

VIEL KOMFORT UND WENIG STROM BEIM BUSFAHREN

Die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs ist in vollem Gang. Der Bau von Trolley- und Batteriebussen, die Fahrgast-Komfort und tiefen Stromverbrauch in Einklang bringen, ist technisch anspruchsvoll. Forschungseinrichtungen wie die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich unterstützen die Hersteller mit wichtigen Erkenntnissen etwa zum optimalen Einsatz von Batterien. Ein aktuelles Forschungsprojekt zielt auf eine bessere Energieversorgung von Heizung, Lüftung und Klimatisierung.



Die Batterie auf dem Dach ermöglicht diesem Trolleybus, auch Strecken ohne Oberleitungen zu meistern. Foto: B. Vogel

Dieselbusse erbringen in den Schweizer Städten eine beträchtliche Transportleistung. Doch das soll sich ändern: Aus Gründen des Klimaschutzes wollen die meisten Verkehrsbetriebe die fossil betriebenen Busse kurz- und mittelfristig durch elektrische Alternativen wie Trolley- und Batteriebusse ersetzen. Damit die Elektrifizierung gelingt, braucht es leistungsfähige Elektrobusse, die die vielfältigen Anforderungen des städtischen Nahverkehrs erfüllen. «Hier ist auch die Forschung gefragt, da durch den Einsatz von Simulations- und Optimierungstools sowie selbstlernenden Algorithmen gute Kompromisse zwischen verschiedensten Zielgrößen wie Investitionskosten, Energieeffizienz, Langlebigkeit, Komfort, etc. erreichbar sind», sagt Christopher Onder, Professor am «Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik» (IDSC) der ETH Zürich.

Trolleybus im Batteriebetrieb

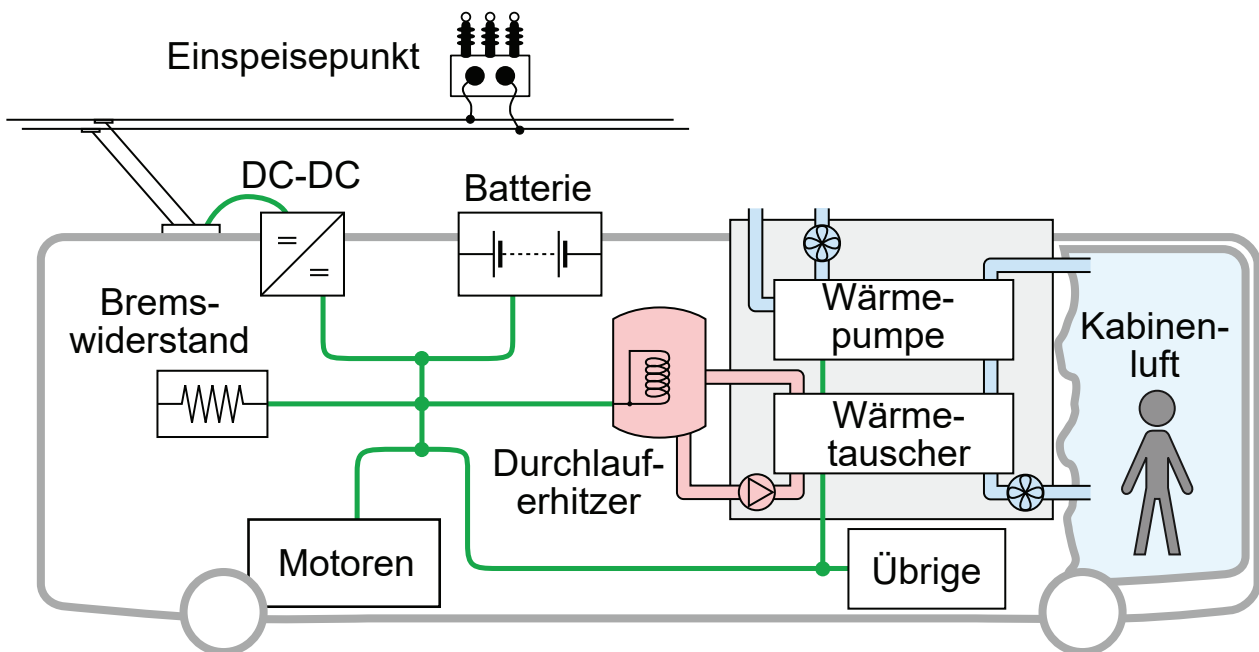
Forschende des IDSC wirkten beispielsweise an der Entwicklung des «SwissTrolley plus» mit. Aus dem Projekt ging 2019 ein Trolleybus hervor, der dank einer leistungsfähigen Batterie auch auf Linien eingesetzt werden kann, die nur teilweise mit Oberleitungen ausgerüstet sind. Zudem kann der «Swiss Trolley plus» dank der Batterie rekuperierte Bremsenergie besser nutzen, indem diese für die spätere Verwendung in der Batterie zwischengespeichert wird. Forschende der ETH



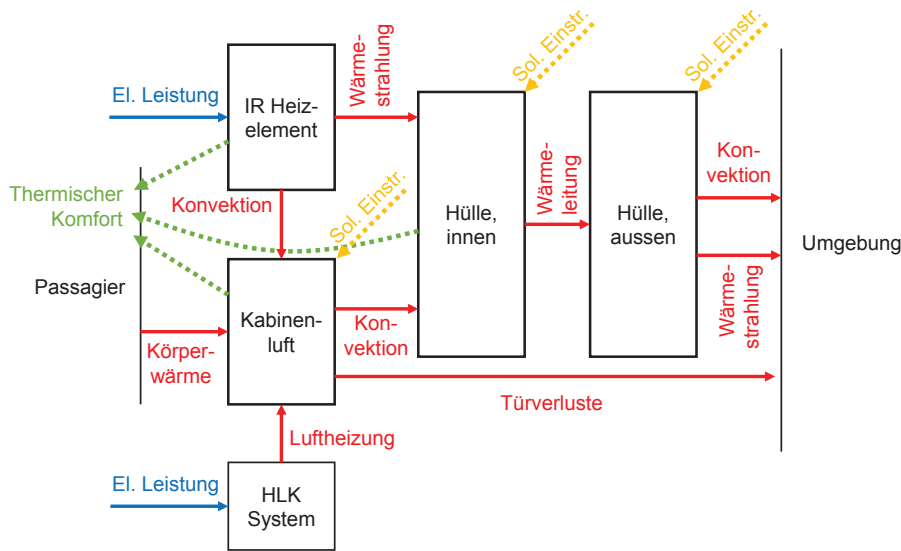
Ein Batterie-unterstützter Gelenktrolleybus der Verkehrsbetriebe Zürich. Foto: VBZ

Zürich entwickelten für den Bus ein selbstlernendes Energiemanagementsystem zum Laden und Entladen der Batterie. Verglichen mit der vorherigen Trolleybus-Generation können rund 15 % der elektrischen Energie gespart werden.

Für Busse des öffentlichen Nahverkehrs gelten hohe Anforderungen: Sie sollen pünktlich und störungsfrei verkehren. Sie sollen den Fahrgästen aber auch einen hohen Komfort bieten, darunter genügend Sitzplätze und Stauraum für Gepäck, zudem frische und gut temperierte Luft im Fahrgastraum. Damit sich die Reisenden wohl fühlen, wärmt eine Heizung



Energiesystem eines Trolleybusses, der dank einer Batterie auch Teilstrecken ohne Oberleitung bewältigt. In einer ETH-Studie wurde unter anderem untersucht, wie die Lebensdauer der Batterie durch geschicktes Lade-/Entlademanagement respektive durch optimierten Betrieb der Wasserheizung verlängert werden kann. Grün steht für elektrische Verbindungen, Rot für Warmwasser, Blau für Luft. Illustration: Schlussbericht ISOTHERM



Darstellung der simulierten Wärmeflüsse in einem Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs gemäss dem von Fabio Widmer an der ETH entwickelten Modell. Illustration: Schlussbericht ISOTHERM

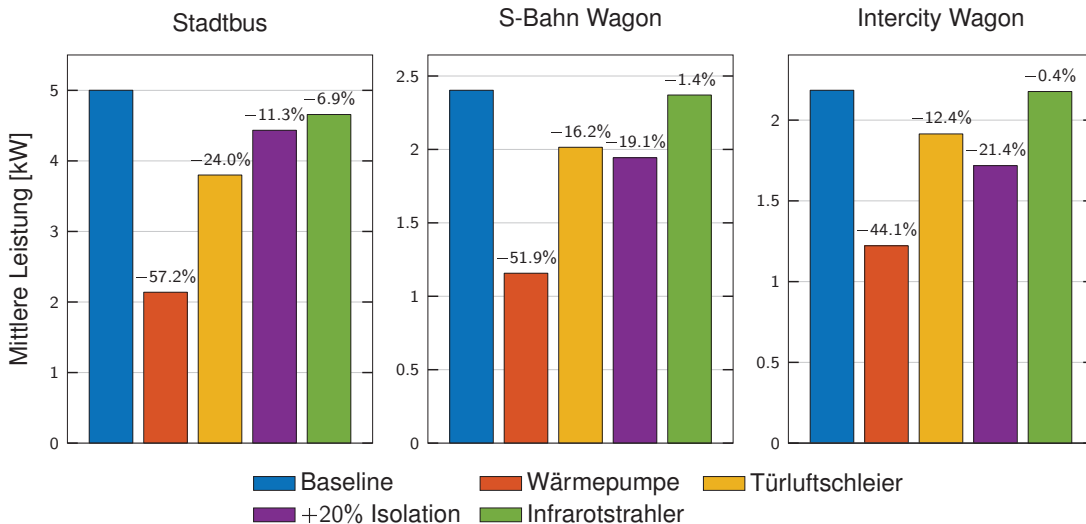
an kalten Tagen, eine Lüftung sorgt für Luftaustausch, und an heissen Tagen kühlt die Klimaanlage. Die Systeme für Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK) haben einen erheblichen Anteil am Energieverbrauch von Bussen: An kalten Wintertagen verbrauchen sie mitunter gleich viel oder sogar mehr Strom als der Antrieb.

Abwärme des Motors fehlt

Die Energieversorgung der HLK-Systeme stellt für Batteriebusse eine besondere Herausforderung dar. Bei dieselgetriebenen Bussen kann die Heizwärme grösstenteils aus der Abwärme des Motors bezogen werden. Bei elektrischen Fahr-

zeugen steht diese Energiequelle nicht zur Verfügung, da die (sehr effizient arbeitenden) Antriebskomponenten sehr wenig Wärmeverluste haben. Die Energie zum Betrieb der HLK-Systeme muss daher aus der Batterie bezogen werden. Das schmälert die Reichweite der Fahrzeuge.

Die Auslegung und Ansteuerung der HLK-Systeme von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist daher eine wichtige technische Herausforderung. Der ETH-Wissenschaftler Fabio Widmer hat im Rahmen seiner Doktorarbeit nach Optimierungsmöglichkeiten gesucht. Seine Erkenntnisse gelten für verschiedene Elektrofahrzeug, neben Batterie- und Trolley-



Die Grafik zeigt, wie stark sich der Energieverbrauch der HLK-Systeme im Jahresdurchschnitt durch vier verschiedene Effizienzmassnahmen gemäss ETH-Studie reduzieren lässt (jeweils im Vergleich zu einem HLK-System mit klassischer Klimaanlage und elektrischer Heizung). Die höchste Reduktion lässt sich durch eine Wärmepumpe erreichen, dies in Elektrobusen ebenso wie in S-Bahnen oder Intercity-Zügen. Bei der Modellierung dieser Verbrauchswerte wurde die Annahme getroffen, dass der PMV-Wert (vgl. Textbox S. 4) im Winter nicht unter -1 (die Reisenden empfinden das Raumklima durchschnittlich als etwas zu kühl) und im Sommer nicht über +1 (die Reisenden empfinden das Raumklima durchschnittlich als etwas zu warm) liegen darf. Grafik: Fabio Widmer

bussen auch für Trams und Bahnwagen. Widmer schloss die Studie mit dem Titel «Intelligent Software for Thermal Energy Management» (ISOTHERM) vor kurzem ab. Das Bundesamt für Energie hat sie mit Geldern aus dem Forschungsprogramm «Mobilität» mitfinanziert. Weitere Unterstützung leistete die Busherstellerin Carrosserie HESS AG (Bellach/SO). Die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) stellten einen ihrer Trolleybusse für Feldversuche zur Verfügung.

Heizung und Batteriealterung

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeit von Fabio Widmer lag auf der Frage, wie bei einem Batterie-unterstützten Trolleybus die Abnutzung (Degradation) der Batterie reduziert werden kann. Der ETH-Forscher entwickelte eine Heizungssteuerung, mit der starke Entlade- und Ladeströme vermieden und so die Batterie geschont werden kann. Dieses Ziel wird erreicht, indem die Heizung wenn immer mög-

lich mit Rekuperationsenergie betrieben wird, also mit dem Strom, der beim Abbremsen des Busses gewonnen wird. Auf dem Weg können die Ströme zum Laden der Batterie reduziert werden. Umgekehrt wird in Phasen, wenn der Bus mit Batteriestrom beschleunigt, auf das Heizen verzichtet. So lassen sich starke Ströme beim Entladen der Batterie vermeiden.

So angesteuert ist die Heizung des Busses nicht mehr dauerhaft in Betrieb. Das führt aber nicht zu einer Komforteinbusse, da die Temperatur im Bus bei einer temporären Inaktivität der Heizung nur sehr langsam absinkt. Die neuartige Steuerung des ETH-Wissenschaftlers wurde im letzten Quartal 2022 auf einem Batterie-unterstützten Trolleybus der VBZ praktisch erprobt. Die Alterung der Batterie konnte während dieser Zeit um 12 % vermindert werden. Anders ausgedrückt: Dank der neuen Steuerung haben Batterien eine deutlich längere Betriebszeit, was auch finanziell vorteilhaft ist.

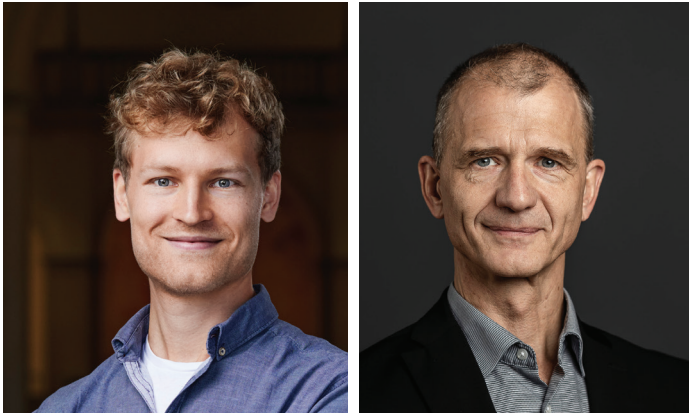
THERMISCHER KOMFORT IST MEHR ALS DIE RICHTIGE TEMPERATUR

Heizung, Lüftung und Klimatisierung haben das Ziel, Menschen genügend Frischluft und eine behagliche Temperatur bereitzustellen. Wann genau dieser «thermische Komfort» zum Beispiel in einem Bus gegeben ist, lässt sich nicht so einfach bestimmen, wie Fabio Widmer im ISOTHERM-Schlussbericht festhält: «Der thermische Komfort einer einzelnen Person ist letztlich kein objektiver Wert, der sich vollständig durch quantitative Grössen wie die Temperatur erfassen lässt.» Aus diesem Grund machen die meisten Modelle Aussagen über einen erwarteten «Mittelwert» des thermischen Komfortempfindens einer Population.

Um zu beschreiben, wie gut der thermische Komfort in einem Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs ist, zieht die ETH-Studie das Modell heran, das der dänische Ingenieur Povl Ole Fanger vor gut 50 Jahren entwickelt hat. Das Modell quantifiziert den von Menschen in einem Fahrzeug (oder auch in einem Haus) empfundenen thermischen Komfort auf einer Skala, die von «kalt» (-3) bis «heiss» (+3) reicht. Dieser Zahlenwert – auf Englisch bezeichnet als «Predicted Mean Vote»/PMV – widerspiegelt das durchschnittliche subjektive Wärmeempfinden einer Gruppe von Personen. Ein Wert von +1 beispielsweise bedeutet, dass Personen ein bestimmtes Raumklima im Durchschnitt als «etwas zu warm» empfinden.

Der PMV wird auf der Grundlage der folgenden Einflussgrössen berechnet: Temperatur der Umgebungsluft, mittlere Strahlungstemperatur (der Sonne, aber auch der umliegenden Flächen wie z.B. kalte Fenster oder warme Infrarotheizelemente), körperliche Aktivität, Isolationswert der Kleidung, Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit. Auf Basis des PMV-Indexes prädiziert Fangers Modell zudem den Prozentsatz der Personen in einer Gruppe, die mit einer bestimmten thermischen Umgebung unzufriedenen sind (engl.: «Predicted Percentage of Dissatisfied»/PPD).

Zur Veranschaulichung mag das folgende Beispiel dienen: Eine Umgebungslufttemperatur von 15 °C und eine mittlere Strahlungstemperatur von 14 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 40 % führt bei leichtem Luftzug von 0.1 m/s, winterlicher Bekleidung (1.3 clo) und ohne körperlicher Betätigung (sitzend) zu einem PMV von -1 («leicht kühl») und einem PPD von 26 %. Das bedeutet, eine Gruppe von Busreisenden würde diese Situation im Durchschnitt als «leicht kühl» empfinden (PMV -1). Rund ein Viertel der Gruppe wäre mit der Beheizung des Busses unzufrieden (PPD 26 %).



Die Studie von ETH-Doktorand Fabio Widmer (links) wurde von Christopher Onder (rechts), ETH-Professor am «Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik» (IDSC) betreut. Fotos: ETH Zürich

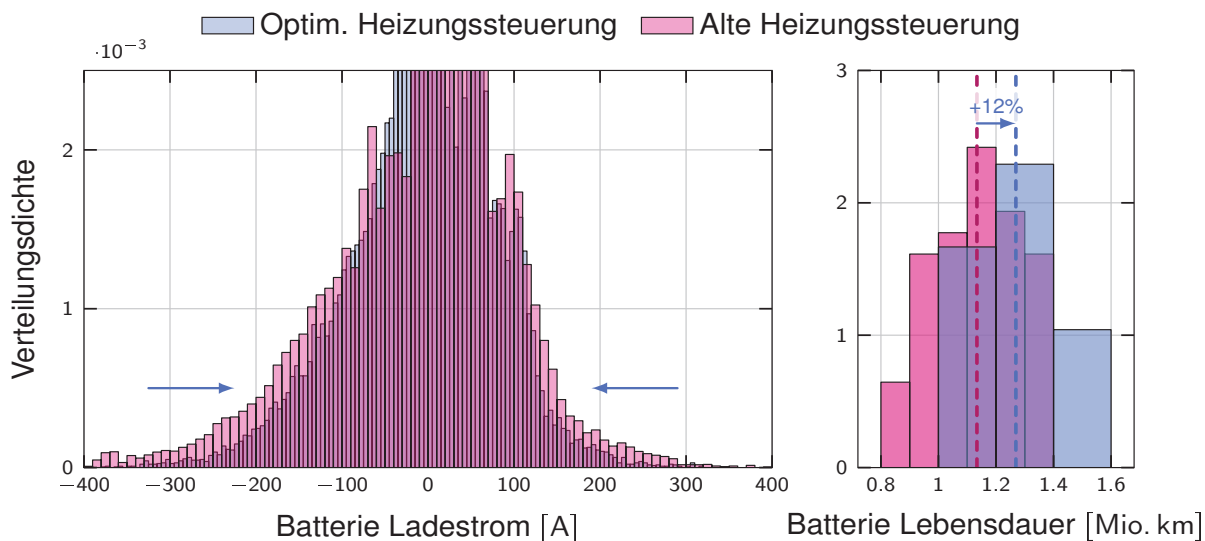
Wärmepumpen sparen bis zu 60 % Energie

Die meisten Ergebnisse der ISOTHERM-Studie basieren nicht auf Messungen, sondern auf Modellrechnungen. Dafür entwickelte Fabio Widmer ein Modell, mit dem sich das Raumklima in Bussen, Trams oder Bahnwagen beschreiben lässt. Das Modell berücksichtigt diverse Einflussgrößen: Art und Leistung der Wärme- und Kälteerzeugung, Wärmeisolation der Wände, Luftaustausch bei geöffneten Türen, Wärmeeintrag der Sonne, Aussentemperatur, aber auch Wärmeabgabe durch die Fahrgäste. Mit dem Modell können mögliche Raumklimata berechnet und mit den Komfortansprüchen der Fahrgäste in Beziehung gesetzt werden. Widmers Modell stellt die Einflussgrößen grafisch dar und fördert dadurch das Verständnis, wie diese voneinander abhängen.

Ein wichtiges Ergebnis der Modellrechnungen: Wird für die Beheizung des Fahrgastraums eine Wärmepumpe anstelle einer Elektroheizung eingesetzt, können abhängig vom Fahrzeugtyp 40 bis 60 % an Energie eingespart werden (vgl. Abbildung S. 3 unten). Der Einsatz von Wärmepumpen, wie er in modernen Bussen und Zügen zunehmend praktiziert wird, ist energetisch also sinnvoll. Als «sehr vielversprechend» erachtet die Studie auch sogenannte Türluftschleier, also «Vorhänge» aus Druckluft, die Wärmeverluste bei geöffneten Türen vermindern. Mit solchen Anlagen, die bisher erst als Prototypen verfügbar sind, könnte der Energieverbrauch der HLK-Systeme im einem Gelenkbus schätzungsweise um rund einen Viertel vermindert werden. In dieser Berechnung ist die Energie für die Erzeugung des Luftschleiers allerdings noch nicht berücksichtigt.

Infrarotstrahler ohne grosse Wirkung

In Fahrzeugen, deren Türen weniger oft benutzt werden als in Bussen, sind Türluftschleier weniger empfehlenswert. So könnte in Zügen eine erhöhte Energieeffizienz wohl eher über eine bessere Isolierung der Fahrgastkabine erreicht werden, vermutet die ETH-Studie. Zu einem ernüchternden Ergebnis kommt die Untersuchung bei der Nutzung von Strahlungswärme: Hierbei werden an der Fahrzeugdecke Infrarotstrahler montiert, die die Fahrgäste ohne merkliche Erwärmung der Luft direkt mit Wärme versorgen. Die Lufttemperatur in der Fahrkabine kann dadurch ohne Komforteinbusse abgesenkt und so Energie gespart werden. Die Modellrechnungen im Rahmen der ISOTHERM-Studie zeigen allerdings, dass Infrarotstrahler in modernen, mit Wärmepumpen ausgerüste-



Die Grafik links zeigt, dass mit der an der ETH entwickelten Heizungssteuerung hohe Lade- und Entladeströme reduziert werden können. Das kommt der Lebensdauer der Batterie zugute (Grafik rechts). Grafik: Schlussbericht ISOTHERM

ten Bussen keine nennenswerten Effizienzgewinne mit sich bringen.

ISOTHERM ist unterdessen im Nachfolgeprojekt «Swiss eBus Plus» aufgegangen. Bei diesem Vorhaben soll bis 2026 unter Mitwirkung von ETH Zürich, Berner Fachhochschule, Carrosserie HESS und VBZ ein reichweitenstarker Quartier-Batteriebus entwickelt werden. Das Fahrzeug soll einen ganzen Betriebstag ohne Nachladen bewältigen. Zudem sollen die HLK-Systeme ganzjährig ausnahmslos mit Batteriestrom auskommen, also ohne die heute oft noch erforderliche Dieselzusatzheizung. Um dieses Ziel zu erreichen, braucht es die richtige Wahl der technischen Komponenten, eine gute Isolierung des Fahrgastraums und eine optimale Steuerung der Energieversorgung. Das BFE unterstützt das Projekt mit Mitteln aus seinem P+D-Programm.

- Der englischsprachige **Schlussbericht** zum Projekt «ISOTHERM – Intelligent Software for Thermal Energy Management» ist abrufbar unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44962>
- **Auskünfte** erteilt Luca Castiglioni, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Mobilität:
luca.castiglioni@bfe.admin.ch
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Mobilität finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-mobilitaet.