

## Statusbericht

29. Juli 2017

### KIT Busshuttle-Service auf Basis von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Bussen und einer Wasserstofftankstelle

Thomas Jordan<sup>1)</sup> und Anke Vesper<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institut für Kern- und Energietechnik IKET H2, KIT

<sup>2)</sup>Pro-Science GmbH

(Optionaler Hinweis)

**Bitte beachten Sie:**

Dieser interne Bericht enthält Informationen von vorläufigem Charakter und ist ausschließlich für den internen Gebrauch bestimmt.

**Kindly note:**

This internal report contains information of preliminary character and is intended for internal use exclusively.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Historie .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Projektpartner und Aufgaben .....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Planung und Aufbau.....</b>	<b>12</b>
4.1	Planung und Beschaffung der Busse.....	12
4.1.1	Planung bezüglich der Busse.....	12
4.1.2	Beschreibung der beschafften Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybrid-Busse .....	12
4.2	Aufbau und Inbetriebnahme der Tankstelle .....	14
4.2.1	Planung der Tankstelle .....	14
4.2.2	Ausschreibung, Werkvertrag und Aufbau der Tankstelle ..	15
4.2.3	Beschreibung der beschafften Tankstelle .....	15
4.3	Probleme beim Aufbau der Tankstelle bis zur Inbetriebnahme	19
4.4	Probleme fahrzeugseitig bis zur Inbetriebnahme .....	23
<b>5</b>	<b>Betrieb .....</b>	<b>24</b>
5.1	Nomineller Betrieb .....	24
5.2	Betriebsdaten.....	25
5.2.1	Passagiere .....	25
5.2.2	Fahrleistungen .....	25
5.2.3	Spezifischer Verbrauch der Busse.....	26
5.2.4	Verfügbarkeiten.....	27
5.2.5	Energieverbrauch an der Tankstelle .....	30
5.2.6	Wartungsaufwand für Busse und Tankstelle.....	30
5.2.7	Besondere Einsätze .....	32
<b>6</b>	<b>Probleme im Betrieb.....</b>	<b>34</b>
6.1	Betriebliche Probleme mit der Tankstelle.....	34
6.2	Betriebliche Probleme mit den Fahrzeugen .....	38
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>42</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1 Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen-Hybridbusse und die Wasserstofftankstelle am KIT.....</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf von Antragsstellung bis Bau und Eröffnung des Betriebs der H2-Tankstelle.....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 3: Darstellung der komplexen Projektstruktur über der Wertschöpfungskette. ....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Wasserstoff-Brennstoffzellen Hybrid Busses beim Auflastbetrieb („Fahren mit FC“, oben) und bei Rekuperation („Bremsen“, unten), Quelle Daimler. ....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 5: Foto eines Wasserstoff-Brennstoffzellen Hybrid-Busses vor dem Wasserstoffversuchszentrum am KIT Campus Nord .....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 6: Foto der Gesamtansicht der Tankstelle am KIT Campus Nord... </i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 7: Zapfsäule mit Blick auf den 700 bar-Zapfpunkt.....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 8: Funktionsprinzip und Aufbau der Tankstelle .....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 9: Spezielle Einrichtung zum Abblasen der 30kg H2 aus den Fahrzeugspeichern .....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 10: Behelfstankanlage entliehen von Postauto Schweiz im Dezember 2012 .....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 11: Betankung eines Busses an der Behelfstankanlage .....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 12: Streckenverlauf des KIT Bus-Shuttles.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 13: Fahrplan des KIT Bus-Shuttles (Status: 10.05.2017), siehe <a href="https://www.kit.edu/downloads/Fahrplan_Shuttle.pdf">https://www.kit.edu/downloads/Fahrplan_Shuttle.pdf</a>.....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 14: Spezifischer Verbrauch der Busse .....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 15: Verfügbarkeit des KIT Shuttle Busses mit dem Kennzeichen ... 1064. ....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 16: Verfügbarkeit des KIT Shuttle Busses mit dem Kennzeichen ... 1068 .....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 17: Verfügbarkeit der KIT Wasserstofftankstelle. ....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 18: Der Wasserstoffbus KA-IT 1068 auf der Hannover-Messe im April 2012. ....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 19: Wasserstoffbusse beim Betriebsausflug des IKET.....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 20: Lage der Montageöffnungen (weiß) im Containerboden mit Position des Kompressor-Rahmens (dunkelgrau), der Halteschrauben (rot) und der Betonanker (blau). ....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 21: Mit Bitumen-Spachtelmasse versiegelte Betonanker BA-1 bis BA-4. ....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 22: Für die HV-Verschraubung vorbereitete Vorderseite des Kompressors.....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 23: HV-Schraubengarnitur (links) und fertige HV-Schraubverbindung (rechts) mit Futterblech und eingeschweißten Stegblechen zur Versteifung des Rahmens.....</i>	<i>37</i>

<i>Abbildung 24: Links: Bleigewichte vor dem Kompressor und Position von Betonanker BA-4 (auf dem Foto von einem Träger verdeckt). Rechts: Bleigewichte im Bereich von BA-4. ....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 25: Unfall bei der Zufahrt zur Tankstelle.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 26: Einfahrt eines KIT-Shuttlebusse in den Campus Nord des KIT. ....</i>	<i>42</i>

## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Fahrleistungen der KIT Bus-Shuttles von 2013-2016.....	26
Tabelle 2: Verbrauch der elektrischen Energie und Druckluft der Tankstelle...	30
Tabelle 3: Wartungsaufwand für die Tankstelle .....	31

# 1 Einleitung

Dieser Statusbericht beschreibt den Stand des Projekts, bei dem das KIT zwei Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen-Hybridbusse und eine Wasserstoff-tankstelle für den Busshuttle-Service zwischen Campus Nord, Campus Süd und Campus Ost betreibt.



*Abbildung 1 Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen-Hybridbusse und die Wasserstofftankstelle am KIT*

Wasserstoff und Brennstoffzellen werden mittelfristig wichtige Rollen in der Energiewende hin zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft und hin zur Elektrifizierung der Mobilität spielen. Die wichtigsten Herausforderungen, die zur Marktvorbereitung der entsprechenden Technologien adressiert werden müssen, sind die weitere Erhöhung der Lebensdauer, die Verbesserung der Leistungscharakteristik und die Senkung der Herstellungskosten der relevanten Komponenten und Systeme, sowie der Aufbau einer Versorgungsinfrastruktur bestehend aus Speicher und Verteilnetze, für regenerativ produzierten Wasserstoff. Vor allem Letzteres ist Voraussetzung für eine breite Markteinführung und für einen effizienten, für den Nutzer akzeptablen Betrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen im Alltag.

Durch seine universelle Herstell- und Nutzungsmöglichkeiten können die verschiedenen Energiesektoren mittels Wasserstoff gut verbunden werden. So hat Wasserstoff als effizient über Elektrolyse herstellbarer chemischer Energiespeicher ein hohes Potenzial erneuerbare Energie in den Mobilitätssektor zu bringen und so die nationalen Einsparziele bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen auch in diesem Bereich zu erreichen. Der Wasserstoff bietet höchste gravimetrische Energiedichte und die Brennstoffzellen gewährleisten dabei sehr hohe Wandlungseffizienz selbst bei kleinen Baugrößen, was Elektromobilität mit den üblichen Reichweiten und Betankungszeiten bei gewohntem Komfort erlaubt.

Auf diesem Hintergrund ist das KIT bestrebt, diese Technologie weiter zu entwickeln. Mit dem Busshuttle-Service sollte eine entsprechende Systemlösung technisch und wirtschaftlich validiert und demonstriert werden. Gleichzeitig sollte das System als Forschungs-, Entwicklungs- und Ausbildungsinfrastruktur für neue Wasserstofftechnologien genutzt werden und als zusätzlicher Versorgungspunkt für den alternativen Kraftstoff Wasserstoff in der Region Nordbaden dienen.

Die Wasserstoffbusse müssen für den Shuttle-Dienst nominell relativ hohe Laufleistungen (bis 70000 km pro Jahr) erbringen. Dies kann im Vergleich mit ähnlich gelagerten Demonstrationsprojekten wie NABUZ oder CHIC als „Stress-Test“ für die eingesetzte Technologie verstanden werden. Diese intensive Nutzung der Fahrzeuge ist nur bei einer nahezu durchgängigen Verfügbarkeit der Betankungsinfrastruktur und der Fahrzeuge möglich. Die tatsächlichen Verfügbarkeiten, Effizienzen, CO<sub>2</sub>-Einsparungen und betrieblichen Kosten wurden und werden erhoben und denen konventioneller, vergleichbarer Lösungen gegenübergestellt. Eventuelle Schwachstellen oder betriebliche Probleme seitens der Tankstellentechnologie, der Brennstoffzellen-betriebenen Fahrzeuge und insbesondere der entsprechenden Schnittstellen wurden identifiziert und in enger Zusammenarbeit mit den involvierten Parteien meistens sehr schnell behoben.

Dabei kann das KIT auf einzigartige Forschungsinfrastrukturen für Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologie direkt zugreifen, was es klar von den anderen prototypischen Betreibern von Tankstellen oder Busflotten unterscheidet. Im praktischen Ablauf blieb dieser Vorteil bisher ungenutzt, was vielleicht den doch sehr unterschiedlichen Interessen aller involvierter Parteien zuzuschreiben ist. Der intensive Betrieb generiert dennoch wertvolle, weil hochgradig praxisrelevante Erfahrungen, welche allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden und welche die weitere Verbesserung der Technologien beschleunigen sollen. So stellt das KIT die wesentlichen Daten der zentralen Erhebungsstelle der CEP kostenfrei zur Verfügung. Bei allen anderen, zusätzlich über die Laufzeit geförderten Projekten ist diese Berichterstattung obligatorisch.

Im Vergleich zu den anderen Brennstoffzellen-Busprojekten hat sich die Projektpartnerstruktur hier als sehr komplex und daher oft als hinderlich erwiesen. Die Tankstelle wird vom KIT primär ohne direktes kommerzielles Interesse betrieben. Die Busse sind zwar Eigentum des KIT dürfen aber nur vom KVV gefahren werden. Die Wartung findet auf drei Ebenen statt. Im europäischen CHIC Projekt zum Beispiel, werden die Busse durch Verkehrsunternehmen betrieben und die Wartung der Busse findet typisch sehr nahe beim Betreiber statt. Die auch bezüglich der Kommunikation komplexe Konstellation war beim Projekt am KIT nur durch den Einsatz einer dedizierten Projektleitung beherrschbar.

Parallel zu den mehr technisch orientierten Zielsetzungen sollen im Rahmen des Projekts jedoch auch Fragen bezüglich der Akzeptanz bearbeitet werden. Der durch den Karlsruher Verkehrsverbund KVV im Unterauftrag für das KIT als öffentliche Linie betriebene Wasserstoff-Busshuttle-Service bewirkt eine hohe Präsenz dieser Technologie bei den Mitarbeitern, den Studenten und Gästen des KIT und in der Öffentlichkeit allgemein. Durch diese Sichtbarkeit und besonders durch die direkte „Erfahrbarkeit“ werden die Wahrnehmung und die Akzeptanz dieser innovativen Technologien in breiten Teilen der Bevölkerung positiv fördern.

Über wiederholte Befragung der verschiedenen beteiligten Gruppen soll ermittelt werden, wie die Demonstration wahrgenommen wird und welchen Einfluss sie auf die Haltung der Öffentlichkeit hat. Durch die hohe Anzahl an Nutzern - mit etwa 70000 KIT-Shuttle-Fahrgästen pro Jahr - wird nicht nur die Sichtbarkeit der Technologie, sondern auch die Repräsentanz solcher Befragungen gefördert.

Der vorliegende Bericht stellt einen Zwischenstatus dar, da gegenwärtig der Betrieb um zwei weitere Jahre, bis Mitte 2019, verlängert werden soll. Im folgenden Kapitel 2 wird zunächst die Historie beschrieben, die zu dem Projekt geführt hat. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die involvierten Partner beziehungsweise Zulieferer. In Kapitel 4 werden die Erfahrungen aus der Planungsphase und aus dem Aufbau der Tankstelle wiedergegeben. Darauf folgt das zentrale Kapitel 5 mit den eigentlichen betrieblichen Erfahrungen. Im Anschluss, in Kapitel 6, werden besondere Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme und außergewöhnliche Umstände, wie zum Beispiel Störungen, beschrieben. Kapitel 7 enthält die Zusammenfassung und ein Ausblick.



## 2 Historie

Auf Initiative und mit finanzieller Unterstützung des Umweltministeriums Baden-Württemberg (UM) entschloss sich im Spätjahr 2009 das Präsidium des KIT, eine Wasserstofftankstelle als wesentliches Element der „Tankstelle der Zukunft“ zu errichten. In einem ersten Gespräch mit Vertretern des UM wurde die Absicht des Landes bekundet, sich stärker für den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und gegebenenfalls auch für entsprechende Fahrzeuge einzusetzen.

Wesentliche Aspekte der zu errichtenden Anlage sollten ein möglichst offener Zugang sowie eine starke Nutzung sein. Eine Kombination der KIT Tankstelle mit dem Betrieb von Brennstoffzellenbussen, welche die konventionellen Diesel-Busse der KIT-Shuttle-Linie ersetzen sollten, erschien vielversprechend. Das Konzept für ein solches Projekt wurde zunächst gemeinsam mit der Energie Baden-Württemberg AG (EnBW) ausgearbeitet. Das zweiphasige Konzept bestand aus einer initialen Phase für die Beschaffung, den Aufbau und die Inbetriebnahme, und der darauf folgenden betrieblichen Phase, begleitet von Studien zu den potenziellen Produktionspfaden von Wasserstoff – unter Berücksichtigung der regionalen Gegebenheiten – sowie der Anwendung und der Skalierung von entsprechenden Technologien, die am KIT untersucht und weiterentwickelt werden. Insbesondere die großskalige Produktion von Wasserstoff aus Biomasse (bioliq® und VERENA) und die Hochdruckelektrolyse sollten näher untersucht werden (siehe Ausblick).

Parallel wurde eine erste Kostenschätzung erstellt und der Eigenanteil der Finanzierung durch Beschluss des Aufsichtsrats des KIT gesichert.

Das UM forderte das Verfassen und Unterzeichnen einer Absichtserklärung (LOI) der wesentlichen Parteien und die Einreichung eines Förderantrages noch im Jahr 2010. Die EnBW hatte zwischenzeitlich entschieden, sich am Projekt nicht zu beteiligen, sondern die für Industrieunternehmen etwas attraktiveren Förderbedingungen aus dem nationalen Programm NIP in Anspruch zu nehmen. Der LOI wurde im November von KIT, UM, EvoBus GmbH (EvoBus) und Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) unterschrieben. Der Förderantrag wurde am 17.12.2010 beim UM eingereicht. Die Förderzusage erfolgte zum 23.12.2010, so dass die im Folgenden beschriebene Planung beginnen konnte.

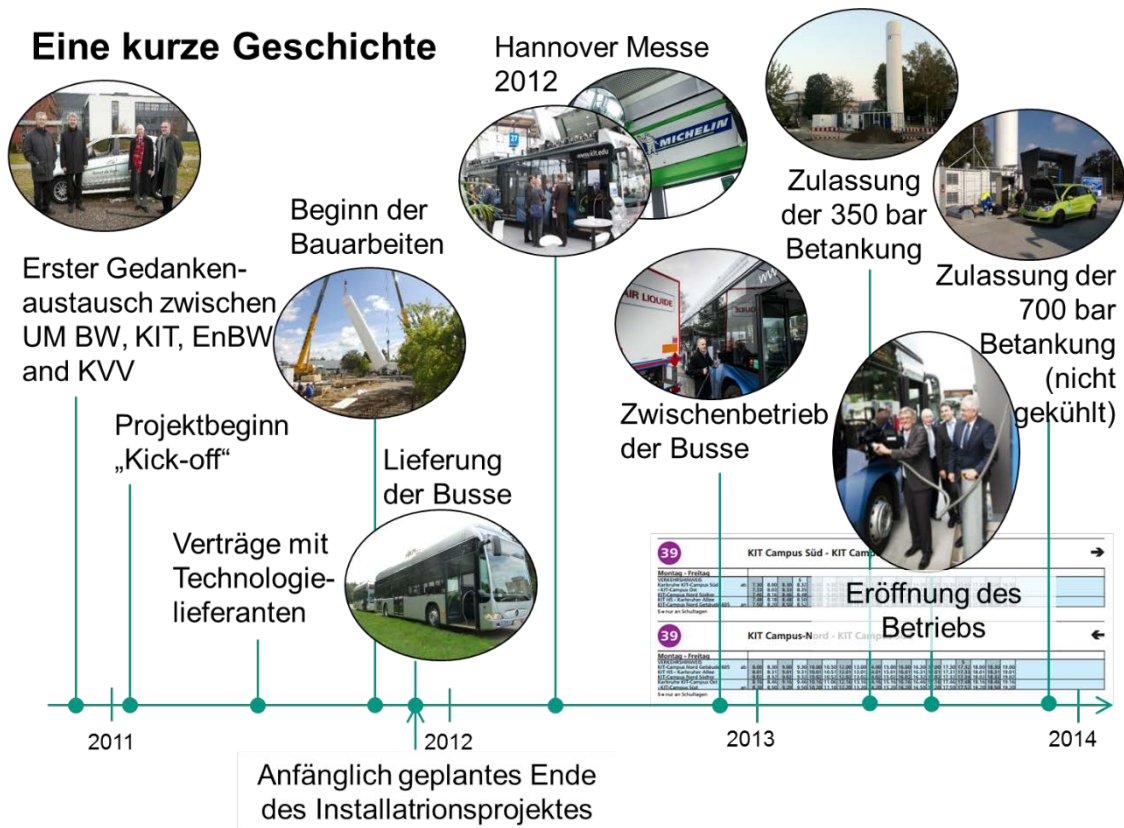


Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf von Antragsstellung bis Bau und Eröffnung des Betriebs der H<sub>2</sub>-Tankstelle

### 3 Projektpartner und Aufgaben

Es wurde ein Projektteam am KIT gebildet. Als Projektleiter wurde vom Präsidium Herr Dr.-Ing. Thomas Jordan, Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) benannt. Dem Kernteam für das Projekt gehörten im Wesentlichen Vertreter aus den Dienstleistungseinheiten Projektmanagement und Qualitätssicherung (PMQ), Einkauf, Verkauf und Materialwirtschaft (EVM) sowie Bau- und Projektmanagement (TID-BPM) an. Bei Bedarf wurde dieses Kernteam um weitere Vertreter z.B. aus den Dienstleistungseinheiten Finanzmanagement (FIMA), Rechtsangelegenheiten (RECHT), KIT-Sicherheitsmanagement, Presse, Kommunikation und Marketing (PKM), der Werksfeuerwehr sowie sporadisch auch aus anderen technischen Instituten erweitert.

Das Projektteam veranstaltete regelmäßige Projekt-Meetings, um die große Zahl an involvierten Personen auf dem Laufenden zu halten und notwendige Informationen und Entscheidungen einzufordern. Der technische Projektleiter informierte darüber hinaus alle am Projekt Beteiligten durch regelmäßige E-Mails.

Neben den internen Treffen wurden bei Bedarf dezidierte Treffen mit den weiteren externen Beteiligten (Lieferanten, VBK, TÜV, Behörde, etc...) durchgeführt. Eine frühe Information des TÜV sowie des Regierungspräsidium war aus den Erfahrungen anderer Projekte heraus geboten und stellte sich insgesamt als förderlich heraus.

Mit der Inbetriebnahme erweiterte sich der Kreis der Projektbeteiligten im Wesentlichen um die Technologielieferanten für Busse und Tankstelle, deren Zulieferer und Service-Unternehmen (z.B. LITEC, Brusa...etc.) hinzu. Zusätzlich beauftragte KIT die Pro-Science GmbH als Kümmerer für die Tankstelle und Koordinator für die betriebliche Phase.

Mit den Fahrern, Ausbildern und Fahrgästen ist die komplette Wertschöpfungskette für ein solches Transportsystem abgebildet (siehe Abbildung 3)

### Komplexe Projektstruktur

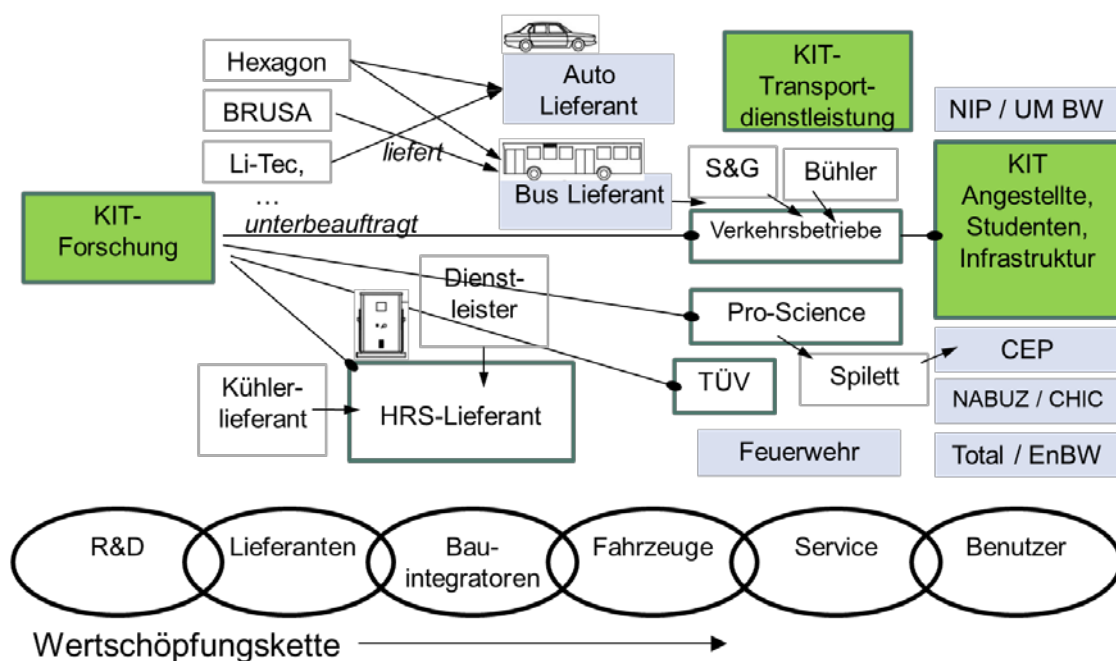


Abbildung 3: Darstellung der komplexen Projektstruktur über der Wertschöpfungskette.

## 4 Planung und Aufbau

### 4.1 Planung und Beschaffung der Busse

#### 4.1.1 *Planung bezüglich der Busse*

Da der zu erwartende Beschaffungswert für die beiden Wasserstoff-Busse über 193.000 € lag und als Lieferanten mehrere Bieter (z.B. Advanced Public Transport Systems BV (APTS), Van Hool oder EvoBus) in Frage kamen, wurde ein europaweites, offenes Vergabeverfahren eingeleitet.

Im Rahmen der technischen Spezifikation sollten die Brennstoffzellen-Busse dem 12m City-Bus-Standard entsprechen und zumindest aus einer Kleinserie stammen, d.h. eine Entwicklungsreife weit über einem Prototyp-Status aufweisen, eine generelle europäische Zulassung haben, für ca. 70.000 km Jahresleistung geeignet sein, eine zumindest einem Dieselhybrid-Bus gleichwertige Effizienz aufweisen, ein vom KVV spezifiziertes Leitsystem haben und durch den Hersteller umfassend betreut werden.

Da die zeitlichen Vorgaben zur Durchführung des Projektes sehr eng waren – die Mittelverwendung sollte innerhalb einen halben Jahres nach Abschluss des Fördervertrags erfolgen - hätten formale Fehler bei der Ausschreibung das Projekt gefährdet. Genauigkeit sowie die Ausschöpfung der vergaberechtlich möglichen Fristverkürzungen waren deshalb Grundvoraussetzung. Auch wurde darauf verzichtet, für den Fall eines Terminverzuges Konventionalstrafen vorzusehen, um potentielle Anbieter nicht generell von der Abgabe eines Angebotes abzuhalten.

Das einzige Angebot für die Busse wurde schließlich von EvoBus abgegeben. Der Preis lag über den geplanten Kosten. Vor diesem Hintergrund mussten weitere potentielle Einsparungen bei der Realisierung der Tankstelle geprüft werden, ohne dass die Funktionalität der Anlage eingeschränkt würde. Es wurde daher beschlossen, auf die ursprünglich geplante, dem innovativen Charakter der Anlage angemessene Flüssigversorgung –bzw. Speicherung und auf die großzügig ausgelegte Überdachung zu verzichten. Dadurch konnten die Mehrkosten bei der Busbeschaffung ausgeglichen werden.

Die Lieferung der Busse erfolgte fristgerecht am 06.10.2011.

#### 4.1.2 *Beschreibung der beschafften Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybrid-Busse*

Die für den Shuttle-Verkehr zwischen Campus Süd, Nord und Ost eingesetzten zwei Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybrid-Busse sind von Evobus (Daimler) hergestellt (Abbildung 1). Diese sind vom Typ Basis Citaro, d.h. 12 m lange Standard-Stadtbusse. Sie verfügen über je zwei 60 kW PEM FC Stacks. Es können

35 kg Wasserstoff bei 350 bar gespeichert werden, was zu einer Reichweite von mindestens 300 km führt (die tatsächlich erzielten Reichweiten sind weit höher). Der Bus wird elektrisch über je zwei Radnabenmotoren auf der Hinterachse angetrieben. Die Motoren werden primär über einen Lithium-Ionen-Akkumulator mit elektrischer Leistung versorgt. Der Akkumulator, auch als Batterie bezeichnet, wird bei Bedarf von den Brennstoffzellen geladen. Mit der Batterie alleine verfügt der Bus nur über ca. 10 km Not-Reserve.

Die Steuerung des Fahrzeugs unterscheidet mindestens die drei Betriebszustände: Fahren mit Brennstoffzelle FC („Floating“), Bremsen inklusive Rekuperation und Beschleunigen.

Die Busse verfügen des Weiteren über Niederflurtechnik, haben eine konventionelle Sitzanordnung und sind voll klimatisiert.

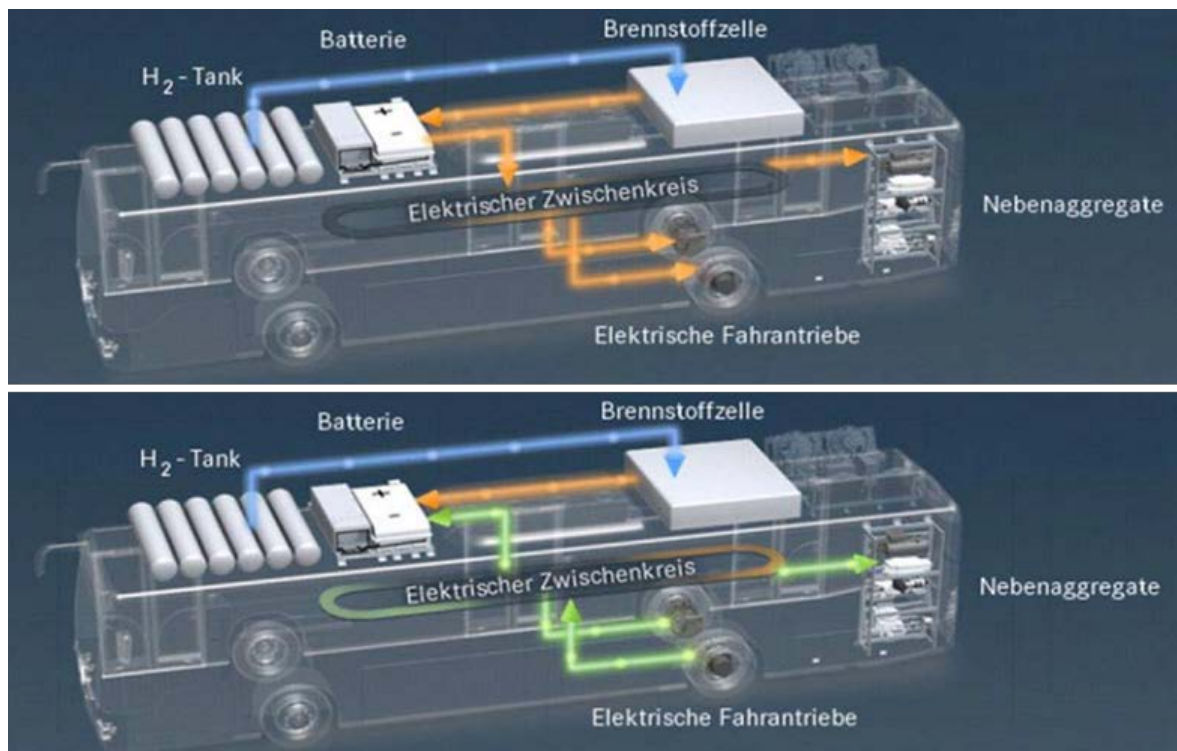


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Wasserstoff-Brennstoffzellen Hybrid Busses beim Auflastbetrieb („Fahren mit FC“, oben) und bei Rekuperation („Bremsen“, unten), Quelle Daimler.



Abbildung 5: Foto eines Wasserstoff-Brennstoffzellen Hybrid-Busses vor dem Wasserstoffversuchszentrum am KIT Campus Nord

Bei der weiteren Festlegung von Ausstattungsdetails, z.B. Lackierung, Sitzbeschaffenheit, Bodenbeläge, etc., hat sich die Absprache mit dem Verkehrsunternehmen, hier VBK/KVV, sehr bewährt.

## 4.2 Aufbau und Inbetriebnahme der Tankstelle

### 4.2.1 Planung der Tankstelle

Um einen marktvorbereitenden Effekt mit der Fördermaßnahme zu erzielen, war ein modulares Konzept bzw. ein prototypischer Aufbau der Anlage gefordert. Die Anlage sollte als Vorlage für ein quasi standardisiertes Produkt dienen. Diese Standardisierung sollte wiederum eine Skalierung in der Produktion von Komponenten bzw. ganzen Betankungsanlagen unterstützen und damit mittelfristig die Kosten reduzieren.

Die Mindestanforderungen an die Tankstelle orientierten sich am Shuttle-Betrieb. Busbetankungen von jeweils bis zu 30 kg sollten in max. 20 Minuten möglich sein, dies entspricht eine Abgabe von ca. 90 kg Wasserstoff pro Tag.

Ein wesentliches Element der Planung der Tankstelle war die Festlegung des Standortes innerhalb des KIT. Zunächst wurde geplant die Tankstelle im Bereich des damals nur in Planung befindlichen EnergyLab aufzustellen. Die Nähe zum JRC ITU und vor allem der verzögerte Rückbau eines Experiments haben diesen Standort jedoch verhindert. So wurde schließlich der Standort nahe zur bestehenden, konventionellen Tankstelle gewählt, da dieser leicht über die Lieferzufahrt zum Betriebsgelände am Campus Nord zu erreichen ist und

infrastrukturell teilweise bereits erschlossen war. Um einen späteren Umzug möglich zu machen sollte die Anlage möglichst Container-basiert aufgebaut sein.

Die offene Zugänglichkeit für zumindest die der Clean Energy Partnership (CEP) zugeordneten Fahrzeuge soll über die CEP Smartcards realisiert werden. Das Vorzeigen der CEP-Karte soll eine freie Zufahrt zur Tankstelle am Campus Nord gewähren. Die Karte funktioniert damit so ähnlich wie ein Tagesbesucher-Ausweis.

#### **4.2.2 Ausschreibung, Werkvertrag und Aufbau der Tankstelle**

Die Ausschreibung der Tankstelle erfolgte national im Rahmen einer beschränkten Ausschreibung nach VOB, da der geschätzte Auftragswert unter 1,0 Mio. Euro lag. Dieses Vergabeverfahren war möglich aufgrund des Erlasses zur Beschleunigung investiver Maßnahmen („Konjunkturpaket II“) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS), welcher vom Land Baden-Württemberg bis zum 31.12.2011 verlängert wurde.

Die folgenden drei Firmen wurden nach interner Abstimmung als geeignet angesehen und wurden zur Angebotsabgabe aufgefordert:

- Linde AG (Linde),
- Air Products GmbH (Air Products) und
- Air Liquide Deutschland GmbH (ALD).

Alle drei Firmen gaben jeweils ein Angebot ab. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbeziehung des Preises für die Errichtung der Tankstelle und der Betriebskosten (Wartung und Wasserstoffverbrauchskosten) war Grundlage zur Auswahl des Lieferanten.

#### **4.2.3 Beschreibung der beschafften Tankstelle**

Die Wasserstofftankstelle am KIT-Campus Nord (Abbildung 6) verfügt über die Möglichkeit einer 350 bar Befüllung für Busse und einer 700 bar Befüllung für PKW's, letztere ist jedoch ungekühlt. Es können wie spezifiziert pro Tag ca. 90 kg Wasserstoff abgegeben werden was den geforderten 3 Busbetankungen und 10 PKW-Betankungen entspricht. Die maximale Dauer einer vollständigen Busbetankung wurde geprüft und beträgt weniger als 20 min. Die Tankstelle verfügt über eine Speicherkapazität von 300 kg Wasserstoff bei 45 bar und 120 kg Wasserstoff bei 450 bar was einer Gesamtmenge von 420 kg Wasserstoff entspricht. Der benötigte Wasserstoff wird mittels Air Liquide Deutschland derzeit von BASF bezogen, wo er als Nebenprodukt anfällt.



Abbildung 6: Foto der Gesamtansicht der Tankstelle am KIT Campus Nord



Abbildung 7: Zapfsäule mit Blick auf den 700 bar-Zapfpunkt



Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau der Tankstelle.

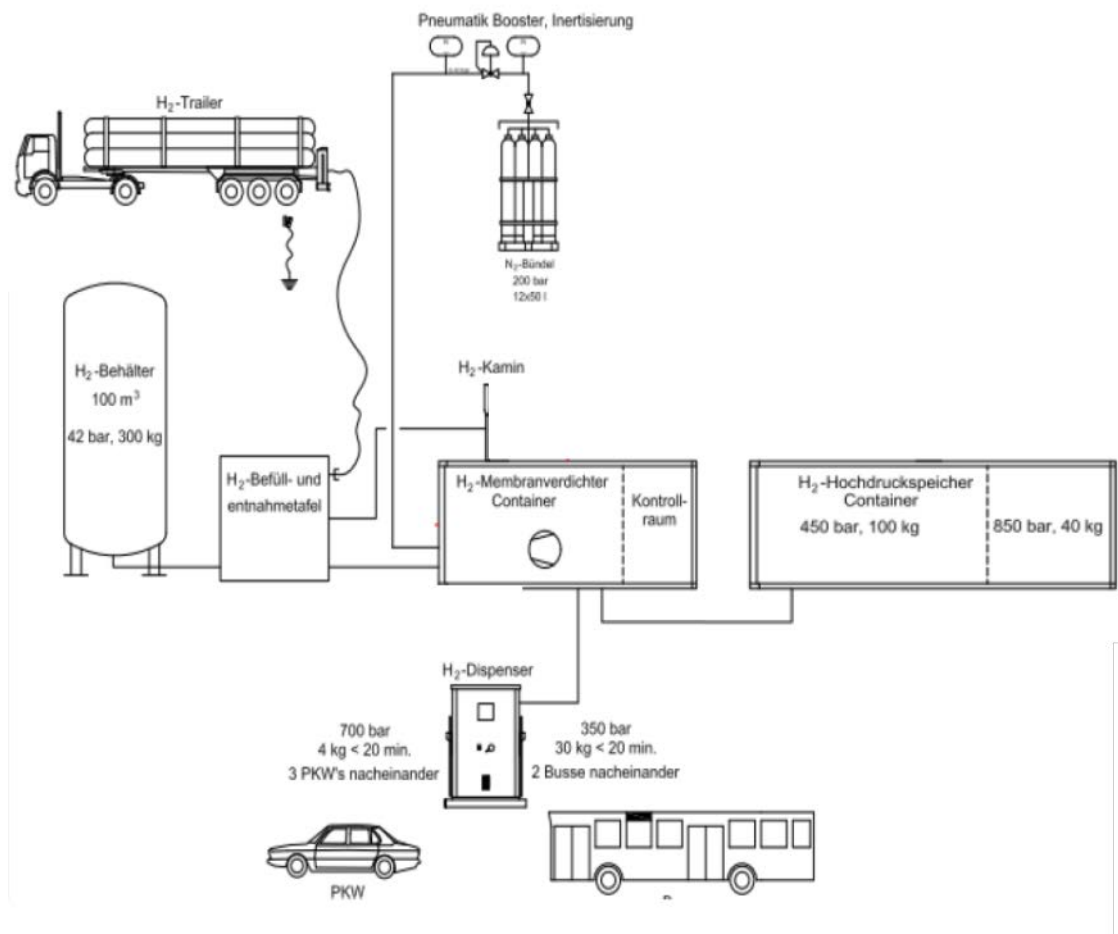


Abbildung 8: Funktionsprinzip und Aufbau der Tankstelle

Die Hauptkomponenten der Tankstelle werden im Folgenden beschrieben:

#### H2-Befüll und Entnahmetafel:

An der Befüll- und Entnahmetafel befinden sich die für die manuell durchgeführte Befüllung der Anlage benötigten Ventile und Anzeigeelemente. Über diese Bedientafel kann der Status der Tankstelle abgelesen werden und die Tankstelle im Notfall in einen sicheren Zustand überführt werden. Beim Befüllvorgang parkt der den Wasserstoff anliefernde Trailerlastzug auf dem dafür vorgesehenen Parkplatz, der mit einer speziellen, statischer Aufladung entgegenwirkenden Asphaltdecke überzogen ist. Zusätzlich muss der Trailer während des Füllvorgangs über ein Erdungskabel geerdet werden.

#### Wasserstoff-Niederdruckbehälter:

Im Wasserstoff-Niederdruckbehälter wird der Großteil des an der Tankstelle vorhandenen Wasserstoffs gelagert. Er hat ein Volumen von 100 m<sup>3</sup> (19 m hoch

und ca. 3 m Durchmesser) und enthält bei einem maximalen Fülldruck von 42 bar rund 300 kg Wasserstoff. Die Lagerung des stehend aufgebauten Zylinders musste der lokalen Erdbebenzone entsprechend ausgeführt werden.

#### Container mit H2 Membran Verdichter:

Im Tankstellencontainer befindet sich ein zweistufiger Membrankompressor der Firma PDC Machines Inc., der für einen H2-Volumenstrom von 80-120 kg pro Tag ausgelegt ist. In der ersten Stufe wird der Wasserstoff dem Niederdruckbehälter entnommene Wasserstoff auf 70 bar vorverdichtet und dann in der zweiten Stufe auf bis zu 450 bar komprimiert.

#### H2-Hochdruckspeicher:

Der H2-Hochdruckspeicher besteht aus drei speziellen, für einen Fülldruck von 450 bar freigegebenen Gasflaschenbündeln zur Aufnahme von ca. insgesamt 120 kg Wasserstoff beim maximalen Fülldruck von 450 bar. Aus diesem Hochdruckspeicher erfolgt die Busbetankung durch einfaches Überströmen von einem höheren in ein niedrigeres Druckniveau.

#### Tanksäule / Dispenser:

Über den Dispenser erfolgt der eigentliche Tankvorgang. Er verfügt über zwei Zapfpunkte, einmal für 350 bar (Busbetankung) und einmal für 700 bar (PKW Betankung). Die Betankung erfolgt Computer gesteuert über ein in den Dispenser integriertes Terminal, über das der Fahrer sich zunächst anmelden und dann das zu betankende Fahrzeug spezifizieren muss. Bei einer Busbetankung werden innerhalb von 20 min. bis zu 30 kg Wasserstoff in den Tank des Busses gefüllt. Der Wasserstoffvorrat im Hochdruckspeicher reicht aus, um 2 Busbetankungen hintereinander ohne zusätzliche Wartezeiten durchführen zu können. Bei einer ebenfalls möglichen PKW-Betankung werden über den 700 bar Zapfpunkt des Dispensers in der selben Zeit jedoch nur 3-5 kg Wasserstoff in den PKW Tank befüllt, da die für eine schnellere 700 bar Betankung notwendige Kühlung (noch) nicht vorhanden ist. Diese ungekühlte Betankung ist nicht SAE konform. Der entsprechende SAE Standard wurde erst nach Vertragsabschluss von der CEP übernommen. Es gibt jedoch eine Ausnahmegenehmigung zur Betankung von Daimler B-Klasse f-cell Fahrzeuge für diese ungekühlte Betankung.

## 4.3 Probleme beim Aufbau der Tankstelle bis zur Inbetriebnahme

Obwohl formal rechtzeitig eingereicht, nahm die Genehmigung viel Zeit in Anspruch, da das Regierungspräsidium zusätzliche Informationen zu der Technologie benötigte, die sich nicht aus den vom Tankstellenlieferanten stammenden Dokumenten ergaben.

Als weiteres Problem hat sich herausgestellt geeignete zu betankende Fahrzeuge für Probetankungen oder für die Abnahme zu organisieren. Ein Tanksimulationssystem, welches von GM in Europa betrieben wurde, war zum relevanten Zeitpunkt nicht mehr verfügbar. Obwohl Unterstützung für die 700 bar Betankungen durch Daimler und emobility-BW bzw. CEP angeboten wurde, war die Koordinierung schwierig, insbesondere wenn schnelle Betankungsfolgen geprobt werden sollten. Dafür sind mehrere geeignete Fahrzeuge notwendig, oder ein schnelles Abblasen des getankten Wasserstoffs, wie es bezüglich der Busbetankungen praktiziert wurde (siehe Abb.9). Bei den Bussen braucht eine vollständige Entleerung über die spezielle Einrichtung ca. 4 Stunden.



Abbildung 9: Spezielle Einrichtung zum Abblasen der 30kg H<sub>2</sub> aus den Fahrzeugspeichern

Die wesentlichen Schwierigkeiten bei Aufbau und Inbetriebnahme der Tankstelle waren durch den Lieferanten veranlasst. Die wichtigsten sind die Nachfolgenden:

- Bei der Anlieferung der Container (Verdichter und Druckbündel) wurde zum ersten Mal klar, dass diese Anlage nicht wie vertraglich vereinbart aus einer laufenden Fertigung aus Frankreich stammt. Die Container kamen per Luftfracht aus den USA. Dies war zusätzlich im Widerspruch zu dem, was beim Bietergespräch ausgesagt wurde. Die Container und die später gelieferte Zapfsäule wiesen Gebrauchsspuren auf.
- Bei dem Gespräch mit TÜV Nord wurde vom TÜV-Mitarbeiter erklärt, dass keine neue CE-Erklärung für eine bereits in Betrieb genommene Anlage bzw. Komponenten gegeben werden kann. Nach unmittelbarer Rücksprache mit dem Tankstellenlieferanten wurde eingeräumt, dass die Anlage in Kanada bereits im Einsatz war. Es wurde erklärt, dass dies lediglich einen Probetrieb darstellte. Dieser „Probetrieb“ hat nach unserer Kenntnis 2009 am Flughafen Toronto stattgefunden. Dies steht im Widerspruch zur angefragten und beauftragten Neuanlage. Eine offizielle Stellungnahme vom Lieferanten zur Historie der Anlage steht trotz mehrmaliger Anmahnung seitens KIT noch aus.
- Der Verdichter wies bzw. weist kein ordnungsgemäßes Typenschild auf. Eine Historie ist wie oben bereits erwähnt nicht nachvollziehbar. Entgegen der Forderung, die Anlage komplett nach deutschen/europäischen Regeln (AD 2000) auszulegen, waren wesentliche Druckkomponenten nach der US-amerikanischen Norm ASME ausgelegt. Aufgrund der unterschiedlichen Sicherheitsphilosophie zwischen ASME und AD 2000 ergab sich die Erfordernis der Nachberechnung der Komponenten oder alternativ deren Austausch. KIT bestand auf den Austausch der Druckbehälter (Hochdruckkühler und Pulsationsdämpfer), der erst in 2013 einwandfrei realisiert wurde.
- Bei den Schweißungen der im Freien verlaufenden Druckrohre gab es wiederholt Probleme. TÜV und Dekra stellten beim Röntgen schwerwiegende Fehler fest und ließen diese Schweißnähte nicht zu. Die Schweißungen mussten mehrfach wiederholt werden. Die Prüfzeugnisse wurden uns erst nach mehrmaligem Anmahnen beim Lieferanten übergeben.
- Der ursprünglich installierte Container für die Druckbündel wies eine unzulässige Durchhängung auf. Es stellte sich heraus, dass der Container keine geeignete Zulassung hatte und der vom Tankstellenlieferanten bereitgestellte Fundamentplan falsch war. Mit dem Tankstellenlieferanten wurde zunächst der Austausch des Containers vereinbart. Schlussendlich wurden die 300bar Druckbehälter durch die bestellten 450bar Behälter getauscht, welche in 3 Bündeln frei aufgestellt wurden. Dies dauerte

mehrere Monate. Der Tankstellenlieferant verwies diesbezüglich auf entsprechend lange Lieferfristen.

- Bei einem Probetrieb in Gegenwart des TÜVs gab es starke Vibrationen des Verdichters und den angeschlossenen Leitungen. Es stellte sich heraus, dass auch die vom Tankstellenlieferanten weitergeleiteten Vorgaben für die Fundamentierung falsch waren. Nach mehrmaliger Anmahnung durch KIT entfernte der Tankstellenlieferant den Container und änderte das Fundament, jedoch ohne klare Konzeption und Nachweise bezüglich der Vibrationsbeherrschung und ohne weitere Absprache in Eigenregie.
- Bei einer Probebetankung kam es zu einem Abriss der Antriebsscheibe des Verdichters. Ein Mitarbeiter des Tankstellenlieferanten musste den Not-Aus auslösen. Bis heute gibt es keine aussagekräftige Dokumentation bzw. QS-Dokumente für die Montage. Stattdessen gab es ingenieurstechnisch nicht haltbare Erklärungen über die Funktion der Schrauben als Sollbruchstellen. Erst nach mehrmaligem Nachhaken seitens KIT hat der Tankstellenlieferant zugegeben, dass bei der Montage vergessen wurde, die Schrauben der Riemenscheibe anzuziehen.
- Bei der Betankung im Rahmen des Leistungstests am 26.01.2012 schaltete die Anlage zunächst wegen einer Fehlfunktion eines Strömungswächters aus. Nach der zweiten Betankung kam es zur Anzeige eines Membranrisses. Der aus den USA eingeflogene Experte von PDC (Hersteller des Kompressors) stellte 3 Tage später fest, dass die Membran nicht defekt war, sondern wegen nicht ausreichend festgezogener Verdichterkopf-Schrauben aus dem Lager gerutscht war. Wiederum war ein Fehlen der Qualitätssicherung (QS) und mangelhafte Montage seitens des Tankstellenlieferanten offensichtlich Ursache für diesen Störfall. Ein weiteres Mal wurde von KIT massiv die Vorlage des QS-Plans gefordert.
- Am 03.02.2012 hat der Flammenwächter einen Fehlalarm ausgelöst. Der Tankstellenlieferant empfahl ohne weitere Diagnose den Flammenwächter trotz einer potentiellen Brandgefahr bei H<sub>2</sub>-gefüllten Druckbehältern über das Wochenende „...mit einem Tuch abzudecken.“. Die KIT Werksfeuerwehr hatte dies als grob fahrlässig bezeichnet. Dem Vorschlag des Tankstellenlieferanten wurde nicht gefolgt.
- Ein vom KIT wegen den Vorfällen zusätzlich hinzugezogener Gutachter empfahl in seinem ersten Bericht vom 07.12.2011 und in seinem folgenden Zwischenbericht vom 11.02.2012, die Anlage wegen sicherheitstechnischer Bedenken nicht in Betrieb zu nehmen. Daraufhin wurde die für den 09.03.2012 vorgesehene Einweihung der Tankstelle erneut verschoben. Bei einer Begehung der Anlage am 01.03.2012 wurden durch den Gutachter weitere Mängel entdeckt. Erst am 10.5.2013 konnte der Gutachter in seinem Endbericht feststellen, dass keine weiteren sicherheitstechnisch relevanten

Mängel an der Anlage bestehen und von daher ein sicherer Betrieb möglich sei.

- Nachdem sich der Tankstellenlieferant zunächst dagegen ausgesprochen hatte, den vertraglich geforderten Kartenleser zu installieren (anstatt dessen wurde zunächst nur ein elektronisches Schloss installiert), erklärte sich der Tankstellenlieferant später im Rahmen der Abnahme bereit, einen CEP-konformen Kartenleser zu installieren. Dies ist dann zeitnah erfolgt.

Die beschriebenen Probleme und die notwendigen sicherheitsrelevanten Nachrüstungen und die sehr schleppend fertig gestellte Dokumentation erforderten ein mehrfaches Verschieben der Inbetriebnahme und der feierlichen Einweihung. Erstmals wurde die Einweihung der Tankstelle vom 09.12.2011 auf den 09.03.2012 verschoben. Auch dieser Termin musste aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten abgesagt werden. Die Einweihung und die Inbetriebnahme fand schließlich am 12.06.2013 statt.

Um gegen Ende 2012 zumindest die Busse offiziell in Betrieb nehmen zu können, wurde von Postauto Schweiz, bzw. Carbagas, eine Behelfsbetankungsanlage ausgeliehen und installiert. Für jeweils 3-4 Betankungen mit ca. 50% Befüllung der Busse musste dann jeweils ein frisch befüllter 200 bar Trailer von Air Liquide geordert werden. Über diese Betankungen konnte kein Linienbetrieb dargestellt werden.



Abbildung 10: Behelfstankanlage entliehen von Postauto Schweiz im Dezember 2012



*Abbildung 11: Betankung eines Busses an der Behelfstankanlage*

Nachdem zwischenzeitlich ein umfangreicher Schriftwechsel mit der Geschäftsführung des Tankstellenlieferanten keinen Fortschritt in der oben geschilderten Thematik gebracht hatte, wurde die Geschäftsleitung der Muttergesellschaft eingeschaltet, um die Umsetzung der ausstehenden Maßnahmen sicherzustellen und damit die Abnahme der Tankstelle zu beschleunigen bzw. überhaupt erst zu ermöglichen. Hierzu wurde zusätzlich aus Vertretern des Tankstellenlieferanten und KIT eine Task-Force gebildet. Selbst auf Geschäftsführungsebene musste mehrfach nachgehakt werden, um die ausstehende Beseitigung der Mängel zu erreichen.

#### 4.4 Probleme fahrzeugseitig bis zur Inbetriebnahme

Nachdem die beiden Busse Anfang Oktober 2011 geliefert wurden, gab es einige Schwierigkeiten, die allerdings von den zuvor beschriebenen Problemen weitgehend überschattet wurden.

Obwohl die Tankstelle noch nicht betriebsbereit war, mussten die Busse zugelassen werden, um nicht wegen einer in 2012 geänderter Europäischer Rechtslage bzgl. der Zulassungsanforderungen vollständig überarbeitet werden zu müssen. Die Busse wurden angemeldet und bei KVV geparkt.

Bei einer kürzeren Testfahrt ist einer der Busse am 18. Juni 2012 auf einer zentralen Kreuzung in Karlsruhe liegen geblieben. Die Ursache war ein Teildefekt der Fahrbatterie. Das Fahrzeug musste abgeschleppt werden, um es in Mannheim bei Evobus zu reparieren. Am gleichen Tag teilte Evobus mit, dass die Busse – entgegen der Spezifikation - nicht für eine Dauerhöchstgeschwindigkeit von 80 km/h zugelassen wären. Es wurde seitens KIT gefordert, diesen Mangel zu beheben. In entsprechenden Maßnahmen wurde der Kühlkreislauf der Radnabenmotoren im Oktober 2012 modifiziert, was schließlich eine Dauerhöchstgeschwindigkeit von 80 km/h ermöglichte.

Zudem mussten beide Busse modifiziert werden um ein Starten bei unter  $-10^{\circ}\text{C}$  zu erlauben. Die Spezifikation forderte  $-18^{\circ}\text{C}$ . Im Spätsommer 2012 mussten dann noch Batteriesteuergeräte, DC/DC-Konverter und Druckmesstechnik getauscht werden. Diese Maßnahmen dauerten wieder jeweils ca. 2 Wochen je Bus.

## 5 Betrieb

### 5.1 Nomineller Betrieb

Die Busse werden für den Betrieb des KIT-Bus-Shuttle-Services eingesetzt. Dieser verbindet den KIT Campus Süd, Campus Ost und Campus Nord (Abbildung 12). Er dient dem Transport der Angestellten und der Studenten des KIT und soll ausschließlich für Dienstfahrten genutzt werden. Der Fahrplan der Bus-Shuttles ist in Abbildung 13 dargestellt. Die ca. 30 km lange Strecke beginnt im Campus Süd und führt über den Campus Ost zum Campus Nord, von wo dann auf direktem Weg wieder zum Campus Süd zurückgefahren wird. Der Bus verkehrt typisch halbstündlich, wobei ein Bus den ganzen Tag, der Zweite aber nur morgens und abends zu den Stoßzeiten eingesetzt wird. Es sind drei Betankungen am Tag vorgesehen, wobei der den ganzen Tag fahrende Bus gegebenenfalls zweimal pro Tag betankt werden muss und der andere maximal einmal.

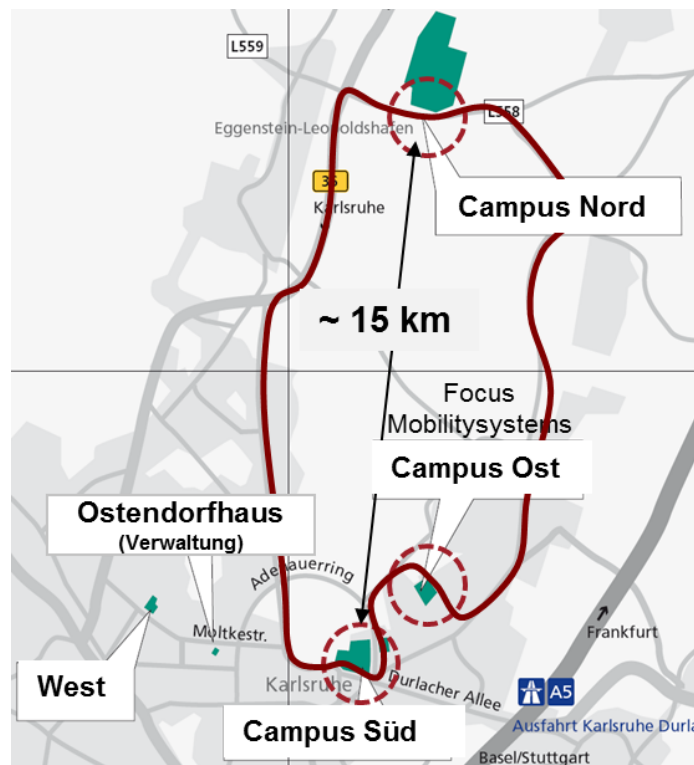


Abbildung 12: Streckenverlauf des KIT Bus-Shuttles



**BUS 39** KIT-Shuttle: Karlsruhe Campus Süd – Karlsruhe Campus Nord

Montag – Freitag																		
VERKEHRSHINWEIS																		
Karlsruhe CS (Uni)	07:30	08:00	08:30	08:32	09:00	09:30	10:00	10:30	11:15	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30
– KIT Campus Ost	07:35	08:05	08:35	08:37	09:05	09:35	10:05	10:35	11:20	12:35	13:35	14:35	15:35	16:35	17:05	17:35	18:05	18:35
KIT-CN Südtor H1	07:50	08:20	08:50	08:52	09:20	09:50	10:20	10:50	11:35	12:50	13:50	14:50	15:50	16:50	17:20	17:50	18:20	18:50
KIT H5 - Weingartener Str.	07:51	08:21	08:51	08:53	09:21	09:51	10:21	10:51	11:36	12:51	13:51	14:51	15:51	16:51	17:21	17:51	18:21	18:51
KIT-CN Gebäude 605 - H6	07:52	08:22	08:52	08:54	09:22	09:52	10:22	10:52	11:37	12:52	13:52	14:52	15:52	16:52	17:22	17:52	18:22	18:52

**BUS 39** KIT-Shuttle: Karlsruhe Campus Nord – Karlsruhe Campus Süd

Montag – Freitag																		
VERKEHRSHINWEIS																		
KIT-CN Gebäude 605 - H6	08:05	08:35	09:05	09:35	10:05	10:53	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	16:35	17:05	17:35	17:37	18:05	18:35	19:05
KIT H15	08:06	08:36	09:06	09:36	10:06	10:54	12:06	13:06	14:06	15:06	16:06	16:36	17:06	17:36	17:38	18:06	18:36	19:06
Casino	08:07	08:37	09:07	09:37	10:07	10:55	12:07	13:07	14:07	15:07	16:07	16:37	17:07	17:37	17:39	18:07	18:37	19:07
H19	08:08	08:38	09:08	09:38	10:08	10:56	12:08	13:08	14:08	15:08	16:08	16:38	17:08	17:38	17:40	18:08	18:38	19:08
Karlsruhe Campus Ost	08:20	08:50	09:20	09:50	10:20	11:08	12:20	13:20	14:20	15:20	16:20	16:50	17:20	17:50	17:52	18:20	18:50	19:20
– Karlsruhe CS (Uni)	08:27	08:57	09:27	09:57	10:27	11:15	12:27	13:27	14:27	15:27	16:27	16:57	17:27	17:57	17:59	18:27	18:57	19:27

Abbildung 13: Fahrplan des KIT Bus-Shuttles (Status: 10.05.2017), siehe [https://www.kit.edu/downloads/Fahrplan\\_Shuttle.pdf](https://www.kit.edu/downloads/Fahrplan_Shuttle.pdf)

## 5.2 Betriebsdaten

### 5.2.1 Passagiere

Das KIT-Shuttle-Service transportiert durchschnittlich ca. 800 Passagiere am Tag was bei 200 Arbeitstagen zu einem Transport von 160.000 Passagiere pro Jahr führt.

### 5.2.2 Fahrleistungen

Die Tabelle 1 enthält die Fahrleistung in km für die Jahre 2013 bis 2016. Es zeigt sich dass die jährliche Fahrleistung von 2013 bis 2016 kontinuierlich zugenommen hat, was mit der verbesserten Verfügbarkeit der Busse und der Tankstelle zusammenhängt (siehe Kapitel 5.2.4). Mit der Verbesserung der Fahrleistung ist auch der Verbrauch an kg Wasserstoff pro 100 km von 2013 bis 2016 deutlich gesunken.

Tabelle 1: Fahrleistungen der KIT Bus-Shuttles von 2013-2016

	Fahrleistung (km)			
	2013	2014	2015	2016
Januar		2925	4845	8130
Februar		255	3936	8592
März		4885	2090	9530
April		5665	1000	5290
Mai		2185	5000	8038
Juni		990	9000	6416
Juli		1180	7625	4159
August		553	5469	8310
September		9945	10070	6612
Oktober	1215	2961	5980	8028
November	6023	167	700	9083
Dezember	3936	2126	3892	10375
<b>Summe</b>	<b>11174</b>	<b>33837</b>	<b>59607</b>	<b>92563</b>

### 5.2.3 Spezifischer Verbrauch der Busse

Der spezifische Verbrauch der beiden Busse lässt sich aus Abb.14 ablesen.

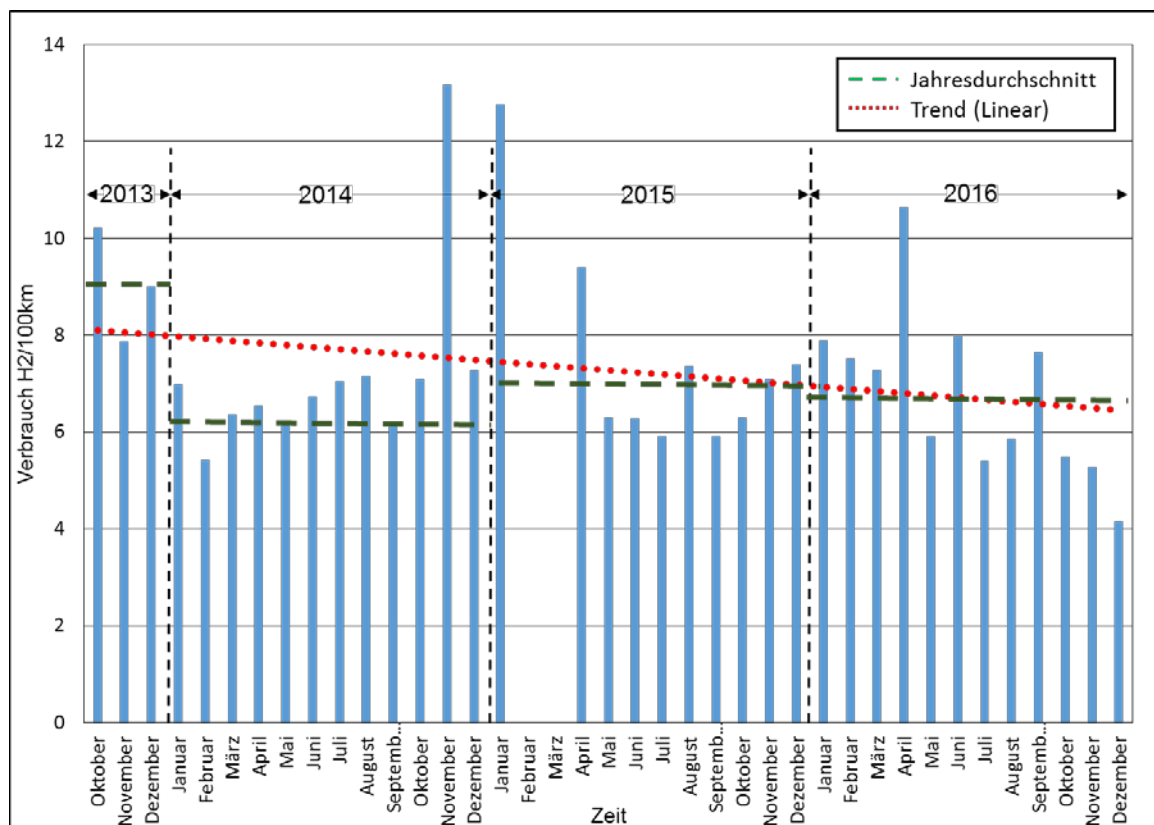


Abbildung 14: Spezifischer Verbrauch der Busse

Im Mittel sind das im Jahr 2013 9,1 kg H<sub>2</sub>/100 km, im Jahr 2014 6,2 kg H<sub>2</sub>/100 km, im Jahr 2015 7,1 kg H<sub>2</sub>/100 km und für das Jahr 2016 6,5 kg H<sub>2</sub>/100 km gewesen. Die rote Linie zeigt den Trend über die Jahre 2013-2016. Es hat sich herausgestellt, dass der Verbrauch von Umweltbedingungen wie Temperatur, im Wesentlichen aber von der Fahrweise der Fahrer und von der Bedienung der zugeschalteten Stromverbrauchern (Sitzheizung, Klimaanlage etc.) abhängt. Eine sparsame Fahrweise von geübten Fahrern bewirkt eine deutliche Reduzierung des H<sub>2</sub>-Verbrauchs. Dies erklärt beispielsweise die niedrigen Verbrauchswerte im letzten Quartals 2016, in dem hauptsächlich erprobte Stammfahrer eingesetzt wurden.

Über Multiplikation mit dem Faktor 3 lässt sich das Energieäquivalent in Liter Diesel berechnen. Geht man von einem Verbrauch von ca. 40l Diesel/100km eines vergleichbaren konventionellen Busses auf der identischen Strecke aus, ist der Brennstoffzellen-Bus 50% energieeffizienter, bei gleichen oder sogar fast besseren Komfortfunktionen, insbesondere Klimatisierung. Dazu sei angemerkt, dass bei den Bussen nur ca. 50% des Energieinhalts des Treibstoffs für den eigentlichen Vortrieb aufgewandt wird.

Geht man weiter davon aus, dass der als Nebenprodukt anfallende Wasserstoff ohne diese Nutzung wie zuvor einfach in die Atmosphäre abgeblasen wird - so wie es auch heute noch bei den meisten großen deutschen Chemieparcs die Regel ist [1] - kann man damit auch direkt die Masse an nicht-emittierten CO<sub>2</sub> berechnen. In den ersten drei Jahren des Betriebs wurden so ca. 375 to CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart.

#### 5.2.4 **Verfügbarkeiten**

Da der Shuttlebetrieb nur während der Werktage Montag bis Freitag stattfindet, wird die Verfügbarkeit vom System bestehend aus Fahrzeuge und Tankstelle auf der Basis der Werktage außerhalb der geplanten Wartungszeiten definiert. Vereinfacht kann für eine vollständige Verfügbarkeit, d.h. 100%, von einer Verfügbarkeit an 240 Werktagen im Jahr ausgegangen werden.

In den Abbildungen 15 bis 17 sind diese Verfügbarkeiten separat für jeweils beide KIT-Shuttle-Busse und für die Tankstelle in Form von Balkendiagrammen dargestellt.

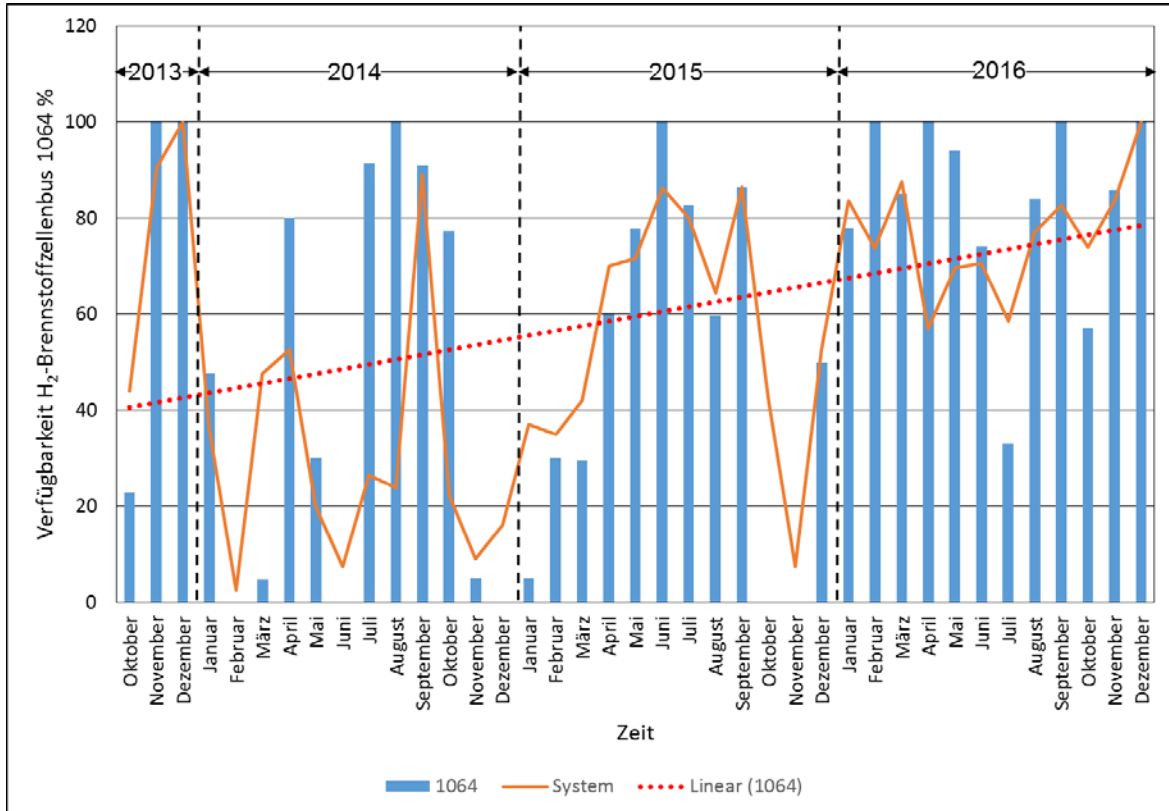


Abbildung 15: Verfügbarkeit des KIT Shuttle Busses mit dem Kennzeichen ... 1064.

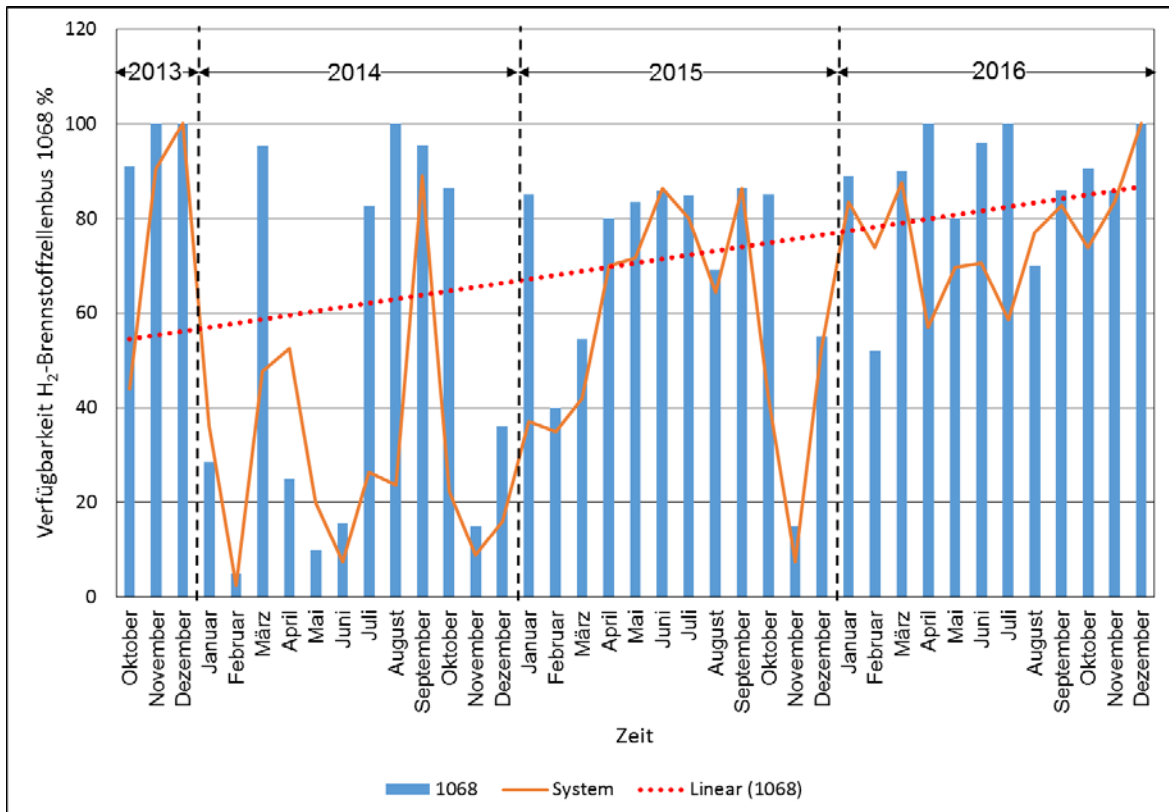


Abbildung 16: Verfügbarkeit des KIT Shuttle Busses mit dem Kennzeichen ... 1068

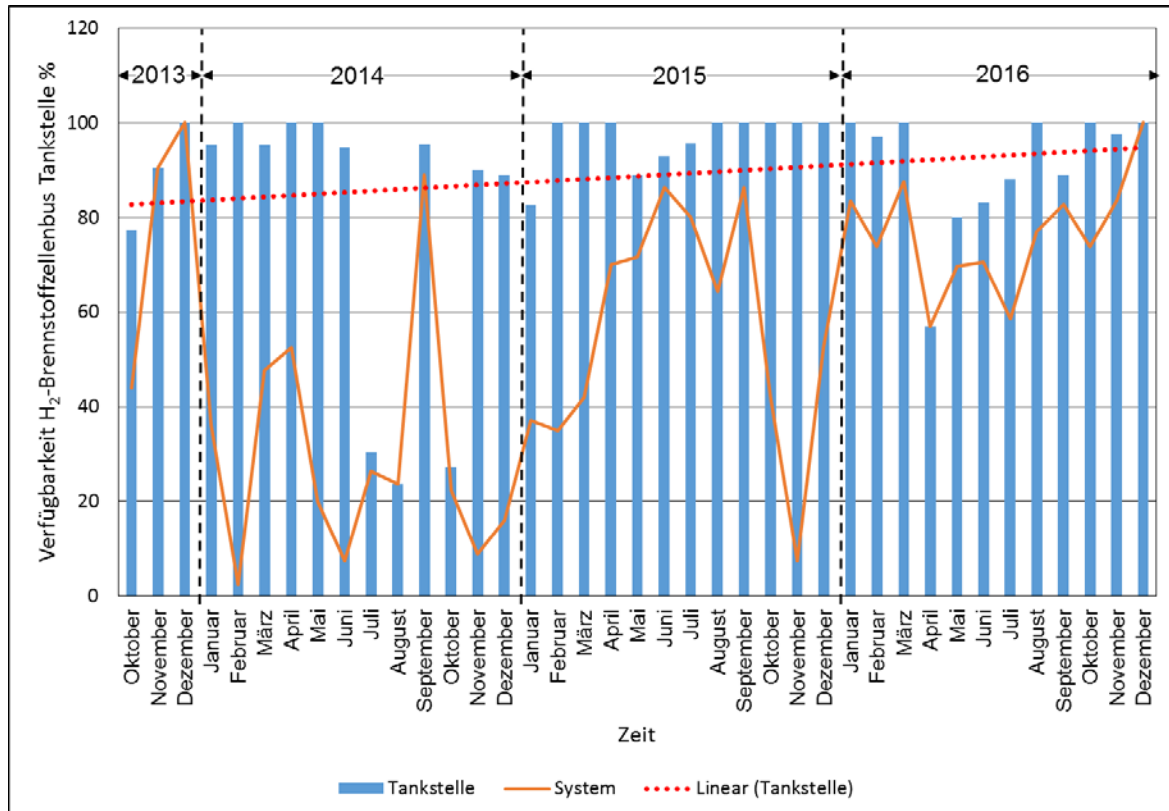


Abbildung 17: Verfügbarkeit der KIT Wasserstofftankstelle.

Eine Gesamtverfügbarkeit ergibt sich daraus, dass die eigene Tankstelle notwendigerweise verfügbar sein muss – es gibt im Karlsruher Raum bis jetzt keine Ausweichmöglichkeit für eine Busbetankung - und dass je Bus 50% Verfügbarkeit bzgl. der Fahrzeuge angesetzt wird. Die folgende Gleichung spiegelt diesen Ansatz wieder.

$$\text{Verfüg}_\text{System} = 0.5 * (\text{Verfüg}_\text{1064} + \text{Verfüg}_\text{1068}) * \text{Verfüg}_\text{HRS}$$

In den Abbildungen 15 bis 17 ist die entsprechende Gesamtverfügbarkeit des Systems über der Zeitachse grafisch (orange Linie) dargestellt.

### 5.2.5 *Energieverbrauch an der Tankstelle*

Tabelle 2: Verbrauch der elektrischen Energie und Druckluft der Tankstelle

<b>Jahr</b>	<b>Elektrische Energie [kWh]</b>	<b>Druckluft [Nm<sup>3</sup>]</b>
<b>2013</b>	28827	664
<b>2014</b>	27529	183
<b>2015</b>	29694	494
<b>2016</b>	27805	236
<b>Summe</b>	<b>113855</b>	<b>1577</b>

### 5.2.6 *Wartungsaufwand für Busse und Tankstelle*

#### Wartungsaufwand der Busse

Die Wasserstoff-Brennstoffzellen Busse unterliegen einer jährlich wiederkehrenden Hauptuntersuchung, die vom TÜV durchgeführt wird. Dabei werden die Busse auf die Straßenverkehrssicherheit untersucht sowie die Gasanlage auf Dichtigkeit überprüft. Zusätzlich wird 3 Mal im Jahr eine SP Sicherheitsprüfung (SP) durchgeführt, bei der die Busse wie bei der Hauptuntersuchung auf Verkehrssicherheit und Dichtigkeit geprüft werden. Kleinere Überprüfungen werden zusätzlich halbjährlich durchgeführt.

#### Wartungsaufwand der Tankstelle

Der Wartungsaufwand für die Tankstelle ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Es hat sich bewährt einen direkten Ansprechpartner, einen „Kümmerer“, vor Ort zu haben, der tägliche Kontrollgänge mit kleinerem Umfang und Assistenz bei den Betankungen durchführt. Im vorliegenden Fall führt dies die Firma Pro-Science im Unterauftrag durch. Die eigentliche Wartung ist in Kombination mit dem Kaufvertrag vertraglich gesichert. Der Tankstellenlieferant beauftragt entsprechende Unterauftragnehmer zur Durchführung der Wartung nach Aufruf durch die betreuende Infrastrukturabteilung des KIT. Letztere bestellt gegebenenfalls auch die entsprechenden Vertreter der technischen Überwachungsinstanzen, wie TÜV, hinzu.

Tabelle 3: Wartungsaufwand für die Tankstelle

	Voraussichtlicher Partner	Leistungen	letzte Prüfung	Anzahl in 5 Jahren		2015				2016				2017				2018				2019			
				Basis	Wartung Plus	15Q1	15Q2	15Q3	15Q4	16Q1	16Q2	16Q3	16Q4	17Q1	17Q2	17Q3	17Q4	18Q1	18Q2	18Q3	18Q4	19Q1	19Q2	19Q3	19Q4
1	ALD	Hälbjährliche und jährliche Revision; Einweisung der Lieferanten bei Wartungsarbeiten, Beaufsichtigung und Dokumentation der Wartungsarbeiten, Arbeitsfreigaben erstellen, In- und Außerbetriebnahme,	---	0	10	+		+		+		+		+		+		+		+		+			
2	C-MA	Prüfungen der sicherheitstechnischen MSR-Schutzeinrichtungen / manuellen und automatischen Notabschaltungen; Befähigte Person für Ex-Schutz, Hinweis: entspricht wiederkehrende Prüfungen gem. BetrSichV ohne BGV A3; Angebot 600 084N13 vom 26.03.2014; email H. Schiffer vom 23.09.2014	Jan. 2013	5	0	B				B				0									B		
2a	C-MA	BGV A3	Jan. 2013	2	0	0				B				0									B		
3	Theisen	Theisen Inspektion; insbes. Dichtigkeit von Druckgeräten und Gängigkeit von Armaturen, Filterelemente wechseln, siehe Angebot 30A0308 vom 17.01.14,	--	0	5	+				+				+									+		
4	SERA	PDC Kompressor warten / SERA, Wartung nach 4.000 Betriebsstunden, Ölwechsel nach 3.000 Betriebsstunden, Angebot vom 05.05.2014; Alternativ: Wartung durch Fa. Marx Maschinenbau	Jan. 2013		0	B				0				B									0		
6	Maximator	Booster warten /überprüfen / 700bar-Betankung testen (wenn PkW verfügbar), Angebot vom 11.04.2014, Wartung alle drei Jahre;	Jul. 2013	1	1	0				B				0									+		
7	Dräger	Gaswarnanlage, Brandmelder, Flammwächter testen, Angebot vom 30.07.2013	H. Band ???	5	5	B		+		B				B		+				B			+		
8	MTA	Kaltwassersatz, Angebot vom AN13-1321 vom 05.09.2013; Kältemaschine war nicht im Ursprungsangebot enthalten	2014	3	2	B				+				B									B		
9	ProScience	H. Stern unterstützt ALD bei Wartungsarbeiten, Angebot Nr. 230 vom 27.03.2014		10	0	B			B		B			B						B			B		
10	WEH	Füllkupplung- und Abreißkupplung alle drei Jahre von WEH prüfen lassen	2011	2	0	B				0				B									0		
11	Tokheim	Angebot einholen , Bestellung Gerät 144872 vom 10.07.13, ursprünglich vorgesehenes Gerät war wartungsfrei	2013	0	2	+								+											
12	Berndt Meßtechnik	O2-Messzelle tauschen, Angebot vom 03.04.2014		5	0	B				B				B						B			B		
13	Cylinder-Prüfung	Wasserdruckprüfung der Wystrach-Zylinder beim Hersteller, Fa. Kessels Prüfwerk GmbH		0	1	0				0				0									0		
14	Kühler-Prüfung	Wasserdruckprüfung beide Kühler und Pulsationsdämpfer, Demontage/Montage, Transport, Prüfung bei Fa. Hofer		0	1	0				0				0									0		
15	Sicherheits-ventile	Demonatage/Montage, Überprüfung beim Hersteller / TÜV, Fa. Nietzgodka, Hersose, Leser oder vom TÜV dafür zugelassene Firmen	vor Erst-IBN (2011)	1	1	B				0				0									0		
16	Operating Update	ProScience und ALD, Abt. Projects & Know How, Auswertung Betriebsverfahren, Konzept anlagentechnische Anpassungen, Prüfung BackUp-System, keine Hardware, 3 Fachleute, je zwei Tage		0	1	+																			
17	Fernüberwachung	ALD: Telefo-Überwachung TCC- Hardware und SPS-Erweiterung		0	1	+																			
18	TCC-Service	ALD: TCC-24/7-Service			5 Jahre 24/7																				

### 5.2.7 **Besondere Einsätze**

Von Anfang an war geplant, die Busse für Messen insbesondere in Karlsruhe, aber auch Stuttgart und für eigene Kongresse oder andere Events einzusetzen. Dies sollte auch Dritten möglich sein und es wurden entsprechende Gebühren für Fahrzeuge, bzw. Ersatzbusstellung und Fahrservices abgeleitet. Aufgrund der anfänglich schlechten Verfügbarkeit hat sich dieses Vorhaben nicht wirklich etabliert. Verschiedenen Anfragen (WES in Stuttgart 2012, Management-Tagung des KIT in Baden-Baden 2013, Nutzfahrzeugmesse in Karlsruhe 2015, Energietag in Rheinland-Pfalz 2016, etc.) musste wegen des labilen Zustands oder den relativ hohen Kosten eines Transports der Fahrzeuge an den Veranstaltungsort abgesagt werden.

Noch vor der Inbetriebnahme im April 2012 hat das KIT einen der Busse an die Wasserstoff-Ausstellung der Hannover-Messe transportieren lassen und dort als Messestand benutzt. Der Organisator hat dazu zwar relativ geringe Standgebühren verlangt, der Transport selbst war jedoch mit ca. 10.000 Euro recht kostspielig.



Abbildung 18: Der Wasserstoffbus KA-IT 1068 auf der Hannover-Messe im April 2012.

Am 17. September 2014 wurden beide Busse für den Betriebsausflug des IKET eingesetzt. Ziel war unter anderem ein Besuch von der Fertigung von EvoBus in Mannheim.





Abbildung 19: Wasserstoffbusse beim Betriebsausflug des IKET.

Ein Bus wurde am 02.07.2011 auf dem Tag der offenen Tür am Campus Ost unter dem Motto "Die Zukunft der Mobilität" ausgestellt. Besonderheit dabei war, dass der Bus Seite an Seite mit der früheren Entwicklung eines Brennstoffzellenbetriebenen VW-Bus gezeigt wurde. Diese Eigenentwicklung des KfK wurde dazu aus dem Technikmuseum Mannheim entliehen, wo sie normalerweise als Dauerleihgabe ständig ausgestellt wird. Das Interesse bei den Besuchern bezüglich beider Exponate war sehr hoch.

Die Firma Daimler/Evobus hat jeweils einen Bus zu zwei Veranstaltungen in ihrem Werk Wörth geliehen. Dabei wurde von Daimler ein eigener Fahrer gestellt.

## 6 Probleme im Betrieb

### 6.1 Betriebliche Probleme mit der Tankstelle

Mehrfach, insbesondere bei relativ hohen Außentemperaturen war das Kühlsystem des Kompressors überfordert. Das Öl und das Kühlwasser wurden wärmer als eine Grenztemperatur, was dazu führte dass die Steuerung die Anlage automatisch außer Betrieb nahm. Nach mehrfachem Vorkommen wurde zusammen mit dem Tankstellenlieferant eine zusätzliche Wasservorlage außerhalb des Verdichter-Containers installiert und in das Kühlsystem integriert. Damit konnte dieses Problem zuverlässig gelöst werden.

Am 09.07.2014 wurde die Wasserstofftankstelle auf dem Campus Nord des KIT vorübergehend außer Betrieb genommen. Der Grund war das Versagen von zwei der sechs Halteschrauben am Kompressor-Rahmen. Im Folgenden wurden zunächst mögliche Ursachen des Versagens erörtert, bevor konkrete Maßnahmen zur Beseitigung des Mangels diskutiert und beschlossen wurden.

Nach Diskussionen mit dem Tankstellenlieferanten wurde schließlich ein konkretes Vorgehen für die Mängelbeseitigung erarbeitet, das als Grundlage für die später durchgeführten Arbeiten diente. Dieses Vorgehen sieht in erster Linie einen Ersatz der Original-Befestigungsschrauben durch HV-Verschraubungen mit einer höheren Dehngrenze vor.

Um die Befestigung des Kompressor-Rahmens überarbeiten zu können mussten jedoch zunächst Montageöffnungen in den Containerboden geschnitten werden, wodurch die Unterseite aller Verschraubung zugänglich gemacht wurde. Diese Öffnungen wurden, nach vergeblichen Versuchen mit Kronenbohrern und einer Stichsäge, schließlich mittels eines Trennschleifers in den Containerboden

geschnitten, wobei trotz Inertisierung der Anlage besonderes Augenmerk auf die Minimierung des Funkenflugs gelegt wurde. Abb. 20 zeigt die Lage der 5 Montageöffnungen im Containerboden sowie die Positionen von Kompressor-Rahmen, Halteschrauben und Betonanker.

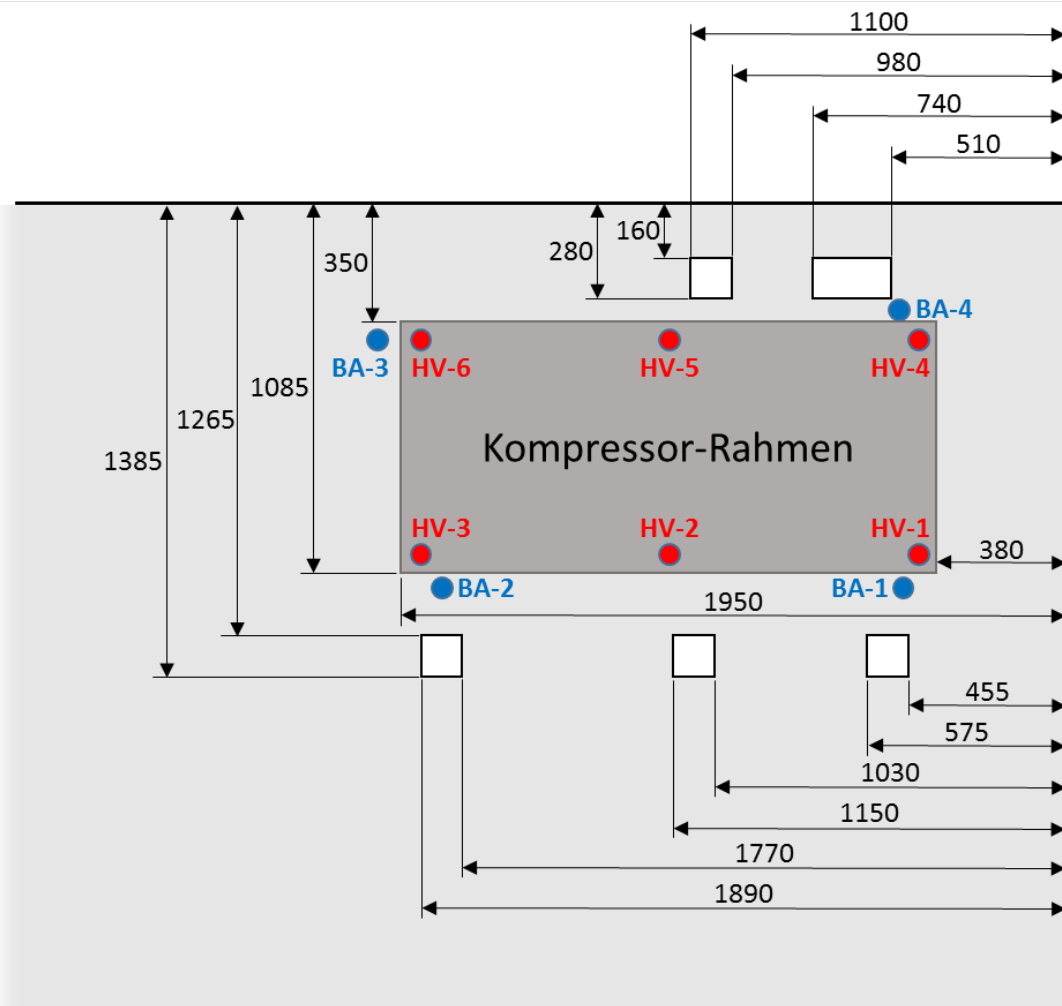


Abbildung 20: Lage der Montageöffnungen (weiß) im Containerboden mit Position des Kompressor-Rahmens (dunkelgrau), der Halteschrauben (rot) und der Betonanker (blau).

Im Zuge der Erörterung möglicher Ursachen für die gelösten/abgerissenen Halteschrauben bzw. bei der Erarbeitung von Schritten zur Mängelbeseitigung wurde bereits zu Beginn bemerkt, dass keine Dokumentation bzgl. der Anzugsdrehmomente von Halteschrauben und Betonankern vorhanden ist. Aus diesem Grund wurde beschlossen, vor dem Beginn der Arbeiten an der Halterung auch die vier Betonanker nahe den Ecken des Kompressor-Rahmens auf das empfohlene Drehmoment von 80 Nm nachzuziehen. Nach dem Aufbringen der zur Stabilisierung/Schwingungsdämpfung vorgesehenen Bleigewichte in unmittelbarer Nähe der Betonanker wurden diese Anzugs-Drehmomente später nochmals überprüft. Zum Schutz vor Korrosion wurden die unter dem Containerboden aus

dem Erdbreich ragenden Betonanker schließlich mit einer Schicht Bitumen-Spachtelmasse versiegelt (Abb. 21).



Abbildung 21: Mit Bitumen-Spachtelmasse versiegelte Betonanker BA-1 bis BA-4.

Bei der anschließenden Überarbeitung der Kompressor-Befestigung wurden zunächst die alten Verschraubungen entfernt und die Durchgangslöcher im Rahmen für eine Verschraubung M16-10.9 gem. DIN EN 14399-4 auf einen Durchmesser von ca. 17 mm erweitert. Als weitere Maßnahme zur Stabilisierung des Kompressor-Rahmens wurden jeweils ca. 5 cm links und rechts dieser Löcher an den Doppel-T-Trägern Regionen angeschliffen (Abb. 22), in die später 10 mm starke Stegbleche zur Erhöhung der Steifigkeit der Träger eingeschweißt wurden.

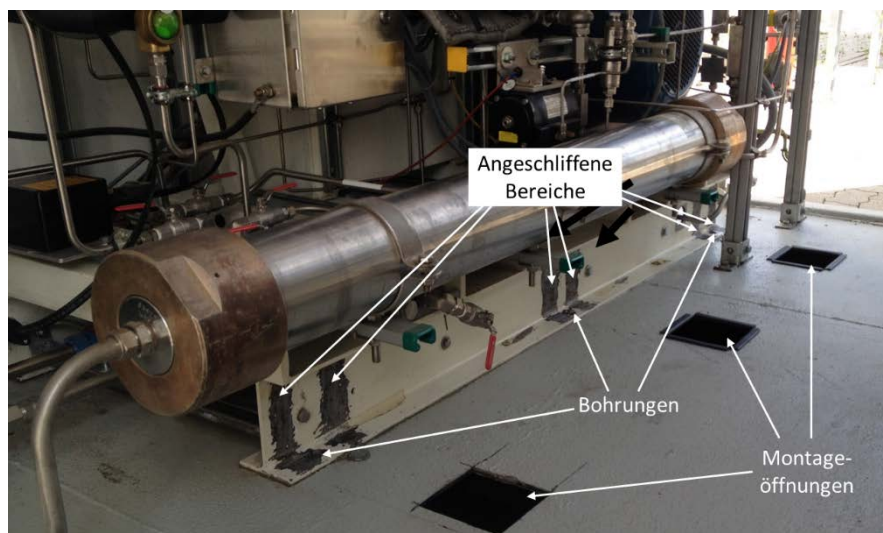
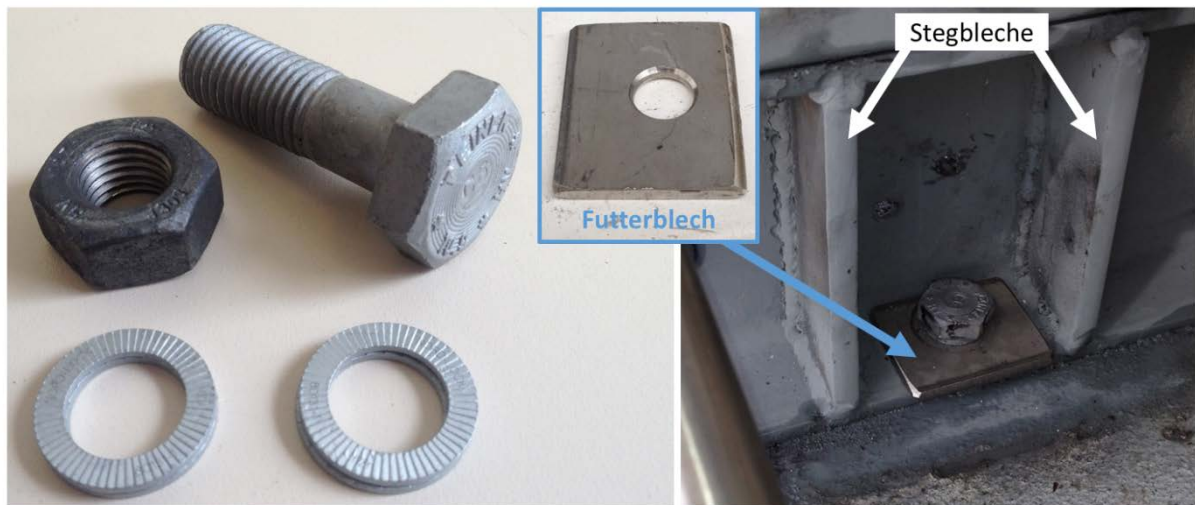


Abbildung 22: Für die HV-Verschraubung vorbereitete Vorderseite des Kompressors.

Probleme bei der Verschraubung bereitete die Rundung im unteren Bereich der Doppel-T-Träger, durch die keine plane Auflagefläche der

Schraubensicherungsscheiben gegeben war. Deshalb wurden zusätzliche, an einer Kante angeschliffene Futterbleche (blauer Rahmen in Abb. 23) gefertigt und eingebaut um die Rundung auszugleichen.



*Abbildung 23: HV-Schraubengarnitur (links) und fertige HV-Schraubverbindung (rechts) mit Futterblech und eingeschweißten Stegblechen zur Versteifung des Rahmens.*

Die Komponenten einer HV-Verschraubung sind auf der linken Seite von Abb. 23 dargestellt. Jede der sechs HV-Schraubenverbindungen besteht aus einer HV-Schraube (M16x50) und der dazu passenden HV-Mutter sowie zwei Paaren Keilsicherungsscheiben der Firma Nord-Lock, die unter Schraubenkopf bzw. Mutter eingesetzt wurden. Alle HV-Verschraubungen wurden mit dem vom Hersteller der Keilsicherungsscheiben angegebenen Anzugs-drehmoment von 279 Nm angezogen. Die rechte Seite von Abb. 23 zeigt den oberen Teil einer solchen HV-Verschraubung mit Futterblech und eingeschweißten Stegblechen.

Nach den oben genannten Arbeiten wurden am 14.08.2014 von der Firma IBIS Schwingungsmessungen bei unterschiedlichen Kompressor-Betriebsbedingungen durchgeführt. Die ersten Messungen erfolgten mit der verstärkten und versteiften Kompressor-Befestigung, während bei späteren Messungen zusätzlich Bleigewichte entlang der Vorderseite des Kompressor-Rahmens und später auch im Bereich von Betonanker BA-4 verteilt wurden. Abb. 24 zeigt links ein Foto der vor dem Kompressor angeordneten 36 Bleigewichte mit einem Gesamtgewicht von 396 kg und rechts die später hinzugefügten 14 Bleigewichte im Bereich von BA-4 mit einem Gesamtgewicht von 154 kg.

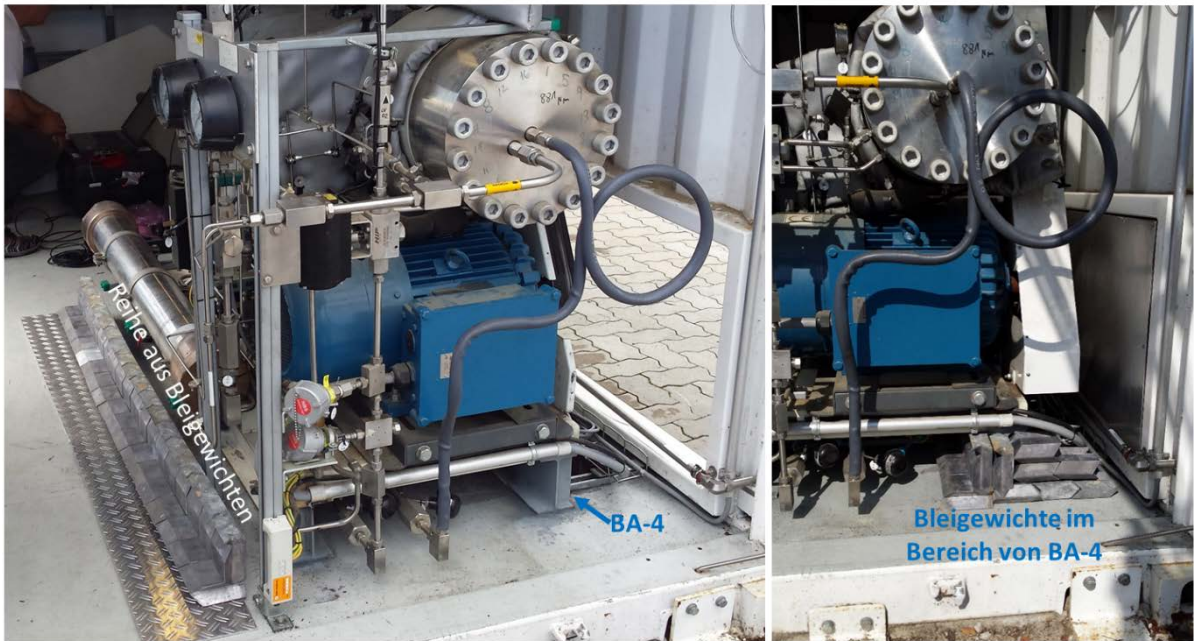


Abbildung 24: Links: Bleigewichte vor dem Kompressor und Position von Betonanker BA-4 (auf dem Foto von einem Träger verdeckt). Rechts: Bleigewichte im Bereich von BA-4.

Anhand der Ergebnisse einer nachfolgenden Schwingungsmessung wurde dann entschieden dass diese Schritte zur Mängelbeseitigung ausreichend sind.

## 6.2 Betriebliche Probleme mit den Fahrzeugen

Einige Probleme, die sich bereits vor der Inbetriebnahme der Tankstelle auf Seiten der Fahrzeuge andeuteten, haben sich insbesondere im ersten Jahr des Betriebes deutlich verschärft.

Wiederholt haben Ausfälle des DC/DC-Wandlers, der die unterschiedlichen Spannungen von Batterie und Brennstoffzellen anpasst, zu einem unmittelbaren nicht vorhersehbaren Ausfall geführt. Teilweise blieb der betroffene Bus mitten auf der Fahrstrecke stehen und der Fahrer musste ein Ersatzfahrzeug ordern und das Fahrzeug abschleppen lassen. Bei einem der Abschleppvorgänge wurde nicht nach Vorschrift vorgegangen, was zu einem zusätzlichen Defekt im Antrieb führte. Die Plattenwärmetauscher, die den speziellen Kühlkreis für die Brennstoffzellen mit dem konventionellen Kühlkreis verbinden, haben mehrfach Brüche aufgewiesen. Das Kühlmittel für die Brennstoffzellen wurde mit dem leicht elektrisch leitenden konventionellen Kühlmittel vermischt, was zu einer Schutz-Abschaltung der Brennstoffzelle geführt hat.

Das Anodenmodul, ein Gebläse mit trocken gelagertem Lüfterrad zur Aufbereitung der Wasserstoffzufuhr, hat mehrfach verfrüht ausgesetzt. Mittlerweile wird das Anodenmodul bei der jährlichen Wartung vorsorglich ausgetauscht.

Generell Schwierigkeiten macht der das Einschalten, bzw. Aufrüsten, der Fahrzeuge. Der Fahrer muss dabei mit kürzeren Haltezeiten durch die verschiedenen Stufen durchschalten. Geschieht dies zu schnell oder insbesondere unmittelbar nach einem Ausschalten so kann sich die komplexe Steuerelektronik „aufhängen“. Das schnelle Ausschalten und wieder Einschalten („cycling“) ist oft durch Irritation des Fahrers verursacht, der fälschlicherweise, aufgrund der fehlenden Betriebsgeräusche, davon ausgeht, das Fahrzeuge sei nicht richtig gestartet. In Stuttgart wurden deswegen die Busse mit Warnleuchten nachgerüstet, die dem Fahrer anzeigen nicht weiter in die nächste Stufe zu schalten. Hat sich die Steuerelektronik „aufgehängt“ kann dies nur durch einen Spezialisten von EvoBus zurückgesetzt werden.

Neben diesen Schwierigkeiten gab es auch noch zwei konventionelle Unfälle, in die die Busse involviert waren. Am 16.06.2015 ist ein Fahrer an die Abweiser an der Tankstelle gefahren. Der Schaden am Bus war beträchtlich (siehe Abb. 25).



*Abbildung 25: Unfall bei der Zufahrt zur Tankstelle*

Am 05.11.2015 gab es dann einen Auffahrunfall, bei dem ein PKW auf das Heck eines der Busse auffuhr. Dadurch dass in dem Heckbereich Steuerelektronik und Kühlkreise untergebracht sind, hat auch dieser Unfall zu beträchtlichem Schaden geführt.

In beiden Unfällen, war das Wasserstoffsystem ungefährdet und blieb auch unbeschädigt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bezüglich der Tankstelle lässt sich schließen, dass insbesondere die installierte Technik noch weit von einer Serienproduktreife entfernt ist. Dennoch konnte eine relativ hohe Verfügbarkeit im Betrieb realisiert werden, was zum Teil an der Einfachheit des gewählten Systems liegt. Es hat sich gezeigt, dass die Lieferfristen für einzelne Ersatzteile sehr lang sind, was unter Umständen zu hohen Ausfallzeiten führen kann. Während des langwierigen Aufbaus war man von sich relativ schnell ändernden Standards konfrontiert und bei der Zulassung der Tankstelle herrschten noch relativ große Unklarheiten bei den zuständigen Behörden sowie bei den technischen Prüfinstanzen. Das machte die Zulassung insgesamt nicht einfacher. Das Sicherheitskonzept war durch den Lieferanten vordefiniert. Daher hatte der Bauherr/Betreiber weniger als gewünscht Einfluss auf die entsprechenden Sicherheitsstrategien und -Maßnahmen. Es hat sich gezeigt, dass die Qualitätsanforderungen zwischen Lieferant und Bauherr/Betreiber sehr stark voneinander abweichen.

Bezüglich der Busse hat sich gezeigt, dass die labile Leistungshalbleiter-Technik einen zuverlässigen Einsatz der Busse für den kommerziellen Bereich noch sehr schwierig machen. Bei den gegenwärtigen Stückzahlen im zweistelligen Bereich werden diese Probleme wie auch die entsprechend hohen Kosten und Ersatzteillage kaum in den Griff zu bekommen sein. Aufgrund von sich ebenfalls schnell ändernden Standards war die Zulassung der Busse fast unmöglich. Zu Beginn des Shuttle-Verkehrs waren die Busse oft nicht verfügbar, was sowohl durch die Leistungselektronik, aber auch durch konventionelle Bauteile (Kompressor, Türöffner etc.) verursacht wurde. Durch die umständliche Start- und Abschaltprozedur (Auf- und Abrüsten) der Busse, was zu Fehler in der Technik führen kann, hatten die Fahrer Angst den Bus zu bedienen. Die anfänglich schlechte Verfügbarkeit führte zu einem gemischten Feedback der Nutzer („fährt zu selten“ „unzuverlässig“, „tolle Dynamik leise“ „Pfeifgeräusche“). Im Betrieb haben sich die Busse als sehr energieeffizient erwiesen und scheinen bei entsprechender Herstellung des eingesetzten Wasserstoffs eine interessante, wenn auch gegenwärtig noch teure Option zur Einsparung von CO<sub>2</sub> Emissionen im Verkehr zu sein. Zusätzlich reduziert die Technik die Lärm- und Feinstaub- und Ammoniakbelastung der Umwelt. Gegenwärtig wird die Verlängerung des Busbetriebs um weitere zwei Jahre bis Ende 2019 vorbereitet.



Mittelfristiges Ziel ist es, einen Teil des benötigten Wasserstoffs im KIT selbst über nachhaltige Pfade herzustellen und damit den Vorgaben der CEP möglichst nahe zu kommen. Als Beispiele für die vom KIT untersuchten Produktionspfade seien hier die alkalische Hochdruck-Elektrolyse und Biomasse-Verwertung (VERENA, bioliq®) genannt. Die Tankstelle könnte in nationalen oder EU-Projekten als „Schulungstankstelle“ verwendet werden und stellt ein wesentliches Element der Wasserstoffwandlungskette dar, die das KIT für Forschungsarbeiten in das POF3 Helmholtz-Programms „Speicher und vernetzte Infrastrukturen (SCI)“ einbringt.

Gegenwärtig werden Nachrüstungen und Anpassungen untersucht, die in erster Linie dazu dienen sollen, den 700bar Zapfpunkt konform mit den SAE Standards bzw. Anforderungen der Clean Energy Partnership CEP zu machen und die Tankstelle so vollständig in das deutsche Tankstellennetz zu integrieren. Aufgrund der fehlenden Kühlung verlängert sich gegenwärtig noch die Dauer eines Betankungsvorgangs für einen typischen Brennstoffzellen-PKW von 3 Minuten auf ca. 20 Minuten. Dies ist nur ausnahmsweise von Daimler für die B-Klassen f-cell Fahrzeuge zugelassen.

Das wesentliche Element der notwendigen Maßnahmen ist somit die Nachrüstung einer Kühlung für die 700 bar Betankungsoption. Bei der Entwicklung der Kühlung stellt die Integration in die bestehende Anlage eine besondere Herausforderung dar. Zusätzlich sollen vorzugsweise Komponenten verwendet werden, die das KIT aus einem abgeschlossenen, NIP geförderten Projekt erworben hat. Diese Wiederverwendung von Komponenten wäre ein einfach fassbarer Beleg für die Nachhaltigkeit der öffentlichen Förderung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit diesem Vorhaben wesentliche Ziele des Schwerpunktes „Verkehr“ im Nationalen Entwicklungsplans adressiert werden konnten:

- die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Energiesystemen können eng mit der Demonstration dieser Systemlösung verknüpft werden;
- die Wasserstoffversorgung für Verkehrsanwendungen wird in der Schlüsselregion Nordbaden zuverlässig erweitert, obwohl gegenwärtig der CEP-Standard für die PKW-Betankung wegen fehlender Kühlung des 700bar-Zapfpunktes nicht eingehalten wird;
- alle relevanten Zulieferer, insbesondere im Bereich Service, wurden eingebunden;
- die Kundenakzeptanz wird durch hohe Sichtbarkeit und direkten Nutzen gefördert;
- die schließlich erreichte Verfügbarkeit und die Effizienz - insbesondere bei den Fahrzeugen- zeigt das große Potential für eine umweltfreundliche Elektromobilität mit Hilfe von Wasserstoff und Brennstoffzellen.



Abbildung 26: Einfahrt eines KIT-Shuttlebusse in den Campus Nord des KIT

## 8 Danksagung

Die Autoren, die Wasserstoffgruppe und das KIT insgesamt bedankt sich beim Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg für die großzügige Förderung der notwendigen Investitionen, bei den Sponsoren Michelin und Atlas-Copco, sowie bei allen Projektbeteiligten innerhalb wie außerhalb des KIT für ihr großes Engagement.

## 9 Literatur

[1] Joest, S.; Fichtner, M.; Wietschel, M.; Bünger, U.; Stiller, C.; Schmidt, P.; Merten, F.; Parker, N.; Bonhoff, K; Fraunhofer-Gesellschaft GermanHy Studie zur Frage "Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?" Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und in Abstimmung mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW)

