

# Auf dem Weg zu einem energieeffizienten und klimafreundlichen Schweizer Mobilitätssystem



# IMPRESSUM

## Basierend auf dem Working Paper

**Towards an Energy Efficient and Climate Compatible Future Swiss Transportation System, 2017**

Boulouchos K<sup>1</sup>, Cellina F<sup>2</sup>, Ciari F<sup>1</sup>, Cox B<sup>3</sup>, Georges G<sup>1</sup>, Hirschberg S<sup>3</sup>, Hoppe M<sup>4</sup>, Jonietz D<sup>1</sup>, Kannan R<sup>3</sup>, Kovacs N<sup>2</sup>, Küng L<sup>1</sup>, Michl T<sup>4</sup>, Raubal M<sup>1</sup>, Rudel R<sup>2</sup> & Schenler W<sup>3</sup>

Boulouchos K<sup>1</sup>, Hirschberg S<sup>3</sup> & Romera G<sup>5</sup> [eds.]

<sup>1</sup>ETH Zürich, <sup>2</sup>SUPSI, <sup>3</sup>PSI, <sup>4</sup>ZHAW & <sup>5</sup>SCCER Mobility

## Inhaltliche Zusammenfassung

Konstantinos Boulouchos  
Leiter SCCER Mobility  
Institut für Energietechnik  
ETH Zürich  
Tel. +41 44 632 56 48  
boulouchos@lav.mavt.ethz.ch  
www.lav.ethz.ch

## Kontakt

Gloria Romera Guereca  
Managing Director SCCER Mobility  
ETH Zürich  
Tel. +41 44 633 80 06  
gloria.romera@sccer.ethz.ch  
www.sccer-mobility.ch

## Layout und Gestaltung

Kirsten Oswald  
Project Manager Communications SCCER Mobility  
ETH Zürich  
Tel. +41 44 633 85 75  
kirsten.oswald@sccer.ethz.ch  
www.sccer-mobility.ch

## Auf dem Weg zu einem energieeffizienten und klimafreundlichen Schweizer Mobilitätssystem

Dieses Dokument fasst die wichtigsten Ergebnisse eines aktuellen Forschungsberichtes<sup>1</sup> zusammen, der sich mit der heutigen Situation und den Zukunftsperspektiven des Schweizer Mobilitätssystems auseinandersetzt. Der Bericht wurde von einer Arbeitsgruppe des Schweizer Kompetenzzentrums für Energieforschung auf dem Gebiet der Mobilität (SCCER Mobility)<sup>2</sup> mit dem Ziel erarbeitet, Entwicklungen für eine zukünftige Mobilität aufzuzeigen, die in Einklang stehen mit der Einhaltung der Klimaziele des Pariser Übereinkommens<sup>3</sup> und der Schweizer Energiestrategie 2050. Der Schwerpunkt dieses Berichtes liegt auf dem motorisierten Individualverkehr und dem damit verbundenen Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Andere Verkehrssektoren und Nachhaltigkeitskriterien werden Gegenstand zukünftiger Berichte sein. Im Folgenden stellen wir potentielle Entwicklungspfade interessierten Vertreterinnen und Vertretern der Wirtschaft, Politik und Gesellschaft vor, um damit die Grundlagen für eine sachliche, wissenschaftsbasierte Diskussion zu schaffen.

### Ausgangslage: Ist-Zustand, Treiber und Ziele für den Schweizer Mobilitätssektor

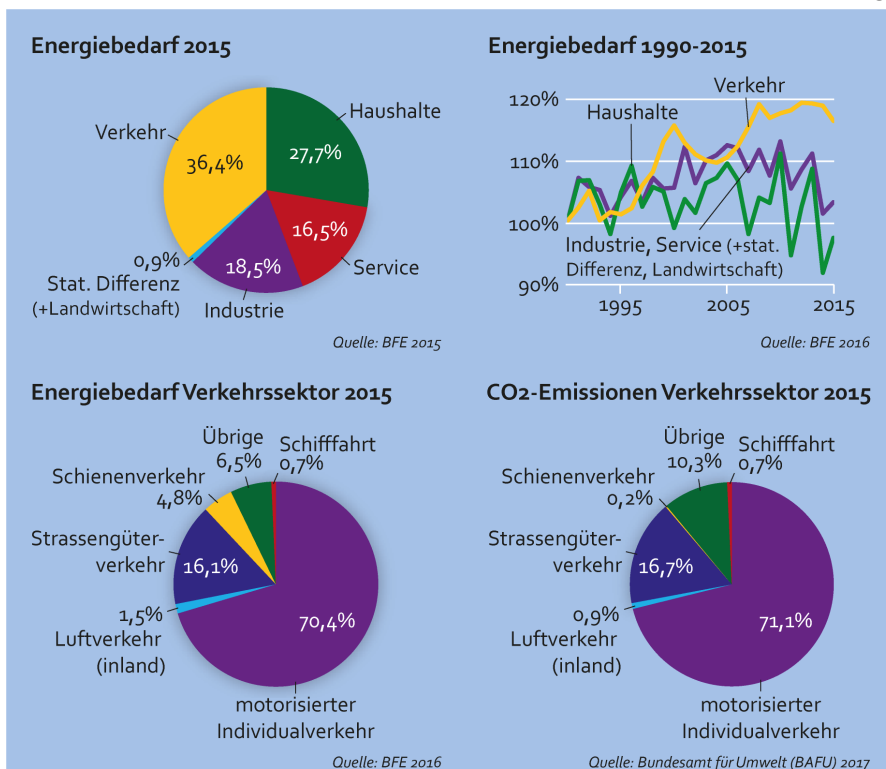
Zum heutigen Zeitpunkt ist der Mobilitätssektor der mit Abstand grösste Energieverbraucher in der Schweiz. Gemäss neuesten Berechnungen des Bundesamtes für Energie (BFE) liegt der Anteil des Verkehrs am gesamten Endenergieverbrauch in der Schweiz bei gut 36% (BFE 2015, s. **Abb. 1**) und

bei knapp einem Drittel der Treibhausgasemissionen. Dazu kommt, dass der Verkehr als einziger Sektor über die letzten drei Jahrzehnte anteilmässig immer mehr Energie benötigte. Ein Trend, der erst in den letzten Jahren abflachte. Auch innerhalb des Mobilitätssektors zeigen sich eindeutige Schwergewichte. Den mit Abstand grössten Energieverbrauch hat mit etwa 70% der motorisierte Individualverkehr (MIV). An zweiter Stelle folgt

mit 16% der Strassengüterverkehr. Der internationale Luftverkehr ist nicht Gegenstand dieses Berichtes, wird allerdings zukünftig angesichts der wachsenden Bedeutung auch in die Betrachtungen über die Zukunft der Mobilität mit einfließen müssen.

Es ist sinnvoll, den MIV als Hauptenergieverbraucher und grössten CO<sub>2</sub>-Verursacher innerhalb des Verkehrssektors genau unter die Lupe zu nehmen und die Entwicklung des MIV hin zum heutigen energetischen Schwergewicht näher zu beleuchten. Bis zum Jahr 2010 stieg die Anzahl gefahrener Fahrzeugkilometer in der Schweiz stark an (s. **Abb. 2**); dies auch aufgrund der wachsenden Bevölkerung und des Pro-Kopf-Einkommens. Etwas weniger stark zugenommen haben bis 2010 die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Grund für diesen Unterschied liegt im technologischen Fortschritt, der seit Mitte der 1990er Jahre zu einer kontinuierlichen Abnahme des pro Fahrzeugkilometer ausgestossenen CO<sub>2</sub> geführt hat.

Die neuesten Szenarien des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) legen nahe, dass die Nachfrage nach Fahrzeugkilometern in der Schweiz aller Voraussicht nach

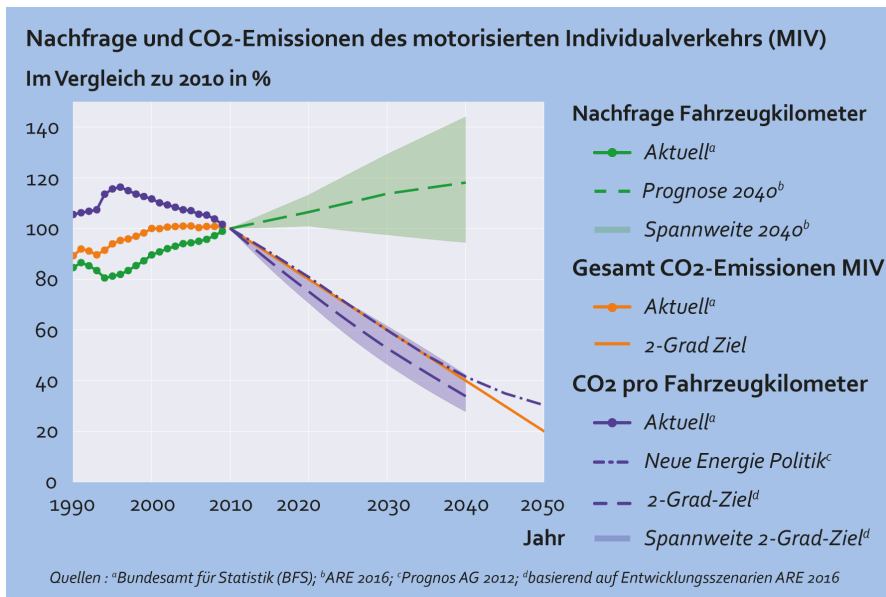


**Abbildung 1.** Der Verkehrssektor hat den höchsten Energiebedarf in der Schweiz. Die Tendenz ist weiterhin zunehmend. Der motorisierte Individualverkehr trägt dabei den Hauptanteil und verursacht etwa 70% der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Mobilitätssektors.

<sup>1</sup>Bericht „Towards an Energy Efficient and Climate Compatible Future Swiss Transportation System“, 2017

<sup>2</sup>Swiss Competence Center for Energy Research - Efficient Technologies and Systems for Mobility ([www.sccer-mobility.ch](http://www.sccer-mobility.ch))

<sup>3</sup>Die Klimaschutzkonferenz der Vereinten Nationen 2015 (The 2015 United Nations Climate Change Conference, COP 21, Paris)



**Abbildung 2.** Will die Schweiz die in Paris festgelegten Klimaziele (Erderwärmung <+2°C) umsetzen, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des MIV bis 2050 um etwa 80% sinken.

weiterhin ansteigen wird (ARE 2016). Die Bandbreite der Prognosen liegt zwischen praktisch null und 40% Zuwachs (s. **Abb. 2**). Dieser absehbaren Entwicklung steht die Absicht der Schweiz entgegen, an dem von der Klimawissenschaft erarbeiteten CO<sub>2</sub>-Budget für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels (Erderwärmung <+2°C mit 66% Wahrscheinlichkeit, Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016) festzuhalten. Wir gehen davon aus, dass dieses Ziel anteilmässig für alle Energiesektoren - und damit auch für die Mobilität - gelten soll und setzen somit für die Schweiz und für die ganze Welt das gleiche CO<sub>2</sub>-Budget pro Kopf voraus. Unter der vereinfachten Annahme einer linearen Absen-

kung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses zeigen laufende Berechnungen des SCCER Mobility, dass bis 2050 die gesamten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des MIV um 80% gesenkt werden müssen. Ab dem Jahr 2060 darf der MIV gar kein CO<sub>2</sub> mehr emittieren. Unter diesen Voraussetzungen besteht Handlungsbedarf, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss des MIV sehr schnell zu senken.

Laut diesem erstmals auf diese Art errechneten Ziel lassen sich erforderliche Verbesserungen an der gesamten MIV-Flotte festlegen: nämlich eine CO<sub>2</sub>-Absenkung pro Fahrzeugkilometer um ca. 65% bis 2040 (verglichen mit den Werten von 2010). Zwar gibt es je nach

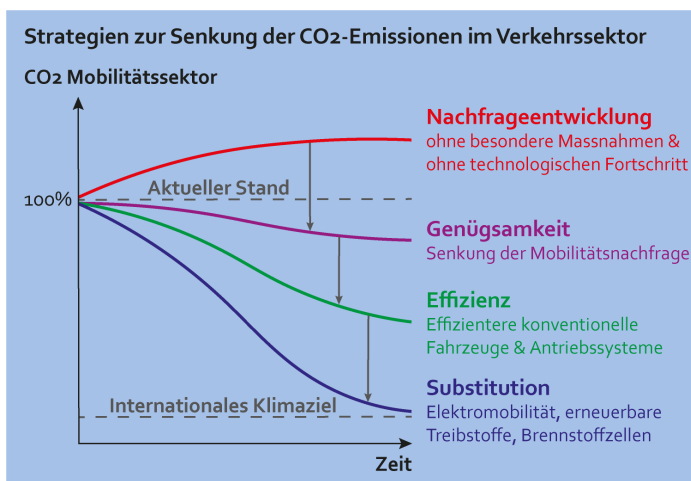
gewähltem ARE-Nachfrage-szenario eine gewisse Bandbreite bezüglich der notwendigen CO<sub>2</sub>-Absenkung, doch selbst die bisher beschlossenen Ziele der Energie-strategie 2050 (Prognos AG 2012) werden nur unter sehr optimistischen Annahmen ausreichen, um die erforderliche Absenkung erreichen zu können.

### Ein systemischer Ansatz zur Zielerreichung

Ausgehend von der Annahme, dass die Schweiz weiterhin an den international festgelegten Klimazielen festhalten will, hat sich SCCER Mobility in einem systemischen Ansatz mit der Frage auseinandergesetzt, wie eine so drastische Senkung der vom Verkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten 50 Jahren erreicht werden könnte. Als Grundlage hierfür müssten aus Sicht des SCCER Mobility drei Bedingungen erfüllt werden (s. **Abb. 3**): (1) Eindämmung der Nachfrage («Genügsamkeit», u.a. durch smarte Systeme), (2) Erhöhung der Antriebs- und Fahrzeugeffizienz («Effizienz») und (3) Substitution fossiler durch erneuerbare Energieträger («Substitution»).

### Potentiale gezielter Interventionen

Der relative Anteil dieser drei Teilstrategien dürfte sich voraussichtlich sowohl im Verlauf der Zeit verändern als auch je nach Verkehrssektor variieren. Um das Potential verschiedener Massnahmen zur Zielerreichung auf der Nachfrageseite auch auf der Angebotsseite einschätzen zu können, haben wir einzelne, gezielte normative Interventionen mithilfe Schweizer Mobilitätsdaten (BFS/ARE 2012) untersucht und die jeweils erzielbare CO<sub>2</sub>-Verringerung berechnet. Die nächsten drei Beispiele solcher Interventionen sind im Rahmen



**Abbildung 3.** Um CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor senken zu können, ist eine systemische Herangehensweise mit synergetischen Massnahmen sowohl auf der Nachfrageseite als auch auf der Angebotsseite erforderlich (hier qualitativ dargestellt).

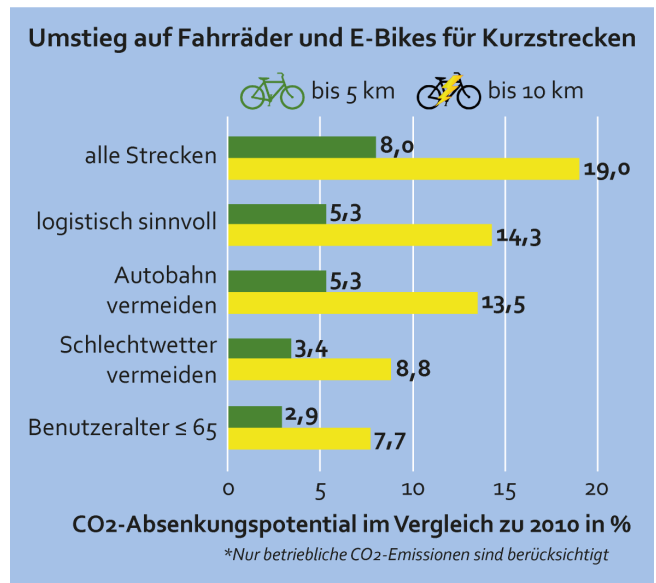


des ETH-Projektes «Strategic Guidance»<sup>4</sup> innerhalb des SCCER Mobility entstanden (Boulouchos et al. 2017, s. S. 34-41) und werden im Folgenden der Reihe nach kommentiert.

Als Erstes wurde untersucht, wie gross das CO<sub>2</sub>-Absenkungspotential wäre, wenn in Zukunft MIV-Fahrten von weniger als 5 km ausschliesslich mit dem Fahrrad bzw. von unter 10 km mit dem E-Bike zurückgelegt werden und somit sämtliche ineffizienten Kurzstreckenfahrten mit dem Auto wegfallen würden. Ein Umstieg auf den sogenannten «Langsamverkehr» führt im Idealfall zu einer CO<sub>2</sub>-Verringerung (vollständige Umsetzung) von 8 bis im allerbesten Fall 19% (s. **Abb. 4**). Werden bei dieser Betrachtung sukzessive realistische Einschränkungen dazu gedacht, so reduziert sich diese Einsparung deutlich; unter Berücksichtigung von allen Einschränkungen sind 2,9 bis 7,7% maximal möglich. Unter dem Strich bedeutet dies, dass die Auswirkungen eines landesweiten Umstiegs auf den «Langsamverkehr» zwar nicht zu vernachlässigen sind, tatsächlich aber bliebe der Beitrag dieser Intervention überschaubar.

Ferner untersucht wurden die Auswirkungen eines vollständigen Umsteigens aller Pendler der fünf grössten Schweizer Städte auf den öffentlichen Verkehr (ÖV, s. **Abb. 5**). Das errechnete Potential zeigt für diesen Fall eine maximale CO<sub>2</sub>-Verringerung von etwa 16%, gemessen am gesamten Ausstoss des MIV in der Schweiz. Auch in diesem Fall reduziert sich das Einsparpotential unter Berücksichtigung von verschiedenen Kriterien, wie Zeitverlust und Komforteinbusse zu den Stosszeiten, sehr rasch auf einen sehr tiefen einstelligen Prozentbereich. Sollten die

**Abbildung 4.** Unter Berücksichtigung üblicher Hindernisse für die Fahrradnutzung, lassen sich selbst bei konsequenter Nutzung nur CO<sub>2</sub>-Einsparungen im einstelligen Prozentbereich für E-Bikes realisieren. Der Umstieg ist also willkommen, aber der Ertrag verhältnismässig gering.



Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) diese Verlagerung auf den ÖV bewältigen, müssten sie unter voller Ausschöpfung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials (16,8%) ihre heutigen Kapazitäten um etwa 50% erhöhen.

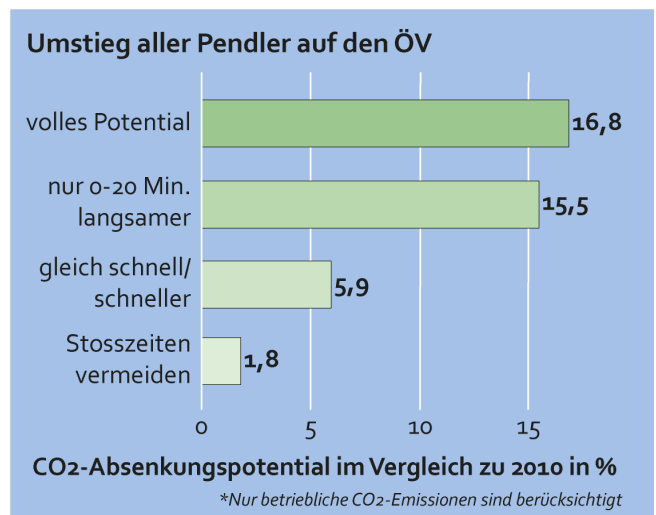
Im Weiteren wurden die Folgen nachfrageseitiger Interventionen an der Nahtstelle von Technologie und Konsumentenverhalten untersucht. Es wurden drei verschiedene Fälle beleuchtet, teils unter Berücksichtigung von Motorleistungsänderungen und unter der Annahme des konsequenten Einsatzes von Leichtbauelementen im Fahrzeugbau. Bei Letzterem wird von einem Potential zur Ge-

wichtseinsparung von 10% (mittelfristig gut machbar) und längerfristig von 20% (sehr aufwendig und teuer) für die gesamte PKW-Flotte ausgegangen. Folgende CO<sub>2</sub>-Einsparungen ergeben sich für die jeweilige Strategie (s. **Abb. 6**).

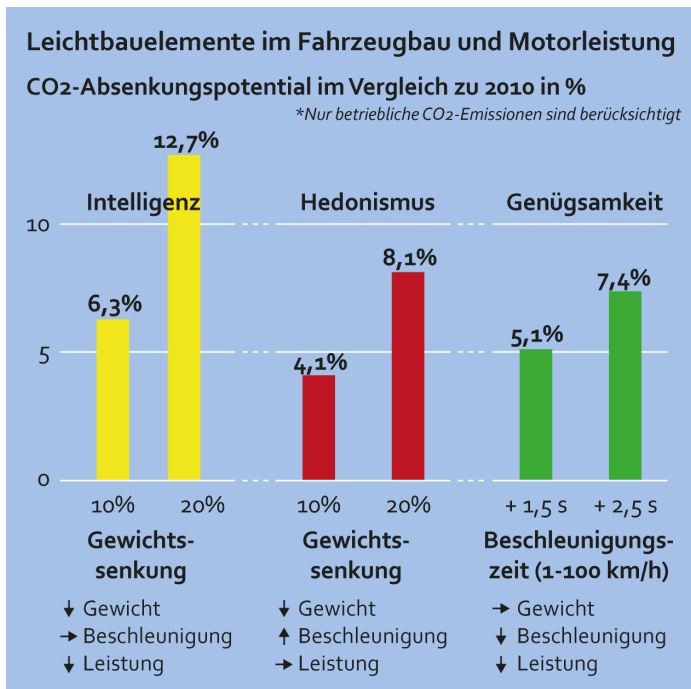
**Intelligenz:** Die erzielte Gewichtsreduktion wird dazu genutzt, die installierte Motorleistung entsprechend zu reduzieren, um die gleiche Fahrzeugdynamik aufrecht zu erhalten. Bei etwas höheren Kosten gegenüber dem Ist-Zustand beträgt die CO<sub>2</sub>-Einsparung 6-13%.

**Hedonismus:** Trotz Gewichtsreduktion wird die ursprüngliche Motor-

**Abbildung 5.** CO<sub>2</sub>-Emissionen könnten deutlich durch eine Verlagerung des Pendlerverkehrs auf den ÖV vermindert werden, wenn Kunden gewisse Nachteile in Kauf nehmen würden. Die Verlagerung würde zudem eine Erhöhung der Transportkapazitäten bedingen.



<sup>4</sup>Das von der ETH geförderte Projekt bewertet systematisch die potentiellen Auswirkungen von technologischen, Infrastruktur- und sozio-ökonomischen Mobilitätsmassnahmen und unterstützt damit die strategische Ausrichtung der Forschungsaktivitäten des SCCER Mobility.



**Abbildung 6.** Fahrzeugleichtbau mit angepasster Motorleistung erhält die Fahrdynamik und ist die effektivste Kombination hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Einsparung.

nigen für eine flächendeckende Elektrifizierung des MIV liegen dürfte. Durch Beimischung von nachhaltig erzeugtem Schweizer Biogas ins Erdgas können noch zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

Man erreicht in der Summe dieser «evolutionären» Technologieentwicklungen eine Halbierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses auf etwa **5,5 Mio. Tonnen pro Jahr** ohne nennenswerte Verknüpfung oder Auswirkungen auf das übrige Energiesystem. Die berechneten CO<sub>2</sub>-Einsparungen basieren auf der Annahme, dass diese herkömmlichen verbesserten Technologien innerhalb der nächsten 10-15 Jahre bei gleichbleibender Verkehrsleistung den Markt für Neufahrzeuge dominieren werden.

**Elektrifizierungspfad:** Eine weitere Entkarbonisierung der Mobilität lässt sich anschliessend (mittel- und langfristig) nur noch durch Technologieentwicklungen basierend auf einer Antriebselektrifizierung erreichen. Die beiden konkurrierenden Elektrifizierungspfade für die Zukunft sind einerseits batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) und andererseits Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs), die mit Wasserstoff als Energieträger betrieben werden. Die dazu erforderliche Elektrizität beträgt für BEVs schätzungsweise etwa **20%** des aktuellen Strombedarfs der Schweiz und etwa **50%** für FCEVs (bei heutiger Verkehrsleistung). Nun muss allerdings bei sämtlichen Elektrifizierungsszenarien für die Zukunft in Betracht gezogen werden, dass die erzielbare Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses stark vom CO<sub>2</sub>-Fussabdruck des verwendeten Stroms abhängig sein wird. Im Vergleich zum «evolutionären» Pfad und seinen jährlich etwa **5,5 Mio. t CO<sub>2</sub>** (Minimalwert), schneiden nur die BEVs mit dem Schweizer Verbraucher-Strommix deutlich

leistung beibehalten, wodurch die Fahrdynamik höher ist. Bei deutlich steigenden Kosten ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 4-8%.

**Genügsamkeit:** In diesem Fall wird das Fahrzeuggewicht beibehalten, die Motorleistung wird jedoch um zwei Stufen reduziert, sodass die Fahrdynamik wenig oder merklich reduziert wird. Dies ermöglicht bei geringeren Kosten gegenüber dem Referenzfall CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 5-7%.

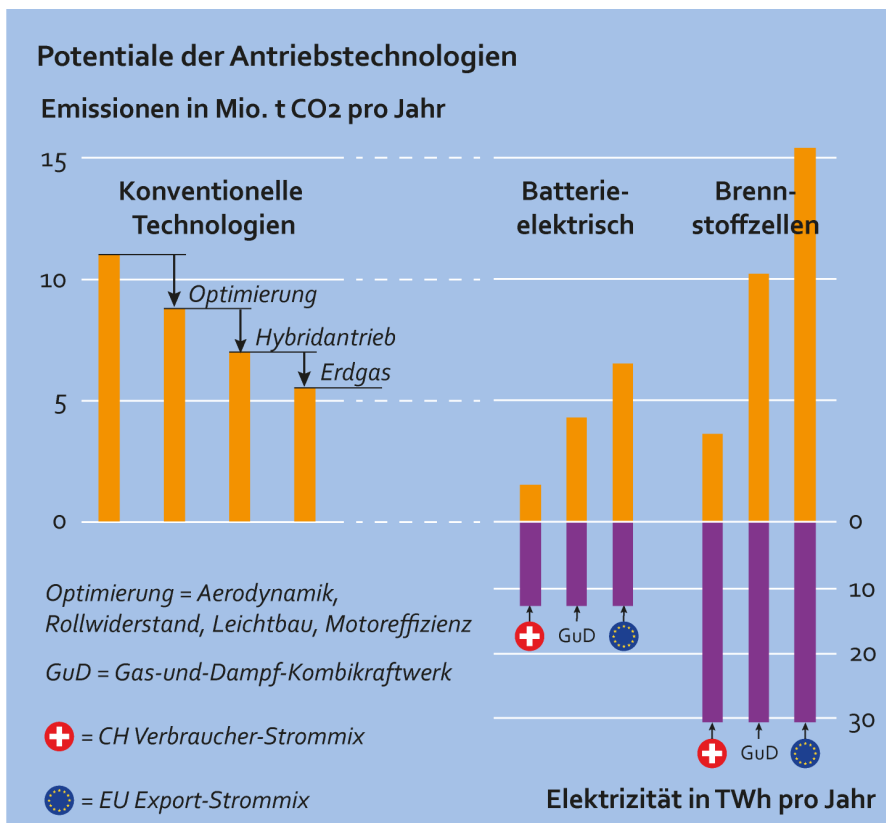
**Potentiale der Antriebstechnologien und zukünftiger Energieträger**

Technologische Entwicklungen, die zu einer erheblichen Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Fahrzeugen führen, werden insbesondere im Bereich der Antriebstechnologien sowie der entsprechenden Energieträger eine entscheidende Rolle spielen, um das 2-Grad-Klimaziel einhalten zu können. Aus Sicht des SCCER Mobility ist diese technologische Entwicklung für den MIV auf zwei Ebenen denkbar.

**Evolutionäre Technologieentwicklung:** Zum einen werden sich Fahrzeuge auf «evolutionärer» Ebene

stetig weiterentwickeln, wobei davon auszugehen ist, dass sich bereits bekannte Technologien fortlaufend verbessern werden (s. **Abb. 7**). Durch Optimierungen am Fahrzeug (Aerodynamik, Leichtbau, Rollwiderstand) und am Motor selbst (variable Ventilzeiten und Verdichtung sowie verbesserte Brennverfahren) kann gegenüber dem derzeitigen Technologiestand von einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 20% ausgegangen werden. Weitere CO<sub>2</sub>-Einsparungen von mindestens 20% können mit der inzwischen marktreifen Hybridtechnologie erzielt werden, wodurch gegenüber den heutigen durch den MIV verursachten knapp **11 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro Jahr** kurz- bis mittelfristig eine Reduktion auf etwa **7 Mio. t** erreichbar wäre.

Ein weiterer Fortschritt wäre realisierbar, wenn der gesamte MIV vom Betrieb mit Erdöl auf Erdgas umsteige, wodurch sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoss des MIV nochmals um mindestens 20% reduzieren liesse. Diese Entwicklung würde zwar einen gewissen Infrastrukturaufwand für neue Tankstellen bedeuten, der aber deutlich unter demje-



**Abbildung 7.** Optimierung und erhöhter Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutraleren konventionellen Technologien kann schon mehr als 50% CO<sub>2</sub> einsparen. Der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck systemverändernder Technologien (batterieelektrisch und Brennstoffzellen) hängt stark von der Stromquelle ab. Der geschätzte durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionswert des EU Export-Strommixes beruht auf Daten aus dem Jahr 2014 (Messmer & Fischknecht 2016).

(etwa **1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>**) und mit Strom aus Gaskombikraftwerken etwas (**4,3 Mio. t CO<sub>2</sub>**) besser ab. Bei den FCEVs wiederum stossen alle Stromerzeugungsorten ausser dem Schweizer Verbraucher-Strommix deutlich mehr CO<sub>2</sub> aus als die Summe der «evolutionären» Massnahmen.

Welche Technologie sich auch immer durchsetzt, es muss in jedem Fall festgehalten werden, dass die Bereitstellung so grosser neuer Elektrizitätsmengen gemäss Schweizer Strommix illusorisch ist; es wird in Zukunft nicht viel mehr Wasserkraft geben als heute und neue erneuerbare Energiequellen müssen so weit wie möglich prioritär die mittelfristig abzuschaffenden Kernkraftwerke ersetzen.

**Neue chemische Energieträger:** Schliesslich könnte die Power-to-

Gas-Technologie<sup>5</sup> zur nahe zu vollständigen Entkarbonisierung des Verkehrs beitragen. Dabei wird saisonal überschüssige Elektrizität (aus erneuerbaren bzw. «CO<sub>2</sub>-freien» Energiequellen) in chemische Energieträger (Wasserstoff, synthetische Kohlenwasserstoffe) umgewandelt, welche über das ganze Jahr für die Mobilität eingesetzt werden könnten. Allerdings ist diese Technologie insbesondere kostenmässig noch nicht marktreif und mit sehr hohem technologischem und energetischem Aufwand verbunden. Diese Energieträger könnten jedoch insbesondere für bestimmte Anwendungen, z.B. für schwere Nutzfahrzeuge oder im Schiffsverkehr, ein Schlüsselement sein.

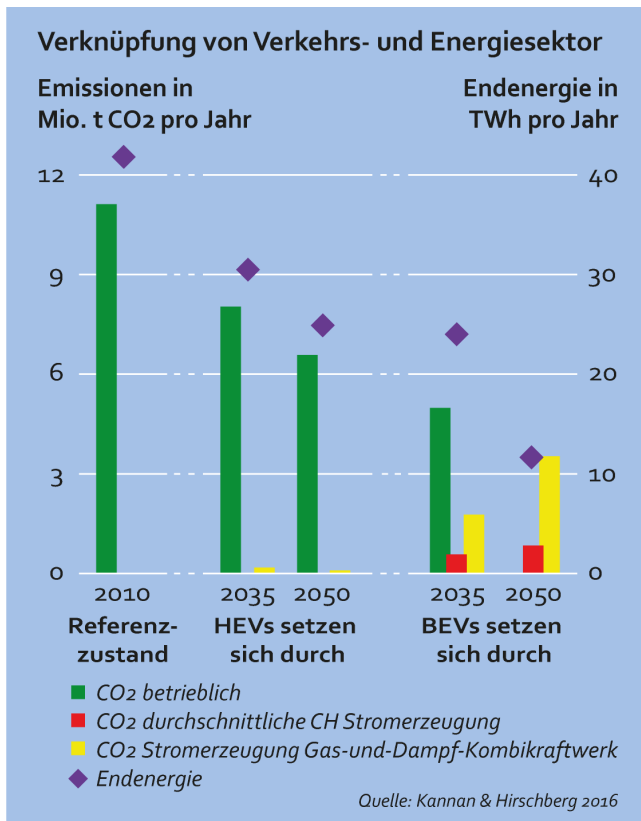
Wie eingangs erwähnt, liegt der Fokus dieses Berichtes auf dem

MIV und wir analysieren andere Verkehrssektoren nicht im Detail. Diese Sektoren sind jedoch sicherlich auch zentral für eine CO<sub>2</sub>-Absenkungsstrategie und werden in zukünftigen Berichten eingehend untersucht.

### Techno-ökonomische Sicht auf die Verknüpfung von Verkehrs- und Elektrizitätssektor

Der Elektrifizierungspfad wird eine starke Verknüpfung des Verkehrs mit dem Elektrizitätssektor herbeiführen. Deshalb hat SCCER Mobility die notwendige Koevolution dieser beiden Sektoren mittels eines techno-ökonomischen Energiesystemmodells gemäss ausgewählten Szenarien der Schweizer Energiestrategie 2050 untersucht (Kannan & Turton 2014). Exemplarisch zeigen wir hier den CO<sub>2</sub>-Ausstoss und den Endenergiebedarf in zwei Szenarien: a) aktuelle Energiepolitik inklusive Atomausstieg und b) striktere politische Massnahmen, die eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 60% bis 2050 voraussetzen. Unter Weiterführung der heutigen Energiepolitik setzen sich gemäss Modell Benzin-Hybridfahrzeuge (HEVs, 80% in 2050) durch. Ganz im Gegenteil führt eine striktere Zielsetzung zu einer Flotte, die 2050 fast ausschliesslich aus BEVs bestehen wird. In Einklang mit der vorherigen Abbildung (s. **Abb. 7**) wird erneut verdeutlicht, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoss und der Endenergiebedarf auch hier nicht zu vernachlässigen sind (s. **Abb. 8**). Jedoch führt das BEV-Szenario im Vergleich zum HEV-Pfad zu einem geringeren direkten CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Der gesamte CO<sub>2</sub>-Fussabdruck ist jedoch nach wie vor nicht gleich null, da sich dieser zukünftig teilweise auf den Stromsektor verlagert. Wie schon erwähnt, ist der zusätz-

<sup>5</sup>Prozess, in dem mittels Wasserelektrolyse mit teilweise nachgeschalteter Methanisierung ein Brennstoff hergestellt wird. Das Potential dieser Technologie wird innerhalb des SCCER-Programms untersucht und ein Bericht dazu wird Mitte 2018 erwartet.



**Abbildung 8.** Der zusätzliche Elektrizitätsbedarf der Mobilität kann gemäss diversen Szenarien im Rahmen der Energiestrategie 2050 auf unterschiedliche Art und Weise abgedeckt werden. Langfristig sinkt der betriebliche CO<sub>2</sub>-Ausstoss und der Endenergiebedarf nur bei flächendeckendem Einsatz von BEVs.

Einerseits ist zu erwarten, dass die fortschreitenden Digitalisierungstechnologien Konzepte wie «car-sharing» und «ride-sharing» fördern werden. Aber auch, dass die inhärente Sicherheit des autonomen Fahrens zu deutlich weniger, leichteren und sparsameren Fahrzeugen führen dürfte, womit sowohl der voraussichtliche Bedarf an grauer Energie<sup>6</sup> als auch der Aufwand für sonstige Infrastruktur sinken würde. Andererseits besteht die Befürchtung, dass durch den erhöhten Komfort und die deutlich niedrigeren Kosten pro gefahrenem Kilometer eine massive Erhöhung der Nachfrage seitens heute nicht fahrwilliger oder fähiger Personen entstehen könnte. Ferner sind Anreize zu längeren Pendlerdistanzen gegeben und es besteht die Gefahr von Wettbewerbsnachteilen für den ÖV. Dies gilt auch für den Güterverkehr, bei dem grosse Kosteneinsparungen beim vollautomatisierten Betrieb auf der Strasse zu erwarten sind, womit auch hier der Schienengüterverkehr weniger wettbewerbsfähig wäre. Insgesamt darf man also voraussichtlich keinen entscheidenden – wenn überhaupt positiven – Beitrag des automatisierten Fahrens zur Lösung des Energie- und CO<sub>2</sub>-Problems für die Mobilität erwarten.

liche Strombedarf einer reinen BEV-Flotte erheblich und ihre Gesamtemissionen werden stark vom CO<sub>2</sub>-Fussabdruck des verwendeten Stroms abhängen.

### Lebenszyklusanalyse verschiedener Mobilitätstechnologien

Der Vergleich verschiedener Entwicklungsszenarien basierte bisher ausschliesslich auf Endenergie- und CO<sub>2</sub>-Werten, die aus dem Betrieb der Fahrzeuge herrühren. Eine Erweiterung dieses Vergleichs durch die Berücksichtigung der dem Betrieb vorgelagerten Prozesse wie der Herstellung von Energieträgern, Antrieben und Fahrzeugen ist aber im Sinne einer Lebenszyklusanalyse unerlässlich. Damit können die neuen Antriebs- und Fahrzeugtechnologien (Elektrifizierungspfade) auf ihre Klima-, Umwelt- und Kostenauswirkungen hin untersucht werden.

Die Berücksichtigung der vorgelagerten Prozesse bestätigt, dass die Elektromobilität bei erneuerbarer

Stromerzeugung im Vergleich zum «evolutionären» Pfad sehr tiefe CO<sub>2</sub>-Betriebsemissionen ermöglicht (s. **Abb. 9**). Jedoch führt auch bei den elektrifizierten Antrieben der Aufwand für die Hardwareerstellung zu insgesamt verhältnismässig moderaten CO<sub>2</sub>-Absenkungen. Viele der massgebenden vorgelagerten Prozesse finden im Ausland statt; dies bedeutet, dass eine weitgehende Entkarbonisierung des Verkehrssektors nur bei gleichzeitiger massiver CO<sub>2</sub>-Absenkung der weltweiten Industrieprozesse erreichbar sein wird.

### «Game-changing» Entwicklungen

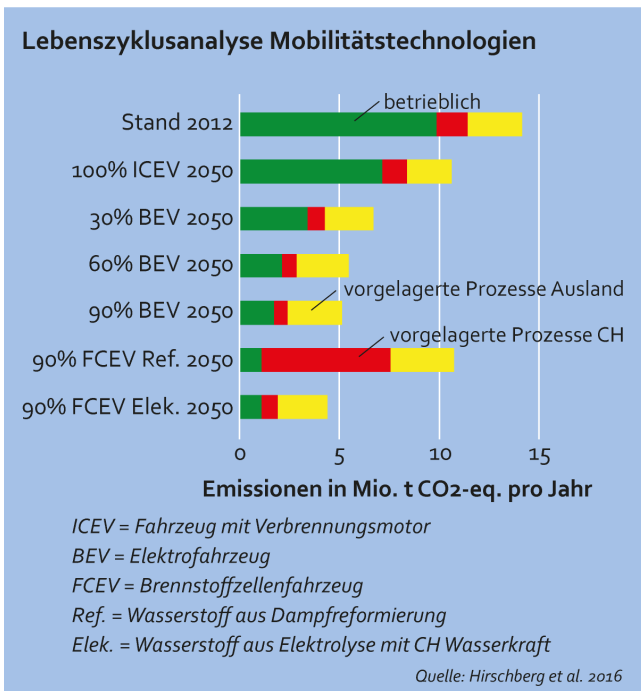
An der Nahtstelle von Angebot und Nachfrage ist eine potentielle «game-changing» Technologie erkennbar: das selbstfahrende Fahrzeug. Bei der Umsetzung einer vollautomatisierten, fahrerlosen Betriebsweise entstehen zwei entgegengesetzte Trends im Hinblick auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Mobilität.

### Erfordernisse an eine zielführende Politik zur Umsetzung der Energie- und Klimaziele

Die weltweite Mobilität wird innerhalb der nächsten 50 Jahre eine umwälzende Transformation durchlaufen müssen, um mithelfen zu können die internationalen Klimaziele zu erreichen. Diese Transformation wird technologische, ökonomische und hoffentlich auch positive soziale Auswirkungen haben. Dementsprechend ist die Bedeutsamkeit einer übergeordneten, strategisch verlässlichen, aber

<sup>6</sup>Energie, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird.





**Abbildung 9.** Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass eine weitgehende Elektrifizierung des Verkehrssektors durch erneuerbaren Strom nicht automatisch zu «null» CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Entscheidend ist nämlich, dass alle vorgelagerten Prozesse eine gute Klimabilanz haben. Dies setzt eine Entkarbonisierung der gesamten industriellen Produktionsprozesse weltweit voraus.

### Schlussfolgerungen

Will die Schweiz die internationalen Klimaziele (COP 21, Paris) einhalten, muss der CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro Fahrzeugkilometer langfristig gegen null sinken. Dies kann nur durch eine parallel-verlaufende Eindämmung der Nachfrage sowie durch die konsequente Ausschöpfung von technologischen Fortschritten erfolgen. Einerseits müssen diese Technologiepotentiale durch die Optimierung der heute schon verfügbaren Fahrzeugtechnologien («evolutionärer» Weg) erreicht werden und andererseits durch den verbreiteten Einsatz der Elektromobilität (Elektrifizierungspfad) sowie neuer Technologien und Energieträger, sobald diese zu annehmbaren Gesamtpreisen verfügbar sind. Dies bedeutet, dass der Elektrizitätssektor zukünftig auch CO<sub>2</sub>-frei sein muss. Entscheidend wird dabei sein, dass auch sämtliche vorgelagerten Prozesse keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr verursachen, was letztlich eine Entkarbonisierung des gesamten industriellen Produktionsprozesses weltweit voraussetzt. Die Realisierung einer solch ehrgeizigen Transformation setzt eine strategisch zielgerichtete, jedoch taktisch anpassungsfähige Politik auf internationaler Ebene voraus. Als innovatives und wohlhabendes Land kann die Schweiz eine Pionierrolle in dieser systemischen Transformation einnehmen. Mit seiner technologischen und sozioökonomischen Forschung strebt das SCCER Mobility danach, die Umsetzung der Energiestrategie 2050 zu unterstützen und Wege aufzuzeigen, wie unser zukünftiger Mobilitätssektor klimapolitische Ziele erfüllen kann.

im Lauf der Zeit auch anpassungsfähigen Energie- und Klimapolitik für den Verkehr notwendig. Sehr wichtig ist, dass diese möglichst international eingebettet ist, wobei zweifelsohne technologisch sowie wirtschaftlich starke Wirtschaftsräume wie die Schweiz vorangehen müssen.

Selbstverständlich muss diese Politik anerkennen, dass die Mobilität ein wesentliches Merkmal für die Wohlfahrt moderner Gesellschaften ist. Sie kann deswegen mengenmässig nicht beliebig reduziert werden. Alle Spielräume für eine vernünftige Eindämmung der Nachfrage nach Mobilität und soweit möglich die Umkehrung des heutigen Wachstumstrends müssen aber konsequent ausgeschöpft werden. Eine wichtige Rolle können dabei smarte, auf Informationstechnologien gestützte Systeme spielen. Auch wird der Durchsetzung verursachergerechter Preise eine Schlüsselrolle zukommen. Zurzeit zahlt insbesondere der MIV zwar weitgehend seine Infrastruktur selber, bei Weitem aber nicht die Umweltkosten, die er verursacht, insbesondere nicht den CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Umgekehrt

weist der öffentliche Verkehr in der Regel niedrige Umweltkosten auf, ist jedoch nur teilweise in der Lage, seine Infrastrukturkosten zu decken (ECOPLAN/INFRAS 2014). Zu beachten ist hier, dass u.a. ein einheitlicher, mit der Zeit steigender CO<sub>2</sub>-Preis (angepasst an den aktuellen Wissensstand) über alle Energiesektoren hinweg unerlässlich ist, damit sich die optimalen Energieträger durchsetzen.

Um Anreize für zielgerichtete neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle sowie faire Marktbedingungen für die verschiedenen Mobilitätsmodi schaffen zu können, weisen neuste Forschungsergebnisse darauf hin, dass eine auf Lenkungsmaßnahmen basierte Politik gegenüber Subventionen deutlich kostengünstiger ist (Böhringer et al. 2017). Abschliessend muss darauf hingewiesen werden, dass bei jedem erzielbaren Effizienzfortschritt auf den Rebound-Effekt geachtet werden muss. Dieser besagt, dass Einsparungen tendenziell zu höherer Nachfrage entweder im gleichen oder auch in anderen Sektoren führen, wodurch die ursprünglichen Effizienzgewinne teilweise kompensiert werden.

## REFERENZEN

- Akademien der Wissenschaften Schweiz. 2016. Brennpunkt Klima Schweiz : Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Akademien der Wissenschaften Schweiz, Bern.
- Boulouchos K, Cellina F, Ciari F, Cox B, Georges G, Hirschberg S, Hoppe M, Jonietz D, Kannan R, Kovacs N, Küng L, Michl T, Raubal M, Rudel R & Schenler W. 2017. Towards an Energy Efficient and Climate Compatible Future Swiss Transportation System. Boulouchos K, Hirschberg S & Romera G [eds.]. SCCER Mobility. ETHZ, PSI, SUPSI & ZHAW.
- Böhringer C, Kosch M, Landis F, Müller A, van Nieuwkoop ER & Rausch S. 2017. Promotion- or Steering-based Energy Policy: Assessing Efficiency and Distributional Impacts. Universität Oldenburg, ECOPLAN & ETHZ.
- Bundesamt für Energie (BFE). 2015. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2015. Bundesamt für Energie, Bern.
- BFE. 2016. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016 - Tabellen.
- Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). 2016. Verkehrsperspektiven 2040. Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- Bundesamt für Statistik (BFS)/ARE. 2012. Mobilität in der Schweiz: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- BFS. 2016. Treibhausgasemissionen der Schweiz 1990-2014.
- BFS. (kein Datum). Mittlere ständige Wohnbevölkerung der Schweiz.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). 2017. Entwicklung der Emissionen von Treibhausgasen seit 1990.
- ECOPLAN/INFRAS. 2014. Externe Effekte des Verkehrs 2010: Monetisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Schlussbericht zuhanden des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- Hirschberg S et al. 2016. Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles. Final report of the THELMA project in co-operation with the Swiss Competence Center for Energy Research "Efficient technologies and systems for mobility". PSI, EMPA & ETHZ.
- Kannan R & Turton H. 2014. Switzerland energy transition scenarios - Development and application of Swiss TIMES Energy System model (STEM). Final project report to Federal Office of Energy. Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen.
- Kannan R & Hirschberg S. 2016. Interplay between electricity and transport sectors - Integrating the Swiss car fleet and electricity system. Transportation Research Part A: Policy and Practice.
- Messmer A & Frischknecht R. 2016. Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014. Treeze Ltd., Uster. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Prognos AG. 2012. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Prognos, Basel.



*Swiss Competence Center for Energy Research  
Efficient Technologies and Systems for Mobility*

## SCCER Mobility

Das **Swiss Competence Center for Energy Research - Efficient Technologies and Systems for Mobility (SCCER Mobility)** fördert in der schweizerischen Mobilitätsforschung die Bereitstellung von Wissen und neuen Technologien für ein nachhaltiges Mobilitätssystem. Dieses zeichnet sich durch minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen, eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs sowie die Vermeidung von Schadstoffemissionen aus. Somit unterstützen die Forschungsarbeiten des SCCER Mobility die Umsetzung der **Energiestrategie 2050**.

Im Rahmen des SCCER Mobility arbeiten **25 Forschungsgruppen** aus zehn führenden Schweizer Forschungsinstitutionen mit 28 Firmen aus der Privatwirtschaft zusammen, um neue Lösungen und Produkte auf dem Gebiet der Mobilität zu erarbeiten, welche eine messbare Auswirkung auf Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Ausstoss beinhalten.

Die Forschungsaktivitäten des SCCER Mobility decken ein breites Themengebiet ab: Komponenten für die Elektromobilität, Batteriesysteme, neue Konzepte für Brennstoffzellen, Verbrennungseffizienz, erneuerbare Treibstoffe und Verminderung des nicht-antriebsbedingten Energiebedarfs. Darüber hinaus untersucht das SCCER Mobility systemische Aspekte der Mobilität. Dies beinhaltet eine ganzheitliche Betrachtung von Mobilitätssystemen unter Berücksichtigung von Infrastruktur, Umweltauswirkungen, Raumentwicklung, raumzeitlichen Daten, Technologie-Assessment sowie energiewirtschaftlichen und sozioökonomischen Einflussfaktoren. Die Autoren dieses Berichtes sind vor allem im Bereich systemische Aspekte der Mobilität tätig. Neue Forschungsergebnisse und Erweiterungen der hier aufgezeigten Resultate werden kontinuierlich in Form von wissenschaftlichen Publikationen, Berichten und bei Bedarf auch weiteren White Papers veröffentlicht.

Zusätzlich werden in Zukunft innerhalb des SCCER Mobility und in Zusammenarbeit mit anderen SCCERs folgende Themen vertieft:

- mögliche technologische Entwicklungspfade (Effizienz, Elektrifizierung, synthetische und erneuerbare Kraftstoffe) für den Strassengüterverkehr sowie die internationale Schiff- und Luftfahrt
- weitere Dimensionen eines nachhaltigen Verkehrssystems, z.B. lokale und regionale Umweltbelastung anhand einer Vielfalt von Indikatoren
- sozioökonomische Aspekte, die zur Entwicklung der zukünftigen Mobilität erforderlich sind: u.a. politische Massnahmen, Kostenaspekte sowie Nachfragepräferenzen und Entscheidungsmechanismen von Konsumenten und Investoren

SCCER Mobility ist eines der acht von der Kommission für Innovation und Technologie (KTI) geförderten Kompetenzzentren. Weitere Information finden Sie auf [www.sccer-mobility.ch](http://www.sccer-mobility.ch).



*Swiss Competence Center for Energy Research  
Efficient Technologies and Systems for Mobility*

**In Zusammenarbeit mit der KTI**

---



**Förderprogramm Energie**  
Swiss Competence Centers for Energy Research

---



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Kommission für Technologie und Innovation KTI