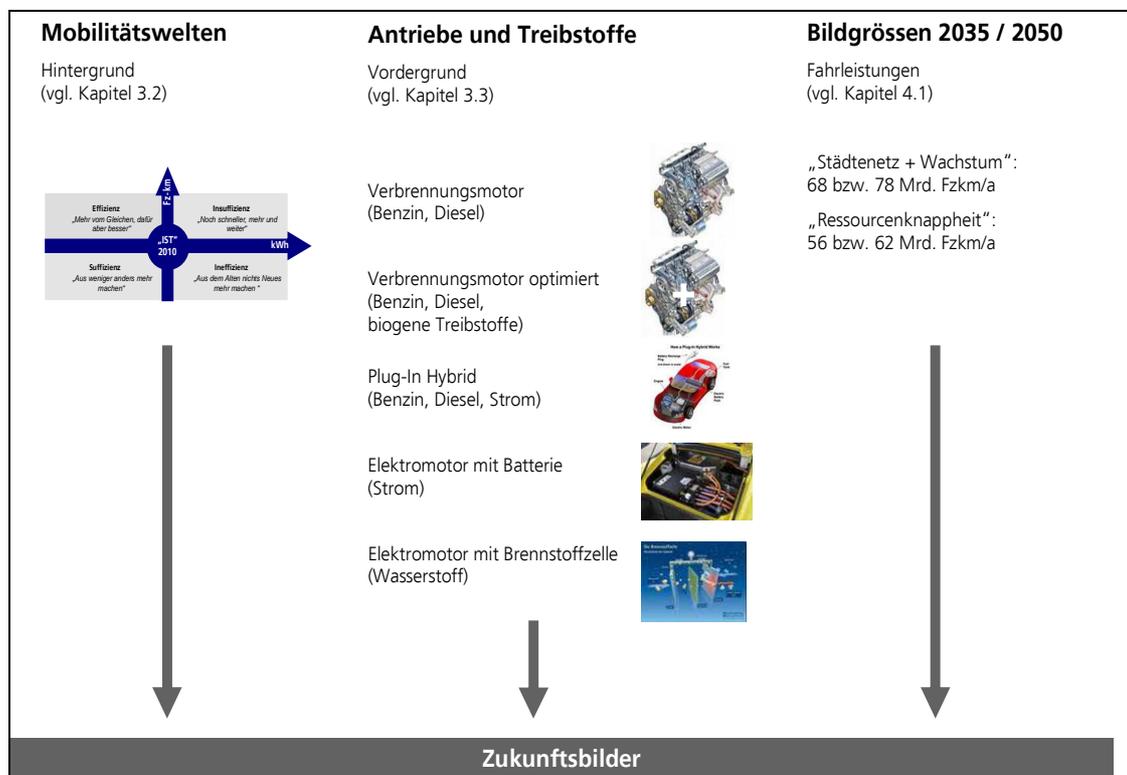


Abbildung 13: Elemente der Zukunftsbilder

Der Energiebedarf wird in weiterer Folge je Zukunftsbild berechnet, weshalb die Szenarien der Energieperspektiven nicht als Eingangsgröße berücksichtigt werden.

Die verschiedenen Elemente werden nun zu Zukunftsbildern entsprechend der Abbildung 13 zusammengefügt. Dabei werden diese Bilder hier normativ, polarisierend erstellt. Sie sind im Vordergrund durch die Anteile von Fahrzeugtypen und Treibstoffen charakterisiert, die in den folgenden Kapiteln jeweils für die beiden Zeitpunkte 2035 und 2050 dargestellt werden. Der Kombination der Elemente der Zukunftsbilder liegen die folgenden Überlegungen zugrunde:

- Die Verkehrsperspektive „Städtenetz und Wachstum“ kann mit den Mobilitätswelten Effizienz (bei sinkender Energienachfrage) und Insuffizienz (steigende Energienachfrage) kombiniert werden.

- Die Verkehrsperspektive „Ressourcenknappheit“ geht von einer annähernd gleichen Fahrleistung im MIV wie heute aus. Diese Perspektive wird hier der Mobilitätswelt der Suffizienz zugeordnet. Eine konstante Gesamtfahrleistung bei steigender Bevölkerung bedeutet, dass die Fahrleistung pro Person sinkt. Die Mobilitätswelt der „Ineffizienz“ ist vor dem Hintergrund der Verkehrsperspektiven nicht denkbar. Sie wird hier nicht weiter verwendet.

Die Bildgrösse *Städtenetz und Wachstum* wird hinsichtlich seiner Umsetzung mit unterschiedlichen Vordergründen gezeichnet:

- Das "BAU" Bild soll jene Art von Prognosen aufnehmen, welche z.B. der World Energy Outlook der OECD und die BFE-Energieperspektiven (Szenarien I und II) verwenden. Darin wird von einer weiteren Effizienzsteigerung ausgegangen. Es dient als Referenzbild, womit in weiterer Folge die anderen Zukunftsbilder verglichen werden.
- Bei den Zukunftsbildern "Verbesserter Verbrennungsmotor (ICI)", "Elektromobilität (BEV)" und "Brennstoffzelle (FCV)" steht jeweils eine Technologie im Zentrum, mit der die prognostizierte Verkehrsnachfrage befriedigt werden soll:
  - Bei ICI wird von einer deutlichen Effizienzsteigerung bei den Verbrennungsmotoren ausgegangen. Im Vergleich zum BAU, muss der Energiebedarf bei den gleichen Fahrleistungen sinken. Dieses Zukunftsbild ist somit vor dem Hintergrund der Mobilitätswelt "Effizienz" zu betrachten.
  - BEV: Elektromotoren weisen gegenüber Verbrennungsmotoren eine höhere Effizienz auf. Fraglich ist hier aber auch, ob insgesamt der Primärenergieverbrauch steigt oder sinkt. Dieses Zukunftsbild ist somit vor dem Hintergrund der Mobilitätswelten "Effizienz" oder „Insuffizienz“ zu betrachten. Aufgrund der geringen Fahrweiten der Fahrzeuge können diese Antriebe aber auch in einer Suffizienz-Welt genügen.
  - FCV: Die steigende Anzahl Fahrzeugkilometer wird hier mit Wasserstoff zurückgelegt. In Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs für die Herstellung des Wasserstoffes ist dieses Zukunftsbild ebenfalls vor dem Hintergrund der Mobilitätswelten "Effizienz" oder „Insuffizienz" zu betrachten.

Das Bild *Ressourcenknappheit* versucht bewusst eine Alternative zum Verkehrswachstum zu zeichnen, wobei auch hier die Bildgrösse gemäss Verkehrsperspektiven beibehalten wird und eine gegenüber heute annähernd konstante Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr zugrunde gelegt wird. Aufgrund der Vorgaben konstanter Fahrleistungen wie heute ist das Zukunftsbild „Human Power and Public Transport“, auch tendenziell eher der Mobilitätswelt Effizienz zuzuordnen. Da bei steigenden Bevölkerungszahlen die Fahrleistungen je Person aber sinken, ist das Zukunftsbild der Suffizienz zugeordnet.

## 4.3 Business-As-Usual (BAU)

### 4.3.1 Hintergrund und Fahrleistung

Für das BAU Bild wird die Verkehrsnachfrage entsprechend „Städtenetz und Wachstum“ hinterlegt. Daraus resultieren Fahrleistungen von jährlich 67.8 Mrd. (2035) bzw. 72.7 Mrd. (2050) Fahrzeugkilometern. Das BAU Bild beruht auf dem Hintergrund „Effizienz“ oder „Insuffizienz“. Hier sind auch in Zukunft Effizienzsteigerungen der Motoren und damit eine Senkung des spezifischen Treibstoffverbrauchs zu erwarten. Ob diese reichen, um bei wachsender Fahrleistung den Energiebedarf je Jahr zu reduzieren, wird in Kapitel 4.8 erläutert.

### 4.3.2 Fahrzeugklassen und Flottenstruktur

Das BAU-Zukunftsbild orientiert sich in der Verteilung der Fahrzeugklassen und der Verbrauchswerte an den Daten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Bundesamtes für

Umwelt (HBEFA 3.1) für das Jahr 2035. Bis 2050 erfolgt die Fortschreibung entsprechend der von 2010 bis 2035 angenommenen Entwicklung. Es werden weiter existierende Antriebstechnologien auf Basis von fossilen Primärenergieträgern mit gering effizienten und mittel effizienten Fahrzeugen eingesetzt. Bei diesem Vorgehen wird von folgenden Rahmenbedingungen ausgegangen:

- Die Einsparpotenziale nehmen im Vergleich zu bisher realisierten Einsparungen ab, da die Motorenoptimierung bereits weit fortgeschritten ist.
- Ein Teil der Einsparungen durch optimierte Verbrennungsmotoren wird durch neue elektrische Verbraucher kompensiert (Klima, ESP, Fensterheber, Entertainment...).
- Es kommen keine energieintensiven zusätzlichen Verbraucher im Fahrzeug hinzu. Nur ein Teil der zukünftigen Verbrauchsoptimierungen wird moderat im Endverbrauch sichtbar.

Die spezifischen Verbrauchsfaktoren sind in Kapitel 3.3.3 ausgewiesen.

Der Anteil der einzelnen Fahrzeugkategorien an den Fahrleistungen entspricht für das Jahr 2035 den Annahmen in HBEFA3.1. Bis 2050 unterstellen wir eine leichte Verschiebung der Fahrleistungen von Mittelklasse- zu Kompaktfahrzeugen. Bei den effizienten Mittelklassefahrzeugen gibt es zudem eine Verschiebung aus dem Benzin- in den Dieselmotorbereich. Ausschlaggebend dafür sind weiterhin verbesserte Verbrauchswerte der Dieselfahrzeuge ohne die bisherigen Komforteinschränkungen hinsichtlich Laufruhe.

Des Weiteren erhöht sich der Anteil von ineffizienten Fahrzeugen von 2035 bis 2050 geringfügig. Dies ist auf eine höhere Fahrzeuglebensdauer zurückzuführen.

### Zukunftsbild: BAU 2035

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor</b>		<b>100%</b>				
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	15.7%	79%	21%	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	0.3%	86%	14%	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	48%	55%	45%	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	1%	60%	40%	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	34%	37%	63%	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	1%	47%	53%	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Batterie</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

*Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas*

Tabelle 15: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild BAU 2035

**Zukunftsbild: BAU 2050**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene Treibstoffe	Wasser -stoff	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel			
<b>Verbrennungsmotor</b>	<b>100%</b>					
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	15.7%	79%	21%	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	0.3%	86%	14%	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	64%	55%	45%	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	1%	55%	45%	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	18%	27%	73%	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	1%	47%	53%	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Batterie</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 16: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild BAU 2050

### 4.3.3 Infrastruktur Treibstoffversorgung

Es werden bestehende Tankstellen weitergenutzt. Es besteht lediglich Ersatzinvestitionsbedarf für die Aufrechterhaltung des bestehenden Versorgungsnetzes.

## 4.4 Verbessertes Verbrennungsmotor (ICI)

### 4.4.1 Hintergrund und Fahrleistung

Für das Bild ICI (Internal Combustion Engine Improved) mit optimierten Verbrennungsmotoren wird die Verkehrsnachfrage entsprechend „Städtenetz und Wachstum“ hinterlegt. Dies entspricht Fahrleistungen von jährlich 67.8 Mrd. (2035) bzw. 72.7 Mrd. (2050) Fahrzeugkilometern. Das Bild beruht auf dem Hintergrund „Effizienz“. Es sind Effizienzsteigerungen der Motoren und damit eine Senkung des spezifischen Treibstoffverbrauchs zu erwarten (z.B. über weitere Hybridisierung ohne Plug-In). Im Vergleich zum BAU-Szenario wird jedoch ein weiterer „Technologieschub“ bei den Verbrennungsmotoren in Gang gesetzt.

Ob diese Verbesserungen reichen, um den Gesamtenergiebedarf für den Individualverkehr trotz wachsender Fahrleistung zu reduzieren, wird in Kapitel 4.8 diskutiert.

### 4.4.2 Fahrzeugklassen und Flottenstruktur

Im Zukunftsbild ICI wird mit einer verstärkten Reduktion des spezifischen Verbrauchs bei existierenden Antriebstechnologien auf Basis von fossilen Primärenergieträgern gerechnet. Des-

halb werden hier vermehrt hocheffiziente Fahrzeuge (vgl. Kapitel 3.3.3) eingesetzt. Durch den Ansatz der konstanten prozentualen Verbrauchsreduktion über den Betrachtungszeitraum, fallen die Verbesserungen zum Ende immer geringer aus. Dieses Verhalten deckt sich mit dem gängigen Verlauf technischer Entwicklungen, bei dem das messbare Ergebnis von Verbrauchsreduktionen zum Ende der Entwicklung immer kleiner wird. Ausserdem wird deutlich, dass das Einsparungspotenzial mit der Fahrzeugklasse steigt. D.h., die absolute Reduktion ist höher in den Klassen mit hohem Verbrauch.

Die Verteilung der *Fahrzeugklassen* für 2035 und 2050 im ICI-Zukunftsbild basiert auf dem Zukunftsbild BAU und damit auf dem Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1. Allerdings wird davon ausgegangen, dass im ICI-Zukunftsbild nur effiziente und hocheffiziente Fahrzeuge existieren, d.h. es findet eine Verschiebung von den effizienten zu den hocheffizienten und von den ineffizienten zu den effizienten Fahrzeugen statt.

Bei den *Treibstoffen* wird im Zukunftsbild ICI eine bedeutende Zunahme von biogenen Treibstoffen angenommen. Grundsätzlich sind biogene Treibstoffe in allen Zukunftsbildern denkbar. Bedeutende Anteile am Gesamtverbrauch sind jedoch nur in Verbindung mit Effizienzsteigerungen realistisch. In den Zukunftsbildern mit alternativen Antrieben werden keine biogenen Treibstoffe berücksichtigt, damit die verschiedenen Effekte nicht vermischt werden.

In den IEA-Szenarien betragen die Anteile für biogene Treibstoffe 4% bzw. 9% am Gesamtenergieverbrauch 2035 für den Verkehr. Die Potenziale in der Schweiz sind angesichts des geringen Anteils am Weltverbrauch praktisch unbeschränkt, d.h. über Importe könnte der ganze Treibstoffverbrauch in der Schweiz aus biogenen Ressourcen gedeckt werden (mit entsprechender Zahlungsbereitschaft und ohne strenge Auflagen bzgl. ökologischen und sozialen Aspekten). Mit den heutigen politischen Rahmenbedingungen und technischen Möglichkeiten zur Herstellung von biogenen Treibstoffen sind hohe Anteile von biogenen Treibstoffen kaum denkbar. Werden jedoch entsprechende Fortschritte bei den Biotreibstoffen der 2. Generation erreicht, sind Anteile von 5-9% des Treibstoffbedarfs im Jahr 2030 möglich (Zah et al. 2010).<sup>48)</sup>

Im ICI-Zukunftsbild gehen wir davon aus, dass der Anteil der biogenen Treibstoffe gemessen am Gesamtverbrauch bei 8% im Jahr 2035 (Tabelle 17) und bei 10% im Jahr 2050 (Tabelle 18) liegt. Bei den anderen Zukunftsbildern wird davon ausgegangen, dass die Bedeutung der biogenen Treibstoffe vernachlässigbar bleibt.

---

48) Unter der Annahme einer Effizienzsteigerung der Fahrzeugflotte auf 4 Liter / 100 km.

**Zukunftsbild: ICI 2035**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene Treibstoffe	Wasser -stoff	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel			
<b>Verbrennungsmotor 100%</b>						
Kleinwagen hocheffizient	16%	72%	20%	8%	x	x
Kleinwagen effizient	0.3%	79%	13%	8%	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	48%	51%	41%	8%	x	x
Kompaktklasse effizient	1%	55%	37%	8%	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	34%	34%	58%	8%	x	x
Mittelklasse effizient	0.7%	43%	49%	8%	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Batterie 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 17: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild ICI 2035

**Zukunftsbild: ICI 2050**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene Treibstoffe	Wasser -stoff	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel			
<b>Verbrennungsmotor 100%</b>						
Kleinwagen hocheffizient	16%	71%	19%	10%	x	x
Kleinwagen effizient	0.3%	77%	13%	10%	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	64%	50%	40%	10%	x	x
Kompaktklasse effizient	1%	50%	40%	10%	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	18%	24%	66%	10%	x	x
Mittelklasse effizient	0.7%	42%	48%	10%	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Batterie 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 18: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild ICI 2050

### 4.4.3 Infrastruktur Treibstoffversorgung

Im ICI Zukunftsbild kann die bestehende Tankstelleninfrastruktur weiterhin genutzt werden. Bei Beibehaltung heute üblicher Tankvolumina ist allenfalls sogar eine Ausdünnung des Versorgungsnetzes möglich. Der Finanzbedarf im Rahmen der Infrastruktur beschränkt sich auf Erhaltungs- und Betriebskosten.

Durch den Einsatz biogener Treibstoffe entsteht gegebenenfalls geringfügiger Anpassungsbedarf bei der Tankstellenausrüstung, um korrosiven Einflüssen vorzubeugen. Im Verteilernetz sind keine Änderungen erforderlich, da biogene Treibstoffe bereits als Beimischung ausgeliefert werden können.

## 4.5 Elektrofahrzeuge mit Batterien (BEV)

### 4.5.1 Hintergrund und Fahrleistung

Für das Bild „BEV“ (Battery Electric Vehicles) wird die Verkehrsnachfrage entsprechend „Städtenetz und Wachstum“ hinterlegt. Daraus resultieren Fahrleistungen von jährlich 67.8 Mrd. (2035) bzw. 72.7 Mrd. (2050) Fahrzeugkilometern. Das Bild beruht auf dem Hintergrund der Mobilitätswelt „Effizienz“ oder „Insuffizienz“, d.h. steigende Verkehrsnachfrage und technologische Entwicklungen zur Reduktion des Energieverbrauchs. Es wird aber davon ausgegangen, dass eine neue Technologie zum Durchbruch gelangt.

### 4.5.2 Fahrzeugklassen und Flottenstruktur

Im BEV-Zukunftsbild (Tabelle 19) ist die Grundannahme, dass im Bereich der Speicher- und Ladetechnik für reine Elektrofahrzeuge deutliche Weiterentwicklungen zur Serienreife erzielt werden. Dazu gehört auch, dass die Techniken preislich mit Verbrennungsantrieben konkurrieren können bzw. finanziell attraktiv sind und entsprechende Infrastrukturen alltagstauglich zur Verfügung stehen. Durch Schnellladekonzepte und Verfügbarkeit von Ladestationen sind die Hemmschwellen gegenüber der Elektromobilität abgebaut.

*Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren* sind bis 2035 auf dem Markt weiterhin vertreten, sowohl mit Diesel als auch mit Benzin als Energieträger. Die Verteilung auf Diesel und Benzin entspricht dem ineffizienter Fahrzeuge der jeweiligen Klasse des BAU Zukunftsbildes. Ab 2050 gibt es in diesem Bild keine Fahrzeuge mit reinen Verbrennungsmotoren mehr.

Das Vertriebsnetz für Dieselmotoren bleibt bestehen, da im Bereich Güterverkehr der Einsatz von Elektro- oder Hybridkonzepten nicht den Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit entspricht. Der spezifische Dieserverbrauch wird im Vergleich zum BAU halbiert. Die Annahmen zum spezifischen Stromverbrauch sind in Kapitel 3.3.3 dokumentiert.

Im Kompakt- und Mittelklassebereich werden vornehmlich Plug-In-Hybride, zur Kompensation der Reichweitenbeschränkung bei reinen Elektrofahrzeugen, als Antriebssystem eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich vornehmlich um serielle Hybride handelt, bei denen Diesel im Range Extender zu Strom umgewandelt wird (vgl. Anhang A4). Der hohe Stromanteil ergibt sich aus der Nutzung: Kompaktfahrzeug typischerweise als Familien- und Arbeitswegfahrzeug. D.h. man kommt in der Regel mit einer Stromladung hin und zurück und kann am Abend nachladen. Mittelklassefahrzeuge sind sehr stark in Flotten vertreten und werden für Mittel- und Langstrecke genutzt.

*Reine Elektrofahrzeuge* sind bis 2035 hauptsächlich im Kleinwagenbereich zu finden. Mit dem bis 2050 zu erwartenden Verbesserungen in den Bereichen Kapazität, Gewicht, Effizienz und Fahrzeuggewicht sind reine E-Konzepte auch im Kompakt- und Mittelklassesegment vertreten, die Hybridantriebe mit Plug-In bleiben aber weiterhin dominant. Geht man von einer realistisch

möglichen Verdoppelung der heute verfügbaren Batteriekapazitäten bis 2050 aus, beschränkt sich die Reichweite von reinen Elektrofahrzeugen auch in Zukunft auf den Bereich unter 400 Kilometer.

**Zukunftsbild: BEV 2035**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor</b>	<b>44%</b>					
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	10%	62%	38%	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	17%	61%	39%	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	17%	52%	48%	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>	<b>33%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	17%	x	30%	x	x	70%
Mittelklasse	17%	x	70%	x	x	30%
<b>Elektromotor, Batterie</b>	<b>23%</b>					
Kleinwagen	23%	x	x	x	x	100%
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 19: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild BEV 2035

**Zukunftsbild: BEV 2050**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>	<b>53%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	23%	x	10%	x	x	90%
Mittelklasse	30%	x	40%	x	x	60%
<b>Elektromotor, Batterie</b>	<b>47%</b>					
Kleinwagen	33%	x	x	x	x	100%
Kompaktklasse	10%	x	x	x	x	100%
Mittelklasse	3%	x	x	x	x	100%
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>	<b>0%</b>					
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 20: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild BEV 2050

### 4.5.3 Infrastruktur Treibstoffversorgung

Die Tankstelleninfrastruktur für Benzin und Diesel muss für weitere Fahrten im MIV mit dem Range Extender und für den Güterverkehr bestehen bleiben. Allenfalls ist eine Ausdünnung des Tankstellennetzes aufgrund der sinkenden Nachfrage zu erwarten.

Investitionen im privaten und öffentlichen Bereich sind für die Elektromobilität notwendig. Ausreichende Lademöglichkeiten sind Voraussetzung für eine Akzeptanz dieses Zukunftsbildes. Dabei ist offen, ob die Infrastruktur den Austausch von Batterien oder das Nachladen der Batterien beinhaltet:

- Systeme mit Batteriewechsel an Tankstellen: Bei diesem System wird die Batterie nicht im Fahrzeug nachgeladen. Die leere Batterie wird an der Tankstelle gegen eine volle Batterie ausgetauscht und anschliessend geladen. Ein solches System muss weitestgehend automatisiert sein. Bei Batteriegewichten von bis zu 300 kg ist ein Wechsel per Hand nicht mehr möglich. Der Platzbedarf für die Lagerung dürfte enorm sein, bzw. es ist ein Rotationsystem wie bei den Mietwagenfirmen erforderlich. Der Batterie-Austausch müsste über den Fahrzeugboden erfolgen und setzt dazu kostspielige unterirdische Infrastruktur voraus. Da zudem die Batterie die Kernkompetenz der Fahrzeughersteller sein wird, gehen wir hier nicht davon aus, dass diese Systeme die Lösung sind. Sie werden nicht weiter betrachtet.
- Die Batterien werden fest im Personenwagen installiert und über Lademöglichkeiten in Garagen, Parkplätzen, vor Häusern und in der Innenstadt beladen. Ladesysteme, wie zum Beispiel Induktionsschienen in den Strassen oder vor den Ampeln werden hier aufgrund der absehbar hohen Kosten nicht behandelt.

Hier wird von einem Nachladen der Batterie ausgegangen. Dazu werden private und öffentliche Ladestationen unterschieden:

- Private Ladestationen (sog. „Wall Boxes“): Entsprechend einer anderen Studie<sup>49)</sup> wird hier davon ausgegangen, dass für jedes Elektrofahrzeug eine private Ladestation vorhanden sein muss. Damit ist der Einsatz im üblichen Tageseinsatz mit Fahrten zur Arbeit und zum Einkaufen möglich. Das Fahrzeug wird über Nacht zu Hause beladen. Auf Basis der Fahrleistungen von Elektrofahrzeugen im Zukunftsbild und einer durchschnittlichen Fahrtweite der Fahrzeuge von 12'200 km je Jahr ergeben sich somit die folgenden Anzahl Fahrzeuge und damit die Anzahl privater Ladestationen:
  - 2035: ca. 2,5 Mio. Fahrzeuge (= Anzahl privater Ladestationen)
  - 2050: ca. 5.0 Mio. Fahrzeuge (= Anzahl privater Ladestationen)
- Öffentliche Ladestationen: Längere Fahrten werden in diesem Zukunftsbild mit Fahrzeugen mit Range Extendern durchgeführt, die das konventionelle Tankstellennetz benutzen. Um aber trotzdem eine Versorgungssicherheit mit Strom zu gewährleisten, werden auch öffentliche Ladestationen berücksichtigt. Zur Ermittlung der Anzahl Ladestellen wird die Fläche der Schweiz durch eine Fahrtweite von 35 km dividiert. Es ergibt sich ein Bedarf von ca. 250 öffentlichen Ladestationen.

Weitere Differenzierungen der Ladestationen wie „Business & Offices“-Lösungen oder „Fast Charging Stations“ wurden hier nicht betrachtet, da sie für die Funktion des Zukunftsbildes aufgrund der Beladung über Nacht zu Hause bzw. aufgrund des Einsatzes von Fahrzeugen mit Range Extendern nicht notwendig sind.

Für die Betrachtung der Kosten der Ladestationen sind die Faktoren

- Anschaffung der Ladestation,
- Aufbau und Anschluss sowie
- Wartung und Instandhaltung relevant.

---

49) Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010)

Öffentlich betriebene Ladestationen sind, hinsichtlich ihres Aufbaus, Ladekapazität und der technischen Einrichtungen für die Erfassung der Nutzerdaten, deutlich komplexer ausgelegt als private Ladegeräte. Die folgende Tabelle 21 zeigt die ermittelten Kosten je Ladestation.

		Private Ladestati- on	Öffentli- che La- destatio- nen	Business & Offices	Fast Charging Stations
Anschaffung (inkl. Aufbau und An- schluss)	[CHF/Ladestation]	270 – 1700 <sup>1), 3)</sup>	5000 – 10'000 <sup>2), 3)</sup>	5000 <sup>3)</sup>	50'000 <sup>3)</sup>
Wartung und Instand- haltung	[CHF/Ladestation und Jahr]	k.A.	2'600 <sup>2)</sup>	k.A.	k.A.

Quellen:

1) Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010)

2) EON (2010): Öffentliche Ladestationen liegen im Bereich von bis zu 10'000 CHF es ist aber davon auszugehen, dass der Preis bei grösseren Stückzahlen in den Bereich von 5'000 CHF sinkt. (Annahmen basierend auf Hersteller von Ladestationen (Mennekes).

3) Protoscar (2010): 2020-Vision Schätzung der EV-Infrastruktur, Foliensatz Status November 2010.

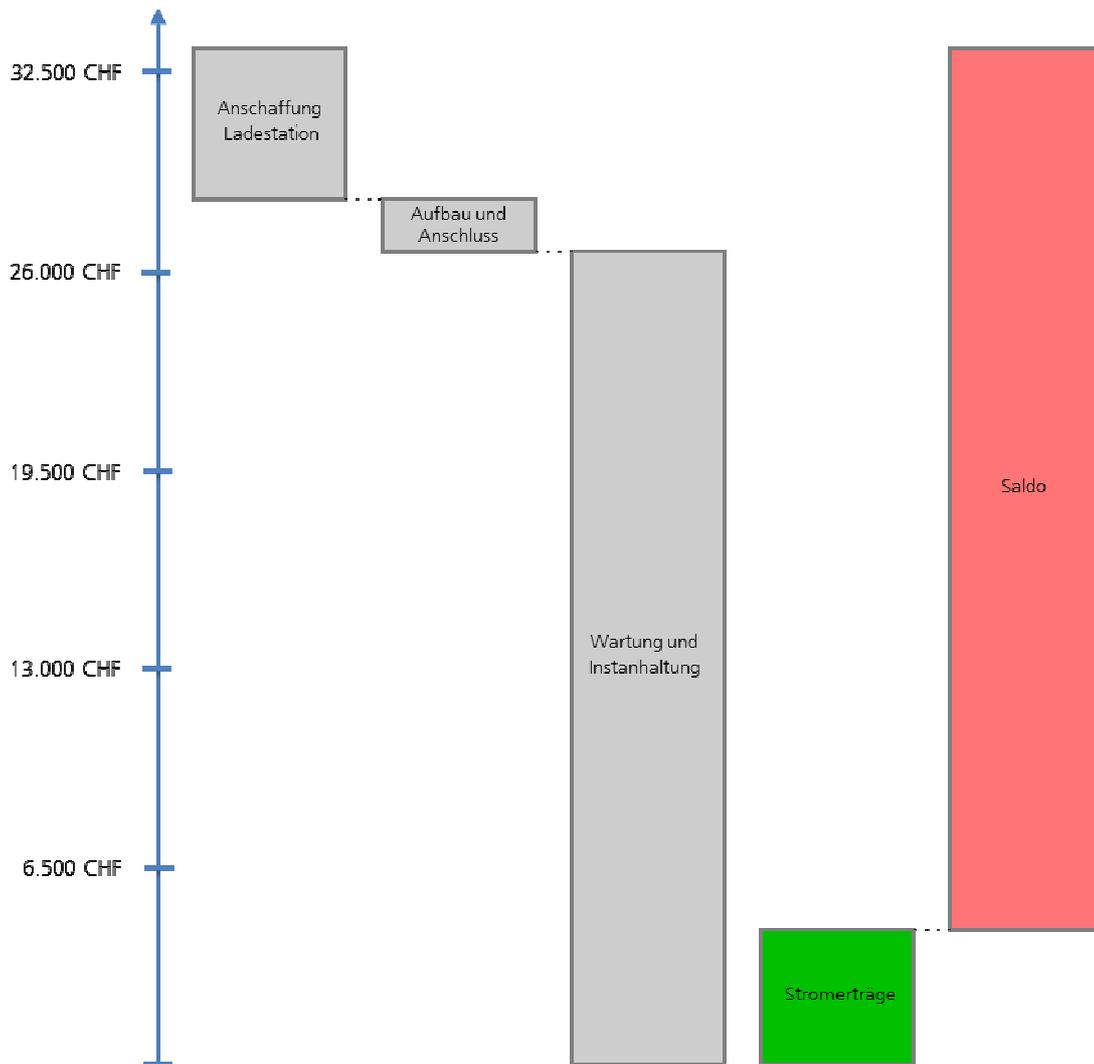
k.A. = Keine Angaben vorhanden.

*Tabelle 21: Anschaffungs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten je Ladeeinheit (inklusive Installation und Anschlusskosten) im Zukunftsbild BEV*

#### *Exkurs: Rentabilität öffentlicher Ladestationen*

Die folgende Abbildung 14 zeigt, wie sich die Situation für einen privaten Anbieter der öffentlichen Ladestationen darstellt. Die Kosten und Erträge wurden ohne Diskontierung über zehn Jahre gerechnet. Dabei werden Anschaffungskosten und Kosten für Aufbau und Anschluss separat dargestellt. Den Kosten stehen Erträge für den Versorger von ca. 500 CHF jährlich (5 Ladevorgänge pro Tag à 20 kWh, Zusatzpreis von 1.5 Rappen/kWh an öffentlichen Ladestationen gegenüber privaten Ladestationen) gegenüber.<sup>50)</sup> D.h. die Betriebskosten übersteigen, laut Kalkulation der Energieversorger, deutlich den Ertrag.

50) EON (2010)



Quelle: EON (2010), eigene Umrechnung in Schweizer Franken

Abbildung 14: Gesamtkalkulation öffentliche Ladestation über Nutzungsdauer 10 Jahre

Fazit: Eine privatwirtschaftliche Rentabilität der Ladestationen ergibt sich nicht aus den Stromerträgen. Für eine privatwirtschaftliche Bereitstellung von öffentlichen Ladestationen müssen diese Bestandteil eines grösseren Produktes sein (z.B. ähnlich ÖV-Ticket, welches bei Freizeitveranstaltungen Gratisnutzung beinhaltet).

## 4.6 Fahrzeuge mit Brennstoffzellen (FCV)

### 4.6.1 Hintergrund und Fahrleistung

Für das Zukunftsbild FCV (Fuel Cell Vehicles) wird die Verkehrsnachfrage entsprechend „Städtenetz und Wachstum“ hinterlegt. Daraus resultieren Fahrleistungen von jährlich 67.8 Mrd. (2035) bzw. 72.7 Mrd. (2050) Fahrzeugkilometern. Das FCV Bild beruht auf dem Hintergrund der Mobilitätswelt „Effizienz“ oder „Insuffizienz“, d.h. steigende Verkehrsnachfrage und technologische Entwicklungen, die zu einer Veränderung des Energieverbrauchs führen. Es wird davon ausgegangen, dass eine neue Technologie zum Durchbruch gelangt.

## 4.6.2 Fahrzeugklassen und Flottenstruktur

Für das Jahr 2035 (Tabelle 22) wird angenommen, dass die Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV) erst einen Fünftel der Fahrzeugkilometer erbringen und somit noch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in Betrieb sind. Durch den hohen Peripherieaufwand und die teure Technologie sind FCV zunächst nur in den Segmenten Kompakt- und Mittelklasse zu finden. Unter Peripherieaufwand ist hier die Technik im Fahrzeug zu verstehen (Hardware, Software), die für den Betrieb einer Brennstoffzelle erforderlich sind (Wärmeabfuhr, Kaltstart etc.).

Die Verteilung der Antriebe mit fossilen Treibstoffen entspricht der Verteilung der effizienten Fahrzeuge im Zukunftsbild ICI 2035, sowohl bezüglich Fahrzeugklassen als auch bei der Aufteilung Benzin und Diesel.

Für 2050 (Tabelle 23) wird hier unterstellt, dass die Brennstoffzellentechnik ausgereift und flächendeckend verfügbar ist. Betrachtet werden hier reine Wasserstoffbrennstoffzellen. Speichertechniken für akzeptierte Reichweiten und ein flächendeckendes Versorgungsnetz sind vorhanden.

### Zukunftsbild: FCV 2035

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene Treibstoffe	Wasser -stoff	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel			
<b>Verbrennungsmotor</b>		<b>80%</b>				
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	23%	62%	38%	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	40%	61%	39%	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	17%	52%	48%	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor; Batterie</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>		<b>20%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	7%	x	x	x	100%	x
Mittelklasse	13%	x	x	x	100%	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 22: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild FCV 2035

**Zukunftsbild: FCV 2050**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor; Batterie</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>		<b>100%</b>				
Kleinwagen	23%	x	x	x	100%	x
Kompaktklasse	56%	x	x	x	100%	x
Mittelklasse	21%	x	x	x	100%	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 23: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild FCV 2050

### 4.6.3 Infrastruktur Treibstoffversorgung

Grundsätzlich bleibt auch bei diesem Szenario das bestehende Tankstellennetz bestehen, da eine Versorgung des Güterverkehrs mit Diesel sichergestellt werden muss.

Die Infrastruktur muss bei der grossflächigen Einführung von Brennstoffzellentechnik auf Wasserstoffbasis grundlegend umgestaltet bzw. ergänzt werden. Beginnend mit deutlich höheren Anforderungen an die Sicherheit über neue Betankungssysteme bis zu einem spezifischen Speichersystem für Wasserstoff, sind Investitionen vorzunehmen. Auch an das Verteilersystem werden aufgrund der Eigenschaften und Flüchtigkeit des Wasserstoffs höhere Anforderungen als an klassische Treibstoffe gestellt.

Alternativ dazu ist eine Einführung dezentraler Produktionsanlagen für die Wasserstoffversorgung denkbar. Aber auch hierbei sind ebenfalls Investitionen die Folge.

Bei der Infrastrukturentwicklung für die Versorgung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen gehen alle Studien von einer mehrstufigen Entwicklung aus. Die erste Phase geht von Stationen vornehmlich in den Haupt-Agglomerationen aus. In der zweiten Phase werden die Stationen auf eine Versorgung in allen wichtigen Agglomerationen und entlang der verbindenden Hauptachsen erweitert. In der dritten Stufe erfolgt der flächendeckende Ausbau. Das Vattenfall-Konzept geht bezüglich der Infrastruktur sowohl von einer zentralen Erzeugung des Wasserstoffs in Grossanlagen und der Verteilung per Lastwagen wie auch von einer dezentralen Erzeugung des Wasserstoffs aus.

#### Zentrale Wasserstoffproduktion

Die Studie Vattenfall (2006) geht davon aus, dass in dieser zweiten Stufe ca. 1'000 Tankstellen in Deutschland ausreichen, um eine Versorgung mit einer Maximaldistanz von 35 km von jedem Punkt zur nächsten Tankstelle sicherzustellen. D.h., in dieser Stufe werden lediglich 0.5%

der bestehenden Tankstellen mit H<sub>2</sub> Technik ausgerüstet (Grundlage: 20'000 Tankstellen Deutschland).

Für die Schweiz bedeutet eine Abdeckung entsprechend Phase 2 mit einem Abstand von max. 35 km ca. 250 H<sub>2</sub>-Tankstellen. Bei einem Vollausbau sind die 3.700 Tankstellen in der Schweiz umzurüsten.

Bei einer zentralen Wasserstoffproduktion wird der Wasserstoff in Form von LH<sub>2</sub> angeliefert, in der Tankstelle gespeichert und für die Betankung von Fahrzeugen mit Druckgas tanks verdampft.

Die Investitions- und Betriebskosten für eine CGH<sub>2</sub>-Tankstelle sind in der folgenden Tabelle 24 dargestellt.

		Heute	2050
Investition	[CHF/Tankstelle]	1'400'000	665'000
Betriebskosten	[CHF/kWh]	0.038	0.026

Quelle:

Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010); Unterstellt werden sechs Dispenser je Tankstelle

*Tabelle 24: Anschaffungs- und Betriebskosten einer CGH<sub>2</sub>-Wasserstofftankstelle bei zentraler Wasserstoffproduktion*

### Dezentrale Wasserstoffproduktion oder Versorgung mit Pipeline

Bei einer Erzeugung von Wasserstoff vor Ort („onsite“) oder in Verbindung mit einer Pipeline werden CGH<sub>2</sub>-Tankstellen benötigt, die nach dem „Booster-Prinzip“ betrieben werden. Die Investitions- und Betriebskosten für eine CGH<sub>2</sub>-Tankstelle sind in der folgenden Tabelle 25 dargestellt.

		Heute	2050
Investition	[CHF/Tankstelle]	1'500'000	750'000
Betriebskosten	[CHF/kWh <sub>CGH<sub>2</sub></sub> ]	0.047	0.039

Quelle:

Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010); Unterstellt werden sechs Dispenser je Tankstelle

*Tabelle 25: Anschaffungs- und Betriebskosten einer CGH<sub>2</sub>-Wasserstofftankstelle bei dezentraler Wasserstoffproduktion*

## 4.7 Muskelkraft und öffentlicher Verkehr (HP+PT)

### 4.7.1 Hintergrund und Fahrleistung

Für das Zukunftsbild „HP+PT“ (Human Power + Public Transport) wird die Verkehrsnachfrage entsprechend den Verkehrsperspektiven „Ressourcenknappheit“ hinterlegt. Dies entspricht Fahrleistungen von jährlich 56.5 Mrd. (2035) bzw. 56.6 Mrd. (2050) Fahrzeugkilometern. Das Bild bewegt sich damit zwischen den Mobilitätswelten „Effizienz“ und „Suffizienz“: Die Menschen finden ihre Zufriedenheit mehr in der näheren Umgebung. Aufgrund der Verfügbarkeit von Ressourcen auch bis 2050 ist dieses Bild vor allem auf einen Wertewandel zurückzuführen. Verstärktes zentrales Wohnen und Arbeiten, Nähe wird gesucht. Lange Distanzen werden aufgrund der Bündelungsvorteile des öffentlichen Verkehrs vor allem mit dem ÖV zurückgelegt. Dabei erhalten Kleinstfahrzeuge wie Citelecs, SAM's etc. zusätzlich zum Segment Kleinfahrzeuge eine hohe Bedeutung.

#### 4.7.2 Fahrzeugklassen und Flottenstruktur

Motorisierter Individualverkehr erfolgt vor allem in den Städten und Orten. Dieser wird überwiegend mit E-Bikes und neuen Kleinstfahrzeugen wie SAM's oder Venturi etc. erbracht (Abbildung 15). Diese Kleinstfahrzeuge sind elektrisch angetrieben und gegebenenfalls mit eigenem Solardach ausgestattet (z.B. Venturi).



Abbildung 15: SAM Re-Volt<sup>51)</sup>



Abbildung 16: VENTURI electric<sup>52)</sup>

Die Festlegung der Fahrzeugflottenstruktur und der Verteilung der Fahrleistungen für das Jahr 2050 erfolgt hier auf Basis heutiger Fahrdistanzverteilungen für Wegetappen und Einschätzungen zum Einsatzbereich der Fahrzeuge:

- Die Kleinstfahrzeuge sind für Fahrten bis zu 12 km für eine Etappe geeignet. Dies sind gemäss Mikrozensus 2000 ca. 25% der Fahrleistungen. Hier wird davon ausgegangen, dass alle diese Fahrten mit Kleinstfahrzeugen erbracht werden.
- Elektrische Kleinwagen decken den Distanzbereich 12 bzw. 40 km für eine Etappe ab. Dies sind rund 45% der Fahrleistungen.

51) Foto: [www.re-volt.com.pl](http://www.re-volt.com.pl)

52) <http://www.venturielectic.fr>

- Fahrten über 40 km für eine Etappe werden mit Plug-In Hybriden durchgeführt.

Im Jahr 2035 hat noch knapp die Hälfte der Fahrzeuge einen Verbrennungsmotor. Die Aufteilung auf die Fahrzeugklassen, auf Diesel bzw. Benzin und auf Diesel bzw. Strom bei den Hybridfahrzeugen ist analog zum BEV-Zukunftsbild für 2035.

In den folgenden Tabellen 26 und 27 sind die Fahrzeugklassen und die Flottenstruktur dargestellt.

**Zukunftsbild: HP+PT 2035**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor 44%</b>						
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	10%	62%	38%	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	17%	61%	39%	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	17%	52%	48%	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender 16%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	16%	x	30%	x	x	70%
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor; Batterie 40%</b>						
Kleinstwagen/-fahrzeuge	17%	x	x	x	x	100%
Kleinwagen	23%	x	x	x	x	100%
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle 0%</b>						
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 26: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild HP+PT 2035

**Zukunftsbild: HP+PT 2050**

Antriebe		Fossile Treibstoffe		Biogene	Wasser	Strom
Fahrzeugkategorie	Anteile	Benzin	Diesel	Treibstoffe	-stoff	
<b>Verbrennungsmotor</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen effizient	x	x	x	x	x	x
Kleinwagen ineffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse hocheffizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse effizient	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse ineffizient	x	x	x	x	x	x
<b>Plug-in Hybrid / Range Extender</b>		<b>30%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	30%	x	10%	x	x	90%
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor; Batterie</b>		<b>70%</b>				
Kleinstwagen/-fahrzeuge	25%	x	x	x	x	100%
Kleinwagen	45%	x	x	x	x	100%
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x
<b>Elektromotor, Brennstoffzelle</b>		<b>0%</b>				
Kleinwagen	x	x	x	x	x	x
Kompaktklasse	x	x	x	x	x	x
Mittelklasse	x	x	x	x	x	x

Fossile Treibstoffe inklusive Erdgas

Tabelle 27: Anteile Fahrzeugtypen und Treibstoffe im Zukunftsbild HP+PT 2050

### 4.7.3 Infrastruktur

Im Zukunftsbild HP+PT sind für die Elektromobilität ähnlich hohe Investitionen wie im BEV-Zukunftsbild zu erwarten. Das bestehende Tankstellennetz muss für den Güterverkehr bestehen bleiben, kann aber in einer deutlich ausgedünnten Struktur (Langstreckentanks-Lastwagen) eine Versorgung sicherstellen.

Es müssen hohe Investitionen im Bereich öffentlicher Verkehr getätigt werden. Hierbei geht es vorrangig um den Langstreckenverkehr mit deutlich verkürzten Reisezeiten und niedrigen Taktzeiten. Dazu sind entsprechende Investitionen im Schieneninfrastrukturbereich und im Versorgungsbereich (z.B. Energie) zu tätigen.

## 4.8 Vergleich der Zukunftsbilder bezüglich Energieverbrauch

### 4.8.1 Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel

Der Energieverbrauch in den Zukunftsbildern ist von den Fahrzeugtypen, den Antriebstechnologien und den eingesetzten Treibstoffen abhängig. Aus Sicht der Kundinnen und Kunden ist in erster Linie relevant, wie viel Energie ein Fahrzeug im Betrieb verbraucht. Für die Gesamtbetrachtung der Zukunftsbilder ist jedoch der Primärenergieverbrauch relevant. Dies ist auch bei der zukünftigen Ausgestaltung von Politiken zu berücksichtigen.

Neben der Betriebsphase wird auch die Herstellung und Verteilung des Treibstoffs berücksichtigt. Der Energieverbrauch in den Zukunftsbildern wird jeweils sowohl für die Betriebsphase (Tank-to-Wheel) als auch für die gesamte Kette vom Abbau der Rohstoffe bis zum Betrieb des Fahrzeugs (Well-to-Wheel) ausgewiesen (Abbildung 17).

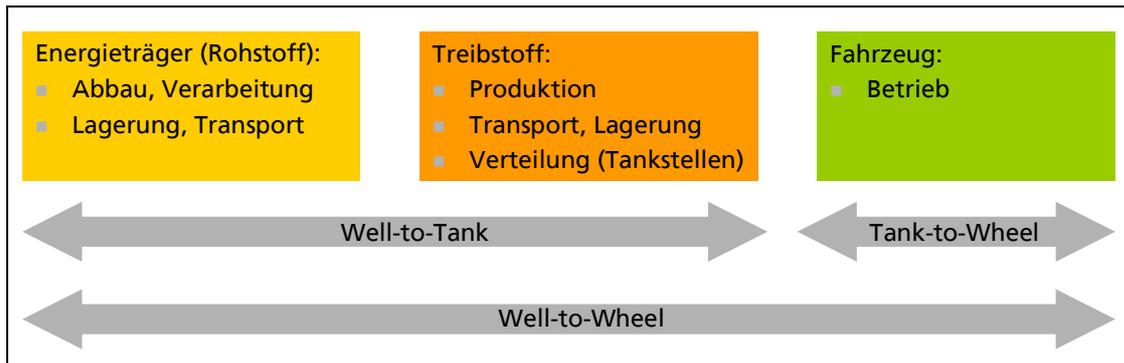


Abbildung 17: Systemabgrenzung bei der Berechnung des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch über die gesamte Produktionskette (Well-to-Wheel) wird anhand von Primärenergiefaktoren ausgedrückt. So bedeutet beispielsweise ein Faktor von 1.22 beim Diesel, dass pro Megajoule getanktem Diesel 1.22 Megajoule Primärenergie verbraucht werden. Der gesamte Primärenergiefaktor entspricht der Summe der fossilen, nuklearen und erneuerbaren Primärenergie.<sup>53)</sup> Die hier verwendeten Primärenergiefaktoren sind im Anhang A3 aufgeführt.

In den vorliegenden Analysen nicht berücksichtigt ist der Energieaufwand zur Herstellung der Fahrzeuge. Dieser ist weniger stark von den Fahrzeugtechnologien und den Treibstoffen abhängig, und die Analysen fokussieren auf die Unterschiede in der Betriebsphase. Im Sinne einer umfassenden Lebenszyklusanalyse wären diese Effekte ebenfalls einzubeziehen. Eine solche Analyse ist jedoch sehr aufwändig und im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich.

#### 4.8.2 Energieverbrauch für den Betrieb der Fahrzeuge ("Tank-to-Wheel")

In einem ersten Schritt wird der Energieverbrauch für den Betrieb der jeweiligen Fahrzeugflotte in den verschiedenen Zukunftsbildern berechnet. Grundlagen hierfür sind die Fahrleistungen (vgl. Kap. 4.1.1), die Verteilung der Fahrleistung auf entsprechende Fahrzeuge (vgl. Kap. 4.3 bis 4.7) und die spezifischen Verbrauchsfaktoren (vgl. Kapitel 3.3.3). Dabei handelt es sich um eine grobe Hochrechnung des Verbrauchs im „Idealzustand“, ohne weitere Differenzierung nach Altersstruktur der Fahrzeugflotte.

Der Energieverbrauch für den motorisierten Individualverkehr in den Jahren 2035 und 2050 ist in den folgenden beiden Abbildung 18 und 19 ausgewiesen. Eine detaillierte Aufstellung der Zahlen ist in Anhang A3 zu finden.

53) In einigen Studien wird der Primärenergiefaktor ohne die Anteile erneuerbarer Energie ausgewiesen oder ohne die Anteile Energie aus Abfällen und aus Abwärme. In der vorliegenden Studie sind diese Anteile ebenfalls berücksichtigt.

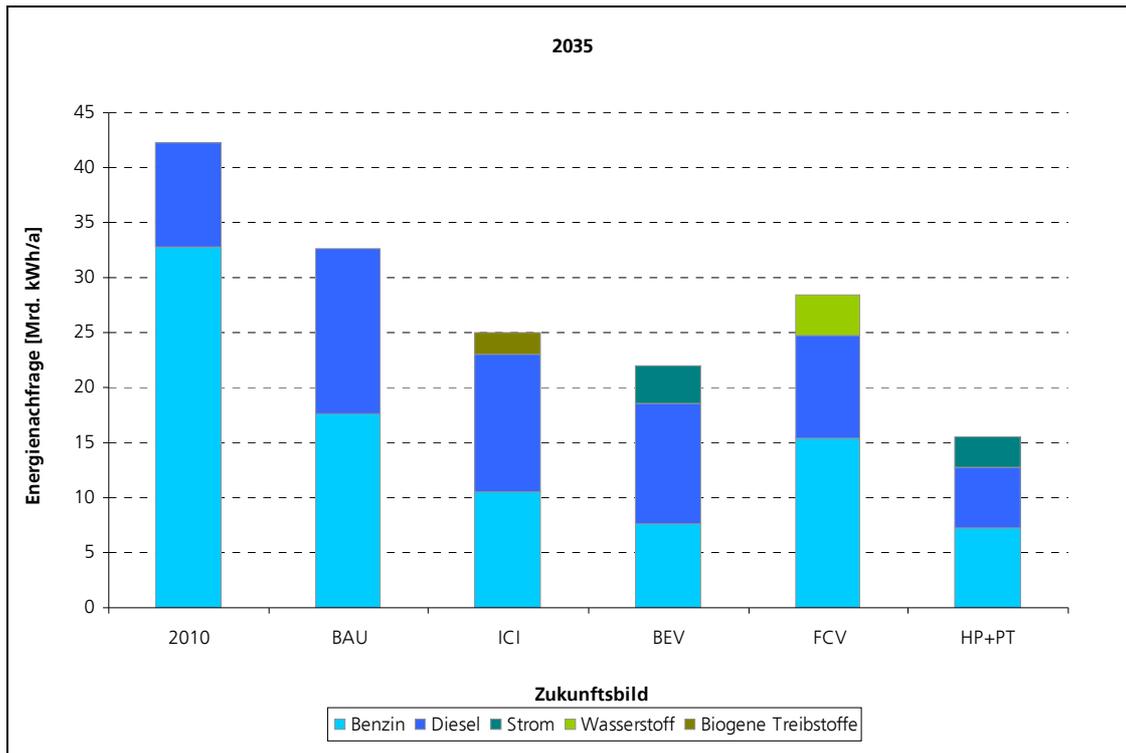


Abbildung 18: Endenergieverbrauch (Energienachfrage "Tank-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2035<sup>54)</sup>

Der gesamte Energieverbrauch des motorisierten Individualverkehrs nimmt in einer Tank-to-Wheel-Betrachtung gegenüber heute in allen Zukunftsbildern ab. Bereits im BAU-Zukunftsbild resultiert eine Reduktion aufgrund von effizienteren Verbrennungsmotoren. Mit verstärkten Anstrengungen zur Effizienzsteigerung und einem Trend zu kleineren Fahrzeugen sinkt der Verbrauch noch weiter (ICI). Die Brennstoffzellen-Fahrzeuge machen im Zukunftsbild FCV im Jahr 2035 erst einen Anteil von 20% der Fahrleistung aus. Der Anteil von Verbrennungsmotoren ist dann immer noch hoch. Im Vergleich zu ICI gibt es mehr grössere Fahrzeuge und die Verbrennungsmotoren sind weniger effizient. Deshalb resultiert ein höherer Energieverbrauch.

Im Jahr 2035 spielen Benzin und Diesel in allen Zukunftsbildern noch eine wichtige Rolle. Bezogen auf die Fahrleistung machen Elektroantriebe in den Zukunftsbildern BEV und HP+PT zwar schon mehr als die Hälfte aus. Der Strombedarf liegt jedoch bei nur rund 16% des Endenergiebedarfs, da Elektroantriebe effizienter sind und der Anteil Elektroautos vor allem im Segment der Kleinwagen hoch ist.

Bis ins Jahr 2050 verändert sich das Bild insbesondere hinsichtlich des Zukunftsbildes FCV. Während im Jahr 2035 dort erst 20% der Fahrleistung mit Brennstoffzellenfahrzeugen zurückgelegt wurden, kommen in diesem Zukunftsbild im Jahr 2050 nur noch Brennstoffzellenfahrzeuge zum Einsatz. Wenn in diesen Brennstoffzellen Wasserstoff eingesetzt wird, der mittels Elektrolyse hergestellt wird, so führt dies zu einem beträchtlichen Strombedarf (rund 29 TWh/a), der deutlich über dem Strombedarf des BEV-Zukunftsbildes liegt. Falls der Wasserstoff aus Erdgas reformiert wird, braucht es dazu rund 22 TWh/a an Erdgas (vgl. Fussnote zu Abbildung 19).

54) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder:  
**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

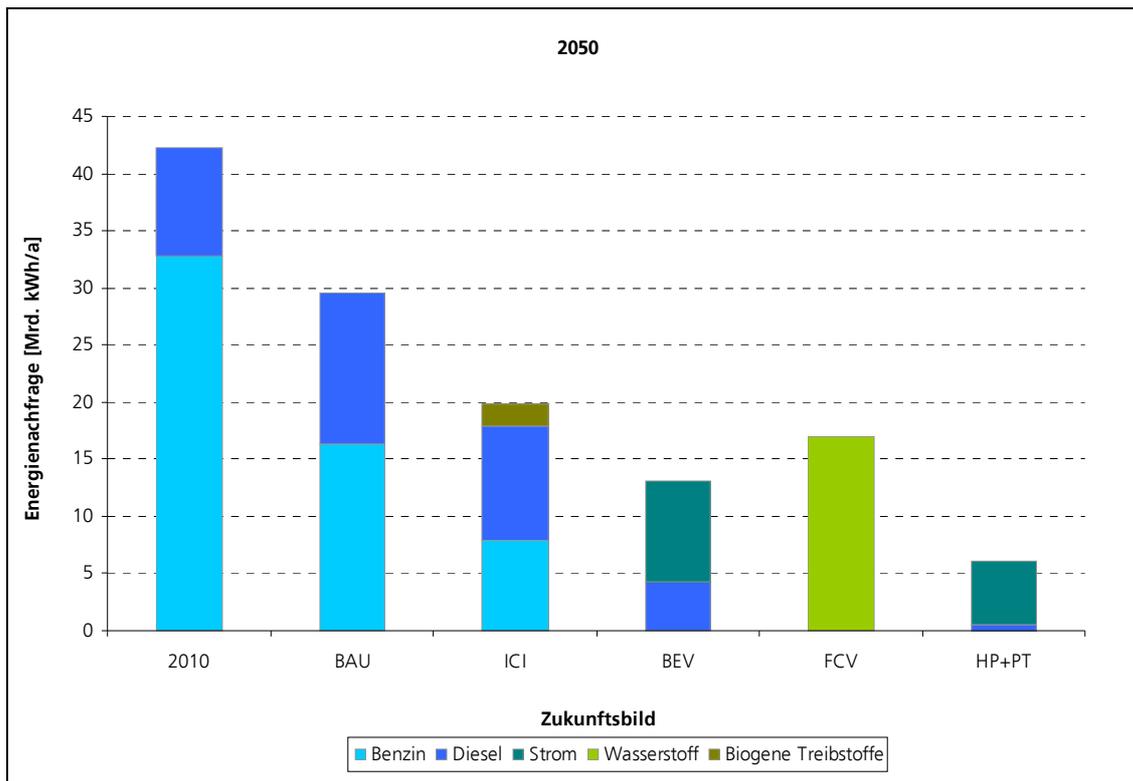


Abbildung 19: Endenergieverbrauch (Energienachfrage "Tank-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050<sup>55)</sup>

Wird für den Vergleich nur der Energieinhalt des Treibstoffes betrachtet (Tank-to-Wheel-Betrachtung), so zeigt sich für das Jahr 2050, dass das FCV-Szenario zwischen BEV und ICI einzuordnen ist. Die Brennstoffzellenantriebe sind gemäss den erhobenen Grundlagen leicht energieeffizienter als die verbesserten herkömmlichen Verbrennungsmotoren, aber klar ineffizienter als batteriegespeicherte Elektrofahrzeuge – dies, weil Wasserstoff als Energieträger grundsätzlich auch für grössere Autos und für Autos mit grösserer Reichweite Sinn macht und entsprechend eingesetzt würde.

Bis zum Jahr 2050 sinken die Anteile von Benzin und Diesel in den Zukunftsbildern mit Elektroantrieben deutlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein Teil der Fahrzeuge immer noch als Plug-In-Hybride betrieben werden und deshalb bei BEV und HP+PT fossile Treibstoffe immer noch eine gewisse Rolle spielen.

### Interpretation mit Bezug zu den BFE-Energieperspektiven

In den Energieperspektiven des BFE wird für den Verkehrssektor der Endenergieverbrauch, d.h. der Verbrauch für den Betrieb der Fahrzeuge ausgewiesen. Im Vergleich mit den Szenari-

55) Bei reiner Tank-to-Wheel-Betrachtung wird die **Wasserstoffproduktion** nicht erfasst. Der Strombedarf für die Wasserstoffproduktion Onsite beträgt 1.6 kWh/kWh<sub>H2</sub> resp. 1.43 kWh/kWh<sub>H2</sub>. Die H<sub>2</sub>-Verflüssigung (für den Transport) braucht zusätzlich 0.21 kWh/kWh<sub>H2</sub> (vgl. Fraunhofer ISI 2010). Damit werden für die Herstellung von den rund 17 TWh/a Wasserstoff mittels Elektrolyse im Zukunftsbild FCV rund **29 TWh/a Strom** benötigt. Wird der Wasserstoff mittels Dampfreformierung erstellt, so braucht es dazu und 1.32 kWh/kWh<sub>H2</sub>. Erdgas, d.h. **22 TWh/a Erdgas** (+ 3.6 TWh/a Strom für die H<sub>2</sub>-Verflüssigung)

Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

en der Energieperspektiven resultiert in den hier entwickelten Zukunftsbildern ein tieferer Energieverbrauch für den motorisierten Individualverkehr.

Das BAU-Zukunftsbild entspricht in den Grundzügen dem Szenario I der BFE-Energieperspektiven. Dieses Szenario basierte jedoch auf spezifischen Verbrauchsangaben, die in der Zwischenzeit aktualisiert wurden. Im aktuellen Handbuch für Emissionsfaktoren HBEFA 3.1 (BAFU 2010) werden höhere jährliche Absenkungsraten angenommen. Diese Werte unterliegen unseren Hochrechnungen für das BAU-Zukunftsbild. Entsprechend weisen die Berechnungen zum BAU-Szenario einen reduzierten Treibstoffverbrauch aus gegenüber den Energieperspektiven I (denen noch das HBEFA 2.1 zugrunde lag). Der Gesamtverbrauch von rund 33 TWh pro Jahr (117 PJ/a) im Jahr 2035 entspricht etwa dem Szenario III der BFE-Energieperspektiven.

Die Grundlagen für die weiteren Zukunftsbilder orientieren sich an der Referenz des "Business as Usual". Zusätzlich werden je nach Zukunftsbild höhere Anteile an effizienten Fahrzeugen, Kleinwagen oder an alternativen Antrieben und Treibstoffen unterstellt. So resultiert in den Zukunftsbildern mit optimierten Verbrennungsmotoren (ICI) oder mit grossen Anteilen an Elektrofahrzeugen mit Batterien (BEV) für das Jahr 2035 ein Energieverbrauch, der mit rund 90 PJ/a bzw. 80 PJ/a unter demjenigen in Szenario IV der Energieperspektiven liegt (96 PJ/a). Der tiefere Energieverbrauch ist hier einerseits auf effizientere Motoren und andererseits auf höhere Anteile an Kleinwagen zurückzuführen.

Im Zukunftsbild mit einem hohen Anteil von Fahrzeugen mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen liegt der Energieverbrauch der Fahrzeuge mit gut 100 PJ/a leicht über demjenigen von Szenario IV. Die Brennstoffzellenantriebe sind gemäss den gemachten Annahmen klar ineffizienter als batteriegespeicherte Elektrofahrzeuge – dies, weil Wasserstoff als Energieträger grundsätzlich auch für grössere Autos und für Autos mit grösserer Reichweite Sinn macht und entsprechend eingesetzt würde. Die Ergebnisse unterscheiden sich insbesondere deshalb von den BFE-Energieperspektiven, weil eine andere Aufteilung auf die Sekundärenergieträger unterstellt wird.

Unser Zukunftsbild HP+PT entspricht weitgehend dem Szenario „Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft“ der BFE-Energieperspektiven. Es lässt sich, gestützt auf BFE (2007a), wie folgt beschreiben: Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können bis 2035 um rund die Hälfte und der Endenergieverbrauch pro Kopf um knapp ein Drittel reduziert werden. Ferner wird der Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Wärmenachfrage auf 28% und an der Treibstoffnachfrage auf 11% gesteigert. Die Erdölabhängigkeit wird global abgebaut, neue energieeffiziente Technologien kommen auf den Markt. Die Trennung zwischen Wohnen und Arbeiten verschwimmt bei einem Trend zu mobilen, papierlosen Arbeitsplätzen immer mehr. Es wird verdichtet und kompakter gebaut, der öffentliche Verkehr wird stark aufgewertet. Das Zukunftsbild HP+PT geht bei einigen Annahmen noch weiter. Mit dem motorisierten Individualverkehr werden vor allem noch kürzere Strecken mit kleineren und leichteren Fahrzeugen zurückgelegt. Diese werden zu einem grossen Teil mit Elektromotoren betrieben. So resultiert ein Endenergieverbrauch von rund 57 PJ/a, der deutlich unter Szenario IV liegt.

### 4.8.3 Primärenergiebedarf ("Well-to-Wheel")

Bei der Berechnung des gesamten Energieverbrauchs werden der Abbau von Primärenergieträgern und die Herstellung des Treibstoffs einbezogen. Der Primärenergiebedarf ist einerseits von der Endnachfrage und andererseits vom Energieaufwand bei der Treibstoffproduktion und -bereitstellung abhängig. Letzterer ist stark davon abhängig, welche Primärenergieträger und welche Herstellungsprozesse eingesetzt werden. Zusätzlich zu einem durchschnittlichen Wert wird deshalb eine Bandbreite von minimalem bis maximalem Energiebedarf aufgezeigt. Die Bandbreiten beim Energiebedarf beruhen auf folgenden Eckwerten zu den verschiedenen Treibstoffen:

- Benzin und Diesel: Als durchschnittlicher Wert wird der heutige Primärenergiebedarf betrachtet. Das Maximum entspricht einem 60% höheren Energiebedarf bei der Rohölförderung aus sogenannten unkonventionellen Quellen (era 2009).

- Strom: Abweichungen vom Schweizer Verbrauchsmix (=durchschnittlicher Wert im Jahr 2007) nach oben (Atomkraft) und nach unten (Wasserkraft), was jeweils dem Maximum bzw. dem Minimum der verschiedenen Technologien entspricht (ESU-Services 2008).
- Wasserstoff: Durchschnittlicher Wert basiert auf Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse mit durchschnittlichem Schweizer Strom-Verbrauchsmix. Maximaler bzw. minimaler Wert entspricht der Herstellung mittels Elektrolyse und Strom aus Atomkraft bzw. Wasserkraft.<sup>56)</sup>
- Biogene Treibstoffe: der minimale Wert entspricht Biogas aus Abfallstoffen, wobei Primärenergie aus Abfall nicht berücksichtigt wird (ESU-Services 2008), das Maximum entspricht der Herstellung von Biodiesel (BtL) aus Holz (ESU-Services 2007).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 (für das Jahr 2035) und Abbildung 21 (für das Jahr 2050) zu entnehmen. Die Details der Berechnungen sind im Anhang A3 zu finden.

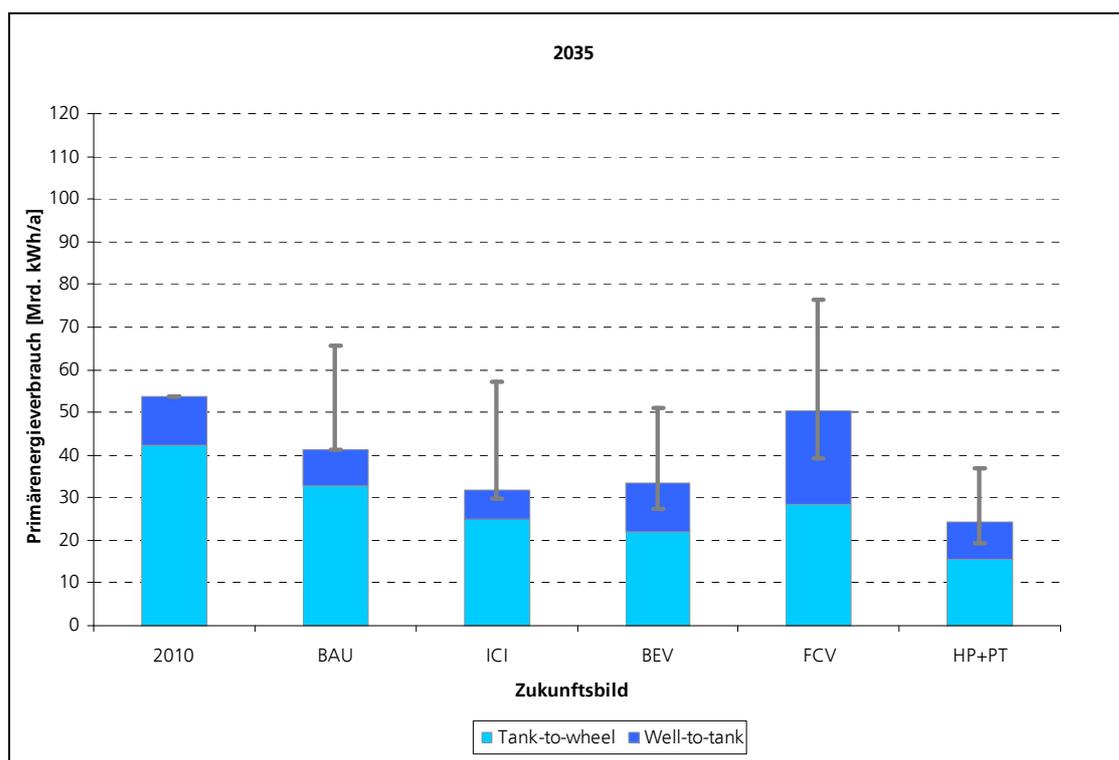


Abbildung 20: Primärenergieverbrauch ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2035<sup>57)</sup>. Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

Mit durchschnittlichen Annahmen zum Energiebedarf für die Vorketten der Treibstoffproduktion ist der Primärenergiebedarf 2035 im FCV am höchsten. Dies stammt daher, dass die Herstellung von Wasserstoff energieintensiv ist.

Im Jahr 2050 werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zukunftsbildern deutlicher. Beim FCV ist der Primärenergieverbrauch bei durchschnittlichen Annahmen zum Energieverbrauch (Wasserstoff produziert mittels Elektrolyse mit dem Schweizer Strom-Verbrauchsmix des Jahres 2007) knapp 70% höher als im Jahr 2010. Auch wenn der Wasserstoff vollständig mit Strom aus Wasserkraft produziert würde, liegt der Wert noch fast so hoch wie beim BAU mit durchschnittlichen Annahmen zum Energiebedarf der Vorketten.

56) Der Primärenergiefaktor bei der Herstellung mittels Dampfreformierung unter Einsatz von Erdgas liegt zwischen diesen beiden Werten.

57) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder:  
**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

Auch wenn Wasserstoff via Dampfreformierung aus Erdgas produziert wird, ist der Primärenergiebedarf für das FCV leicht höher als beim BAU (Abbildung 22).

Der Primärenergieverbrauch im BEV-Zukunftsbild liegt über demjenigen in ICI, wenn ein Primärenergiefaktor gemäss dem heutigen Strommix (Schweizer Verbrauchsmix 2007) unterstellt wird. Dieser Primärenergiefaktor liegt deutlich über demjenigen für Benzin oder Diesel (gemäss heutiger Erdöl-Förderung). Allerdings ist bei letzterem bis 2050 gegenüber heute ein Anstieg des Energiebedarfs für die Erdölförderung zu erwarten und der Primärenergiebedarf wird innerhalb der angegebenen Bandbreite steigen.<sup>58)</sup> Im BEV-Zukunftsbild ist es möglich, den Primärenergiebedarf unterhalb demjenigen für ICI zu senken, wenn der Anteil an Strom aus erneuerbaren Energien steigt.

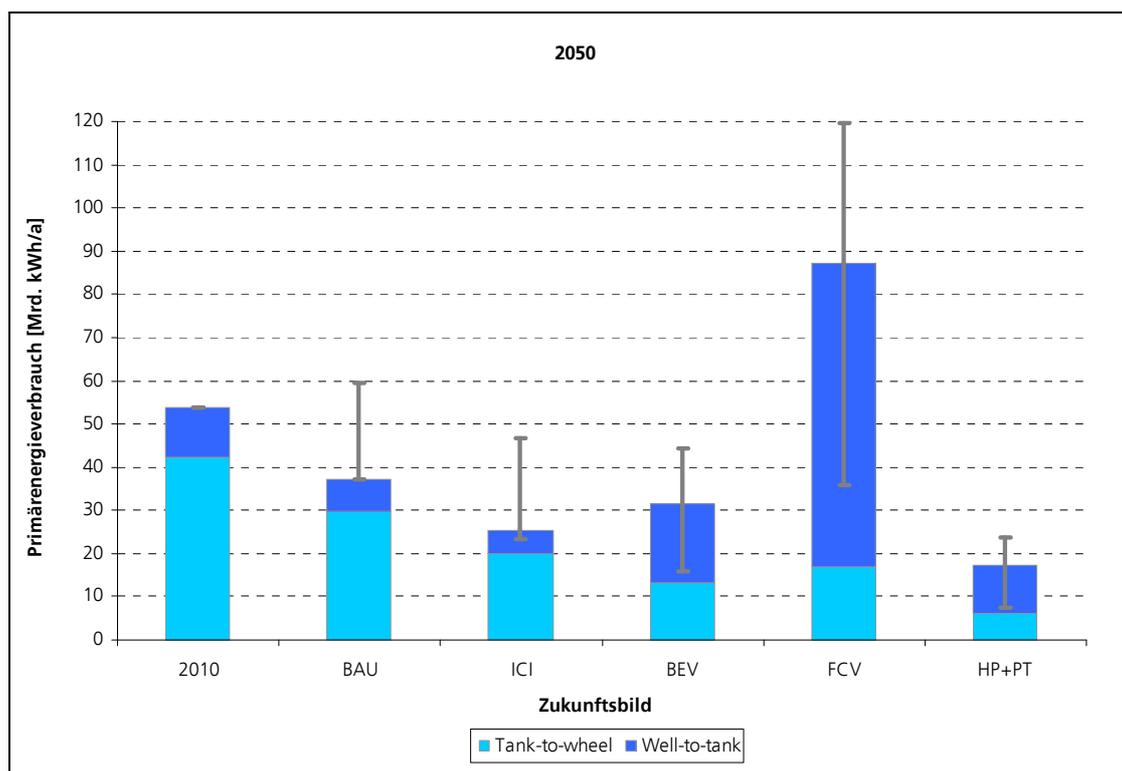


Abbildung 21: Primärenergieverbrauch ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050<sup>59)</sup>. Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

Die in der obigen Abbildung dargestellte Bandbreite für den Primärenergieverbrauch ist in Tabelle 28 differenziert nach verschiedenen Arten der Stromproduktion dargestellt (grafische Darstellung 35 vgl. Anhang A3). Berücksichtigt werden nur die Zukunftsbilder, in denen Strom als Treibstoff direkt oder indirekt zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt wird.

58) Der obere Wert der angegebenen Bandbreite bildet die Situation ab, bei dem der fossile Treibstoffe vollständig aus unkonventionellen Quellen stammt. Aus heutiger Sicht ist nicht absehbar, wie viel Erdöl im Jahr 2050 aus konventionellen Quellen stammt, der angegebene Wert ist in diesem Sinne als Maximalwert zu verstehen.

59) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

Primärenergie [Mrd. kWh/a] nach Strommix	2050		
	BEV	FCV	HP+PT
Wasserkraft	16	36	7
Windkraft	17	39	8
Photovoltaik	20	49	10
Gas (GuD)	26	69	14
CH Produktionsmix	26	71	14
CH Verbrauchsmix	31	87	17
UCTE Produktionsmix	36	103	20
Kohle	40	115	22
Atomkraft	41	120	23

*Tabelle 28: Primärenergieverbrauch in den Zukunftsbildern 2050 je nach Art des eingesetzten Strommixes<sup>60)</sup> (grafische Darstellung 35 vgl. Anhang A3)*

Die hier dargestellten Werte basieren auf den heutigen Primärenergiefaktoren. Diese können bei einzelnen Technologien (z.B. Photovoltaik) durch technische Fortschritte bis 2050 möglicherweise noch etwas gesenkt werden. Die grösseren Änderungen sind jedoch beim Produktions- und Verbrauchsmix bis 2050 zu erwarten. Bereits mit den heute beschlossenen energie- und klimapolitischen Massnahmen kann davon ausgegangen werden, dass erneuerbare Energien an Bedeutung gewinnen und die zukünftigen Primärenergiefaktoren tendenziell tiefer liegen als die heutigen. Dies bedeutet, dass die für 2050 zu erwartenden Werte jeweils in der unteren Hälfte der angegebenen Bandbreite liegen werden.

Allerdings spielen in Szenarien zum zukünftigen Strommix neben erneuerbaren Energien häufig auch die Atomkraft und fossile Energieträger eine Rolle (letztere mit Carbon Capture and Storage). Unter diesen Annahmen können zwar die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich gesenkt werden, die Auswirkungen auf den Primärenergieverbrauch sind jedoch weniger deutlich.<sup>61)</sup>

Im Zukunftsbild FCV wäre als Alternative zur Elektrolyse auch die Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas mittels Dampfreformierung möglich. Der Primärenergieverbrauch ist mit diesem Verfahren tiefer, ausser wenn bei der Elektrolyse ausschliesslich Strom aus Wasser- und Windkraft eingesetzt werden (Abbildung 22). In der langfristigen Betrachtung ist der Einsatz von Erdgas für die Herstellung von Wasserstoff jedoch aufgrund der beschränkten Erdgasvorkommen sowie aus klimapolitischer Sicht problematisch.

60) Der UCTE Produktionsmix entspricht dem in Europa produzierten Strommix (UCTE = Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity)

61) Dies gilt auch für die beiden von der Vereinigung der europäischen Elektrizitätswirtschaft, EURELECTRIC vorgestellten Szenarien zum zukünftigen Strommix in der EU (Eurelectric 2010). Der in diesen beiden Szenarien prognostizierte Strommix für 2050 wird im vorliegenden Bericht bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.3.2). Die Resultate zum Primärenergieverbrauch würden mit diesen Annahmen etwa in der Grössenordnung liegen wie die in Abbildung 21 dargestellten Resultate, die auf dem heutigen CH-Produktionsmix basieren.

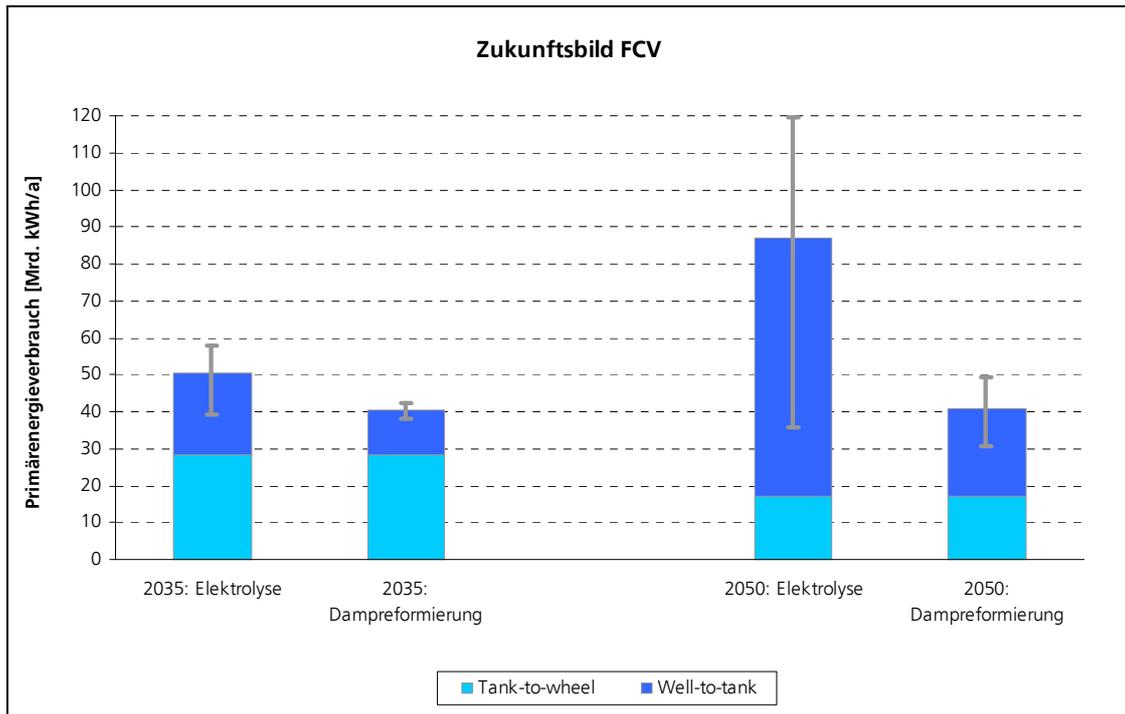


Abbildung 22: Vergleich von Primärenergieverbrauch für Wasserstoff-Herstellung via Elektrolyse und Erdgas-Reformierung

#### 4.8.4 Folgerungen für Infrastruktur Energieerzeugung

Die Nachfrage nach fossilen Treibstoffen nimmt in allen Zukunftsbildern ab. In den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT mit einem starken Rückgang der Nachfrage nach Benzin und Diesel ist von einem teilweisen Rückbau der Infrastruktur für die Herstellung und Verteilung dieser Treibstoffe auszugehen. Allerdings werden diese Treibstoffe weiterhin im Güterverkehr eingesetzt und eine Grundversorgung durch das Tankstellennetz bleibt weiterhin bestehen. Auf die Erdölförderung und -verarbeitung haben Nachfrageänderungen durch den Individualverkehr in der Schweiz global gesehen eine marginale Wirkung.

Für die verschiedenen Zukunftsbilder sind damit gegenüber dem BAU primär die folgenden Anpassungen an der Infrastruktur zur Energieerzeugung notwendig:

- Ausbau Stromproduktion für das Zukunftsbild BEV und HP+PT
- Infrastruktur für die Wasserstoffproduktion (Elektrizität für Elektrolyse oder Gas für die Dampfreformierung) für das Zukunftsbild FCV

Die Nachfrage nach Strom steigt bis im Jahr 2050 im BEV-Zukunftsbild auf rund 8 TWh/a und im HP+PT-Zukunftsbild auf rund 5 TWh/a. Für das FCV-Zukunftsbild sind rund 17 TWh/a an Wasserstoff bereitzustellen. Für die Erstellung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse erfordert dies rund 26 TWh/a Strom.

#### Beurteilung der Stromnachfrage

Die Nachfrage nach Strom steigt im Zukunftsbild BEV bis ins Jahr 2050 um rund 14% des heutigen Schweizer Strom-Endverbrauchs und im Zukunftsbild FCV sogar um rund 50% des heutigen Verbrauchs, wenn Wasserstoff via Elektrolyse erstellt wird. Die gesamte Fahrleistung wird in diesen beiden Zukunftsbildern im Jahr 2050 mit Plug-In-Hybriden oder reinen Elektroautos resp. mit Brennstoffzellenfahrzeugen erbracht.

Im Jahr 2035 entfällt im BEV-Zukunftsbild erst ein Drittel der Fahrleistung auf Plug-In-Hybride und knapp ein Viertel auf reine Elektrofahrzeuge. Daraus resultiert ein Strombedarf von rund 3.5 TWh/a, was 5-7% der künftigen gesamten Elektrizitätsnachfrage gemäss Energieperspektiven des BFE ausmacht.<sup>62)</sup>

Im FCV-Zukunftsbild wird im Jahr 2035 erst 20% der Fahrleistung mit Brennstoffzellenfahrzeugen erbracht. Zur Herstellung des entsprechenden Wasserstoffs via Elektrolyse werden rund 6 TWh/a Strom benötigt, was 9-12% der gesamten Elektrizitätsnachfrage gemäss Energieperspektiven des BFE ausmacht.

Der zusätzliche Strombedarf bis 2035 im BEV-Zukunftsbild entspricht etwa zwei Dritteln der gemäss Energiegesetz angestrebten zusätzlichen Produktion aus erneuerbaren Energien bis 2030.<sup>63)</sup> Beim FCV-Zukunftsbild ist die benötigte Strommenge für die Herstellung von Wasserstoff leicht höher als die angestrebte Produktionserhöhung aus erneuerbaren Energien bis 2030.

Für die Deckung des zusätzlichen Bedarfs bis 2050 (rund 8 TWh jährlich für das BEV-Zukunftsbild resp. rund 26 TWh jährlich für FCV-Zukunftsbild) sind entweder deutliche Effizienzmassnahmen in anderen Bereichen, ein Ausbau der Produktionskapazitäten oder zusätzliche Stromimporte notwendig. Vergleichswerte für Anlagen und weitere Vergleichsgrössen sind in Tabelle 29 aufgeführt.

Zukunftsbild	Strombedarf 2050	Anteil an Strom-Endverbrauch 2009 <sup>64)</sup>	Anzahl Kernkraftwerke (Typ Leibstadt <sup>65)</sup> )	Anzahl Gaskraftwerke (GuD) à 550 MW <sup>66)</sup>	PV-Anlage CH heute (120 kWh/m <sup>2</sup> )	Wind (8 Windräder à 2 MW mit ~27 GWh/a <sup>67)</sup> )
BEV	8 TWh/a	14%	1	2 - 3	66.4 km <sup>2</sup> (~6'700 Anlagen wie Stade de Suisse <sup>68)</sup> )	~ 300 solche Windparks
FCV	29 TWh/a	50%	3	8 - 9	204 km <sup>2</sup> (~20'000 Anlagen wie Stade de Suisse)	~ 1'100 solche Windparks

Tabelle 29: Vergleiche zur möglichen Abdeckung der Stromnachfrage<sup>69)</sup>

62) Szenario I: + 29% gegenüber 2000 (67.6 TWh/a), Szenario IV-2% gegenüber 2000 (51.4 TWh/a)

63) Im Energiegesetz (EnG, SR 730.0) ist das Ziel festgehalten, die Erzeugung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien bis 2030 gegenüber dem Stand im Jahr 2000 um mind. 5'400 Gigawattstunden zu erhöhen.

64) 57.5 TWh im Jahr 2009, Elektrizitätsstatistik des BFE

65) 1'165 MW Leistung, Jahresproduktion 9'400 GWh

66) Ann: 6'200 Betriebsstunden Vollast (in Analogie zu BFE Energieperspektiven). -> Jahresproduktion ca. 3'400 GWh

67) Entspricht der erwarteten Jahresproduktion der neusten 8 Windräder auf dem Mont Croisin: [http://www.bkw-fmb.ch/bkwfmb/de/home/thema\\_energie\\_und/Energieproduktion/Wind/juvent\\_sa.html](http://www.bkw-fmb.ch/bkwfmb/de/home/thema_energie_und/Energieproduktion/Wind/juvent_sa.html)

68) Jahresproduktion Stade de Suisse ca. 1.2 GWh/a mit ca. 12'000 m2 Dachfläche

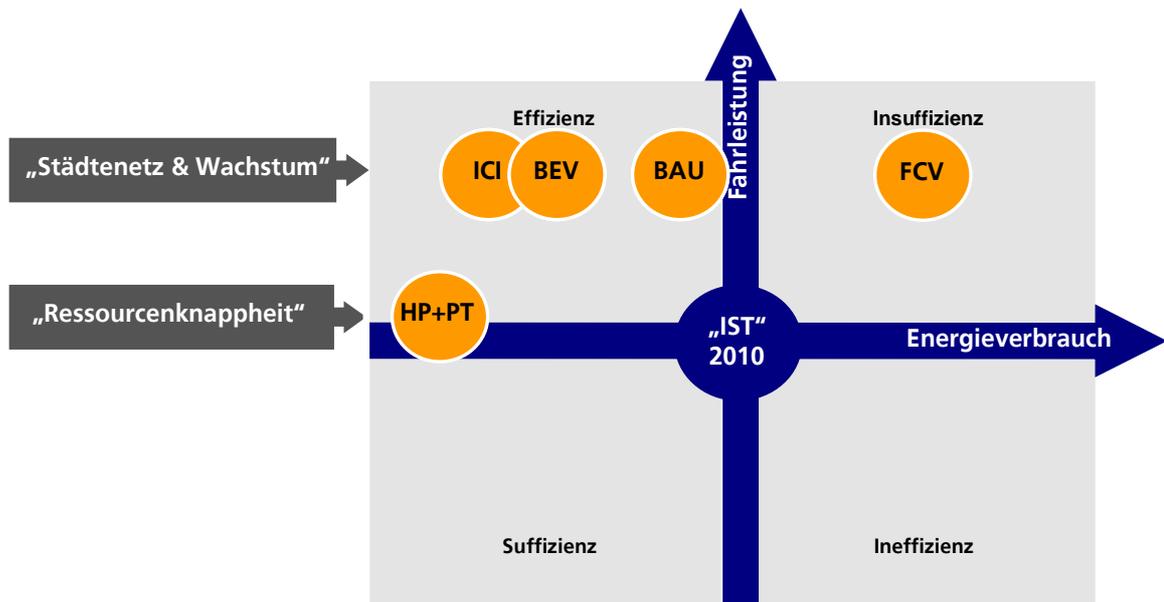
69) Nicht berücksichtigt ist hier das Zukunftsbild HP+PT, in dem die Stromnachfrage für den MIV deutlich tiefer ist.

Bei den aufgeführten Vergleichsanlagen sind bei KKW und GuD bis 2050 keine grossen Effizienzsteigerungen mehr zu erwarten, da die Technik "ausgereift" ist. Bei Photovoltaik ist wohl etwa eine Verdoppelung des Wirkungsgrades möglich, denn heute liegt der Wirkungsgrad von Solarmodulen mit monokristallinen Zellen bei ca. 18%, mit polykristallinen Zellen bei ca 15% und im Labor werden Werte bis knapp 30% erreicht (Vgl. z.B. Angaben Swissolar: [http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/publikationen/PV\\_Broschuere\\_de\\_LOW.pdf](http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/publikationen/PV_Broschuere_de_LOW.pdf)). Auch bei den Windrädern dürften bis 2050 noch Effizienzsteigerungen möglich sein.

Zur energieseitigen Infrastruktur gehören auch die Netze. Die Anforderungen bezüglich Kapazitäten sowie veränderte Belastungen durch die Beladung von Elektrofahrzeugen wurden hier nicht untersucht.

#### 4.8.5 Fazit: Zuordnung Mobilitätswelten zu Antrieben und Treibstoffen

Nach Ermittlung des Energieverbrauchs, können die Zukunftsbilder nun den Mobilitätswelten zugeordnet werden (Abbildung 23).



Legende:

BAU = Business as Usual

ICI = Internal Combustion Engine Improved (optimierte Verbrennungsmotoren)

BEV = Battery Electric Vehicle (Batteriebetriebenes Fahrzeug)

FCV = Fuel Cell Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)

HP + PT = Human Power und öffentlicher Verkehr

Abbildung 23: Kombination Mobilitätswelten und Zukunftsbilder

Die Bildgrösse *Städtenetz und Wachstum* wird hinsichtlich seiner Umsetzung mit unterschiedlichen Vordergründen gezeichnet:

- Die Bildern "BAU", "Verbesserter Verbrennungsmotor (ICI)" und "Elektromobilität (BEV)" reduzieren bei wachsenden Fahrleistungen den Energiebedarf gegenüber heute. "Verbesserter Verbrennungsmotor (ICI)" und "Elektromobilität (BEV)" reduzieren den Energiebedarf zudem gegenüber BEV. Sie sind damit Ausdruck einer effizienteren Welt.
- Im Zukunftsbild FCV steigt der Primärenergieverbrauch sowohl gegenüber heute als auch gegenüber dem BAU-Zukunftsbild: Bei einer geklärten Energieversorgung (Wasserstoff) erlauben diese Antriebe eine uneingeschränkte Mobilität. Der Primärenergiebedarf für die Herstellung des Wasserstoffes ist jedoch hoch und dieses Zukunftsbild ist somit eher der Mobilitätswelt Insuffizienz zuzuordnen, wobei ein bedeutender Technologiesprung notwendig ist.

Das Bild HP + PT versucht bewusst eine Alternative zum Verkehrswachstum zu zeichnen, wobei auch hier die Bildgrösse gemäss Verkehrsperspektiven beibehalten wird und eine gegenüber heute annähernd konstante Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr zugrunde gelegt wird. Der Primärenergiebedarf sinkt sehr. Das Zukunftsbild ist ebenfalls der Mobilitätswelt „Effizienz“ mit Tendenz zur Suffizienz zuzuordnen.



## 5 Auswirkungen der Zukunftsbilder

Die in Kapitel 4 entwickelten Zukunftsbilder werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf eine Nachhaltige Entwicklung beschrieben. Die Auswirkungen werden dargestellt, um allfällig notwendige ergänzende Massnahmen zur Vermeidung von unerwünschten Nebenwirkungen zu erkennen. Ziel dieser Auswirkungsermittlung ist es nicht, die Zukunftsbilder zu bewerten oder eine Priorisierung zu erhalten.

### 5.1 Vorgehen

Zur Beschreibung der Auswirkungen auf Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt leiten wir Zielbereiche und Indikatoren her, die auf bestehenden Beurteilungssystemen aus den Bereichen Verkehr, Energie und Umwelt basieren. Anhand der Indikatoren werden die Auswirkungen der Zukunftsbilder beschrieben. Dabei handelt es sich primär um qualitative Beschreibungen von Tendenzen und Zusammenhängen. Diese werden durch quantitative Angaben zu einzelnen Kriterien ergänzt.

Nicht Gegenstand der Untersuchung sind hier die Bedingungen und Massnahmen, die für eine Realisierung der Zukunftsbilder erforderlich sind. Als Referenz für die Beschreibung der Auswirkungen wird das BAU-Szenario ("Business as Usual") herangezogen. Relevante Unterschiede werden identifiziert und beschrieben. Dies bedeutet, dass innerhalb des Systems von Energiebereitstellung, Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb (vgl. Abbildung 24) jeweils auf diejenigen Bereiche fokussiert wird, die bei den jeweiligen Zielbereichen relevant sind.

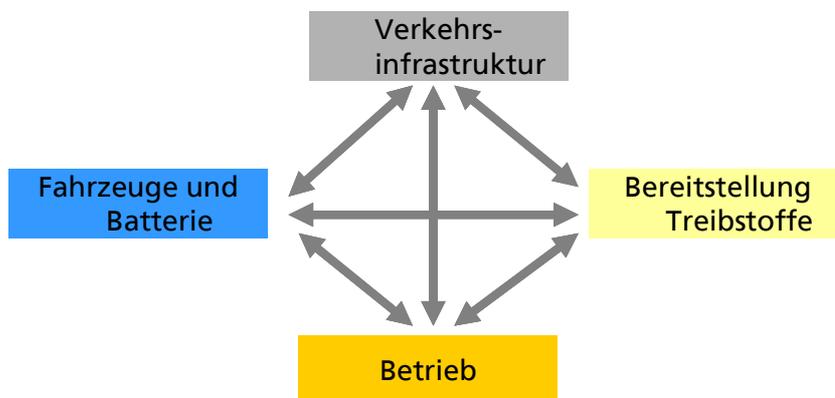


Abbildung 24: Systemabgrenzung

Die folgenden Annahmen wurden bei der Bestimmung von Auswirkungen der Zukunftsbilder unterstellt:

- **Mobility Pricing:** Die heutige Erhebung von Mineralölsteuern ist unabhängig von den Antrieben und Treibstoffen in Diskussion. Damit die Vergleichbarkeit zwischen den Zukunftsbildern gegeben ist, erfolgen die Betrachtungen ohne Berücksichtigung von Steuern und Abgaben.
- **Verkehrstelematik:** Technische Massnahmen wie automatische Abstandsmessung und elektronische Steuerung der Fahrzeuge erhöhen die Sicherheit. Diese Entwicklung ist unabhängig von den Zukunftsbildern. Deshalb werden auch keine Sicherheitsunterschiede zwischen Klein- und Grossfahrzeugen zugrunde gelegt. Investitionen im Bereich intelligente Infrastruktur wie Parkleitsysteme, teilautomatische Führungssysteme zur Erhöhung der Sicherheit und in Smart Grids fallen in allen Bildern an und werden deshalb nicht berücksichtigt.

## 5.2 Zielsystem

Die Analyse der Zukunftsbilder orientiert sich am übergeordneten Ziel einer Nachhaltigen Entwicklung im Verkehr, wobei hier nur der motorisierte Individualverkehr betrachtet wird. Was dies bedeutet, wird anhand des nachfolgend beschriebenen Zielsystems konkretisiert. Dieses orientiert sich an den drei Zieldimensionen der Nachhaltigen Entwicklung:

- wirtschaftliche Leistungsfähigkeit
- gesellschaftliche Solidarität
- ökologische Verantwortung.

Eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung des Zielsystems ist die *Strategie Nachhaltige Entwicklung* (Schweizerischer Bundesrat 2008). Die Strategie erläutert die drei Zieldimensionen der Nachhaltigen Entwicklung anhand von Kriterien, die in unser Zielsystem einfließen. Weiter stützen wir uns auf Beurteilungsinstrumente, die für bestimmte Fragestellungen und Themenbereiche entwickelt wurden. Beispiele sind der *Leitfaden Volkswirtschaftliche Beurteilung von Umweltmassnahmen und -zielen* (BAFU 2008) und das *Ziel- und Indikatorensystem Nachhaltiger Verkehr des UVEK* (ZINV UVEK).<sup>70)</sup> Dieses System bildet die Grundlage für die Instrumente zur Beurteilung Strasseninfrastrukturprojekten (NISTRA)<sup>71)</sup> und von Bahnprojekten (NIBA)<sup>72)</sup>.

In jeder der drei Zieldimensionen der Nachhaltigen Entwicklung werden Oberziele definiert, die in weitere Unterziele aufgeteilt werden (Tabelle 30).

---

70) <http://www.are.admin.ch/dokumentation/publikationen/00024/00283/index.html?lang=de>

71) <http://www.astra.admin.ch/dienstleistungen/00129/00183/00187/index.html?lang=de>

72) [http://www.bav.admin.ch/dokumentation/verbindliche\\_dokumente/00911/index.html?lang=de](http://www.bav.admin.ch/dokumentation/verbindliche_dokumente/00911/index.html?lang=de)

Oberziele	Teilziele
<b>Umwelt</b>	
U1 Umweltbelastungen senken	U1.1 Luftschadstoffe senken U1.2 Lärmbelastung senken
U2 Klima schützen	U2.1 Treibhausgasemissionen senken
U3 Ressourcen schonen	U3.1 Primärenergieverbrauch senken U3.2 Bodenversiegelung reduzieren U3.3 Einsatz metallischer Rohstoffe minimieren
U4 Natürliche Vielfalt fördern	U4.1 Natürliche Lebensräume erhalten U4.2 Landschaftszerschneidung reduzieren
<b>Wirtschaft</b>	
W1 Kosten minimieren	W1.1 Investitions- und Betriebskosten für Fahrzeuge minimieren W1.2 Investitions- und Betriebskosten für Infrastruktur minimieren
W2 Wertschöpfung erhöhen	W2.1 Absatzmärkte für Schweizer Unternehmen schaffen W2.2 Einheimische Rohstoffe und Produkte nutzen
W3 Indirekte wirtschaftliche Effekte optimieren	W3.1 Unterstützung einer regional ausgeglichenen wirtschaftlichen Entwicklung W3.2 Flexibilität des Systems erhöhen (Investitionsrisiko reduzieren, Anpassungsfähigkeit bei technolog. Entwicklungen)
W4 Versorgungssicherheit gewährleisten	W4.1 Abhängigkeit von einzelnen Energiequellen senken W4.2 Verfügbarkeit der Rohstoffe gewährleisten
<b>Gesellschaft</b>	
G1 Gesundheit und Wohlbefinden fördern	G1.1 Verkehrssicherheit erhöhen G1.2 Minimierung von Störfallrisiken G1.3 Beeinträchtigungen des Siedlungs- und Landschaftsbildes minimieren
G2 Gesellschaftliche Solidarität fördern	G2.1 Zugang für alle Regionen und gesellschaftlichen Gruppen sicherstellen

Tabelle 30: Zielsystem für die Auswirkungsanalyse

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ober- und Teilziele erläutert und die Auswirkungen in den einzelnen Zukunftsbildern dargestellt. Für jedes Teilziel wird von Symbolen gemäss der Skala in der folgenden Tabelle 31 zusammenfassend beurteilt, ob die Entwicklung der Zielrichtung entspricht.

✓	Starke Entwicklung gemäss Zielrichtung
(✓)	Tendenzen gemäss Zielrichtung
≈	Keine relevanten Auswirkungen
+/-	Auswirkungen von konkreter Ausgestaltung abhängig
!	Entwicklung gegen Zielrichtung

Tabelle 31: Beurteilungsskala

## 5.3 Umwelt

### 5.3.1 U1 Umweltbelastung senken

Lokale, nationale sowie grenzüberschreitende Umweltbelastungen sollen langfristig auf ein umweltverträgliches Niveau gesenkt werden. Die grössten Umwelt-Auswirkungen des Verkehrs betreffen die Luftschadstoffe, die Treibhausgasemissionen und die Lärmbelastung. Die Auswirkungen auf das Klima werden unter dem separaten Kriterium U2 "Klima schützen" bewertet (vgl. Kapitel 5.3.2), weitere Auswirkungen im Bereich natürliche Ressourcen sowie natürliche Vielfalt in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4.

#### U1.1 Luftschadstoffe

Luftschadstoffe werden sowohl im Betrieb von Fahrzeugen ausgestossen als auch bei der Bereitstellung der Energie, der Infrastruktur und der Fahrzeuge. Die Luftreinhalteverordnung (LRV) und die Abgasnormen (Euro-Normen) betreffen die Luftschadstoffe Stickoxide, PM<sub>10</sub>, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, und Schwefeldioxid. Wichtig ist ausserdem der Sekundärschadstoff Ozon, welcher von Autos nicht direkt ausgestossen wird, sich aber aus Vorläufersubstanzen (Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) bildet. Das Treibhausgas CO<sub>2</sub> ist für Mensch und Tier nicht toxisch und wird deshalb nicht zu den Luftschadstoffen im engeren Sinn gezählt. Die Beurteilung der Treibhausgasemissionen erfolgt unter dem Teilziel U2.1 ("Treibhausgasemissionen senken").

#### Bisherige Entwicklung

Seit den 1990er Jahren sind mit den Schadstoffnormen Euro-1, Euro-2, Euro-3, Euro-4, aktuell Euro-5 und in wenigen Jahren Euro-6 sehr grosse Fortschritte bei den PW-Neuzulassungen erreicht worden, welche sich mit der üblichen zeitlichen Verzögerung auch in der Gesamtflotte manifestieren. So sind die Emissionen an Stickoxiden, PM<sub>10</sub>, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen (NMHC) stark zurückgegangen (vgl. Anhang A5). Bei PM<sub>10</sub> und beim Ozon, das indirekt über verschiedene Reaktionen aus Vorläufersubstanzen entsteht, sind die Ziele der LRV noch nicht erreicht, auch wenn die Emissionen der Vorläufersubstanzen stark reduziert worden sind. Eine Verbesserung der Belastung mit PM<sub>10</sub> bringt die Euro-5-Norm, weil damit Partikelfilter für Dieselaautos de facto obligatorisch werden. Auch bei den Stickoxiden werden die Ziele der LRV noch nicht überall und immer erreicht

#### Entwicklung bei Business as Usual (BAU)

Die aktuelle und demnächst in Kraft tretende, bereits beschlossene Euro-Norm 5 bzw. 6 werden zu weiteren Reduktionen namentlich der NO<sub>x</sub>-, NMHC- und PM-Emissionen beitragen. Bis zum Jahr 2035 ist davon auszugehen, dass über 97% der Fahrleistung von Fahrzeugen erbracht werden wird, welche die Euro-Norm 6 erfüllen. Das BAU bringt bezüglich Schadstoffbelastungen der Luft durch bereits beschlossene technische Massnahmen eine Verbesserung gegenüber dem heutigen Zustand (vgl. Abbildung 39 im Anhang A5).

#### Entwicklung bei den anderen Zukunftsbildern

Im *Zukunftsbild ICI* wird neben der Effizienzerhöhung von Benzin- und Dieselfahrzeugen von einer Zumischung von 8% Biotreibstoffen im Jahr 2035 und 10% im Jahr 2050 ausgegangen. Ökobilanzen für verschiedene Biotreibstoffe zeigen, dass insbesondere beim Anbau der Rohstoffe grosse Umweltbelastungen entstehen können<sup>73)</sup>. Die aggregierten Umweltbelastungen stammen jedoch nur zu einem kleinen Teil aus Schadstoffbelastungen der Luft (abgesehen von

---

73) So ist beispielsweise die gesamte Umweltbelastung durch die Produktion und den Einsatz von Biodiesel aus Soja, das in Brasilien angebaut wird, deutlich höher als beim Einsatz von fossilen Treibstoffen. Mehr als 80% der Belastung stammt dabei aus dem Anbau (vgl. Zah et al. 2007).

Treibhausgasemissionen). In der Schweiz sind die ökologischen Anforderungen an den Einsatz von Biotreibstoffen hoch, weshalb durch die Verwendung von Biotreibstoffen keine grösseren neuen Schadstoffbelastungen entstehen sollten (vgl. auch Kapitel 2.1.3). Die Effizienzerhöhung bei den Benzin- und Dieselfahrzeugen, die in diesem Zukunftsbild über 90% der Fahrleistung erbringen, führt zu einer Reduzierung der emittierten Luftschadstoffe. Damit wird davon ausgegangen, dass die Schadstoffbelastung der Luft beim Zukunftsbild ICI gegenüber dem BAU weiter reduziert wird. Insbesondere werden durch den Einsatz von (konventionellen) Hybridfahrzeugen die Emissionen in Städten reduziert.

Im *Zukunftsbild BEV* ist eine Verschiebung der Schadstoffbelastung einerseits infolge der Batterien und andererseits durch den Einsatz von Strom statt fossilen Brennstoffen zu erwarten. Ökobilanzen für BEV zeigen, dass die Umweltbelastung generell und auch für die Schadstoffbelastung der Luft über den ganzen Lebenszyklus (Fahrzeug inkl. Batterie) in erster Linie von der Primärenergiequelle für die Stromproduktion abhängig ist.<sup>74)</sup> In der Gesamtbilanz fällt der Verbrauch wertvoller Metalle und Mineralien für die Batterie ins Gewicht. Die Emissionen in der Betriebsphase werden jedoch deutlich reduziert. Wenn der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt, kann die Belastung insgesamt reduziert werden.

Im *Zukunftsbild FCV* wird die Schadstoffbelastung primär durch die Art der Wasserstoff-Herstellung bestimmt. Detaillierte Lebenszyklusanalysen von Brennstoffzellenfahrzeugen wurden bisher noch nicht durchgeführt. Generell ist aber aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Herstellung von Wasserstoff eine Reduktion der Luftschadstoffe nur möglich, wenn diese Energie mit "sauberen" Technologien hergestellt wird. Die Beurteilung bei FCV erfolgt hier trotz des hohen Energiebedarfs leicht positiv, da im Unterschied zu den dezentralen Emissionen im BAU in der Betriebsphase eine bessere Kontrolle und Eindämmung der Schadstoffe möglich ist.

Das *Zukunftsbild HP+PT* führt zu einer starken Entwicklung in die Zielrichtung Umweltbelastungen senken. Dies ist in erster Linie dadurch zu begründen, dass der Primärenergieeinsatz in diesem Zukunftsbild sehr viel geringer ist als im BAU. Auf Basis der obigen Ausführungen ergibt sich folgende Gesamteinschätzung der Zukunftsbilder im Vergleich zum BAU:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U1.1	Luftschadstoffe senken	(✓)	(✓)	(✓)	✓

## U1.2 Lärmbelastung

Lärm entsteht in erster Linie beim Betrieb der Fahrzeuge, einerseits durch den Motor, andererseits aber auch durch Reifen-, Fahrbahn- und Windgeräusche. Neben dem Motorentyp beein-

74) Beispiele:

Wenn die Umweltbelastung ("environmental burden") über den gesamten Lebenszyklus eines BEV auf 100% festgelegt wird (Strom: durchschnittlicher Europamix), so liegt die entsprechende Belastung bei einem effizienten Benzinauto (Euro-5-Norm) bei etwa 130-160%. Der Anteil der Batterie (Produktion plus Entsorgung) macht je nach Methode bloss 7-15% aus. Vgl. D. A. Notter et al (2010). Wie hoch der Anteil der Luftschadstoffe am "environmental burden" ist, wird in der Publikation nicht explizit ausgewiesen.

Für Plug-in-Hybride, die mit amerikanischem Strommix (hoher Anteil an Strom aus Kohlekraftwerken) betrieben werden, ist die Belastung immer noch kleiner als bei Fahrzeugen mit "normalen" Verbrennungsmotoren und der Beitrag der Batterie liegt bei bloss 2-5%. Vgl. C. Samaras et. al.

Auch die Ökobilanz für ein elektrisches Fahrzeug mit ZEBRA-Batterie zeigt, dass die Gesamt-Umweltbelastung (Eco-Indicator 99) für dieses Fahrzeug - sogar wenn es mit Strom aus einem Kohle- oder einem GuD-Kraftwerk betrieben wird - klar kleiner ist, als bei einem modernen Benzin-Auto (Euro-5-Norm). Allerdings erfordert ein optimaler Einsatz dieser Batterie hohe Betriebstemperaturen. Wenn die Temperatur in der Batterie zu tief ist, kommt es zu hohen Verlusten.

(Vgl. [http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi\\_ergebnisse.html](http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi_ergebnisse.html))

flussen auch Reifen, Belag, Aerodynamik der Fahrzeugkarosserie und Fahrverhalten den Lärmpegel.

Bei Geschwindigkeiten unter 40 km/h dominiert bei Personenwagen das *Antriebsgeräusch* des Fahrzeugs (bei LW ab einer Geschwindigkeit von 65 km/h). Dieses wird bei Verbrennungsmotoren durch eine Kombination von Drehzahl und Art und Zustand des Motors verursacht. Vor allem in Städten sind herkömmliche Motorengeräusche von Verbrennungsmotoren eine Hauptquelle für Lärm. Der Einsatz von Elektromotoren in den Zukunftsbildern BEV und FCV würde diesbezüglich eine deutliche Verbesserung mit sich bringen. Allerdings sind damit auch Risiken verbunden, vgl. dazu G1.1 Verkehrssicherheit.

Die *Roll- und Windgeräusche* sind weitgehend unabhängig von der Antriebstechnologie und dem verwendeten Treibstoff und haben in allen vier Zukunftsbildern denselben Einfluss auf die Lärmentstehung. Die beeinflussenden Faktoren hierbei sind Geschwindigkeit (Lärm nimmt mit dritter Potenz zu), Bereifung, Strassenbelag, Fahrzeuggewicht und Witterung. Ab einer Geschwindigkeit von 40 km/h ist das Rollgeräusch eines Fahrzeugs dominierend. Erst ab ca. 160 km/h machen Windgeräusche einen bedeutenden Anteil am Lärm aus, hauptsächlich beeinflusst durch Geschwindigkeit, Aerodynamik und Windverhältnisse. Dieser Faktor ist damit in der Schweiz vernachlässigbar.

Die durch den Verkehr hervorgerufene Lärmbelastung ist bereits seit längerem ein aktiv diskutiertes Thema in der Politik. Der Fokus wird dabei vor allem auf die Durchführung von Massnahmen zur Lärmreduktion gelegt. Neben der Errichtung von Lärmschutzwänden entlang stark befahrener Strassen, spielt auch die Installation von Schallschutzfenstern in besonders betroffenen Wohngebieten eine wichtige Rolle. Quellenbezogene Massnahmen, wie die Verwendung von geräuscharmen Strassenbelägen oder die Entwicklung lärmarmen Bereifung, gewinnen zudem vermehrt an Bedeutung. Diese Massnahmen wirken unabhängig von Antriebstechnologien oder Treibstoffen.

Damit ergibt sich die folgende Einschätzung der Zukunftsbilder im Vergleich zum BAU-Zukunftsbild:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U1.2	Lärmbelastung senken	(✓)	✓	✓	✓

Die Lärmbelastung wird durch den Einsatz von Elektromotoren insbesondere in bewohnten Gebieten deutlich reduziert, wenn ein relativ grosser Anteil der Flotte aus Elektrofahrzeugen besteht. Auch im ICI wird durch den Einsatz von konventionellen Hybrid-Fahrzeugen der Lärm in dicht besiedelten Gebieten reduziert.

### **Elektroautos und Lärm**

**Motorenlärm:** Damit der Gesamt-Verkehr signifikant leiser wird, muss ein relativ bedeutender Anteil der Flotte aus Elektrofahrzeugen bestehen

**Reifenlärm:** geht man davon aus, dass künftige Elektro-Autos einen vergleichbaren Standard an Komfort und Sicherheit aufweisen wie heutige PWs, dann werden sie auch in etwa dasselbe wiegen (Batterien!). Da das Gewicht massgebend das Reifen-Fahrbahn-Geräusch beeinflusst, ist von dieser Seite kein signifikanter Emissions-Gewinn zu erwarten. Bei den Reifen für Elektrofahrzeuge wird zudem grossen Wert auf geringen Rollwiderstand gelegt (gesteigerte Reichweite), solche Reifen werden voraussichtlich eine eher harte Gummimischung aufweisen, was den Reifen tendenziell lauter macht. Hingegen werden die Reifen vermutlich wieder schmaler werden, was die Emission verringern sollte. Welcher Effekt schlussendlich überwiegt lässt sich noch nicht abschätzen. Unter den genannten Voraussetzungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass lärmarme Beläge auch bei einem hohen Elektrofahrzeug-Anteil die Lärmemission signifikant reduzieren.

### 5.3.2 U2 Klima schützen

Treibhausgasemissionen (insbesondere CO<sub>2</sub>) führen zu einer Veränderung des Klimas. Die Belastung durch Treibhausgase muss gebremst bzw. reduziert werden.

#### U2.1 Treibhausgasemissionen senken

Treibhausgasemissionen entstehen beim Betrieb des Fahrzeugs, bei seiner Herstellung, bei der Energiebereitstellung und auch beim Bau der Infrastruktur. Bei heutigen Verbrennungsmotoren entstehen etwa 70% der Emissionen im Betrieb, 10-15% bei der Energiebereitstellung und der Rest bei Unterhalt, Herstellung und Entsorgung von Fahrzeug und Infrastruktur (Spielmann & de Haan 2008).

Elektromotoren sind von ihrem Wirkungsgrad her deutlich effizienter als Verbrennungsmotoren, daher haben sie ein Potenzial, die Treibhausgasemissionen zu senken. Die Höhe der Emissionen hängt jedoch davon ab, wie die im Fahrzeug eingesetzte Energie (Strom, Wasserstoff) hergestellt wird. Bei den im Folgenden dargestellten Berechnungen wird für die Treibhausgasemissionen der Stromproduktion die CO<sub>2</sub>-Intensität gemäss dem heutigen Schweizer Strom-Verbrauchsmix verwendet. Zusätzlich wird eine Bandbreite von minimalen bis maximalen Werten dargestellt. Das Minimum entspricht Strom aus Wasserkraft, das Maximum Strom aus Kohlekraftwerken<sup>75)</sup>. Wie sich die gesamten Emissionen durch unterschiedliche Stromarten verändern ist für die Zukunftsbilder 2050 in Tabelle 32 dargestellt.

Auch bei Emissionen aus den Vorketten der Produktion von fossilen Treibstoffen wird eine Bandbreite dargestellt: Für die Zukunft ist durch die höheren Anforderungen zur Förderung von unkonventionellem Erdöl mit höheren Emissionen zu rechnen.

Für jedes Zukunftsbild wurden die Treibhausgasemissionen berechnet, die beim Betrieb der Fahrzeuge und bei der Bereitstellung der Energie ausgestossen werden ("well-to-wheel"). Die Grundlagen der in den folgenden Abbildungen 25 und 26 dargestellten Resultate sind im Anhang A6 dokumentiert.

---

75) Dabei wird für Strom aus Kohlekraftwerken mit einem heutigen Faktor für spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen gerechnet. Allfällige CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage) werden nicht berücksichtigt.

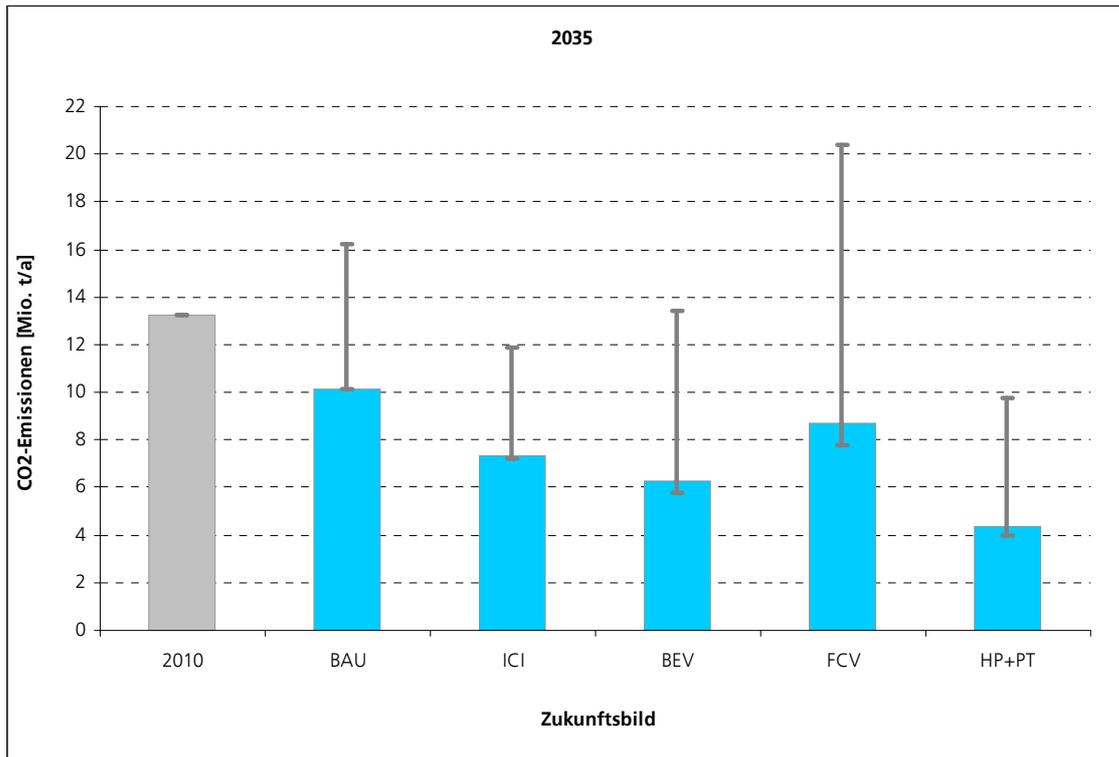


Abbildung 25: CO<sub>2</sub>-Emissionen angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente total ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2035<sup>76)</sup>. Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

Durch die hohen Anteile an fossilen Treibstoffen ist im Jahr 2035 die Bandbreite der Emissionen nach unten beschränkt. Bei steigenden Anteilen von nicht-konventionellem Erdöl werden die spezifischen Emissionen deutlich höher als heute. Bei den Zukunftsbildern BEV und FCV wird die Bandbreite der CO<sub>2</sub>-Emissionen zudem durch die Art der eingesetzten Elektrizität bestimmt. Wenn die Emissionen im oberen Bereich der angegebenen Bandbreite zu liegen kommen werden die durch effizientere Antriebe erreichten Einsparungen zumindest teilweise wieder wettgemacht oder sogar übertroffen. Einzig bei HP+PT ist auf jeden Fall eine deutliche Reduktion sichtbar.

76) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder:  
**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

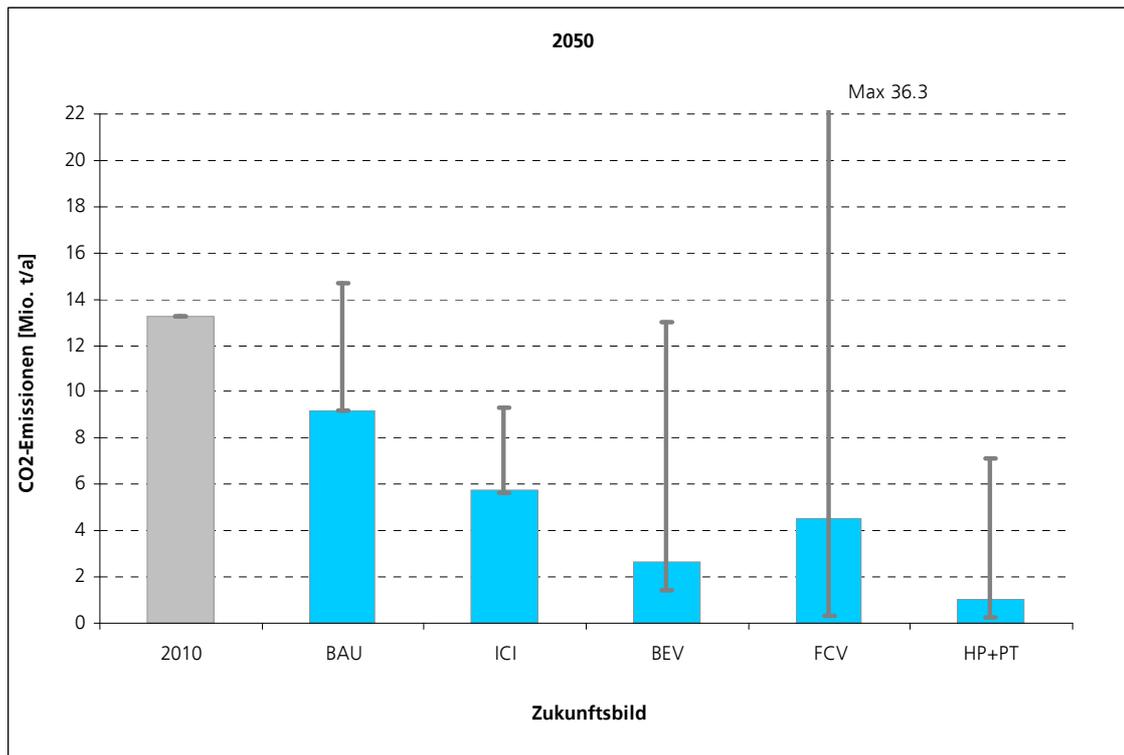


Abbildung 26: CO<sub>2</sub>-Emissionen angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente total ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050<sup>77)</sup>. Für das FCV-Zukunftsbild ist der Primärenergieverbrauch für H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse dargestellt.

Im Jahr 2050 wird die Bandbreite bei den Zukunftsbildern mit hohen Anteilen Strom oder Wasserstoff sehr gross. Entscheidend ist nun, wie dieser Strom und Wasserstoff produziert werden. Die Unterschiede durch die Stromproduktion sind in Tabelle 32 aufgeführt (sowie ergänzend dazu als Abbildung in Anhang A6). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wasserstoffherstellung via Elektrolyse und Erdgasreformation sind in Abbildung 27 einander gegenübergestellt.

Das *Zukunftsbild ICI* bringt aufgrund der verbesserten Energieeffizienz eine Verbesserung gegenüber dem BAU. Klar am tiefsten sind die Treibhausgasemissionen beim *Zukunftsbild HP+PT*, auch hier sind die Emissionen aber unterschiedlich hoch, je nachdem wie der benötigte Strom erzeugt wird.

Werden die Elektrofahrzeuge im Zukunftsbild *BEV* im Jahr 2050 mit Strom entsprechend dem heutigen Schweizer Strom (Verbrauchsmix Schweiz; Hauptwert im Diagramm) betrieben, so sind die Treibhausgasemissionen deutlich tiefer als im BAU und auch tiefer als im Zukunftsbild *ICI*. Werden allerdings die BEV mit CO<sub>2</sub>-intensivem Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken betankt, so werden die Emissionen das BAU oder sogar die heutigen Emissionen übertreffen. Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Entsorgung der Batterien wurden bei den Berechnungen nicht berücksichtigt. Verschiedene Ökobilanzen zeigen jedoch, dass dieser Beitrag klein ist.<sup>78)</sup>

77) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

78) Für Plug-in-Hybride, die mit amerikanischem Strommix (hoher Anteil an Strom aus Kohlekraftwerken) betrieben werden, verursachen Herstellung und Entsorgung der Batterie bloss 2 - 5% der Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs (vgl. C. Samaras et. al. 2008). Für reine Elektrofahrzeuge, die mit Schweizer oder europäischem Strommix betrieben werden, ist der prozentuale Anteil der Batterien wegen der tieferen Emissionen im Betrieb der Fahrzeuge allenfalls etwas höher. Der obere Rand der Bandbreite der Treibhausgasemissionen in den dargestellten Abbildungen ist jedoch konservativ festgelegt worden, weil er mit einer heutigen CO<sub>2</sub>-Intensität für Strom aus Kohlekraftwerken berechnet wurde. Kohlekraftwerke im Jahr 2050 werden voraussichtlich tiefere Emissionen aufweisen,

Die Bandbreite beim *Zukunftsbild FCV* ist besonders gross, weil die Herstellung von Wasserstoff energieintensiv ist. Für das Zukunftsbild FCV wird im Jahr 2050 für die Herstellung via Elektrolyse gut dreimal mehr Strom benötigt als für das Zukunftsbild BEV. Deshalb ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber dem BAU nur möglich, wenn der benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Dies ist eine sehr grosse Herausforderung, wie die Beispiele zur benötigten Strombereitstellung in Tabelle 29 zeigen. Bei CO<sub>2</sub>-intensiver Stromproduktion ist mit einem deutlichen Anstieg gegenüber heute oder dem BAU zu rechnen (mehr als eine Verdoppelung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem worst-case des BAU).

Die in der obigen Abbildung dargestellte Bandbreite der Treibhausgasemissionen ist in der folgenden Tabelle differenziert nach verschiedenen Arten der Stromproduktion dargestellt (grafische Darstellung vgl. Anhang A6). Berücksichtigt werden nur die Zukunftsbilder, in denen Strom als Treibstoff direkt oder indirekt zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt wird. Neben den verschiedenen Technologien und dem heutigen Produktions- und Verbrauchsmix werden auch zwei unterschiedliche Szenarien zur zukünftigen CO<sub>2</sub>-Intensität des europäischen Strommix betrachtet (Eurelectric 2010). Im Szenario "Baseline" wird unterstellt, dass die bisher beschlossenen Massnahmen weitergeführt werden, so z.B. das Emissionshandelssystem. Die resultierenden Emissionen entsprechen etwa denjenigen mit dem heutigen Schweizer Verbrauchsmix (Tabelle 32). Im Szenario "Power Choices" wird das Ziel verfolgt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt um 75% zu reduzieren. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, soll einerseits die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien und aus Atomkraft gesteigert werden und andererseits Kohlenstoff abgeschieden und gespeichert werden (CCS). Wird dieses Ziel erreicht, liegen die Emissionen in allen Zukunftsbildern am unteren Ende der in Abbildung 26 angegebenen Bandbreiten.

CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Strommix [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	2050		
	BEV	FCV	HP+PT
Wasserkraft	1.4	0.3	0.2
Atomkraft	1.5	0.5	0.3
<b>Prognose eurelectric "Power Choices"</b>	<b>1.5</b>	<b>0.8</b>	<b>0.3</b>
CH Produktionsmix	1.6	0.8	0.3
Windkraft	1.6	0.8	0.3
Photovoltaik	2.1	2.6	0.7
<b>Prognose eurelectric "Baseline"</b>	<b>2.5</b>	<b>3.9</b>	<b>0.9</b>
<b>CH Verbrauchsmix</b>	<b>2.7</b>	<b>4.5</b>	<b>1.0</b>
Gas (GuD)	5.6	14.2	2.9
UCTE Produktionsmix	6.5	17.4	3.5
Kohle	12.2	36.3	7.0

Tabelle 32: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Zukunftsbildern 2050 je nach Art des eingesetzten Strommixes (grafische Darstellung vgl. Anhang A6)

Wird der Wasserstoff mittels Dampfreformierung erstellt, so sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen tiefer als beim BAU, doch für das Zukunftsbild FCV 2050 würden dazu rund 22 TWh/a an Erdgas benötigt, was rund 50% der Diesel- und Benzinnachfrage im Jahr 2010 entspricht.

weil sie beispielsweise mit CCS (Carbon Capture and Storage) ausgerüstet sind (allerdings sind auch dort Vorketten-Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen).

Auch die Ökobilanz für ein elektrisches Fahrzeug mit ZEBRA-Batterie zeigt, dass die Gesamt-Umweltbelastung (Eco-Indicator 99) für dieses Fahrzeug - sogar wenn es mit Strom aus einem Kohle- oder einem GuD-Kraftwerk betrieben wird - klar kleiner ist, als bei einem modernen Benzin-Auto (Euro-5-Norm).

(Vgl. [http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi\\_ergebnisse.html](http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi_ergebnisse.html))

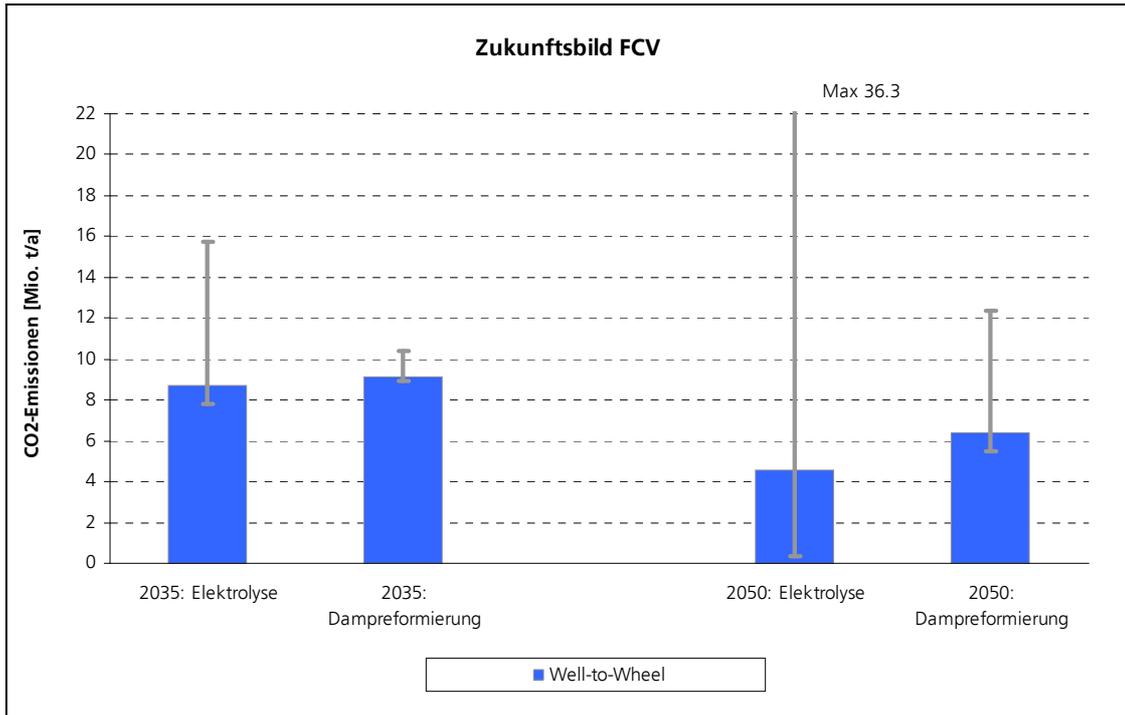


Abbildung 27: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen je nach Art der Wasserstoffherstellung

In den obigen Vergleichen zwischen den Zukunftsbildern ist zu berücksichtigen, dass im Zukunftsbild HP+PT tiefere Fahrleistungen unterlegt sind als in den andern. Deshalb werden hier ergänzend die spezifischen Emissionen dargestellt (Tabelle 32). Diese sind in HP+PT ebenfalls am tiefsten, weil kleinere, effizientere Fahrzeuge eingesetzt werden. Bei den hier dargestellten Werten werden die Emissionen der gesamten Kette zur Energiebereitstellung, vom Abbau der Rohstoffe bis zum Betrieb des Fahrzeugs berücksichtigt ("Well-to-Wheel") (Tabelle 33). Deshalb sind die Werte nicht direkt vergleichbar mit den aktuell diskutierten Zielwerten<sup>79)</sup>, die nur die Betriebsphase ("Tank-to-Wheel") betreffen.

	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	
CO <sub>2</sub> - Emissionen 2035	149	108	92	128	78	g CO <sub>2</sub> /km
CO <sub>2</sub> - Emissionen 2050	126	79	37	62	18	g CO <sub>2</sub> /km

Tabelle 33: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen ("Well-to-Wheel") pro Fahrzeugkilometer (g CO<sub>2</sub>/km)

Diese spezifischen Emissionswerten basieren auf dem heutigen Stromverbrauchsmix, der im Vergleich verschiedener Technologien eine mittlere CO<sub>2</sub>-Intensität aufweist.

Zusammenfassend ergibt sich damit die folgende Beurteilung der Zukunftsbilder: In allen Zukunftsbildern besteht das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Eine wichtige Voraussetzung ist jedoch, dass der Strom mit CO<sub>2</sub>-armen Technologien produziert wird. Dies gilt insbesondere im FCV-Zukunftsbild mit einem hohen Energiebedarf.

79) Als indirekter Gegenvorschlag zur Volksinitiative "Für menschenfreundlichere Fahrzeuge" sollen gemäss Botschaft des Bundesrates (BBl 2010 973) maximale Emissionswerte festgelegt werden, die sich an den Zielen der EU orientieren. Diese Ziele sehen vor, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2015 auf 130 g/km zu senken.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U2.1	Treibhausgasemissionen senken	(✓)	+/-	+/-	✓

### 5.3.3 U3 Ressourcen schonen

Die Effizienz der Rohstoff- und Energienutzung im gesamten Lebenszyklus eines Produktes soll verbessert werden (Material- und Energieintensität). Dazu muss der Energieverbrauch verringert bzw. durch erneuerbare Energieträger substituiert werden. Gleichzeitig sollen der Abbau natürlicher Ressourcen und der Bodenverbrauch (Versiegelung) vermindert werden.

#### U3.1 Primärenergieverbrauch senken

Der Primärenergieverbrauch des motorisierten Individualverkehrs in den einzelnen Zukunftsbildern ist in Kapitel 4.8 hergeleitet und beschrieben worden. Für das einfachere Verständnis der unten aufgeführten Beurteilung des Indikators wird die Abbildung 28 zum Primärenergieverbrauch der verschiedenen Zukunftsbilder hier nochmals dargestellt.

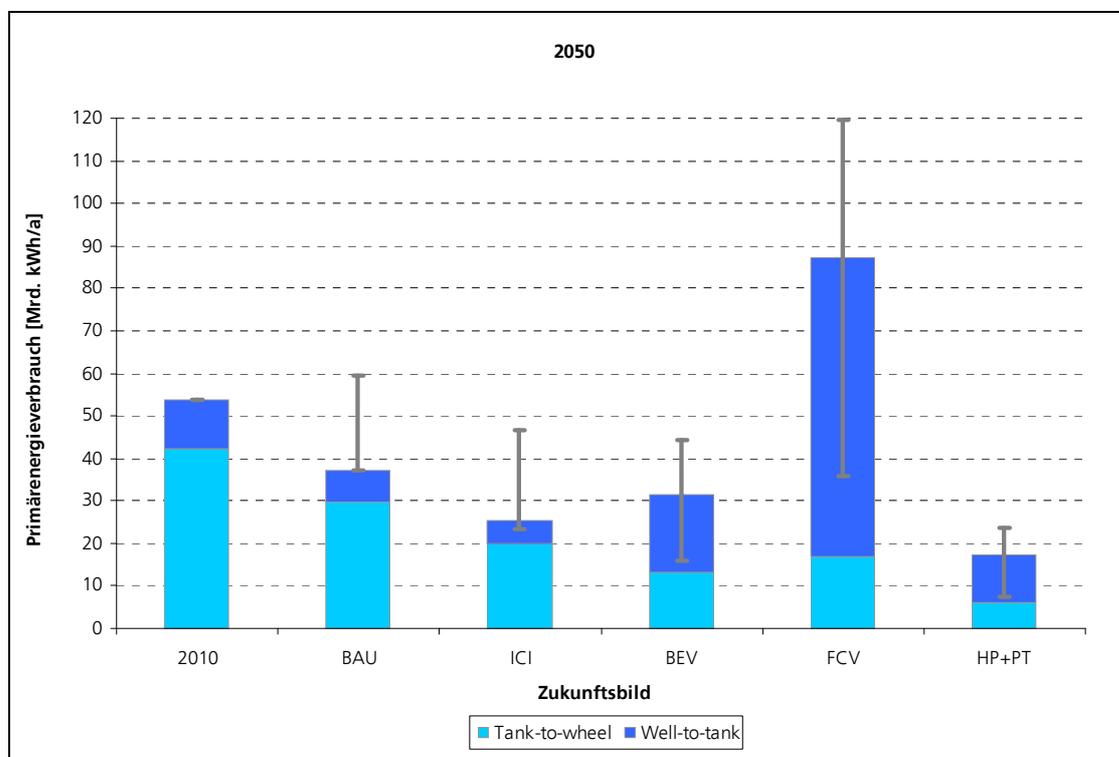


Abbildung 28: Primärenergieverbrauch ("Well-to-Wheel") in den Zukunftsbildern 2050<sup>80)</sup>. Zukunftsbild FCV mit Wasserstoff aus Elektrolyse.

#### Anteil erneuerbare Energien

Nicht direkt ersichtlich aus dem Primärenergieverbrauch ist die Menge an erneuerbaren Energien, die im jeweiligen Zukunftsbild verwendet wird. Im BAU werden ausschliesslich fossile, d.h. nicht erneuerbare Energieträger eingesetzt. Bei ICI ist der Einsatz biogener Treibstoffe unterstellt (8% im Jahr 2035 resp. 10% im 2050). Beim Strommix, der den fetten Balken in den Diagrammen zu Grunde gelegt wurde, handelt es sich um den Schweizer Strom-

80) Zu Grunde gelegte Fahrleistungen:

2010: 59 Mrd. Fzkm; BAU, ICI, BEV, FCV: 72.7 Mrd. Fzkm; HP+PT: 56.6 Mrd. Fzkm

Verbrauchsmix mit einem Anteil von 36% erneuerbarer Energie<sup>81)</sup>. Für höhere Anteile an erneuerbaren Energien sind die unteren Bereiche der angegebenen Bandbreite massgebend. Der jeweils tiefste Wert entspricht 100% Strom aus Wasserkraft (ohne Pumpspeicherung).

Der Anteil nicht erneuerbarer Energien gemessen am Endenergieverbrauch ist heute und im Zukunftsbild BAU bei 100% (Abbildung 29). Beim Einsatz von Strom (direkt oder zur Erzeugung von Wasserstoff) ist entscheidend, mit welcher Technologie der Strom hergestellt wird. In den Zukunftsbildern BEV und HP+PT wird jeweils noch ein Teil der Fahrleistung über Plug-In-Hybride abgedeckt. Deshalb verbleibt ein Anteil aus nicht erneuerbarer Energie, auch wenn der Strom zu 100% aus erneuerbaren Quellen stammt.

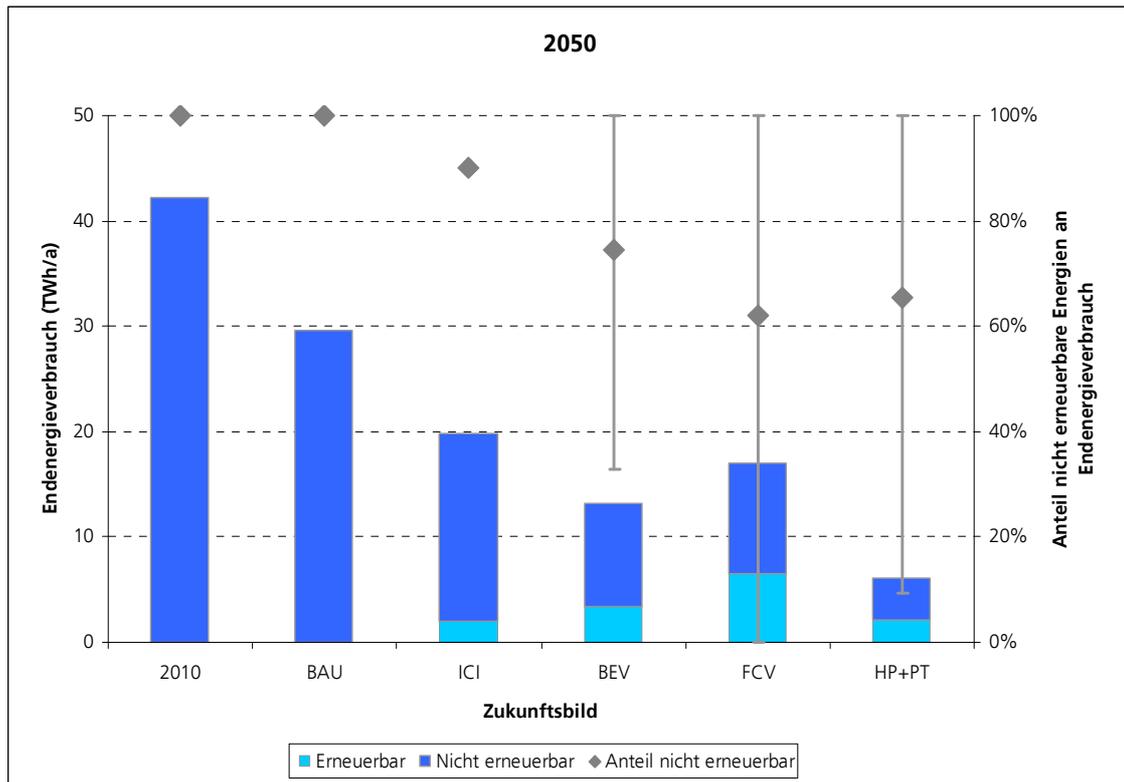


Abbildung 29: Anteile erneuerbare bzw. nicht erneuerbare Energien bei der Endenergie in den Zukunftsbildern 2050<sup>82)</sup>. (Nicht dargestellt ist der Energiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff.)

Für den Primärenergieverbrauch gemäss Abbildung 28 ergibt sich die folgende Einschätzung der Veränderung gegenüber dem BAU:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U3.1	Primärenergieverbrauch senken	✓	✓	!	✓

81) Anteile 2007: 36% aus Wasserkraft, 2% aus Abfällen und anderen erneuerbaren Energieträgern (BFE 2007: Umfrage Stromkennzeichnung).

82) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen**:  
**2010**: 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV**: 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT**: 56.6 Mrd. Fzkm

### U3.2 Bodenversiegelung reduzieren

Durch den Bau von Strassen, asphaltierten Wegen und Plätzen, Häusern, Gewerbe- und Industrieanlagen werden freie Flächen in grossem Umfang versiegelt<sup>83)</sup>. Eine starke Bodenversiegelung wirkt sich negativ auf den Wasserhaushalt aus und kann ausserdem zu einer höheren Grundwasserbelastung führen, da bei punktueller Versickerung des Niederschlages weniger Nähr- und Schadstoffe im Boden gefiltert werden können.

Die Verkehrsinfrastruktur trägt massgeblich zur Versiegelung des Bodens bei (undurchlässiges Material wie Teer, Asphalt), ebenfalls relevant aber von geringerem Ausmass sind die Anlagen zur Energieproduktion und -verteilung. Zukunftsbilder zur Mobilität können sich unterscheiden bezüglich Strassen- und Schienenwegen, Flächen für Infrastruktur zur Energieproduktion und -verteilung (Kraftwerke, Raffinerien, Tankstellen, etc.) und Siedlungsfläche.

Ausser im Zukunftsbild "HP+PT" wird in den Zukunftsbildern von der gleichen Fahrleistung ausgegangen. Deshalb sind bezüglich der *Verkehrswege* keine relevanten Unterschiede im Vergleich zum "BAU" festzustellen. Bei einer reduzierten Fahrleistung in "HP+PT" ist allenfalls ein geringerer Flächenbedarf für Strassen notwendig, dafür dürfte der Bedarf an Schienenwegen steigen.

Die *Infrastruktur zur Energieverteilung* ist im Vergleich zu den Verkehrswegen weniger bedeutend für die Versiegelung. Unterschiede zwischen den Zukunftsbildern sind beim Betrieb von Wasserstofftankstellen und bei der Installation von Ladestationen für Elektrofahrzeuge auszumachen. Da der Güterverkehr und auch ein Teil des Individualverkehrs zumindest anfangs noch mit Benzin oder Diesel betrieben werden, wird diese Infrastruktur noch länger in Betrieb sein. Die Anzahl der Zapfsäulen kann aber reduziert werden, so dass der zusätzliche Platzbedarf für Wasserstoff-Tankstellen oder Batteriewechselstationen kompensiert werden kann. Ladestationen für Elektroautos können an bestehenden Einrichtungen wie Parkplätzen oder Garagen integriert werden.

Die Bodenversiegelung durch *Infrastruktur für die Energieproduktion* wird verursacht durch den Bau von Fundamenten, Betriebs- und Produktionsgebäuden, Produktionsanlagen, Zufahrtswegen und Stellplätzen. Die Benzin- und Dieselproduktion erfolgt in grossen Raffinerien, die Herstellung von biogenen Treibstoffen geschieht in kleineren, dezentralen Anlagen. Der Flächenverbrauch durch solche Anlagen ist im Vergleich zur Verkehrsinfrastruktur sowohl in der Schweiz wie auch im europäischen Ausland von untergeordneter Bedeutung. In keinem Zukunftsbild ist ausserdem von einer relevanten Veränderung im Bereich Bodenversiegelung durch die Bereitstellung von Treibstoffen auszugehen. Bei der Stromproduktion tritt Bodenversiegelung in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei der Treibstoffproduktion lediglich bei Atomkraftwerken oder konventionell-thermischen Kraftwerken auf (Wasser-, Solar- und Windstrom führen zu keiner nennenswerten Bodenversiegelung). Auch hier ist der Einfluss auf die Bodenversiegelung im Vergleich zum Einfluss durch die Strasseninfrastruktur generell gering und es ergibt sich auch bei keinem der untersuchten Zukunftsbilder eine Veränderung mit nennenswertem Einfluss. Die Herstellung von Wasserstoff erfolgt grösstenteils in grossen Chemieanlagen, wo er z.B. als Nebenprodukt der Chlorherstellung entsteht. Auch hier gilt, dass der Einfluss auf die Bodenversiegelung gering ist.

Die *Siedlungsentwicklung* wird einerseits durch die gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Trends beeinflusst, die den einzelnen Zukunftsbildern hinterlegt sind (vgl. Kapitel 3.2). Andererseits können auch die Möglichkeiten verschiedener Technologien einen Einfluss auf die Siedlungsstruktur haben. Ob die Siedlungsstruktur durch die begrenzte Reichweite von Batterie-Fahrzeugen verdichtet werden kann oder das Wachstum der Siedlungsflächen an Agglomerationsrändern eher begünstigt, kann hier nicht vertieft untersucht werden. Die Auswirkungen auf das Fahrverhalten und die Raumentwicklung sind in weiterführenden Untersuchungen zu analysieren, die sich auf diese Fragen im Kontext der Elektromobilität beschränken.

---

83) Versiegeln = Bedecken des Bodens durch Bauwerke, so dass kein Niederschlag mehr eindringen kann und natürlich ablaufende Prozesse im Boden gestört werden

Zusammenfassend kommen wir zur Einschätzung, dass die Zukunftsbilder bezüglich Bodenversiegelung keine relevanten Unterschiede zum BAU aufweisen. Einzig im Zukunftsbild HP+PT ist eine positive Auswirkung zu erwarten. Diese beruht auf dem unterstellten Wertewandel der Gesellschaft und der daraus resultierenden Veränderungen der Siedlungsstrukturen.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U3.2	Bodenversiegelung reduzieren	≈	≈	≈	(✓)

### U3.3 Einsatz metallischer Rohstoffe minimieren

Der Fahrzeugbau gehört zu den rohstoffintensiven Branchen. Neben den klassischen Metallen wie Stahl, Aluminium und Kupfer gewinnen die seltenen Metalle (auch Elektronikmetalle genannt) wie Neodym<sup>84</sup>, Platin und Kobalt ständig an Bedeutung. Insbesondere im Elektrofahrzeugbau werden diese metallischen Rohstoffe immer wichtiger (z.B. Platin für Brennstoffzellen, Kobalt für Lithium-Ionen-Akkus oder Neodym für Permanentmagnete in Elektro- und Hybridfahrzeugen). Die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ist beschränkt und der steigende Bedarf lässt die Vorräte im Boden merklich schwinden. Unter den Gesichtspunkten einer Nachhaltigen Entwicklung entscheidend sind die handelspolitische Verfügbarkeit der Ressourcen gute Arbeitsbedingungen sowie die Reduktion der Umweltbelastungen beim Rohstoffabbau und der Weiterverarbeitung.

Während das Zukunftsbild BAU auf konventionelle Techniken setzt, erwachsen aus der Verwendung von Zukunftstechnologien (Elektromotor, Brennstoffzelle) in den Zukunftsbildern ICI (Elektromotoren für konventionelle Hybride) BEV und FCV veränderte Ressourcenanforderungen. Unterschiede zum BAU zeigen sich bei den nachfolgend beschriebenen mineralischen Rohstoffen, die in der Verwendung für elektrische Antriebs- und Speichersysteme eine Schlüsselposition einnehmen. Weitere Rohstoffe werden unabhängig vom Zukunftsbild eingesetzt werden: Neben Stahl und Aluminium sind dies auch Metalle für die in allen Zukunftsbildern vermehrt eingesetzte Elektronik.

Die folgenden Ausführungen basieren auf Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI 2009a, Fraunhofer ISI 2009b) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2009c, BGR 2010). Das Vorkommen von Ressourcen, Umweltbelastungen beim Abbau und die Möglichkeiten zur Schliessung von Stoffkreisläufen (Recycling) werden hier aus Umweltsicht betrachtet. Der Aspekt der Verfügbarkeit der Ressourcen wird unter dem Teilziel W4.2 (Verfügbarkeit der Rohstoffe gewährleisten) diskutiert.

#### Neodym

Aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften spielt Neodym eine äusserst wichtige Rolle in der Herstellung von Permanentmagneten. Diese werden für den Bau von Elektromotoren verwendet und bilden somit die Grundlage der Antriebstechnologien in den Zukunftsbildern BEV und FCV. Neodym ist ein Metall aus der Gruppe der Seltenen Erden. Entgegen dieser Gruppenbezeichnung sind ausreichende Reserven verfügbar.

Neodym kann nicht gesondert abgebaut werden, da es stets in Kombination mit anderen Metallen der Gruppe Seltene Erden in Erdoxidverbindungen (SEO) vorkommt. Die Nachfrage nach anderen Seltenen Erden liegt jedoch oftmals weit hinter derjenigen von Neodym, sodass ein Grossteil der abgebauten Metalle erstmals vor Ort deponiert wird. Bei stark ansteigendem Be-

84) Neodym (Nomenklaturempfehlung war zeitweise: Neodymium) ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Nd und der Ordnungszahl 60. Im Periodensystem steht es in der Gruppe der Lanthanoide und zählt damit auch zu den Metallen der seltenen Erden. Die Elementbezeichnung leitet sich von den griechischen Worten neos für „neu“ und didymos für „Zwilling“ (als Zwilling von Lanthan) ab. Es wird zur Herstellung stärkster Magnete verwendet.

darf an Neodym und einem Mangel an alternativen Fördermethoden ist daher zukünftig davon auszugehen, dass grosse Mengen an Erdoberflächenerz bewegt werden müssen, allerdings nur ein kleiner Anteil davon wirklich benötigt wird.

Zurzeit gibt es zudem noch kein nennenswertes Recycling von Neodym. Die weitere Verknappung der Ressource sowie steigende Preise machen die Entwicklung innovativer Recyclingkonzepte jedoch notwendig. Ein Problem hierbei besteht in der aufwendigen Abtrennung von Neodym in geringer Konzentration von anderen Metall- bzw. Kunststoffkomponenten.

### **Kupfer**

Als elektrisches Leitmaterial bildet Kupfer eine kaum ersetzbare Basis für den Bau von Autos und insbesondere Elektromotoren. In allen vier Zukunftsbildern ist durch vermehrten Einsatz technischer Mittel in Automobilen mit höherem Kupferbedarf zu rechnen. In den Zukunftsbildern BEV und FCV erhöht sich dieser Bedarf durch die Verwendung von Elektromotoren um weitere ca. 50% gegenüber heute.

Die gegenwärtig ökonomisch förderbaren Reserven von Kupfer belaufen sich auf knapp 500 Mio. Tonnen, was bei der heutigen Fördermenge für ca. 30 Jahre reichen würde. Der Anteil von recyceltem Sekundärkupfer am gesamten Kupferbedarf beträgt mittlerweile 15%, in entwickelten Ländern mit hohen Kupferpreisen liegt dieser Wert zum Teil weit höher, beispielsweise 40% in Deutschland. Geht man davon aus, dass in zukünftigen Automobilen mehr Kupfer verbaut wird und der Preis für das Metall weiter steigt, so ist eine höhere Recyclingquote sehr wahrscheinlich. Folglich kann in der Zukunft ein beachtlicher Teil des Kupferbedarfs mit Sekundärkupfer gedeckt werden.

### **Platin**

Das Edelmetall wird vor allem als Katalysator eingesetzt und stellt in Brennstoffzellen heute eine essentielle Komponente dar. Somit nimmt Platin hinsichtlich des Zukunftsbildes FCV eine zentrale Rolle ein. Die weltweiten Reserven von 71'000 Tonnen sollten bei gegenwärtiger Fördermenge für weitere 130 Jahre reichen.

Wegen seines hohen Preises hat Platin eine hohe Recyclingquote. Da im Szenario FCV komplett auf Verbrennungsmotoren verzichtet wird, kann ein Teil des zukünftigen Platinbedarfs durch Einsparung konventioneller Katalysatoren (verantwortlich für 42% des heutigen Platinbedarfs) kompensiert werden.

### **Lithium**

Bei der Herstellung von leistungsstarken Batterien hat sich Lithium als sehr geeignet erwiesen und ist deshalb im Zukunftsbild BEV als Energiespeicher in Batterien eine wichtige Ressource. Bei der gegenwärtigen Fördermenge würden die Reserven von ca. sechs Mio. Tonnen gemäss Fraunhofer ISI (2009b) für weitere 270 Jahre reichen. Die aktuell weltweit identifizierten Vorkommen würden insgesamt für ca. 10 Mia. Elektrofahrzeuge ausreichen, was der 200-fachen heutigen Produktion an Fahrzeugen weltweit entspricht (ZSW 2010).

Neben dem Ausbau vorhandener Kapazitäten zur Lithiumförderung wird heutzutage auch vermehrt an Konzepten zu sinnvollen Rohstoffrecyclingkonzepten gearbeitet. Erste Projekte zur Entwicklung von Kreislaufsystemen, in denen Sekundärlithium für die erneute Herstellung von Batterien verwendet wird, laufen bereits und sollen in Zukunft die Abhängigkeit von Importen reduzieren. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig 50 – 85% des Lithiums wiederverwertet werden können.

Zusammenfassend kommen wir aufgrund des zusätzlichen Bedarfs von knappen metallischen Rohstoffen und der damit einhergehenden, energieintensiven Steigerung der Fördermengen in allen Zukunftsbildern zu keinem eindeutigen Ergebnis. Zum einen sind unterschiedliche Metalle verschieden zu beurteilen, zum anderen sind die Auswirkungen von den Recyclingkonzepten abhängig. Die Möglichkeiten zum Recycling sind bei den genannten Rohstoffen grundsätzlich gegeben, da sie in den Fahrzeugen in konzentrierter Form eingesetzt werden und nicht über

diffuse Einträge in das Ökosystem gelangen. Die Rückgewinnung und das Recycling der Stoffe am Ende der Nutzungsdauer der Fahrzeuge oder einzelner Komponenten wie Batterien sind für eine nachhaltige Nutzung der Rohstoffe unerlässlich.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U3.3	Einsatz metallischer Rohstoffe minimieren	+/-	+/-	+/-	+/-

### 5.3.4 U4 Natürliche Vielfalt fördern

Die biologische Vielfalt stellt die Grundlage der Ernährung dar und liefert wichtige Baustoffe, Fasern, Medikamente. Für den Erhalt der Biodiversität müssen Lebensräume geschützt und die Zerschneidung von Landschaften reduziert werden.

#### U4.1 Natürliche Lebensräume erhalten

Zu betrachten sind einerseits der Bodenverbrauch für Infrastrukturanlagen und andererseits die Nutzung von natürlichen Ressourcen wie z.B. Boden, Biomasse oder Wasser für die Energieproduktion. Bezüglich Verkehrswegen und Infrastruktur zur Energieverteilung sind keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Zukunftsbildern auszumachen, wie bereits im Abschnitt zur Bodenversiegelung ausgeführt wurde (U3.2).

Je nach Energieträger gibt es unterschiedliche Auswirkungen auf natürliche Lebensräume. In der Schweiz sind allfällige Beeinträchtigungen von natürlichen Lebensräumen bei einem verstärkten Ausbau der Elektromobilität (mit Batterien oder Brennstoffzellen) möglich und bedingen eine sorgfältige Standortsuche für den Bau von Wasser- oder Windkraftwerken. Demgegenüber stehen jedoch globale positive Auswirkungen durch eine Verbrauchssenkung bei fossilen Treibstoffen. Die Erdölförderung ist je nach Technologie mit massiven Eingriffen in die Landschaft (insbesondere beim Abbau von Ölsanden) und mit erheblichen Risiken für die Ökosysteme verbunden. Auch die Produktion von Biotreibstoffen kann natürliche Lebensräume beeinträchtigen. Beispiele dazu ist die Abholzung von Wäldern für den Anbau von Ölpalmen oder die Intensivierung der Landwirtschaft für den Anbau von Energiepflanzen. Deshalb sind im ICI-Zukunftsbild, in dem Anteile von 8 bzw. 10% Biotreibstoffe unterstellt sind, die Auswirkungen auf die Biodiversität davon abhängig, wie die biogenen Treibstoffe hergestellt werden.

Auch für die Zukunftsbilder BEV und FCV ergeben sich keine eindeutigen Verbesserungen oder Verschlechterungen gegenüber dem BAU. Bei beiden Bildern ist ausschlaggebend, welche Primärenergieträger eingesetzt werden. Für das Bild HP+PT gilt dies auch, eine generell positive Entwicklung für die natürlichen Lebensräume ist aber aufgrund der deutlichen Reduktion des Energiebedarfs zu erwarten.

Zusammenfassend kommen wir zur folgenden Einschätzung:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U4.1	Natürliche Lebensräume erhalten	+/-	+/-	+/-	(✓)

Die positive Auswirkung beim Zukunftsbild HP+PT beruht einerseits auf dem deutlichen Rückgang des Energiebedarfs und andererseits auf dem unterstellten Wertewandel der Gesellschaft.

#### U4.2 Landschaftszerschneidung reduzieren

Für den Erhalt der natürlichen Vielfalt ist der Austausch zwischen verschiedenen Populationen wichtig. Dieser wird durch die Zerschneidung von Landschaften durch Verkehrswege beeinträchtigt. Wie bereits beim Thema Bodenversiegelung (U3.2) erläutert, sind diesbezüglich keine

Unterschiede zwischen den Zukunftsbildern auszumachen. Allfällige positive Effekte durch abnehmende Fahrleistungen im Bild HP+PT werden durch einen Anstieg der Nachfrage beim Schienenverkehr und dort allenfalls notwendiger Verkehrswege wettgemacht. Basierend auf diesen Überlegungen machen wir in allen Zukunftsbildern keine bedeutenden Vor- oder Nachteile gegenüber dem BAU aus:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
U4.2	Landschaftszerschneidung reduzieren	≈	≈	≈	≈

## 5.4 Wirtschaft

### 5.4.1 W1 Kosten minimieren

Ziel ist es, die gegebenen Fahrleistungen wirtschaftlich, das heisst mit möglichst niedrigen Kosten zu erreichen. Dazu sollen die Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten möglichst tief gehalten werden. Hierbei sind die Kosten der Fahrzeuge und die Kosten der Infrastruktur zu unterscheiden. Diese beiden Aspekte werden hier berücksichtigt. Weitere volkswirtschaftliche Kosten, beispielsweise externe Kosten von Lärm oder Umweltwirkungen werden hier nicht monetarisiert und sind bereits unter den Umweltzielen berücksichtigt.

#### W1.1 Investitions- und Betriebskosten für Fahrzeuge minimieren

##### Übersicht

Die Kosten der Fahrzeuge setzen sich aus festen und variablen Kosten zusammen. Feste Kosten sind unabhängig von der Fahrleistung eines Fahrzeugs, variable Kosten sind abhängig von der Fahrleistung. Zunächst werden die Berechnungen für die beiden Kostenarten erläutert. Anschliessend werden die Gesamtkosten ausgewiesen.

##### Feste Kosten

Die festen Kosten setzen sich zusammen aus den Kostenarten „zeitabhängige Abschreibung“, „Verzinsung“, „Unterstellung“ und „allgemeine Kosten (z.B. Versicherungen)“. Die Zukunftsbilder unterscheiden sich vor allem bezüglich der Abschreibungen, die auf den unterschiedlichen Anschaffungskosten entsprechend Kapitel 3 beruhen. Die nachfolgende Abbildung 30 zeigt die Kosten für einen BMW der 5-er Reihe mit ca. 3'000 cm<sup>3</sup>-Motor. Der BMW5er entspricht einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse. Da er in dieser Klasse das einzige Fahrzeug ist, von dem es auch eine Brennstoffzellenausführung gibt, dient dieses Fahrzeug hier zur Illustration.

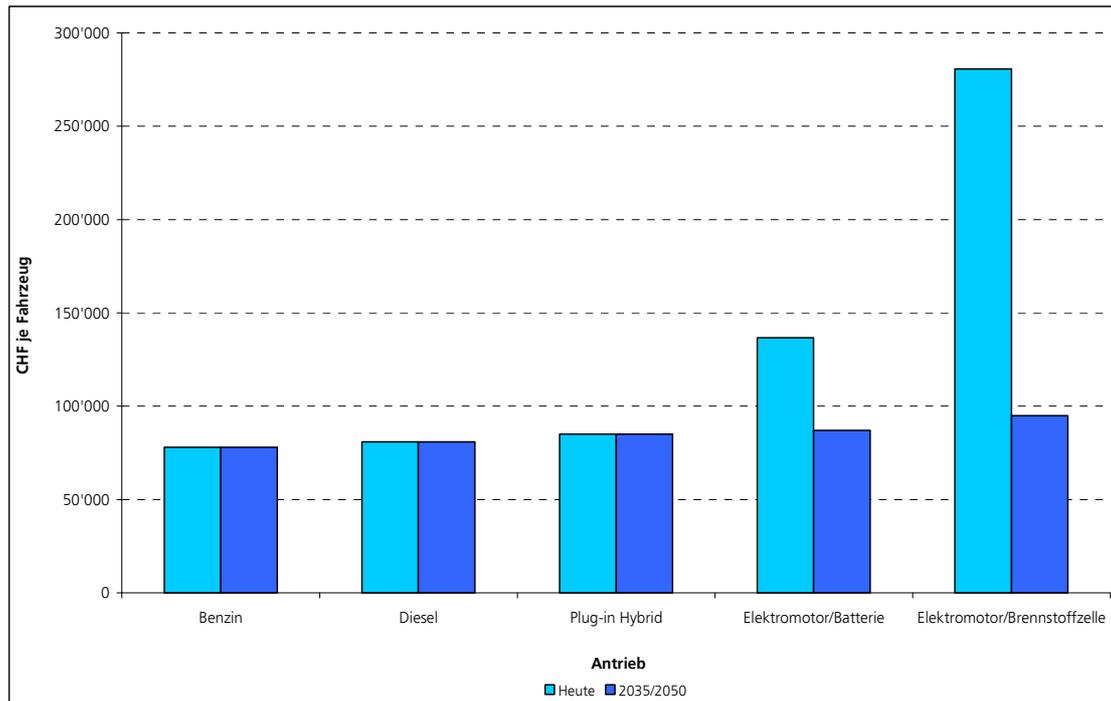


Abbildung 30: Anschaffungskosten für ein BMW der 5-er Reihe mit ca. 3'000 cm<sup>3</sup>-Motor) in den Zukunftsbildern (Kosten ohne Ladestation)

Bezüglich der batteriebetriebenen Fahrzeuge wird davon ausgegangen, dass der heutige Batteriepreis in Höhe von 900 bis 1300 CHF/kWh bis in Jahr 2035 auf 400 CHF gesenkt werden kann. Dies vor allem in Folge von Massenproduktion. Lernkurveneffekte werden gering sein, da aufgrund der heute bereits bestehenden grossen Verbreitung von Batteriesystemen (z.B. Laptop) hier keine grossen Änderungen zu erwarten sind. Auch hinsichtlich Fahrweite (bis max. 200 km) ohne Nachladen und bezüglich der kalendarischen Lebensdauer von 12 Jahren sind hier optimistische Annahmen hinterlegt.<sup>85)</sup> Letztlich verbleiben aber ca. 7 - 13% höhere Anschaffungskosten als bei einem Fahrzeug mit Dieselmotor.

Hinsichtlich des Kaufverhaltens der Verbraucher ist festzuhalten, dass die Anschaffungsentscheide eines Autos nur zu einem geringen Teil von Kaufpreis abhängig sind. Status, Prestige und Wünsche an die Ausstattung von Fahrzeuge führen heute schon zu erheblichen Preisunterschieden von Fahrzeugen eines gleichen Modells. Deshalb sind die Mehrkosten kein Ausschlusskriterium für teurere Fahrzeuge in einzelnen Zukunftsbildern. Es bedarf aber guter Argumente oder Emotionen, warum die Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug getätigt werden sollen.

#### Variable Kosten

Die variablen Kosten setzen sich zusammen aus den fahrleistungsabhängigen Abschreibungen, den Reifenkosten, den Treibstoff- und Energiekosten sowie den Servicekosten. Die Berechnung der variablen Kosten beruht auf den Fahrleistungen je Zukunftsbild, den Verbrauchsfaktoren und den Energiepreisen. Die Annahmen zu den Energiepreisen sind in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt, wobei in Tabelle 34 die Energiepreise in den für Konsumenten üblichen Dimensionen dargestellt werden. Tabelle 35 zeigt die Energiepreise je Kilowattstunde. Für die Berechnungen werden die Preise aus Gründen der Vergleichbarkeit ohne Steuern und Abgaben (Faktorkosten) berücksichtigt.

Wichtige Annahmen zu den Energiepreisen stützen sich auf die folgenden Quellen:

85) Vgl. Kapitel 3. Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010)

- Weltmarktpreis Rohöl basierend auf Szenarien der Internationalen Energieagentur für das Jahr 2030 (IEA 2009)
- Strompreise basierend auf den Energieperspektiven des Bundesamtes für Energie für das Jahr 2035 (BFE 2007b)
- Entwicklung der Preise ab 2030/2035: Preissteigerung von real jährlich 2.5 Prozent, entsprechend Strompreissteigerungen beim oberen Wert in den Energieperspektiven.

Die Entwicklung der Weltmarktpreise für Rohöl ist von zahlreichen Faktoren abhängig, die heute nicht vorhersehbar sind. Basierend auf den heutigen Informationen zu Angebot und Nachfrage ist spätestens ab den 2030er-Jahren mit deutlichen Preissteigerungen zu rechnen (vgl. dazu Prognosen zur Erdölproduktion in Abbildung 8). Der Anstieg der Kosten von Erdölprodukten könnte durch die Ausweitung der Produktion von synthetischem Treibstoff aus Kohle (CtL, Coal-to-Liquid) gedämpft werden. Allerdings ist CtL aus verschiedenen ökologischen und technisch-ökonomischen Aspekten negativ zu beurteilen und die Verbreitung der Technologie hängt stark von den politischen Rahmenbedingungen ab.<sup>86)</sup>

		Jahr						
		2010	2035			2050		
			Unterer Wert	Mittelwert	Oberer Wert	Unterer Wert	Mittelwert	Oberer Wert
Weltmarktpreis Rohöl	[US-\$/barrel]	80 1)	90	102.5	115 6)	130	148	167 11)
Tankstellenabgabepreise								
Benzin	- Faktorkosten [CHF/l]	0.73 2)	0.82	0.94	1.05 7)	1.19	1.36	1.52 7)
	- Steuern und Abgaben [CHF/l]	0.93 2)	0.93	0.93	0.93 8)	0.93	0.93	0.93 8)
	<b>Summe [CHF/l]</b>	<b>1.66 3)</b>	<b>1.75</b>	<b>1.87</b>	<b>1.98</b>	<b>2.12</b>	<b>2.28</b>	<b>2.45</b>
Diesel	- Faktorkosten [CHF/l]	0.80 2)	0.90	1.02	1.15 7)	1.30	1.48	1.66 7)
	- Steuern und Abgaben [CHF/l]	0.92 2)	0.92	0.92	0.92 8)	0.92	0.92	0.92 8)
	<b>Summe [CHF/l]</b>	<b>1.72 3)</b>	<b>1.82</b>	<b>1.94</b>	<b>2.07</b>	<b>2.22</b>	<b>2.40</b>	<b>2.58</b>
Strom	[CHF/kWh]	0.20 4)	0.20	0.29	0.38 9)	0.29	0.42	0.54 12)
Wasserstoff	[CHF/kg]	11.44 5)	12.87	14.66	16.45 10)	18.64	21.23	23.82 11)
Quellen:								
1) <a href="http://www.tecson.de/prohoel.htm">http://www.tecson.de/prohoel.htm</a> (Stand 11. Juni 2010)								
2) EBP (2007): Anteil Faktorkosten am Tankstellenabgabepreis								
3) Tankstellenabgabepreis 2010 entsprechend <a href="http://www.tanktipp.ch">www.tanktipp.ch</a> und TCS (Stand 13.06.2010).								
4) Eidgenössische Elektrizitätskommission (ElCom), Durchschnittspreis Haushalte Schweiz, <a href="http://www.strompreis.elcom.admin.ch/ShowCat.aspx?placeNumber=261&amp;opID=565">http://www.strompreis.elcom.admin.ch/ShowCat.aspx?placeNumber=261&amp;opID=565</a> ; .								
5) Ludwig Bölkow Systemtechnik, Fraunhofer ISI, Mai 2010.								
6) IEA (2009)								
7) Hochrechnung Faktorkosten mit Veränderung Weltmarktpreis Rohöl								
8) Real konstant								
9) Spannweite Energieperspektiven 2035, wobei als unterer Wert der Wert 2010 verwendet wird (in Energieperspektive 0.18 CHF/kWh).								
10) Herstellung Wasserstoff aus Erdgas: Preissteigerung 2010->2035 entsprechend Weltmarktpreis Rohöl.								
11) Preissteigerung bis 2035 und 2050 entsprechend Strom um 2,5%/a.								
12) Preissteigerung von 2.5%/a entsprechend 2010-> oberer Wert Energieperspektiven 2035.								

**Tabelle 34:** Reale Treibstoff- bzw. Energiepreise bezogen auf die aus Konsumentensicht relevanten Einheiten

86) Eine ausführliche Darstellung von Chancen und Risiken von CtL findet sich in der Dissertation von Daniel Vallentin (2009).

		Jahr						
		2010	2035			2050		
			Unterer Wert	Mittelwert	Oberer Wert	Unterer Wert	Mittelwert	Oberer Wert
Weltmarktpreis Rohöl	[US-\$/barrel]	80 <sup>1)</sup>	90	102.5	115 <sup>6)</sup>	130	148	167 <sup>11)</sup>
Tankstellenabgabepreise								
Benzin								
- Faktorkosten	[CHF/kWh]	0.08 <sup>2)</sup>	0.09	0.11	0.12 <sup>7)</sup>	0.14	0.15	0.17 <sup>7)</sup>
- Steuern und Abgaben	[CHF/kWh]	0.11 <sup>2)</sup>	0.11	0.11	0.11 <sup>8)</sup>	0.11	0.11	0.11 <sup>8)</sup>
<b>Summe</b>	<b>[CHF/kWh]</b>	<b>0.19 <sup>3)</sup></b>	<b>0.20</b>	<b>0.21</b>	<b>0.23</b>	<b>0.24</b>	<b>0.26</b>	<b>0.28</b>
Diesel								
- Faktorkosten	[CHF/kWh]	0.09 <sup>2)</sup>	0.10	0.12	0.13 <sup>7)</sup>	0.13	0.15	0.17 <sup>7)</sup>
- Steuern und Abgaben	[CHF/kWh]	0.10 <sup>2)</sup>	0.10	0.10	0.10 <sup>8)</sup>	0.09	0.09	0.09 <sup>8)</sup>
<b>Summe</b>	<b>[CHF/kWh]</b>	<b>0.20 <sup>3)</sup></b>	<b>0.21</b>	<b>0.22</b>	<b>0.24</b>	<b>0.23</b>	<b>0.24</b>	<b>0.26</b>
Strom	[CHF/kWh]	0.20 <sup>4)</sup>	0.20	0.29	0.38 <sup>9)</sup>	0.29	0.42	0.54 <sup>12)</sup>
Wasserstoff	[CHF/kWh]	0.34 <sup>5)</sup>	0.39	0.44	0.49 <sup>10)</sup>	0.56	0.64	0.72 <sup>11)</sup>

Quellen:  
1) <http://www.tecon.de/prohoel.htm> (Stand 11. Juni 2010)  
2) EBP (2007): Anteil Faktorkosten am Tankstellenabgabepreis  
3) Tankstellenabgabepreis 2010 entsprechend [www.tanktipp.ch](http://www.tanktipp.ch) und TCS (Stand 13.06.2010).  
4) Eidgenössische Elektrizitätskommission (ElCom), Durchschnittspreis Haushalte Schweiz,  
5) Ludwig Bölkow Systemtechnik, Fraunhofer ISI, Mai 2010.  
6) IEA (2009)  
7) Hochrechnung Faktorkosten mit Veränderung Weltmarktpreis Rohöl  
8) Real konstant  
9) Spannweite Energieperspektiven 2035, wobei als unterer Wert der Wert 2010 verwendet wird (in Energieperspektive 0.18 CHF/kWh).  
10) Herstellung Wasserstoff aus Erdgas: Preissteigerung 2010->2035 entsprechend Weltmarktpreis Rohöl.  
11) Preissteigerung bis 2035 und 2050 entsprechend Strom um 2,5%/a.  
12) Preissteigerung von 2,5%/a entsprechend 2010-> oberer Wert Energieperspektiven 2035.

**Tabelle 35:** Reale Treibstoff- bzw. Energiepreise je Kilowattstunde

Die Servicekosten der Fahrzeuge basieren auf den heutigen Kosten der Benzin- und Dieselfahrzeuge. Diese liegen je nach Fahrzeugklasse und Antrieb zwischen 3700 und 4700 Franken je Jahr. Im Verhältnis zu diesen Servicekosten werden die Kosten für Plug-In-Hybride mit 200%, von BEV mit 50% und bei FCV-Fahrzeugen mit 75% geschätzt.<sup>87)</sup> Die übrigen Kosten wurden einer Untersuchung entnommen (EBP (2006)) und unterscheiden sich nicht zwischen den Antriebsarten.

Die folgenden Abbildungen 31 und 32 zeigen die variablen Kosten je Fahrzeugkilometer in den einzelnen Zukunftsbildern für das Jahr 2035 und 2050 mit dem jeweils hinterlegten Mix aus Antrieben und Treibstoffen.

87) Vgl. Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2010)

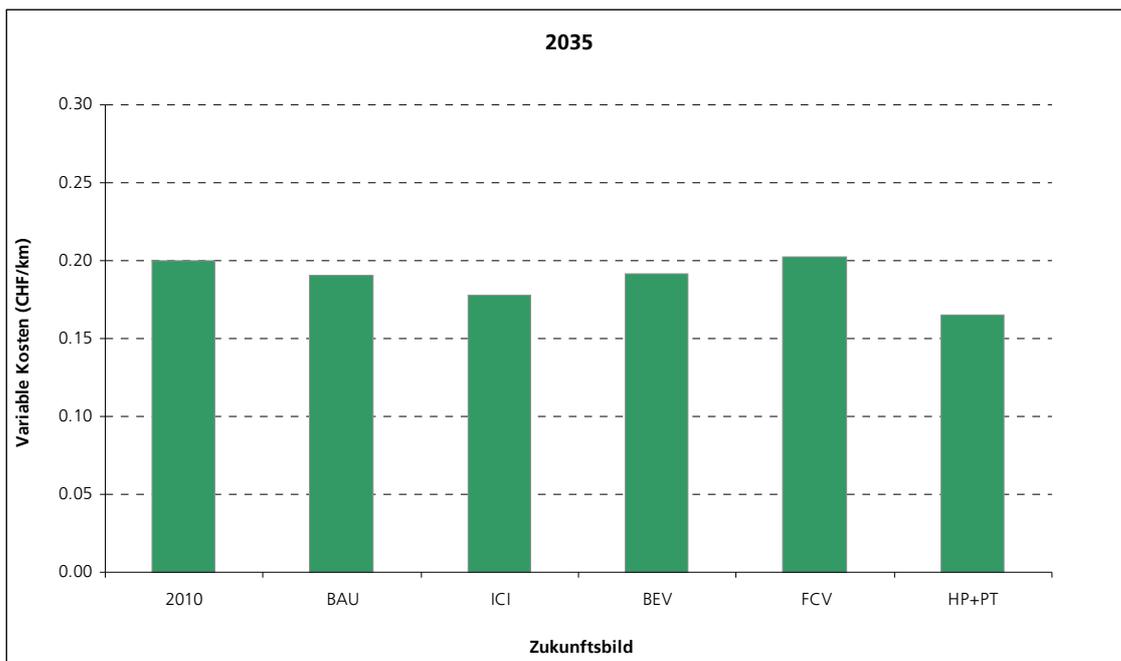


Abbildung 31: Variable Fahrzeugkosten je Fahrzeugkilometer und je Zukunftsbild Jahr 2035<sup>88)</sup>

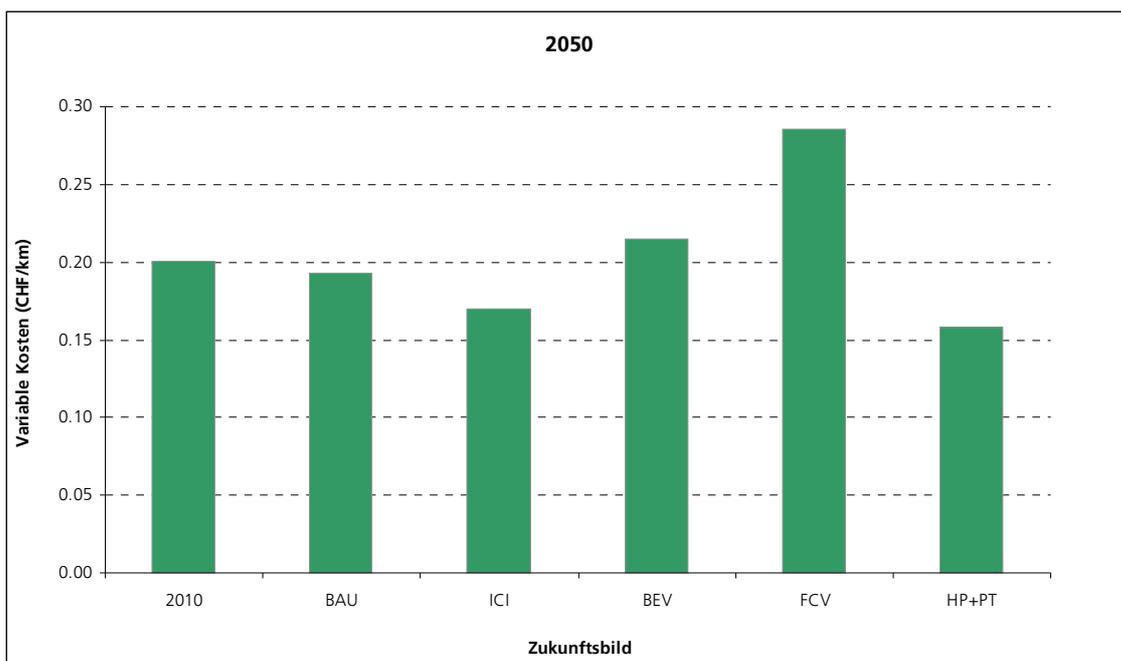


Abbildung 32: Variable Fahrzeugkosten je Fahrzeugkilometer und je Zukunftsbild für 2050<sup>89)</sup>

Während im Jahr 2035 die Kosten aufgrund der Durchmischung der Antriebe und Treibstoffe in etwa gleich sind, ändert sich dies im Jahr 2050. Werden die Steuern und Abgaben auf die Treibstoffe nicht mit betrachtet, zeigt sich, dass die Kosten vor allem im Zukunftsbild FCV ge-

88) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder:  
**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

89) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen:**  
**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

genüber heute und auch gegenüber dem BAU zunehmen. Bei BEV bleiben die Kosten annähernd konstant. Bei ICI und HP+PT sinken die spezifischen Kosten.

#### *Gesamtkosten je Zukunftsbild*

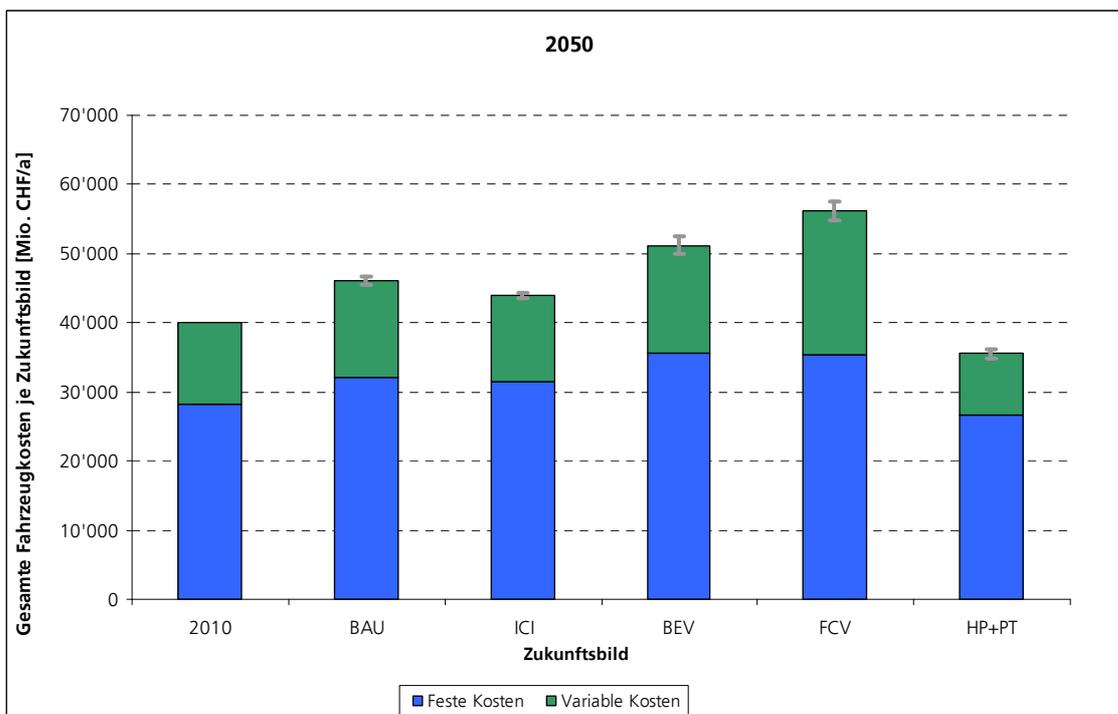
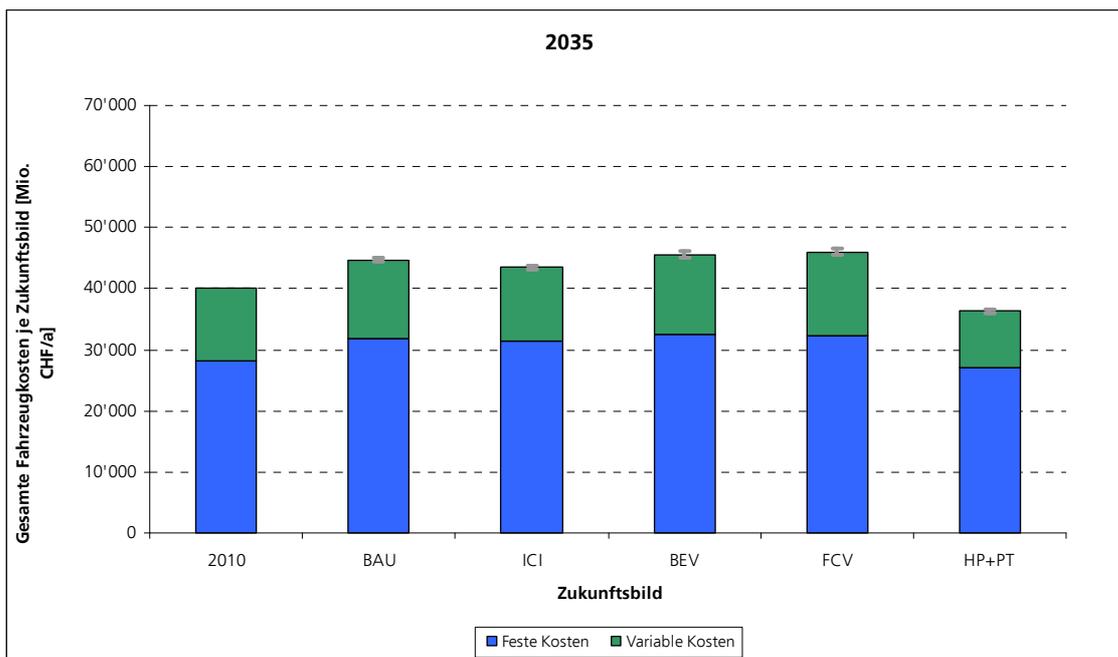
Die folgenden Abbildung 33 und 34 zeigen die Fahrzeugkosten je Zukunftsbild insgesamt und je Fahrzeugkilometer. Die Spannweiten geben die oberen und unteren Energiepreise an.

In den Zukunftsbildern BAU, ICI, BEV und FCV nehmen aufgrund der steigenden Fahrleistungen und der Steigerung der Energiepreise die Kosten bis ins Jahr 2035 zu. Gegenüber dem BAU-Zukunftsbild werden die Kosten bei ICI aufgrund der Effizienzsteigerungen leicht gesenkt. BEV und FCV liegen auf ähnlicher Höhe wie BAU. Bei HP+PT ist der Energieverbrauch auf der Strasse (ohne ÖV) deutlich geringer als im BAU.

Im Jahr 2050 sind die Kosten BEV und FCV deutlich höher als diejenigen des BAU. Sowohl die variablen als auch die fixen Kosten steigen. Die fixen Kosten aufgrund der höheren Kosten bei den Fahrzeugen, die variablen Kosten aufgrund der Preisentwicklung des Stroms gegenüber Benzin/Diesel (ohne Steuern und Abgaben). Die in der Literatur<sup>90)</sup> oftmals dargestellten Vorteile von BEV-Fahrzeugen gegenüber benzingetriebenen Fahrzeugen beruhen oftmals auf einer Betrachtung mit Steuern und Abgaben. Im Rahmen der Diskussion um Mobility Pricing ist von deren längerfristigen Existenz aber nicht auszugehen und eine Gleichbehandlung von Antrieben und Treibstoffen zu unterstellen.

---

90) Vgl. bspw. Frondel/Peistrup (2009)



Anmerkungen:

*Kosten ohne Steuern und Abgaben*

Spannweiten aufgrund oberer und unterer Werte für die Treibstoff- und Energiepreise. Im Jahr 2010 haben die Treibstoffkosten ohne Steuern und Abgaben an den gesamten variablen Kosten einen Anteil von ca. 30%

*HP+PT: Ohne Zusatzkosten öffentlicher Verkehr*

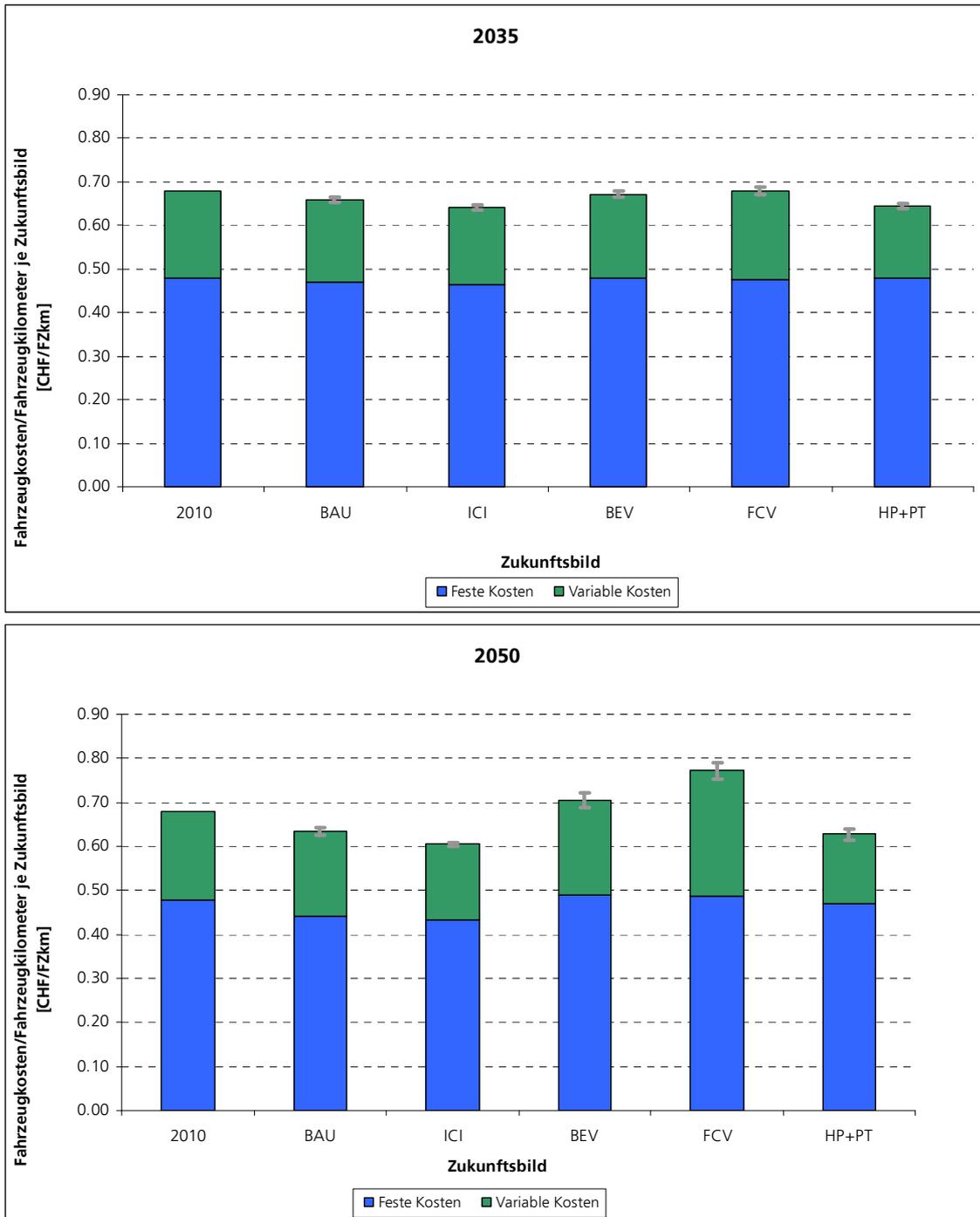
**Abbildung 33: Gesamte Fahrzeugkosten je Jahr und Zukunftsbild<sup>91)92)</sup>**

91) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder 2035:

**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

92) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen 2050:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm



Anmerkungen:

*Kosten ohne Steuern und Abgaben*

Spannweiten aufgrund oberer und unterer Werte für die Treibstoff- und Energiepreise. Im Jahr 2010 haben die Treibstoffkosten ohne Steuern und Abgaben an den gesamten variablen Kosten einen Anteil von ca. 30%

*HP+PT: Ohne Zusatzkosten öffentlicher Verkehr*

Abbildung 34: Gesamte Fahrzeugkosten je Fahrzeugkilometer und je Zukunftsbild<sup>93)94)</sup>

93) Folgende **Fahrleistungen** sind Grundlage für den Zustand 2010 und die Zukunftsbilder 2035:

**2010:** 59 Mrd. Fzkm, **BAU, ICI, BEV, FCV:** 67.8 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.5 Mrd. Fzkm

94) Zu Grunde gelegte **Fahrleistungen 2050:**

**2010:** 59 Mrd. Fzkm; **BAU, ICI, BEV, FCV:** 72.7 Mrd. Fzkm; **HP+PT:** 56.6 Mrd. Fzkm

Hieraus ergibt sich das folgende Ergebnis der Auswirkungsanalyse:

- Die Kostensenkungen durch Verbrauchsoptimierung bzw. Verhaltensänderungen ergeben Vorteile für die Zukunftsbilder ICI und HP+PT (ohne Kosten ÖV)
- FCV ist auch bei allen optimistischen Annahmen teurer als BEV. Hinzukommen zudem noch die gesamten Ausgaben, um den technologischen Stand zu erzielen.
- BEV kommt zu ähnlichen Resultaten wie das BAU-Szenario. Hinzukommen zudem noch die anfänglich hohen Aufwendungen für die Weiterentwicklung der Technologie wie auch die Kosten bis zur Realisierung der Massenproduktionsvorteile.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W1.1	Investitions- und Betriebskosten für Fahrzeuge minimieren	(✓)	!	!	(✓) (ohne ÖV)

#### Exkurs: Notwendigkeit von neuen Geschäftsmodellen

Unter anderem aufgrund der hohen Anfangskosten bei den BEV-Bildern besteht die Diskussion, inwieweit mögliche neue Geschäftsmodelle dazu führen können, die Kosten besser zu verteilen. Die Zukunftsbilder geben zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle folgenden Anstoss:

- BAU: Aufgrund der steigenden Ausgaben werden gegebenenfalls mehr Fahrgemeinschaften gebildet. Car Sharing könnte zusätzlich an Bedeutung gewinnen.
- ICI: Da die für das Verkehrsverhalten entscheidungsrelevanten Kosten insgesamt nicht steigen, bzw. sogar die spezifischen Kosten leicht sinken, sind neue Geschäftsmodelle schwierig zu etablieren.
- BEV: Durch neue Geschäftsmodelle könnten für den Verbraucher die festen Kosten variabilisiert werden. Dies kann durch Tarifmodelle geschehen, die ähnlich dem Leasing oder analog zum Handy-Markt funktionieren. Aufgrund der Möglichkeit, die Batterien zur Energiespeicherung ins Netz zu integrieren (Vehicle-to-Grid) können die Autofahrer zudem eine Vergütung durch die Energieversorger erhalten. Für lange Fahrten mit Mittelklassefahrzeugen erhalten Car-Sharing Konzepte mit (Plug-In-)Hybriden eine zunehmende Bedeutung.
- FCV: Durch neue Geschäftsmodelle für den Verbraucher können die hohen Anschaffungskosten variabilisiert werden. Allerdings sind hier die Möglichkeiten weniger umfangreich als im Zukunftsbild BEV. Hier steht vor allem das klassische Leasing im Vordergrund. Da aber auch die variablen Kosten höher sind, wird dieses Modell schwer umsetzbar sein.
- HP+PT: Im Rahmen der Elektromobilität können, müssen aber nicht neue Geschäftsmodelle entstehen. Hier sind diese Geschäftsmodelle aber nicht notwendig, da die Kosten ja sogar zurückgehen. In BEV und FCV sind sie notwendig, damit die Kosten aufgefangen werden können.

#### W1.2 Investitions- und Betriebskosten für Infrastruktur minimieren

Die Kosten der Infrastruktur beziehen sich einerseits auf die Verkehrswege und andererseits auf die Energieversorgung.

##### Kosten der Verkehrswege

Bezüglich der Kosten der Verkehrswege kann davon ausgegangen werden, dass im BAU, ICI, BEV und FCV die gleichen Strassen benötigt werden. Dies ist im Zukunftsbild HP+PT für den verbleibenden überregionalen Verkehr an sich auch der Fall. Im Zukunftsbild HP+PT werden aber erhebliche Investitionen in den öffentlichen Verkehr und die Schiene notwendig sein. Diese können hier aber nicht quantifiziert werden.

##### Kosten der Energieversorgung

Hinsichtlich der Kosten der Energieversorgung können die folgenden Punkte unterschieden werden:

1. Erzeugung, wie z.B. Förderung Rohöl, Produktion von Strom und Wasserstoff
2. Überörtliche Verteilung, wie z.B. Pipelines, Lastwagen, Schiffe
3. Kosten Tankstellen/Ladestationen

Die Kosten der Erzeugung und der überörtlichen Verteilung können nicht allein dem Verkehr zugerechnet werden, da der Strom auch für Haushalte und Industrie zur Verfügung steht. Hier werden also vor allem die Kosten der Tankstellen/Ladestationen betrachtet.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4 stellt sich der Bedarf je Zukunftsbild wie folgt dar (Tabelle 36):

Zukunftsbild	Bedarf Tankstellen/Ladestationen
BAU	Tankstellen für Benzin und Diesel wie heute
ICI	Wie BAU, allenfalls Reduktion Tankstellen aufgrund geringeren Benzin- und Dieselbedarf
BEV	Tankstellen für Diesel wie in BAU (für Güterverkehr) allenfalls Reduktion Tankstellen aufgrund geringeren Benzin- und Dieselbedarf Private und öffentliche Ladestationen
FCV	Tankstellen für Diesel wie in BAU (für Güterverkehr) Tankstellen umgerüstet auf Wasserstoff Keine Kosten überörtliche Verteilung und Herstellung
HP+PT	Tankstellen für Diesel wie in BAU (für Güterverkehr) allenfalls Reduktion Tankstellen aufgrund geringeren Benzin- und Dieselbedarf Private und öffentliche Ladestationen

Tabelle 36: Übersicht zum Bedarf an Tankstellen und Ladestationen je Zukunftsbild

Investitionsbedarf besteht somit vor allem bei den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT. Die folgende Tabelle 37 zeigt den Investitionsbedarf je Zukunftsbild. Die Quellen sind in Kapitel 4 dokumentiert.

BEV	2035			2050		
	Private Ladestationen		Öffentliche Ladestationen	Private Ladestationen		Öffentliche Ladestationen
	unterer Wert	oberer Wert		unterer Wert	oberer Wert	
1. Preis je Ladestation	270	1'700	5'000	270	1'700	5'000
2. Anzahl Ladestationen	2'500'000	2'500'000	250	5'000'000	5'000'000	250
3. Investitionen in Mio. CHF (=1*2)	675	4'250	1	1'350	8'500	1
<b>Investitionen in Mio. CHF</b>	<b>680 - 4300</b>			<b>1400 - 8500</b>		
<b>Zusätzliche Betriebskosten in Mio/Jahr</b>	k.A.	k.A.	1	k.A.	k.A.	1

FCV	2035		2050	
	Zentral LCGH2	Dezentral CGH2	Zentral LCGH2	Dezentral CGH2
Nur Kosten Tankstellen - Erzeugung und überörtliche Verteilung				
1. Preis je Tankstelle	665'000	750'000	660'000	1'500'000
2. Anzahl Tankstellen	3'700	3'700	3'700	3'700
3. Investitionen in Mio. CHF (=1*2/1)	2'461	2'775	2'442	5'550
<b>Investitionen in Mio. CHF</b>	<b>2'500 - 2'800</b>		<b>2'500 - 2'800</b>	
<b>Zusätzliche Betriebskosten in Mio/Jahr</b>	98	176	442	663

HP+PT (ohne Kosten ÖV)	2035			2050		
	Private Ladestationen		Öffentliche Ladestationen	Private Ladestationen		Öffentliche Ladestationen
	unterer Wert	oberer Wert		unterer Wert	oberer Wert	
1. Preis je Ladestation	270	1'700	5'000	270	1'700	5'000
2. Anzahl Ladestationen	2'100'000	2'100'000	250	3'800'000	3'800'000	250
3. Investitionen in Mio. CHF (=1*2)	567	3'570	1	1'026	6'460	1
<b>Investitionen in Mio. CHF</b>	<b>570 - 3600</b>			<b>1000 - 6500</b>		
<b>Zusätzliche Betriebskosten in Mio/Jahr</b>	k.A.	k.A.	1	k.A.	k.A.	1

Tabelle 37: Investitions- und Betriebskosten für Ladestationen und Wasserstofftankstellen (ohne Energieerzeugung und überörtliche Verteilung)

Protoscar (2010) schätzt die Investitionen der Infrastruktur für ein BEV-Zukunftsbild auf circa 1 Mrd. CHF für das Jahr 2020 und liegt damit in einer ähnlichen Grössenordnung wie die hier vorgelegten Zahlen. Zusammenfassend ergibt sich das folgende Bild für die Infrastrukturkosten je Zukunftsbild:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W1.2	Investitions- und Betriebskosten für Infrastruktur minimieren	≈	!	!	!

## 5.4.2 W2 Wertschöpfung erhöhen

Quantitative, aber vor allem auch qualitative und langfristige Verbesserungen der ökonomischen Leistungsfähigkeit des Landes stehen bei diesem Zielbereich im Vordergrund. Die regionale Wertschöpfung soll durch die Nutzung einheimischer Energieträger und Produkte, aber auch durch den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Exportwirtschaft in verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette erhöht werden.

### W2.1 Absatzmärkte für Schweizer Unternehmen schaffen

Für Unternehmen bestehen im Kontext des Individualverkehrs zahlreiche Märkte, von der Herstellung von Komponenten für Fahrzeuge über die Herstellung oder Vermarktung von Treibstoffen bis zu Serviceleistungen.

Im Bereich der *Fahrzeugherstellung* sind Schweizer Unternehmen heute als Zulieferer tätig. Das Potenzial zur Erschliessung neuer Märkte ist dort am grössten, wo neue Produkte entwickelt werden und nicht schon etablierte Marktstrukturen bestehen. Dies gilt für die Zukunftsbilder BEV, FCV und HP+PT. Die Schweizer Wirtschaft zeichnet sich durch ein hohes Innovationspotenzial aus. Wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Erschliessung von Marktpotenzialen sind Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie die Sicherstellung des Wissens- und Technologietransfers von den Hochschulen zu den Unternehmen.

Schweizer Firmen sind heute bereits in verschiedenen Bereichen der *Elektromobilität* tätig, z.B. Brusa Elektronik im Bereich von Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge, MES-DEA als Komponentenhersteller (ZEBRA-Batterie) oder auch in der Fahrzeugherstellung (z.B. Protoscar, Mindset).

Im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen sind in der Schweiz eine Reihe von Unternehmen und Forschungsinstitutionen tätig, die sich im Netzwerk HYDROPOLE gemeinsam für Forschung und Entwicklung im Bereich von Wasserstoffanwendungen in verschiedenen Bereichen einsetzen.<sup>95)</sup>

Unabhängig von den Zukunftsbildern bestehen Marktpotenziale im Bereich von Technologien zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen und mit der Infrastruktur. Diese gewinnt an zusätzlicher Bedeutung, wenn Batterien in Elektrofahrzeugen zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen im Stromnetz genutzt werden sollen (Vehicle to Grid).

Die *Energieversorgung* für den Individualverkehr basiert heute primär auf Erdöl, d.h. einem importierten Energieträger. Bei einem Ausbau der Elektromobilität entstehen neue Absatzmärkte für die Schweizer Stromversorger. Weiter besteht bei der Entwicklung und Markteinführung von neuen Technologien die Möglichkeit zur Erschliessung neuer Märkte.

Zusammenfassend kommen wir zur Einschätzung, dass die Chancen zur Erschliessung neuer Absatzmärkte in den Zukunftsbildern mit neuen Antriebstechnologien gegenüber dem BAU steigen:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W2.1	Absatzmärkte für Schweizer Unternehmen schaffen	≈	(✓)	(✓)	(✓)

95) [www.hydropole.ch](http://www.hydropole.ch)

## W2.2 Einheimische Rohstoffe und Produkte nutzen

Die Rohstoffe für die Produktion von Fahrzeugen stammen überwiegend aus dem Ausland (vgl. U3.3). Auch die im BAU eingesetzten fossilen Energieträger werden importiert. In den Zukunftsbildern mit hohen Anteilen strom- oder wasserstoffbetriebener Fahrzeuge kann sich dieses Bild ändern. Ausschlaggebend ist aber auch hier, aus welcher Primärenergie der Strom bzw. der Wasserstoff produziert wird. Durch den bedeutenden Anteil an fossilen Treibstoffen werden in allen Zukunftsbildern im Jahr 2035 ein grosser Teil der Energie für den Individualverkehr importiert (vgl. auch U3.1 Anteil nicht erneuerbarer Energieträger). Im Jahr 2050 ist in den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT ein deutlicher Anstieg möglich – je nachdem, wie der Strom produziert wird.

Die im ICI-Zukunftsbild beigemischten biogenen Treibstoffe könnten ebenfalls zumindest teilweise in der Schweiz hergestellt werden. Das grösste Potenzial besteht in der Produktion von Biogas. Neben den herkömmlichen Verfahren zur Vergärung von Hofdünger und biogenen Abfällen wird auch der Vergasung von Feststoffen wie Holz in sogenannten Pyrolyse-Verfahren ein Potenzial beigemessen.

Mit einer Ablösung der fossilen Treibstoffe steigt die Möglichkeit zur Nutzung einheimischer Rohstoffe:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W2.2	Einheimische Rohstoffe und Produkte nutzen	≈	(✓)	(✓)	(✓)

## 5.4.3 W3 Indirekte wirtschaftliche Effekte verbessern

Durch die konzentrierte Schaffung und den Erhalt der wirtschaftlichen Tätigkeiten soll der Arbeitsstandort gestärkt werden. Forschung, Entwicklung und Technologie sind wichtige Voraussetzungen für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit. Auch regionale Zentren müssen davon profitieren können (dezentrale Konzentration).

### W3.1 Unterstützung einer regional ausgeglichenen wirtschaftlichen Entwicklung

Da die Verfügbarkeit des motorisierten Individualverkehrs und die Strasseninfrastruktur in allen Zukunftsbildern gegeben sind, sind dadurch keine Unterschiede bezüglich der Erreichbarkeit der Regionen begründet. Einschränkungen ergeben sich allenfalls durch die beschränkte Reichweite von Elektrofahrzeugen. In allen Zukunftsbildern sind jedoch noch gewisse Anteile an Plug-In-Hybriden ausgewiesen, so dass dieser Nachteil ebenfalls entfällt. Im Zukunftsbild HP+PT werden zudem negative Aspekte bezüglich der Reichweite durch einen Ausbau des öffentlichen Verkehrs wettgemacht.

Chancen für die wirtschaftliche Entwicklung ausserhalb der zentralen Wirtschaftsstandorte bieten sich durch die dezentrale Produktion von Strom oder Wasserstoff, d.h. in den Zukunftsbildern BEV, FCV und HP+PT. Weiter bilden sich in diesen Zukunftsbildern neue Marktstrukturen und es sind neue Produkte und Dienstleistungen gefragt. Durch die Bildung von Technologie-/Wirtschaftsclustern in regionalen Zentren können auch Unternehmen ausserhalb der grossen Wirtschaftsregionen von den neuen Marktchancen profitieren.

Bei der Substitution von fossilen Treibstoffen bietet die dezentrale Energieproduktion Chancen für alle Regionen:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W3.1	Unterstützung einer regional ausgeglichenen wirtschaftlichen Entwicklung	≈	(✓)	(✓)	(✓)

### W3.3 Flexibilität des Systems erhöhen

Ein flexibles System ermöglicht laufende Anpassungen an technologische Entwicklungen, so dass Effizienzfortschritte genutzt werden können. Flexibilität bedeutet den Verzicht auf grosse einmalige Investitionen und reduziert somit auch das Investitionsrisiko. Die Investitionen sind insbesondere für die Zukunftsbilder BEV, FCV und HP+PT sehr hoch.

Ein weiterer Faktor der Flexibilität ist die dezentrale und auf verschiedenen Energieträgern basierende Energieversorgung (vgl. W4.1 Abhängigkeit von einzelnen Energieträgern senken). Diese Abhängigkeit wird in allen Zukunftsbildern mit Alternativen zu fossilen Treibstoffen gesenkt.

Aufgrund der Überlegungen vor allem zu den Energieträgern gelangen wir zu folgender Beurteilung:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W3.3	Flexibilität des Systems erhöhen (Investitionsrisiko, Anpassungsfähigkeit)	≈	(✓)	(✓)	✓

## 5.4.4 W4 Versorgungssicherheit gewährleisten

Ein funktionierendes Mobilitätssystem ist eine wichtige Voraussetzung für eine leistungsfähige Wirtschaft und eine hohe Lebensqualität. Für die Gewährleistung der Mobilität sind die Energieversorgung und die notwendige Infrastruktur sicherzustellen

### W4.1 Abhängigkeit von einzelnen Energiequellen senken

Gegenüber dem BAU gibt es in allen Zukunftsbildern eine Diversifizierung der Energieträger. Zudem wird durch die Abhängigkeit auch eine Reduktion des Gesamtverbrauchs reduziert. Der Vorteil beim Einsatz von Strom und Wasserstoff ist, dass diese Sekundärenergieträger aus verschiedenen Primärenergiequellen hergestellt werden. Damit sinkt die Abhängigkeit von einzelnen Energieträgern oder Versorgungsregionen.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit zum Einsatz erneuerbarer Energieträger. Diese sind im Gegensatz zu fossilen Treibstoffen im Inland vorhanden, wodurch eine grössere Unabhängigkeit erreicht werden kann.

In allen Zukunftsbildern mit elektrischen Antrieben wird die Abhängigkeit gegenüber dem BAU reduziert. Im BEV-Zukunftsbild kommen jedoch für längere Strecken Plug-In-Hybride zum Einsatz, in diesem Bereich bleibt eine Abhängigkeit vom Erdöl bestehen. Allenfalls sind hier als Alternative auch biogene Treibstoffe denkbar. Die Nachfrage nach flüssigen Treibstoffen für die Hybrid-Fahrzeuge im BEV-Zukunftsbild liegt jedoch über den gemäss heutigen Schätzungen realisierbaren Potenzialen (vgl. Zah et al. 2010). So resultiert die folgende Einschätzung:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W4.1	Abhängigkeit von einzelnen Energieträgern senken	≈	(✓)	✓	✓

### W4.2 Verfügbarkeit der Rohstoffe gewährleisten

In den Zukunftsbildern kommen Antriebs- und Energiespeicherkonzepte zum Einsatz, die aus unterschiedlichen Rohstoffen hergestellt werden. Die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ist einerseits eine Voraussetzung für die Verbreitung der jeweiligen Technologien. Andererseits ist auch der Einsatz für andere Anwendungen zu gewährleisten. Die folgenden Ausführungen basieren auf Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI 2009a, Fraunhofer ISI 2009b) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2009c, BGR 2010).

### **Neodym**

Mit über 50% der Reservevorkommen und 97% der weltweiten Neodym-Förderung kontrolliert China den Markt. Gemäss den Szenarien BEV und FCV wäre mit einer massiven Bedarfssteigerung an Neodym zu rechnen, dem gegenüber steht der Plan der chinesischen Regierung, sowohl die Förderung als auch den Export zu senken.<sup>96)</sup> Als Reaktion auf den drohenden Engpass werden aktuell neue Förderprojekte in anderen Teilen der Welt (USA, Australien, Grönland) intensiv vorangetrieben. Es bleibt jedoch sehr zweifelhaft, ob dadurch die steigende Nachfrage sowie die drohende Exportdrosselung Chinas abgefangen werden können.

Eine mögliche Alternative zu Neodym wäre die Verwendung von Elektromotoren mit elektrisch erzeugtem Magnetfeld. Besonders interessant sind hier Synchronmotoren wegen ihres hohen Wirkungsgrades, belastungsunabhängige Drehzahl, Motor- und Generatorbetrieb und dem fehlenden Schlupf. Die technische Entwicklung beim Synchronmotor hat derzeit aber noch Defizite beim Einsatz von elektrisch erzeugter Erregung im Rotor und muss weiter erforscht werden.

### **Kupfer**

Grosse Kupfervorkommen (> 3'000 Mio. t) werden vor allem in Südamerika und Zentralafrika vermutet. Chile verfügt mit etwa 30% über die grössten Reserven und ist weit vor USA, Peru und Russland (je 6-8%) der Hauptförderer (36%). Aufgrund der ausreichenden Verfügbarkeit und der guten Verteilung von Vorkommen/Förderung auf politisch relativ stabile Länder, sind zumindest kurzfristig trotz steigenden Bedarfs keine markanten Engpässe zu erwarten. Allerdings ist bei der erwarteten Zunahme des Kupferbedarfs damit zu rechnen, dass die mit der heute verfügbaren Technik wirtschaftlich abbaubaren Reserven Mitte der 2030er Jahre erschöpft sind. Durch die Erschliessung von neuen Vorkommen oder einen Ausbau des Kupfer-Recyclings ist mit tendenziell steigenden Kosten zu rechnen.

### **Platin**

Aufgrund der weltweiten Reserven, die sich vorwiegend auf Südafrika (mit knapp 60% der Hauptförderer), Russland und Australien verteilen, sowie einer hohen Recyclingquote ist bei der Platinversorgung nicht mit Engpässen zu rechnen. Allerdings könnte das Edelmetall die Technologie als Kostentreiber nachteilig beeinflussen. Eine Alternative zu Brennstoffzellen mit Platin als Katalysator sind alkalische Brennstoffzellen. 2009 wurde der Nachweis erbracht, dass solche Brennstoffzellen funktionsfähig sind (Wuhan-Zelle). Eine stabile, Hydroxyl-Ionenleitende Membran ist aber derzeit noch nicht serienreif, die Wirkungsgrade dieser Zellen sind zudem derzeit deutlich geringer.

### **Lithium**

Die weltweiten Lithium-Reserven, die sich hauptsächlich in Südamerika, aber auch in Nordamerika, China und Afrika befinden, sind gross und auf die erwartete Nachfragezunahme wurde vielerorts bereits mit Kapazitätserweiterungen reagiert. Zukünftig ist zudem mit einer hohen Recyclingquote zu rechnen, sodass selbst bei extremen Annahmen bis zum Jahr 2050 nicht mit einer Verknappung zu rechnen ist. Ein Risiko für die Versorgungssicherheit ist jedoch dadurch gegeben, dass sich die Lithiumressourcen auf wenige, teilweise politisch instabile Länder verteilen (ZSW 2010).

In der zusammenfassenden Beurteilung der Auswirkungen zeigt sich kein einheitliches Bild. Die Ausgangslage ist bei jedem einzelnen Rohstoff etwas anders. Grundsätzlich sind ausreichende Reserven vorhanden. Bei allen Zukunftsbildern werden jedoch Rohstoffe eingesetzt, deren Verfügbarkeit durch Exportbeschränkungen problematisch sein kann. Diese geopolitischen Risiken sind für die Schweiz als rohstoffarmes Land schwierig einschätzbar.

---

96) vgl. Artikel in der Frankfurter Allgemeine F.A.Z.  
<http://www.faz.net/s/Rub0E9EEF84AC1E4A389A8DC6C23161FE44/Doc~E011959D5FA2D43C487038A8B39C3D131~ATpl~Ecommon~Scontent.html>, Stand 22.09.2010

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
W4.2	Verfügbarkeit der Rohstoffe gewährleisten	!	!	!	!

## 5.5 Gesellschaft

### 5.5.1 G1 Gesundheit und Wohlbefinden fördern

Der physische und psychische Gesundheitszustand beeinflusst in hohem Masse die Lebensqualität und ist ein wichtiger Faktor für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit. Die Möglichkeiten der individuellen Mobilität werden positiv erlebt, viele Auswirkungen des Verkehrs jedoch negativ. Die Zahl der Unfallopfer und der durch den Verkehr in ihrer Gesundheit beeinträchtigten Personen soll verringert werden. Dazu müssen die Verkehrssicherheit erhöht und die Störfallrisiken minimiert werden. Als weiterer Beitrag zum Wohlbefinden sollen Verkehrs- und Energieversorgungsinfrastrukturen die Qualität von Siedlungs- und Landschaftsbildern möglichst wenig beeinträchtigen.

#### G1.1 Verkehrssicherheit erhöhen

Unfälle mit Todesfolgen und/oder schwerwiegenden Verletzungen sind in fast allen industrialisierten Ländern rückläufig. In der Schweiz ist die Anzahl im Strassenverkehr schwerverunfallter (schwerverletzter und getöteter) Personen im vergangenen Jahrzehnt um ein Viertel gesunken: 2009 wurden verglichen mit 2000 41 Prozent weniger Personen im Strassenverkehr getötet, 24 Prozent weniger schwer verletzt und 14 Prozent weniger leicht verletzt.<sup>97)</sup> Der Rückgang ist am grössten bei Insassen von Personenwagen; bei den Motorrädern ist die Zahl der Verunfallten gestiegen.

Wichtige Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit und damit Ansatzpunkte für Verbesserungen sind das Verhalten der Fahrzeuglenkenden, die Fahrleistungen insgesamt, die Voraussetzungen bezüglich Fahrzeugen und Infrastruktur sowie vermehrt auch der Einsatz von Technologien zur Unfallvermeidung. Für alle Zukunftsbilder gilt, dass die positive Entwicklung bei den Unfällen mit Personenwagen nur fortgesetzt werden kann, wenn die bisherigen Anstrengungen weitergeführt und ausgebaut werden. Zudem sind neue Entwicklungen sowohl gesellschaftlicher als auch technischer Art frühzeitig zu erkennen, damit bei Bedarf geeignete Massnahmen entwickelt werden können.

Unabhängig von der Antriebstechnologie werden schon heute vermehrt elektronische Systeme eingesetzt, die unterstützend wirken und das Unfallrisiko minimieren bzw. den Unfall vermeiden helfen („aktive Sicherheit“). Dieser Trend wird sich fortsetzen. Gerade bei kleineren und leichteren Elektrofahrzeugen tragen „aktive Sicherheitssysteme“ künftig einen wichtigen Teil zur Fahrzeugsicherheit bei, ohne dabei das Gewicht des Fahrzeugs massgeblich zu erhöhen. Elektronische Stabilitätsprogramme, Fussgängerfrüherkennung und andere Fahrassistenten sind Sicherheitssysteme, welche helfen es gar nicht erst zu einem Zusammenstoss kommen zu lassen. Der gegenwärtige „eSafety-Trend“ in der Fahrzeugsicherheit und die Nachfrage nach Systemen der Unfallvermeidung wird durch die Einführung von Elektroautos möglicherweise verstärkt. Bis ins Jahr 2050 werden diese Systeme jedoch unabhängig von der Antriebstechnologie verbreitet eingesetzt werden.

Die Zukunftsbilder unterscheiden sich in erster Linie in Bezug auf die Fahrzeuge voneinander. Im Vergleich zum BAU-Zukunftsbild ist in den anderen Zukunftsbildern eine Fahrzeugflotte

97) Bundesamt für Statistik, Medienmitteilung vom 30. Juli 2010

unterstellt, die tendenziell effizienter ist. Bei den Zukunftsbildern BEV und HP+PT findet zudem eine Verschiebung von der Mittelklasse zur Kompaktklasse und insbesondere zu mehr Kleinwagen statt. Viele Kleinwagen und Mikroautos bieten schon heute einen ebenso guten Insassenschutz wie grössere Fahrzeuge. Aufgrund ihrer reduzierten Masse geht von Ihnen ausserdem in vielen Fällen ein geringeres Verletzungsrisiko für die jeweiligen Crash-Partner aus. Allerdings gibt es auch Hinweise, dass die heute in Kleinserien hergestellten Elektroautos bezüglich Sicherheitsstandards nicht die gleichen Anforderungen erfüllen wie vergleichbare Micro- oder Kleinwagen mit Verbrennungsmotor. Aus den bisherigen Erfahrungen und teilweise fehlenden Sicherheitssystemen bei heute verfügbaren Modellen von Elektroautos kann jedoch nicht auf die Sicherheit von elektrisch angetriebenen Autos generell geschlossen werden.

Die technischen Spezifikationen von Elektroautos und veränderte Anforderungen an die Konstruktion können sich positiv auf Sicherheitsaspekte auswirken. Ein Beispiel ist die fehlende Verbrennungsmaschine unter der Motorhaube. Anstatt des Motorblocks und des Getriebes befindet sich beim Stromauto dort der wesentliche kleinere Elektromotor, wenn er nicht sogar im Heck oder in den Radnarben untergebracht ist, wie im Falle eines Prototypen der Firma Michelin. Diese Veränderung ermöglicht eine gänzliche andere Frontgestaltung, welche weitreichende Chancen bietet, den Fussgängerschutz gegenüber den Auto mit Verbrennungsmotor zu verbessern. Das Risiko einer schweren Kopfverletzung im Falle einer Kollision mit einem Fussgänger liesse sich aufgrund grösserer Abstände zwischen der Motorhaube und dem Elektromotorblock im Innenraum möglicherweise deutlich reduzieren.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der reduzierte Lärmpegel bei niederen Geschwindigkeiten. Vor allem schwächere Verkehrsteilnehmer im Verkehr orientieren sich oftmals nach Gehör, und fehlender Motorenlärm birgt somit ein gewisses Gefahrenpotenzial. Ein potenzielles Risiko lässt sich insbesondere für seh- und hörbehinderte schwächere Verkehrsteilnehmer ableiten. In den Vereinigten Staaten wird deshalb aktuell über die Anbringung von akustischen Signalen an Hybridfahrzeuge diskutiert<sup>98)</sup> und in Japan wurde auf den 1. Januar 2010 bereits eine Richtlinie über Massnahmen zur besseren Hörbarkeit von Hybridfahrzeugen in Kraft gesetzt<sup>99)</sup>. So kann das Unfallrisiko mit einfachen Mitteln reduziert werden. Bei höheren Geschwindigkeiten (> 30 km/h) existiert dieses Problem aufgrund der auftretenden Roll- und Windgeräusche nicht mehr. Zu berücksichtigen ist zudem, dass die Orientierung per Ohr je nach räumlichem Kontext und Verkehrsdichte eine unterschiedliche Rolle spielt. Gerade in weniger stark befahrenen und Wohnquartieren spielt die „*O*rientierung“ neben der Orientierung per Auge eine wichtige Rolle, werden Motorfahrzeuge doch hier aufgrund des leiseren Umfelds oftmals erst gehört bevor sie gesehen werden. Im dichten, lauten Stadtverkehr hingegen dürfte die „*O*rientierung“ eher eine untergeordnete Rolle spielen.

Andere Einflüsse der Elektro(auto)mobilität ergeben sich durch reduzierte Durchschnittsgeschwindigkeiten bei wachsenden Elektrifizierungsgraden und weniger Unfälle in Folge von Fahrten mit stark überhöhten Geschwindigkeiten („Raserunfälle“) aufgrund der geringeren Maximalgeschwindigkeiten von Elektrofahrzeugen. Gegenüber einem thermischen Motor erlaubt der Elektroantrieb im Regelbetrieb Maximalgeschwindigkeiten die noch deutlich unterhalb jener liegen, welche sich mit den heutigen Personenwagen erreichen lassen. Wird bedacht, dass eine überhöhte oder nicht angepasste Geschwindigkeit die mit zu den häufigsten Unfallursachen gehört, liegt die Vermutung nahe, dass sich aufgrund der limitierten Kapazitäten des E-Mobils, künftig exzessive Geschwindigkeiten mit tödlichen Ausgängen vermehrt in Grenzen halten könnten. Das Elektroauto könnte so auch zur Initialzündung für ein anderes Geschwindigkeitsregime werden, welches sowohl den Fahrzeugbau und das Fahrverhalten derart verändert, dass sich theoretische und tatsächlich gefahrenen Spitzengeschwindigkeiten immer mehr mit den gesetzlich vorgeschriebenen Limiten decken.

---

98) vgl. z.B. Studien zur Wahrnehmung von Fahrzeugen [http://newsroom.ucr.edu/news\\_item.html?action=page&id=1803](http://newsroom.ucr.edu/news_item.html?action=page&id=1803)

"Toyota baut Krachmacher ein" <http://www.n-tv.de/auto/Toyota-baut-Krachmacher-ein-article1345616.html>

99) "Guideline on measures against the quietness of hybrid vehicles, etc." Die Richtlinie ist eine Empfehlung der japanischen Behörde an die Fahrzeughersteller.

Insgesamt sind somit im Vergleich zum BAU sowohl positive als auch negative Effekte auszumachen, die sich in etwa die Waage halten. Im Zukunftsbild HP+PT werden die positiven Effekte auf die Verkehrssicherheit als stärker beurteilt. Der Individualverkehr ist in diesem Zukunftsbild vor allem für kürzere Strecken und innerorts von Bedeutung. Dort ist zwar das Unfallrisiko durch das Nebeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmer am grössten. Durch die kleineren und leichteren Fahrzeuge sinkt jedoch das Verletzungsrisiko bei schwächeren Verkehrsteilnehmern.

Zusammenfassend werden im Vergleich zum BAU die folgenden Auswirkungen bezüglich Sicherheit festgehalten:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
G1.1	Verkehrssicherheit erhöhen	≈	≈	≈	✓

### G1.2 Verringerung von Störfällen

Während unter dem obigen Thema Verkehrssicherheit der Betrieb der Fahrzeuge berücksichtigt wird, geht es hier um Risiken, die einen Zusammenhang mit dem Treibstoff oder der Antriebstechnologie haben. Dabei werden die Bereiche Produktion von Treibstoffen, Lagerung, Transport, Tankstellen und Betrieb in Fahrzeugen berücksichtigt.

Mit dem Einsatz der heute gängigen Treibstoffe Benzin und Diesel ist nur ein geringes Todesfallrisiko verbunden. Der Anteil des treibstoffbedingten Risikos am gesamten kollektiven Todesfallrisiko im Strassenverkehr liegt unter 1% (EBP 2009). Im Vordergrund stehen dabei Risiken durch schwere Verkehrsunfälle beim Betrieb der Fahrzeuge. Die Risiken bei Lagerung und Transport der Treibstoffe sind marginal.

Unterschiede zwischen den Zukunftsbildern bestehen bei der Treibstoffproduktion, bei der Lagerung und Verteilung der Treibstoffe und beim Betrieb der Fahrzeuge.

Das Risiko bei der *Treibstoffproduktion* liegt bei den heute und in den Zukunftsbildern BAU und ICI eingesetzten Treibstoffen im Ausland. Die Rohölförderung ist mit Risiken für Mensch und Umwelt verbunden. Neben grösseren Störfällen wie beispielsweise Explosionen auf Ölplattformen entsteht ein Gesundheitsrisiko für die lokale Bevölkerung, was u.a. auf die Verseuchung von Gewässern, Grundwasser und der Böden zurückzuführen ist (era 2009). Im ICI-Zukunftsbild ist das Risiko gegenüber BAU leicht reduziert, weil der Treibstoffbedarf tiefer ist.

In den Zukunftsbildern mit hohen Anteilen an elektrisch oder mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen (BEV, FCV, HP+PT) ist das Risiko davon abhängig, wie diese Sekundärenergieträger produziert werden. Da die Produktion vermehrt in der Schweiz oder im näheren Ausland stattfindet, ist die Schweiz von den Risiken direkter betroffen als bei fossilen Treibstoffen. Die verschiedenen Stromproduktionsverfahren unterscheiden sich stark bezüglich Eintretenswahrscheinlichkeit von Störfällen und potenziellem Schadensausmass. Bei neueren Technologien wie Photovoltaik- oder Biogasanlagen ist eher mit Störfällen aber mit geringen Schäden zu rechnen. Bei der Kernkraft hingegen ist die Wahrscheinlichkeit von Störfällen tiefer, der potenzielle Schaden dafür bedeutend höher.

Bei der *Lagerung und Verteilung von Treibstoffen* ist das Risiko von der Speicher- und Treibstoffart abhängig. Flüssige, herkömmliche Treibstoffe wie Diesel oder Benzin sind potentielle Gefahren für das Grund- und Oberflächenwasser und die umliegende Natur. Zudem besteht das Risiko einer Explosion oder schwerwiegender Grossbrände. Die Speicherung und Versorgung mit flüssigem Wasserstoff bringt die Gefahr von Druckexplosionen und die Entstehung von explosiven Gasgemischen mit sich. Es ist allerdings anzunehmen, dass Wasserstoff, ebenso wie Strom, nicht auf Vorrat produziert, sondern ohne Lagerung direkt eingespeist wird. Eine Alternative wäre die dezentrale Produktion direkt an den Verbrauchsorten.

Das Risiko im *Betrieb der Fahrzeuge* ist von der Art des Treibstoffs sowie von der Speicher- und Antriebstechnologie abhängig. Beim Einsatz von Elektromotoren mit hohen Spannungen steigt das Risiko im Betrieb. Es kann zu Stromschlägen und zu Überhitzungen und als Resultat zu Bränden kommen. Des Weiteren geht Gefahr von austretendem Batterieelektrolyten aus. Fahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden, verfügen zudem über Druckbehälter in denen sich der Wasserstoff befindet. Diese Behälter können bei Unfällen zu einer Gefährdung von Insassen werden, einerseits mechanisch, aufgrund ihres hohen Gewichtes, und andererseits durch Druckwellen, die beim Bersten der Behälter entstehen können. Wird der Wasserstoff direkt im Fahrzeug hergestellt, so gehen die möglichen Gefahren vom verwendeten Energieträger sowie dem Reformierungsprozess (Temperatur, Druck) aus. Benzin und Diesel weisen gegenüber Wasserstoff zwar eine höhere Ereigniswahrscheinlichkeit auf, allerdings ist das Schadenpotenzial geringer. Das grösste Risiko besteht im Falle eines Treibstoffaustritts, wie bei der Lagerung, in der lokalen Verschmutzung der Umwelt und der Entstehung von Bränden.

Leistungsfähige *Batterien* (Akkumulatoren), wie sie für den Einsatz in Fahrzeugen gebraucht werden, können im Betrieb sehr hohe Temperaturen erreichen und sich im Extremfall selbst entzünden. Dabei können Elektrolyte austreten sowie giftige Verbrennungsprodukte entstehen. Die hohen Temperaturen könnten unter Umständen auch umliegende Materialien beschädigen oder sogar entzünden. Eine weiteres Element wäre die Gefahr von Stromschlägen, die bei mangelhafter Isolierung oder unsachgemässen Umgang auftreten können. Abgesehen von den Risiken, die bei Speicherung und örtlicher Produktion von Wasserstoff auftreten, gibt es das Risiko beim Betrieb einer *Brennstoffzelle*.

Zusammenfassend ist im ICI-Zukunftsbild im Vergleich zum BAU keine relevante Änderung festzustellen. Bei den anderen Bildern sind die Risiken von der Art der Stromproduktion abhängig:

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
G1.2	Minimierung von Störfallrisiken	≈	+/-	+/-	+/-

### G1.3 Beeinträchtigungen des Siedlungs- und Landschaftsbildes minimieren

Die Auswirkungen auf das Siedlungs- und Landschaftsbild sind verknüpft mit der Bodenversiegelung (U3) und der Biodiversität (U4). Neben den quantitativen Aspekten, d.h. wie viel Infrastruktur ist notwendig, spielen aber auch qualitative Aspekte oder die Frage, wo eine Anlage gebaut wird eine Rolle.

Von entscheidender Bedeutung für je nach Zukunftsbild unterschiedliche Auswirkungen auf das *Landschaftsbild* ist, welche Treibstoffe eingesetzt und wie diese hergestellt werden. Bei fossilen Energieträgern (v.a. Zukunftsbilder BAU und ICI) entsteht die grösste Beeinträchtigung bei der Rohölförderung. Mit zunehmender Nutzung von nicht-konventionellen Quellen wie z.B. Ölsande steigt der Eingriff in die Landschaft. Bei den anderen Zukunftsbildern ist die Stromproduktion relevant. Diese ist bisher eher lokal, mit Auswirkungen auf das Landschaftsbild durch grosse zentrale oder viele kleinere dezentrale Anlagen. Mit Projekten wie Desertec werden aber auch hier die mit der Produktion verbundenen negativen Auswirkungen ins Ausland verschoben. Im Zukunftsbild HP+PT ist der Energiebedarf deutlich tiefer und folglich sind geringere Eingriffe in die Landschaft notwendig.<sup>100)</sup>

Das *Siedlungsbild* wird von der Betankungs-Infrastruktur beeinflusst. In den Zukunftsbildern mit hohen Anteilen Batteriefahrzeugen (BEV, HP+PT) sind positive Effekte durch einen teilweisen Rückbau von Tankstellen auszumachen. Im Gegenzug werden jedoch Ladestationen im öffent-

100) Nicht berücksichtigt wurden in der vorliegenden Untersuchung, welche Konsequenzen der Elektrifizierung auf die Übertragungsinfrastruktur hat. Mehr- und Minderbelastungen sind im Kontext der gesamten Stromversorgung zu betrachten.

lichen Raum gebaut. Wie stark diese das Siedlungsbild beeinflussen und ob sie als negativ oder positiv wahrgenommen werden ist von deren Gestaltung abhängig.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
G1.3	Beeinträchtigungen des Siedlungs- und Landschaftsbildes minimieren	≈	+/-	+/-	(✓)

## 5.5.2 G2 Gesellschaftliche Solidarität fördern

Im Bereich der Mobilität ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Verhalten und Mobilitätsbedürfnisse verschiedener sozialer und gesellschaftlicher Gruppen wichtig. Es sollen dabei besonders Menschen mit einem erschwerten Zugang zu Verkehrsinfrastruktur und alle Formen der Mobilität berücksichtigt werden. Von Bedeutung ist auch eine gute Anbindung ländlicher Räume.

### G2.1 Zugang für alle Regionen und gesellschaftlichen Gruppen sicherstellen

Zugang zur Mobilität bedeutet die Möglichkeit, sich im geografischen Raum zu bewegen. Voraussetzungen dafür sind einerseits die Verfügbarkeit von Transportmitteln, Verkehrsinfrastruktur und andererseits die persönlichen (körperlichen und finanziellen) Möglichkeiten, die für die Nutzung dieser Transportmittel notwendig sind. Die Solidarität ist beeinträchtigt, wenn diesbezüglich grosse Unterschiede zwischen Regionen, verschiedenen Verkehrsteilnehmern oder gesellschaftlichen Gruppen bestehen.

Bezüglich der Verkehrsinfrastruktur unterscheiden sich die Zukunftsbilder kaum. Relevant sind aber die Unterschiede bei der Infrastruktur zur Energieverteilung. Unterschiede gegenüber dem BAU-Zukunftsbild gibt es bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (FCV) und bei Elektrofahrzeugen mit Batterien (BEV, HP+PT). Für die Versorgung in allen Regionen ist ein flächendeckender Ausbau der Infrastruktur notwendig. Auch in städtischen Gebieten ist zumindest in der Übergangsphase eine Benachteiligung von Fahrzeughaltern möglich, die über keine eigene Garage oder Abstellplatz mit Lademöglichkeit verfügen.

Insgesamt heben sich Vor- und Nachteile verschiedener Zukunftsbilder auf.

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
G2.1	Zugang für alle Regionen und gesellschaftlichen Gruppen sicherstellen	≈	≈	≈	≈

## 5.6 Exkurs: Auswirkungen der Zukunftsbilder auf die Verkehrsnachfrage

Bei den Zukunftsbildern ICI und HP+PT sinken die Gesamtkosten gegenüber BAU im Jahr 2050 sowohl absolut wie auch spezifisch je Fahrzeugkilometer. Bei BEV und FCV steigen die Gesamtkosten der motorisierten Mobilität an. Entsprechend der ökonomischen Theorie sind aufgrund der Preisänderungen auch Nachfrageänderungen zu erwarten. Bei steigenden Kosten bestehen unterschiedliche Reaktionsmöglichkeiten:

1. Reduktion der Fahrleistung (z.B. Fahrgemeinschaften bilden, Umsteigen auf den öffentlichen Verkehr, Fahrten unterlassen, näherliegende Ziele anfahren)
2. Einsatz effizienterer Fahrzeuge (d.h. eine Verschiebung der angenommenen Fahrzeugflottenstruktur)

3. Reduktion der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage bzw. Senkung der Sparquote, wenn die Verkehrsleistung nicht gesenkt wird. Das heisst, dass sich die Nachfrage in anderen Segmenten der Volkswirtschaft reduzieren wird.

Welcher dieser Effekte eintreten wird, ist nicht eindeutig. Auf eine Berechnung der Veränderung der Verkehrsnachfrage mittels heutiger Preiselastizitäten wird bewusst verzichtet, da deren Anwendbarkeit insbesondere in den Zukunftsbildern mit technologischem Wandel höchst fraglich ist. Dies zudem, wenn die Mobilität mit neuen Geschäftsmodellen (Car Sharing etc.) individuell finanzierbar bleibt. Hier wird davon ausgegangen, dass die entsprechende Zahlungsbereitschaft für die individuelle motorisierte Mobilität in den jeweiligen Zukunftsbildern vorhanden ist. Grundlage für die Auswirkungsanalysen sind also die Fahrleistungen gemäss den ARE-Verkehrsperspektiven. Damit sind die Auswirkungen der Zukunftsbilder auch besser untereinander vergleichbar.

Bezüglich Elektrofahrzeuge wird teilweise das Argument vorgebracht, dass Elektro-Autos zu einer Zunahme des Zweitwagenbesitzes führen können und bei deren Nutzung auch die Fahrleistungen steigen werden. Die folgende Tabelle 38 zeigt verschiedene Einflussfaktoren auf die Fahrleistung von Elektrofahrzeugen im Vergleich zum BAU-Szenario mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf.

Effekt von Elektrofahrzeugen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor	Veränderung der Fahrleistung BEV gegenüber BAU
Betriebs- und Unterhaltskosten Fahrzeug: - Die Kosten im BEV sind höher	↓
Anschaffungskosten Fahrzeug - für E-Fahrzeuge höher - Die Anschaffungskosten für ein E-Fahrzeug spielen hinsichtlich der Fahrleistung keine Rolle, da ein Fahrzeug in der Regel zweckgebunden (Fahren von A nach B) angeschafft wird	-
Anzahl Fahrzeuge im Besitz: - Auch ein Zweit- oder Drittfahrzeug führt in der Regel nicht zu höheren Fahrleistungen. Lediglich in Kombination mit sehr geringen Anschaffungskosten ist mit einer "Übermotorisierung" in der Familie zu rechnen - Da E-Autos teurer sind, besteht kein Grund, warum mehr Zweitwagen als im BAU existieren sollten	↓
Sicherheit: - Das Sicherheitsempfinden spielt keine Rolle hinsichtlich Fahrleistung, da ein Fahrzeug – wie schon bei den Anschaffungskosten angemerkt – in der Regel zweckgebunden angeschafft wird.	-
Reichweite der Fahrzeuge: - Bei weitestgehend gleich bleibender Verkehrsinfrastruktur ist bei gleicher oder höherer Reichweite nicht mit einer Erhöhung der Fahrleistung zu rechnen. Erst durch höhere Geschwindigkeiten auf den Hauptachsen (durch semiautomatische Leitsysteme) kann eine Konkurrenz z.B. zum Flugzeug entstehen. - Eine geringere Reichweite ist, gegenüber dem heutigen technischen Standard, als deutliche Einschränkung der Funktionalität zu sehen. Sie führt ggf. zum Abwandern auf Alternativen.	↓

**Tabelle 38:** *Unterschiede Elektroautos und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor hinsichtlich nachgefragter Fahrleistungen*

Fazit: Durch Elektromobilität sind in Summe eher nachfragedämpfende als nachfragesteigernde Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage im Sinne von Fahrleistungen zu erwarten.

## 5.7 Fazit

Im Vergleich der Zukunftsbilder über alle Zielbereiche (Tabelle 39 und Tabelle 40) zeigen sich die folgenden zentralen Resultate:

- Der Energieverbrauch im Fahrzeug wird durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges reduziert. So besteht ein grosses Potenzial, den Primärenergieverbrauch zu senken. Dieses Potenzial wird jedoch nur realisiert, wenn die Vorketten der Energieproduktion effizient sind. Dies ist beim Einsatz von Wasserstoff nicht der Fall. Beim Einsatz von strombetankten Fahrzeugen ist der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien gegenüber dem heutigen Verbrauchsmix zu erhöhen, damit der Primärenergiebedarf massgeblich reduziert werden kann.
- Der grösste Teil der Treibhausgasemissionen entsteht bei der Energieproduktion und beim Verbrauch im Fahrzeug (bei fossilen Treibstoffen). Von entscheidender Bedeutung für das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist deshalb, mit welchen Technologien der Strom erzeugt wird. Dies gilt insbesondere für den energieintensiven Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen, aber auch für Elektroautos mit Batterie.
- Bei alternativen Technologien im Bereich des Antriebs und der Energiespeicherung werden andere Rohstoffe eingesetzt. Die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ist im Kontext der globalen Entwicklungen auch in anderen Technologiebereichen zu betrachten. Aufgrund der heute absehbaren Entwicklungen und der Möglichkeit zum Recycling von Rohstoffen werden die Vorräte als ausreichend beurteilt. Ein Risiko von Versorgungsengpässen besteht aber aufgrund von fehlenden Kapazitäten beim Abbau der Rohstoffe oder wegen staatlicher Eingriffe und Exportbeschränkungen von Ländern mit hohen Rohstoffvorräten.
- Weitere Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft (z.B. Biodiversität, Störfallrisiken, Landschaftsbild) sind von der konkreten Ausgestaltung der Zukunftsbilder abhängig. In erster Linie ist auch hier die entscheidende Frage, wie die Treibstoffe hergestellt werden. Ebenfalls von Bedeutung ist die Entsorgung und Wiederverwendung von Rohstoffen, z.B. bei den Batterien.
- Die Vollkosten für den Betrieb Fahrzeuge sind bei den neuen Technologien höher, ausser wenn gleichzeitig weniger gefahren wird und kleinere Fahrzeuge eingesetzt werden. Insbesondere bei den Brennstoffzellen-Fahrzeugen zeichnen sich deutlich höhere Kosten ab, auch wenn gegenüber heute deutliche Fortschritte erzielt werden können.
- Die Kosten für den Aufbau einer neuen Infrastruktur für die Ladung von Batteriefahrzeugen oder für Wasserstoff sind hoch.
- Ferner zu berücksichtigen sind die hohen Entwicklungs- und Einführungskosten bei den Elektromobilitätsszenarien.
- Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive zeigen die neuen Technologien jedoch einige Vorteile. Die Wettbewerbsvorteile der Schweiz liegen in der hohen Wissensintensität und Innovationskraft. Ein weiteres Potenzial besteht in der Substitution von importierten fossilen Treibstoffen durch einheimischen und allenfalls dezentral hergestellten Strom.

Insgesamt zeigen alle Zukunftsbilder Potenziale, den motorisierten Individualverkehr gemäss den Zielen einer Nachhaltigen Entwicklung gegenüber dem "Business as Usual" zu verbessern. Die grösste Wirkung kann erreicht werden, wenn neben den Änderungen bei Antrieben und Treibstoffen gleichzeitig Verhaltensänderungen stattfinden. Dies zeigt sich an der Beurteilung des Zukunftsbilds HP+PT bei dem ein gesellschaftlicher Wandel unterstellt wird, der u.a. dazu führt, dass die Wege kürzer und die Fahrzeuge kleiner werden.

✓	Starke Entwicklung gemäss Zielrichtung
(✓)	Tendenzen gemäss Zielrichtung
≈	Keine relevanten Auswirkungen
+/-	Auswirkungen von konkreter Ausgestaltung abhängig
!	Entwicklung gegen Zielrichtung

*Tabelle 39: Beurteilungsskala*

		ICI	BEV	FCV	HP+PT
<b>Umwelt</b>					
U1.1	Luftschadstoffe senken	(✓)	(✓)	(✓)	✓
U1.2	Lärmbelastung senken	(✓)	✓	✓	✓
U2.1	Treibhausgasemissionen senken	(✓)	+/-	+/-	✓
U3.1	Primärenergieverbrauch senken	(✓)	(✓)	!	✓
U3.2	Bodenversiegelung reduzieren	≈	≈	≈	(✓)
U3.3	Einsatz metallischer Rohstoffe minimieren	+/-	+/-	+/-	+/-
U4.1	Natürliche Lebensräume erhalten	+/-	+/-	+/-	(✓)
U4.2	Landschaftszerschneidung reduzieren	≈	≈	≈	≈
<b>Wirtschaft</b>					
W1.1	Investitions- und Betriebskosten für Fahrzeuge minimieren	(✓)	!	!	(✓) (ohne ÖV)
W1.2	Investitions- und Betriebskosten für Infrastruktur minimieren	≈	!	!	!
W2.1	Absatzmärkte für Schweizer Unternehmen schaffen	≈	(✓)	(✓)	(✓)
W2.2	Einheimische Rohstoffe und Produkte nutzen	≈	(✓)	(✓)	(✓)
W3.1	Unterstützung einer regional ausgeglichenen wirtschaftlichen Entwicklung	≈	≈	≈	≈
W3.2	Know-how aufbauen und Wettbewerbsfähigkeit erhalten	≈	(✓)	(✓)	(✓)
W3.3	Flexibilität des Systems erhöhen (Investitionsrisiko, Anpassungsfähigkeit)	≈	(✓)	(✓)	✓
W4.1	Abhängigkeit von einzelnen Energiequellen senken	≈	(✓)	✓	✓
W4.2	Verfügbarkeit der Rohstoffe gewährleisten	!	!	!	!
<b>Gesellschaft</b>					
G1.1	Verkehrssicherheit erhöhen	≈	≈	≈	✓
G1.2	Minimierung von Störfallrisiken	≈	+/-	+/-	+/-
G1.3	Beeinträchtigungen des Siedlungs- und Landschaftsbildes minimieren	≈	+	+/-	(✓)
G2.1	Zugang für alle Regionen und gesellschaftlichen Gruppen sicherstellen	≈	≈	≈	≈

Tabelle 40: Beurteilung der Zukunftsbilder anhand sämtlicher Zielbereiche

## 6 Handlungsbedarf je Zukunftsbild

Mit der Auswirkungsanalyse wurden die Vor- und Nachteile der Zukunftsbilder dargestellt. In welche Richtung letztlich die Entwicklung gehen wird, ist Teil des politischen Prozesses. Deshalb wird hier auch keine abschliessende Bewertung der Zukunftsbilder vorgenommen. Im Folgenden wird nun aber aufgezeigt, welche Schritte notwendig wären, wenn die Zukunftsbilder realisiert werden sollen. Die nötigen Massnahmen je Zukunftsbild werden in fünf Gruppen gegliedert:

- **Hardware:** Infrastruktur, Treibstoff, Tankstellen, Normen. Dies betrifft die Strassen- und Versorgungsnetze sowie die Verteilung der Treibstoffe (Tankstellen, Ladestationen etc.)
- **Angebotsseite (Fahrzeuge):** Sicherstellung des Angebots benötigter Fahrzeugen.
- **Nachfrageseite:** Akzeptanz und Marktpenetration
- **Monetäre Aspekte:** Finanzierung, Anreize, Subventionen und Steuern. Diese beziehen sich vor allem auf die Kosten des Fahrzeugs und der Infrastruktur.
- **Perspektiven und Herausforderungen** der künftigen Mobilitätsforschung

Bei jedem Punkt werden vereinfacht die folgenden Akteure unterschieden: Bund, Kantone, Gemeinden, Autobranche (Hersteller bzw. Generalimporteure), Elektrizitätswirtschaft (swisslectric, Axpo/BKW/Alpiq, EVU und Gemeindewerke), Verbände/NGO (TCS usw.).

Der Handlungsbedarf wurde auf einem Workshop am 5. November 2010 diskutiert und erarbeitet. Eingeladen waren Stakeholder aus der Verwaltung, der Wirtschaft, der Wissenschaft und von Verbänden. Die Teilnehmer des Workshops sind im Anhang A8 aufgeführt. Im Folgenden wird im Kapitel 6.1 zunächst auf den Handlungsbedarf eingegangen, der für alle Zukunftsbilder gilt. Bei den einzelnen Zukunftsbildern werden dann in den Kapiteln 6.2 bis 6.5 die ergänzenden, spezifischen Punkte erwähnt. Die Kapitel dokumentieren die Massnahmen, wie sie auf den Workshop diskutiert worden sind. Die Sammlung der Massnahmen bezieht sich auf einen kurzfristigen Zeitraum. Es wird somit eine Übersicht über denkbare Massnahmen zur Erzielung des Zukunftsbildes vorgelegt. Die Massnahmen sind ohne Gewichtung oder Bewertung dargestellt. Es besteht hier nicht der Anspruch die Massnahmen mit ihrer notwendigen Dosierung zu ermitteln, so dass die Zukunftsbilder bis ins Jahr 2050 realisiert werden könnten. Die Massnahmensammlung muss sich somit auch nicht mit der Meinung der Begleitkommission decken.

### 6.1 Alle Zukunftsbilder (inkl. Business-As-Usual, BAU)

Die folgenden Annahmen wurden bei der Erarbeitung des Zukunftsbildes "Business-as-Usual" unterstellt und gelten gleichermassen für alle Zukunftsbilder:

- *Mobility Pricing:* Die heutige hauptsächliche Finanzierung der Strasseninfrastruktur über die Erhebung von Mineralölsteuern ist, unabhängig von den Antrieben und Treibstoffen, in Diskussion. Die Diskussion wird allerdings vor dem Hintergrund der Elektromobilität forciert. In allen Zukunftsbildern wird deshalb davon ausgegangen, dass ein Mobility Pricing besteht. Die genaue Ausgestaltung ist für die hier zu behandelnde Fragestellung nicht relevant. Grund und Vorteil dieser Annahme ist, dass Treibstoffsteuern (welche aktuell auf Benzin und Diesel erhoben werden, auf Mobilitätsstrom jedoch nicht) nicht betrachtet zu werden brauchen und somit die Bilder nicht verzerren.
- *Verkehrstelematik:* Technische Massnahmen wie automatische Abstandsmessung und elektronische Steuerung der Fahrzeuge erhöhen die Sicherheit. Diese Entwicklung ist unabhängig von den Zukunftsbildern. Deshalb werden auch keine Sicherheitsunterschiede

zwischen Klein- und Grossfahrzeugen zugrunde gelegt.<sup>101)</sup> Investitionen im Bereich intelligente Infrastruktur wie Parkleitsysteme und teilautomatische Führungssysteme zur Erhöhung der Sicherheit fallen somit in allen Bildern an und werden deshalb nicht berücksichtigt.

- *Recycling*: Die Rückgewinnung der Rohstoffe ist angesichts der global steigenden Nachfrage und der negativen Umweltwirkungen beim Abbau der Rohstoffe wichtig. Das Augenmerk ist insbesondere auf die Entwicklung bei bisher weniger gebräuchlichen Rohstoffen zu legen, die in allen Zukunftsbildern aufgrund der vermehrt eingesetzten Elektronik wichtiger werden, Handlungsbedarf aus staatlicher Sicht besteht, wenn über den Markt ungenügende Anreize zum Recycling gesetzt werden. Mögliche Massnahmen reichen von Kundeninformationen bis zu Recycling-Quoten.

Für alle Zukunftsbilder wurde ausserdem eine einheitliche künftige (gegenüber heute allenfalls leicht ausgebaut) Strasseninfrastruktur unterstellt. Diese ist – im Rahmen der hier betrachteten Zukunftsbilder – weitestgehend unabhängig von der Nachfrage, wobei unterstellt wurde, dass es mittels Verkehrstelematik hinreichende Möglichkeiten gibt, eine gleichbleibende Qualität im Verkehrsfluss zu erhalten.

**Hardware: Infrastruktur, Tankstellen, Treibstoff, Normen** **BAU**

Handlungsbedarf	Massnahme
Sichere und effiziente Nutzung der Verkehrsinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone: Forcierung von Projekten für das kantonsübergreifende Verkehrsmanagement zur optimalen Ausschöpfung der Kapazität des bestehenden Strassennetzes;</li> <li>• Bund: Schaffung rechtlicher Grundlagen für die Erfassung von Bewegungsprofilen zur optimierten Nutzung von Infrastruktur und Verkehrssystemen;</li> </ul>
Weiterentwicklung und Anwendung Verkehrstelematik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund und Kantone: Planung und Bereitstellung von finanziellen Mitteln für Umrüstung/Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur, um Kommunikationselemente für zukünftige kooperative Systeme zu integrieren;</li> <li>• Kantone: Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft bei der Bereitstellung von Informationen, und der Aufbereitung von Kartenmaterial für Navigation, zu verkehrsberuhigten Zonen, empfohlene Umfahrungsrouten, usw.</li> </ul>
Finanzierung Verkehrsinfrastruktur (und allenfalls punktuelle Nachfragesteuerung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Einnahmen abhängig von Nutzung und unabhängig von Antrieben und Treibstoffen gestalten: Gezielter Einsatz von Mobility Pricing (und Schaffung rechtlicher und technischer Voraussetzungen für die Verkehrssteuerung in Agglomerationen)</li> </ul>

**Angebotsseite (Fahrzeuge)** **BAU**

Handlungsbedarf	Massnahme
Erhöhung der Effizienz durch den Einsatz leichter Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Marktkompatibilität leichter Fahrzeuge erhöhen (Forcierung von Programmen zur Erzielung aktiver Sicherheit im Verkehr, z.B. EU Intersafe-2)</li> </ul>
Weiterentwicklung Technik und Geschäftsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im BAU-Szenario werden keine neuartigen angebotsseitigen Politikmassnahmen unterstellt. Verfolgt wird die Umsetzung und Weiterentwicklung des Regelwerks, welches die Automobilhersteller zur Einhaltung eines jährlich sin-</li> </ul>

101) Hier wird auch mit unterstellt, dass die elektronische Erhöhung der Sicherheit durch die Konsumenten auch entsprechend wahrgenommen werden und kleine Fahrzeuge so auch eine hohe Akzeptanz auch hinsichtlich Sicherheit erzielen werden.

	kenden mittleren Energieverbrauchs der Neuwagen zwingt, bzw. Mitarbeit bei und Übernahme entsprechender Regelwerke auf EU-Ebene (Fortführung der 130- und 95 g CO <sub>2</sub> /km-Zielwerte für die Zieljahre 2015 bzw. 2020)
Weiterentwicklung Technik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund mit Autobranche: Förderung des Einsatzes von Leichtlaufölen und reibungsarmen Reifen durch Zielvereinbarungen mit den Erstausstattern (Importeure) und dem Autogewerbe.</li> </ul>
Neue Fahrzeugkonzepte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobranche: Starker Ausbau und stetige Verbesserung des Angebots an Zweirädern mit elektrischem (Hilfs-)Antrieb.</li> </ul>
Neue Geschäftsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobranche: Anbieten weiterer, zu Mobility-CarSharing komplementärer Angebote, wie z.B. innovative CarSharing-Modelle analog dem Car2Go-Modell in Ulm von Daimler, hersteller-, garagen- oder neuwagenkaufgebundene CarSharing-Konzepte.</li> </ul>

**Nachfrageseite: Akzeptanz und Marktpenetration** **BAU**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Steigerung Akzeptanz effizienter Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Erarbeitung, und Einsatz auf europäischer Ebene für die Einführung, von nachvollziehbaren Evaluationsverfahren und Konsumenteninformationen zu Energieverbrauch und Umweltbelastungen von Strassenfahrzeugen im Alltagseinsatz (Well-to-Wheel-Ansatz)</li> <li>• NGO: Programm zur Relativierung der (negativen) subjektiven Wahrnehmung solcher Fahrzeuge (Nachweis der Sicherheit)</li> <li>• Bund: Im BAU-Szenario werden keine neuartigen nachfrageseitigen Politikmassnahmen unterstellt. Insbesondere verzichtet der Gesetzgeber weiterhin auf Anreizsysteme beim Neuwagenkauf (es bleibt bei gewissen kantonalen Motorfahrzeug-Rabattsystemen).</li> <li>• Bund: Einen schweizerischen Real-world-Fahrzyklus definieren (z.B. ARTEMIS-Fahrzyklen; analog zu Vorgehen der U.S. EPA); Obligatorium, bei Neuwagen Verbrauch (auch) für diesen Fahrzyklus anzugeben; der vom Verkäufer angegebene Verbrauch kann eingeklagt werden.</li> <li>• Autobranche: Werbung und Marketing intensivieren; Händlermargen für diese Fahrzeuge anheben (damit attraktiver für Verkäufer).</li> </ul>
Steigerung Effizienz im Verkehrsalltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Obligatorische EcoDrive-Auffrischkurse alle 5 bis 10 Jahre</li> </ul>

**Monetäre Aspekte: Finanzierung, Anreize und Subventionen** **BAU**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Besteuerung MIV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Im BAU-Szenario wird Mobility Pricing unterstellt. Es werden keine neuen Energiesteuern eingeführt. Die CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Treibstoffe wird weiterhin nicht erhoben, eine allfällige CO<sub>2</sub>-Teilkompensationspflicht der Treibstoffimporteure kann vornehmlich im Ausland erfolgen und hat keinen grossen Einfluss auf das Preisniveau.</li> </ul>
Besteuerung Motorfahr-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone, Bund: Erarbeitung von Grundlagen für die Har-</li> </ul>

zeuge	monisierung der kantonalen Steuermodelle (Annahme: Mobility Pricing wird vor allem die Mineralölsteuer ersetzen und die übrigen bestehenden Steuern eher ergänzen)
Automobilsteuer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Automobilsteuer auf Energieverbrauch je pkm oder tkm ausrichten.</li> </ul>

**Perspektiven und Herausforderungen der künftigen Mobilitätsforschung** **BAU**

Handlungsbedarf	Massnahme
Leistungsfähigkeit Verkehrsinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund und Kantone: Entwicklung verkehrstelematischer Lösungen zwecks Halten und Optimieren des derzeitigen Qualitätstandes der Verkehrsinfrastruktur bei steigendem Verkehrsaufkommen.</li> </ul>
Wirtschaftliche Landesversorgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Quantifizierung der volkswirtschaftlichen Vorteile einer Reduktion der Abhängigkeit von Erdölimporten (durch erneuerbare Energien oder durch höhere Energieeffizienz); Entwicklung von Mechanismen zur Monetarisierung dieser Vorteile (z.B. grössere Pflichtlager; Äufnung von Preisschwankungsreserven) zwecks Förderung von Energieeffizienz.</li> </ul>

## 6.2 Verbesserter Verbrennungsmotor (Internal Combustion Improved, ICI)

Für das Zukunftsbild ICI sind keine technischen Quantensprünge notwendig. Aufgrund bestehender und absehbarer Technologie werden starke energiepolitische Massnahmen eingeführt.

**Hardware: Infrastruktur, Tankstellen, Treibstoff, Normen** **ICI**

Handlungsbedarf	Massnahme
Reduktion Karbonintensität Treibstoffmix	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Beimischungsziel und Entwicklungspfad für Biotreibstoffe analog zu EU und USA; unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien.</li> </ul>

**Angebotsseite (Fahrzeuge)** **ICI**

Handlungsbedarf	Massnahme
Erhöhung der Effizienz durch den Einsatz leichter Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Regulierung des maximal zulässigen Treibstoffverbrauchs von Motorfahrzeugen, mit jährlicher Anpassung an den autonomen technischen Fortschritt;</li> <li>• Bund: Jeweils verzugslose Übernahme des EU-Regelwerks zu CO<sub>2</sub>-Zielwerten für den Mittelwert der Neuwagen je Hersteller, ohne Anpassung des Zielwerts oder des Zieljahrs an schweizerische Markt- oder Kaufkraftverhältnisse; insbesondere auch Beibehaltung des 95 g CO<sub>2</sub>/km-Werts für 2020.</li> <li>• Bund: Nach 2020 kontinuierliche weitere Absenkung des jährlichen g CO<sub>2</sub>/km-Werts der PW-Neuzulassungen.</li> <li>• Bund: Gezieltes Setzen von Anreizen und Subventionen im Bereich der Entwicklung von hocheffizienten Motoren und Brennstoffen. Dabei sollte der Fokus im Bereich der Automobilzulieferer Schweiz liegen (Kompositmaterialien,</li> </ul>

Weiterentwicklung Technik und Geschäftsmodelle	<p>Verbindungstechniken Kunststoff/Metall, Peripheriekomponenten für Teilhybridisierung, Motorenkonzepte)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Autobranche: Keine weiteren Aktionen notwendig: die Bereitstellung entsprechender Fahrzeugkonzepte mit starkem Downsizing ist bei entsprechender Nachfrage relativ schnell möglich; ein Verbot von Fahrzeugmodellvarianten mit hohem Verbrauch erfordert seitens der Privatwirtschaft eine Anpassung der Ertragsmechanik, was aber nicht als eigenständige Massnahme zu betrachten ist.</li> </ul>
Andere Sektoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kantone: Verbot der Produktion von Niedertemperaturwärme aus fossilen Brennstoffen (damit Erdölprodukte länger für mobile Anwendungen verfügbar sind).</li> </ul>
Andere Akteure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Von der Einführung eines Autobahn-Tempolimits in Deutschland könnte sich eventuell eine beschleunigte Downsizing-Entwicklung ergeben.</li> </ul>

**Nachfrageseite: Akzeptanz und Marktpenetration** **ICI**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Steigerung Akzeptanz effizienter Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bund und Kantone: Einführen von Anreizsystemen beim Autokauf auf Basis der Energieetikette oder ähnlicher Kategorisierungsverfahren, finanziert z.B. über Automobilsteuer, zeitlich limitiert.</li> <li>Kantone: Differenzierung der kantonalen Motorfahrzeugsteuern (Bonus-Malus-Systeme) nach Energieverbrauch,</li> <li>Kantone: Harmonisierung der Bemessungsgrundlagen der Bonus-Malus-Systeme.</li> <li>Bund, NGO: Informationsmassnahmen zur Rolle des Neuwagenkaufs und zu Energieeffizienzpotenzialen</li> <li>Bund, Kantone (Finanzdirektorenkonferenz KKFD): Weitere fiskalische Massnahmen wie verbrauchsabhängige Differenzierung der Steuerwirksamkeit von Lohnnebenleistungen wie Geschäftsautos.</li> </ul>
Steigerung Akzeptanz effizienter Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autobranche: Vermeiden der Zahlung von Abgaben an den Staatshaushalt infolge des Nichteinhaltens der CO<sub>2</sub>-Zielwerte durch rechtzeitige Anpassung des Marketing und der Erzielung von Gewinnbeiträgen auch mit sehr verbrauchsarmen Automodellen</li> </ul>
CarSharing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kantone, Gemeinden: CarSharing namentlich für Fahrzeuge mit 4–5 und mehr Plätzen forcieren: Stärkere Differenzierung Motorfahrzeugsteuern, blaue Zone-Parkberechtigung nur bis zu einer bestimmten Fahrzeuggrösse.</li> </ul>

**Monetäre Aspekte: Finanzierung, Anreize und Subventionen** **ICI**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Erhöhung Mobilitätskosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bund: Erhöhung der Mineralölsteuer (kurzfristig) und allfälliger energiebezogener Mobility-Pricing-Tarifstufen (zukünftig) zur Verteuerung der variablen Kosten des MIV.</li> </ul>

Perspektiven und Herausforderungen der künftigen Mobilitätsforschung		ICI
Handlungsbedarf	Massnahme	
Grundlagen für die staatliche Beeinflussung des Nachfrageverhaltens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Erforschung der Wirkung nicht-monetärer Anreize und Informationen;</li> <li>• Bund, Kantone: Entwicklung neuer Prognosemodelle zur Wirkung namhafter monetärer Anreize;</li> <li>• Bund, NGO, Autobranche: Durchführung von Konsumentenbefragungen, Monitoring des Kaufverhaltens und Verknüpfung mit sozioökonomischen Daten.</li> </ul>	
Grundlagen zu Mobilitäts- und Kaufverhalten sowie Trenddiffusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, NGO, Autobranche: Differenzierte Prognostizierung, in welchen Marktsegmenten die Nachfrage nach kleineren/schwächer motorisierten Autos sich zuerst durchsetzen wird;</li> <li>• Autobranche: Möglichkeiten der Änderung der Ertragsmechanik ("wie Geld verdienen mit kleineren Autos") und des Übergangs vom Autoverkauf zum Mobilitätsdienstleistungsverkauf</li> </ul>	
Internalisierung externer Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Weitere Förderung der Internalisierung externer Kosten, um den optimalen Mix an Verkehrsträgern zu erreichen.</li> </ul>	

### 6.3 Batterieelektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV)

Der Einführung der Elektromobilität stehen technisch keine Hindernisse im Wege. Aufgrund der notwendigen Investitionen und Kosten bedarf es eines hohen steuernden und auch finanziellen Aufwandes unter anderem durch die öffentliche Hand, d. h. es muss aktiv gehandelt werden.

Hardware: Infrastruktur, Tankstellen, Treibstoff, Normen		BEV
Handlungsbedarf	Massnahme	
Ergänzung/Aufbau der Strukturen zur Produktion der zusätzlich benötigten Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone, Gemeinden, Elektrizitätsbranche: Verstärkte Anstrengungen zur Reduktion des Stromverbrauchs durch Effizienzmassnahmen insgesamt.</li> <li>• Elektrizitätsbranche: Verstärkung des Ausbaus der Produktionskapazitäten von erneuerbaren Energieträgern</li> <li>• Elektrizitätsbranche, Gemeinden: Förderprämien für Photovoltaik (über KEV-Deckelung hinaus) und/oder für nicht-einspeisende Photovoltaik (mit Elektroauto als Speicher)</li> <li>• Bund, Elektrizitätsbranche: Verstärkte Förderung Ladesysteme auf Basis von regenerativen Energiequellen zum Nachweis der Wirksamkeit dieser Technologie</li> <li>• Elektrizitätsbranche: Leistungsfähige Stromnetze bereitstellen</li> <li>• Elektrizitätsbranche: leistungsregelbare Kraftwerke bereitstellen (Pumpspeicherwerke, Gasturbinen, usw., insofern notwendig infolge eines Ausbaus Erneuerbarer Energie für Elektromobilität</li> </ul>	
Infrastruktur zur Beladung der Fahrzeuge bereitstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizitätsbranche, Kantone: Private Ladestationen für Fahrzeuge mit Garagenstellplatz (Wallboxes): Bei Neubau und Sanierung von Häusern: Information Bauherren</li> </ul>	

(ggfs. Förderung), dass Hausanschluss auf Hoch-Ampere ausgelegt wird (vor allem bei Häusern mit Tiefgaragen)

- Bund, Elektrizitätsbranche: Park&Charge-System fördern und/oder Harmonisierung Rechnungsstellung öffentlicher Ladestation-Anbieter erzwingen
  - Elektrizitätsbranche, Autobranche: Leitfaden für die Erstellung privater oder öffentlicher Ladestationen erstellen.
  - Elektrizitätsbranche, Kantone: Private Ladestationen für Fahrzeuge ohne Garagenstellplatz: Klärung der Möglichkeiten und den Bedarf für entsprechende Beladungsplätze. Wie erfolgt dies innerstädtisch? Sollen entlang der Strasse überall öffentliche Ladestationen stehen?
  - Öffentliche Ladestationen: Einrichtung eines nationalen Infrastrukturfonds Elektromobilität zur Planung und ggfs. Realisierung einer landesweiten öffentlich zugänglichen Beladungsinfrastruktur für batteriebetriebene Motorfahrzeuge. Dieses Infrastruktur sollte ab Anfang landesweit konzipiert werden, mit jährlich sinkender Maschenweite
  - Kantone: Gezielte Standortsuche, namentlich in Siedlungszentren
  - Bund: Klärung, inwieweit öffentlich zugängliche Ladestationen öffentlich-rechtlich oder privatwirtschaftlich zur Verfügung gestellt werden sollten: Durch die öffentliche Hand ist zu klären, wem letztendlich die Ladesäule gehört; der Verbleib im Bereich der Privatwirtschaft bedeutet in der Regel eine schnelle und gute Verteilung aber auch die Gefahr von Preisabsprachen zum Nachteil des Kunden.
  - Gemeinden: Prüfung des Anpassungsbedarfs der innerstädtischen Infrastruktur an Elektromobilität. Dazu gehören Parkraumbewirtschaftung mit entsprechender Ladeinfrastruktur und für Elektromobile reservierte Parkplätze.
  - Bund, konzessionierte Transportunternehmen (KTU), Kantone, Gemeinden: Bei jedem Umbau eines öffentlichen oder SBB-Parkplatzes muss ein Leerrohr verlegt werden (für spätere Ladestation).
  - Anforderungen an Normierung: Kompatible Lösungen hinsichtlich des mechanischen Anschlusses; informations- und kommunikationstechnische Einbindung des Betriebes der Fahrzeuge im Versorgungsnetz (z. B. Ladestationen und Abrechnungsmodelle<sup>102)</sup>).
  - Elektrizitätsbranche, Bund: Normen und Standards sind auf internationaler Ebene voranzutreiben, die Teilnahme an entsprechenden Gremien wo möglich noch zu verstärken, entsprechende Gremienarbeit zu finanzieren.
- Standardisierung bzw. Normierung insbesondere der Stecker, aber auch von Ladestationen und Abrechnungsmodellen
- Ladestationen und Stecker
- Autobranche: Konsequente Entwicklung von Schnellladetechniken 200A/400V DC
  - Elektrizitätsbranche: Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz durch einheitliche Serienproduktion von Ladestationen
  - Bund, Elektrizitätsbranche: Teilnahme in Normierungsgremien

---

102) Pfeiffer und Smolka: Elektromobilität, Infrastruktur und Abrechnung, 2009, S.33ff

Lokale Stromnetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemeinde, Elektrizitätsbranche: Hochampère-Anschlüsse bei Haussanierungen vorsehen (inkl. Absicherung des Netzes)</li> <li>• Kantone, Gemeinden: Lademöglichkeit in Bauvorschriften.</li> <li>• Gemeinde, Elektrizitätsbranche: Gewährleisten, dass EVU auch bei grösseren Mengen an Elektroautos noch "Anschlusspflicht" nachkommen können.</li> </ul>
Öffentlicher Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone, konzessionierte Transportunternehmen (KTU): Kombiangebot ÖV-Elektroauto schaffen.</li> <li>• KTU: Konsequente Strategie zur Steigerung der Energieeffizienz im ÖV (pro pkm), um den kompetitiven Vorsprung gegenüber MIV nicht zu verlieren.</li> </ul>
Energy Contracting	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizitätsbranche: Demonstrationsprojekte und Geschäftsmodelle für Combined-Cycle-(BHKW) in Siedlungen zur Wärmeerzeugung und Stromerzeugung auch für Elektromobilität (Vorteil Speicherfähigkeit)</li> <li>• Elektrizitätsbranche: Geschäftsmodell Kopplung Leasing Elektromobil mit Photovoltaikanlage auf Garagendach.</li> </ul>

<b>Angebotsseite (Fahrzeuge)</b>	<b>BEV</b>
----------------------------------	------------

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Zeigen, dass Technik funktioniert und diese in den Markt bringen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone, öffentliche Flottenbetreiber: Einführung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb in grosser Stückzahl, z.B. Unterstützung von CarSharing-Plattformen</li> </ul>
Verfügbarkeit von Fahrzeugen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobranche: Produktion hochfahren</li> <li>• Autobranche: Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen die aus Kundensicht identische Eigenschaften im Bereich Komfort und Sicherheit haben wie Standardfahrzeuge</li> </ul>
Erarbeiten von Geschäftsmodellen zur Finanzierung der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizitätsbranche: Auftritt von EVU als Anbieter/Leasinganbieter von Elektromobilen bei gleichzeitiger vertraglicher Bindung an Stromlieferung.</li> <li>• Elektrizitätsbranche: Bündelung von Fahrzeugangeboten mit entsprechenden Angeboten der Netzbetreiber. Übertragung von Konzepten beispielsweise aus dem Mobilfunkbereich (hoher Bekanntheitsgrad, hohe Akzeptanz)</li> </ul>

<b>Nachfrageseite: Akzeptanz und Marktpenetration</b>	<b>BEV</b>
---	------------

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Bevorzugung Elektromobile in der Markteinführungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Schaffung rechtlicher Grundlagen für die Zuteilung von Parkplätzen in der Nähe von ÖV-Knotenpunkten, Freigabe von Taxi und Busspuren für Elektromobile, Bevorrechtigte Parkplätze für Elektrofahrzeuge (die aufladen)</li> </ul>
Gewährleistung eines nachhaltigen Strommixes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Elektrizitätsbranche: Zur Förderung der Nachfrage ist Transparenz über den (minimal garantierten, Nachhaltigkeitsansprüchen genügenden) E-Mobilitäts-Strommix herzustellen sowie die Möglichkeit des Erwerbs von er-</li> </ul>

neuerbarer Elektrizität noch höherer Qualität vorzusehen.

- |                        |   |
|------------------------|---|
| Fahrstunden            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EVUs und Autobranche: Neue Geschäftsmodelle mit Kauf einer Anzahl grünen Kilometer (Kombination Autoleasing mit Bezug eines grünen Strommixes; Fahrzeug im Eigentum des EVU).</li> <li>• Bund: Mindestens eine Fahrstunde muss in einem Elektromobil absolviert werden.</li> </ul> |
| Nicht-monetäre Anreize | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parkhäuser und publikumsverkehrsintensive Einrichtungen wie Shoppingcenter: Es werden mehr Parkplätze bewilligt, falls ein Teil für Elektromobile reserviert bleibt.</li> <li>• Reservierte Parkplätze in Siedlungszentren.</li> </ul>   |
| Freizeitverkehr        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Tourismus, NGO: Demonstrationsprojekte gezielt für Freizeitverkehr (inkl. Berggebiet).</li> </ul>  |

**Monetäre Aspekte: Finanzierung, Anreize und Subventionen** **BEV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Markteinführung bei hohen Preisen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Neben allgemein auf Energieeffizienz ausgerichtete Förderprogramme wären für die beschleunigte Marktdurchdringung von BEV ein spezifisches <b>Förderprogramm Elektrofahrzeuge</b> mit direkten Subventionen (Kaufanreize, Stromtarife, Motorfahrzeugsteuerbefreiung, evtl. Bevorzugung im Strassenverkehr) vorzusehen..</li> <li>• Entwicklung von Leasingmodellen, Eingehen von Partnerschaften mit Batterievermiet-Gesellschaften, Second-Use-Batterieweiterverwendungsgesellschaften, Carsharing-Organisationen</li> </ul>
Anreizsysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone: Bonus-Malus-Systeme mit einmalig ausbezahltem hohem Bonus für Elektrofahrzeuge.</li> <li>• Bund: Bonusprämien für Elektrofahrzeuge mit Photovoltaik-Anlagen auf Garagendach, finanziert über Automobilsteuer, zeitlich befristet.</li> <li>• Erdölvereinigung: Schaffung eMobile-Fonds für Auszahlung Prämien bei Anschaffung Elektroauto (als inländische Massnahme im Rahmen der Teilkompensationspflicht der Treibstoffimporteure).</li> </ul>
Internalisierung externer Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Well-to-wheel-Energieaufwendung als Bemessungsgrundlage (statt wie heute tank-to-wheel)</li> </ul>
Koordination	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, NGO: Nationale Koordination der Forschungsthemen, Politikansätze, Pilotprojekte</li> </ul>

**Perspektiven und Herausforderungen der künftigen E-Mobilitätsforschung** **BEV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Nutzung des gesamten Potenzials der Elektromobilität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Schweizer Bundesämter in Partnerschaft mit Universitäten und Verbänden/Unternehmungen aus der Energie- und Automobilwirtschaft setzen ein nationales <b>Forschungsprogramm Elektromobilität</b> im Bereich Individualverkehr auf. Ein solches Forschungsprogramm sollte auf die schweizerischen Gegebenheiten abstellen: Forschung im Bereich intelligenter Energienetze (smart grids) inklusive vehicle-to-grid-Aspekte.</li> </ul>

Verbesserung Know-How über Fahrzeuge, deren Nutzung und Verfügbarkeit für Elektrizitätswirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Transportbranche: Erhebung der Potenziale der Elektromobilität im Güterverkehr</li> <li>• Forschung im Bereich der sozioökonomischen Innovation (andere Mobilitätskonzepte, Änderung des Nutzerverhaltens)</li> <li>• Forschung im Bereich der Batterietechnik, namentlich von Batteriemanagementsystemen sowie Businessmodelle für den Second-Life-Einsatz von Batterien.</li> </ul>
Grundlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizitätswirtschaft: Forschungen/Erhebungen zum Einsatz der PWs (Fahrtweiten, Standzeiten und Standorte im Tagesverlauf). Entsprechende Grundlagen werden benötigt, um ein Netz mit Ladestationen zu planen und um vehicle-to-grid-Konzepte zu konzipieren (Wann sind wie viel Fahrzeuge am Netz).</li> </ul>
Secondlife Batterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Erforschung des Strommixes (gemittelt und marginal) für MIV-Elektrizität (tagesganggewichtet).</li> <li>• Bund: Erforschung Recycling und Second-Life von Batterien inkl. Entfernung rechtlicher Hindernisse für neue Geschäftsmodelle.</li> </ul>

## 6.4 Fahrzeuge mit Brennstoffzellen (Fuel Cell Vehicles, FCV)

Die Brennstoffzellen-/Wasserstofftechnologie ist technisch noch weit entfernt von einer flächendeckenden Einführung. Deshalb ist der Handlungsbedarf hier vor allem auf Forschung und Entwicklung ausgerichtet. Mittel- bis langfristig ergibt sich hier dann aber auch ein ähnlicher Handlungsbedarf, wie er im Zukunftsbild BEV dokumentiert wurde.

Hardware: Infrastruktur, Tankstellen, Treibstoff, Normen		FCV
Handlungsbedarf	Massnahme	
Ergänzung/Aufbau der Strukturen zur Produktion der zusätzlich benötigten Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizitätsbranche: Konzepte zur Produktion des Wasserstoffs ausarbeiten</li> <li>• Bund, Elektrizitätsbranche, Erdölvereinigung: Vorbereitung Systemscheid für zentrale oder dezentrale Produktion sowie entsprechende Regulierung der Infrastruktur</li> <li>• Erdölvereinigung oder einzelne Tankstellenketten: Verstärkte Zusammenarbeit bzw. Kooperation mit Industriezweigen, bei denen in der Produktion Wasserstoff als Abfallprodukt anfällt bzw. als Nebenprodukt energieeffizient hergestellt werden kann, und Angebot von Wasserstoff bei einzelnen Tankstellen;</li> <li>• Bund: Forcierung der Bereitstellung von Wasserstoff über regenerative Energiequellen durch entsprechende Produktionsvergütungen</li> </ul>	
Infrastruktur zur Betankung der Fahrzeuge bereitstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Festlegung von Normen für Schnittstellen unter dem Aspekt der internationalen Kompatibilität</li> <li>• Bund: Formulierung und Verabschiedung von einheitlichen Sicherheitsstandards</li> </ul>	
Verbesserung Kenntnisstand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Langfristige Forschungsprogramme im Bereich Brennstoffzellen- und Wasserstoffspeichertechnik (Internationales)</li> </ul>	

	tional vorantreiben), z.B. Lagerfähigkeit H2
Einstieg in Wasserstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobranche: Prüfung eines Einstiegs in die Verwendung von Wasserstoff über Beimischung bei Gasantrieben</li> <li>• Elektrizitätsbranche: Beteiligung an Wasserstoffproduktion in entlegenen Gebieten (Sahara usw.)</li> </ul>
Betankungsinfrastruktur bereitstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erdölvereinigung: Umstrukturierung des Servicenetzes hinsichtlich der gestiegenen Anforderungen im Bereich der Wartung von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb und – der damit verbundenen - Hochvolttechnik</li> <li>• Bund, Kantone, Erdölvereinigung: Eingehen von Public-Private-Partnerships zur Teilfinanzierung der Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur</li> </ul>

**Angebotsseite (Fahrzeuge) FCV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Erfahrungen sammeln	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone, Gemeinden, öffentliche Flottenbetreiber: Frühzeitiges Umstellen lokaler Bus-, LNF- und PW-Flotten auf Brennstoffzellenantrieb, welche in Stadtzentren mit nur einer oder wenigen Tankstellen betrieben werden können.</li> </ul>
Energiebereitstellung einbeziehen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobranche: Eingehen von Allianzen mit Herstellern erneuerbaren Wasserstoffs</li> </ul>

**Nachfrageseite: Akzeptanz und Marktpenetration FCV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Hohe Fahrzeugkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Abwarten von Technologiesprüngen bei den Fahrzeugen, bevor eine Förderung in Erwägung gezogen wird. Langfristig wirtschaftliche Gleichstellung von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb zu Fahrzeugen in klassischer Bauweise durch Förderprogramme oder Bezuschussung.</li> <li>• Kantone, Gemeinden, öffentliche Flottenbetreiber: Gegebenfalls Einstieg in Test-Flotten (z.B. Busse im öffentlichen Verkehr) oder öffentliche Fahrzeuge prüfen.</li> </ul>

**Monetäre Aspekte: Finanzierung, Anreize und Subventionen FCV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Hohe Fahrzeugkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Massnahme, da im Moment keine Markteinführung absehbar.</li> </ul>

**Perspektiven und Herausforderungen der künftigen Mobilitätsforschung FCV**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Pilotprojekte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, später Erdölvereinigung: Demonstrationsprojekte wie städtische Busflotten, kommunale Fahrzeugflotten, Baustellen- und Spezialfahrzeuge.</li> <li>• Bund/Universitäten: Erforschung Wasserstoff als vermit-</li> </ul>

telnder Energieträger und -speicher.

Pfadabhängigkeit

- Bund, Erdölvereinigung: Erforschung der Transformationsperiode bis zu einem Wasserstoffwirtschaft-Gleichgewichtszustand: Welche Hindernisse behindern die Transformation?

## 6.5 Muskelkraft und öffentlicher Verkehr (HP+ PT)

Das Zukunftsbild HP+PT beinhaltet ebenfalls eine hohe Fahrleistung mit Elektrofahrzeugen. Deshalb wird hier teilweise auf die Handlungsempfehlungen des Zukunftsbilds BEV verwiesen.

Hardware: Infrastruktur, Tankstellen, Treibstoff, Normen		HP+PT
<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>	
Produktion Wasserstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>	
Tankstellen-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>	
Standardisierung Stecker, Ladestationen, Abrechnungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>	
Verkehrsinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemeinden, Kantone: Entflechtung der Verkehrsträger (Fussverkehr, Zweiradverkehr) zwecks Förderung des Langsamverkehrs und Erhöhung der Sicherheit des Langsamverkehrs.</li> </ul>	
Raumplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone, Gemeinden: Planung, Erhalt und Errichtung von mit Langsamverkehr erreichbaren Naherholungsgebieten.</li> </ul>	
Öffentlicher Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone, Gemeinden: Mindestens Erhalt des ÖV-Angebots in Randregionen</li> </ul>	
Wertewandel, Verkehrsplafonierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantone: Rechtliche Grundlagen schaffen für das Verwendung öffentlicher Parkplätze durch CarSharing-Fahrzeuge.</li> </ul>	
Angebotsseite (Fahrzeuge)		HP+PT
<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>	
Angebot sicherstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Subventionen der Hersteller von elektrischen Zweirädern und E-Scootern.</li> </ul>	
Bevorzugung Elektromobile in der Markteinführungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>	
Verfügbarkeit von Fahrzeugen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>	
Versorgung der Bevölkerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detailhandel: Dezentrale Detailhandels- und Logistikkonzepte, weil Personen weniger in Einkaufszentren etc. gebündelt sind.</li> </ul>	
Nachfrageseite: Akzeptanz und Marktpenetration		HP+PT
<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>	
Wertewandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Akteure: Positive Anreize und Beispiele sind notwen-</li> </ul>	

	dig, um die Akzeptanz einer Verkehrsplafonierung zu generieren.
monetäre Anreize	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gratisparkplätze für Elektroautos und/oder -zweiräder in Siedlungsnähe und bei ÖV-Knoten.</li> </ul>
Standardisierung Stecker, Ladestationen, Abrechnungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog zu BEV</li> </ul>
Effiziente Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemeinden, NGOs, Autobranche: Testmöglichkeiten für E-Bikes.</li> </ul>
Wertewandel, Verkehrsplafonierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkürzung der Verkehrswege, raumplanerische Ansätze, Förderung Telearbeit usw.</li> </ul>

**Monetäre Aspekte: Finanzierung, Anreize und Subventionen** **HP+PT**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Öffentlichen Verkehr fördern	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Prüfen, welcher finanzielle Aufwand nicht nur in der Infrastruktur, sondern auch beim Betrieb des ÖV anfallen könnte.</li> </ul>
Wertewandel, Verkehrsplafonierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone: Änderung Lohnsteuerabzüge (Eliminierung der Subventionierung des Pendlerverkehrs)</li> </ul>
Mobility Pricing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund: Regressives Mobility Pricing zur Reduktion kurzer (substituierbarer) Fahrten: Hoher Sockelgebühr für erste 3 km.</li> </ul>

**Perspektiven und Herausforderungen der künftigen Mobilitätsforschung** **HP+PT**

<b>Handlungsbedarf</b>	<b>Massnahme</b>
Wertewandel, Verkehrsplafonierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Akteure: Erforschen, wie über Kommunikation, best practices, Gruppen-Selbstverpflichtungen usw., der Wertewandel herbeigeführt und verstärkt werden kann.</li> </ul>



## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Empfehlungen zu den Zukunftsbildern

Im Folgenden fassen wir die gesammelten Empfehlungen zum Handlungsbedarf je Zukunftsbild zusammen.

**Zukunftsbild BAU – Business As Usual.** Dieses Zukunftsbild steht für die Richtung, in der wir uns bewegen, und den Zustand des Mobilitätssystems, den wir ohne zusätzliche, neue politische Massnahmen erreichen werden. Es werden aber dennoch viele Massnahmen notwendig sein – so wie bis anhin. Namentlich die heutige Situation und die bereits vorhandenen Trends<sup>103)</sup> erfordern Massnahmen, um das resultierende Verkehrswachstum überhaupt bewältigen zu können. Dazu gehören vor allem Massnahmen zum Kapazitätsmanagement auf den Strassen (Telematik) und ein Mobility Pricing. Zudem ist die aktive Sicherheit der Fahrzeuge zu erhöhen, damit kleinere und leichtere Fahrzeuge sicherer werden und damit eine höhere Marktakzeptanz erzielen. Zum BAU-Szenario gehört auch die Übernahme der 130g CO<sub>2</sub>/km-Regelung für PW-Neuzulassungen.

**Zukunftsbild ICI – Internal Combustion Improved.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbilds liegt auf der sozio-ökonomischen Seite, nicht auf der technischen. Die Fahrzeuge und die notwendige Technik sind sozusagen schon heute vorhanden und weitestgehend erprobt. Die Herausforderung ist es, diese Best-Available-Technology (BAT) zum Kunden zu bringen. Hierzu wird konzeptionell ein klassischer Policymix notwendig sein. Zu betonen ist, dass die Massnahmen griffig und teilweise hart sein müssten, ausser wenn die Erdölpreise so ansteigen, dass dadurch eine Entwicklung hin zu ICI induziert wird. Zum Policymix würden sowohl regulatorische Massnahmen (unilaterale Zulassungsverbote von energie-ineffizienten Fahrzeugen) als auch marktbasierende Massnahmen (progressive Besteuerung ineffizienter Fahrzeuge; CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Treibstoffen, höhere Treibstoffsteuern und zusätzlich Mobility Pricing; Anreizsysteme beim Neuwagenkauf), flankiert mit angebotsorientierten Ansätzen (Zielvereinbarungen mit Generalimporteuren; Übernahme der gCO<sub>2</sub>/km-Zielwert-Weiterentwicklung der EU für 2020) und Informationsmassnahmen gehören.

**Zukunftsbild BEV – Battery Electric Vehicles.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbilds BEV ist ein verbindliches Commitment der Politik und der Gesellschaft: Die Schweiz will zu jenen Industrieländern mit dem schnellstem Anstieg bei der Elektromobilität gehören. Dazu müsste die Schweiz verstärkt Fördermittel bereitstellen. Notwendig ist auch die Gewährleistung eines nachhaltigen marginalen Strommixes durch die Elektrizitätsbranche, sowie eine koordinierte Planung, Kommunikation und Aufbau eines Netzes an Elektrotankstellen für die Schweiz. Sodann soll die Schweiz ihre Stärken als Experimentierfeld für sozioökonomische Innovation im Mobilitätsverhalten, im CarSharing und in der kombinierten Mobilität verwenden. Neue Geschäftsmodelle (Energieversorgungsunternehmen als Elektromobilitätsanbieter, Kauf von Fahrleistung statt von Fahrzeugen), die Förderung der Kopplung mit Photovoltaikmodulen sowie die Förderung und Bevorzugung (z.B. Parkplätze auf öffentlichem Grund und bei Bahnhöfen) von Elektro-CarSharing sind notwendig.

**Zukunftsbild FCV – Fuel Cell Vehicles.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbilds liegt, im Gegensatz zu ICI und gar zu BEV, auf der technischen Seite. Solange die nachhaltige Herstellung von Wasserstoff nicht in grossem Massstab möglich ist, lässt sich dieses Zukunftsbild nicht erreichen. Da sich die übrigen Technologien auch weiter entwickeln werden, müssen für die Wasserstoffherstellung sehr grosse Effizienzsprünge eintreten. Ansonsten kann sich wasserstoffbasierte Mobilität allenfalls in Nischenanwendungen etablieren, aber nicht als Hauptenergieträger. Die Massnahmen für dieses Zukunftsbild umfassen

103) Motorisierungsgrad steigt, wenn auch dank des gut ausgebauten ÖV-Systems niedriger als in den umliegenden Ländern; hohe Kaufkraft führt zu Neuwagenflotten mit dem jeweils höchsten Treibstoffverbrauch in Europa; Bevölkerungswachstum

deshalb die Forschung und Entwicklung in der Wasserstoffherstellung, aktuell jedoch kaum in der weiteren Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

**Zukunftsbild HP+PT – Human Power + Public Transport.** Die Herausforderung für das Zustandekommen dieses Zukunftsbildes liegt im notwendigen Wertewandel. Hier steht die sozio-ökonomische Herausforderung erneut im Vordergrund (wie bei ICI und BEV), jedoch nochmals deutlich grösser. Das Ziel einer Plafonierung oder Stabilisierung der Fahr- oder Verkehrsleistung ist schon seit langem „Wunschzustand“ vieler Akteure; die reale Entwicklung war aber eine andere. Die aktuellen Trends sind dem Zukunftsbild HP+PT entgegengesetzt. Für dessen Realisierung sind demnach Massnahmen nötig, welche anders und schärfer sind als bisherige Massnahmen. Sie müssen aber demokratisch legitimiert werden. Ein Wertewandel ist deshalb Voraussetzung. Für das Erreichen des Zukunftsbildes HP+PT stehen deshalb zunächst wertebeeinflussende Massnahmen im Vordergrund. Zu betonen ist, dass für dieses Zukunftsbild die Mobilität generell deutlich teurer werden müsste, die Mobilität sich nicht weiter beschleunigen sollte (bis hin zum gewollten Bestehenlassen von Engpässen), und kombinierte Mobilität teilweise "erzwingen" werden müsste (z.B. Sperrung des Zugangs zu Stadtzentren für MIV). Es ist möglich, dass Massnahmen, welche sinnvoll sind für den Weg in Richtung der Zukunftsbilder ICI, BEV (und ggf. FCV), im Widerspruch stehen zu solchen für den Weg in Richtung HP+PT. Zu betonen ist die Kostenseite: Das Zukunftsbild HP+PT kommt mit weniger Investitionen in Energiebereitstellung und -verteilung sowie Strasseninfrastruktur aus. Hingegen werden hohe Investitions- und Betriebskosten im öffentlichen Verkehr notwendig werden.

## 7.2 Ausblick: Welche Entwicklungen zeichnen sich ab?

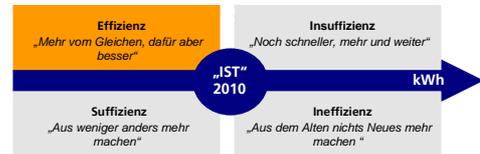
Ziel der Zukunftsbilder ist es, fünf mögliche Zustände zu analysieren; sie wurden bewusst zugespitzt und zeichnen sich je durch eine klare technologische Hauptvariante aus. So werden Vor- und Nachteile der Antriebsvarianten sichtbar. Die Realität wird sich aber zwischen den Zukunftsbildern bewegen, die wahrscheinliche künftige Entwicklung ist eine Mischung aus mehreren Zukunftsbildern, wobei die Ausgangslage die Entwicklung hin zu BAU ist. Die weitere Entwicklung kann auch zunächst in Richtung eines Zukunftsbildes (z.B. zunächst mehr ICI) und anschliessend zu einem anderen Zukunftsbild übergehen (z.B. BEV).

Die Kombination aus mehreren Zukunftsbildern wird sich auch deshalb ergeben, weil damit vor allem in der Übergangsphase die Vorteile mehrerer Systeme kombiniert und die Nachteile reduziert werden können.

Das Forschungsteam erwartet eine Entwicklung, welche von BAU ausgehend unter dem Einfluss höherer Ölpreise, internationaler Klimaschutzverpflichtungen, der Internalisierung externer Kosten und einem gewissen Wertewandel stark in Richtung des Zukunftsbildes ICI geht, um dann in eine Kombination aus ICI und BEV überzugehen. Dazu sind im Vergleich zum BAU politische Massnahmen notwendig wie beim ICI-Zukunftsbild beschrieben; wir erwarten, dass solche oder ähnliche Massnahmen aufgrund von Energie- und CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sowie einem teilweisen Wertewandel politisch umgesetzt werden. Ein Wertewandel wie er für die Realisierung des Zukunftsbildes für HP+PT notwendig wäre, erwarten wir vor dem Hintergrund verfügbarer technischer Alternativen nicht. Mehrheitlich aus Kostengründen wird ICI gegenüber BEV in den nächsten 20 Jahren im Vorteil sein. Die kommenden sehr effizienten Fahrzeuge mit internem Verbrennungsmotor werden reduzierte Umweltbelastungen aufweisen, welche mit Elektromobilität mit einem Standard-Strommix vergleichbar sind – aber zu geringeren Kosten. Die Potenziale von Elektromobilen namentlich für Kleinstfahrzeugen, Kurzstreckenmobilität, Freizeitmobilität und bei der Verbindung mit erneuerbaren Energien (Speicherfähigkeit), sowie die hohe Zahlungsbereitschaft eines grösseren Teils des Schweizer Neuwagenmarkts für umweltschonende Technik, werden ein Wachstum erlauben, welches über dem europäischen Schnitt liegen dürfte, die Marke von 100'000 Elektromobilen in der Schweiz im 2020 aber knapp verfehlen dürfte. Ab 2016 ist mit der breiten Verfügbarkeit von batteriebetriebenen Fahrzeugen mit Range Extender (serielle Hybride) zu rechnen. Solche Fahrzeuge bleiben teurer als künftige sehr effiziente, kleine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, welche im realen Verkaufspreis günstiger als heute werden könnten.

# A1 Beschreibung Mobilitätswelten

## Effizienz 2035/2050: Mehr Strassenverkehr mit weniger Energie

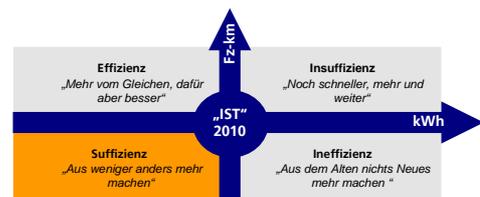


Politik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Verkehrspolitik des Bundes hat sich in ihren Schwerpunktsetzungen gegenüber 2010 nicht massgeblich verändert; das Leitbild der nachhaltigen Verkehrsentwicklung hat jedoch deutlich an Einfluss gewonnen.</li> <li>• Als Grundprinzip staatlichen Handelns ist die Nachhaltigkeit zunehmend etabliert. Damit ist sie ein bedeutender normativer Rahmen für die Sektorpolitiken.</li> <li>• Die Globalisierung und zunehmende Spezialisierung sowie der steigende materielle Wohlstand führen zu einer stetigen Zunahme des in- und europäischen Güterverkehrs.</li> <li>• Der zunehmende europäische Integrationsprozess (ohne Beitritt der Schweiz aber mit einer Fortschreibung bilateraler Abkommen) bedingt die verstärkte Aufnahme von Transitverkehr-Strömen.</li> <li>• Der Spielraum des Staates beim Einsatz der öffentlichen Finanzen nimmt ab. Im Bereich der Infrastruktur wird ein zunehmender Anteil der Mittel notgedrungen in die Werterhaltung bestehender Netze investiert. Die Möglichkeiten, neue Bauten zu realisieren, sind ohne eine Neuallokation von Mitteln stark eingeschränkt.</li> <li>• Neben punktuellen Strassenausbauten erfolgen die Schwerpunktsetzungen vornehmlich bei der Steigerung der Kapazitäten vorhandener Strasseninfrastrukturen (Engpassbeseitigung in Agglomerationen).</li> <li>• Die Umwelt- und Ressourcenpolitik spielt auf allen Ebenen eine zunehmend wichtigere Rolle.</li> <li>• Insgesamt setzen alle Politikfelder stark auf technologieorientierte Politikstrategien.</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die ökologische Modernisierung der Weltgesellschaft ist Konsens.</li> <li>• Pendlerdistanzen und Freizeitverkehr in der Schweiz vergrössern sich stetig.</li> <li>• Der Anteil der Altersgruppe 65+ nahm stetig zu, zudem nimmt die Verkehrsleistung dieser Altersgruppe anders als in der Vergangenheit stark zu.</li> <li>• Das Auto ist weiterhin der Hauptverkehrsträger, die grosse Mehrheit der Schweizer Bevölkerung hat ständigen Zugriff auf ein Auto.</li> <li>• Die kulturelle Bedeutung des Automobils wird sich weiterentwickeln und stärker ausdifferenzieren; es wird zu einer wachsenden Anzahl unterschiedlicher „Automobilitätsleitbilder“ kommen.</li> <li>• In den Ballungsräumen werden auch künftig autofreie oder autoarme Mobilitätsstile an Bedeutung gewinnen.</li> <li>• Die Anzahl junge Fahranfänger wird gerade in den Städten zurückgehen; der Führerscheinwerb mit 18 ist keine Selbstverständlichkeit mehr; in der urbanen Jugendkultur verliert das Auto als Verkehrsmittel an Bedeutung.</li> </ul>

Alltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insgesamt gibt es beim Mobilitätsverhalten keine grossen strukturellen Veränderungen gegenüber 2010</li> <li>• Neue Lebens-/Familienmodelle („Patchwork-Familien“) stellen andere Anforderungen an die individuelle Mobilitätsorganisation; sie erfordern rationalere Mobilitätsentscheidungen und den flexiblen Einsatz von unterschiedlichen Mobilitätswerkzeugen</li> <li>• Die Zunahme der Single-Haushalte und von Haushalten mit mehreren Wohnsitzen steigern den individuellen Mobilitätsaufwand</li> <li>• Raumordnerische und stadtplanerische Entwicklungen setzen auf die Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung von Verkehren</li> <li>• Die wachsende Komplexität des Alltagslebens führt dazu, dass immer Menschen nach neuen individuellen Mobilitätslösungen suchen; diese „Mobilitätspioniere“ lassen sich nicht nur auf die Nutzung eines Mobilitätswerkzeugs festlegen</li> <li>• Die wachsende Komplexität des Alltagslebens erfordert zudem eine bessere individuelle Verfügbarkeit über möglichst viele Mobilitätswerkzeuge und steigert die Nachfrage nach neuen Mobilitätsdienstleistungen</li> <li>• Die Flexibilisierung der Arbeitswelt ist fortschreitend und sorgt für eine leichte räumliche und zeitliche Verschiebung von Pendlerströmen</li> <li>• Die Zeit unterwegs wird immer effizienter genutzt, entweder zur Steigerung der beruflichen Produktivität oder zur sozialen und kulturellen Reproduktion</li> <li>• Der Verkehr verteilt sich aufgrund der flexiblen Zeitstrukturen über den ganzen Tag, es treten weniger dominante Spitzen während der Hauptverkehrszeiten auf. Mit einer hochmobilen älteren Bevölkerung, die bis ins höhere Alter von 80 Jahren über viel Zeit und finanzielle Ressourcen für Tagesausflüge mit dem öffentlichen oder motorisierten Individualverkehr verfügt, ist mit einer weiteren Zunahme der Mobilitätsnachfrage zu rechnen</li> <li>• Zentraler Nenner ist dabei die zunehmende Pluralisierung der Gesellschaft. Die Bandbreite an Mustern von Lebensführungen nimmt weiter zu und differenziert sich noch stärker aus.</li> <li>• Möglichst individuelle Fortbewegungsarten werden bevorzugt, die Nachfrage im öffentlichen Verkehr dehnt sich auf die Nacht- und Randzeiten aus</li> </ul>
Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Wohlstandsniveau der 2010er Jahre ist fortgeschrieben und das BIP ist bis 2035 gestiegen.</li> <li>• Die Zahl der Erwerbslosen ist in der Schweiz auf einem im europäischen Vergleich geringen Niveau.</li> <li>• Die zunehmenden Verkehrsleistungen ermöglichen eine weitere Zunahme des Grads der Arbeitsteilung und der Spezialisierung. Damit sind wesentliche Grundlagen für Produktivitätsfortschritte und damit für Wirtschaftswachstum gegeben.</li> <li>• Durch die flexibleren Arbeitsstrukturen verändern sich die Tagesganglinien, da Erwerbstätige häufiger auch tagsüber oder am Wochenende unterwegs sind. Die Integration der Frauen in den Arbeitsmarkt geht nicht einher mit einer abnehmenden Arbeitstätigkeit der Männer, womit die Weghäufigkeiten im Berufsverkehr insgesamt ansteigen</li> </ul>
Verkehrsinnovation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologische und weniger soziale Innovationen bieten das Rückgrat der Erneuerung des Verkehrssektors.</li> <li>• Gerade im Automobilsektor führt der Weg in Richtung seiner nachhaltigen Modernisierung über den technischen Fortschritt.</li> <li>• Die Markteinführung neuer Umwelttechniken hat sich gegenüber früheren Jahrzehnten deutlich beschleunigt.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diese Technologien haben die negativen Auswirkungen des MIV deutlich verringert.</li> <li>• Dank des technologischen Fortschritts sind seit einigen Jahren die Grenzwerte für CO, NO<sub>x</sub> und HC deutlich unterschritten.</li> <li>• Die Ausdifferenzierung des automobilen Antriebsstrangs ist schnell vorangeschritten, sodass sich neben den klassischen Diesel- und Ottomotoren zahlreiche alternative Antriebe etablieren konnten.</li> <li>• Das Auto wird dank I+K-Technologien zu einem vielseitig vernetzten Verkehrs-, Kommunikations- und Interaktionsmittel.</li> <li>• Im Falle des Elektroautos entsteht dank künftiger „Vehicle-to-Grid“ Technologie eine neuartige Einbindung in das Stromnetz.</li> </ul>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bund, Kantone und Städte bieten Anreize, Energie im Verkehr zu sparen, vor allem bei der Anschaffung energieeffizienter Fahrzeuge.</li> <li>• Die energiepolitischen Zielsetzungen, angefangen bei Zielvorgaben der Europäischen Union bis hin zu den lokalen Zielsetzungen von Städten und Gemeinden in Sachen Energieautarkie und CO<sub>2</sub>-Neutralität, lösen im gesamten Energiesektor dynamische Innovationen aus.</li> <li>• Die Energiepreise sind stark angestiegen und üben einen deutlichen Einfluss auf den Verkehrssektor aus.</li> </ul>

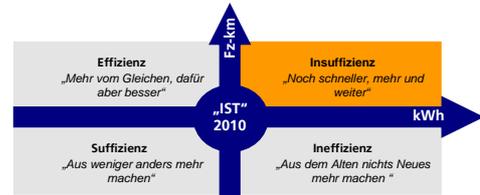
**Suffizienz 2035/2050:  
Weniger Strassenverkehr mit weniger Energie**



Politik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Verkehrspolitik des Bundes setzt neue Schwerpunkte bei der Reduktion von Fahrten mit dem privaten PW und bei der Verlagerung von Autoverkehren auf den ÖV bzw. Langsamverkehr.</li> <li>• Eine massiv veränderte Raumentwicklungspolitik schafft hochverdichtete Siedlungsstrukturen in Agglomerationsräumen ohne Einbussen bei der Lebensqualität. Damit werden neue Grundlagen für eine stärkere Vermeidung von Verkehren gelegt; der Trend zu grösseren pro-Kopf Wohnflächen ist gebrochen.</li> <li>• Das Leitbild der Stadt der kurzen Wege wird auf lokaler Ebene konsequent umgesetzt</li> <li>• Der europäische Integrationsprozess (nach wie vor ohne Beitritt der Schweiz) hat sich verlangsamt und bilaterale Handelsabkommen erschweren den internationalen Warenaustausch</li> <li>• Der gesamte Verkehrssektor ist in den europäischen Emissionshandel einbezogen</li> <li>• Regionale Produktions-, Distributions- und Konsumtionscluster stellen das wirtschaftspolitische Rückgrat der Schweiz dar.</li> <li>• Die finanziellen Mittel für den Bau und Unterhalt der Infrastrukturen verlagern sich auf die Beschleunigung des Verkehrs innerhalb der Agglomerationsräume (Ausbau des ÖVs über- und unterirdisch).</li> <li>• Für den Interagglomerationsverkehr werden keine neuen Strasseninfrastrukturen bereitgestellt.</li> <li>• Ein Paradigmenwechsel bei der Bepreisung des Verkehrs fördert die Vermeidung transportintensiver Mobilitätsmuster.</li> </ul>
---------	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Umwelt-, Energie- und Verkehrspolitik setzt neben der Förderung neuer Technologien auf soziale Innovationen mit weniger raumgreifenden Mobilitätssystemen.</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die starke Überalterung sowie geringere Zuwanderungsraten unterstützen den Trend bei der abnehmenden Verkehrsleistung.</li> <li>• An die Stelle einer technologie- und effizienzorientierten ökologischen Modernisierung tritt der ökologische Strukturwandel.</li> <li>• Der private Personenwagen verliert seine Dominanz im Mobilitätsleitbild der Schweizer Bevölkerung.</li> <li>• In den Ballungsräumen werden autofreie oder autoarme Mobilitätsstile noch stärker an Bedeutung gewinnen.</li> <li>• Die zunehmende Pluralisierung der Gesellschaft wird gestoppt. Die Bandbreite an Mustern von Lebensführungen nimmt nicht weiter zu und differenziert sich nicht noch stärker aus.</li> </ul>
Alltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Epoche des bedingungslosen „höher, schneller, weiter“, in der sich der moderne Mensch „euphorisch“ mobilisierte, klingt aus, und immer mehr Menschen versuchen durch mobilitätsrelevante Lebensentscheidungen (Wohnstandortwahl) Wege zu vermeiden und Tagesdistanzen zu verringern.</li> <li>• Pendlerdistanzen und Anzahl der Pendlerfahrten verringern sich deutlich.</li> <li>• Im Bereich der Mikromobilität (auf Wegen bis zu 3 km) werden gerade in den Ballungsräumen verstärkt nicht-motorisierte oder elektrifizierte Mobilitätswerkzeuge (Scooter, Elektrovelos, „Segways“ zum Einsatz kommen).</li> <li>• Die Erreichbarkeit ländlicher und peripherer Gebiete sowie der Tourismusregionen in der Schweiz hat sich verringert.</li> <li>• Die Investitionen in die Daseinsgrundvorsorge in diesen Räumen sind massiv angestiegen; so werden die bislang notwendigen Personenverkehr in die Zentren stärker vermieden.??</li> <li>• Die Lebensqualität in den hochverdichteten Agglomerationsräumen hat sich durch neue Architekturen, welche u.a. „grüne“ städtische Kulturlandschaften schaffen noch verbessert.</li> </ul>
Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eine andere Sicht des Wirtschaftens setzt sich durch ("Zero Growth"), bei der sich trotz geringen Wirtschaftswachstums Wohlstand und Beschäftigung sichern lassen.</li> </ul>
Verkehrsinnovation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das verkehrssubstituierende Potenzial von Informations- und Kommunikationstechnologien wird massiv gefördert und weiterentwickelt.</li> <li>• Mobility-Pricing setzt Anreize zur Vermeidung von Autofahrten und Verlagerung auf andere Verkehrsträger.</li> <li>• Die Energieeffizienzgewinne und Treibhausgasreduktionen beim einzelnen Fahrzeug werden nicht länger durch ein weiteres Anwachsen der Fahrzeugflotte kompensiert.</li> </ul>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die 2000 Watt-Gesellschaft, mit spezifischen, quantitativen Zielen für die Alltagsmobilität ist allgemein anerkanntes, langfristiges energiepolitisches Ziel des Bundes.</li> <li>• Die dezentrale Energieerzeugung aus erneuerbaren Energie nimmt zu; Haushalte werden zu "Prosumenten".</li> <li>• Der Anteil regenerativer Energien nimmt stetig zu.</li> <li>• In einzelnen Lebensbereichen gibt es starke Fortschritte bei den effizienzsteigernden Technologien. Im Übrigen wird die reduzierte Endenergienachfrage durch geringeren Verbrauch getragen.</li> </ul>

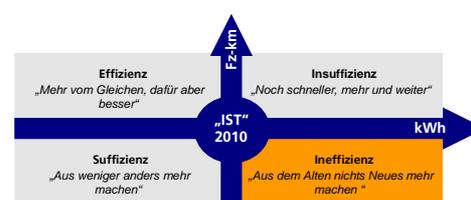
## Insuffizienz: mehr Strassenverkehr mit mehr Energie



Politik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Schweizer „Beschleunigungspakt“ sorgt für einen massiven Ausbau des heimischen Verkehrs- und Energiesektors. Die nationale und internationale Politik hält zwar weiterhin an der Bekämpfung des Klimawandels fest, setzt dabei allerdings auf die Kohlendioxidabtrennung bei Kohlekraftwerken und Nukleartechnologie.</li> <li>• Im Vordergrund der Klimapolitik steht jedoch die Anpassung an den Klimawandel und die damit verbundene Schaffung neuer Märkte und unternehmerischer Perspektiven.</li> <li>• Die Politik setzt hinsichtlich der Elektrifizierung des MIV in erster Linie auf Wasserstoff; vielerorts spielt die Kernenergie eine zentrale Rolle bei der Wasserstoffherstellung.</li> <li>• Durch massive Investitionen in die Kernenergie, wird der zusätzliche Energiebedarf gesichert, der durch die umfassende Elektrifizierung des motorisierten Verkehrs. Der intereuropäische Strassenverkehr nimmt deutlich zu; an den Rändern der Schweiz wachsen die grenzüberschreitenden Pendlerströme stark an.</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesellschaftliche Leitbilder, die im Zusammenhang mit der Suffizienzwirtschaft stehen, sind „out“; „Masshalten“ gilt angesichts des Fortschritts als unzeitgemäss.</li> <li>• Ein neuer „Nuklearkonsens“ oder „Wasserstoffkonsens“ tritt dem „Nachhaltigkeitskonsens“ entgegen.</li> <li>• In der neuen „Risikogesellschaft“ überwiegt der Glaube an die Beherrschbarkeit technologischer Risiken.</li> <li>• Der fortschreitende Klimawandel und die damit verbundenen einschneidenden gesellschaftlichen und alltagsweltlichen Veränderungen gelten als unabänderlich.</li> <li>• Eine Politik der Anpassung an den Klimawandel, weil als kostengünstiger beurteilt als die Eindämmung des Klimawandels, bestimmt vielerorts das Agieren von privaten und öffentlichen Akteuren.</li> </ul>
Alltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Schweizerinnen und Schweizer sind hochmobil; klassische „Invarianzen“ wie das konstante Reisezeitbudget pro Kopf verschwinden, die durchschnittliche Reisezeit nimmt von ca. 90 auf ca. 110 Minuten je Tag zu.</li> <li>• Der Boom in allen Sektoren und die Flexibilisierung der Arbeitswelt erfordern, dass aus der Reisezeit produktive Zeit wird.</li> <li>• Ein Grossteil der Schweizer Haushalte zeichnet sich durch ein Vollversorgung mit unterschiedlichen Mobilitätswerkzeugen und -dienstleistungen aus, welche eine maximale Wahlfreiheit garantieren.</li> </ul>
Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die ökonomische und kulturelle Globalisierung schreitet weiter voran, die Weltwirtschaft wächst.</li> <li>• Neue Wachstumsmärkte entstehen insbesondere auch im Energiesektor.</li> <li>• Mit dem weiter wachsenden Welthandel nimmt auch der Verkehr zu, welcher nicht oder nur schwer durch alternative Energieträger ersetzt werden können (Seeschifffahrt und Flugverkehr)</li> <li>• Das Schweizer BIP wächst überdurchschnittlich und führt nahezu zu Vollbeschäftigung.</li> </ul>
Verkehrsinnovationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeffizienzsteigernde Innovationen, welche die Gesamtenergiebilanz des Verkehrs im grossen Stil verbessern, bleiben aus.</li> <li>• Herkömmliche, verbrennungsmotorisch betriebene Personenwagen</li> </ul>

	<p>schaffen keine signifikante Effizienzsteigerung.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Brennstoffzelle schafft den Durchbruch, insbesondere weil das Angebot an Wasserstoff gesichert ist und die Probleme der Lagerung im Fahrzeug gelöst werden.</li> <li>Hochgeschwindigkeitsprojekte im Bahnverkehr („Swissmetro“) fördern die Entstehung von verkehrsintensiven Raumstrukturen und wirken sich auch beschleunigend auf Gesamtmobilität und Strassenverkehr aus.</li> </ul>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infolge der jährlich stark steigenden Nachfrage erfährt der gesamte Energiesektor einen Boom. Dies betrifft namentlich die Kernenergie. Der Anteil der nachhaltigen Energien an der Gesamterzeugung stagniert. Eine zentrale Rolle spielt Wasserstoff als Endenergieträger, nuklear erzeugt oder an weit entfernten Standorten. Dies beflügelt insbesondere den Verkehrssektor.</li> </ul>

### Ineffizienz: Weniger Strassenverkehr mit mehr Energie



Politik	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schweizer Politik ist rückwärtsgewandt und entfernt sich zunehmend von Leitbildern der Nachhaltigkeit.</li> <li>Die Schweiz isoliert sich tendenziell, umgeben von einer sich weiter integrierenden Europäischen Union, und konzentriert sich auf eine Stellung als Standort höchster Wohn- und Arbeitsqualität mit Begrenzung der Zuwanderung.</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ein umfassender gesellschaftlicher Wandel und ein Aufbruch in Richtung einer ökologischen Modernisierung oder eines ökologischen Strukturwandels bleiben aus.</li> <li>Gesellschaftlicher Stillstand wird durch eine fortschreitende selbstgewollte Isolation der Schweiz im europäischen und internationalen Kontext zusätzlich gefördert.</li> </ul>
Alltag	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Personenverkehrsleistungen per capita steigen nicht weiter, sondern sinken insgesamt leicht; insbesondere beim ÖV sind sowohl im schweizerischen Fern- als auch Nahverkehr Einbrüche festzustellen.</li> <li>Der Anteil des MIV am Modal-Split im Nahraum erhöht sich; auf längeren Distanzen jedoch nimmt er ab.</li> <li>Auf den Punkt gebracht: Die Menschen in der Schweiz bleiben eher Zuhause und bewegen sich ansonsten verstärkt auf kurzen Wegen mit ineffizienten Autos.</li> </ul>
Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Weltwirtschaft steckt in einer anhaltenden Krise mit nur geringen Wachstumsraten und längeren rezessiven Phasen; dies betrifft auch die Schweiz, welche aber ihre Position im Kreis der Dienstleistungsnationen in etwa wahren kann.</li> <li>Die damit in Verbindung stehenden Verkehre haben allerdings kaum einen Einfluss auf die Verkehrsleistung im MIV.</li> </ul>
Verkehrsinnovationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Das Ausbleiben von Verkehrsinnovationen, ineffiziente Infrastrukturen und Fahrzeugflotten erhöhen den Energieverbrauch pro Fahrzeugkilometer.</li> <li>Die Schweiz verzichtet auf jegliche Normen für PW-Neuzulassungen und schliesst sich der EU-Regelung zu den mittleren g CO<sub>2</sub>/km-Emissionen der PW-Neuzulassungen nicht an; in der Folge wird die Schweiz zu einem "Mekka" für stark motorisierte Fahrzeuge sowie für</li> </ul>

	<p>Fahrzeugmodelle, welche in den Nachbarländern nicht mehr auf den Markt gebracht werden.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Die Schweiz folgt dem Beispiel Deutschlands und hebt die generelle Geschwindigkeitsbegrenzung auf ihren Autobahnen auf.</li></ul>
Energie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Weil die Nachfrage mit bescheidenen jährlichen Raten zunimmt, hält der Ausbau der Energieproduktion mit der Nachfrage mit und es kommt vereinzelt zu Überkapazitäten bei der Energieproduktion.</li><li>• Dank namhaften Technologiesprüngen, z.B. bei der Kernspaltung oder -fusion, Tiefengeothermie oder "Wüstenstrom", verbilligt sich der Produktionsfaktor Energie. Dies führt zu abnehmenden Energiespar-Anreizen.</li></ul>

## A2 Teilnehmer Expertengespräche

Die befragten Experten sind in der folgenden Übersicht dargestellt.

Gesprächspartner/Institution	Art der Rückmeldung
Bach, EMPA	Persönliches Gespräch
Prof. Michael Höckel, Univ. of Appl. Sces Biel-Bienne, CH	Mail
Prof.Dr.J.Czerwinski, Univ. of Appl. Sces Biel-Bienne, CH	Mailkontakt, Beistellung Artikel "Die grosse Illusion vom Klimaneutralen Autofahren"
Dr. Vezzini, Univ. of Appl. Sces Biel-Bienne, CH	Aus Zeitgründen Befragung abgelehnt
Prof. Hug Kurt, Univ. of Appl. Sces Biel-Bienne, CH	Persönliches Gespräch
Dr. Andreas C.R.Mayer, TTM Technik Thermische Maschinen, CH	Telefoninterview
U. Böhme, Daimler R&D, Elektrische Antriebe und Steuerungen, Stuttgart, D	Mail
A. Fritz, Daimler R&D, Statische Softwareanalyse, Telematiksysteme, Stuttgart, D	Mail

*Tabelle 41: Liste der geführten Interviews (Stand 24.06.10), weitere Gespräche vereinbart*

Vorgängig zum Gespräch erhielten die Gesprächsteilnehmer den nachfolgenden Gesprächsleitfaden. Dieser wurde dann bei einem persönlichen Treffen oder in einem Telefonat besprochen.

### Pro

Bei den Experteninterviews waren sich bei den folgenden Aussagen zu Trends und Entwicklungen alle Experten sicher, dass diese eintreten werden, bzw. korrekt sind. Es sind nicht alle Aussagen mit der genannten Tendenz in dieser Auflistung enthalten, sondern eine Auswahl derjenigen, die den Grundtenor am besten wiedergeben.

- Teilautomatisierter Verkehr wird sich bis 2050 durchsetzen.
- Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und mit der Verkehrsinfrastruktur wird wesentlicher Bestandteil der Mobilität sein.
- Die Kundenanforderung hinsichtlich der Reichweite seines Fahrzeuges wird auch in Zukunft im Bereich 400 bis 800 Kilometer mit einer Energieträgerladung liegen.
- Der Trend, bei annähernd gleichem Hubraum und Leistungsparametern immer geringere Verbräuche zu erzielen, hält an.
- Es werden in Zukunft serienfähige Wasserstoffantriebe mit Brennstoffzellen verfügbar sein.

### Kontra

Bei den folgenden Aussagen waren sich die befragten Experten mehrheitlich sicher, dass diese nicht korrekt sind bzw. nicht eintreten werden.

- Kleinwagen sind nicht sicher.
- Die Individualisierung der Fahrzeuge geht zurück.

- Verbrauchsoptimierungen, die durch eine Reduzierung des Komforts erzielbar sind, werden von der Mehrheit der Kunden akzeptiert. [Schmale Reifen, Verschlechterung Klimatisierung, Verzicht auf Servolenkung etc.]
- Das Auto wird zukünftig seine Funktion als Statussymbol verlieren.
- Die Anschaffungskosten für Elektro-/Wasserstofffahrzeuge werden zukünftig unter den Anschaffungskosten vergleichbarer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor liegen.
- Es wird keine deutlichen Innovationen in der Entwicklung des klassischen Verbrennungsmotors mehr geben.
- Brennstoffzellen werden die Verbrennungsmotoren vollständig ersetzen.

### **Divergierend**

In den im Folgenden formulierten Aussagen gehen die Ansichten der befragten Experten deutlich auseinander. Zum Teil wurden die Aussagen sehr kontrovers diskutiert.

- Der Motorisierungsgrad [Fahrzeuge je Haushalt, auch reine Freizeitfahrzeuge berücksichtigt] nimmt weiter zu.
- Die Anforderung an die Reichweite von Fahrzeugen mit einer Energieträgerladung (Benzin, Diesel, Strom...) wird in Zukunft < 400km sein.
- Die Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge werden maximal 10% über den heutigen Anschaffungskosten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor liegen.
- Das mittlere jährliche Einsparungspotenzial bei Verbrennungsmotoren (Flottenmix) ist bis 2035 > 2.5%.
- Hybridkonzepte werden sich nicht durchsetzen.
- Es wird ein flächendeckendes Verteilernetz für H2 geben.
- Die eingesetzten Materialien (Platin etc.) verhindern auch zukünftig den flächendeckenden Einsatz von Brennstoffzellen.
- Biokraftstoffe werden einen Anteil > 10% als Beimischung zu Kraftstoffen bekommen.
- Das Potenzial für den Einsatz von Biotreibstoffen in der Schweiz wird in einem Bericht des Bundesrats auf 75 Mio. l je Jahr geschätzt (Biotreibstoffe 1. und 2. Generation). Dieser Betrag wird nicht gesteigert.

## A3 Annahmen und Resultate Energieverbrauch

### Primärenergiefaktoren (MJeq pro MJ in das Fahrzeug gelieferte Energie)

Treibstoff	MJ pro MJ in das Fahrzeug gelieferte Energie			Datenquelle
	min	plausibelster Wert	max	
Benzin	1.29	1.29	2.064	1), 2)
Diesel	1.22	1.22	1.952	1), 2)
Strom	1.22	2.97	4.08	1)
Atomkraft		4.08		1)
Kohle		3.92		1)
Gas (GuD)		2.34		1)
UCTE Produktionsmix		3.53		1)
CH Verbrauchsmix		2.97		1)
CH Produktionsmix		2.41		1)
Windkraft		1.33		1)
Photovoltaik		1.66		1)
Wasserkraft		1.22		1)
Wasserstoff Elektrolyse	2.10	5.12	7.04	1), 3)
Wasserstoff aus Erdgas	1.81	2.40	2.91	
Biogene Treibstoffe	0.45	1.45	5.55	1), 4)
Erdgas		1.15		1)

#### Datenquellen

- 1) ESU-Services (2008): Primärenergiefaktoren von Energiesystemen
- 2) era (2009): Auswirkungen fossiler Kraftstoffe
- 3) ISI (2010): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freie Endenergieträger
- 4) ESU-Services (2007): Life Cycle Assessment of BTL-fuel production; p. 48

**Primärenergieverbrauch**

**"Plausibler Wert"**

Primärenergie für die Herstellung von...	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mia kWh/a]	42.2	22.8	13.6	9.9	19.9	9.3	21.0	10.2	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mia kWh/a]	11.6	18.3	15.2	13.3	11.3	6.8	16.2	12.2	5.3	0.0	0.7
Strom [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0	8.3	0.0	0.0	26.1	0.0	16.5
Wasserstoff (Elektrolyse, Verbrauchsmix CH) [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	0.0	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	87.0	0.0
Biogene Treibstoffe [Mia kWh/a]	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mia kWh/a]</b>	<b>53.9</b>	<b>41.1</b>	<b>31.7</b>	<b>33.4</b>	<b>50.5</b>	<b>24.3</b>	<b>37.2</b>	<b>25.2</b>	<b>31.4</b>	<b>87.0</b>	<b>17.2</b>
Anteil Betrieb	78%	79%	79%	66%	56%	64%	79%	79%	42%	20%	36%
Well-to-tank	11.6	8.4	6.7	11.4	22.0	8.8	7.6	5.4	18.3	70.1	11.1

**Minimaler Wert**

Primärenergie für die Herstellung von...	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mia kWh/a]	42.2	22.8	13.6	9.9	19.9	9.3	21.0	10.2	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mia kWh/a]	11.6	18.3	15.2	13.3	11.3	6.8	16.2	12.2	5.3	0.0	0.7
Strom [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	3.4	0.0	0.0	10.7	0.0	6.8
Wasserstoff (Elektrolyse, Wasserkraft) [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	35.8	0.0
Biogene Treibstoffe [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mia kWh/a]</b>	<b>53.9</b>	<b>41.1</b>	<b>29.7</b>	<b>27.4</b>	<b>39.2</b>	<b>19.4</b>	<b>37.2</b>	<b>23.2</b>	<b>16.0</b>	<b>35.8</b>	<b>7.5</b>
Abweichung von "plausiblen Wert"	0.0	0.0	2.0	6.0	11.4	4.9	0.0	2.0	15.4	51.3	9.7
Anteil Betrieb	78%	79%	84%	80%	73%	80%	79%	85%	82%	48%	82%
Well-to-tank	11.6	8.4	4.7	5.4	10.7	3.9	7.6	3.4	2.9	18.8	1.3

**Maximaler Wert**

Primärenergie für die Herstellung von...	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mia kWh/a]	67.6	36.5	21.8	15.9	31.9	14.8	33.6	16.3	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mia kWh/a]	18.6	29.2	24.3	21.3	18.1	10.8	25.9	19.5	8.4	0.0	1.1
Strom [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0	11.3	0.0	0.0	35.9	0.0	22.6
Wasserstoff (Elektrolyse, Atomkraft) [Mia kWh/a]	0.0	0.0	0.0	0.0	26.5	0.0	0.0	0.0	0.0	119.6	0.0
Biogene Treibstoffe [Mia kWh/a]	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mia kWh/a]</b>	<b>86.2</b>	<b>65.7</b>	<b>57.2</b>	<b>51.2</b>	<b>76.5</b>	<b>37.0</b>	<b>59.6</b>	<b>46.8</b>	<b>44.4</b>	<b>119.6</b>	<b>23.7</b>
Abweichung von "plausiblen Wert"	0.0	24.7	25.5	17.7	26.0	12.7	22.3	21.5	12.9	32.5	6.6
Anteil Betrieb	49%	50%	44%	43%	37%	42%	50%	42%	30%	14%	26%
Well-to-tank	43.9	33.1	32.2	29.1	48.0	21.5	30.0	26.9	31.2	102.6	17.6

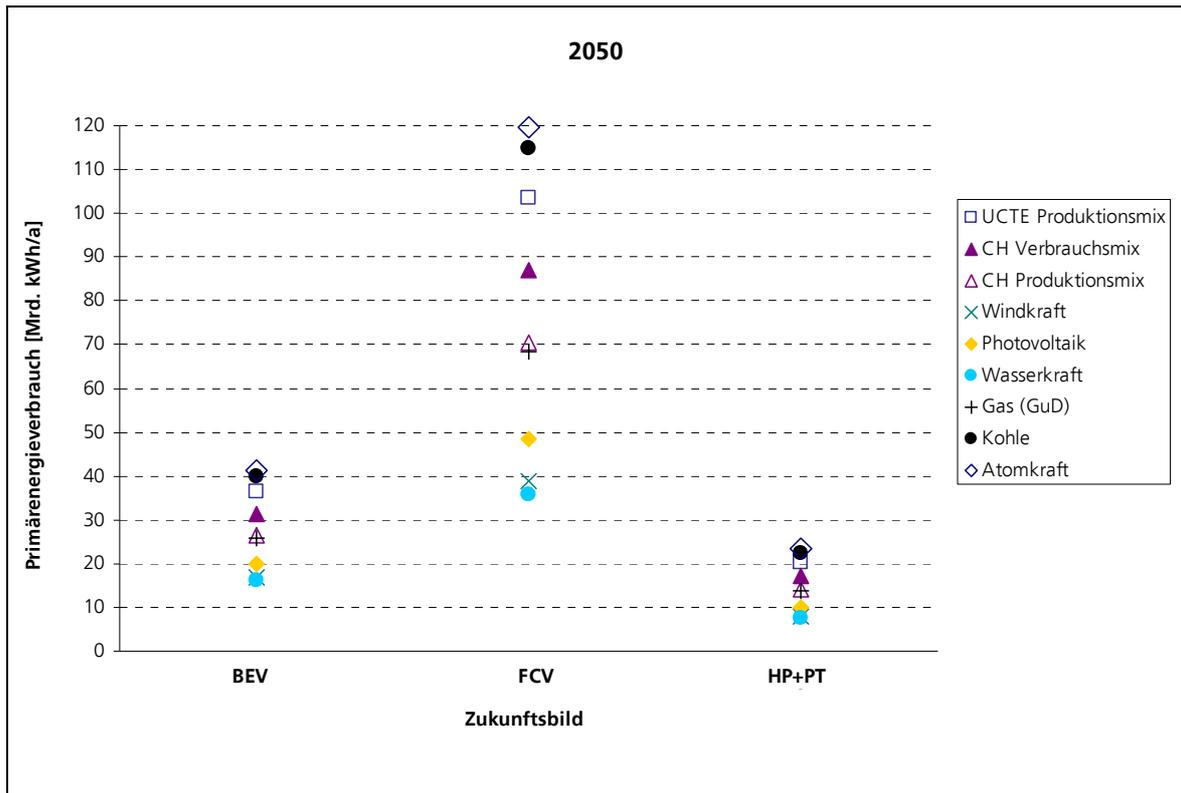


Abbildung 35: Primärenergieverbrauch für die Zukunftsbilder 2050 je nach eingesetzter Stromart

## A4 Berechnungsmodelle BEV

Im BEV-Zukunftsbild 2035 wird angenommen, dass die Fahrleistungen anteilig durch Dieselkraftstoff und Strom (Mittelklasse: 30/70) erbracht werden.

Für die Abschätzung der Gesamtenergiebilanz müssen in diesem Zukunftsbild die Wirkungsgrade der einzelnen Primärenergieträger ins Verhältnis zu den genutzten technischen Prinzipien gesetzt werden.

Ein Verbrennungsmotor im PW arbeitet heute (je nach eingesetztem Primärenergieträger) mit einer Effizienz von 28-45% hinsichtlich eingesetzter Primärenergie und der letztendlich für die Vorwärtsbewegung zur Verfügung stehender Antriebsenergie.

Die folgende Abbildung 36 zeigt die technische Kette im Verbrennungsmotor, vom Primärenergieträger (Kraftstoff) bis zu den Rädern.

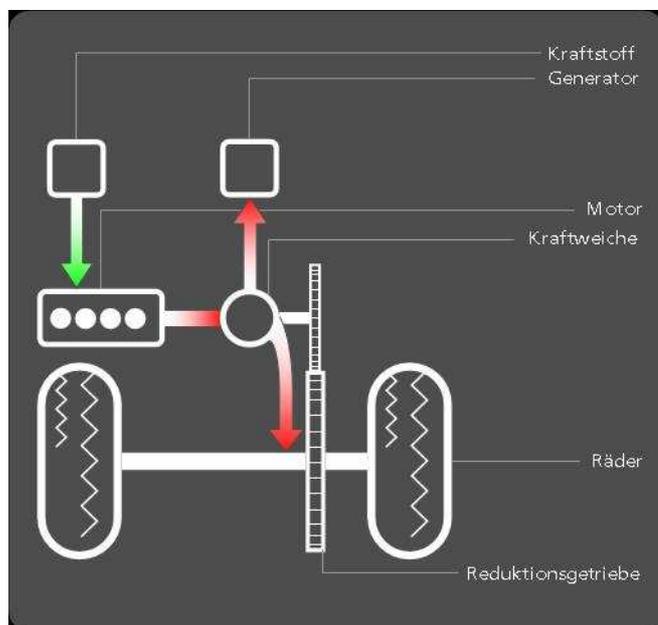


Abbildung 36: Antriebsstrang Verbrennungsmotor mit Getriebe

Im Wesentlichen treten die Verluste im normalen Verbrennungsmotor selber, dem Getriebe (weiter Drehzahlbereich/mehrstufig) und ggf. im Differential auf.

Rechnet man den Energiegehalt von einem Liter Primärenergieträger Diesel in kWh um und wendet den beschriebenen Wirkungsgrad an, so erhält man die Antriebsenergie in kWh.

Wird der niedrigste Wirkungsgrad angesetzt, steht folgende Antriebsenergie zur Verfügung:

$$1l \cdot 9,8 = 9,8kWh$$

$$9,8kWh \cdot 0,28 = \underline{2,7kWh}$$

Ausgehend vom höchstmöglichen Wirkungsgrad steht folgende Antriebsenergie zur Verfügung:

$$1l \cdot 9,8 = 9,8kWh$$

$$9,8kWh \cdot 0,45 = \underline{4,41kWh}$$

Pro eingesetztem Liter Dieseldieselfkraftstoff steht effektiv eine Antriebsenergie von 2.7kWh zur Verfügung.

Elektroantriebe bei Personenwagen unterscheiden sich im Wirkungsgrad deutlich von Verbrennungsmotoren.

Ein Elektromotor liegt heute bei einem Wirkungsgrad zwischen 95-99%. Aus Kosteneffizienzgründen ist bei der Elektromobilität vom Einsatz von Motoren mit einem Wirkungsgrad von 95% auszugehen. Weitere Verluste treten bei der Speicherung, Regelung und Übertragung der Energie auf.

Der Gesamtwirkungsgrad bei einem Elektrofahrzeug liegt heute bei etwa 75%.

$$\text{eingesetzteEnergie[kWh]} \cdot \text{Wirkungsgrad} = \text{Antriebsenergie[kWh]}$$

Oder entsprechend der eingesetzten Energiemenge bei Diesel ergibt sich eine zur Verfügung stehende Antriebsenergie von

$$9,8\text{kWh} \cdot 0,75 = \underline{7,35\text{kWh}}$$

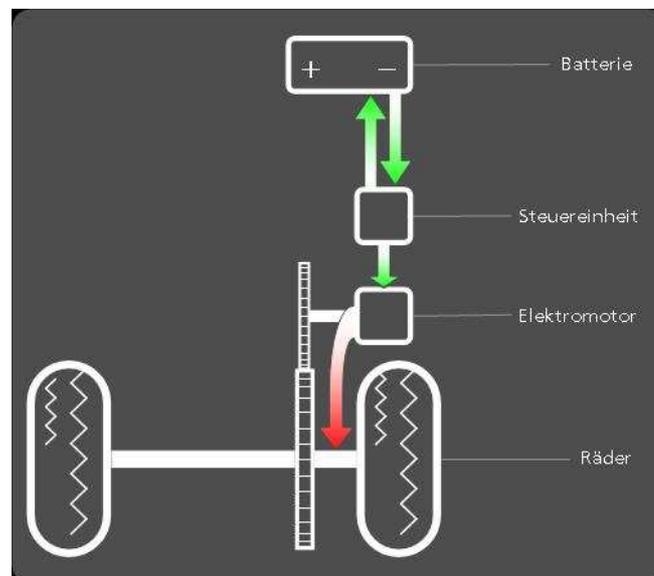


Abbildung 37: Antriebsstrang Elektrofahrzeug

Ein Hybridfahrzeug mit einem sogenannten Range Extender ist eine Mischung aus einem Verbrennungs- und Elektromotor in serieller Bauweise. D.h. der Verbrennungsmotor treibt die Räder nicht mehr direkt an. Die von ihm erzeugte mechanische Energie wird direkt in elektrische Energie umgewandelt und gespeichert.

Das folgende Schema (Abbildung 38) zeigt den Aufbau.

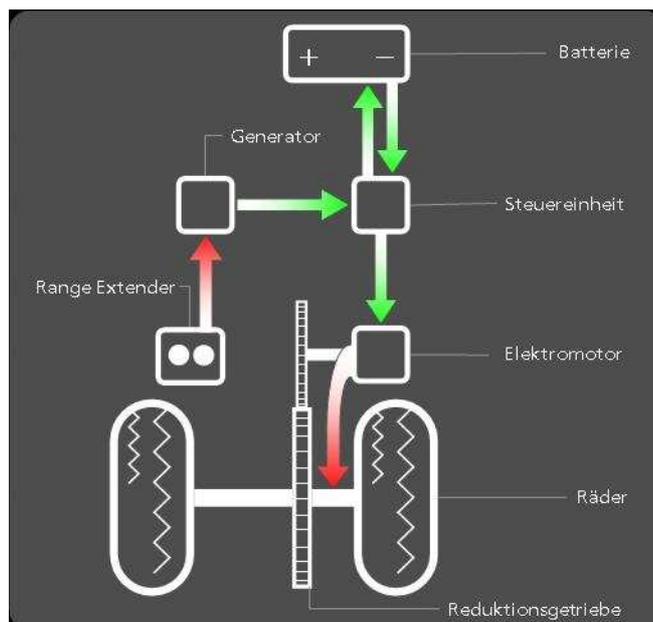


Abbildung 38: Hybridantrieb mit Range Extender

Wie bereits in Kapitel 4.5.2 beschrieben, geben Range Extender ihre Energie nicht direkt an die Antriebsräder weiter. Insofern sind Schalt- und Reduktionsgetriebe, ein weiter Drehzahlbereich und Nebenaggregate überflüssig, es kommt aber der Strang für die Umwandlung und Speicherung in Elektroenergie hinzu. Man geht davon aus, dass die dadurch bedingte Effizienzsteigerung und technische Weiterentwicklungen wie Steer-by-wire, variable Energieversorgungsarchitektur mit bremsphasengesteuertem Generatorladen, HCCI (Homogeneous Charge Compression und dem Einsatz Thermoelektrischer Generatoren (TEG), einen Wirkungsgrad auf ca. 44-46% für den Range Extender bedeuten. Hinzu kommen mindernd wiederum 75% Wirkungsgrad aus dem Strang Batterie - Antriebsräder.

Entsprechend der angenommenen Verteilung der Fahrleistung auf 70% aus Strom aus Steckdosenladung und 30% durch den Range Extender, lässt sich, ohne Berücksichtigung weiterer Entwicklungen wie ggf. hocheffiziente Benzinmotoren, ein konservativ gerechneter Wirkungsgrad für das Gesamtsystem von 51.7 Prozent (bei einer äquivalenten Antriebsenergie entsprechend Elektro- und Verbrennungsmotor) bestimmen.

Der Range Extender mit 30% Anteil von 12kWh Antriebsenergie (3,6kWh) benötigt 12kWh Primärenergie.

$$3,6kWh / 0,75(\text{Wirkungsgrad}_{E-Motor}) / 0,4(\text{Wirkungsgrad}_{RExtender}) = \underline{12,0kWh}$$

Der Elektroantriebstrang mit 70% Anteil von 12kWh Antriebsenergie (8,4kWh) benötigt 11,2kWh Primärenergie.

$$8,4kWh / 0,75(\text{Wirkungsgrad}_{E-Motor}) = \underline{11,2kWh}$$

$$\text{Gesamtprimärenergie} = \underline{12kWh} + \underline{11,2kWh} = \underline{\underline{23,2kWh}}$$

	Eingesetzte Energie in kWh/100km	Effektive Antriebsenergie in kWh/100km
Fahrzeug mit Verbrennungsmotor	43.1 (Basis Verbrennungsmotor: BAU 2035 effizient, Diesel, Kompaktklasse, Wirkungsgrad 28%)	12.0
Reines Elektrofahrzeug	16.0	12.0
Fahrzeuge mit Range Extender	23.2 (Diesel, Wirkungsgrad 40%)	12.0 (30% RaEx/70% Steckdose)

*Tabelle 42: Vergleich Energieeinsatz/Wirkungsgrad verschiedener Antriebe*

## A5 Luftschadstoffe im Verkehr

### Bisherige Entwicklung

Bei den Luftschadstoffen besteht eine starke zeitliche Dynamik. Seit den 1990er Jahren sind mit den Schadstoffnormen Euro-1, Euro-2, Euro-3, Euro-4, aktuell Euro-5 und in wenigen Jahren Euro-6 sehr grosse Fortschritte bei den PW-Neuzulassungen erreicht worden, welche sich mit der üblichen zeitlichen Verzögerung auch in der Gesamtflotte manifestieren.

Im Folgenden wird aus Sicht des Jahres 2010 die Situation bei den Luftschadstoffen geschildert.

Die wichtigsten Schadstoff-Emissionen des Verkehrs sind:

- **Stickoxide** ( $\text{NO}_x$ ), eigentlich Stickstoffoxide, ist eine Sammelbezeichnung für mehrere Stoffe, beim Auto geht es vor allem um Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ). Aus dem Auspuff kommt vor allem  $\text{NO}$ , in der Luft wird dies dann in relativ kurzer Zeit zu  $\text{NO}_2$  oxidiert.  $\text{NO}_x$  führen in Kontakt mit Wasser (beispielsweise in der Atmosphäre) zur Säurebildung. Auf die Schleimhäute wirken sie deshalb reizend und giftig. Auch sind  $\text{NO}_x$  Vorläufersubstanzen für Ozon.  $\text{NO}_x$  werden vor allem von Dieselmotoren ausgestossen, kaum jedoch von Benzinmotoren. Mit der kommenden Abgasnorm Euro-6 wird bei Dieselfahrzeugen die  $\text{NO}_x$ -Reduktion obligatorisch werden. In der Schweiz kennt die Luftreinhalteverordnung für  $\text{NO}_2$  drei Ziel- bzw. Grenzwerte: Über das ganze Jahr gemittelt sollte die Konzentration 30 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft nicht überschreiten; ausserdem gibt es einen 24-Stunden-Mittelwert von 80 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft; dieser Grenzwert darf nur ein Mal pro Jahr überschritten werden. Des weiteren darf die Konzentration von 100 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft, gemittelt über eine halbe Stunde, nur während maximal 5% aller halben Stunden pro Jahr überschritten werden. Der verkehrsbedingte  $\text{NO}_x$ -Ausstoss ist seit Mitte der 1980er Jahren stark zurückgegangen. Die LRV-Ziele gelten aber noch nicht als erreicht (mit der Euro-6-Norm werden die Emissionsgrenzen nochmals verschärft); das Jahresmittel wird in verkehrsreichen Wohnlagen aktuell weiterhin überschritten.
- **Partikel-Emissionen** (PM für Englisch particle matter), auch Feinpartikel, Russpartikel, lungengängige Partikel oder Feinstaub genannt, bezeichnet man feste und flüssige schwebende Teilchen im Mikrometerbereich in der Luft. Im Gegensatz zu den anderen Luftschadstoffen sind Feinpartikel chemisch überhaupt nicht homogen, sondern ein Gemisch von Partikeln aus allen möglichen Quellen. Manche Feinpartikel sind schädlich, einfach weil sie sehr klein sind. Andere sind aber auch toxisch oder sogar krebserregend. Insbesondere jene Partikel, welche von Dieselmotoren ausgestossen werden, die sogenannten Russpartikel, sind vermutlich auch beim Menschen kanzerogen. In der Schweiz kennt die Luftreinhalteverordnung für Feinpartikel zwei Ziel- bzw. Grenzwerte: Über das ganze Jahr gemittelt sollte die  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration 20 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft nicht überschreiten; ausserdem gibt es einen 24-Stunden-Mittelwert von 50 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft; dieser Grenzwert darf nur ein Mal pro Jahr überschritten werden. Der verkehrsbedingte Feinpartikel-Ausstoss ist seit Mitte der 1980er Jahren stark zurückgegangen. Die LRV-Ziele sind aber noch nicht erreicht (mit der Euro-5-Norm wird der Partikelfilter für Dieselaautos de facto obligatorisch); das Jahresmittel wird in verkehrsreichen Wohnlagen weiterhin überschritten.
- **Ozon** ( $\text{O}_3$ ) ist ein chemisch aktives Gas. Es entsteht indirekt über sehr verschiedene Reaktionen aus Vorläufersubstanzen. Wichtig sind vor allem die Stickoxide und Kohlenwasserstoffe. Eine grosse Rolle bei der Bildung von Ozon spielt auch die Sonneneinstrahlung, weshalb Ozon vor allem an schönen Sommertagen die Alarmwerte übersteigen kann. In der Schweiz kennt die Luftreinhalteverordnung für Ozon zwei Ziel- bzw. Grenzwerte: Es gibt einen Stunden-Mittelwert von 120 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft; dieser Grenzwert darf nur ein Mal pro Jahr überschritten werden. Des weiteren darf die Konzentration von 100 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft, gemittelt über eine halbe Stunde, nur während ma-

ximal 2% aller halben Stunden pro Jahr überschritten werden. Die LRV-Ziele sind noch nicht erreicht, auch wenn die Emissionen der Vorläufersubstanzen stark reduziert wurden.

Bei den folgenden Schadstoffen gelten die Emissionen des Verkehrs nicht mehr als problematisch:

- **Kohlenstoffmonoxid** (auch Kohlenmonoxid genannt, abgekürzt CO) ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Kohlenmonoxid ist ein farb-, geruch- und geschmackloses giftiges Gas. Es entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Treibstoffen. Es wird vor allem vom Benzinmotor ausgestossen (jedoch dank des Dreiwegekatalysators in ungiftiges CO<sub>2</sub> umgewandelt), weniger von Dieselmotoren. In der Schweiz ist das Ziel der Luftreinhalteverordnung für CO ein 24-Stunden-Mittelwert von 8 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft; dieser Grenzwert darf nur ein Mal pro Jahr überschritten werden. Dank des Einsatzes von Dreiwegekatalysatoren und Oxidationskatalysatoren ist der verkehrsbedingte CO-Ausstoss seit Mitte der 1980er Jahren stark zurückgegangen. Das LRV-Ziel ist erreicht.
- **(Nicht-Methan-)Kohlenwasserstoffe** (NMHC für englisch non-methane hydrocarbons), auch Volatile Organic Compounds genannt (VOC), ist ein Sammelbegriff für alle nicht vollständig zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O verbrannten Treibstoffmolekülen. Sie lassen sich im Dreiwegekatalysator (oder im Oxidationskatalysator) relativ einfach über weitere Oxidierung umwandeln zu den Endprodukten der vollständigen Verbrennung, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Deshalb ist der verkehrsbedingte NO<sub>x</sub>-Ausstoss seit Mitte der 1980er Jahren stark zurückgegangen. Die LRV-Ziele sind beinahe erreicht, vor allem hat sich der relative Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen stark reduziert; mit der Euro-6-Norm werden die Emissionsgrenzen nochmals verschärft.
- **Schwefeldioxid** (SO<sub>2</sub>), welches aber dank schwefelarmen Treib- und Brennstoffen heute kein Thema mehr ist

#### Geltende Abgasnormen und Ausblick

Die aktuelle und demnächst in Kraft tretende, bereits beschlossene Euro-Norm 5 bzw. 6 werden zu weiteren Reduktionen namentlich der NO<sub>x</sub>-, NMHC- und PM-Emissionen beitragen; bis zum Jahr 2035 ist in einem Business-as-Usual-Szenario davon auszugehen, dass bis zu 97% der Fahrleistung von Fahrzeugen erbracht werden wird, welche die Euro-Norm 6 (oder eine allfällige noch strengere Euro-7-Norm usw., welche heute allerdings nicht absehbar ist) erfüllen:

- Neu entwickelte Modelle von Personenwagen und leichten Lieferwagen (Kategorie N1-I) müssen seit dem 1. September 2009 die Abgasnorm Euro 5 erfüllen. Seit September 2010 gilt sie für alle erstmals zugelassenen Modelle. Fahrzeuge mit Benzinmotor dürfen heute nur noch 0,06 Gramm Stickoxid pro Kilometer ausstossen, 25 Prozent weniger als bisher. Die Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid sind unverändert geblieben. Dieselmotoren müssen ihren Stickoxidausstoss um 28 Prozent und den Partikel ausstoss um 80 Prozent verringern, was den Partikelfilter unentbehrlich macht. Für Lieferwagen der Kategorien N1-II und N1-III sind die Fristen ein Jahr später. Für schwere Motorwagen (Lastwagen, Busse, etc.) traten die EURO V-Normen bereits 2008/2009 in Kraft. Dabei wurde der NO<sub>x</sub>-Ausstoss um ca. 40% verringert.
- Die Euro-6-Norm wird ab 1.9.2014 für neue Typgenehmigungen und ab 1.9.2015 für alle Zulassungen von Personenwagen und Lieferwagen der Kategorie N1-I gelten. Für Lieferwagen der Kategorien N1-II und N1-III sind die Fristen ein Jahr später. Mit der Euro-6-Norm werden Diesel-Personenwagen einen Partikel-Anzahl-Grenzwert einzuhalten haben und nahezu die gleichen Abgaswerte erreichen müssen wie Benzinautos. Dies wird für die Hersteller von Dieselaautos nur mit grossem Aufwand zu erreichen sein und neben Dieselpartikelfilter auch die NO<sub>x</sub>-Reduktion erforderlich machen. Längerfristig ist deshalb damit zu rechnen, dass Dieselaautos etwas teurer werden und die Verbrauchsvorteile des Dieselmotors abnehmen. Für schwere Motorwagen (Lastwagen, Busse, etc.) wird die EURO VI-Norm bereits 2013/2014 in Kraft treten. Der NO<sub>x</sub>-Ausstoss wird um 8% gesenkt, der Partikel ausstoss (Masse) um 50%. Zusätzlich wird ein Partikel-Anzahl- sowie ein NH<sub>3</sub>-Grenzwert eingeführt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch technologische Verbesserungen die Emissionen von Verbrennungsmotoren deutlich gesenkt werden konnten und mit den zukünftigen Abgasvorschriften weitere Verbesserungen absehbar sind. Dies resultiert in zeitlichen Verläufen der Emissionen wie in nachfolgender Abbildung 39.

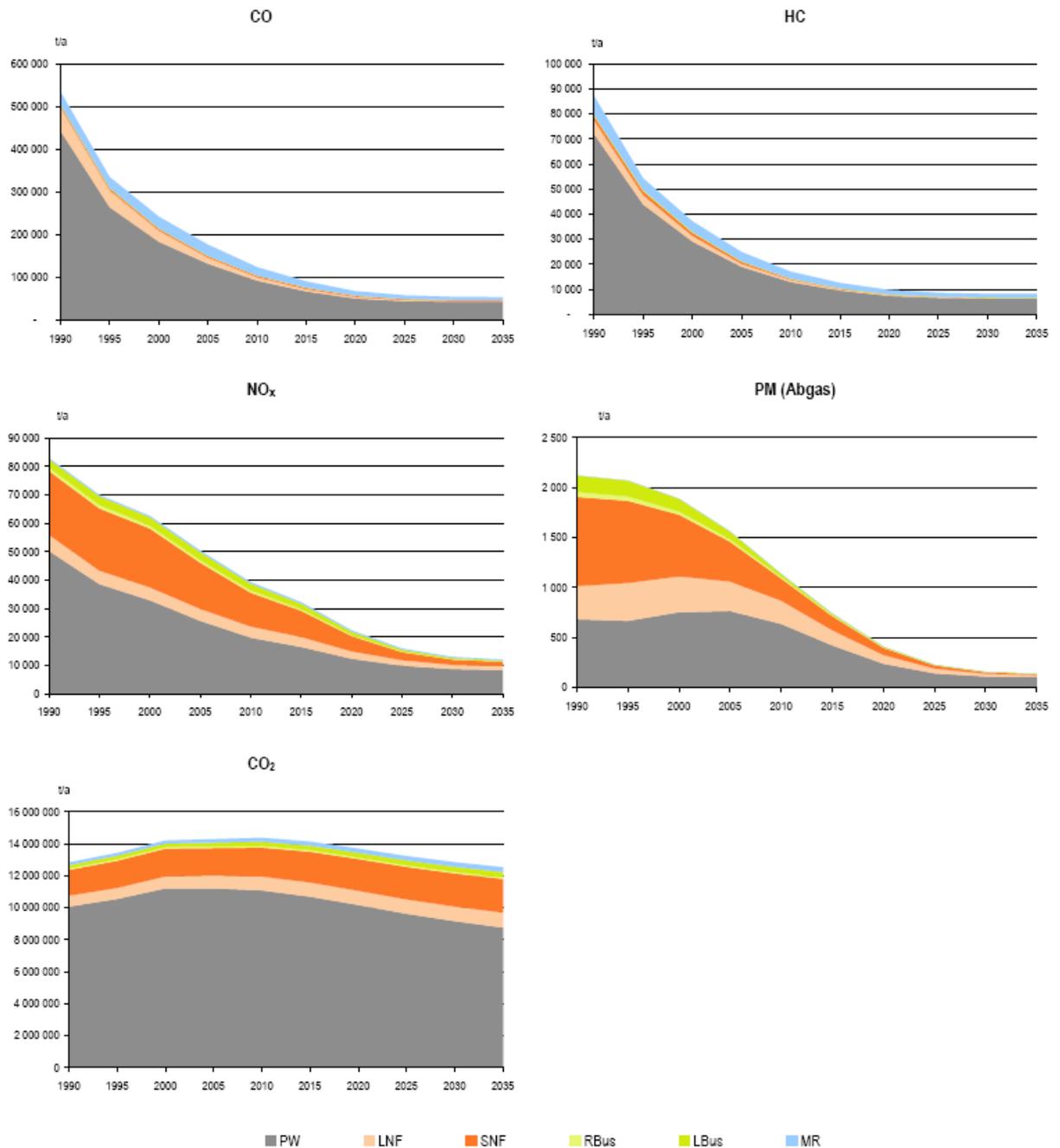


Abbildung 39: Modellierter Emissionsentwicklung der Luftschadstoffe bis 2035 gemäss BAFU (2010)

## A6 Grundlagen und Resultate Treibhausgasemissionen

### Emissionsfaktoren

Treibstoff	kg CO <sub>2</sub> pro kWh in das Fahrzeug gelieferte Energie			Datenquelle
	min	plausibelster Wert	max	
Benzin	0.317	0.317	0.507	1), 2)
Diesel	0.302	0.302	0.484	1), 2)
Strom	0.011	0.155	1.238	1)
Atomkraft		0.018		1)
Kohle		1.238		1)
Gas (GuD)		0.486		1)
UCTE Produktionsmix		0.594		1)
Prognose eurelectric <i>Baseline</i>		0.134		5)
Prognose eurelectric <i>Power Choices</i>		0.026		5)
CH Verbrauchsmix		0.155		1)
CH Produktionsmix		0.029		1)
Windkraft		0.029		1)
Photovoltaik		0.090		1)
Wasserkraft		0.011		1)
Wasserstoff Elektrolyse	0.019	0.267	2.136	1), 3)
Wasserstoff aus Erdgas	0.321	0.376	0.726	1), 3)
Biogene Treibstoffe	0.047	0.115	0.259	1), 4)

#### Datenquellen

- 1) ESU-Services (2008): *Primärenergiefaktoren von Energiesystemen*
- 2) era (2009): *Auswirkungen fossiler Kraftstoffe*
- 3) ISI (2010): *Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freie Endenergieträger*
- 4) ESU-Services (2007): *Life Cycle Assessment of BTL-fuel production*
- 5) Eurelectric (2010): *Power Choices - Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050.*

**CO<sub>2</sub>-Emissionen**

**"Plausibler Wert"**

	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	10.4	5.6	3.3	2.4	4.9	2.3	5.2	2.5	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	2.9	4.5	3.8	3.3	2.8	1.7	4.0	3.0	1.3	0.0	0.2
Strom [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.0	1.4	0.0	0.9
Wasserstoff [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0
Biogene Treibstoffe [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mio. t CO<sub>2</sub>/a]</b>	<b>13.3</b>	<b>10.1</b>	<b>7.3</b>	<b>6.3</b>	<b>8.7</b>	<b>4.4</b>	<b>9.2</b>	<b>5.7</b>	<b>2.7</b>	<b>4.5</b>	<b>1.0</b>

**Minimum**

	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	10.4	5.6	3.3	2.4	4.9	2.3	5.2	2.5	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]											
Strom [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
Wasserstoff [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.317	0.0
Biogene Treibstoffe [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mio. t CO<sub>2</sub>/a]</b>	<b>10.4</b>	<b>5.6</b>	<b>3.4</b>	<b>2.5</b>	<b>5.0</b>	<b>2.3</b>	<b>5.2</b>	<b>2.6</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.1</b>

**Maximum**

	2010 (Vergleich) *	2035					2050				
		BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT	BAU	ICI	BEV	FCV	HP+PT
Benzin [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	16.6	9.0	5.4	3.9	7.8	3.6	8.3	4.0	0.0	0.0	0.0
Diesel [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	4.6	7.2	6.0	5.3	4.5	2.7	6.4	4.8	2.1	0.0	0.3
Strom [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	3.4	0.0	0.0	10.9	0.0	6.9
Wasserstoff [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.3	0.0
Biogene Treibstoffe [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
<b>GESAMT [Mio. t CO<sub>2</sub>/a]</b>	<b>21.2</b>	<b>16.2</b>	<b>11.9</b>	<b>13.4</b>	<b>20.4</b>	<b>9.8</b>	<b>14.7</b>	<b>9.3</b>	<b>13.0</b>	<b>36.3</b>	<b>7.1</b>

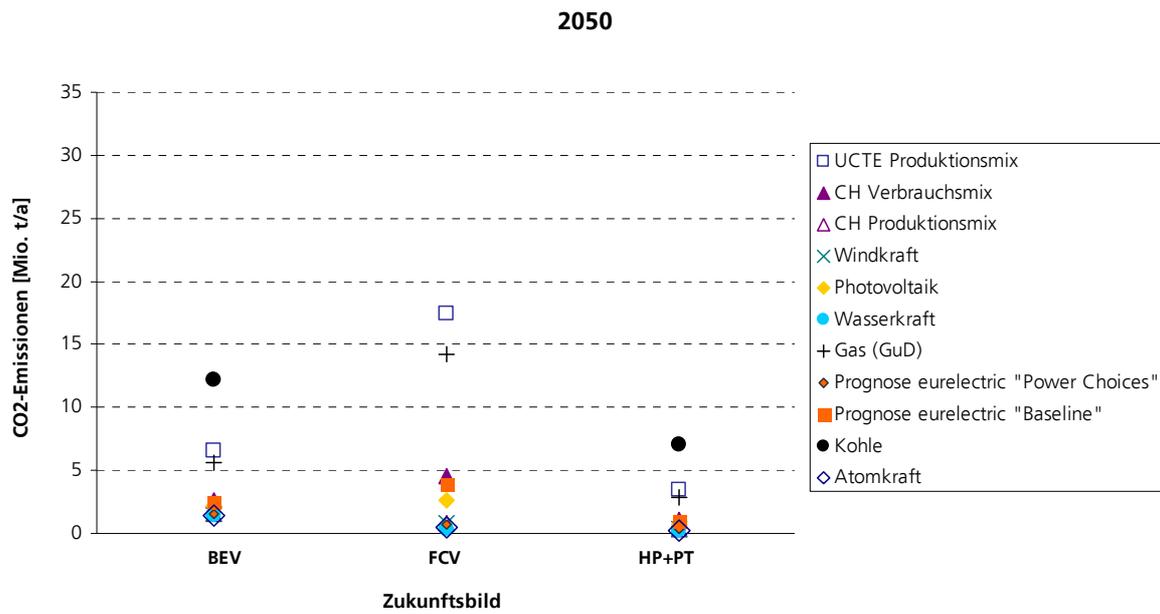


Abbildung 40: CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Zukunftsbilder 2050 je nach Art der Stromproduktion

## A7 Spezifische Verbrauchsfaktoren neuzugelassener Fahrzeuge im Jahr 2035 und 2050

BAFU Bericht 355+ geht in seinen Annahmen von einer Reduzierung von 1.5% pro Jahr bei den Neuinverkehrsetzungen aus. Inverkehrsetzungen machen im Schweizer Markt einen jährlichen Anteil von ca. 7% an der Gesamtflotte PW aus.

Entsprechend den Annahmen aus 355+ ergibt sich eine stärkere Absenkung der Treibstoffverbräuche bis 2035 bzw. 2050 (Tabelle 44 und 45).

	2035			2050		
	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch
Kleinwagen (<1.4l)	4.2	3.8	3.4	3.4	3.1	2.7
Kompaktklasse (1.4-2l)	5.3	4.8	4.4	4.2	3.9	3.5
Mittelklasse (>2l)	7.0	6.4	5.7	5.6	5.1	4.6
Verbrauch in l/100km						

**Tabelle 43:** Verbrauchsentwicklung BAU-Szenario nach BAFU Bericht 355+, Benzin

	2035			2050		
	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch	Effizienz gering	effizient	Effizienz hoch
Kleinwagen (<1.4l)	2.8	2.5	2.3	2.2	2.0	1.8
Kompaktklasse (1.4-2l)	4.2	3.8	3.4	3.3	3.0	2.7
Mittelklasse (>2l)	5.2	4.7	4.2	4.1	3.7	3.4
Verbrauch in l/100km						

**Tabelle 44:** Verbrauchsentwicklung BAU-Szenario nach BAFU Bericht 355+, Diesel

Aus den Werten lässt sich ein durchschnittlich um 1l/100km geringerer Kraftstoffverbrauch bei Inverkehrsetzungen im Vergleich zur gleichen Fahrzeugklasse feststellen.

## A8 Teilnehmer des Workshops vom 05. November 2010

Name (Alphabetische Reihenfolge)	Organisation
Bach, Christian	EMPA
Beglinger, Caroline	VCS (vormittags)
Bolinger, Pierre-Yves	Credit Suisse
Burgener, Andreas	Auto Schweiz
Dieterle, Rudolf (Vorsitz)	ASTRA
Dittrich, Philipp	Paul Scherrer Institut
Egli, Kurt	VCS
Ellenberger, Amira	BAFU
Gasser, Thomas	ASTRA
Haefeli, Ueli	NewRide
Hallenbarter, Dionys	Alpmobil
Hug, Kurt	Fachhochschule Bern
Hungerbühler, Karin	Stadt St. Gallen
Infanger, Kurt	ARE
Keller, Dominik	Basel-Stadt
Löhner, Roger	TCS
Neumeister, Michael	Stadt Zürich
Piffaretti, Marco	Protoscar
Pulfer, Martin	BFE
Siegrist, Stefan	BfU
n.N	BfU
Sigrist, Jürg	Renault
Volken, Thomas	BFE
Wegmann, Susanne	e'mobile

---

## Literaturverzeichnis

- Angele, Hans-Christian (2006): Wenn Bauern Energie produzieren. Vision Bioenergie 2020. Sondernummer Erneuerbare Energien.
- ARE - Bundesamt für Raumentwicklung (2006): Perspektiven des Schweizerischen Personenverkehrs 2030.
- ARE - Bundesamt für Raumentwicklung (2008): Raumkonzept Schweiz – Eine dynamische und solidarische Schweiz, Entwurf vom 24. Juni 2008
- ARE - Bundesamt für Raumentwicklung (2010): Konzept zur Siedlungsentwicklung nach innen, Arbeitshilfe zur Erarbeitung der Agglomerationsprogramme Verkehr und Siedlung.
- Avenir Suisse (2009): Energie für Wirtschaft und Wohlstand (Leporello).
- Bach (2010): CO<sub>2</sub>-Reduktions- und Betriebskostenpotenziale eines Erdgas-Hybridantriebs, Foliensatz zum Vortrag auf der Veranstaltung „Tage der Technik 2010 – Nachhaltige Mobilität“
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2010): Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1021.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2008): Volkswirtschaftliche Beurteilung von Umweltmassnahmen und -zielen; Leitfaden, Mai 2008.
- BFE – Bundesamt für Energie (2007a). Energieperspektiven 2035 Management Summary. Bern, 15. Januar 2007.
- BFE – Bundesamt für Energie (2007b): Die Energieperspektiven 2035, Band 1 – Synthese. Bundesamt für Energie, Bern, Januar 2007.
- BFE – Bundesamt für Energie (2009): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008.
- BFE – Bundesamt für Energie (2010): Erdölmarkt / Benzinpreise in der Schweiz. Gas- und Kohlenmärkte. Vincent Beuret, Ende Januar 2010.
- BFE, BLW, ARE, BAFU (2009): Biomassestrategie Schweiz: Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern.
- BFS – Bundesamt für Statistik (November 2009): Fahrzeugbewegungen und Fahrleistungen im Personenverkehr, Tabelle T11.3.2.1
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2009a): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, Kurzstudie.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2009b): Energierohstoffe 2009. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2009c): Commodity Top News Nr. 31: Seltene Erden. Hannover.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2010): Commodity Top News Nr. 33: Elektronikmetalle. Hannover.
- Bitzer, K. (2010): Ist Peak Oil erreicht? Die Sicht der ASPO. In: Klimawandel, Ölknappheit, Wirt-

---

schaftskrise; Tagungsband zur Fachtagung am 28.8.2010, Herausg. Schweizerische Energie-Stiftung SES.

BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009): GermanHy – Studie zur Frage "Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?", erarbeitet von Deutsche Energieagentur (dena), Forschungszentrum Karlsruhe, Fraunhoferinstitut für System- und Innovationsforschung (ISI), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

BP (2009): Statistical Review World Energy.

Brümmerhoff (2007): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen

Cerwenka, Hauger, Hörl, Klamer (2007): Handbuch der Verkehrssystemplanung

Crutzen, P. J. A. R. Mosier, K. A. Smith, and W. Winiwarter (2008): N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmos. Chem. Phys. 8, 2008, S. 1389-395. <http://www.atmos-chem-phys.net/8/389/2008/>

DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH (2010): Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen, Ausgabe 2010, 4. Quartal.

Deutsche Energie-Agentur DENA (2010): Erdgas und Biomethan im künftigen Strommix.

EBP (2007): Ermittlung repräsentativer Betriebskostensätze für Kraftfahrzeuge zur Bewertung von Massnahmen im Strassenverkehr, Forschungsauftrag VSS 2005/205 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).

EBP (2009): Risikoabschätzung zu alternativen Treibstoffen und Antrieben.

EON (2010): Elektromobilität – Zukunftsmarkt oder Nischenthema, Vortrag Andreas Zelles, Konzerninitiative Elektromobilität, Garching, 24. Juli 2010.

era - energy research architecture (2009): Auswirkungen fossiler Kraftstoffe. Treibhausgasemissionen, Umweltfolgen und sozioökonomische Effekte.

Erdölvereinigung (2006): Die langfristige Verfügbarkeit von Erdöl.

ESU-Services (2007): Life Cycle Assessment of BTL-fuel production. Life Cycle Impact Assessment and Interpretation. RENEW - Renewable fuels for advanced powertrains.

ESU-Services: Rolf Frischknecht & Matthias Tuchschnid (2008): Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, 18.12.2008

Eurelectric (2010): Power Choices - Pathways to Carbon-Neutral Electricity in Europe by 2050.

Fraunhofer ISI (2009a): Rohstoffe für Zukunftstechnologien

Fraunhofer ISI (2009b): Lithium für Zukunftstechnologien

Fraunhofer ISI/Ludwig Bölkow Systemtechnik (2009): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freie Endenergieträger, Studie im Auftrag der RWE AG

Frondel/Preistrup (2009): Zeitenwende beim Automobil – Benzin und Diesel vor dem Aus?, in: Internationales Verkehrswesen, (61. Jg), Heft 7+8, S. 253-257

IEA (2008): Key World Energy Statistics, International Energy Agency

IEA (2009): World Energy Outlook, International Energy Agency

- 
- IEA (2010): Sustainable Production of SECOND -Generation Biofuels. Potential and perspectives in major economies and developing countries. Information Paper, Anselm Eisentraut.
- INFRAS (2007). Der Energieverbrauch des Verkehrs 1990-2035: Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten „BIP hoch“, „Preise hoch“ und „Klima wärmer“. Sektoraler Bericht zu den BFE-Energieperspektiven 2035. INFRAS in Auftrag Bundesamt für Energie, Bern, Januar 2007.
- Jungbluth N, Frischknecht R, Faist Emmenegger M, Steiner R, et al., (2007): Life Cycle Assessment of BTL-fuel production: Inventory Analysis. RENEW - Renewable Fuels for Advanced Powertrains, Sixth Framework Programme: Sustainable Energy Systems, Deliverable: D 5.2.7., ESU-services: Uster.
- Kampa, A. & Wolfensberger, U. (2007): Biotreibstoffe – Grundlagen für die Beurteilung aus Schweizer Sicht. ART Schriftenreihe 5.
- Kiley, David (2008): The road to a stronger CAFE standard. U.S. automakers have to get toiling to meet new fuel-efficiency legislation. Bloomberg Businessweek.  
<http://www.msnbc.msn.com/id/23793222/page/2/>, 22.06.2010
- Notter, Dominic A.; Marcel Gauch; Rolf Widmer; Patrick Wäger; Anna Stamp; Rainer Zah & Hans-Jörg Althaus (2010): Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. Environmental Science & Technology, August 2010
- OECD/FAO (2008): Agricultural Outlook 2008-2017.
- Ökoinstitut (2008): Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energie bis 2030 (RENEWABILITY, FZK 0327546), Zwischenbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), in Zusammenarbeit mit DLR-IVF (Berlin).
- Protoscar (2010): 2020-Vision Schätzung der EV-Infrastruktur, Foliensatz Status November 2010
- Samaras, Constantine & Kyle Meisterling (2008): Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. Environmental Science & Technology, Vol. 42, No 9, 2008
- SATW - Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (2008): Erdölknappheit und Mobilität in der Schweiz.
- SATW - Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (2009): Biotreibstoffe – Chancen und Grenzen.
- Spielmann & de Haan (2008): Umweltindikatoren im Verkehr – Vergleich der Verkehrsmittel anhand CO<sub>2</sub>-Emissionen, Energieaufwand und übriger Umweltauswirkungen, ETH Zürich
- TAB (2006): Perspektiven eines CO<sub>2</sub>- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick.
- TCS (Nov. 2006): Autokatalog
- TCS (2006): AutoInfo TCS (CD)
- TCS (2009): Wasserstoff und Brennstoffzelle  
[http://www.tcs.ch/main/de/home/auto\\_moto/umwelt\\_energie/treibstoff.RightColumn.0003.CtxLinkDownloadFile7.pdf/3979\\_Wasserstoff\\_und\\_Brennstoffzelle\\_de.pdf](http://www.tcs.ch/main/de/home/auto_moto/umwelt_energie/treibstoff.RightColumn.0003.CtxLinkDownloadFile7.pdf/3979_Wasserstoff_und_Brennstoffzelle_de.pdf), 22.06.2010
- UBA (2010): CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale.
- Vallentin, D (2009): Coal-to-Liquids (CtL): Driving Forces and Barriers. Synergies and Conflicts

---

from an Energy and Climate Policy Perspective. ibidem-Verlag, Stuttgart. Reihe Ecological Energy Policy, Bd. 11. 450 S.

Vattenfall (2006): CO<sub>2</sub>-freie Wasserstofferzeugung, Vortrag von Grubel/Weinmann vom 24.10.2006

Wallentowitz, H., Freialdenhofen, A., Olschewski, I (2010): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development (2004): The Sustainable Mobility Project. Overview.

Wymann, O. (2007): Auto um Umwelt. München.

Zah, R., Böni, H., Gauch, M., Hischier, R., Lehmann, M., Wäger, P. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Landwirtschaft.

Zah, R., Binder, C., Bringezu, S., Reinhard, J., Schmid, A., Schütz, H. (2010): Future Perspectives of 2nd Generation Biofuels. Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung TA-SWISS 55/2010.

ZSW – Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (2010): Lithium – begehrter Rohstoff der Zukunft. Eine Verfügbarkeitsanalyse. Ulm.

---

## Abkürzungen

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAU	Business as Usual
BEV	Elektrofahrzeuge mit Batterien (inkl. Plug-in Hybride)
BFE	Bundesamt für Energie
BtL	Biomass to Liquid (umg. Biodiesel)
CCS	Combined Combustion System
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FCV	Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen
HP	Human Power (=Muskelkraft)
ICI	Verbrennungsmotoren optimiert (inkl. Konventionelle Hybride)
IEA	International Energy Agency
KTU	Konzessionierte Transportunternehmen
LW	Lastwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NGO	Nichtregierungsorganisation (Non-Governmental Organization)
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organization for economic Co-operation and Development)
OPEC	Organisation erdölexportierender Länder (Organization of the Petroleum Exporting Countries)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PT	Public Transport (=Öffentlicher Verkehr)
PW	Personenwagen
SATW	Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

---

# Projektabschluss

**FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK**

**ARAMIS SBT**

## Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 2.12.2010/27.2.2011

### Grunddaten

Projekt-Nr.: **ASTRA 2009/009**

Projekttitel: **Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von morgen**

Enddatum: **15.3.2011**

### Texte:

Zusammenfassung  
der Projektergebnisse:

Diese Forschungsarbeit liefert einen Beitrag zur Beantwortung der Fragen und bereitet Grundlagen zu Alternativen und deren Wirkung im Bereich des motorisierten Individualverkehrs auf. Mit dieser Arbeit liegen konkret folgende Resultate für die Schweiz vor:

- Vergleichende Darstellung alternativer Antriebe und Treibstoffe;
- Ermittlung der jeweiligen technischen Potenziale;
- Ermittlung des zukünftigen Energiebedarfs im motorisierten Individualverkehr (Personenverkehr ohne Güterverkehr) auf Basis der Verkehrsperspektiven des Bundes, jeweils für die Jahre 2035 und 2050;
- Aufbereitung der Kosten und Nutzen für die gesamte Volkswirtschaft;
- Systematische Aufbereitung der Vor- und Nachteile hinsichtlich relevanter Zielbereiche der nachhaltigen Entwicklung.

Neben den technologischen Entwicklungen wird auch ein Zukunftsbild betrachtet, welches neben einem Technologiewandel auch von einem gesellschaftlichen Wandel ausgeht.

Zielerreichung:

Die gesteckten Projektziele wurden erreicht.

Folgerungen und  
Empfehlungen:

Der Handlungsbedarf zur Realisierung von vier Zukunftsbildern ist aufgezeigt. Das Forschungsteam erachtet eine Entwicklung am wahrscheinlichsten, welche vorerst von Business as usual (BAU) ausgehend unter dem Einfluss höherer Ölpreise, internationaler Klimaschutzverpflichtungen, der Internalisierung externer Kosten und einem gewissen Wertewandel stark in Richtung des Zukunftsbildes ICI (Verbesserung der Verbrennungsmotoren) geht, um dann in eine Kombination aus ICI und BEV (Battery Electric Vehicle) überzugehen. Dazu sind im Vergleich zum Business as usual weitergehende politische Massnahmen notwendig; wir erachten als wahrscheinlich, dass solche oder ähnliche Massnahmen aufgrund der Verfügbarkeit fossiler Treibstoffe, von Energie- und CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sowie Wer-

---

tewandel politisch umgesetzt werden. Mehrheitlich aus Kostengründen wird die Verbesserung der Verbrennungsmotoren (ICl) gegenüber Elektrofahrzeugen (BEV) in den nächsten 20 Jahren im Vorteil sein.

Publikationen:

Schriftenreihe VSS/ASTRA

**Beurteilung der Begleitkommission:**

*Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.*

Beurteilung:

Das Forschungsprojekt zeigt schlüssig auf, dass in allen Antriebstechnologien noch erhebliche Verbesserungspotenziale stecken. Im Hinblick auf die beschränkte Verfügbarkeit fossiler Treibstoffe, der Klima- bzw. CO<sub>2</sub>-Problematik und der grossen Abhängigkeit von Erdöllieferanten muss alles daran gesetzt werden, diese Potenziale optimal zu nutzen. Die fossilen Antriebstechnologien bzw. die entsprechenden Fahrzeugkonzepte sind schon in einer fortgeschrittenen Lebenszyklusphase, während die Entwicklung von neuen Fahrzeugkonzepten mit Batterie- und Wasserstoffantrieben erst noch in einer frühen Entwicklungsphase steht. Bei der Wertung der Ergebnisse ist deshalb im Auge zu behalten, dass die neuen Technologien erfahrungsgemäss ein noch wesentlich grösseres Verbesserungspotenzial vor sich haben, als die heute schon besser optimierten Technologien. Dafür liegen in den neuen Technologien erheblich grössere Unsicherheiten. Weiter ist zu beachten, dass die ‚graue‘ Energie, d.h. die Energie zur Herstellung der Fahrzeuge und Antriebe in den vorliegenden vergleichenden Betrachtungen nicht berücksichtigt wurde.

Die Erwartungen ans Forschungsprojekt wurden vollumfänglich erfüllt; die Forschungsziele sind erreicht.

Umsetzung:

Als Ergebnis des Forschungsprojektes wird auch ein ganzes Bündel von Massnahmen zur Beschleunigung der Umsetzung der einzelnen Antriebstechnologien vorgeschlagen.

Es wurde aufgezeigt bzw. bestätigt, dass durch den Einsatz von Elektrizität die individuelle Mobilität auch zukünftig befriedigt werden kann. Der Einfluss des Strommixes spielt in Bezug auf den Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Thematik eine grosse Rolle. Bei einem Einsatz erneuerbarer Energien sind die diesbezüglichen Verbesserungspotenziale sehr gross.

Es wird nun Aufgabe der politischen Entscheidungsinstanzen sein, die Stossrichtungen in Bezug auf die Festlegung passender Rahmenbedingungen (Versorgungssicherheit, Energieeffizienz und Emissionen) und dann Art und Umfang der einzelnen Förderungs- bzw. Lenkungsmassnahmen festzulegen.

weitergehender  
Forschungsbedarf:

- Was treibt uns morgen an im Güterverkehr?
- Vergleichende Betrachtungen von Antriebstechnologien der Zukunft unter Einbezug der ‚grauen‘ Energie

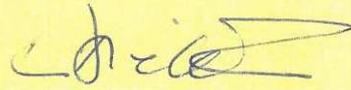
- Innert einiger Jahre: Nachführung des Vergleichs unter Berücksichtigung des dannmaligen Standes der Technologie, der gesellschaftlichen Werthaltungen und der ökonomischen bzw. ökologischen Rahmenbedingungen.

Einfluss auf Normenwerk: Keinen

**Präsident Begleitkommission:**

Name:	Dieterle	Vorname:	Rudolf
Amt, Firma, Institut:	Bundesamt für Strassen ASTRA		
Strasse, Nr.:			
PLZ:	3003	Email:	<a href="mailto:rudolf.dieterle@astra.admin.ch">rudolf.dieterle@astra.admin.ch</a>
Ort:	Bern	Telefon:	+41 31 322 94 01
Kanton, Land:	Schweiz	Fax:	+41 31 323 23 03

**Unterschrift Präsident Begleitkommission:**

 P.S. 1  
R. Dieterle

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinkörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts <i>Aspects juridiques d'un concept de sécurité basé sur les risques et l'efficience</i> <i>Legal aspects of a risk and efficiency based safety approach</i>	2009

1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen <i>Procédure de détermination du besoin d'entretien dans les réseaux routiers communaux</i> <i>Procedure for determining the maintenance requirements of municipal road networks</i>	2009
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben <i>Systematical impact assessment of small and medium transport projects</i> <i>Analyses des impacts systématiques pour projets de transport petits et moyens</i>	2009
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement <i>Application de couches intercalaires de géosynthétiques pour la gestion de l'entretien des chaussées</i> <i>Application of asphalt interlayers for road maintenance management</i>	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route <i>Perspektiven und Anwendungen der Navigationsmethoden für die Strassenverkehrstelematik und für das Strasseninformationssystem</i> <i>Perspectives and applications of the navigation systems for the intelligent transportation systems and for the road information system</i>	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Outil intégré Excel pour le calcul de risques sur les galeries de protection contre les chutes de pierre</i> <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Excel-based tool for the risk analysis of rockfall protection galleries</i>	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern <i>Comportement d'adhérence des unités de précontrainte à torons</i> <i>Bond behaviour of strand tendons for post-tensioning</i>	2009
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkombeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton <i>Béton filtré ultra-performant pour augmenter l'efficacité de la maintenance des ouvrages d'art en béton armé</i> <i>Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete for increasing efficiency of the maintenance of reinforced concrete road structures</i>	2010

1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle <i>Développement d'une centrale de cogénération à base d'huile végétale avec propre moulin à huile</i> <i>Development of a vegetable oil block heat and power plant with own oil mill</i>	2010
1296	ASTRA 2007/008	Swis contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP) <i>Schweizer-Beitrag zum Russpartikel-Messprogramm für schwere Motorwagen (HD-PMP)</i> <i>Contribution de la Suisse au Programme de Mesure des Particules pour voitures automobiles lourdes (HD-PMP)</i>	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? -(Performance-orientierte Methoden) <i>Relation between binder properties and damage characteristics of pavements ?</i> <i>(Performance orientated methods)</i>	2010
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Schadensprozesse und Zustandsverläufe <i>Processus de dégradation et lois d'évolution</i> <i>Pavement damage processes and performance curves</i>	2008
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen <i>Génération de trafic par des installations de stationnement</i> <i>Traffic generation of parking facilities</i>	2009
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesysteme (SGPS) <i>Système de prévision de chaussées glissantes</i> <i>Forecasting Expert System for Road Slipperiness</i>	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum-Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung <i>Espace de rues sans obstacles-</i> <i>Exigences des personnes avec handicap</i> <i>Obstacle free traffic areas-</i> <i>Demands of people with disabilities</i>	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen <i>Modernisation des feux de signalisation</i> <i>Modernisation of traffic control systems</i>	2010