

Abschlussbericht

AutoStack Industrie

Öffentliche Version

Autor: André Martin, André Martin Consulting

Inhaltsverzeichnis

GLOSSAR	3
1. KURZE DARSTELLUNG	6
1.1 AUFGABENSTELLUNG	6
1.2 VORAUSSETZUNGEN.....	6
1.3 PLANUNG UND ABLAUF	7
1.4 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER STAND	7
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	9
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	10
2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE	10
2.2 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE, VERWERTUNGSPLAN	19
2.3 ALLGEMEINER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS	21
3. ERFOLGSKONTROLLBERICHT	22
3.1 BEITRAG DES ERGEBNISSES ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN	22
3.2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHES ERGEBNIS, WESENTLICHE ERFAHRUNGEN	24

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	KONSORTIUM ZUR DURCHFÜHRUNG DES ASI-PROJEKTS	6
ABBILDUNG 2	ASI-REFERENZSYSTEM ALS GRUNDLAGE DER GEMEINSAMEN STACK-SPEZIFIKATION	11
ABBILDUNG 3	AUSGEWÄHLTE SPEZIFIKATIONSELEMENTE UND ENTWICKLUNGSZIELE	12
ABBILDUNG 4	SKALIERUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE LEISTUNGS- UND EINBAUANFORDERUNGEN	12
ABBILDUNG 5	LEISTUNGSDICHTE UND BENCHMARK DES EVO2-DESIGNS	13
ABBILDUNG 6	ERHÖHUNG DER ZELLSPANNUNG UND NACHWEIS DER LEBENSDAUER IM TESTZYKLUS	14
ABBILDUNG 7	VERRINGERUNG DER STACK-DEGRADATION UND LEISTUNGSSTEIGERUNGEN	14
ABBILDUNG 8	BESSERE GLEICHVERTEILUNG DER STROMDICHTEN DURCH PARAMETEROPTIMIERUNG	15
ABBILDUNG 9	ERFÜLLUNGSSTAND WESENTLICHER SPEZIFIKATIONSELEMENTE	15
ABBILDUNG 10	ERGEBNISSE DER KOSTENANALYSE AUF BASIS REALITÄTSNAHER FERTIGUNGSANNAHMEN	16
ABBILDUNG 11	WESENTLICHE ZIELE DER FERTIGUNGSENTWICKLUNG FÜR 10 000 STACKS	17
ABBILDUNG 12	FERTIGUNGSKONZEPT FÜR 10 000 STACKS	17
ABBILDUNG 13	VERSUCHSANLAGE FÜR DIE MONTAGE VON 30 000 STACKS/JAHR	18
ABBILDUNG 14	ANLAGEN-LAYOUT UND FERTIGUNGSABLAUF FÜR 30 000 STACKS	19
ABBILDUNG 15	MARKTVOLUMEN POTENTIELLER ANWENDUNGEN FÜR DEN ASI-STACK	20

DIE VERANTWORTUNG FÜR DEN INHALT DIESER VERÖFFENTLICHUNG LIEGT BEIM AUTOR.

Glossar

Andere Anwendungen	Alle Anwendungen außer PKW, die grundsätzlich für den Einsatz des ASI-Stacks infrage kommen.
AP	Arbeitspaket
AutoStack-Core, ASC	Europäisches Vorläuferprojekt
AutoStack-Industrie, ASI	Gesamtprojekt
Benchmark	Externer Vergleich von technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften oder Entwicklungen in Form von Analysen oder Tests zur Bestimmung des eigenen Entwicklungsstands.
Betriebspunkt	Leistungs- und Wirkungsgradziel für die technische Auslegung des Stacks
BPP	Bi-polarplatte, Verteilerplatte
BoP/BoS	„Balance of Plant“ bzw. „Balance of System“, alle Teile für die Montage und den Betrieb des Stacks, die nicht Wiederholteile sind, wie Stack-Verspannung, Medienanschlüsse, CVM usw.
CVM	„Cell Voltage Monitoring“, Zellspannungs-Messeinrichtung
Design-Review	Meilenstein zur Überprüfung der Entwicklungsergebnisse und Festlegung der folgenden Entwicklungsschritte ▪ <i>Design-Review 0:</i> Überprüfung der Spezifikation und Festlegung der Entwicklungsziele für Evolution 1 ▪ <i>Design-Review 1:</i> Überprüfung des Entwicklungsstands nach Abschluss von Evolution 1 und Festlegung der Entwicklungsziele für Evolution 2 ▪ <i>Design-Review 2:</i> Überprüfung des Entwicklungsstands nach Abschluss von Evolution 2
DoE-Zielkosten	Kostenziele, die in ein- bis zweijährigem Rhythmus, zuletzt 2019, im Auftrag des U.S. „Department of Energy“ veröffentlicht und als internationale Referenz für die Stack-Zielkosten angesehen werden.

Evolution 1	Entwicklungsphase 1 – für die Entwicklung eines Funktionsmusters.
Evolution 2	Entwicklungsphase 2 – für die Entwicklung eines Erprobungsmusters.
Funktionsmuster	Entwicklungsstand zum Nachweis der Stack-Funktionen nach Abschluss von Evolution 1.
Erprobungsmuster	Entwicklungsstand für die Erprobung und den Nachweis der Stack-Spezifikation mit fertigungsnahem Design nach Abschluss von Evolution 2.
Kostenanalyse	Ermittlung der Stack-Fertigungskosten auf Basis des jeweiligen Entwicklungsstands, Ermittlung und Beschreibung von Kostenreduzierungspotentialen für die Umsetzung in den folgenden Entwicklungsschritten.
Kurz-Stack	Stack mit geringer Anzahl von Zellen, für die Durchführung von Charakterisierungstests.
Leistungsdichte	Stack-Leistung pro volumetrische Einheit, i.e. kW/Liter
Massenfertigungskonzept	Validiertes Konzept für die industrielle Massenfertigung von Stacks und/oder Komponenten auf Basis der Prozessentwicklung und –Validierung im Rahmen des Projekts.
MEA	„Membrane-Electrode-Assembly“, Membran-Elektroden-Einheit
Verwertungskonzept	Potentialanalyse und Vereinbarung der beteiligten Partner zur industriellen Nutzung der Entwicklungsergebnisse.
Packaging	Designanforderung für die volumetrische, geometrische und ggf. gravimetrische Gestaltung einer Komponente oder eines Systems für den möglichst optimalen Einbau in die Fahrzeugumgebung.
Pt-Beladung	Platinmenge pro Flächeneinheit, i.e. mg/cm ²
Rumpfsystem	Definition eines grundsätzlichen Systemumfelds und der dazugehörigen Schnittstellen als Grundlage für die Stack-Spezifikation.

Spezifische Leistung	Stack-Leistung pro gravimetrische Einheit, i.e. kW/Kilogramm.
Skalierbarkeit, Modularisierung	Variierung der Zell-Anzahl des Stacks unter Beibehaltung des Zelldesigns sowie ggf. der Stack-Verspannung für unterschiedliche Leistungsbereiche, in denen der Stack vergleichbares Betriebsverhalten zeigt.
Stack oder BZ-Stack	PEM-Brennstoffzellenstapel bestehend aus Einzelzellen, mechanischer Stack-Verspannung, Medienschnittstellen und ggf. Zellspannungsmessung und Schutzhülle.
Stack-Verspannung	Mechanische Integrationsvorrichtung zur Fixierung des Zellstapels sowie Schnittstellen für Medien und Strom.
Technologie-Injektionspunkt	Meilenstein zur Einsteuerung von Technologieentwicklungen zu Beginn von Evolution 2.
Voll-Stack	Stack mit der spezifizierten Referenzleistung von 85kW mit 274 Zellen.

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des ASI-Projekts war die gemeinsame Entwicklung und Nutzung einer Hochleistungs-Stack-Technologie für automobiler Anwendung sowie von innovativen Herstellprozessen und -Verfahren, die geeignet sind, die funktionalen, Qualitäts- und Kostenziele der Automobilindustrie in einer industriellen Massenfertigung von Stacks und Komponenten zu erfüllen.

1.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben verfolgte einen ganzheitlichen Ansatz, der alle relevanten Aspekte des Komponenten- und Stack-Designs und der für die Massenfertigung benötigten Prozess- und Verfahrensentwicklung abdecken sollte. Ziel war eine möglichst optimale Kombination des vorhandenen Knowhow der relevanten Akteure zu erreichen und kritische Schnittstellen in der Entwicklung effizient zu koordinieren. Dabei sollten die Spezifikationsanforderungen der OEMs im Mittelpunkt der Entwicklung stehen. Das zur Durchführung des Projektes gebildete Konsortium, führte deshalb alle Schlüsselakteure der Wertschöpfungskette, d.h. Automobilhersteller, Komponentenzulieferer, System-integratoren und Forschungseinrichtungen zusammen – Abb.1. Erstmals arbeiteten in einem nationalen Projekt somit namhafte Partner aus Industrie und Wissenschaft zusammen, um die technischen und technologischen Voraussetzungen für die Industrialisierung und kommerzielle Einführung von Brennstoffzellen-Antrieben in Deutschland und Europa zu schaffen.

Die Projektkoordinierung wurde durch das ZSW in Kooperation mit André Martin Consulting durchgeführt. Die Konsortialführung übernahm BMW. Gründungsmitglieder des Konsortiums waren BMW, Daimler, DANA, Ford, Freudenberg, Greenerity (vorm. Solvicore), NuCellSys, PowerCell, Umicore, Volkswagen und ZSW. Im November 2019 trat die AUDI AG dem Konsortium bei. Ab September 2021 übernahm die cellcentric GmbH als Rechtsnachfolger von Daimler und NuCellSys deren Aufgaben im Rahmen des Projekts.



Abbildung 1 Konsortium zur Durchführung des ASI-Projekts

Grundlage für die Stack-Entwicklung bildeten gemeinsame, abgestimmte Konstruktions- und Qualitätsrichtlinien der Fahrzeughersteller für den Stack und die Komponenten. Dadurch sollten möglichst optimale Skaleneffekte in der Entwicklung und Fertigung erreicht und die gemeinsame Nutzung von Hauptkomponenten ermöglicht werden.

1.3 Planung und Ablauf

Das Projekt hatte eine geplante Gesamtlaufzeit von 56 Monaten. Die Projektarbeiten begannen am 3.5.2017 nach vorläufiger Projektfreigabe des Projektträgers Jülich. Aufgrund der Finanzierungsrahmenbedingungen wurden die Arbeiten in zwei Projektphasen durchgeführt. Projektphase 1 wurde am 31.12.2018 beendet. Projektphase 2 begann am 1.1.2019 und war für 36 Monate, d.h. bis 31.12.2021, ausgelegt. Aufgrund der Behinderungen durch die Corona-Pandemie, den dadurch verursachten Auswirkungen auf die Lieferketten sowie zusätzlicher technischer Aufwände zur Erfüllung der Spezifikationsanforderungen wurde das Projekt kostenneutral bis 31.12.2022 verlängert.

Für die Stack-Entwicklung waren zwei Entwicklungsphasen, Evolution 1 und Evolution 2, vorgesehen, um den für die Automobilindustrie nötigen Reifegrad zu erreichen. Parallel dazu wurde die Entwicklung, Auswahl und Erprobung geeigneter Fertigungsprozesse und -Anlagen für Produktionsvolumen von 10 000 und 30 000 Stacks pro Jahr in zwei parallel arbeitenden Teams vorangetrieben. Außerdem bearbeitete das ZSW spezifische wissenschaftliche Themenstellungen im Rahmen der Begleitforschung.

Zur Durchführung und Koordinierung der Arbeiten wurde eine Projektstruktur mit neun Arbeitspaketen implementiert, deren Aufgaben und Ziele im Detail beschrieben und vereinbart wurden. Grundlage des Zeitmanagements war der Projektzeitplan, der regelmäßig kontrolliert und wenn erforderlich aktualisiert wurde. Er wurde ergänzt durch einen Meilensteinplan, der die wichtigsten Entwicklungsschritte und Ziele enthielt. Die operative Steuerung der Arbeiten erfolgte durch den Projekt-Steuerkreis unter Leitung des Koordinators, an dem alle Arbeitspaketleiter bzw. Vertreter aller Projektpartner beteiligt waren. Der Steuerkreis traf alle wichtigen Projektentscheidungen im Einvernehmen. Die Gesamtentwicklung wurde durch ein einheitliches Qualitätsmanagement auf Projektebene unterstützt.

In Entwicklungsphase 1(Evo1) wurden außerdem für zwei spezifische Themen, die MEA- und die Zellentwicklung, spezielle Arbeitsgruppen eingesetzt, um die Entwicklungsarbeiten der kritischen Komponenten mit dem nötigen Fokus und Nachdruck durchführen zu können.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Das Projekt verfolgte das Ziel, die zu Projektbeginn noch bestehende Wertschöpfungslücke in der deutschen/europäischen Stack-Entwicklung für den Einsatz in Fahrzeugen zu schließen. Dafür sollte ein gemeinsames Packaging- und Skalierungskonzept mit höchster Leistungsdichte entwickelt werden, das die Nutzung des Stacks in unterschiedlichen Fahrzeugplattformen und -Modellen verschiedener Hersteller und/oder die Nutzung der entwickelten Komponenten und Fertigungstechnologien durch einen oder mehrere OEMs ermöglicht. So sollten bereits in der frühen Kommerzialisierungsphase attraktive Kosten erreicht und Marktrisiken reduziert

werden. Neben der Erhöhung der Stack-Leistung bestand das Entwicklungsziel in der weiteren Verbesserung der Stack-Funktionalität und Robustheit sowie insbesondere dem Erreichen der Lebensdauerziele.

Die als Projektziel spezifizierte Stack-Leistungsdichte von $>4,0\text{kW/l}^1$ (Spitzenleistung) repräsentierte zum Zeitpunkt des Projektbeginns einen internationalen Spitzenwert sowohl im Vergleich zum damaligen Technologieführer Toyota ($3,1\text{kW/l}$) als auch gegenüber Honda, die mit dem 2016 eingeführten Clarity ebenfalls eine Leistungsdichte von $3,1\text{ kW/l}$ erreichten. Die seinerzeit durch Ballard veröffentlichten Werte zu ihrer neuen Stack-Generation zeigten ebenfalls einen deutlichen Klassenunterschied zu den ASI-Design-Zielen.

Die Fertigungsentwicklung für 10 000 und 30 000 Stacks/a sollte parallel dazu einen substantiellen Beitrag zur industriellen Reifmachung, zur Kostensenkung und für das Erreichen der Qualitätsziele der Automobilhersteller leisten. Dafür stand die Entwicklung und der Nachweis kritischer Fertigungsverfahren für die industrielle Massenfertigung von Stacks und Komponenten im Mittelpunkt, über die zum Zeitpunkt des Projektbeginns noch kein Hersteller verfügte.

Das ZSW bearbeitete Fragen des Wassermanagements, des Stoff- und Wärmetransports in den Zellen, des Stack-Betriebsverhaltens, der Fertigungs-Verfahrenstechnik und der Erforschung von Betriebsanforderungen (AP9), um die Optimierung des Stack- und Komponenten-Designs, des Stack-Betriebs und der Fertigung zu unterstützen.

Zum Erreichen der Entwicklungsziele nutzte das Projekt die Erkenntnisse einer Reihe von Vorgängerprojekten. Dazu gehören:

1. *AutoStack und AutoStack-Core (ASC)*

In den europäischen Projekten AutoStack und AutoStack-Core wurden wesentliche analytische Vorarbeiten sowie die Entwicklung eines Stack-Prinzip-Musters erfolgreich durchgeführt. Die dort erreichten Entwicklungsergebnisse und die ebenfalls in AutoStack-Core erarbeitete Dokumentation des Stack-Funktionsmusters wurden für die vorgesehenen Entwicklungsarbeiten zugrunde gelegt und im Rahmen des Projektes weiterentwickelt. Die in ASC entwickelten Stacks bildeten zu Projektbeginn mit $3,8\text{kW/l}$ den internationalen Benchmark in Bezug auf Stack-Leistungsdichte. Das wird unter anderem dadurch belegt, dass die Firma Bosch nach einem globalen Benchmark im Jahr 2019 eine Lizenz für die Stack-Technologie erwarb und der Beginn der Volumenfertigung im Jahr 2023 vorgesehen ist.

2. *OptiGAA und OptiGAA II*

In diesen Projekten wurden neue, verbesserte Gasdiffusionslagenmaterialien entwickelt, mit denen die Flächen-Leistungsdichte im Stack signifikant verbessert werden konnte. Grundlegende Arbeiten zum besseren Verständnis der mechanischen Eigenschaften und der Transportphänomene innerhalb der GDL waren Basis für die realisierten GDL-Strukturänderungen.

¹ Das damals spezifizierte Entwicklungsziel für die Leistungsdichte betraf den kompletten Stack, d.h. Zellstapel inklusive Endplatten und Medienanschlüsse.

3. NeKat

In diesem Projekt wurden neue, verbesserte Katalysatoren, sowohl für die Anode als auch die Kathode entwickelt. Darauf aufbauend wurden verbesserte MEA-Konzepte entwickelt. In Lebensdauertests zeichneten sie sich durch eine sehr hohe Stabilität aus.

4. BestKat

In diesem Projekt wurden neue Konzepte zur Verbesserung der Degradationsstabilität von Kathodenkatalysatoren erarbeitet. Dabei wurden sowohl verbesserte Messprotokolle zur Lebensdauerprognose von Kathodenkatalysatoren qualifiziert als auch ein verbessertes Verständnis zu technologischen Optionen für die Verbesserung der Stabilität und Aktivität von Brennstoffzellen ORR-Katalysatoren aufgebaut.

5. MiniBip

Das Ziel von MiniBip war die Entwicklung von neuen, kostenattraktiven metallischen Werkstoffen mit verbessertem Umformverhalten für den Einsatz in metallischen Bipolarplatten.

6. HM5 BMWi

Die Erkenntnisse sowie die in dem Projekt entwickelte Materialien, z.B. MEAs oder GDLs wurden für die Entwicklungsarbeiten im Projekt genutzt.

7. Mas-Tech

Das wesentliche Ziel des Projektvorhabens MAS-TECH war es, die bestehende MEA-Technologieplattform durch weitere kostensenkende Elemente zu ergänzen und somit die Gesamtherstellkosten weiter zu senken. Die Ergebnisse des Projekts flossen in die MEA-Fertigungsentwicklung ein.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Fertigungskostenanalysen im Rahmen des Projektes (AP1) wurde ein unabhängiger, spezialisierter, externer Dienstleister beauftragt, um methodische Kompetenz und Unabhängigkeit der Analysen sicherzustellen.

Die Entwicklung und Auswahl von Prozessen, Anlagen und Ausrüstungen für die Entwicklung der Fertigungstechnologie in AP7 wurde in Kooperation mit spezialisierten Unternehmen der Fertigungstechnik durchgeführt.

Für die Aufgaben der Begleitforschung arbeitete das ZSW mit externen Forschungs-Partnern, dem Fraunhofer ISE und dem Schweizer Paul-Scherrer-Institut, als Unterauftragnehmern zusammen. Das Schweizer Paul-Scherrer-Institut beteiligte sich an der Durchführung spezifischer Test-Umfänge im Rahmen eines durch das Eidgenössische Bundesamt für Energie geförderten Projekts.

Weitere Schnittstellen bestanden bei der Komponenten- und Materialauswahl im Zulieferbereich (Tier 2) mit dem Ziel, die besten im Markt verfügbaren Komponenten für die Entwicklung einzusetzen.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Gesamtsicht Stack-Entwicklung

Das Konsortium des AutoStack-Industrie-Projekts hat in den letzten sechs Jahren eine Hochleistungs-Brennstoffzellen-Technologie für den Automobylantrieb entwickelt, die eine Spitzenstellung im internationalen Technologie-Vergleich einnimmt, herausragende konstruktive Eigenschaften besitzt, die bisher von Wettbewerbern nicht gezeigt wurden und für die automobilen Massenfertigung geeignet ist. Mit der Evo2-Entwicklungsphase konnte der Nachweis der Funktionssicherheit in Kurz- und Vollstapeln erbracht werden. Die OEM-Einbauanforderungen werden erfüllt. Die CO- und Zellumkehr-Toleranz wurden nachgewiesen. Der Stack besitzt ein fertigungsgerechtes Design, das im Rahmen der Fertigungsentwicklung des Projekts validiert wurde. In den Lebensdauertests des Evo2-Stacks wurde das Erreichen der spezifizierten Lebensdauerziele nachgewiesen. Die Daten aus einer Reihe von Versuchen lassen zudem den Schluss zu, dass weiteres Optimierungspotential besteht, das erschlossen werden kann. Trotz deutlich erhöhter Marktpreise für wesentliche Materialien und zusätzlicher Spezifikationsanforderungen (COT, CRT) bewegen sich die spezifischen Herstellkosten des Stacks in der Nähe der DoE-Kostenziele.

Die Entwicklung sollte auf dem im europäischen Projekt „AutoStack Core“ entwickelten Stack-Design aufbauen, welches ebenfalls durch Mitglieder des Konsortiums entwickelt worden war. Die vereinbarte OEM-Spezifikation erforderte jedoch eine Abkehr von diesem Ansatz mit deutlichen Änderungen des ursprünglichen Designs, u.a. in der Zell- und Stack-Geometrie, vor allem jedoch durch die Entwicklung einer neuen Bipolar-Platte und einer neuen MEA, die den Betrieb mit deutlich höheren Stromdichten ermöglichen sollten. Darüber hinaus wurden neue technische Anforderungen für die CO-Toleranz und Toleranz gegen Zellumkehr bei Froststart gestellt – Abb. 2.

Die Entwicklung und Erforschung der Funktionalität der MEA wurde in einer speziellen Arbeitsgruppe (MEA-Task Force) vorangetrieben, die mit viel Engagement durch die Partner unterstützt wurde und einen weit über die ursprünglichen Annahmen hinausgehenden Aufwand nach sich zog. Gleiches gilt für die Entwicklung der Einzelzelle, deren Entwicklung ebenfalls durch einen sehr hohen Modellierungs-, Konstruktions- und Testaufwand charakterisiert war. Aus den technischen Zielen ergab sich ein hoher Anspannungsgrad der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über die gesamte Projektlaufzeit.

Gesamtsicht Fertigungsentwicklung

In der Fertigungsentwicklung im Rahmen des Projektes wurden durch die Partner BMW und Powercell erfolgreich Verfahren entwickelt, ausgewählt und validiert, die die Anforderungen für die industrielle Volumenfertigung grundsätzlich erfüllen und das Potential besitzen, die Qualitäts- und Kostenziele der Automobilindustrie zu erfüllen. Der erreichte Stand der Fertigungsentwicklung ist geeignet für eine zeitnahe Überführung in das automobilen Fertigungsdesign. Für die beiden ausgewählten Fertigungsvolumen, 10 000 und 30 000 Stacks/Jahr, wurden dabei unterschiedliche Ansätze ausgewählt und verfolgt.

Das Fertigungskonzept für 10 000 Stacks ist ein Mix aus manueller, mechanischer und teilautomatisierter Fertigung mit Einsatz von Montagerobotern, bei dem Wert auf eine hohe Flexibilität für die Montage unterschiedlicher Stack-Plattformen gelegt wurde, das Erreichen der automobilen Taktzeit jedoch nicht das primäre Ziel war. Das Fertigungskonzept für 30 000 Stacks ist voll automatisiert, erreicht höchste Positionierungspräzision, beinhaltet eine hundertprozentige optische Qualitätskontrolle und zielt auf das Erreichen der automobilen Taktzeit. Die Verfahrenstechnik bietet dafür die Voraussetzungen, jedoch ist eine Steigerung der Verarbeitungsgeschwindigkeit des optischen Erfassungssystems Voraussetzung, um die Taktzeit erreichen zu können.

Eine wesentliche Limitierung in beiden Konzepten stellte die bisherige Einfahrzeit der Stacks von 4-8 Stunden dar, die einen Flaschenhals im Fertigungsablauf mit entsprechendem Anlagenaufwand erzeugte. Durch Versuche im Rahmen der Begleitforschung des Projekts konnte die Einfahrzeit auf eine Stunde gesenkt werden. Dadurch wird es möglich, den Investitionsaufwand für die benötigten Anlagen erheblich zu senken und den Fertigungsablauf deutlich zu beschleunigen.

Erfüllungsstand der technischen Ziele

Der erste Schritt zur Erarbeitung der OEM-Spezifikation war die Verständigung der Fahrzeughersteller auf gemeinsamen Systemannahmen. Das daraus abgeleitete Referenzsystem ist in Abb. 2 dargestellt.

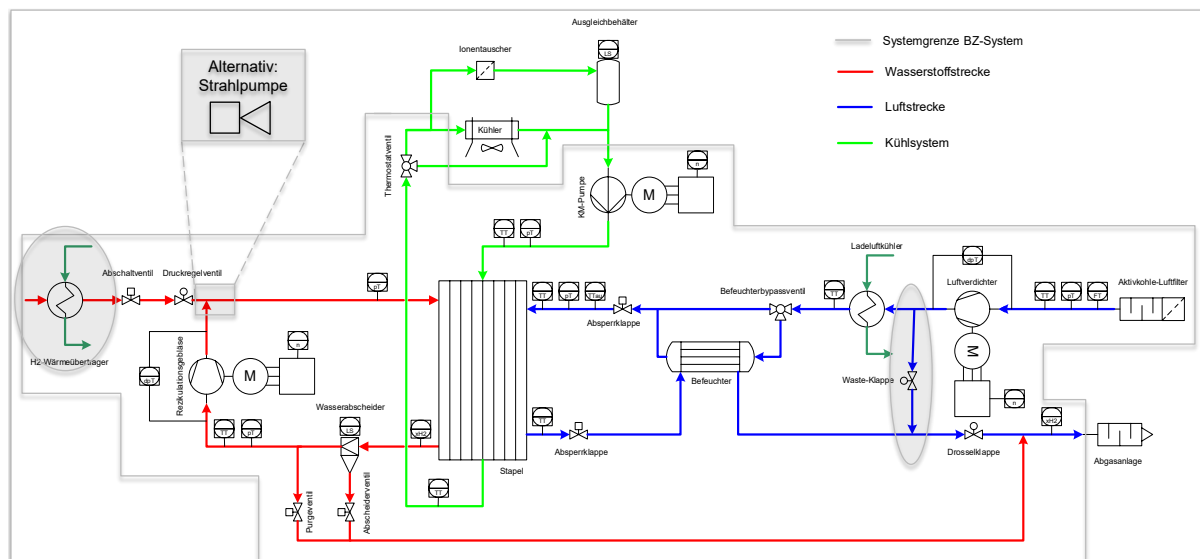


Abbildung 2 ASI-Referenzsystem als Grundlage der gemeinsamen Stack-Spezifikation

Auf Grundlage der Systemannahmen wurde eine gemeinsame Stack-Spezifikation entwickelt und vereinbart. Wesentliche Spezifikationselemente gehen aus Abb. 3 hervor.

Als weitere Voraussetzung für den Einsatz in Fahrzeugen mussten die verschiedenen Einbauanforderungen der Fahrzeughersteller analysiert und eine für alle geeignete Zell- und Stapelgeometrie abgeleitet werden.

Ausgewählte Spezifikationsmerkmale des ASI-Stacks	
Stack-Leistung	10 -150kW
Leistung des Referenz-Stacks	85kW
Spezifische Leistung	0.648mV@2.0A und 2.7bar (Anode) sowie 2,4bar (Kathode)
Zellanzahl	274
Gesamt-Pt-Beladung	0.3mg/cm ²
Leistungsdichte (Zellblock mit Verspannung)	>3.8kW/l
Stack-Lebensdauer	6000h
Froststartfähigkeit	-25°
Zusätzliche Funktionalitäten	Toleranz gegen Zellumkehr und CO-Eintrag
Zielkosten	30...40€/kW

Abbildung 3 Ausgewählte Spezifikationselemente und Entwicklungsziele

Das Skalierungskonzept, das auf dieser Grundlage entwickelt wurde, soll sicherstellen, dass unterschiedliche Leistungs- und Einbauanforderungen erfüllt werden und somit die gewünschten Skaleneffekte erzielt werden können – Abb.4.

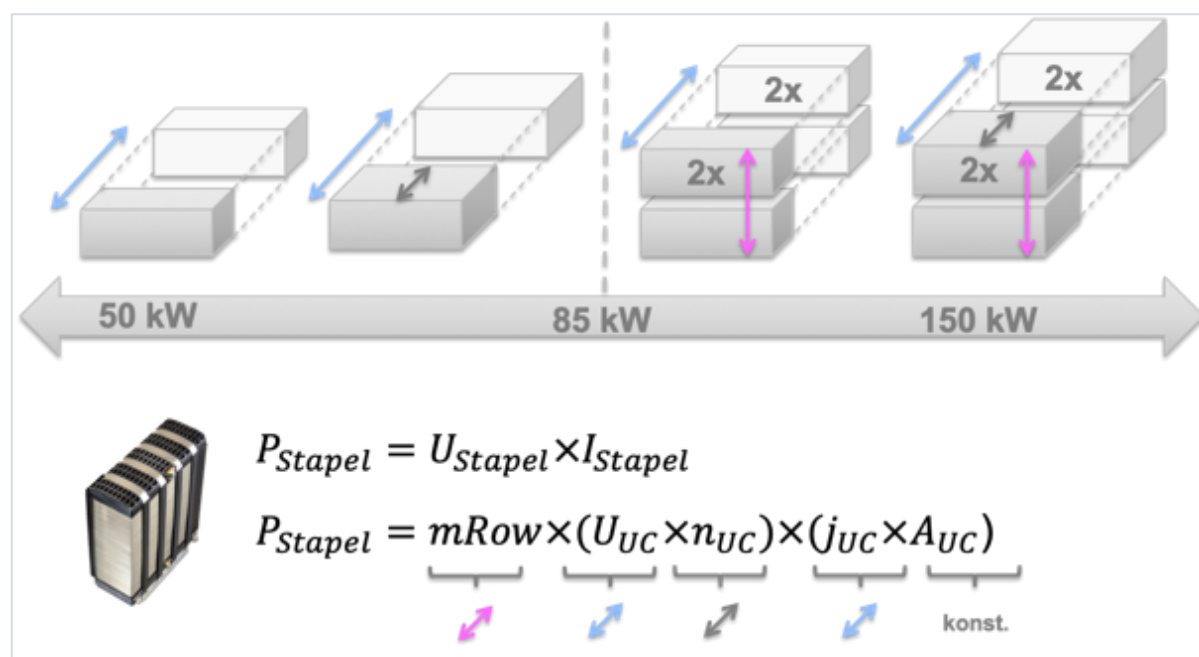


Abbildung 4 Skalierungskonzept für unterschiedliche Leistungs- und Einbauanforderungen

Die Stack-Entwicklung erfolgte in zwei Entwicklungsphasen, Evolution 1 und 2 (Evo1 und Evo2), um den für die Automobilanwendung nötigen Reifegrad erreichen zu können. Jede Entwicklungsphase wurde begleitet von einer Testkampagne zum Nachweis der technischen Eigenschaften des Stacks. Im Verlauf der Entwicklung wurden insgesamt mehr als 60 Stacks in über 30 000 Betriebsstunden mit unterschiedlichen Zielstellungen und Zyklen getestet.

Die entwickelte Stack-Technologie besitzt herausragende technische Eigenschaften. So beträgt die Leistung des ASI-Evo2-Stacks im Betriebspunkt 86.4kW bei 2.0A/cm². Der Stack kann mit einer Spitzenlast von 97.4kW bei 2.5A/cm² betrieben werden. Aufgrund dieser Daten ergibt sich eine Stack-Leistungsdichte des Zellblocks mit Endplatten von 4.2 bzw. 4.7kW/l.

Für einen relevanten Vergleich des Standes der Technik für die Automobilanwendung wird von den meisten Herstellern die Leistungsdichte des Zellblocks ohne Endplatten betrachtet. Das Volumen des Evo2-Zellblocks beträgt 12.82l. Daraus errechnet sich eine Leistungsdichte von 6.7kW/l (nominal) bzw. 7.6kW/l (max.). Diese Zahlen vergleichen sich mit 5.4kW/l (max.), die von Toyota aktuell für den Mirai angegeben werden und von 4.3 kW/l (max.), die von Ballard für ihren neuen Fahrzeug-Stack angegeben werden. Beide reklamieren derzeit die höchste Leistungsdichte für sich. Auf Basis der Nominalleistung hat der ASI-Evo2-Stack eine um 24% höhere Leistungsdichte als Toyota und eine um 55% höhere Leistungsdichte als Ballard. Wählt man für den Vergleich die Spitzenleistung beträgt der Vorteil etwa 41% gegenüber Toyota und 77% gegenüber Ballard – Abb. 5.



Abbildung 5 Leistungsdichte und Benchmark des Evo2-Designs

Die spezifizierte, automobiler Lebensdauer von 6 000h wurde unter den Bedingungen eines beschleunigten Testzyklus im Dauertest nachgewiesen - Abb. 6, rechte Seite. Die Degradationsrate lag nach etwa 3 500 Betriebsstunden im Dauertest je nach Parametereinstellung bei 12...13µV/h und damit im Zielbereich. Die Zellspannung konnte gegenüber ASC um 16mV über den gesamten Leistungsbereich erhöht werden – Abb.6, linke Seite.

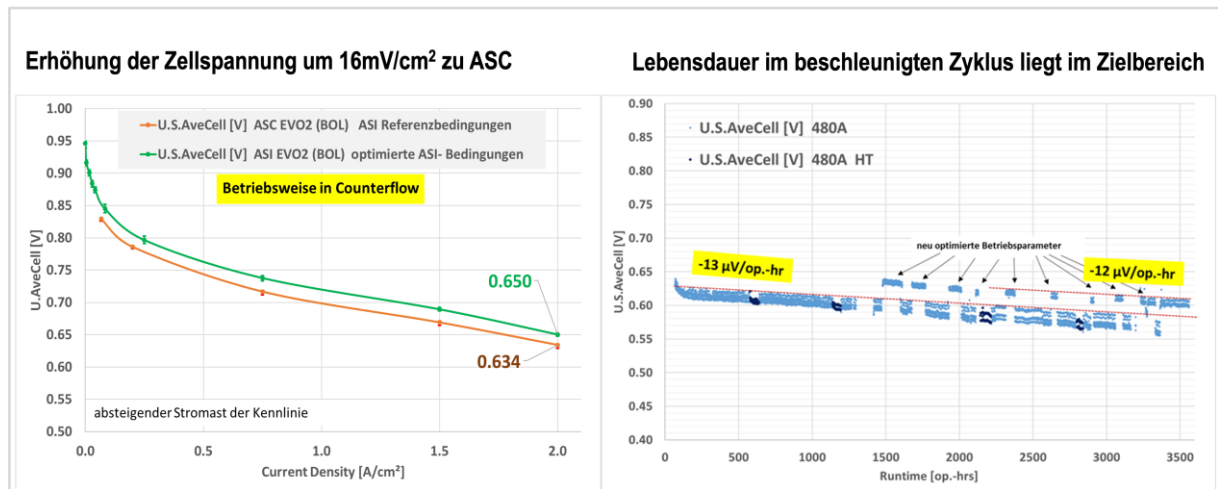


Abbildung 6 Erhöhung der Zellspannung und Nachweis der Lebensdauer im beschleunigten Testzyklus

Die intensive Arbeit an den konstruktiven Details und die Optimierung der Betriebsbedingungen bewirkten eine deutliche Verringerung der Stack-Degradation im Laufe der Entwicklung. Durch die Optimierung der Betriebsparameter konnte weiteres Potential in Bezug auf Leistung und Lebensdauer identifiziert werden – Abb. 7.

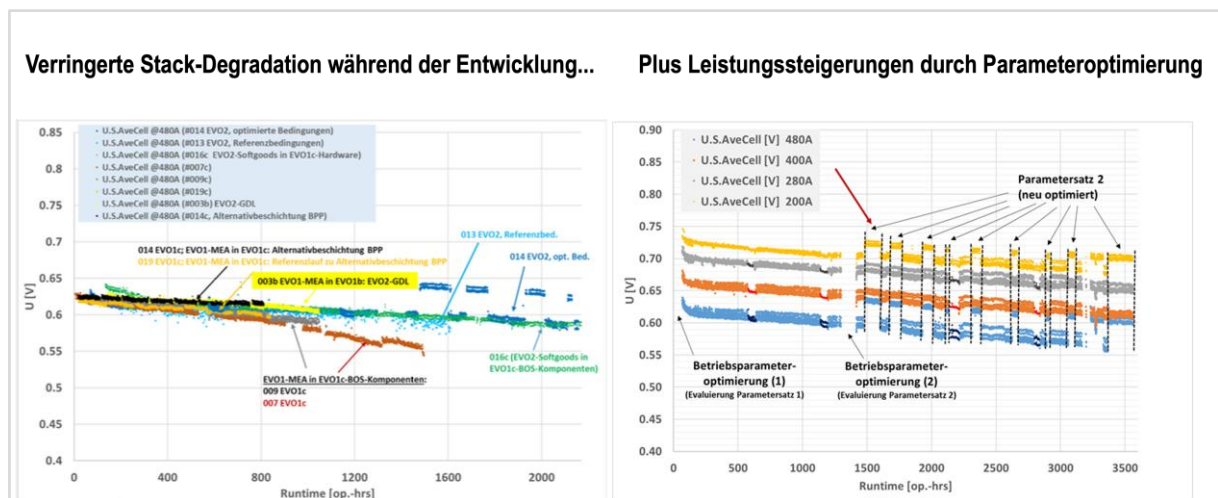


Abbildung 7 Verringerung der Stack-Degradation und Leistungssteigerungen durch Parameteroptimierung

Die Optimierung der Betriebsparameter ermöglichte außerdem eine deutliche Verbesserung der Stromdichteverteilung, die ein wesentlicher Faktor für das Erreichen der Lebensdauerziele ist – Abb. 8. Der zusammenfassende Erfüllungsstand wesentlicher Spezifikationselemente geht aus Abb. 9 hervor.

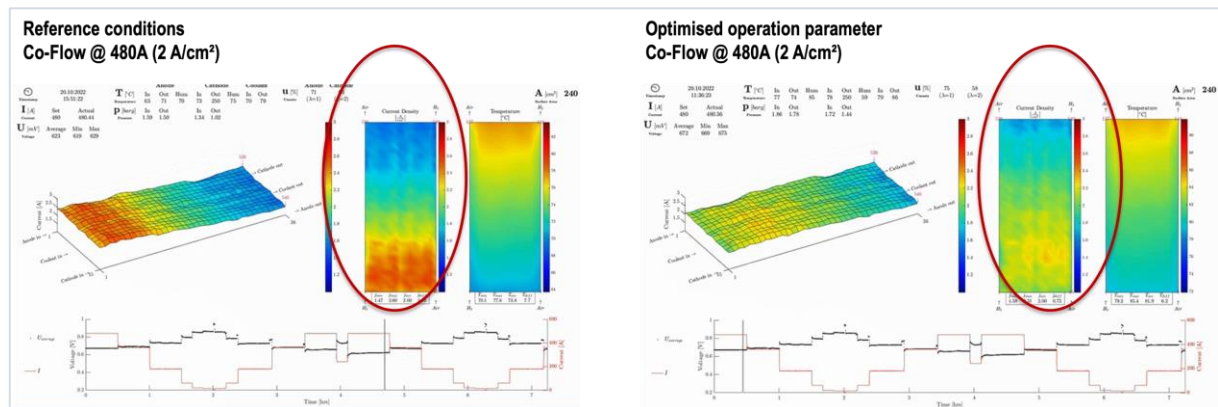


Abbildung 8 Bessere Gleichverteilung der Stromdichte durch Parameteroptimierung

	BOL	EOL
mittlere Zellspannung (bei Referenzleistung 2 A/cm²) [V]	0.648 ✓	0.570
mittlere Zellspannung (bei Hochlast 2.5 A/cm²) [V]		0.510
Betriebsstunden [op.-hr]	6000	
resultierende Degradationsrate [μV/op.-hr]	13 (validiert: 3000 op.-hr)	✓
Anzahl Luftstarts (Air/Air-Starts) [n]	2500 (validiert: 1200)	✓
tolerant gegen Zellumpolung (CRT); Stressor Froststart	Validierung auf Einzelzelebene: 0.3 A/cm² (60s, 30-mal) 1.25 A/cm² (3s, 600-mal)	✓ Validierung Froststart im Vollformat noch ausstehend
tolerant gegen CO-Konzentration (COT) [ppm]	0.25	✓
Heißbetrieb [°C]	95°C über 5% der Gesamtbetriebsstunden	✓

Abbildung 9 Erfüllungsstand wesentlicher Spezifikationselemente

Erfüllungsstand der Kostenziele

Die Fertigungskosten des ASI-Stacks liegen in der Nähe der DoE-Ziele für die automobilen Massenfertigung – Abb. 10. Die noch bestehende Differenz erklärt sich nach Auffassung des Konsortiums durch das in den Analysen von Strategic Analysis (DoE) hinterlegte extrem niedrige Pt-Beladungsziel von 0.15mg/cm² sowie die durch das DoE zugrunde gelegten generischen Fertigungsabläufe als Bestandteil der Analysemethodik. Zum Zeitpunkt der bisher letzten Kostenstudie des DoE, im Jahr 2019, existierten international noch bei keinem Hersteller etablierte Massenfertigungsprozesse.

Die Analysen und Versuche im Projekt (und den Vorgängerprojekten) haben gezeigt, dass die ASI-Spezifikationsziele in Bezug auf Leistungsdichte (Stromdichte), Lebensdauer und Robustheit (COT, CRT) mit einer solchen niedrigen Beladung nicht erreicht werden können. Ein wesentlicher Grund dafür ist der gewünschte hoch-dynamische Betrieb des Stacks, der eine große Robustheit der Auslegung erfordert.

Der zugrundeliegende technische Zielkonflikt wurde durch eine höhere Pt-Beladung gelöst, die es möglich machte, die ausgezeichnete Stack-Leistungsdichte und die Lebensdauerziele zu erreichen. Die hohe Leistungsdichte des Stacks bewirkt andererseits einen geringeren Bedarf an Aktivfläche für das Erreichen der Stack-Leistung und hat somit auch kostensenkende Wirkung. Trotz der Erhöhung der Pt-Beladung gelang es, die Kosten in Evo2 gegenüber Evo1 zu senken.

Vertiefte Kenntnis und größere Realitätsnähe der betrachteten Fertigungsprozesse in Bezug auf das Erreichen der automobilen Taktzeit, Qualitätsanforderungen und Qualitätskontrolle der Fertigung führten im Projekt zur Veränderung bisheriger Annahmen, die in einigen Teilbereichen erhöhte Kosten nach sich zogen. Es zeigte sich auch, dass die Materialkosten in den betrachteten Fertigungsvolumen bereits der dominierende und daher bestimmende Kostenfaktor sind. Die zuletzt erheblichen Kostensteigerungen bei Vormaterialien und Komponenten hatten deshalb ebenfalls direkte Wirkung auf das Ergebnis der Kostenanalyse.

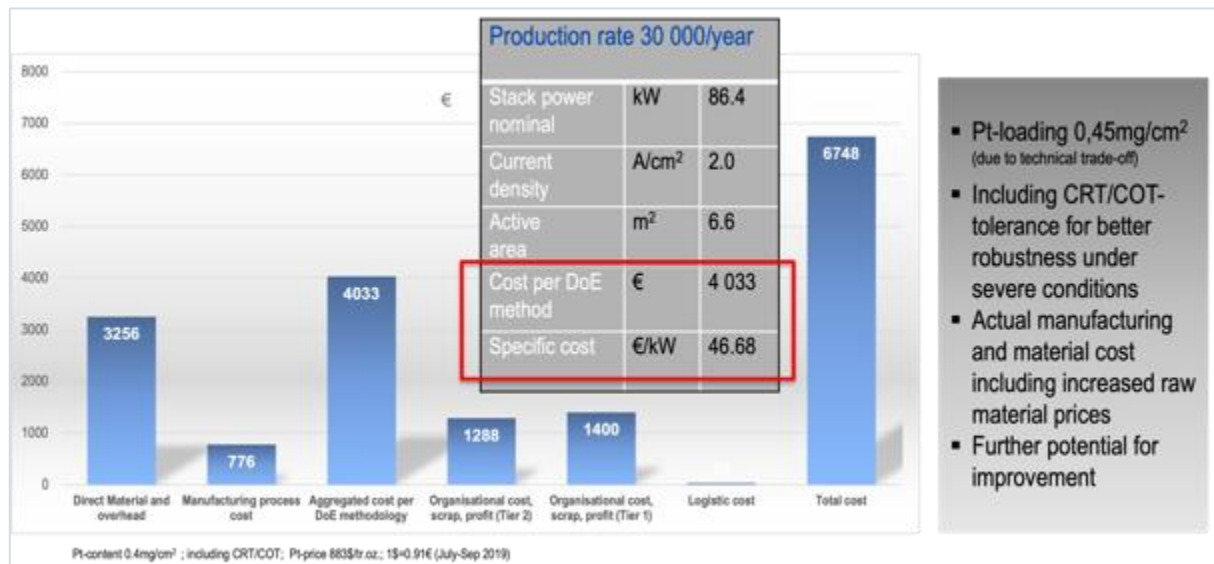


Abbildung 10 Ergebnisse der Kostenanalyse auf Basis realitätsnaher Fertigungsannahmen

Ergebnisse der Fertigungsentwicklung

Die Fertigungsentwicklung für die Stack-Montage wurde für Volumen von 10 000 und 30 000 Stacks pro Jahr in zwei Entwicklungsteams durchgeführt. Betrachtet wurden alle erforderlichen Fertigungsschritte mit Fokus auf Validierung und Nachweis kritischer Fertigungsfunktionen. In beiden parallelen Entwicklungen gelang es, geeignete Fertigungsverfahren auszuwählen und nachzuweisen, die sich für eine zeitnahe Überführung in das industrielle Fertigungsdesign eignen. Im Zentrum der Fertigungsentwicklung für 10 000 Stück stand die Roboter-Montage des Stacks, die Qualitätssicherung und Integration in ein bestehendes Fertigungssystem und eine möglichst hohe Flexibilität der Fertigung für unterschiedliche Plattformen – Abb. 11.

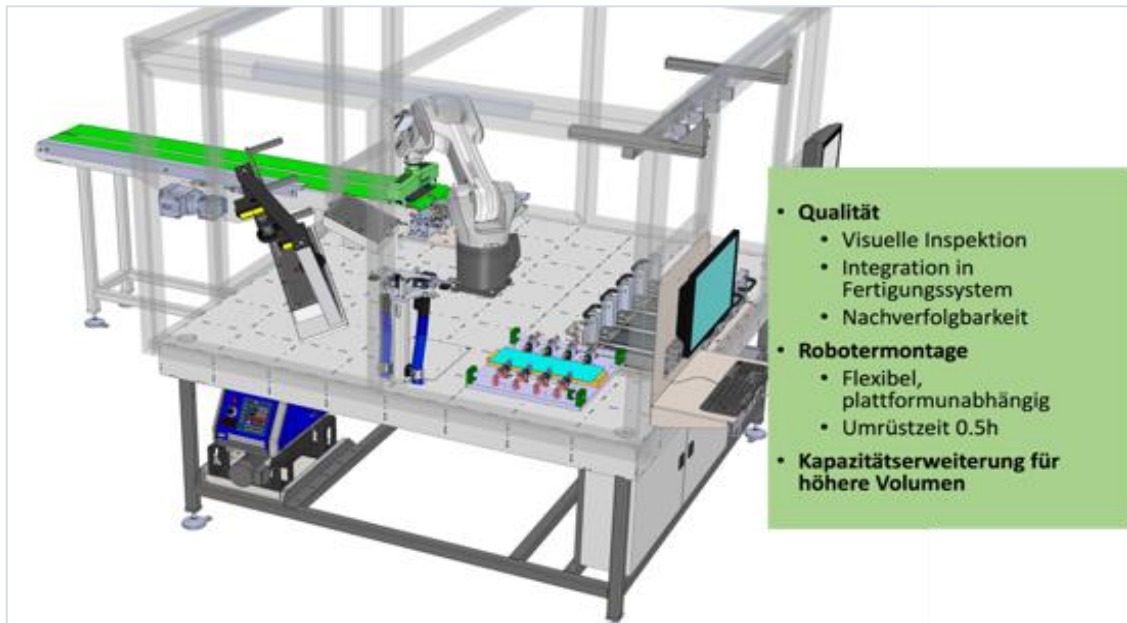


Abbildung 11 Wesentliche Ziele der Fertigungsentwicklung für 10 000 Stacks

Das Fertigungskonzept ist eine Mischung aus manuellen, mechanisierten und automatisierten Verfahrensschritten und kann schrittweise auf Fertigungsvolumen bis zu 30 000 Stacks/Jahr ausgebaut werden – Abb. 12. Es ist für die Herstellung mittlerer Volumen geeignet und zielt nicht auf das Erreichen der automobilen Taktzeit.

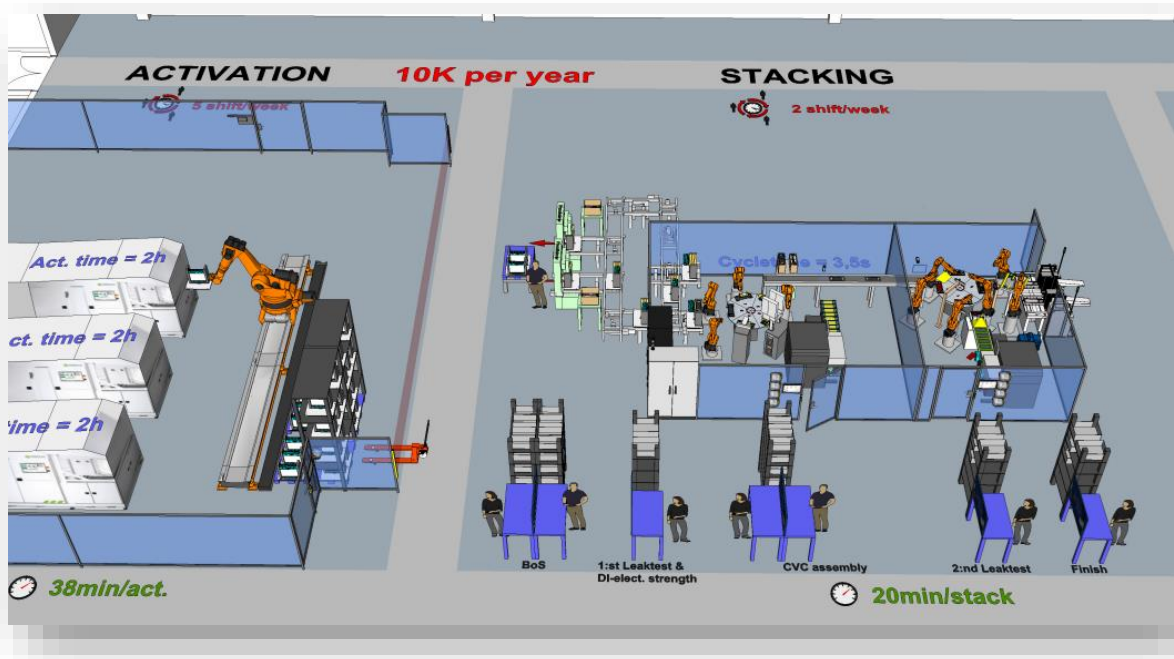


Abbildung 12 Fertigungskonzept für 10 000 Stacks unter Berücksichtigung der Stack-Aktivierung

Die Aktivierungszeit der Stacks betrug zu Beginn des Projekts zwischen vier und acht Stunden. Aus Abb. 12 ist der hohe Aufwand erkennbar, der bei einer angenommenen Aktivierungszeit von nur zwei Stunden nötig ist, wozu drei Teststände betrieben werden müssten, um das Volumen in vertretbarer Zeit zu bewältigen. Die in der Begleitforschung des Projektes erreichte Verkürzung der Aktivierungszeit auf eine Stunde hat daher wesentlichen Einfluss auf die Verkürzung des gesamten Fertigungsablaufs, die Senkung des Anlagenaufwands und somit auf die Beseitigung des Flaschenhalses Stack-Aktivierung.

Ziel der Fertigungsentwicklung für 30 000 Stacks war das Erreichen der automobilen Qualitäts- und Kostenziele sowie der automobilen Taktzeit. Die Versuchsanlage beinhaltet einen vollautomatisierten Montageablauf – Abb. 13 und 14. Sie wird von zwei Seiten beschickt. Der Transport der Montageteile im Inspektionsbereich erfolgt mittels Vakuum-Transportband und beidseitiger optischer Qualitätskontrolle. Vor der Montage durch Schwerkraft erfolgte die Fixierung der BPP und MEA mittels Laser. Die Positionierungsgenauigkeit liegt bei 0.1mm und die erreichte Taktzeit bei 2.6 sec.

Die durchgeführte Testmontage zeigte die konzeptionelle Eignung der validierten Anlagen und Verfahren. Aus den Erkenntnissen wurden Anforderungen für ihre Weiterentwicklung bzw. Optimierung abgeleitet und umgesetzt. Diese betreffen unter anderem die Beschleunigung der Rechenzeit für die optische Qualitätskontrolle, die Nutzung effizienterer Transportverfahren für die Montageteile, Teilezufuhr- und Vereinzelungsverfahren sowie die Beschleunigung der Laserverbindungstechnik. Sie sind Voraussetzung für das Erreichen der Taktzeit von 0.1 sec in der Stack-Montage. Die bereits erreichte Verkürzung der Stack-Aktivierungszeit auf eine Stunde ist von noch größerer Bedeutung für den Fertigungsablauf und Investitionsaufwand bei diesen Volumen.



Abbildung 13 Versuchsanlage für die Montage von 30 000 Stacks/Jahr

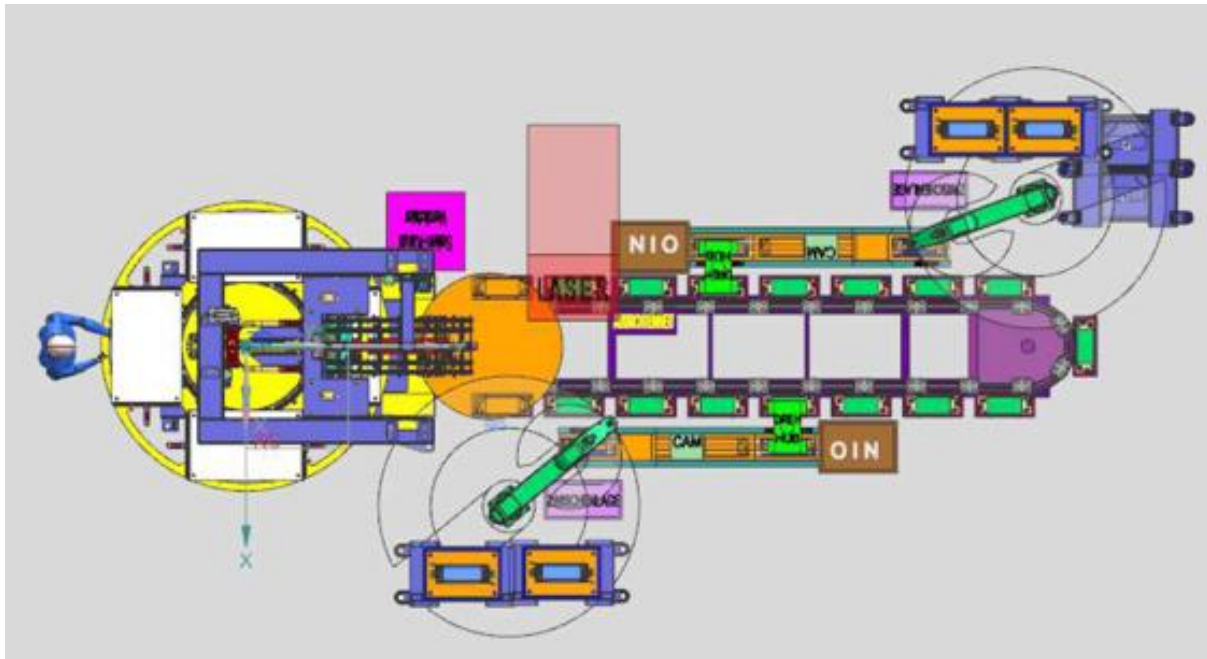


Abbildung 14 Anlagen-Layout und Fertigungsablauf für 30 000 Stacks

2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse, Verwertungsplan

Mit Abschluss der Evolution 2 ist es dem ASI-Konsortium gelungen, einen automobilen Hochleistungs-Stack zu entwickeln, der in allen wichtigen Leistungsparametern eine internationale Spitzenstellung einnimmt und die Lebensdauerziele der Automobilindustrie erfüllt. Die überlegene Stack-Leistungsdichte, das Skalierungskonzept für unterschiedliche Leistungsanforderungen und Einbaubedingungen sowie neue Funktionalitäten für den Betrieb unter schwierigen Einsatzbedingungen eröffnen vielfältige Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlichen Fahrzeugklassen und Modellen sowie darüber hinaus in zahlreichen anderen Anwendungsfällen.

Aus den ASI-Kostenuntersuchungen auf Komponenten- und Stack-Ebene wurde deutlich, dass bereits Fertigungsvolumen von einigen 10 000 Stacks/Systemen ausreichend sind, um nahezu wettbewerbsfähige Fertigungskosten für den Automobilbau zu erreichen. Trotz gestiegener Material- und Rohstoffpreise sowie der neuen Stack-Funktionalitäten liegen die direkten Herstellkosten des Stacks in der Nähe der DoE-Kostenziele. Das Komponenten- und Stack-Design bietet daher beste Voraussetzungen für eine kommerzielle Verwertung durch die am Projekt beteiligten Autohersteller und Zulieferer sowie andere Anwender.

Die Konsortialpartner haben eine Potentialanalyse für die industrielle Nutzung des ASI-Stacks in anderen Anwendungsgebieten als PKW ausgearbeitet².

² Martin, Jörissen, 2020, „Anwendungspotential des ASI-Stacks in sonstigen industriellen Anwendungen“ – Bericht für NOW und PTJ

In dieser Analyse wurden die folgenden potentiellen Anwendungsgebiete für den Stack ermittelt:

- Kommerzielle Flugzeuge (Antrieb und APU)
- Leichte Flugzeuge
- Baumaschinen wie Raupenschlepper, Bagger, Radlader
- Industriestapler der Klassen 1, 4, 5 und 7
- Leichte Transporter
- Marineanwendungen Schiffsneubau alle Kategorien (Antrieb und APU)
- Boote und Yachten
- Mittlere und schwere LKW sowie Busse
- Eisenbahnfahrzeuge (Antrieb und APU)
- Traktoren und selbstfahrende Landmaschinen
- Rechenzentren
- Notstrom- und USV-Versorgung
- Mobilfunktürme.

Die Fertigungsvolumen in Anwendungen, wie Lieferfahrzeuge, Schwerlastfahrzeuge, Gabelstapler und unabhängige Stromerzeugung sind interessant und können besonders in der Markteinführungsphase einen spürbaren Beitrag zum schnellen Volumenaufbau leisten – Abb. 15.

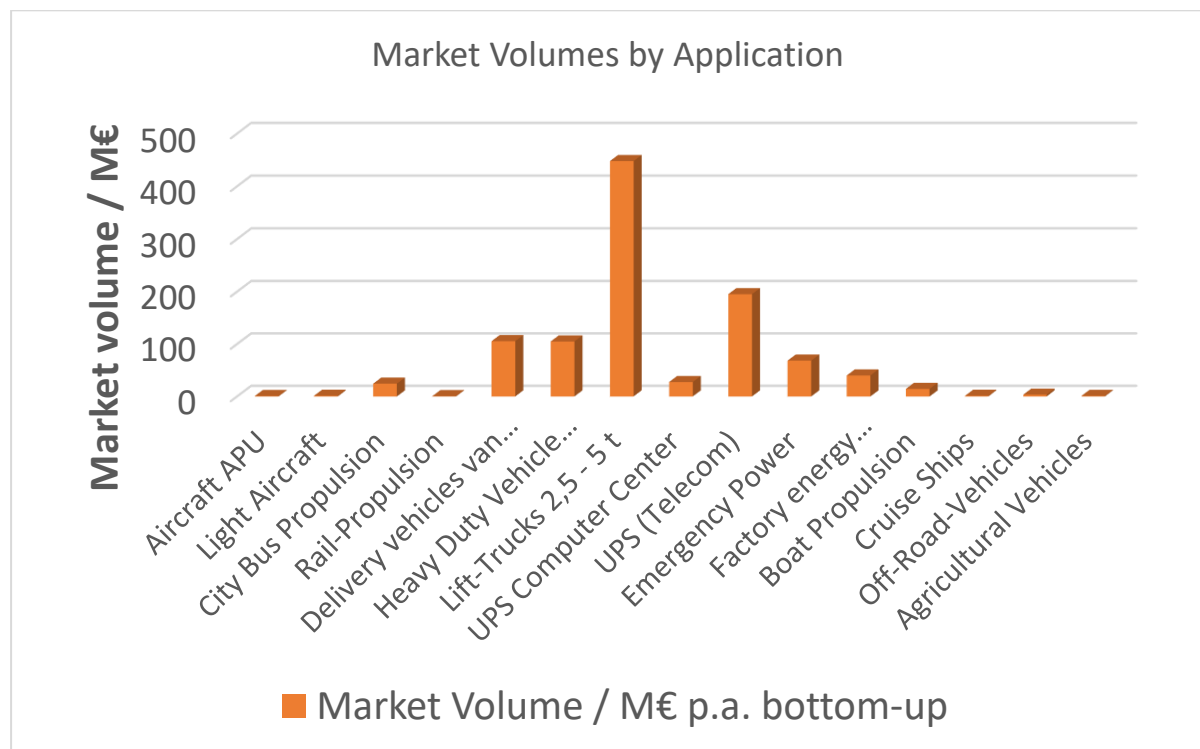


Abbildung 15 Marktvolumen potentieller Anwendungen für den ASI-Stack

Die Zielkosten der betrachteten Anwendungsfälle liegen in allen Fällen höher, z.T. erheblich höher als für PKW, was die Einführung von Brennstoffzellen bei niedrigeren Stückzahlen (höheren Stückkosten) in der Markteinführungsphase erleichtert. Fahrzeugflotten oder industrielle Anwendungen benötigen nur eine punktuelle Betankungsinfrastruktur, die eigenständig errichtet und betrieben werden kann.

Das globale Anwendungspotential umfasst viele Industriebereiche, die in Zukunft von der Robustheit und Wirtschaftlichkeit dieser Automobiltechnologie profitieren können. Es besitzt insgesamt eine Größenordnung von 40...45 Mio. Einheiten pro Jahr in unterschiedlichen anwendungstypischen Leistungsklassen. Normiert auf 85kW-Module des ASI-Referenz-Stacks beträgt das Gesamtpotential etwa 13 Mio. Stück pro Jahr.

Das Verwertungskonzept des Konsortiums ermöglicht die Nutzung von Komponenten oder des integrierten Stacks durch die Projektpartner. Damit ist eine hohe Flexibilität für die Nutzung der gemeinsamen Entwicklungsergebnisse in unterschiedlichen Nutzungsoptionen gegeben. Die Zulieferer sind sowohl bei Nutzung des kompletten Stacks als auch bei ausschließlicher Nutzung von Komponenten durch potentielle Anwender an der Verwertung beteiligt.

Die Nutzung der Stack-Technologie in der PKW-Anwendung wird durch die Portfolio-Politik der einzelnen Unternehmen bestimmt. Sie ist bei den deutschen Herstellern im Unterschied zu einigen wichtigen asiatischen Akteuren nach wie vor eher zurückhaltend, trotzdem die Vorteile der Technologie bei Robustheit und Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes, bei den Infrastrukturanforderungen, der Betankungszeit und im Rahmen der Gesamtenergiestrategie bei Betrachtung der relevanten Fakten offensichtlich sind.

Der zuletzt von einigen deutschen Akteuren immer wieder reklamierte Wirkungsgradnachteil von BZ ist bei einer systemischen Betrachtung der Wirkungsgradketten im Energiesystem, insbesondere der zu erwartenden Bedeutung von Energiespeicherung, nicht mehr gegeben bzw. wird deutlich verringert.³

Das überlegene ASI-Stack-Design und die sehr wettbewerbsfähigen Kosten bilden ausgezeichnete Voraussetzungen für den Zugang zu allen potentiellen Einsatzbereichen.

2.3 Allgemeiner Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

International ist erkennbar, dass sich der Brennstoffzellenantrieb bei einigen asiatischen Herstellern (Toyota, Hyundai, Honda...) als fester Bestandteil des Portfolios sowohl für PKW als auch für Trucks und Busse etabliert hat.

China, das einer der Hauptproduzenten von Fahrzeugbatterien ist und lange Zeit den politischen Schwerpunkt auf BEV legte, hat seine Strategie seit einigen Jahren in Richtung deutlich größerer Technologieoffenheit geändert. Chinesische Unternehmen spielen deshalb auch bei der Entwicklung von Brennstoffzellen inzwischen eine wichtige, wenn auch bei weitem nicht so dominante Rolle wie bei Batterien. Beispiele dafür sind Hyzon und Refire.

³ Vgl. Tillmetz, Martin, 2022, „Wasserstoff auf dem Weg in die Elektromobilität“, S.119

Neben Wasserstoff spielt auch Methanol eine Rolle als flüssiger Kraftstoff und hat sich in China bereits in einigen Anwendungen etabliert.

Insgesamt hat sich das industrielle Moment für Wasserstoff und Brennstoffzellen weiter verstärkt und konsolidiert. Beispiele dafür sind Johnson Matthey, die den Bau einer Gigawatt-Fabrik für Brennstoffzellenkomponenten angekündigt haben. Bosch und Maximator kooperieren bei der Entwicklung von Wasserstofftankstellen und wollen bis 2030 die Technik für 4000 Wasserstofftankstellen bereitstellen. Bosch beabsichtigt außerdem, bis 2030 insgesamt 500 Mio. € in die Entwicklung eigener Komponenten für die Wasserstoffnutzung zu investieren. Bemerkenswert ist ebenfalls das Engagement von Amazon für erneuerbaren Wasserstoff im Rahmen ihres „Climate Pledge Funds“.

Auch im Bereich der Luftfahrt, von Industriestaplern, bei Marineanwendungen, bei PKW und LKW, Bahnanwendungen und der Stromversorgung sind Entwicklungen für den Einsatz von Brennstoffzellen im Gang bzw. erste Demonstratoren oder Flotten im Einsatz. Die Europäische Kommission hat mit den „Important Projects of Common European Interest“, in deren Rahmen kürzlich 41 Wasserstoffgroßprojekte für ganz Europa genehmigt wurden, eine bedeutende Initiative angestoßen. Diese Entwicklungen stehen in bemerkenswertem Kontrast zur Haltung vieler deutscher Fahrzeughersteller.

Erkennbar ist, dass der BZ-Antrieb aufgrund von Leistungsanforderungen und Reichweite für Heavy-Duty-Transportapplikationen inzwischen durch viele Hersteller favorisiert wird. Berücksichtigt man die bisher nicht im Ansatz gelösten infrastrukturellen und logistischen Herausforderungen eines flächendeckenden Ladenetzes für BEV, die Versorgungssicherheit mit kritischen Batterie-Rohstoffen, wie Lithium, Kupfer und Kobalt sowie die generell erhöhte Aufmerksamkeit für die Resilienz von Lieferketten sprechen weitere wichtige Gründe für eine Diversifizierung elektrischer Antriebsvarianten.

Trotz der gegenwärtigen Euphorie und Schwerpunktsetzung für batterie-elektrische Antriebe bei PKW insbesondere in Deutschland muss bei Beurteilung der maßgeblichen Kriterien zukünftig auch eine wichtige Rolle des BZ-Antriebs erwartet werden. Die zentrale Rolle von Wasserstoff als Speichermedium in einer nachhaltigen Energiewirtschaft auf Basis Erneuerbarer Energien verändert zudem die Wirkungsgradbetrachtung der Gesamtenergiekette. Im Fall der Wiederverstromung von Wasserstoff wird der derzeitige Wirkungsgradvorteil von BEV egalisiert.

3. Erfolgskontrollbericht

3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Einführung von BZ-Antrieben in Fahrzeugen ist ein Ziel der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, um die gesetzten CO₂-Reduktionsziele zu erreichen und die Effizienz des Antriebsstrangs in PKW, LNF und anderen Fahrzeugkategorien, insbesondere auch im ÖPNV, zu erhöhen. BZ-Fahrzeuge sind als Beitrag zur umweltfreundlichen und nachhaltigen Energieversorgung auch Bestandteil des Energiekonzepts der Bundesregierung.

Die im ASI-Projekt durchgeführte Stack-Entwicklung ordnet sich in diese Zielstellungen ein und kann durch die Bereitstellung einer innovativen, sehr wettbewerbsfähigen und kostengünstigen Stack-Technologie einen zentralen Beitrag für die breite kommerzielle Einführung der BZ-Technologie in Fahrzeugen und anderen Anwendungen leisten. Die Entwicklungsergebnisse werden als wichtiger Beitrag zur kommerziellen Einführung von BZ-Antrieben in Deutschland und Europa in einem zentralen Bereich der deutschen Volkswirtschaft angesehen. Im Rahmen des Regierungsprogramms der Bundesregierung ist das Projekt „AutoStack Industrie“ in der Säule „Wasserstoff im Verkehr“ angesiedelt.

Die Brennstoffzellentechnologie ist eine Basisinnovation mit grundlegender Bedeutung für die nachhaltige und umweltschonende Energieerzeugung in vielen anderen Industriebereichen und Anwendungen. Sie ist einer der Hauptpfade für die Elektrifizierung von Fahrzeugen, insbesondere solchen, die aufgrund ihres Einsatzprofils einen höheren Energiebedarf haben und auf kurze und flexible Betankung angewiesen sind. Die Europäische Kommission hat „grünem Wasserstoff“ und Brennstoffzellen deshalb in ihrer „Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe“ eine zentrale Rolle zugeschrieben.

Das Emissionsminderungspotential von BZ-Fahrzeugen auf Basis konventioneller WtW-Betrachtung liegt bei etwa 15% gegenüber CNG und 30% gegenüber Diesel⁴. Wird Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt, liegt das Einsparungspotential bei 100%. Kennzeichnend für BZ-Fahrzeuge sind dabei die typischen großen Reichweiten und die schnelle Betankung, die ähnlich wie bei konventionellen PKW weniger als drei Minuten beträgt. Die Antriebsform sorgt für eine deutliche Geräuschemissionsminderung und vermeidet lokale Emissionen. Unterstellt man eine mittlere Fahrleistung von 12 000 km pro Jahr und einen CO₂-Ausstoß von 95 g·km⁻¹ (EU-Zielwert) ergibt sich bei Einsatz von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien eine jährliche Minderung des CO₂-Ausstoßes von 1,14 t pro Fahrzeug und Jahr. Bei 30 000 Fahrzeugen ergäbe dies eine jährliche CO₂-Einsparung von 34 200 t, bei 40 Mio. Fahrzeugen eine Einsparung von 45.6 Mio. t.

Bei einem CO₂-Ausstoß von 95 g·km⁻¹ (4.1 l/100 km Benzinäquivalent) für konventionelle Fahrzeuge ergibt sich für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit einem Wasserstoffverbrauch von 0.76 kg/100 km (Toyota Mirai) eine Einsparung von Kraftstoffenergie von 1.7 MWh. Hochgerechnet auf 30 000 Fahrzeuge entspricht das einer Einsparung von 52 GWh, auf 40 Mio. PKW eine Einsparung von 69 TWh. Dies entspräche ca. 10% des aktuellen Kraftstoffverbrauchs. Bei Bereitstellung des Wasserstoffs aus erneuerbaren Quellen wird gleichzeitig der Verbrauch fossiler Kraftstoffe zu 100% ersetzt.

Die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben ist deshalb eine strategische Notwendigkeit zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie und zur Sicherung von Arbeitsplätzen. Im Unterschied zu batterie-elektrischen Antrieben besitzen Brennstoffzellensysteme eine ähnliche Fertigungstiefe wie konventionelle Antriebe. Fast 90% der Wertschöpfung von Brennstoffzellen-Stacks erfolgen in der Entwicklung und Fertigung der Hauptkomponenten Bipolar-Platte und MEA, die einen zentralen Teil der Projektaktivitäten

⁴ Vgl. LBST, Wurster, 6. Tag der E-Mobilität..., Juni 2016

ausmachen. Insgesamt ist eine hohe Dynamik beim Aufbau von Arbeitsplätzen bei den relevanten Akteuren und Industrien zu beobachten.

Unabhängig von der technologischen Schwerpunktsetzung deutscher Autohersteller ist die technologische Wettbewerbsposition der deutschen Zulieferindustrie im globalen Kontext durch die im Projekt erzielten Durchbrüche bei Stack-Leistungsdichte, -Lebensdauer sowie Funktionalität signifikant gestärkt worden.

3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, wesentliche Erfahrungen

Durch das Konsortium wurde eine Hochleistungs-Stack-Technologie entwickelt, die eine Spitzenstellung im internationalen Technologie-Vergleich einnimmt und herausragende konstruktive Eigenschaften besitzt, die bisher von Wettbewerbern nicht gezeigt wurden. Es ist gelungen, kritische Fertigungsprozesse zu entwickeln und nachzuweisen, die das Potential besitzen, die Qualitäts- und Kostenziele der Automobilindustrie zu erreichen und zeitnah in das industrielle Fertigungsdesign übernommen werden können.

Grundlage dafür war die intensive, funktions- und themenübergreifende Zusammenarbeit zwischen den Partnern entlang der Wertschöpfungskette sowie zwischen Industrie und Wissenschaft, die auf Gesamtprojektebene koordiniert wurde. Die von den Fahrzeugherstellern entwickelte und vereinbarte gemeinsame Stack-Spezifikation schuf die technische Grundlage für den Erfolg der Entwicklungsarbeiten und die Voraussetzung für das Skalierungskonzept des Stacks.

Die Zusammenarbeit zwischen den Komponentenherstellern, dem Stack-Integrator und dem ZSW ermöglichte tiefgehende Analysen technischer Fragestellungen, den Austausch kritischer Informationen und offene Diskussionen zur Erarbeitung optimaler konstruktiver Lösungen. Wesentliche Erkenntnisse wurden aus den Modell-Analysen und vor allem den umfangreichen Tests gezogen. Die Begleitforschung konnte einen relevanten Beitrag zur Erklärung technischer Phänomene liefern. Es gelang, die Stack-Aktivierungszeit deutlich zu verringern und damit einen kritischen Beitrag zur Fertigungsentwicklung zu leisten.