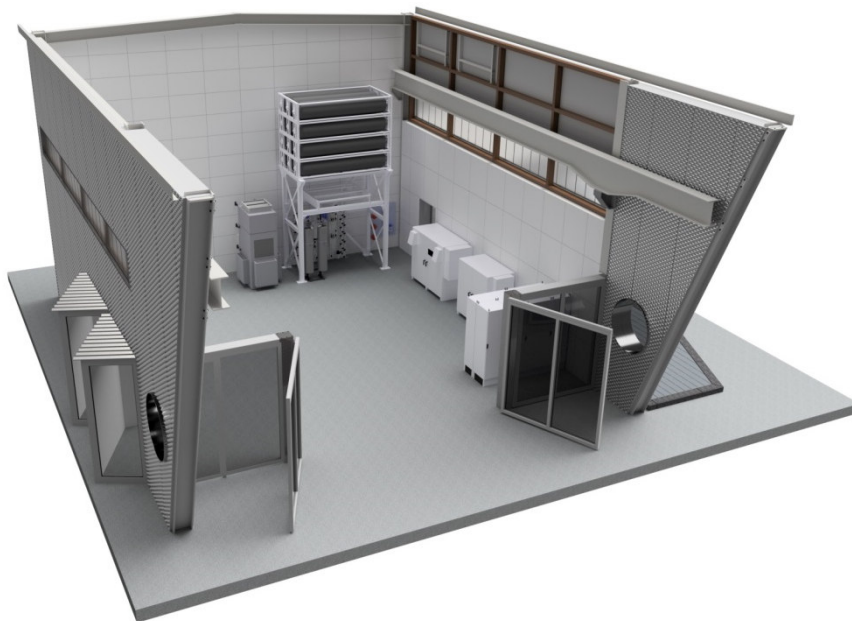


Schlussbericht

Future Mobility Demonstrator – Phase 1



Empa, APT: Christian Bach, Marco Brügger, Urs Cabalzar

ETHZ, IDSC: Lukas Frischknecht

27.11.2017

Inhaltsverzeichnis

Projektpartner	2
Zusammenfassung	3
Übersicht	4
Projektergebnisse	4
Power-to-Gas Demonstrationsanlage <i>move</i>	4
Gesamtsteuerungssystem	7
Modell für einen preisoptimierten Betrieb.....	7
Well-to-Tank Analyse.....	9
Dynamik des Elektrolyseurs.....	12
Technologietransfer	14

Projektpartner

Hauptpartner (alphabetisch)

Atlas Copco AG
Bundesamt für Energie (BFE)
ETH-Rat
Glattwerk AG
Hyundai
H2 Energy
Stadt Dübendorf

Projektpartner (alphabetisch)

Apex AG, Arbor AG (Swagelok), Bucher Municipal, Endress + Hauser Flowtec AG, FPT Motorenforschung AG, IVECO (Schweiz) AG, Metas, Post Company Cars AG, Stäubli International AG, Suva, SVGW (FOGA)

Vielen herzlichen Dank an alle Projektpartner für die vielseitige und sehr wertvolle Unterstützung bei der Durchführung des Projektes ‚Future Mobility Demonstrator – Phase 1‘! Ihre Unterstützung ermöglichte den erfolgreichen Abschluss eines Projektes in den Bereichen der Energieumwandlung und –speicherung, welche derzeit stark an Bedeutung gewinnen. Neben den in diesem Projekt durchgeführten Aktivitäten, wird der Future Mobility Demonstrator auch in Zukunft als Plattform für die Durchführung von weiteren themenverwandten Projekten einen wertvollen Dienst leisten.

Zusammenfassung

Die Aktivitäten zum Projekt ‚Future Mobility Demonstrator – Phase 1‘ starteten am 1. Januar 2014 und wurden per 30. September 2017 abgeschlossen. Die Phase 1 beinhaltete die Realisierung einer Power-to-Gas-Anlage mit lokaler Wasserstoffherzeugung durch einen 180 kW PEM-Elektrolyseur. Ein 44 MPa Kolbenkompressor mit 44 MPa Druckspeicher sowie eine 35 MPa H₂-Tankstelle und eine 35 MPa HCNG-Tankstelle wurden ebenfalls installiert. Die H₂-Produktions- und Betankungsanlage wurde 2015 fertiggestellt (mit Einweihung im November 2015) und die 35 MPa H₂-Tankstelle ist seit diesem Zeitpunkt in Betrieb.

Im Anschluss an den Aufbau der Anlage wurde ein Matlab-Modell der Power-to-Gas-Anlage entwickelt, das es erlaubt, die Anlagendimensionierung und optimierte Betriebsstrategien in Bezug auf Stromkosten und Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom zu untersuchen. Anhand von Messungen am Demonstrator wurden Well-to-Tank-Analysen durchgeführt, die zeigen, dass 57% (bez. auf den Brennwert) der elektrischen Energie in den Fahrzeugtank (35 MPa) gelangen. Bei kleinen Industrieanlagen steigt dieser Wert auf 70 % (bez. auf den Brennwert). Weitere Messungen zur Dynamik des eingesetzten PEM-Elektrolyseurs bestätigen die Eignung dieser Technologie für schnelle Lastwechsel. Diese können innerhalb von 2 Sekunden oder sogar Zehntelsekunden erfolgen, je nachdem, wie die Lastwechsel induziert werden.

Im Rahmen von Nachfolgeprojekten ist die Erweiterung der Anlage durch eine Methanisierung (Phase 2) und einen Netzspeicher (Phase 3) geplant. In Phase 2 soll aus einem Teil des produzierten Wasserstoffs und aus CO₂, welches aus der Luft gewonnen wird, synthetisches Methan hergestellt werden. Die dritte Phase sieht eine Ergänzung der bereits installierten Elektroladesäule durch einen vorgelagerten elektrochemischen Speicher vor.

Übersicht

In Übereinstimmung mit den Projektzielen wurde eine Demonstrationsanlage realisiert, die zeigt, wie überschüssiger oder unrentabler Strom in chemischer Form gespeichert und im Mobilitätssektor genutzt werden kann. Das Gebäude, in dem die Anlage steht, wurde im Jahr 2014 unter Berücksichtigung der geltenden Sicherheitsvorschriften saniert und für die geplanten Installationen vorbereitet. Im selben Jahr wurde die Dimensionierung der Anlage auf der Basis von Simulationen abgeschlossen und die Aufträge für die Hauptkomponenten erteilt. Ende 2014 wurde der Elektrolyseur geliefert. Im Laufe des Jahres 2015 wurden alle übrigen Komponenten für die Herstellung, Verdichtung, Lagerung und Abgabe von H₂ beim Standarddruck von 35 MPa geliefert.

Im Jahr 2016 wurde im Rahmen eines Semesterprojektes in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich ein Modell der Demonstrationsanlage entwickelt. Zur Validierung wurde im gleichen Jahr eine erste Messreihe durchgeführt. Auf der Grundlage einer zweiten Messreihe im Jahr 2017 wurden sowohl die Well-to-Tank-Analyse als auch Untersuchungen zur Dynamik des Elektrolyseurs durchgeführt.

Projektergebnisse

Die folgende Auflistung fasst die wichtigsten Ergebnisse während der gesamten Projektlaufzeit zusammen:

- Funktionsfähige Power-to-Gas Demonstrationsanlage *move* mit Komponenten für die H₂ - Produktion, -Verdichtung, - Lagerung und – Betankung bei 35 MPa
- Gesamtsteuerungssystem für die Datenerfassung und den Anlagenbetrieb installiert. Betrieb nach Strompreisen und Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbarer Energie möglich.
- Modell- und Simulationsergebnisse für die Demonstrationsanlage im Hinblick auf preisoptimierte Betriebsstrategien
- Messungen des realen Energieverbrauchs von der H₂ – Produktion bis zur H₂ – Betankung im Fahrzeugtank bei 35 MPa (Well-to-Tank)
- Messung der Dynamik des Elektrolyseurs

Nachfolgend werden die Projektergebnisse weiter präzisiert.

Power-to-Gas Demonstrationsanlage *move*

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Hauptkomponenten der Demonstrationsanlage *move* dimensioniert, beschafft und installiert. Das untenstehende Schema zeigt den Anlagenaufbau mit dem bisher vorhandenen CNG-Pfad (grün) und dem neu realisierten H₂-Pfad (blau). Die Anlage beinhaltet eine Zapfsäule für HCNG (Mischung aus H₂ & CNG) und H₂ bei einem Druck von 35 MPa. Verblasste Symbole stellen Anlagenerweiterungen dar, die Teil von verwandten Projekten sind, wobei auch der Pfad zur H₂-Betankung bei 70 MPa bereits realisiert wurde.

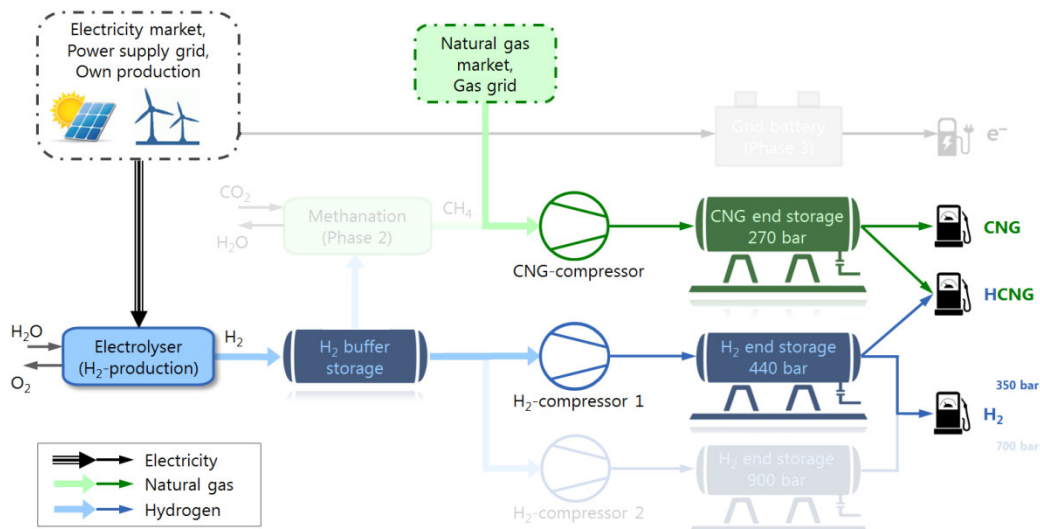


Abb. 1 Schematische Darstellung der Demonstrationsanlage *move*

Die Stromversorgung erfolgt zum einen über Photovoltaikmodule auf dem Dach und an der Fassade des an die Demonstrationsanlage angrenzenden Gebäudes. Die kumulierte Spitzenleistung der Module beträgt 70 kWp. Neben konventionellen multikristallinen Modulen wurden auch Module auf Basis der CIGS-Technologie installiert, die vom ETH/Empa Spin-off Flisom hergestellt werden. Durch diese Dünnschichttechnologie kann der Einsatz von energie- und kostenintensiven Materialien deutlich reduziert werden. Darüber hinaus wird Strom aus einem laufenden Flusskraftwerk mit dokumentiertem Herkunftsnachweis geliefert.

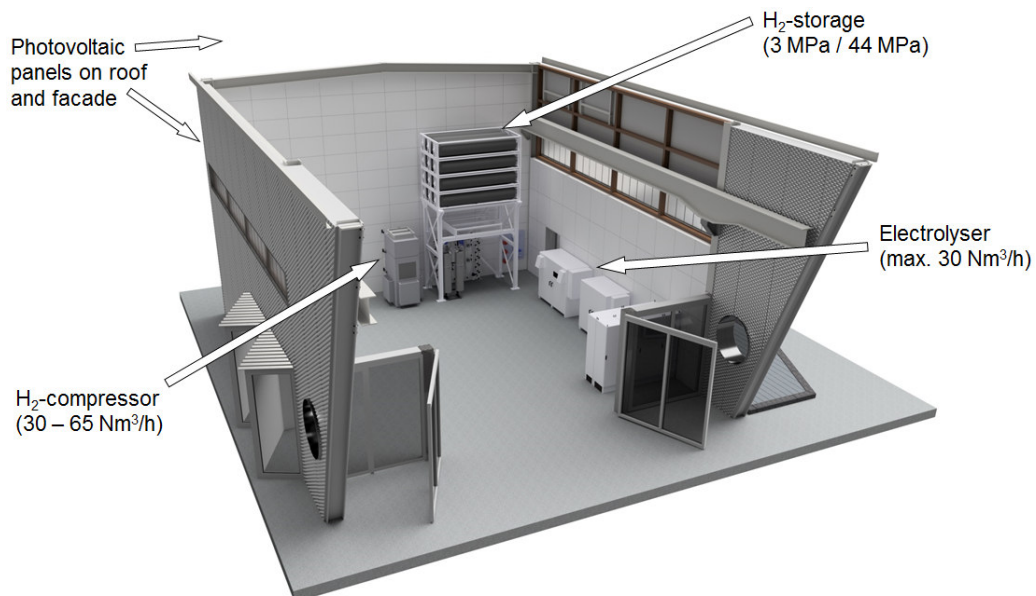


Abb. 2 Komponenten der Demonstrationsanlage *move*, die im Rahmen dieses Projektes installiert wurden

Der erneuerbare Strom wird im Elektrolyseur genutzt, um Wasser in H₂ und O₂ aufzuspalten, wobei bei Voll-last eine H₂-Produktionsrate von 30 Nm³/h erreicht wird. Da für die Elektrolyse die PEM-Technologie eingesetzt wird, kann schnellen Laständerungen durch schwankende Stromquellen ohne weiteres nachgefahren

werden (siehe Kapitel "Dynamik des Elektrolyseurs"). Zur Erhöhung der Flexibilität ist dem Elektrolyseur ein Pufferspeicher (3 MPa) nachgeschaltet, der es erlaubt, den erzeugten H₂ von drei Stunden im Volllastbetrieb zu speichern. Mit einem vierstufigen Kolbenkompressor wird H₂ anschliessend auf ein Druckniveau von 44 MPa gebracht und in den Endspeichern gelagert. Die H₂- und die HCNG-Zapfsäule an der Nordostfassade des Gebäudes ermöglichen die Betankung aus diesen Speichern mittels Kaskadenbetankung.

Die Herausforderungen bei der Anlagenrealisierung lagen naturgemäss im Projektmanagement. Aufgrund von Projektpartnerschaften sowie Lieferantenspezialisierungen wurden die notwendigen Anlagenkomponenten von verschiedenen Lieferanten geliefert. Die Klärung der Schnittstellen und entsprechenden Koordinationsaufgaben erforderten daher seitens der Empa erhebliche Anstrengungen, um eine erfolgreiche Systemintegration zu ermöglichen. Darüber hinaus waren verschiedene Vorbereitungsarbeiten vor Ort notwendig. Namentlich wurden das Kühlsystem für den Elektrolyseur mit Pumpe, Wärmetauscher und Verrohrung sowie unterirdische Leitungen für H₂ und elektrische Leitungen unter der Tankstelle vorab installiert. Die folgenden Bilder zeigen ein Beispiel für Vorbereitungsarbeiten in Form eines Stahlgerüsts und Gasbehälterhalterungen, die an der Empa entworfen und von einem externen Lieferanten gefertigt wurden.

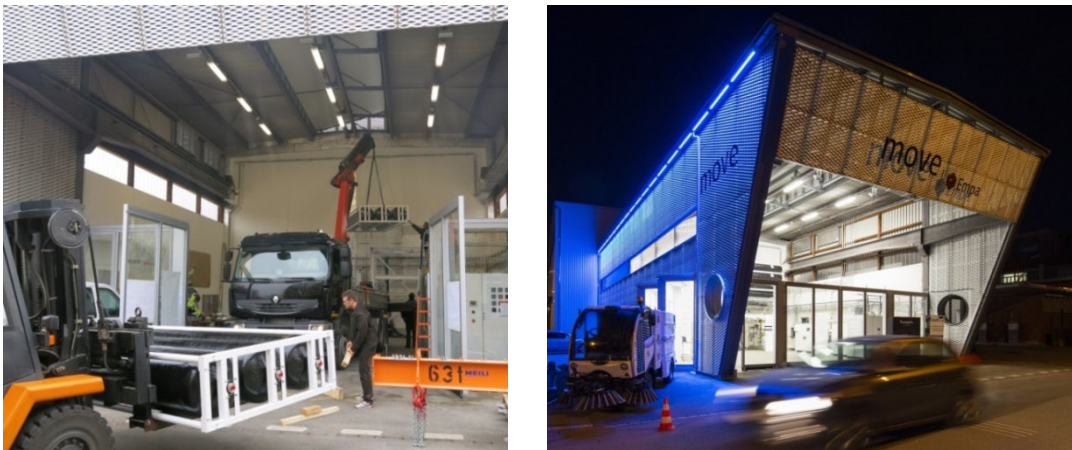


Abb. 3 Montage der Endspeicher auf dem Stahlgerüst (links) und die Aussenansicht der Demonstrationsanlage bei Nacht (rechts)

Während der Planungs- und Installationsphase wurde ein regelmässiger Kontakt zu den Behörden gepflegt, um sicherzustellen, dass der Demonstrator nach den geltenden Vorschriften gebaut wurde. Die zu diesem Thema gesammelten Erfahrungen werden zusammengetragen und für zukünftige Anlagenbauer und -betreiber zur Verfügung gestellt.

Mit der Realisierung der Demonstrationsanlage wurde eine Plattform für verschiedene Forschungsaktivitäten im Bereich der Herstellung und Betankung von erneuerbaren synthetischen Kraftstoffen geschaffen. Die Möglichkeit Untersuchungen unter realen Bedingungen durchführen zu können, ist ein wertvoller Grundstein für aktuelle und zukünftige Projekte in diesem Bereich.

Gesamtsteuerungssystem

Um die Datenerfassung aller Komponenten der Demonstrationsanlage an einem Ort zu bündeln, wurde eine SPS von Beckhoff Automation installiert. Zum einen können so die Daten über einen USB-Stick direkt aus der SPS ausgelesen werden. Zum anderen schreibt die SPS die Daten in eine SQL-Datenbank, in der alle Messwerte gespeichert werden, um sie für die spätere Verwendung leicht zugänglich zu machen. Andere energiebezogene Demonstrationsprojekte der Empa (e-hub, NEST) schreiben Daten in dieselbe Datenbank mit demselben Kodierungssystem.

Die Beckhoff-SPS wird auch für die Gesamtsteuerung der Anlage eingesetzt. Während jede einzelne Komponente eine eigene Steuerung hat, können ihre Befehle über die Beckhoff-SPS überschrieben werden, um eine vordefinierte Betriebsstrategie zu verfolgen. So wird z.B. der Elektrolyseur von seiner Steuerung gestartet, wenn der Druck im stromabwärts liegenden Pufferspeicher sinkt. Eine eigene Steuerung haben auch Kompressor und Endspeicher, wobei die Kompressorsteuerung einer vorgegebenen Hysterese folgt. Über die Beckhoff-SPS können nun zusätzlich Start und Stopp sowie die Lastregelung von Elektrolyseur und Kompressor übergeordnet und unter Berücksichtigung der Strompreise und der Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien gesteuert werden.

Modell für einen preisoptimierten Betrieb

Im Rahmen eines Semesterprojektes wurde in Zusammenarbeit mit der ETH ein Modell der Demonstrationsanlage in Matlab entwickelt. Die einzelnen Komponenten wurden mit Hilfe von diskretisierten Differentialgleichungen für Masse und Energie und der Zustandsgleichung für reale Gase modelliert. Unbekannte Konstanten wurden in einem ersten Schritt anhand von Literaturdaten geschätzt und mit Messungen an der Demonstrationsanlage validiert. Der folgende Screenshot des Programmbausteins des Endspeichers soll einen Eindruck von der Modelloberfläche vermitteln.

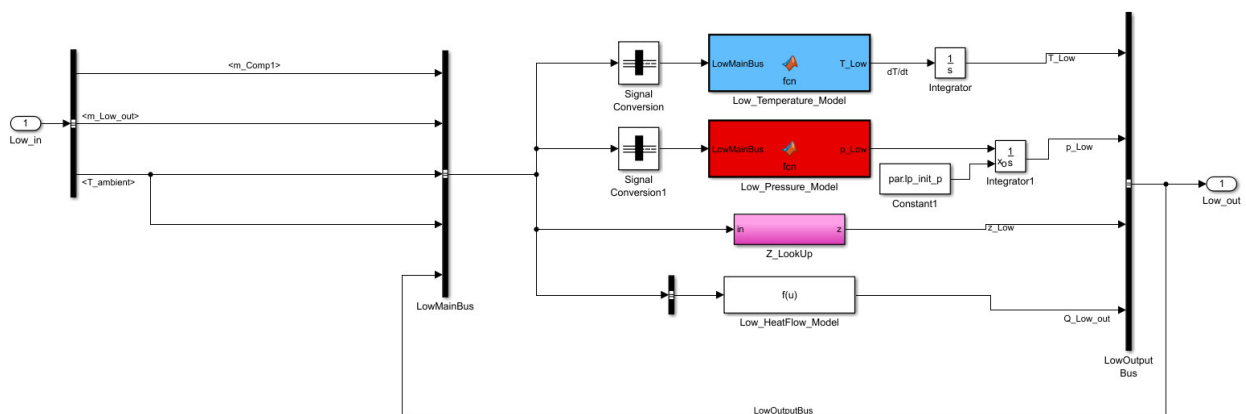


Abb. 4 Matlab Simulink Modelloberfläche für eine Komponente (Endspeicher) des Anlagenmodells

Das Modell ermöglicht grundsätzlich verschiedenste Untersuchungen des Anlagenverhaltens. In der anschließenden beispielhaften Betrachtung liegt der Fokus auf der Suche nach einer preisoptimierten Betriebsstrategie für die Anlage. Die folgenden Eingabeparameter wurden vordefiniert:

- Strom Spothandelspreis (SWISSIX EPEX Spot-Stundenpreise 2015, erste 20 Tage im Januar)
- Bedarf an der Tankstelle (Skalierung des gemessenen Bedarfs)
- Umgebungstemperatur

In einem ersten Schritt wurde eine einfache Strategie verfolgt, bei der die Anlagenkomponenten nur dann betrieben werden, wenn der Strompreis unter eine bestimmte Preisgrenze fällt.

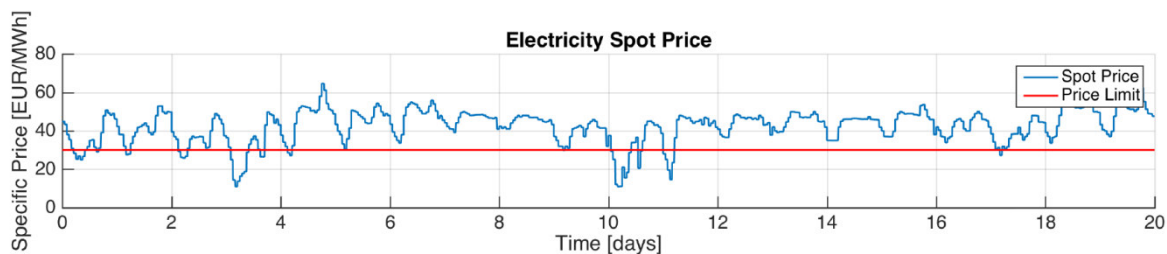


Abb. 5 Strom Spothandelspreis an der SWISSIX EPEX im Januar 2015 (blau) und eine beispielhafte Preisobergrenze von 30 EUR/MWh

Der Wert dieser Preisgrenze wird von den oben genannten Eingangsparametern sowie von den im Modell festgelegten Restriktionen beeinflusst. Eine solche Restriktion stellt z.B. das minimal notwendige Druckniveau der Endspeicher dar. In diesem Fall wird das Druckniveau so gewählt, dass die Speicher immer genügend H₂ enthalten, um mindestens ein Fahrzeug betanken zu können. Bei Verletzung dieser Restriktion werden die Speicher sofort befüllt, auch wenn der aktuelle Strompreis deutlich über dem vordefinierten Grenzwert liegt. Wenn die Preisgrenze zu niedrig angesetzt wird, laufen die Komponenten potenziell auch bei hohen Strompreisen. Das folgende Diagramm zeigt, dass die spezifischen Produktionskosten am niedrigsten waren, als die Preisgrenze in der Größenordnung von 30 EUR/MWh mit den gewählten Eingangsparametern festgelegt wurde. Natürlich wird sich dieser Wert je nach Anlage und Eingangsparameter ändern.

Durch einen differenzierteren Ansatz, der die Festlegung eines festen Preislimits vermeidet, können die spezifischen Kosten weiter gesenkt werden. Dazu wurde ein mathematisches Optimierungsverfahren namens "Dynamic Programming" (DPM-Algorithmus) eingesetzt. Bei dieser Methode werden zunächst Lösungen für die kleinsten Teilprobleme berechnet und dann kombiniert, um die nächst grösseren Probleme zu lösen, bis eine Lösung für das gesamte Optimierungsproblem erreicht ist. Das folgende Diagramm zeigt die spezifischen Kosten beim Betrieb der Anlage nach der Strategie basierend auf dem DPM-Algorithmus (gelb) im Vergleich zu verschiedenen Preislimit-Strategien.

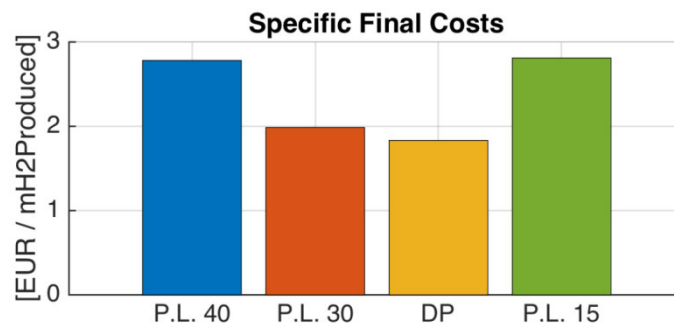


Abb. 6 Spezifische Endkosten pro erzeugte H₂-Masse unter Verwendung unterschiedlicher Betriebsstrategien.

Es ist zu beachten, dass die gezeigten Simulationsergebnisse zur Ermittlung optimaler Betriebsstrategien auf einem bekannten Strompreis für einen bestimmten Zeitraum basieren. Um zu ermitteln, wie eine solche Anlage tatsächlich betrieben werden kann, sind folglich Strompreisprognosen für die kommenden Tage und Wochen von hoher Bedeutung. Je genauer die Prognosen, desto höher ist das Optimierungspotenzial der Betriebsstrategie mit den oben genannten Methoden.

Zusätzliche Bemerkung: Niedrigpreisperioden korrelieren sehr gut mit Perioden mit hohen Anteilen an Elektrizität aus Erneuerbaren Quellen im Stromnetz. Das bedeutet, dass eine wirtschaftlich sinnvolle Betriebsstrategie zwangsläufig auch zu einem in Bezug auf Erneuerbare zeitlich günstigen Strombedarf führt.

Well-to-Tank Analyse

Basierend auf mehreren Messreihen am Elektrolyseur und am Kompressor der Demonstrationsanlage wurden die Energieverluste entlang des Pfades der H₂-Produktion zum Betanken von H₂ mit 35 MPa ermittelt. Die Energieflüsse werden in den untenstehenden Sankey-Diagrammen visualisiert, wobei die Diagramme links und rechts auf dem unteren Heizwert (LHV) bzw. dem höheren Heizwert (HHV) von H₂ basieren. Die unteren Diagramme zeigen die Umwandlungswirkungsgrade für Komponenten, die in kleinen Industrieanlagen mit einer elektrischen Einspeisung im unteren MW-Bereich eingesetzt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit bestehen sowohl Demonstrationsanlage als auch Industrieanlage aus den gleichen Komponenten. Beachten Sie jedoch, dass Anlagen in Industriegrösse möglicherweise kein H₂ vor Ort produzieren, so dass auch Energie für den Transport in Betracht gezogen werden muss.

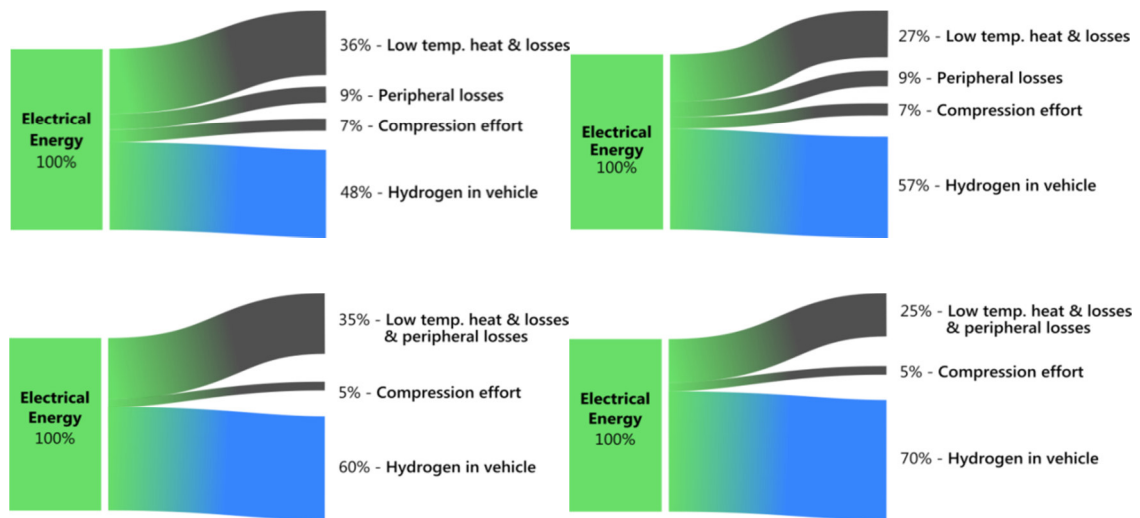


Abb. 7 Well-to-Tank Analyse für die Anlage *move* (bez. auf Heizwert: oben links / bez. auf Brennwert: oben rechts) und eine Industrieanlage (b. a. Heizwert: unten links / b. a. Brennwert: unten rechts)

Die Daten für Industrieanlagen wurden von den Herstellern der jeweiligen Komponenten bereitgestellt und konnten nicht durch eigene Messungen bestätigt werden. Die von diesen Herstellern bislang angegebenen Daten für die Komponenten der Demonstrationsanlage korrelierten jedoch gut mit den eigenen Messungen, so dass die genannten Zahlen als plausibel angesehen werden können.

Der Energieanteil "Niedertemperaturwärme & Verluste" ("Low temp. heat & losses") stellt überwiegend die von den Zellstapeln des Elektrolyseurs erzeugte Wärme dar, die vom Kühlmittel abgeführt wird. Das Temperaturniveau des Kühlmittels am Ausgang des Elektrolyseurs beträgt ca. 55 - 60°C. In der Demonstrationsanlage *move* wird diese Wärme an das Wärmenetz der Empa abgegeben und unterstützt im Winterhalbjahr das bestehende Heizsystem. Für den Elektrolyseur der Anlage *move* werden die nicht den Zellstapel betreffenden Verluste separat als "Periphere Verluste" ("Peripheral losses") dargestellt. Zu diesen Verlusten zählen z.B. der Energieaufwand für Umwälzpumpen, Ventilatoren, Steuergeräte und Gleichrichter. Eine signifikante Menge an Energie wird jedoch für die Trocknung von H₂ benötigt. Bei der Industrieanlage wird der Anteil der Niedertemperaturwärme und der peripheren Verluste in einem Zweig zusammengefasst.

Der Anteil "Kompressionsaufwand" ("Compression effort") zeigt die Energiemenge, die benötigt wird, um H₂ von 0,5 auf 44 MPa zu komprimieren. Damit ist eine Betankung bis zu einem Nenndruck von 35 MPa möglich, was bei H₂-Nutzfahrzeugen Standard ist. Die spezifische Verdichtungsenergie für die industrielle Anlage basiert auf einem ionischen Kompressor.

Es ist zu beachten, dass die in den Sankey-Diagrammen angegebenen Zahlen den Punkt der maximalen Effizienz darstellen, der im Bereich von 30 - 50% der maximalen H₂-Produktion erreicht wird. Bei niedrigeren oder höheren Produktionsraten steigt der Anteil der Verluste. Für den weiten Bereich von ca. 15 - 100% der Produktionskapazität weicht der Umwandlungswirkungsgrad jedoch nur um wenige Prozentpunkte vom Maximalwert ab.

Um die Energieflüsse für die *move* Anlage zu ermitteln, wurde die Stromzufuhr zum Elektrolyseur mit einem Stromzähler gemessen und der H₂-Durchsatz am Auslass des Elektrolyseurs mit einem Coriolis-Sensor erfasst. Da der Gleichrichter und die Trocknungsanlage Teil der Elektrolyseur-Einheit sind, sind neben der für die Kühlung benötigten Energie alle peripheren Verluste in den obigen Zahlen enthalten. Die Kühlwasserversorgung erfolgt beim *move* über das Empa-Kühlnetz. Nach Angaben der Hersteller ist der Kältebedarf jedoch sehr gering und würde die peripheren Verluste nur geringfügig erhöhen.

Der Energieverbrauch des Kompressors wurde ebenfalls mit einem Stromzähler gemessen, während der H₂-Durchsatz anhand von Druckmessungen in den Speichern und der PVT-Methode (Druck, Volumen, Temperatur) ermittelt wurde. Die elektrische Energie, welche pro Energie, die im komprimierten H₂ enthalten ist, benötigt wird, lag bei etwa 24% gegenüber 15%, die vom Hersteller und Projektpartner Atlas Copco gemessen wurden. Eine Untersuchung des Kompressors ergab, dass vermutlich interne Leckagen zu einer Verringerung des Durchsatzes führten, was den erhöhten spezifischen Energieverbrauch zur Folge hatte. Atlas Copco sammelt noch Erfahrungen mit dem praktischen Betrieb des H₂-Kompressors und kann die Demonstrationsanlage *move* auf diese Weise als Plattform zur Produktverbesserung nutzen. Für die Diagramme und die obige Tabelle wurden die vom Hersteller gemessenen Werte eingefügt, da diese mit einem ordnungsgemäss arbeitenden Kompressor erreicht werden können.

Die Umwandlungswirkungsgrade der einzelnen Komponenten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

<i>Elektrolyseur (inkl. periphere Verluste und H₂-Aufbereitung) Typ: PEM</i>	<i>Wirkungsgrad bez. auf Heizwert [%]</i>	<i>Wirkungsgrad bez. auf Brennwert [%]</i>
Demo Anlage <i>move</i> (gemessen, bestätigt)	52	61
Kleinere industrielle Anlage	63	74

<i>Verdichter Eingangsdruck: 0.5 MPa Ausgangsdruck: 44.0 MPa</i>	<i>Eingesetzte elektr. Energie pro Energieinhalt im verdichteten H₂ (b.a. Heizwert) [%]</i>	<i>Eingesetzte elektr. Energie pro Energieinhalt im verdichteten H₂ (b.a. Brennwert) [%]</i>
Demo Anlage <i>move</i> (gemessen, nicht bestätigt) (4-stufiger Kolbenverdichter)	15	13
Kleinere industrielle Anlage (Ionischer Verdichter [Linde])	8	7

Tab. 1 Elektrolyseurwirkungsgrad (oben) und normierter Energieverbrauch von den Kompressoren (unten)

Dynamik des Elektrolyseurs

Der an der Empa eingesetzte Elektrolyseur verfügt über zwei Arten von Stand-by-Modi, die sich vor allem in der Leistungsaufnahme und im Laständerungsvermögen unterscheiden. Im "Leerlaufmodus" wird Strom an die Zellstapel angelegt, während im "Abschaltmodus" nur wenige Peripheriegeräte und die Steuerung laufen. Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme sowie den austretenden H₂-Massenstrom. Der Elektrolyseur wurde aus dem "Abschaltmodus" gestartet, wobei alle internen Komponenten eine Umgebungstemperatur von 17°C aufwiesen.

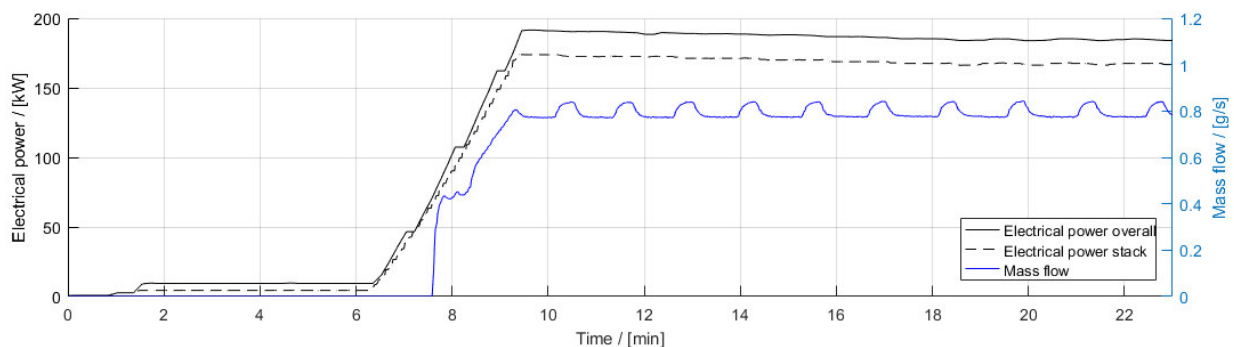


Abb. 8 Verlauf der Gesamtleistung und der Leistung am Zellstapel sowie des H₂-Massenstroms beim Start des Elektrolyseurs aus dem 'Abschaltmodus'.

Nach dem Start des Elektrolyseurs bei $t = 0$ min werden vorprogrammierten Tests durchgeführt und die Kühlmittelumwälzpumpe läuft an. Bei ca. 1.5 min wird Strom an die Zellstapel angelegt und H₂ wird bei sehr geringer Rate erzeugt. Da die Reinheit des produzierten H₂ während dieser Anlaufphase nicht den vorgegebenen Spezifikationen entspricht, wird es durch die Entlüftung über mehrere Minuten an die Atmosphäre abgegeben. Nach ca. 6.5 min wird der Strom, der auf die Stacks wirkt, nach einer vordefinierten Rampenkurve erhöht und ein Druck von bis zu 3 MPa aufgebaut. Ab ca. 7.5 min wird ein H₂ Massenstrom am Ausgang des Elektrolyseurs detektiert, welchem nach ca. 9 min auf den Volllastwert ansteigt.

Es ist zu beachten, dass die Gesamtleistung (durchgezogene Linie) und die Leistungsaufnahme der Zellstapel (gestrichelte Linie) nach Erreichen der Volllast während 9 Minuten (von 9 bis 18 Minuten) um 7 kW leicht abnehmen. Mit steigender Zellstapeltemperatur verbessert sich die Reaktionskinetik und der Umwandlungswirkungsgrad steigt um einige Prozentpunkte, was zu einem geringeren Energiebedarf führt. Beim H₂-Massenstrom ist ein periodischer Anstieg zu beobachten, der durch die Regeneration der Trocknungseinheit hervorgerufen wird.

Wenn der Elektrolyseur nicht vollständig ausgeschaltet ist, sondern in den "Leerlaufmodus" versetzt wird, kann der Volllastbetrieb wesentlich schneller erreicht werden. Die Messungen für das folgende Diagramm wurden aufgezeichnet, nachdem der Elektrolyseur seine Betriebstemperatur erreicht hatte. Durch Schliessen eines Handventils am Auslass wurde der Elektrolyseur in den "Leerlaufmodus" versetzt. Bei $t = 5$ s wurde das Ventil schlagartig geöffnet und der Zellstapelstrom steigt innerhalb von weniger als 2 s auf den Volllastwert. Da die Auflösung der Massendurchflussmessung nicht höher als bei etwa 0.7 Hz eingestellt werden kann,

werden die Werte mit Markierungen anstelle von Kurven visualisiert. Der Massenstrom überschwingt nach dem Öffnen des Ventils, da sich vor dem Schliessen des Ventils Druck aufgebaut hat. Anschliessend sinkt er auf den bei Volllastunter stationären Bedingungen gemessenen Wert ab.

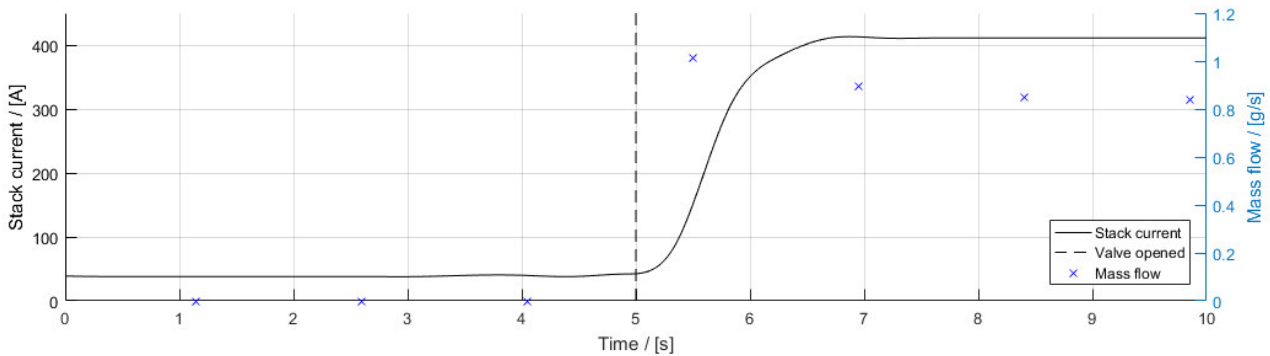


Abb. 9 Verlauf des Zellstapelstroms und des H₂-Massenstroms beim Wechsel von Leerlauf auf Volllast durch Betätigung eines Handventils am Ausgang des Elektrolyseurs

Da die dargestellte Laständerung durch Betätigung eines Ventils am Ausgang erzeugt wurde, ist sie nur repräsentativ für speicherdruckinduzierte Laständerungen. Eine Laständerung kann aber auch durch eine Änderung des Eingangsstroms des Elektrolyseurs herbeigeführt werden, was mit den aktuellen Installationen im *move* nicht möglich ist. Es ist zu erwarten, dass die durch Änderungen am Eingangsstrom induzierten Lastwechsel deutlich schneller erfolgen, so dass ein Lastwechsel von Leerlauf auf Volllast innerhalb von Zehntelsekunden möglich ist.

Änderungen zu oder unter dazwischenliegenden Lasten werden naturgemäss noch schneller erreicht. Messungen zu negativen Laständerungen (z.B. von Volllast auf Leerlauf) zeigten ein sehr ähnliches zeitliches Verhalten. Wenn der Elektrolyseur vollständig abgeschaltet werden soll, dauert dies ca. 2 min. Wird er unmittelbar nach dem Abschalten aus dem "Abschaltmodus" gestartet, so ist die Volllast nach ca. 6 min statt der oben genannten 9 min erreicht.

Die folgende Tabelle fasst die Leistungsaufnahme und die Laständerungsfähigkeit für die beschriebenen Stand-by-Modi zusammen. Wenn die Umgebungstemperatur unter 5°C sinkt, werden innerhalb des Elektrolyseurgehäuses elektrische Heizgeräte gestartet, um Frostbedingungen zu vermeiden, welche die Stacks beschädigen könnten. Diese Heizungen nehmen maximal 2,1 kW elektrische Leistung auf.

Stand-by Modus	Leistungsaufnahme [kW]	Zeit bis Volllast [s] (Elektrolyseur bei Umgebungstemp.)	Zeit bis Volllast [s] (Elektrolyseur bei Betriebstemp.)
Abgeschaltet	0.7 (+2.1)	540	360
Leerlauf	13	-	2 bzw. Sekundenbruchteile

Tab. 2 Leistungsaufnahme und Lastwechselfähigkeit für die Stand-by-Modi

Technologietransfer

- 13.05.14 Expertengespräche „Applied Power-to-Gas“ an der HSR in Rapperswil
Mündliche Präsentation zur Demonstrationsanlage *move* und Vorstellung der
Projektaktivitäten.
- 25.02.15 Veranstaltung “Power-to-Gas in der Mobilität” an der Empa
Inklusive Präsentation und Führung durch die Demonstrationsanlage *move* und
Vorstellung der Projektaktivitäten.
- 18.06.15 POSTER: “Parlamentarieranlass” vor dem Bundeshaus in Bern
- 03.07.15 European Fuel Cell Forum EFCF in Luzern
Mündliche Präsentation zur Demonstrationsanlage *move* und Vorstellung der
Projektaktivitäten.
- 25.08.15 Veranstaltung “Energiewende – smart und innovativ” von Ökostrom Schweiz an der Empa
Mündliche Präsentation zur Demonstrationsanlage *move* und Vorstellung der
Projektaktivitäten.
- 26.08.15 POSTER: “2nd annual SCCER mobility conference” an der ETHZ
- 28.10.15 Gasmobil Symposium an der Empa Dübendorf
Mündliche Präsentation über Power-to-Gas und zur Demonstrationsanlage *move*: “CO2-
neutral dank Power-to-Gas”
- 19.11.15 Werkleiterseminar Gasversorgungsunternehmen in Brunnen
Mündliche Präsentation über Power-to-Gas und zur Demonstrationsanlage *move*: “CO2-
neutral dank Power-to-Gas”
- 23.11.15 Offizielle Einweihung der Demonstrationsanlage *move*
Die Einweihung wurde von Brigitte Buchmann (Leiterin des Departements Mobilität,
Energie und Umwelt und Mitglied der Empa-Direktion), Gian-Luca Bona (Direktor der
Empa), Walter Steinmann (Direktor des Bundesamtes für Energie BFE), Lothar Ziörjen
(Oberbürgermeister der Energiestadt Dübendorf), Hans Magits (Chief Technical Officer
beim Kompressorhersteller AtlasCopco) und Konstantinos Boulouchos (Prof. am Institut
für Energietechnik der ETH Zürich) geleitet.

Anschliessend wurden den anwesenden Energie- und Mobilitätsexperten die Demonstrationsanlage, die
zugehörige Tankstelle und verschiedene Projektfahrzeuge vorgeführt.

<https://www.empa.ch/de/web/s604/move-inauguration>



Einweihung der Anlage *move* einschliesslich einer Demonstration der Wasserstoffbetankung.

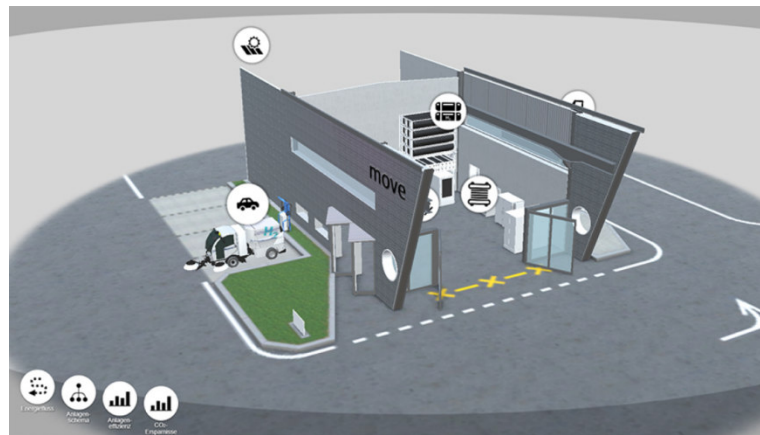
Seit Ende 2015 ist die *move*-Webseite aktiv:

<https://www.empa.ch/web/move>

- 26.01.16 Veranstaltung "Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen" an der Empa
Inklusive Präsentation und Führung durch die Demonstrationsanlage *move* und
Vorstellung der Aktivitäten im RENERG²-Projekt.
- 18.08.16 Tag der offenen Tür an der Empa St.Gallen. Mehrtägige Postersession
Vorstellung der Demonstrationsanlage *move* und der Aktivitäten im RENERG²-Projekt
- 15./16.09.16 2-tägige Konferenz: 11. Tagung Gasfahrzeuge | Gasantriebe und Klimaschutzziele: der
richtige Weg! - in Potsdam.
Mündliche Präsentation zur Demonstrationsanlage *move* und den Aktivitäten im
RENERG²-Projekt.
- 26.-30.04.17 Swiss Mobility Days in Martigny
Mündliche Präsentation zur Demonstrationsanlage *move* und Vorstellung der
Projektaktivitäten.
- 31.08.17 *move* Visualisierung – Link veröffentlicht

Anhand von 3D-Modellen des Gebäudes und der Anlagenkomponenten wurde ein
Visualisierungstool der Demonstrationsanlage entwickelt. Der Gesamtprozess sowie die
einzelnen Komponenten werden animiert und in kurzen Videosequenzen erklärt.
Spezifikationen der Komponenten sowie ausgewählte Echtzeitdaten stehen ebenfalls zur
Verfügung.

Die Visualisierung kann über einen Touchscreen vor Ort oder über den Link auf der *move*-
Webseite abgerufen werden: <https://www.empa.ch/web/move>



02.10.2017 Einweihung der ‚Erlebnisstation‘, die für den ‚Umweltveloweg‘ realisiert wurde.

Die Erlebnisstation enthält im Wesentlichen ein grosses Buch, das die im *move*-Projekt untersuchten Mobilitätskonzepte auf einfache Weise erklärt. Es wurde geschaffen, um Kinder und Familien anzusprechen. Der *move*- Visualisierungsbildschirm befindet sich direkt neben der ‚Erlebnisstation‘ vor der *move* Demonstrationsanlage.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde die Demonstrationsanlage von vielen Experten, insbesondere aus der Energie- und Mobilitätsbranche, besucht. Die Anlage wurde auch anderen Interessenten, wie z.B. Personen aus Politik oder Behörden, vorgestellt.