



Funded by
the European Union
NextGenerationEU

Supported by:

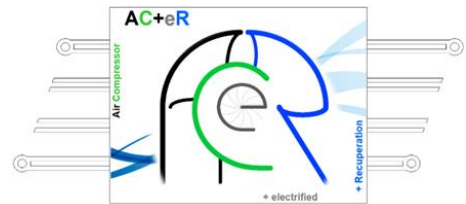


Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

Anlage 2
(zu Nr. 8.2 NKBF 98)

Abschlussbericht zu Nr 8.2
Teil I und Teil II
 zum Verbundvorhaben
BZ_Turbolader
 Teilvorhaben
IHI Charging Systems International GmbH



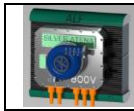
Zuwendungsempfänger: IHI Charging Systems International GmbH	Förderkennzeichen: 19I21046A
--	--

Vorhabenbezeichnung: (Thema)
BZ_Turbolader – Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen; Teilvorhaben: Neuentwicklung eines Turbo-Aufladesystems und Reduzierung der Herstellkosten durch materialoptimierte Komponentenauslegung und fertigungsoptimierte Konstruktion.

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 bis 31.12.2024	Berichtszeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2024
---	--

	Abteilung	Name / Unterschrift	Datum
Erstellt:	IHI Charging System Intl. GmbH	D. Filsinger	20.07.2025

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 19I21046A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



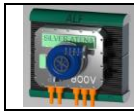
Inhalt

I. Kurze Darstellung zu

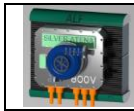
1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	9
3.1 Projektschwerpunkte, Inhalte der Forschung und Entwicklung	9
3.2 Methodisches Vorgehen und Phasenplanung	9
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	13
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
Literatur zu Teil I	18

II. Eingehende Darstellung zu

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	20
1.1 Einleitung	20
1.2 Anforderungsanalyse und Technologiebewertung über „Total Cost of Ownership“ Betrachtungen	21
1.2.1 Systemmodellierung	22
1.2.2 Anforderungen	25
1.2.3 Bewertung der Total Cost of Ownership	27
1.3 Designkonzept und architektonische Gestaltung	30
1.3.1 Systemrad / zusammengeführtes Rad / Merged Wheel	32
1.3.2 Hybridlagersystem	34
1.3.3 Stator mit direkter Gaskühlung	35
1.3.4 Nutzenloser Stator mit Ringwicklung	36



1.4 Komponenten- Subsystem- Systemverifikation und Subsystemvalidierung	38
1.4.1 Untersuchungen am Systemrad	41
1.4.1.1 Aerodynamische Untersuchungen	43
1.4.2 Hybridlagersystem	45
1.4.2.1 Validierung der Lageraufnahme und Messung der Wellenbewegung	46
1.4.3 Wärmemanagement	49
1.5 Systemvalidierung und weitere Untersuchungen	52
1.5.1 Wellenbahnmessungen	53
1.5.2 Performance	54
1.5.3 Wärmemanagement	56
1.5.4 Weitere Untersuchungen	58
1.6 Kostenbetrachtungen	61
1.7 Zusammenfassung	62
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	66
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	67
4. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	70
5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11	71
Literatur zu Teil II	73
Verzeichnisse / Berichtsblätter	79



I. Kurze Darstellung zu

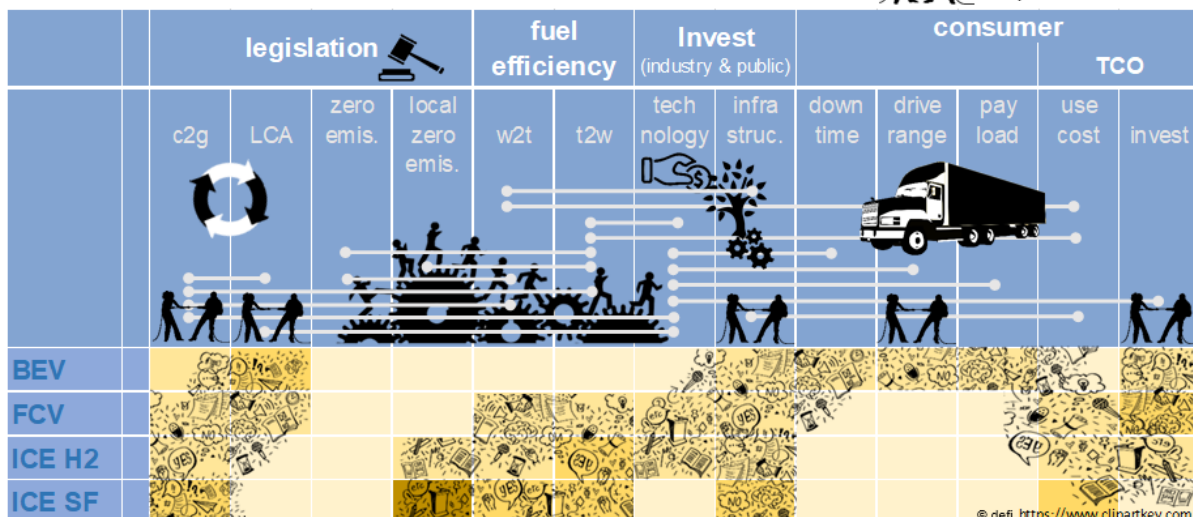
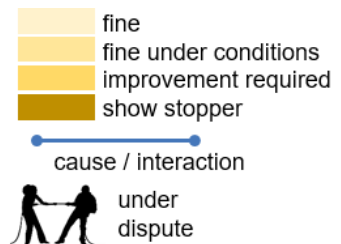
1. Aufgabenstellung

Die wirtschaftliche Nutzbarmachung von grünem Wasserstoff als einem speicherbaren Energieträger für automobile Anwendungen kann einen wesentlichen Beitrag für die Umsetzung des internationalen Klimaziels der Treibhausgasneutralität leisten. Marktanalysen, wie die Studie zu den Potenzialen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie [1], sehen hierbei insbesondere für mobile Anwendungen im Bereich der Nutzfahrzeuge Potentiale. Zur Erschließung dieser Potentiale sind jedoch aus Kosten- als auch aus Wirkungsgradgesichtspunkten mindestens vergleichbare Leistungswerte zu herkömmlichen als auch batterieelektrischen Antrieben notwendig.

Propulsion systems

- Battery Electric Vehicles:
- Hydrogen Fuel Cells and electric drive:
- Internal Combustion Engine with hydrogen:
- Internal Combustion Engine with synthetic fuel:

BEV
FCV
ICE H2
ICE SF



LCA: Product Life Cycle Analysis; c2g: cradle-to-grave: product + utilization; local zero emissions = tail pipe emissions; w2t: well-to-tank; t2w: tank-to-wheel; TCO: Total Cost of Ownership.

Abb 1: Qualitative Bewertung möglicher Antriebe für mobile Anwendungen unter den Aspekten Gesetzgebung, Brennstoffausnutzung, Investitionen und Kundennutzen mit der Annahme, dass grüne Energieträger Verwendung finden; Wechselwirkungen und Bereiche, die stark diskutiert werden, sind kenntlich gemacht (eigene Darstellung).

Je nach Wichtigkeit der Aspekte: Emissionsgesetzgebung, Brennstoffausnutzung, Gesamtlebensdauer, Kundennutzen, aber auch notwendige privatwirtschaftliche und gesellschaftliche Investitionen, wie sie in **Abbildung 1** für batterieelektrische (BEV) und Brennstoffzellen (FCV) Antriebe sowie Wasserstoff Verbrennungsmotor (ICE H2) und Verbrennungsmotor mit synthetischen Brennstoffen (ICE SF) qualitativ vergleichend bewertet sind, werden unterschiedliche Technologien präferiert. Entscheidend sind Betriebskosten (use cost / OPEX) und Investitionskosten (invest / CAPEX), die sich zu den Gesamtlebenskosten (Total Cost of Ownership, TCO) summieren. Technologieentscheide werden auf dieser Basis getroffen. Sind in einer An-

wendung die Betriebskosten entscheidend, wird Technologie mit bester Brennstoffausnutzung präferiert werden; bilden die Investitionen den Hauptanteil für die Gesamtlebensdauerkosten, wird möglichst einfache, kostengünstige Technologie verwendet werden.

In der Betrachtung aller Kosten (TCO-Betrachtung) ist der Brennstoffzellen-Antrieb für Anwendungen in Nutzfahrzeugen derzeit noch nicht wirtschaftlich. In der referenzierten Roland-Berger-Studie wird dargelegt, dass in den letzten Jahren zwar eine Senkung der Herstellkosten um etwa 50% erreicht werden konnte, welche jedoch bisher nur sehr wenige Brennstoffzellen-Anwendungen unter sehr spezifischen Bedingungen konkurrenzfähig zu konventionellen Antriebssystemen machen. Daher wird in dem Segment der Langstrecken-Nutzfahrzeuge auf Grund der hohen Einsatzzeiten ein erster Markteinstieg erwartet. Hierbei sind insbesondere leistungsstarke Zugmaschinen („Heavy-Duty Trucks“) zu adressieren, bei denen die hohen Anfangsinvestitionen in der TCO-Betrachtung durch die hohen Betriebskosten schneller kompensiert werden.

Im Wirkungsgradvergleich bzw. in der Energie-Effizienz der Antriebssysteme liegt der zweite wesentliche Ansatzpunkt für die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellensystemen. Dabei werden sehr oft die Komponenten des Systems Brennstoffzelle individuell auf hohe Dynamik und Spitzenlasten mit dem Ziel optimiert, dass die Brennstoffzelle im Antriebsstrang den Verbrennungsmotor ersetzt. Dementsprechend sind auch die Blickwinkel zahlreicher Veröffentlichungen [2] meist von der Fahrzeugseite, einzelne Komponenten werden sehr oft wenig differenziert, quasi als Black-Box betrachtet.

Es ist jedoch jede Komponente für sich auch kostenseitig und energetisch optimierbar. So kann der Lösungsansatz der IHI Charging Systems International GmbH zur Brennstoffzellenluftversorgung mit Rekuperation durch eine Turbine im Vergleich zu reinen Kompressor-Systemen durch die Nutzung der Abgasenergie den Energiebedarf der Luftversorgung um bis zu 40 % reduzieren [3]. Die Integration eines solchen Turboladers wurde bereits gemeinsam mit Daimler für den Pkw-Bereich im GLC F-Cell Modell erprobt und konnte seine energetischen Vorteile nachweisen [4]. Mit Blick auf die derzeit hohen Kosten der auf Dynamik und Performance optimierten Komponente wurde die Lösung aber als kaum wirtschaftlich skalierbar eingeschätzt. Die Bewertung ergab eine notwendige Kostendegression um einen Faktor ca. 5.

Durch ein im Rahmen des Projektes auf Senkung der Herstellungskosten optimiertes Design und eine produktionsoptimale Auslegung der Brennstoffzellenluftversorgung ist eine derartige Kostendegression realisierbar. Ansatzpunkt ist dabei zudem, die Leistungsanforderungen an die Komponente bestmöglich an die Anwendung anzupassen. So können z.B. durch die Verwendung einer Pufferbatterie extreme Dynamikanforderungen und hohe Spitzenlastleistungsanforderungen vermieden oder zumindest gesenkt werden.

Idee des Projektes ist die Entwicklung eines Luftversorgungssystems für Brennstoffzellen, welches die elektrifizierte Verdichter Technologie mit Rekuperation durch eine Turbine als energieeffiziente Technologie einsetzt. Die Reduzierung der Herstellkosten wird durch eine anwendungsadaptive gesamthafte mechanische und elektrische

Systemauslegung, Integration und Zusammenführung von Funktionen sowie eine materialoptimierte Komponentenauslegung in Verbindung mit einer fertigungsoptimierten Konstruktion ermöglicht.

Ziel des Projektes ist es, die wirtschaftliche Attraktivität der Brennstoffzellen-Technologie wesentlich zu erhöhen. Das im Ergebnis des Projektes entwickelte rekuperative Luftversorgungssystem mit Fokus auf kostenoptimalem Design, optimierter Leistungselektronik und integraler Steuerung wird erstmalig einen wirtschaftlichen Betrieb von Brennstoffzellen in Nutzfahrzeugen durch eine drastische Kostenreduzierung im Vergleich zu aktuell verfügbaren Komponenten und eine gleichzeitige Steigerung der Systemeffizienz im Vergleich zum aktuellen System ermöglichen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Fahrzeugindustrie steht vor einem tiefgreifenden Wandel. Neue Mobilitäts- und Logistikkonzepte sowie neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte bedingen und verändern sich gegenseitig. Dies stellt die Zulieferindustrie vor die Herausforderungen eigenständig strukturelle Innovationen durch innovative Komponentenentwicklungen voranzutreiben. Ein zentrales neues Antriebskonzept, nämlich der Brennstoffzellen-Antrieb, ist in den vergangenen Jahren durch relativ gesehen zu geringe Effizienz- und Kostenfortschritte zunehmend ins Hintertreffen geraten und wird gemeinhin zwischenzeitlich vor allem als alternative Antriebstechnologie für Nutzfahrzeuge und „Long-Range-Applications“ gesehen.

Mit dem geplanten Projekt setzen die Projektpartner in dieser Situation mit dem Vorhaben an, für eine wesentliche Komponente des Brennstoffzellen-Antriebes kostenseitig die bisherigen Herstellkosten drastische zu senken und gleichzeitig den Wirkungsgrad mindestens konstant zu halten. Damit wäre aus Sicht des Brennstoffzellen-Antriebs ein wesentlicher Schritt in Richtung wirtschaftlichem Einsatz möglich, wobei durch die zusätzlichen steuerungsseitigen Optimierungen hinsichtlich maximaler Druckbeaufschlagung und Spitzenlastvermeidung die Lebensdauer der Brennstoffzelle zudem erhöht werden kann.

Mit der erfolgreichen Realisierung des Vorhabens zielen die Partner darauf ab sich zusätzlich bzw. langfristig kompensierend zu ihren bisherigen Leistungsfeldern neue Absatz- und Produktsegmente für alternative bzw. innovative Antriebslösungen zu erschließen. Damit wird der Strukturwandel der Fahrzeugindustrie innerhalb der Verbundpartner und Auftragnehmer ebenso vorangetrieben wie auch der Wandel der Branche selbst. Denn aufbauend auf den Projektergebnissen werden Brennstoffzellen-Hersteller ebenso wie Fahrzeughersteller in die Lage versetzt, ihre Antriebs- und Fahrzeugkonzepte neu zu denken. Insbesondere gilt dies in Bezug auf die erarbeiteten Gesamtsystemtopologien sowie die entwickelten Konzepte der anwendungsspezifischen Systemauslegung für das Kostensenkungspotential.

Wie in der Problemdarstellung kurz angesprochen, wurde die Umsetzbarkeit des turbinenunterstützten Luftladesystems bereits von IHI gemeinsam mit Daimler für den PKW-Bereich im GLC F-Cell Modell erprobt [4]. Die Besonderheit ist hierbei die erstmalige Nutzung der kinetischen Energie des erhitzten Abgasstroms der Brennstoffzelle mittels einer Turbine in einer mobilen Anwendung, welche mit dem Kompressor der Brennstoffzellenluftversorgung gekoppelt ist. Die entstandene Lösung wurde mit Blick auf die hohen Kosten als nicht wirtschaftlich und somit als nicht großserientauglich eingeschätzt. Da aber die grundlegende Umsetzbarkeit des technischen Prinzips nachgewiesen werden konnte, gilt es nun mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit, alternative technische Lösungen, Steuerungen und Komponenten für dieses Prinzip zu entwickeln.

Die Konzeption und Auslegung basiert auf dem unternehmenseigenen Stand der Technik [5, 6, 7] und auf den Anforderungen und Wirkprinzipien eines Turboladers für einen Verbrennungsmotor mit sehr schnellen Ansprechzeiten [8, 9]. In Abschnitt 4 wird darauf noch näher eingegangen. IHI ist in diesem Markt ein etablierter Anbieter und

Entwicklungspartner zahlreicher OEMs. Die Fahrkurven und Lastsituationen einer batteriegepufferten Brennstoffzelle bieten eine Vielzahl von technischen und prozesseitigen Optimierungsmöglichkeiten.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Projektschwerpunkte, Inhalte der Forschung und Entwicklung

Die Umsetzung dieser Projektziele soll durch eine konsequente Neuentwicklung des Luftladesystems unter Optimierung der Brennstoffzellen-Topologie durch folgende Entwicklungsaufgaben erreicht werden:

- I. Erforschung der Effekte und Auswirkungen der anwendungs- und lastfallbezogenen Interaktion zwischen Batteriemanagement, Brennstoffzellensystem und Aufladetechnologie im Spannungsfeld von Effizienz, Kosten, Haltbarkeit sowie Bauraum und Gewicht und deren Auswirkungen auf die Anforderungen an die Systemkomponenten.
- II. Entwicklung eines Turbo-Aufladesystems durch konsequentes Design-to-Cost unter besonderer Berücksichtigung einer produktionskonformen Konstruktion.
- III. Neuentwicklung der Leistungselektronik für Brennstoffzellen- und Luftladesysteme und eines belastungsreduzierenden Steuerungskonzepts.

Alle Ansätze dienen dazu, das Gewicht und die Herstellkosten des Luftladesystems zu reduzieren, als auch die Haltbarkeit und Energieeffizienz verbessern zu können.

Die Erprobung unter realen Bedingungen erfolgt bewusst in einem Laborversuchsstand und wird so, anders als die Felderprobung in einem Brennstoffzellenfahrzeug, ein extrem breites und kontrolliertes Spektrum von Betriebszuständen, Komponentenvarianten und Lastfällen ermöglichen. Diese umfangreiche Erprobung erlaubt Rückschlüsse auf alle vergleichbaren Brennstoffzellen und ermöglicht in Folge auch den wirtschaftlichen Einsatz der Systemlösung in weiteren Anwendungen.

3.2 Methodisches Vorgehen und Phasenplanung

Der Projektverbund zwischen Silver Atena GmbH und IHI Charging Systems GmbH bildet die wesentlichen, die Brennstoffzelle unterstützenden, energietechnischen Komponenten ab und besitzt umfangreiche praktische Erfahrungen für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern und Lösungsvarianten. Die Technische Universität Chemnitz vervollständigt den Verbund hinsichtlich theoretisch-wissenschaftlicher Kompetenz zu Technologie und Methodik. Somit ist der Zugang zu allen wissenschaftlichen, technologischen und praktischen Aspekten der Aufgabenstellung gegeben.

Der Verbund plant ein 4-phasiges Vorgehen. In der **1. Phase „Analyse“** werden die verschiedenen Erfahrungen der Partner systematisch abgeglichen, hinsichtlich Ähnlichkeiten der Prozesse, Rahmenbedingungen und Methoden analysiert und fehlende Informationen über Recherchen und Simulationen erhoben. Erfasst werden dabei Informationen zur Anwendung (Lastgang, Rahmenbedingungen, Mission), zur Technologie (Komponenten, Topologie und Algorithmen), zur Energieeffizienz (Wirkungsgrade, Leistungsbereitschaft), zur Kostenstruktur (Herstellkosten, Betriebskosten) u.v.m. Angestrebt wird einerseits eine Modellierung, welche die Analyse und damit Aussagen zu möglichst allgemeinen Anwendungen der Brennstoffzellentechnologie zulässt. Andererseits wird die Modellierung so detailliert sein müssen, damit Ableitun-

gen der Anforderungen zur ausdrücklichen Komponentenauslegung für den experimentell zu untersuchenden Anwendungsfall, der in Phase 2 konzeptioniert wird, möglich sind.

In der **2. Phase „Konzeption“** werden aus diesen Informationen Optimierungszielstellungen und Topologie-Empfehlungen für einen repräsentativen Anwendungsfall abgeleitet. Dieser umfasst eine generische Aufgabenstruktur, Methoden und Regeln zur Optimierung und Auslegung der Eigenschaften sowie Algorithmen und Maßstäbe zur Bewertung der jeweiligen Ergebnisse. Die Optimierung des Luftladesystems der IHI ist die eine Seite des Feldes, das in der Analyse der Systemvariationen betrachtet werden soll. Hier wäre es das Ziel, die Belastung, d.h. auch den transienten Betrieb des Systems, zu minimieren bzw. so zu gestalten, dass das Aufladesystem sichersten Betrieb erlaubt. Die „Gegenseite“ der multiobjektiven Optimierungsaufgabe ist eine Auslegung mit einem möglichst kleinen Puffer durch eine Speicherbatterie, auf welche Silver Atena GmbH abzielt. Diese hat besonders hohe dynamische Anforderungen an das Luftladesystem, welche ebenfalls bestimmt werden. Auf Basis beider „Grenzfälle“ können der Betrieb und die Belastung für jede Systemabstimmung dazwischen bewertet werden (Effizienz, Kosten, Haltbarkeit, Größe / Gewicht). Je nach Wichtung dieser Größen kann ein „optimales“ System oder eine optimale Topologie definiert werden. Vom Konsortium festzulegende Anwendungsfälle definieren den späteren experimentellen Versuchsaufbau.

Vor der Umsetzung möglicher Varianten in Brennstoffzellen-Topologie, Komponenten und Bauteilen werden während der Konzeptionierungsphase umfangreiche analytische und numerische Vorstudien mit angepasster Modelltiefe durchgeführt. Dabei werden Systembetrachtungen mit eindimensionalen Methoden realisiert. Detaillierte Betrachtungen von Komponenten und deren Funktion werden drei-dimensional abgebildet. Festigkeitsuntersuchungen werden mit Hilfe der Finite Elemente Analyse (FEA) erfolgen. Strömungsuntersuchungen werden mit Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt. Dabei findet kommerziell erhältliche Software Anwendung, um vorhandene Erfahrungen zu nutzen sowie den notwendigen Datenaustausch sicherzustellen und auch einfach zu gestalten. Die Modelle unterschiedlicher Tiefe werden dabei nicht unmittelbar verknüpft, sondern liefern Information, die wechselseitig abgeglichen, bzw. übergeben wird. So wird die eindimensionale Simulation des gesamten Brennstoffzellensystems z.B. Randbedingungen für die Auslegung des Brennstoffzellenturboladers erzeugen. Die Komponentenauslegung des Turboladers wird dann aber selbstverständlich mit dreidimensionalen Verfahren überprüft und bewertet. Größen zur Bewertung der Performance, also der Aerodynamik, sind Wirkungsgrad und Durchfluss für relevante Betriebsbedingungen. Ein Ergebnis ist dabei auch die notwendige Leistungsaufnahme des Verdichters, die zumindest teilweise elektrisch zur Verfügung gestellt werden muss. Zur Abschätzung der Haltbarkeit werden Kontaktdrücke zwischen den verschiedenen Bauteilen aber auch mechanische Spannungen bewertet. Teilweise werden dazu Schädigungsmodelle angepasst, um für den Betrieb eines Brennstoffzellen Turboladers anwendbar zu sein.

Die **3. Phase „Entwicklung“** umfasst die Entwicklung und Umsetzung aller für die Erprobung und Bewertung notwendigen Komponenten, Werkzeuge und Funktionen. Somit ist diese Phase mit dem deutlich größten Aufwand verbunden. Es wird einmal die prototypische Umsetzung realisiert. Parallel dazu geschieht aber auch die kon-

strukturelle Umsetzung, die für eine spätere Massenfertigung geeignet ist, da Technologieentwicklung neben Performance, Haltbarkeit, Größe und Gewicht auch die zu erwartenden Herstellkosten im Blick haben muss. Zu hohe Kosten würden einer Technologieeinführung in den Markt entgegenstehen. So sollen auch Werkzeuge und Verfahren für eine Bewertung und möglichst kostengünstige Herstellung der Komponenten entwickelt werden. Dabei werden „Design-to-Cost“ Abläufe und Prozesse rigoros angewandt.

Vor der Realisierung der Prototypen werden numerische Untersuchungen an Komponenten, Sub-Systemen und Gesamtsystem mit Hilfe von FEA und CFD durchgeführt. Zur Verifikation dienen aerodynamische, thermische, mechanische und elektromagnetische Berechnungen mit Modellen, wie sie in der Phase 2 entwickelt wurden. Tests an Komponenten, wie z.B. das Testen von Verschleißseigenschaften sind, insofern diese als notwendig erachtet werden, möglich. Aufwändig ist auch die Entwicklung der Software beim Partner Silver Atena GmbH, die ebenfalls Funktionstests vor der endgültigen Implementierung unterzogen werden muss. Als Stichwort seien hier ausdrücklich Hardware in the Loop (HiL) Untersuchungen genannt. Eine erste Prüfung und Inbetriebnahme der Komponenten im isolierten Einzelbetrieb erfolgt unter kontrollierten Laborbedingungen bei IHI Charging Systems Intl. GmbH und Silver Atena GmbH vor der Integration in das Gesamtsystem. Die dazu notwendigen (Komponenten)Prüfstände sind dementsprechend ebenfalls in der Phase 3 des Projekts aufzubauen. Der komplexe Systemprüfstand an der Technischen Universität Chemnitz mit den zugehörigen Arbeiten zur Sensorik, Aktorik, Leistungselektronik, Steuerung, Anodenkreis, Kathodenkreis, Kühlkreis, elektrische Last und Messtechnik wird in dieser Phase ebenfalls realisiert und in Betrieb genommen.

Während der **4. Phase „Validierung“** werden die Entwicklungsergebnisse prototypisch sowohl auf Ebene Luftladesystem in Tests an Prüfständen der IHI Charging Systems GmbH als auch auf der Ebene Brennstoffzellensystem an den Versuchsanlagen der TU Chemnitz unter realen Bedingungen demonstriert und erprobt. Von einer Felderprobung in einem Straßenfahrzeug wird abgesehen, da ein realer Einsatz in 6 Monaten nur unter extrem großem Aufwand die gewünschte Breite der Umgebungssituationen erreichen könnte, welche in der Prüfstandumgebung verhältnismäßig einfach simuliert werden kann (Luftdruck, Außentemperatur, Grenzlastfälle etc.). Mit der Auswertung dieser Tests wird der Nachweis der Zielerreichung und die Validierung der Ergebnisse erbracht.

Die folgende **Tabelle 1** zeigt die Terminplanung mit Phasen, Hauptarbeitspaketen und Meilensteinen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

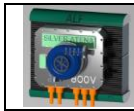
Die IHI Charging Systems Intl. GmbH (ICSI) ist eine Tochter der IHI Corporation (Tokio) und gehört zu den etablierten Anbietern von Turboladern. Ihre Mitarbeiter entwickeln, produzieren und vertreiben Turbolader für die europäische Automobilindustrie. Der Hauptsitz des Unternehmens befindet sich in Ichtershausen (Thüringen), am Standort eines der beiden hochmodernen Produktionswerke. Das zweite europäische Produktionswerk befindet sich in Cernusco, Lombardone (Italien). Das Engineering Center, Forschung und Entwicklung sowie der Independent Aftermarket für EMEA sind am Standort Heidelberg ansässig.

Die Aufladesysteme von ICSI sind bereits millionenfach bei nahezu allen europäischen Automobilherstellern erfolgreich im Einsatz. VW, Audi, Daimler, Toyota, Ferrari und andere vertrauen auf die innovativen Lösungen von IHI. Zukunftsorientierung und die damit verbundene Verantwortung, sind ein fester Bestandteil der Firmenphilosophie. IHI hat die CO₂ frei Mobilität und die damit im Zusammenhang stehende „Wasserstoff Gesellschaft“ als globale Schlüsselthemen identifiziert. Speicherung und Transport in Form von Ammoniak als auch Carbon Capture Technologien werden von IHI in internationalen Verbundvorhaben vorangetrieben. Im Zuge des strategischen Wandels der Produkte und Leistungen von ICSI hin zu alternativen Antriebskonzepten beabsichtigt das Unternehmen, die Kernkompetenz für Aufladesysteme in Anwendungen mit Brennstoffzellenantrieb zu integrieren.

Die Aufladung von mobilen Brennstoffzellen ist Stand der Technik. PEM-Brennstoffzellen stellen dabei die bevorzugte Technologie dar. Eine schöne Übersichtsdarstellung wird von Bethoux in [11] gegeben. Daher wird hier auf eine gesamthafte Darstellung zum technischen Stand von Brennstoffzellen im Allgemeinen verzichtet, sondern es wird, wie auch im Entwicklungsprojekt, wesentlicher Fokus auf das Aufladesystem und die elektronische Steuerung gelegt.





Untersuchungen über die Art der Technologie zur Verdichtung der Ansaugluft führen zum Schluss, dass im sinnvollen Druckbereich Zentrifugalverdichter besonders geeignet sind [12]. Sie zeichnen sich gegenüber alternativen Technologien durch Kompaktheit, vorteilhaftes Leistungsgewicht sowie sehr gute Wirkungsgrade, Laufruhe und eine gute Dauerhaltbarkeit aus, was in **Tabelle 2** aus [12] qualitativ bewertet wurde. Insofern ist die Weiterentwicklung und Anpassung dieser Technologie an die spezifischen Anforderungen einer Brennstoffzelle folgerichtig. IHI kann dabei auf langjährige Erfahrungen bei der Entwicklung und anforderungsspezifischen Anpassung von Zentrifugalverdichtern für Turbolader von Verbrennungsmotoren aufbauen. Siehe dazu z.B. [13] und [14].

Daimler, General Motors, Hyundai und Honda setzen Zentrifugalverdichter in ihren elektrisch unterstützten Systemen ein [15]. Wobei bekannt ist, dass die OEMs mit sehr langer Brennstoffzellenhistorie auch schon andere Verdichter-Technologien im Einsatz hatten. Sowohl Daimler [16] als auch Honda verwendeten in ersten Entwicklungen Schraubenverdichter. Beide Firmen setzen aber jetzt auf die Technologie der Zentrifugalverdichter [4]. Wesentliche Argumente sind hier Gewicht und Volumen auch für die notwendigen Schalldämpfer. Zudem werden inzwischen höhere Druckverhältnisse verlangt. Daher verwendet Honda im Clarity sogar einen zwei-stufigen Verdichter



[17]. Toyota verwendet teilweise Roots- Verdichter unter Inkaufnahme geringerer Wirkungsgrade und Druckverhältnisse [18].

Tabelle 2 aus [12]: Qualitativer Vergleich von Verdichter-Technologien; Zentrifugalverdichter, Rootsverdichter, Schraubenverdichter, Scrollverdichter. *: sehr schlecht ... *****: ausgezeichnet.

Type of Compressors				
	Centrifugal	Roots	Screw	Scroll
Compactness	*****	★★★	★	★
Weight	★★★★	★★★	★★	★★
Temperature rise	★★★	★	★★★★	★★★★
Pulsations, noise	★★★★	★★	★★★	★★★★
Compression	★★★	★★★	★★★★	★★★★
Cost	★★★★	★★★★★	★★	★★
Durability	★★★	★★★★	★★★	★★★
Average rating	3.7/5	3.0/5	2.7/5	2.6/5

Wesentlich bei der Auswahl einer geeigneten Verdichter-Technologie ist die Kenntnis, bzw. die Vorgabe des Druckverhältnisses, das vom Verdichter bereitzustellen ist. Studien, die z.B. von Yan et al [19], aber auch anderen [20, 21, 22] durchgeführt wurden, belegen, dass für PEM ein Systemüberdruck zwischen 2.5bar und 3.0bar zielführend ist. Unter diesen Bedingungen sind ein guter Wirkungsgrad sowie eine gute Leistungsdichte der Brennstoffzelle realisierbar, wie in **Abbildung 2** gezeigt ist.

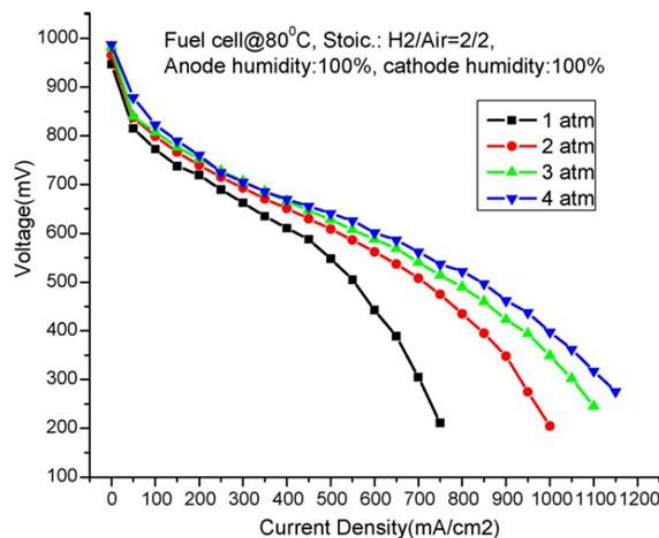


Abb 2: Grundsätzlicher Effekt des Druckes im Luftsystem einer Brennstoffzelle auf deren Performance; Bild 5 aus Yan et al, 2006 [19].

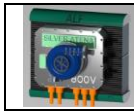
Ungeachtet dessen wird es auch Systeme geben, die entweder mit geringerer Leistungsdichte auskommen und somit bei kleineren Systemdrücken betrieben werden,

oder aber einen eher höheren Druckverlust aufweisen und so höhere Systemüberdrücke verlangen.

Das hier beantragte Projekt zielt auf ein Brennstoffzellensystem mit bestem Wirkungsgrad für den Einsatz in einem Antriebssystem. Die ausdrückliche Mission, d.h. die erwartete Betriebsdauer und typische Lastfälle sowie deren Häufigkeit, soll in der optimalen Abstimmung des Systems Berücksichtigung finden. Das von Yan et al [19] ermittelte Druckniveau ist ideal mit einem einstufigen Radialverdichter abbildbar. Ein einstufiger Radialverdichter erlaubt zudem die Kombination mit einer Turbine, welche Rückgewinnung von Energie aus dem „Abgas“ der Brennstoffzelle erlaubt. Interne Studien zeigen, dass Wirkungsgradvorteile und auch Vorteile in der Leistungsdichte des Brennstoffzellensystems erreicht werden können, wenn die einstufige Verdichtung mit einer Turbine zur Rekuperation des Abgases kombiniert wird [3]. Das gilt auch im Vergleich mit einer zweistufigen Verdichtung mit Zwischenkühlung.

In der ersten Projektphase werden trotzdem weitere Konfigurationen bewertet, Priorität hat aber immer die beste Ausnutzung der Energie des Wasserstoffs, um ein effizientes Antriebssystem abbilden zu können.

Neu im beantragten Projekt ist, dass ausdrückliches Know-How zu den Komponenten schon in der ersten Phase der Systemauslegung Berücksichtigung findet. Die Abstimmung des Systems erfolgt unter dem Aspekt der Effizienz, aber auch die Aspekte Haltbarkeit, Gewicht und Kompaktheit des Systems und im Fokus sind insbesondere die Produktkosten. Diese „Nebenkriterien“ können für den Erfolg einer Technologieentwicklung entscheiden sein. Silver Atena GmbH bringt dabei das Detailwissen bei der Entwicklung elektrischer Antrieb mit der zugehörigen Regelung ein. IHI hat Spezialwissen bei der Entwicklung von Aufladesystemen. Die TU Chemnitz führt die Untersuchungen am System, zunächst numerisch, in der abschließenden Projektphase, auch experimentell, durch. Erwartet wird, dass durch die Berücksichtigung der Mission und damit der Anwendung im Detail schon in der Definitionsphase sowie einer parallel stattfindende Detailauslegung der wesentlichen Komponenten, Aufladesystem und Elektronik mit Steuerung, zu gegenüber dem heutigen Stand der Technik vorteilhaften Konfigurationen führen wird. Vorteile können sich in Wirkungsgrad, Leistungsdichte, Haltbarkeit oder Kosten ausdrücken. Die Wichtigkeit dieser Zielgrößen wird abhängig von der angedachten Anwendung sein. Daher werden im ersten Teil der Studie Systemüberlegungen genutzt, um die Anwendung mit den dahinterstehenden Missionen festzulegen. Darauf aufbauend kann die Gewichtung der genannten Zielgrößen erfolgen. Eine Erhöhung der Technology Readiness Levels (TRL) für das umzusetzende Konzept ist vorgesehen. In jedem Fall wird eine Minimierung der Herstellkosten durchgeführt. Die missionsabhängige Systemeffizienz wird zudem in jedem Fall entscheidend für den Erfolg des Projekts sein.



5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Nachteil vieler bisheriger Entwicklungsansätze für Luftversorgungssysteme von Brennstoffzellenantrieben war eine separierte Auslegung nur auf Basis von eher pauschal vorgegebenen Gesamtanforderungen und die isolierte Konzentration auf die Luftversorgung, bzw. deren Teilkomponenten. Gleichzeitig wurden teilweise Erfahrungen und Anforderungen aus der Entwicklung von Antrieben mit Verbrennungsmotoren übernommen, die darauf abzielten, einen Eins-zu-Eins Ersatz des Verbrennungsmotors mit einer Brennstoffzelle zu erreichen. Der oftmals irreführend verwendete Ausdruck „Fuel-Cell-Engine“ ist Ausdruck dessen. Dies war notwendigerweise einem Mangel an Erfahrung und der Komplexität und Interdisziplinarität von Brennstoffzellenantrieben geschuldet.

Durch die Kooperation von Spezialisten im Bereich Turboaufladung (IHI Charging Systems Intl. GmbH) und Spezialisten im Bereich Steuerungslösungen (Silver Atena GmbH) für Brennstoffzellen- und elektrifizierte Antriebe mit einem ausgewiesenen Brennstoffzellensystemspezialisten wie der TU Chemnitz wird es den Kooperationspartnern möglich erstmalig eine Optimierung des Luftladesystems unter gleichzeitiger simulativer Optimierung des gesamten Brennstoffzellensystem zu realisieren.

Durch diesen Ansatz einer ganzheitlichen Systemoptimierung, also einer integrierten Entwicklung des Aufladesystems und dessen Steuerung zusammen mit der Brennstoffzelle sowie durch die Kooperation ausgewiesener Spezialisten für die einzelnen Systemkomponenten erwarten die Partner erhebliche Potentiale im Bereich Systemeffizienz und Komponentenkosten erschließen zu können und dadurch eine neue Qualität im Bereich Luftladesysteme für Brennstoffzellen zu erreichen. Eine Übersicht und die Zuordnung der Projektpartner sind in **Abbildung 3** zu sehen.

Die Konsortialpartner haben alle einen starken Bezug zur gewählten Themenstellung und bauen auf eine langjährige Zusammenarbeit auf. Die Industriepartner repräsentieren dabei international wichtige Zulieferer der betriebsunterstützenden Komponenten rund um die Brennstoffzelle und ergänzen sich mit den jeweiligen Kernkompetenzen ideal.

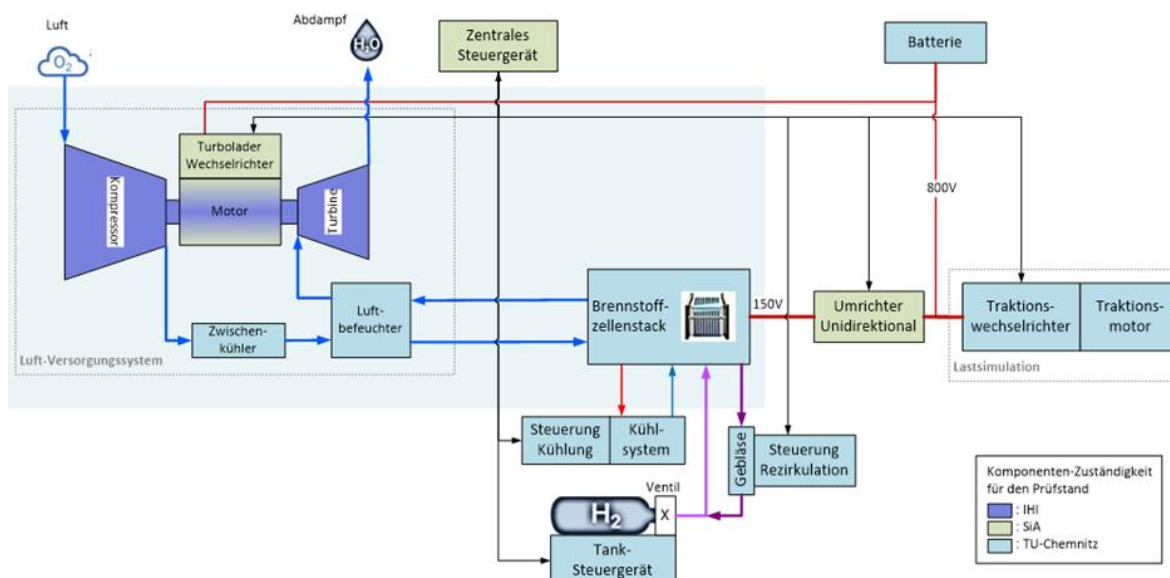


Abb 3: Topologie eines Brennstoffzellen-Antriebstranges und Zuordnung zu den Projektpartnern.

Die Silver Atena GmbH verfügt über jahrelange Erfahrungen bei der Entwicklung von Steuergeräten und Leistungselektroniken für verschiedenste Antriebssysteme im Bereich Automotiv und Aerospace. Dabei sind auch bereits in der Vergangenheit mehrfach Zielstellungen der Systemoptimierung, vorausschauender Systemsteuerung und die Verwendung neuartiger Technologien für die Leistungselektronik erreicht worden. Silver Atena GmbH hat für den H-Tron von Audi den Umrichter (150kW, 400V) entwickelt und produziert. Im Bereich Wechselrichter für Brennstoffzellen-Turboverdichter hat Silver Atena GmbH Produkte mit SiC-Technologie im Kundeneinsatz. Silver Atena GmbH verfügt über zahlreiche Hochvoltprüfstände für Leistungen bis zu 250kW. An eigenen Motorprüfständen werden Motoren vermessen und mit dem Wechselrichter optimiert.

Die Professur Alternative Fahrzeugantriebe (ALF) der Technischen Universität Chemnitz betreibt seit 2010 Forschung auf dem Gebiet der alternativen Fahrzeugantriebe mit dem Schwerpunkt Brennstoffzellenantriebe und umfasst derzeit zahlreiche wissenschaftliche und technische Mitarbeiter. Zur Professur gehören mehrere Labore zur Untersuchung von Brennstoffzellen und deren Peripherie auf Zell-, Stack- und Systemebene. Teststände im Leistungsbereich von wenigen Watt bis über 100kW ermöglichen die Vermessung von Stacks verschiedener Größen.

Für die Vermessung der kathodenseitigen Balance-of-Plant-Komponenten besteht vor Durchführung des hier beschriebenen Projekts ein Teststand für Kompressoren im Bereich bis max. 10kW Systemleistung. Die Ausstattung befindet sich aber in Erweiterung, um die Vermessung auch für Systemkomponenten hin zu größeren Systemleistungen zu ermöglichen.

Des Weiteren bestehen bei der Professur langjährige Erfahrungen im Bereich Modellierung/Simulation von Brennstoffzellen, Brennstoffzellensystemen und -antriebssträngen. Die erforderliche Software (Matlab/Simulink) für die Modellbildung und Simulation ist für Forschungszwecke vorhanden. Damit wurden für diverse Subsysteme Modelle entwickelt, um ganze Systeme abzubilden. Hardware für Steuergeräteentwicklung und Rapid Control Prototyping in Form eines HiL-Rechners und mehrerer Mikroautoboxen steht ebenfalls zur Verfügung.

Das Konsortium wird ebenfalls die Erfahrung von Schlüssellieferanten abfragen und diese in die Entwicklungstätigkeiten einbinden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind hier die Integration des Permanentmagneten in den Rotor, die fertigungsgerechte Konstruktion des Motor-Stators und dessen Integration in das Motorgehäuse sowie die Auswahl von Komponenten der Rotorlagerung zu nennen. Institute der Fraunhofer Gesellschaft werden hinsichtlich bereits vorhandener für das Projekt relevanter Kompetenzen mit Bezug auf eine effektive System- oder Komponentenfertigung bewertet und ggf. in Unteraufträgen in die Entwicklung einbezogen.

Literatur zu Teil I

- [1] U Weichenhain, S Lange, J Koolen, A Benz, S Hartmann, D Heilert, S Henninger, T Kallenbach, Potential der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg, Studie der Roland Berger GmbH im Auftrag von Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, 2020.
 - [2] T Wilberforce, Z El-Hassan, F N Khatib, A Al Makky, A Baroutaji, J G Carton, A G Olabi, Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 40, pp 25695-25734, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.054>, 2017.
 - [3] D Filsinger, G Kuwata, N Ikeya, Tailored centrifugal turbomachinery for electric fuel cell turbocharger, International Journal of Rotating Machinery, 1–14. doi:10.1155/2021/3972387, 2021.
 - [4] C Mohrdieck & S Dehn, The Intelligent Fuel Cell Plug-in Hybrid Drive System of the Mercedes-Benz GLC F-Cell, MTZ worldwide 01, 2019.
 - [5] A Furuno, N Omori, Design and Performance Evaluation of Gas Foil Bearing for Turbo Blower, Japan Society of Mechanical Engineers, 2016.
 - [6] Yoshinaga, S., Aoyama, S., Yamaguchi, K., Jikumaru, T., IH Elemental Technologies to Realize Electrification of High-Speed Rotating Machinery, IHI Engineering Review, Vol 54, No. 1, 2020.
 - [7] Kitamura et al, Striving to Realize a Sustainable Mobility Society - Oil-free motorized turbocharger effectively utilized in an air supply system for fuel-cell vehicles, IHI Engineering Review, Vol. 54, No. 2, 2021.
 - [8] M Rode, T Suzuki, G Iosifidis, T Scheuermann, Electric Turbocharger Concept for Highly Efficient Internal Combustion Engines, MTZ worldwide, 2019.
 - [9] M Rode, D Filsinger, G Iosifidis, L Durbiano, Turbocharging for Combustion Engines in Hybrid Propulsion Systems, MTZ worldwide, 2021.
 - [10] D Filsinger, G Iosifidis, L Durbiano, C Kirschner, J Ehrhard, On Advanced Turbocharger Technology and Development, IHI Engineering Review, Vol. 56, No. 1, 2023.
 - [11] O Bethoux, Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives, Energies, 13, 5843; doi:10.3390/en13215843, 2020.
 - [12] A Kerviel, A Pesyridis, A Mohammed, D Chalet, An Evaluation of Turbocharging and Supercharging Options for High-Efficiency Fuel Cell Electric Vehicles, Appl. Sci. 2018, 8, 2474; doi:10.3390/app8122474, 2018.
 - [13] P Harley, S Spence, D Filsinger, M Dietrich, J Early, Experimental and Numerical Benchmarking of an Improved Meanline Modelling Method for Automotive Turbocharger Centrifugal Compressors, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, Montreal, Canada, GT2015-42175, June 15-19, 2015.
 - [14] A Starke, T Bamba, D Filsinger, P Harley, An Automatic Optimisation of a Centrifugal Compressor for Improved Performance at near Surge Operation, Proceedings of the International Gas Turbine Congress, Tokyo, pp. 495–501, 2015.
 - [15] W Yu, X Sichuan, H Ni, Air compressors for fuel cell vehicles: An systematic review. SAE Int. J. Alt. Power, 4, 115–122, 2015.
 - [16] M Venturi, C Mohrdieck, J Friedrich, Mercedes-Benz B-Class Fuel Cell: the world largest hydrogen vehicle fuel cell fleet experience, EVS27 Symposium, Barcelona, Spain, Nov 17-20, 2013.
-

- [17] T Sugawara, T Kanazawa, N Imai, Y Tachibana, Development of Motorized Turbo Compressor for Clarity Fuel, Cell; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2017.
 - [18] T Hasegawa, H Imanishi, M Nada, Y Ikogi, Development of the Fuel Cell System in the Mirai FCV, SAE Technical Paper 2016-01-1185, doi:10.4271/2016-01-1185, 2016.
 - [19] Q Yan, H Toghiani, H Causey, Steady state and dynamic performance of PEM-FCs under various operating conditions and load changes, Journal of Power Sources 161(1) 492-502. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.03.077, 2006.
 - [20] B Blunier, A Miraoui, Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications, Journal of Fuel Cell Science and Technology 7(4), DOI: 10.1115/1.4000627, August 2010.
 - [21] A C Rojas, G L Lopez, J F Gomez-Aguilar, V M Alvarado, C L Sandoval Torres, Control of the Air Supply Subsystem in a PEMFC with Balance of Plant Simulation, Sustainability, 9, 73; doi:10.3390/su9010073, 2017.
 - [22] H Liu, P Li, A Hartz, K Wang, Effects of geometry/dimensions of gas flow channels and operating conditions on high-temperature PEM fuel cells, Int J Energy Environment Eng, 6:75–89, DOI 10.1007/s40095-014-0153-x, 2015.
-

II. Eingehende Darstellung zu

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 Einleitung

Im Segment der Langstrecken-Nutzfahrzeuge wird erwartet, dass Brennstoffzellenantriebe (FC) aufgrund ihrer längeren Betriebszeiten und der Fähigkeit, Ausfallzeiten zu minimieren, was sie zu einer bevorzugten Technologie macht, eingeführt werden [1] [2]. Bei Schwerlast-LKW (HDT) werden die Gesamtbetriebskosten (TCO) hauptsächlich durch die variablen Betriebskosten beeinflusst. Diese Betriebsausgaben (OPEX) stehen in direktem Zusammenhang mit den Kraftstoffkosten, die wiederum von der Kraftstoffeffizienz des Antriebssystems abhängen. Obwohl die variablen Betriebskosten entscheidend sind, sind erhebliche Kostensenkungen bei den Investitionskosten (CAPEX) der Brennstoffzellentechnologie ebenfalls unerlässlich. Mehrere Studien, unabhängig von ihrem geografischen Ursprung, streben eine Drittelung des CAPEX bis 2050 an [3] [4] [5] [6].

In einem Brennstoffzellensystem mit Protonenaustauschmembran (PEM) spielt der Kompressor eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Gesamtleistung des Systems [7]. Er funktioniert, indem er den Druck und den Luftstrom in die Brennstoffzelle erhöht und so die Effizienz des Wasserstoffoxidaionsprozesses verbessert. Dadurch kann die Brennstoffzelle mehr Leistung erzeugen und gleichzeitig weniger Energie verbrauchen, d. h. Wirkungsgrad und Leistungsdichte werden verbessert. In Schwerlastkraftwagen mit hohem Leistungsbedarf trägt der Turbolader mit Turbinenrekuperation dazu bei, dass das Brennstoffzellensystem die erforderlichen Leistungsstandards für Langstrecken und schwere Nutzlasten erfüllt [8]. Er hilft auch dabei, Temperatur und Druck der Brennstoffzelle stabil zu halten, was die Haltbarkeit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems verbessern kann. Das Wärmemanagement wird durch Turbinenrekuperation erleichtert [9]. Durch Optimierung des Luftmassenstroms und Verbesserung der Energieeffizienz erzeugt der Turbolader Vorteile wie einen geringeren Kraftstoffverbrauch und somit geringere Betriebskosten [10] [11].

Vor dem Hintergrund dieser Debatte wurde erfolgreich ein neuer Turbolader namens AC+eR („Air Compressor + electric driven with Recuperation“) für ein brennstoffzellenelektrisches Antriebssystem in schweren LKW entwickelt. Die Entwicklungsziele für den AC+eR wurden so definiert, dass durch eine geeignete Technologieauswahl die Anforderungen aus der Anwendung bzgl. Leistung, Kompaktheit (Gewicht), Zuverlässigkeit und Kosten in Einklang gebracht werden. Die Entwicklung des AC+eR-Turboladers wurde unter der Kennung 19/21046A gefördert. Er wurde speziell entwickelt, um kostenseitige Attraktivität von Brennstoffzellensystemen in großen Nutzfahrzeugen zu verbessern und so die zentralen Herausforderungen umweltfreundlicher Transportlösungen zu bewältigen. Produktkosten und -effizienz stehen an erster Stelle, müssen aber durch ausreichende Qualität und Zuverlässigkeit ergänzt werden. Der Schwerpunkt dieser wertorientierten Entwicklung lag auf der Optimierung der Produktkosten und der Gewichtsreduzierung durch die Bereitstellung neuer Lösung mit einem

Höchstmaß an Vereinfachung und Funktionsintegration. Mit diesem optimierten Design kann der AC+eR-Turbolader dazu beitragen, beste Effizienz und Nutzlastkapazität zu ermöglichen.

Im Mittelpunkt dieser Entwicklung steht das Potenzial von grünem Wasserstoff – erzeugt aus erneuerbaren Energiequellen – als sauberer Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge. Mit dem Ausbau der Infrastruktur für grünen Wasserstoff und seiner verbesserten Verfügbarkeit wird erwartet, dass er eine wichtige Rolle bei der Emissionsreduzierung im Verkehrssektor spielen wird. Eine zentrale Herausforderung bleibt jedoch bestehen: Die für die flächendeckende Einführung von Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeugen erforderliche Infrastruktur ist noch nicht vorhanden. Der Mangel an Tankstellen und Vertriebsnetzen stellt ein Hindernis für den breiten Einsatz wasserstoffbetriebener LKW dar. Die Entwicklung des AC+eR-Turboladers zeigt jedoch die Bemühungen der Branche, diese Herausforderungen zu bewältigen und nachhaltigere Transportlösungen zu entwickeln. Diese Entwicklung unterstreicht, wie fortschrittliche Technologie dazu beitragen kann, wasserstoffbetriebene Lösungen trotz anhaltender Infrastrukturprobleme der Realisierbarkeit näher zu bringen.

Das Dokument skizziert die Analyse der Anforderungen, die Bewertung der Topologie und der Technologien sowie das Designkonzept und die damit verbundene Designphilosophie und -methodik, die mit der Produktverifizierung einhergeht. Auch die Ergebnisse der experimentellen Validierung werden erläutert.

1.2 Anforderungsanalyse und Technologiebewertung über „Total Cost of Ownership“ Betrachtungen

In vielen Fällen wurden die Komponenten des Brennstoffzellensystems einzeln auf hohe Dynamik und Spitzenlastleistung optimiert, mit dem Ziel, den Verbrennungsmotor im Antriebsstrang durch die Brennstoffzelle zu ersetzen. In diesem Zusammenhang entwickelte IHI eine Luftversorgungslösung für Brennstoffzellen, die auf einem Radialverdichter mit Folienluftlagern basiert und eine Turbine zur Rekuperation nutzt [12] [13]. Durch die Nutzung der Abgasenergie reduziert dieses System den Energieverbrauch des Luftladesystems im Vergleich zu reinen Kompressorsystemen und hat seine Zuverlässigkeit und Energievorteile im Daimler GLC F-Cell unter Beweis gestellt [14]. Die Zykluseffizienz und die wirtschaftliche Skalierbarkeit der Produktkosten erfordert unmittelbar Aufmerksamkeit. Folglich muss jede Entwicklung eine integrale Produktoptimierung beinhalten, die auf einem Verständnis des Brennstoffzellensystems und der Fahrzeugmission basiert. Angepasste Komponentenanforderungen spiegeln die Systemanforderungen wider, die soweit sinnvoll und möglich anhand (numerischer) System- und Funktionsanalyse ermittelt wurden. Die spezifischen Anforderungen sind mit Designflexibilität abzuwägen. Der Fokus muss also auf der anwendungsspezifischen Systemauslegung unter Berücksichtigung von Modularität, Skalierbarkeit und Flexibilität liegen. Die Kostenoptimierung muss Elektrik, Mechanik und Steuerung der Maschine umfassen.

Die effiziente Entwicklung eines optimierten Systems, das die definierten Ziele und Anforderungen erfüllt, erfordert ein strukturiertes Vorgehen; idealerweise verläuft die Entwicklung entlang des Verifizierungs- und Validierungsmodells oder entlang des sogenannten V-Zyklus [15]. Auf die Analyse der Systemanforderungen folgt eine Beschreibung der Systemarchitektur. Hierfür ist ein tiefes Verständnis des Systems und

der Systemanforderungen eine wesentliche Voraussetzung. Dieses wurde durch eine intensive numerische Systemuntersuchung geschaffen, die bereits von Rathke et al. 2024 [10] veröffentlicht wurde. Die spezifischen Missionsparameter für ein Brennstoffzellensystem für Schwerlast-LKW-Anwendungen – wie erwartete Betriebsdauer, typische Lastszenarien und deren Häufigkeit – wurden sorgfältig analysiert, um die Komponentenanforderungen und Lastbedingungen im Detail zu bewerten. Wie Rode et al. 2021 [16] zeigen, helfen solche Simulationen, den Betrieb des Turboladers in neuen Antriebssystemen zu verstehen. Um eine ordnungsgemäße Verifizierung und Validierung zu gewährleisten, wird ein dezidiertes Hybridverbrennungsmotor mit Turbolader in einem Hybridfahrzeug untersucht, um die Auswirkungen verschiedener Fahrzyklen und Fahrerhaltensweisen auf Betrieb und Belastung des Turboladers zu erfassen. In der hier präsentierten Studie wurde eine analoge Untersuchung für den Brennstoffzellen-Turbolader durchgeführt.

1.2.1 Systemmodellierung

Um die geforderten Informationen zum Leistungsbedarf und Wasserstoffverbrauch zu erhalten, wurde an der Technischen Universität Chemnitz ein Simulationsmodell eines 40t-Lastkraftwagens mit brennstoffzellenelektrischem Antrieb in Matlab/Simulink entwickelt, das alle relevanten Subsysteme als Teilmodelle, wie in **Abbildung 1** gezeigt, umfasst und von Rathke et al schon veröffentlicht wurde [10] [11]. Das „Drive-Train Model“ (a) beschreibt die Fahrzeuglängsdynamik als Vorwärtssimulation. Basierend auf dem Missionsprofil/Fahrzyklus (1) generiert das Fahrermodell (2) einen Drehmomentbedarf für den Traktionsmotor (3). Mit der Übersetzung des Getriebemodells (4) werden die Kräfte am Fahrzeug berechnet, um die Fahrwiderstände (5) Luftwiderstand, Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Trägheit zu überwinden. Der entsprechende elektrische Leistungsbedarf des Traktionswechselrichters (6) wird als Hauptausgangsgröße des Antriebsstrangmodells berechnet. Im Hybridsystemmodell (b) wird der Leistungsbedarf des Wechselrichters an den Hybridmanager (7) gemeldet. Die Hybridstrategie steuert die Leistungsabgabe des DC/DC-Wandlers (8) und passt die Leistungsaufteilung zwischen Hybridbatterie (9) und Brennstoffzellensystem (10) an, um den Bedarf des Traktionswechselrichters ausreichend zu decken. Die peripheren Subsysteme (11) des Fahrzeugs, wie Klimaanlage und Beleuchtung, werden der Vollständigkeit halber erwähnt, sind in dem hier verwendeten Modell jedoch nicht berücksichtigt.

Für eine detaillierte Beschreibung der Teilsysteme wird auf [11] verwiesen. In dem hier vorgelegten Bericht zum Unterprojekt der IHI Charging Systems Intl. GmbH muss aber Erwähnung finden, dass im Teilsystem (10), welches das Verhalten der Brennstoffzelle (Fuel Cell) abbildet, wesentliche Beiträge der Komponentenexperten integriert wurden. Das Brennstoffzellensystemmodell wurde als verschachteltes, stationäres Gray-Box-Modell aufgebaut: Die kleinste Einheit ist das Einzelzellenmodell, das die Spannungs-/Strom-Kennlinie, die Wärmeerzeugung und den Reaktantenverbrauch der Brennstoffzelle beschreibt. Dieses Modell wird über die vorgesehene Zahl der Zellen zum Brennstoffzellenstapel skaliert. Zusammen mit allen notwendigen Peripheriekomponenten - Balance of Plant (BOP) - zum Betrieb des Stapels - insbesondere allen Luftpfadkomponenten und deren Druckverlusten - entsteht das Modell des Brennstoffzellenmoduls.

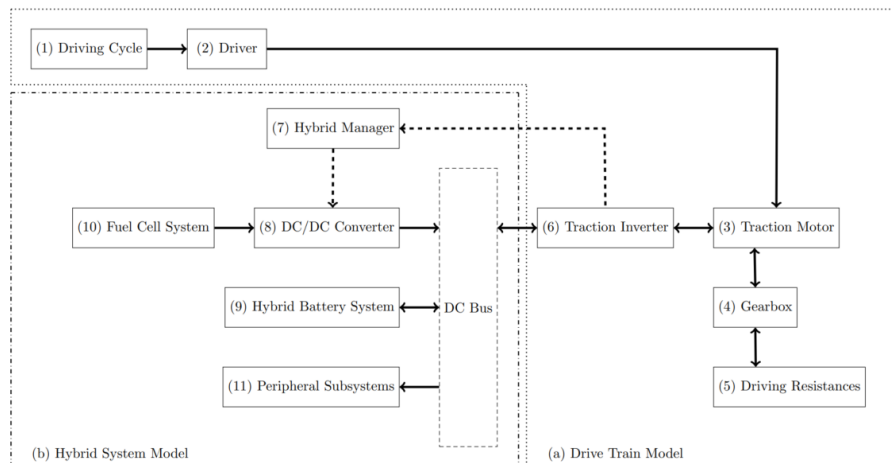


Abb 1: Simulationsmodell des Trucks mit brennstoffzellenelektrischem Antrieb bestehend aus den Teilmodellen (1) bis (11) [11].

Zur Berechnung der stationären und instationären Betriebspunkte wurde ein Simulationsmodell eines elektrisch unterstützten Turboladers im Luftpfad des Brennstoffzellenmoduls erstellt (**Abbildung 2**).

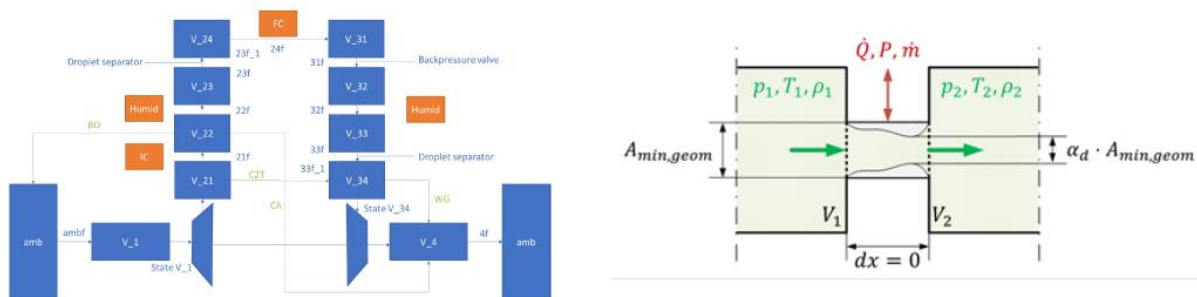


Abb 2: Modellierung des Luftpfades mit Turboaufladung (links) und einfache Darstellung des 0D-Ansatzes (rechts) [10].

Dabei wurde ein 0-dimensionaler Ansatz gewählt, bei dem das Luftleitungssystem des Brennstoffzellenmoduls in verschiedene Volumina eingeteilt wird. Während eines Lastpunktwechsels verändert sich die Masse und die Gastemperatur in diesen Volumina, sodass sich auch der Druck verändert. Auf diese Weise wird der verzögerte Druckauf- bzw. -abbau modelliert. Die Hauptelemente des Luftpfades sind in **Abbildung 2, links** schematisch dargestellt und in Reihenfolge stromabwärts wie folgt gegliedert: Luftfilter, Verdichter, Ladeluftkühler, Befeuchter, Brennstoffzelle, Befeuchter, Tropfenabscheider, Turbine. In einem Sekundärluftpfad kann abhängig von den technischen Anforderungen gekühlte Luft nach Ladeluftkühler durch die Luftlager des Turboladers geleitet werden. Zur Regelung des Systems gibt es noch zusätzliche Bypass Wege und entsprechende Regelventile.

Die Modelle für Luftkühler, Befeuchter und Tropfenabscheider basieren auf spezifischen Herstellerdaten und simulieren Wärme- und Massenströme mithilfe empirischer und datenblattgestützter Ansätze. Ein Schwerpunkt lag auf der Modellierung der Energie- und Massenübergänge, um realistische Betriebsbedingungen darzustellen. Da im

Luftpfad von Brennstoffzellen Zustände auftreten können, in denen die relative Luftfeuchtigkeit über 100 % steigt, kommt es zu Verdampfung und Kondensation von Wasser. In der Modellierung wurden daher Feuchtigkeit, Phasenwechsel und die Inkompressibilität von Wassertropfen berücksichtigt.

Im Luftpfad eingebunden ist der elektrisch unterstützte Turbolader, dessen Verdichter in der Zuströmung liegt, während dessen Turbine in der Abströmung der Brennstoffzelle angeordnet ist (**Abbildung 3**). Verdichter und Turbine wurden basierend auf Kennfeldern modelliert (CFD / Heissgasprüfstand). Der Pfad der elektrischen Leistung führt über den Inverter und den Elektromotor selbst, die jeweils vom Betriebspunkt abhängige Wirkungsgrade besitzen und somit mit Leistungsverlusten behaftet sind.

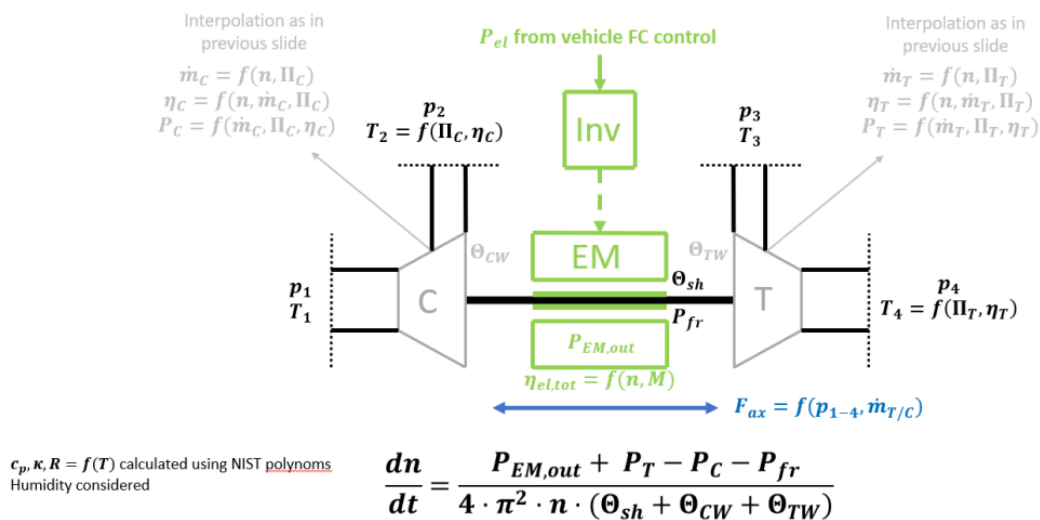


Abb 3: Modell des elektrisch unterstützten Turboladers.

Aus den Ergebnissen der Fahrzeugsimulation ergeben sich in dieser Detaillierung des Luftpfades inklusive des elektrischen Verdichters und einer Turbine zur Rekuperation auch die Anforderungen für die Turboladerauslegung und Randbedingungen für Verifikation und Validierungsversuche.

In den Simulationen fanden VECTO-Fahrzyklen als typische, standardisierte „Drive Cycle ((1) in **Abbildung 1**) Verwendung. VECTO wurde von der Europäischen Kommission zur Berechnung von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen entwickelt und ist ein europäischer Standard zur Bewertung schwerer Nutzfahrzeuge [17]. Daher wird VECTO auch zur Bewertung alternativer Antriebssysteme eingesetzt [18] [19]. Dieses Tool definiert eine Vielzahl typischer Einsatzprofile, die zur Bewertung verschiedener Anwendungen schwerer Nutzfahrzeuge über 3500 kg verwendet werden können [17]. In dieser Studie wurde der VECTO-Longstreckenzyklus zur Untersuchung der Fahrzeugleistung des elektrifizierten Brennstoffzellen Lastkraftwagens, wie er in **Abbildung 4** gemäß [20] dargestellt ist, intensiv analysiert. Die Ergebnisse wurden, wie schon erwähnt, dazu verwendet, um die Anforderungen an den elektrifizierten Luftverdichter festzulegen.

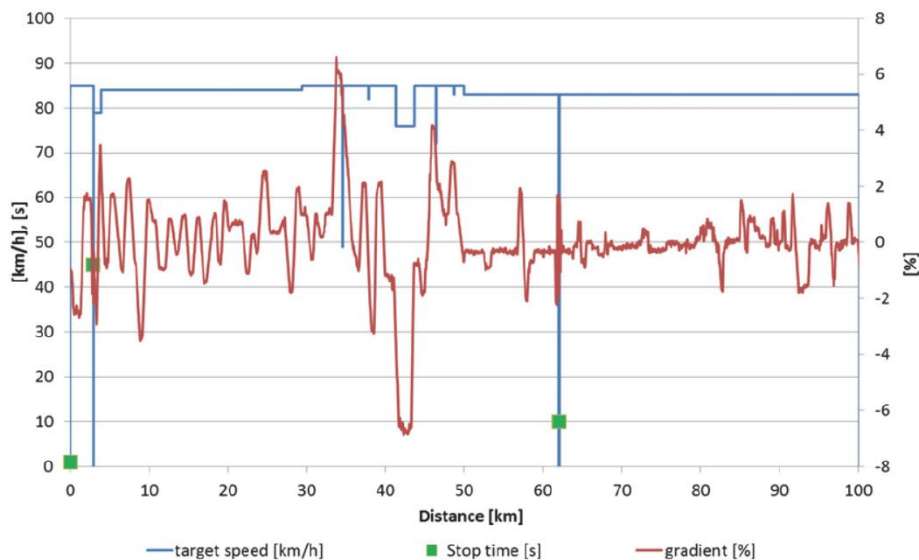


Abb 4: VECTO-Longstrecken-Missionsprofil: Entfernung 100 km, Durchschnittsgeschwindigkeit 80 km/h, Stoppzeit 67 s [20].

1.2.2 Anforderungen

In einem ersten Schritt wurde der erwartete Leistungsbedarf des Traktionswechsellrichters für den VECTO-Longstreckenzyklus ermittelt. Dabei zeigte sich, dass der maximale Leistungsbedarf bei etwa 445,5 kW liegt und der mittlere Leistungsbedarf ohne Berücksichtigung der Rekuperation 115,8 kW und mit Berücksichtigung der Rekuperation 107,5 kW beträgt wie in **Abbildung 5** zu erkennen ist. Auf dieser Basis kann die Grundauslegung des elektrifizierten Brennstoffzellenantriebs erfolgen. Notwendig ist die systemische Erfüllung des Leistungsbedarfs zu jedem Zeitpunkt des Betriebs.

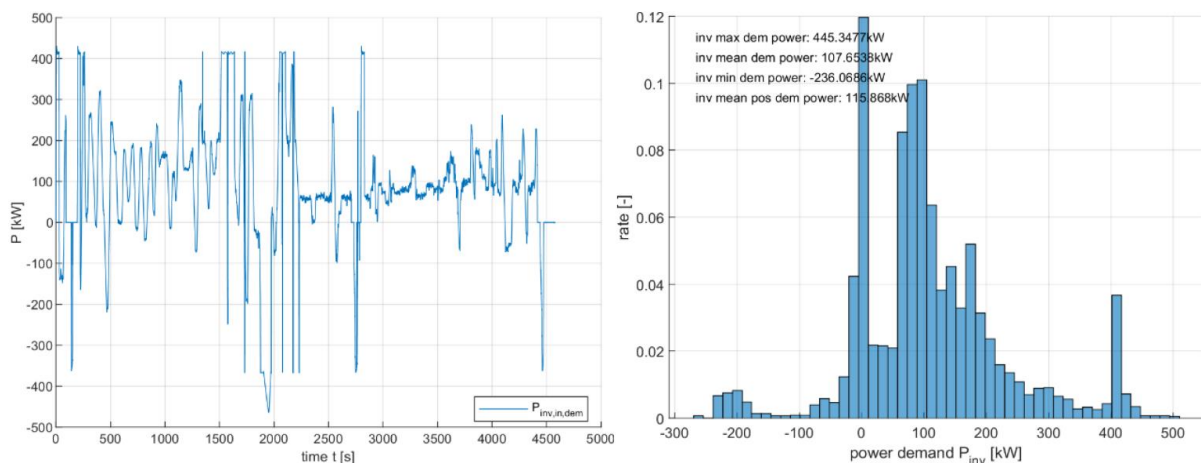
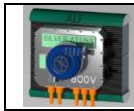


Abb 5: Leistungsbedarf des Antriebsstranges; zeitaufgelöst (links); Häufigkeitsverteilung (rechts).

Nach Festlegung der Parameter des Brennstoffzellenmoduls kann eine Detailauswertung des Verhaltens des Brennstoffzellen Turboladers erfolgen. In **Abbildung 6** sind beispielhaft die Betriebslinien, d.h. Wertepaare von Druckverhältnis und Durchsatz, von Verdichter und Turbine für ein System mit einem Brennstoffzellenmodul mit 128kW Leistung dargestellt. Abhängig von der Gesamtopologie des Antriebssystems in Bezug auf Zahl der Brennstoffzellenmodule und Batteriekapazität sowie der Wahl der



Hybridstrategie ergibt sich eine Verteilung der Häufigkeit des Verdichter-, bzw. Turbinenbetriebs entlang dieser Betriebslinien und damit eine Wichtung der Betriebspunkte, welche bei der Komponentenauslegung in Betracht gezogen werden müssen. Es wurden zahlreiche Rechnungen durchgeführt, bei denen Verdichterkennfeldbreite, Turbinenschluckvermögen, Zahl der Brennstoffzellenmodule, Batteriekapazität, die Missionen und weitere Parameter des elektrifizierten Antriebmodells mit Brennstoffzelle und besonderem Augenmerk auf dem Luftladesystem variiert wurden. Eindrücklich ist, wie in **Abbildung 7** zu sehen, der Effekt der Rekuperation mit einer Turbine. Sie erlaubt verbesserte Modulwirkungsgrade und eine erhöhte Leistungsdichte des Moduls, wie die Auftragung der notwendigen bezogenen Leistung zur Luftverdichtung über der relativen Modulleistung beweist. **Abbildung 7** belegt auch das erwartete ausgeprägte Wirkungsgradoptimum bei kleinen Modulleistungen sowie einen verstärkten „Turbineneffekt“ mit zunehmender Modulleistung.

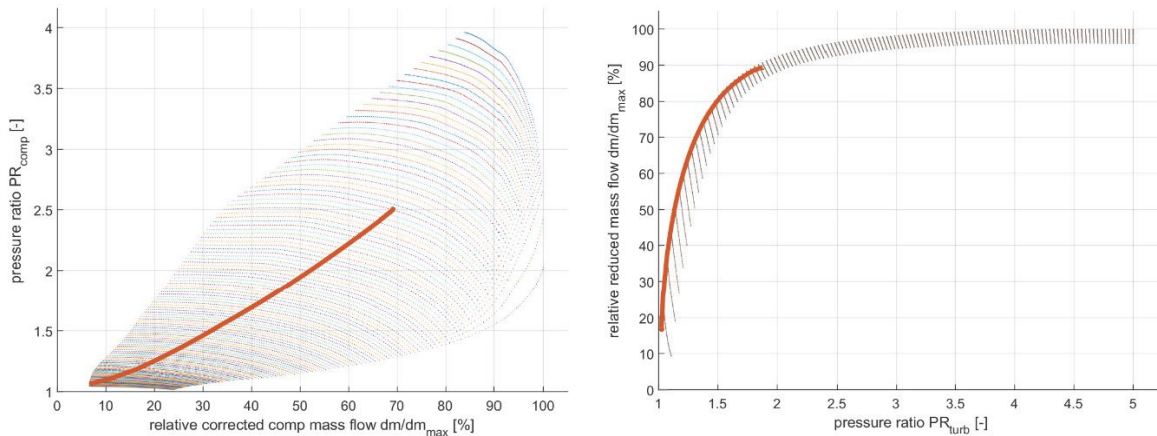


Abb 6: Betriebsbereich (Druckverhältnis und relativer Durchsatz) eines exemplarischen Verdichters und Darstellung der Brennstoffzellenbetriebslinie (links); Betriebsbereich einer exemplarischen Turbine und Darstellung der Brennstoffzellenbetriebslinie (rechts).

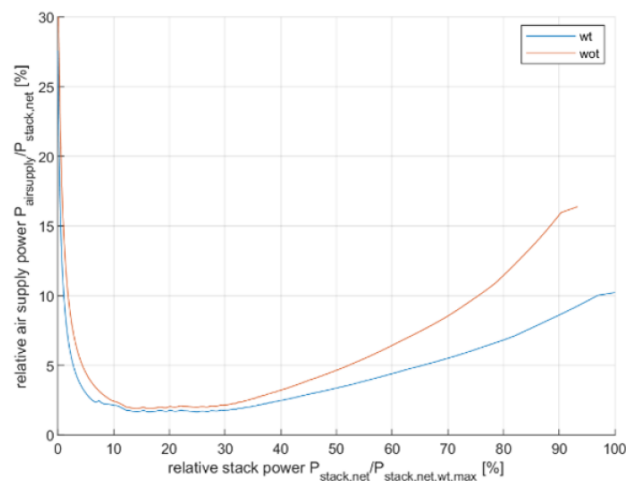


Abb 7: Auftragung der notwendigen bezogenen Leistung zur Luftverdichtung über der relativen Brennstoffzellen Modulleistung mit (wt: blau) und ohne (wot: orange) Rekuperationsturbine.

Diese Studien resultierten in einer Festlegung der Grundparameter für das Luftladesystem, welche aus Gründen der Vertraulichkeit hier nicht aufgelistet werden können. Grundsätzlich hat die gewählte Auslegung zum Ziel eine Brennstoffzelle mit ca. 150kW

Modulleistung optimal zu bedienen. Das erarbeitete Berechnungsmodell erlaubt somit die Schaffung des zuvor geforderten und notwendigen tiefen Systemverständnisses und der Systemanforderungen für die Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen. Es steht aber auch für zukünftige weiterführende Untersuchungen zur Verfügung.

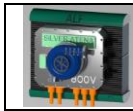
Die modellbasierte Untersuchung der Antriebsleistung eines schweren Brennstoffzellen-LKW mit Fokus auf das Brennstoffzellen-Luftzufuhrsystem half dabei, Betriebsbedingungen wie erforderlichen Druck und Luftstrom zu definieren. Die Simulation der Mission ermöglichte zudem die Definition der stationären und zyklischen Belastung, z. B. der Randbedingungen für die mechanische Bewertung, einschließlich der Definition der Anzahl der Start-Stopps. Die Ergebnisse dieser Anforderungsanalyse bildeten die Grundlage für die Definition der Systemarchitektur, die Detaillierung des Komponentendesigns und die Umsetzung des Systemdesigns. Sie ermöglicht auch eine effektive Planung der Verifizierung und Validierung der Schlüsselkomponenten, Subsysteme und des Turboladersystems.

Bevor allerdings auf die Gestaltung und Umsetzung des Brennstoffzellenturboladers eingegangen wird, soll im nächsten Abschnitt ein kurzer Exkurs zur Bewertung der Total Cost of Ownership ausgeführt werden. Er erlaubt erstmals die Einordnung der Auswirkung der gewählten Luftladetechnologie auf die Gesamtbetriebskosten im Vergleich zu verschiedenen Topologien von Brennstoffzellen-Elektroantrieben.

1.2.3 Bewertung der Total Cost of Ownership

Zusätzlich zum Antriebsstrangmodell (a) und Hybridsystemmodell (b) aus **Abbildung 1** muss für diese Aufgabe zusätzlich ein Kostenmodell verfügbar sein. **Tabelle 1** ist aus der schon zuvor zitierten Veröffentlichung der Technischen Universität Chemnitz [11] entnommen und stellt die angenommene Kostensituation in einer Übersicht dar.

Auf alle Details der Studie wird hier nicht eingegangen, nichtsdestotrotz sollen die wichtigsten Ergebnisse, insbesondere für den OPEX, skizziert werden. **Abbildung 8** fasst die Auswirkungen verschiedener Technologieoptionen auf die Gesamtbetriebskosten zusammen. Die exemplarischen Fälle wurden ausgewählt, um für jede Systemtechnologie eher optimistische Werte für die Betriebskostenreduzierung darzustellen. Die beiden grünen Balken in **Abbildung 8** zeigen den signifikanten Effekt der Hybridstrategie („hybrid strategy“: konstanter FCS-Betrieb reduziert OPEX) von >55k€, der allerdings im Rahmen dieses Berichts nicht weiter begründet wird. Eine Diskussion dazu findet sich im zugehörigen Teilbericht der Technischen Universität Chemnitz. Gleiches gilt für die mit den blauen Balken in **Abbildung 8** veranschaulichten Auswirkungen von bis zu 40k€ aufgrund der Begrenzung der verfügbaren Leistung des Brennstoffzellenmoduls auf Werte zwischen 128 kW pro FCM und 85 kW und die daraus resultierende Änderung der Gesamteffizienz („fuel cell efficiency“). Auch die ermittelten Werte zum Effekt der Batteriekapazität („battery capacity“: Höhere Kapazität reduziert OPEX) von >60k€ - in violett dargestellt - dienen hier nur zur Einordnung der Technologievariationen des Brennstoffzellenturboladers („turbocharger technology“), die in der rechten Spalte in **Abbildung 8** gezeigt sind.



Tab 1: Übersicht der angenommenen Investitions- und Betriebskosten sowie der Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellenreferenzsystems aus [11]; die zugehörigen Quellen sind ebenfalls in [11] angeben.

System	Cost	Explanation	Sources
CAPEX:			
vehicle	100,000 €	baseline vehicle w/o drive train	[41, 42]
inverter	8.67 €/A	max. reference value 570 A	[46]
fuel cell system (FCS)	365 €/kW _{FCS}	w/o air supply; reference value 2 × 128 kW	[43]
battery energy content	124 €/kWh	reference value 162 kWh (100 Ah cells)	[45] in [44]
fuel cell system DC/DC	29 €/kW	reference value 128 kW	[46]
air supply	8 €/kW _{FCM}	reference module size 128 kW	[49]
hydrogen tank system	14.60 €/kWh	constant 35 kg for all investigations	[47]
OPEX:			
hydrogen	4.26 €/kg	mean value of expected future price	[21, 24]

Zusätzlich ist zur Orientierung eine angenommene Spanne der zugehörigen Investitionskosten für das Luftladesystem in **Abbildung 8** eingetragen. Dies hilft, die für die Luftaufladungstechnologie erforderlichen Investitionskosten im Verhältnis zu den Auswirkungen auf die Betriebskosten und damit die Gesamtbetriebskosten zu verstehen.

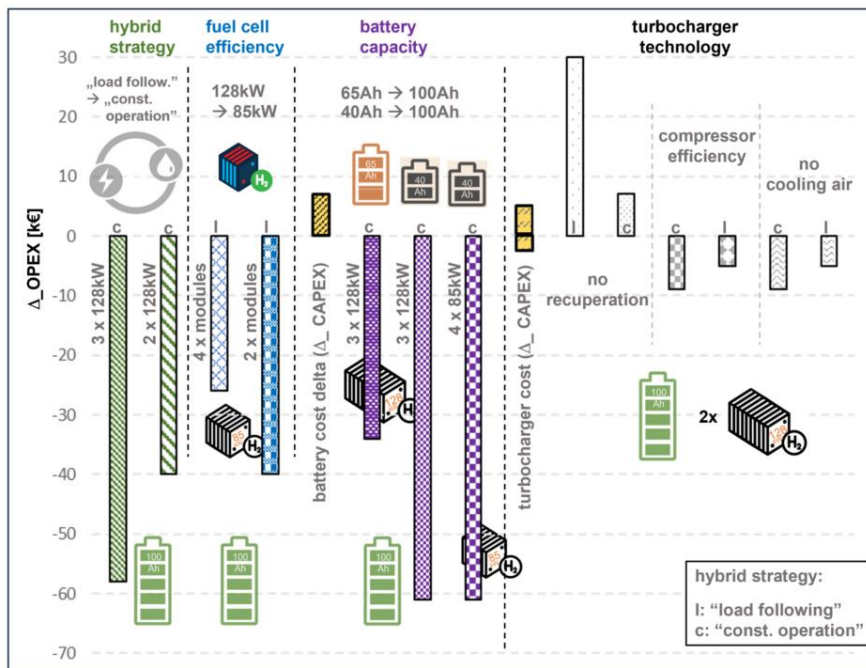


Abb 8: Zusammenfassung der Auswirkungen auf die Betriebskosten bei Wahl verschiedener Technologien.

Die Spanne der angenommenen Investitionskosten liegt zwischen € 500,- und € 3.000,-. Der Vergleich wird für ein System mit 2 × 128-kW-FCMs und einer Batteriezellenkapazität von 100 Ah durchgeführt. Demzufolge betragen gemäß **Tabelle 1** die Referenzkosten für ein Luftladesystem 2.048,- €. Die genannte Kostenspanne soll darüber hinaus verschiedene Produktionsszenarien sowie Technologieoptionen abdecken [11]. Sie beinhaltet auch die im Projektkonsortium erarbeiteten spezifischen

Werte, die aus Vertraulichkeit nicht explizit angegeben sind. Die Vergleiche werden für beide Hybridstrategien dargestellt.

Die grundlegende Luftaufladungstechnologie entspricht der Beschreibung in [21] und umfasst eine Turbine zur Rekuperation, deren positiver Effekt bemerkenswert ist. Für die dynamische „load-following“ Betriebsstrategie einer reinen Verdichterlösung ohne Turbinenrekuperation wird ein Anstieg der Betriebskosten um 30 k€ abgeschätzt. Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung und steht im Einklang mit der Studie von [22], die ebenfalls die Turboladerlösung als am besten für Brennstoffzellensysteme bewertet. Bei der für die Brennstoffzelle weniger fordernde Strategie „constant operation“ ist dieser Effekt mit etwa 7 k€ aufgrund höherer Teillastanteile geringer, was gemäß **Abbildung 7** auch zu erwarten war. Daher ist zusätzlicher (technischer und wirtschaftlicher) Aufwand, beispielsweise zur Steigerung des Verdichterwirkungsgrades oder zur Vermeidung des Bedarfs an komprimierter Kühlluft für das Luftlagersystem, bei der Strategie „constant operation“ zwar weniger vorteilhaft, aber dennoch gewinnbringend. In allen Fällen übertrifft die Betriebskostenreduzierung die Investitionskostensteigerung deutlich und hat positive Auswirkungen auf die Gesamtbetriebskosten. Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurde eine Effizienzsteigerung der Verdichterstufe um 5 % angenommen (siehe **Abbildung 8**, Spalte „compressor efficiency“). In Anbetracht modernster Hochleistungsverdichterstufen wäre dies eine enorme Verbesserung, die bei bereits optimal aufeinander abgestimmten Komponenten nicht zu erwarten ist. Dennoch bergen eine neue, ausgeklügelte Anpassung des Turbomaschinenlayouts, eine Erhöhung der zulässigen Drehzahl sowie eine Verbesserung der elektrischen Maschinen und insbesondere die Anpassung der Turbomaschine an spezifische FCS-Systemanforderungen, wie schon in [21] gezeigt, das Potenzial für eine Steigerung der Performance in dieser Größenordnung. Die Reduktion der Betriebskosten wird für diesen Fall mit etwa 9 k€ abgeschätzt.

Der Turbinenbetrieb wurde in dieser Studie nicht ausdrücklich variiert. Die erzeugten Simulationsergebnisse zeigen aber, dass im besten Fall 30 % bis 40 % der notwendigen Verdichterleistung durch die Turbine rekuperiert werden können. Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs würde eine Verbesserung des Turbinenwirkungsgrades um einen bestimmten Prozentsatz etwa ein Drittel des Effekts vergleichbarer Verbesserungen des Verdichterwirkungsgrades erzielen. In der hier vorgestellten Untersuchung wurde eine Turbine mit fester Geometrie so ausgelegt, dass sie perfekt zur Betriebslinie des Brennstoffzellensystems, die durch massenstromabhängige Druckverluste der Komponenten im Luftpfad vor sowie im Brennstoffzellenstapel selbst als auch in den Komponenten nach dem Brennstoffzellenstapel bestimmt wird. Eine variable Turbine, wie sie oft diskutiert wird, um einen weiteren Turbinenbetriebsbereich zu ermöglichen, die Rekuperation in einem weiteren Betriebsbereich zu verbessern oder die Funktionalität von Bypass- oder Gegendruckventilen zu integrieren, wurde hier nicht berücksichtigt. Jede Turbinenvariabilität würde unter diesen Bedingungen die maximal erreichbare Rekuperation aufgrund von Spaltverlusten beeinträchtigen und reduzieren. Dennoch kann man hinsichtlich der Investitionskosten eine solche Technologieoption im in **Abbildung 8** dargestellten Kostenband beinhalten annehmen.

Schließlich wurde eine weitere Art der Effizienzsteigerung durch die Verringerung von Verlusten untersucht. Luftlager benötigen in der Regel einen kleinen Teil der Druckluft

für die Kühlung und Spülung. Kann dies vermieden werden, verbessert sich die Effizienz des Luftladesystems was zu etwa 9 k€ verringerten Betriebskosten, wie in den beiden rechten Spalten von **Abbildung 8** „no cooling air“ zu sehen ist, führt.

Diese Untersuchung vergleicht erstmals die Auswirkungen von Variationen der allgemeinen Dimensionierung von Antriebsstrangsubsystemen, wie Batteriekapazität und verfügbarer Brennstoffzellensystemleistung, mit den Auswirkungen der Wahl der Subsystemtechnologie, hier des Turboladers des Brennstoffzellenmoduls, auf die Gesamtbetriebskosten. Die Auswirkungen der Topologie des Antriebsstranges sind selbstredend mit bis zu 60 k€ besonders ausgeprägt, weshalb notwendigerweise eine sorgfältige Auslegung und Dimensionierung des Antriebsstrangs unter Berücksichtigung der gewählten Mission von größter Bedeutung ist. Dennoch kann die Wahl der richtigen Aufladetechnologie erheblich zur Reduzierung des H₂-Verbrauchs von FCETs beitragen. Die Betriebskosten werden um Beträge gesenkt, welche die Steigerung der potenziellen Investitionskosten durch zusätzlichen technologischen Aufwand übersteigen, was zu einer Senkung der Gesamtbetriebskosten führt.

Nach dieser Einordnung der gewählten Luftladetechnologie auf die Gesamtbetriebskosten wird im Folgenden die Gestaltung und Umsetzung des Brennstoffzellenturboladers beschrieben.

1.3 Designkonzept und architektonische Gestaltung

Das von den Systemsimulationsmodellen ermittelte Druckniveau kann idealerweise mit einem einstufigen Radialverdichter erreicht werden [10]. Die ausgeführten Überlegungen zeigen zudem eindeutig, dass Vorteile bei der Effizienz und der Leistungsdichte des Brennstoffzellensystems erzielt werden können, wenn die einstufige Verdichtung mit einer Turbine zur Rückgewinnung von Energie aus dem Abgas kombiniert wird. Diese Wahl wird auch von Kerviel et al in [7] und vielen anderen wie in [8] [22] [23] oder [24] und zuletzt in [25] unterstützt. Basierend auf diesen Untersuchungen und den Erfahrungen von IHI mit elektrifizierten Turbomaschinen [13] [21] [26] [27] führt die Technologieauswahl dementsprechend zu einem elektrisch angetriebenen Radialverdichter mit Turbinenrekuperation. Auf einer Welle ist ein Verdichter mit niedriger spezifischer Drehzahl mit einer Halbaxialturbine zur Rekuperation fest verbunden. Der Rotor beinhaltet einen zweipoligen Permanentmagneten (PM). Der Schwerpunkt dieses Berichts liegt auf der Beschreibung der rotierenden Maschine. Die Leistungselektronik wird hier nicht behandelt.

Um die angestrebte deutliche Produktkostensenkung konsequent zu erreichen, wurden bestehende Systemarchitekturen von Aufladesystemen analysiert, mit dem Ziel einer größtmöglichen Designvereinfachung und Funktionenintegration. Aufbauend auf fundierten Erfahrungen mit der Entwicklung von Turboladern für Verbrennungsmotoren [28] wurde eine rigorose Design-to-Cost-Analyse durchgeführt, ähnlich der von Wang & Lusardi in [29] beschriebenen. Die Systemarchitektur wurde durch Form-Funktions-Mapping ermittelt, wie in **Abbildung 9** dargestellt. Die Hauptfunktionen wurden in Unterfunktionen zerlegt, die dann unter Ausnutzung von Möglichkeiten zur Konsolidierung der Funktionen auf möglichst wenige Komponenten verteilt wurden. Zusätzlich wurden die primären Kostentreiber bei Herstellung und Montage identifiziert und in allen Designphasen eine ausgewogene Kompromissfindung unter Berücksichtigung von Aspekten der industriellen Produktion verfolgt [30].

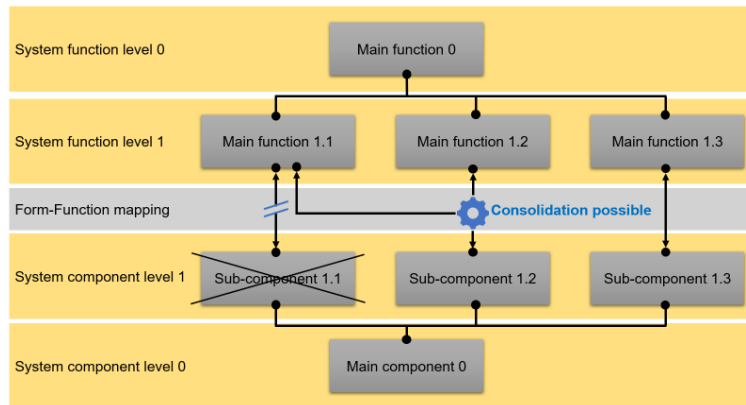
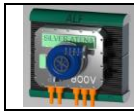


Abb 9: Optimierung der Systemarchitektur durch Form-Funktions-Mapping [30].

Es liegt auf der Hand, dass jede Produktentwicklung von Funktionenintegration erheblich profitieren kann. Dies kann zu höherer Kompaktheit, einer Reduzierung der Teileanzahl und letztlich zu höherer Kosteneffizienz und Gewichtseinsparungen führen. Andererseits kann Funktionenintegration auch die Produktflexibilität einschränken. Wenn bestimmte Anwendungen einige der integrierten Funktionen nicht erfordern, ist das Design möglicherweise nicht für ein spezifisches Anforderungskollektiv geeignet.

Auch im Hinblick auf Verifizierung und Validierung ist die Funktionenintegration ein Aspekt, der einer kritischen Diskussion bedarf. Dabei ist zu beachten, dass die Verifizierung stets über theoretische Überlegungen und/oder numerische Untersuchungen erfolgt. Die Validierung beinhaltet stets experimentelle Tests mit Hardware und kann naturgemäß erst in späteren Entwicklungsphasen durchgeführt werden. Der Aspekt der (numerischen) Vorhersagbarkeit ist in jedem Produktentwicklungsprozess nicht zu unterschätzen. „First Time Right“ kann nur durch rigorose Designprüfungen erreicht werden, die in frühen Entwicklungsphasen auf Designerfahrung und -analysen sowie numerischen Vorhersagen basieren. In jeder Entscheidungsmatrix für (neue) Technologielösungen muss die erwartete Genauigkeit des numerischen Modells bzw. die numerische Vorhersagbarkeit bewertet werden. Auf den ersten Blick bevorzugt dies konservative, bekannte Lösungen und in der Regel auch die einfache Zuordnung einer Funktion zu einer Komponente. Sobald eine Komponente zwei oder mehr Funktionen erfüllt, wird ihre Vorhersagbarkeit komplexer und in der Regel unsicherer. Auch die Interpretation der Testergebnisse aus der Validierung kann weniger eindeutig sein. Dennoch ermöglicht die geeignete Anwendung von Modellen, mit angepasster numerischer Tiefe und die Nutzung moderner multiphysikalischer Ansätze mit entsprechendem multidisziplinärem Know-how die Sicherstellung der Zuverlässigkeit multifunktionaler Komponenten.

Auf dieser Grundlage und mit dieser Philosophie wurden verschiedene Konzepte bewertet, die sich durch unterschiedliche Vereinfachungsgrade und Funktionsintegration, typischerweise verbunden mit reduzierten Kosten sowie unterschiedlichen technischen Risiken auszeichnen. Die Konzepte wurden relativ bewertet. Die Bewertung erfolgte anhand gewichteter Kriterien für Funktion, für technisches Risiko und für die Kosten. Die zugehörige Sensitivitätsstudie zeigt erwartungsgemäß den Kompromiss zwischen technischem Risiko und erwarteten Kosten. Das technische Risiko eines bestimmten Konzepts kann durch die Akzeptanz höherer erwarteter Kosten reduziert

werden. So können Ersatzlösungen für die technischen Risiken identifiziert und definiert werden. Da diese Studie stark auf die Kosten fokussiert war, um das zukünftige Marktpotenzial von Brennstoffzellensystemen für Antriebe zu erhöhen, erhielt das Konzept mit dem größten Grad der Vereinfachung und unter Akzeptanz von technischen Risiken die höchste Bewertung und wurde realisiert.

Ein Querschnitt des ausgearbeiteten Aufbaus des elektrisch angetriebenen Radialverdichters mit Turbinenrekuperation ist in **Abbildung 10** dargestellt. Der Rotor wird von einer zweipoligen permanenten Synchronmaschine angetrieben. Die herausragenden Merkmale sind:

- Systemrad / Zusammengeführtes Rad
- Hybridlagersystem mit Welle mit einem Durchmesser
- Stator mit direkter Gaskühlung
- Nutenloser Stator mit toroidalen Wicklungen

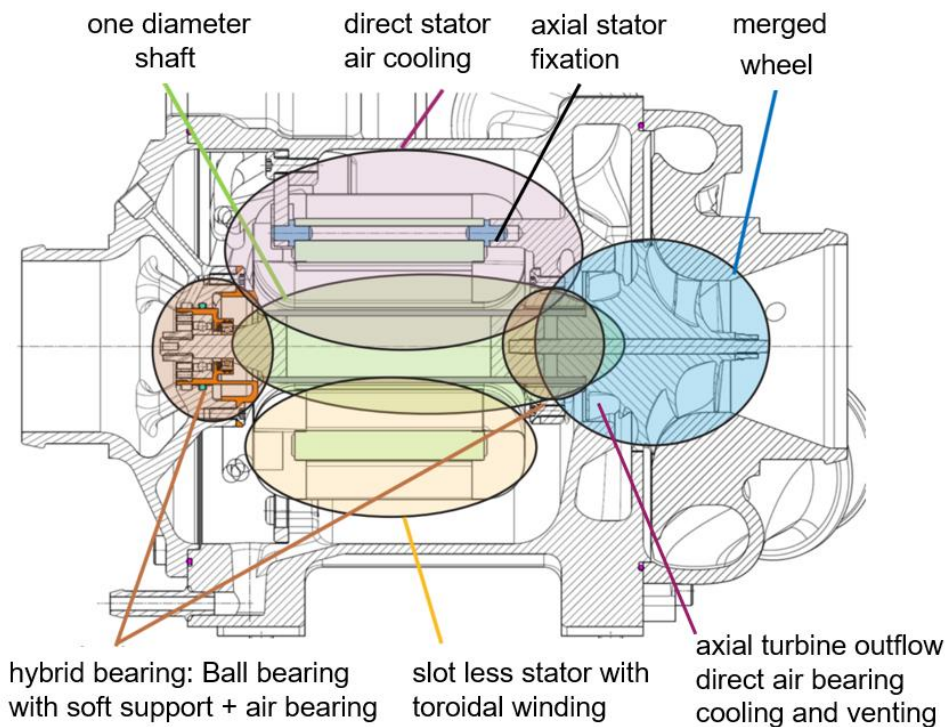
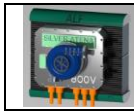


Abb 10: Querschnitt des AC+eR mit hervorgehobenen innovativen Merkmalen.

Im Folgenden werden die vier wesentlichen Innovationsideen dieser neuartigen elektrifizierten Turboladerarchitektur skizziert.

1.3.1 Systemrad / Zusammengeführtes Rad / Merged Wheel

Bei einem elektrischen Turbolader für Brennstoffzellen ist die Maximaltemperatur in der Komponente an den maximalen Kompressorauslassdruck gekoppelt, falls keine aktive Kompressorkühlung vorhanden ist. Unter normal Bedingungen und einem



Druckverhältnis von beispielsweise 2,5 liegt die Kompressorauslasstemperatur bei einem Wirkungsgrad von über 80 % im Bereich von 125 °C. Die Maximaltemperatur der Turbine wird durch die Austrittstemperatur des Brennstoffzellenabgases bestimmt, die bei PEM-Brennstoffzellen typischerweise zwischen 70 und 90 °C liegt. Daher besteht im Gegensatz zu Turboladern, die in Verbrennungsmotoren verwendet werden, keine Notwendigkeit unterschiedliche Materialien für die Turbinen- und Kompressorstufen vorzusehen. Der Form-Funktions-Mapping-Ansatz legt daher die potenzielle Integration der Kompressor- und Turbinenfunktionen in einer Komponente nahe. In einem gemeinsamen Systemrad oder auch „Merged Wheel“ können beide Funktionen realisiert werden. Die Back-to-Back-Konfiguration ermöglicht eine direkte Drehmomentübertragung zwischen Turbine und Verdichter im Rad, was die erforderliche Festigkeit der Rotorwelle reduziert. Darüber hinaus reduziert es den Bedarf an zusätzlichen Bauteilen, z. B. für Radbefestigung, Dichtungen usw., und verbessert auch die Situation hinsichtlich des Wärmeflusses in der Strömungsmaschine und in den Elektromotor. Bei hoher Last mit höchster Kompressoraustrittstemperatur fungiert die Platzierung der Turbine zwischen Kompressor und elektrischer Maschine als Wärmebarriere oder sogar als Wärmeschutz für den Elektromotor. Dies unterstützt das Wärmemanagement und der Kühlungsbedarf wird reduziert. Die Wärmeflussanalyse ergab sogar eine kleine Temperaturerhöhung für die Turbine und eine kleine Temperaturabnahme des Kompressoraustrittsstroms mit jeweils positiver Wirkung auf die Rekuperation und den (virtuellen) Kompressorwirkungsgrad. Da die für die Wärmeübertragung ausschlaggebende Oberfläche jedoch klein ist, ist dieser Effekt begrenzt. Dieser Effekt kehrt sich während des Betriebs um, wenn die Kompressoraustrittstemperatur niedriger ist als die Turbineneintrittstemperatur, was eine vernachlässigbare Auswirkung auf den Systemwirkungsgrad hat.

Abbildung 11 zeigt das Systemrad bestehend aus einem Mixed-Flow-Turbinenrad (MFT) mit seinen vorteilhaften Durchsatzeigenschaften [31] und einem Verdichterrad mit nicht-radialen Schaufeln am Austritt. Die Splitterschaufeln des Verdichters tragen dazu bei, die Strömung effizient zum Radaustritt zu leiten.

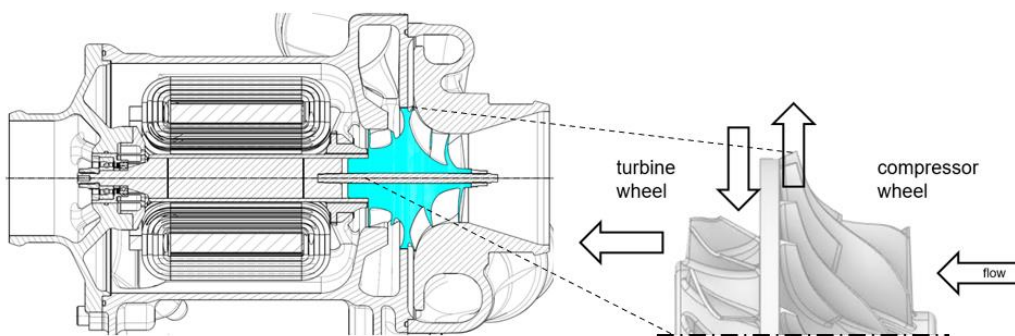


Abb 11: Systemrad oder „Merged Wheel“: Ein Systemrad erfüllt zwei Funktionen: Kompression und Rekuperation. Links: Systemintegration; rechts: Illustration der Strömungsrichtungen.

Durch die gemeinsame Rückwand wird die Zuströmung in die MFT leicht kompromittiert, da eine axiale Komponente kaum vorhanden ist. Die gemeinsame Rückscheibe ermöglicht jedoch eine gewisse Anpassung (Verringerung) der erzeugten Schublast. Der Nabendurchmesser der Turbine entspricht dem Durchmesser des Motorrotors, aber, da die Abströmung in Richtung der Welle erfolgt, gibt es keinen Querschnittsprung mit negativen Auswirkungen auf die Auslassverluste, wie dies bei einer Anordnung der Turbine in einem herkömmlichen Turbolader der Fall ist.

Eine Gegebenheit, die bei dieser Back-to-Back-Radkonstellation behandelt werden muss, ist der erforderliche kleine radiale Spalt zwischen Verdichter- und Turbinenrad und die damit verbundene Leckage, vorwiegend vom Verdichter, wo höherer Druck herrscht, zur Turbine. Diese Leckage hängt von den Betriebsbedingungen von Verdichter und Turbine und darüber hinaus von der lokalen Drucksituation im Spalt ab. Dies bedarf einer eingehenden Untersuchung, auf die in einem späteren Absatz dieser Arbeit eingegangen wird. Es lässt sich jedoch feststellen, dass eine Leckage vom Verdichter zur Turbine nicht vollständig verloren geht, da diese Luftmenge mit hoher Temperatur zur Erzeugung von Turbinenleistung beiträgt.

1.3.2 Hybridlagersystem

Brennstoffzellen reagieren empfindlich auf jegliche Verschmutzung. Daher sind Luftlager, Folienlager oder alternativ Rillenlager („fish bone“), die erste Wahl für Brennstoffzellenkompressoren, um eine Verschmutzung durch Kohlenwasserstoffe aus dem Schmieröl zu vermeiden. Ihre zuverlässige Konstruktion erfordert herausragendes technisches Know-how [32] [33] und ihre Herstellung erfordert sehr präzise Fertigungs- und Montageprozesse, die nicht kostengünstig sind. Magnetlager, die ebenfalls kurz untersucht wurden, bieten ebenfalls keinen Kostenvorteil. Im Gegensatz dazu, erlaubt das Konzept des Systemrades ein „freies“ Wellenende, das ohne negative Auswirkungen auf die Steifigkeit des Rotors mit einem viel kleineren Durchmesser konstruiert werden kann. Einerseits ermöglicht dies das Einsetzen der kompletten, vorgegewichteten Rotorbaugruppe in das Stator- und Motorgehäuse von einer Seite mit all seinen Vorteilen für die Serienproduktion. Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit fettgeschmierte Hochgeschwindigkeits-Schräggugellager mit den damit verbundenen erheblichen Kostenvorteilen einzusetzen, da der kleine Durchmesser es ermöglicht, die notwendigen Grenzwerte der Hertzschen Pressung bei ausreichend hoher Drehzahl in den Laufbahnen der Kugellager einzuhalten. Ein zweites, noch kleineres Kugellager sorgt in Verbindung mit einem Federelement für ausreichend axiale Vorspannung, um die Kugeln in permanentem Kontakt mit den Laufbahnen zu halten. Ein solches Konstruktionskonzept kann nicht nur eines der Radialluftlager ersetzen, sondern auch die Funktion des Axiallagers übernehmen. Das ist insbesondere in Kombination mit dem Merged-Wheel-Konzept der Fall, das die Reduzierung der Axialkraft ermöglicht. Die Minimierung der Axiallast im Betrieb erleichtert die Dimensionierung der Wälzlager und trägt auch dazu bei, Reibungsverluste durch Axiallasten zu minimieren.

Das Hybridlagersystem wurde während der Definition des Designkonzepts eingehend analysiert, da die Verwendung eines steifen Kugellagers mit einem vergleichsweise weichen Luftlager auf einer Welle eine technische Herausforderung darstellt. Darüber hinaus erfordert ein zuverlässiges Rotordesign einen ausreichend hohen Sicherheitsabstand für die Rotoreigenfrequenzen des Rotors im Vergleich zur vorgesehenen maximalen Rotordrehzahl. Um dies zu gewährleisten, wurden zahlreiche charakteristische Rotorparameter mithilfe von DoE-Methoden im Rahmen intensiver automatisierter numerischer Studien variiert. Die Variation von Lagerabstand, Lagerbreite, Magnetdurchmesser und -länge (eine größere Magnetoberfläche erlaubt ein höheres Drehmoment des Elektromotors), Länge, Durchmesser und Stärke der Rotorhülse sowie des Überhangs des Systemrades, um nur einige der wichtigsten zu nennen, führte zu einem Verständnis des möglichen Designspielraums für die Realisierung eines Rotors für das „Merged-Wheel“- und Hybridlagerkonzept unter Einhaltung der Designkriterien für die Rotoreigenfrequenzen. Während diese Untersuchung unter Verwendung einer

sogenannten Frei-Frei-Modalanalyse ohne Lagereinfluss durchgeführt wurden, ist es zwingend erforderlich, auch die Rotor-Lager-Interaktion zu untersuchen [34]. Diese gedämpfte Modalanalyse ergab, dass eine zu steife Aufnahme des Wälzlagers die erste Biegeeigenform in den Betriebsbereich verschiebt. Auf dieser Grundlage wurde die Zielsteifigkeit der Aufnahme der Kugellager in axialer und radialer Richtung definiert, um die Rotorresonanz außerhalb des Betriebsbereichs zu halten und die zuverlässige Umsetzung des Hybridlagerkonzepts zu ermöglichen. Das zweireihige Wälzlager deckt die radiale Belastung am freien Wellenende und die axialen Belastungen in beide Richtungen ab. Es ist auf einem ausreichend kleinen Durchmesser realisiert. Das Luftlager ist nahe dem Turbinenauslass platziert, was für Kühlung und Spülung des Lagers sorgt. Das Luftlager ist auf dem Durchmesser der Magnethülse realisiert, um eine möglichst einfache Wellenkonstruktion zu ermöglichen. Eine derart einfache Wellenbaugruppe erleichtert die Fertigung und die Anzahl der Teile und Schnittstellen ist gering. Das Rotorgewicht und die Trägheit können reduziert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Leistung und die Lebensdauer des Luftlagers aus, insbesondere im Start-Stopp-Betrieb. **Abbildung 12** zeigt die Abhängigkeit der Frequenz der kritischen Eigenform von der radialen Steifigkeit der Wälzlageraufnahme. Sie veranschaulicht die erwartete Änderung der Eigenform für den Mode #6 mit steigender Steifigkeit und definiert letztendlich die vorzuschreibende Steifigkeit, die unter einem bestimmten Schwellenwert liegen muss. Die Grenze ist durch den grünen Balken unterhalb der Abszisse dargestellt.

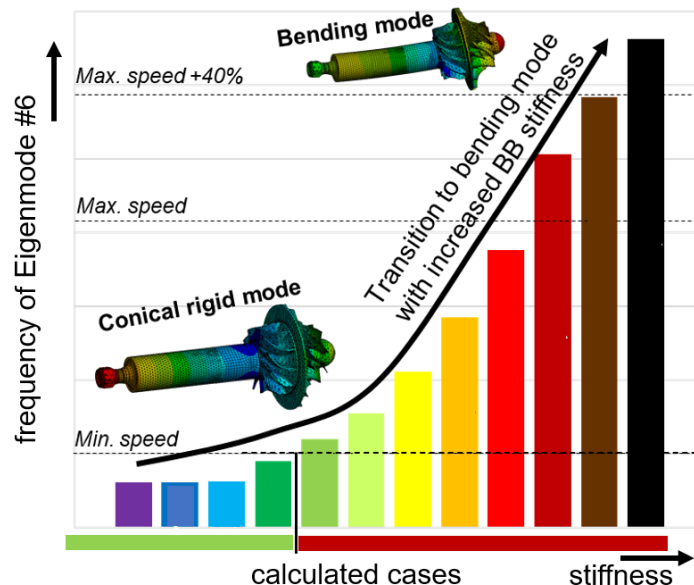


Abb 12: Steifigkeitsvariation der Kugellageraufnahme (farbige Balken) und ihr Einfluss auf die Resonanzfrequenz der Eigenform Nr. 6.

1.3.3 Stator mit direkter Gaskühlung

Hochdrehende Elektromotoren werden typischerweise indirekt durch ein flüssiges Medium gekühlt, bei dem das Kühlmittel durch den Kühlmantel des Statorgehäuses zirkuliert. Die Kühlung erfolgt durch Wärmeleitung vom Stator durch die Vergussmasse in das Kühlmittel. Die Kosten der Statorvergussmasse spielen eine wesentliche Rolle bei den Gesamtkosten des Stators, weshalb eine direkte Stator Kühlung hinsichtlich Kosten- und Gewichtsreduzierung eine äußerst attraktive Option darstellt.

Daher wurde die aktive Gaskühlung des Stators des Elektromotors mithilfe der Turbinenabströmung untersucht. Dies bietet verschiedene Vorteile. Die Turbine wird mit Abgas aus der Brennstoffzelle, das ein Temperaturniveau zwischen 70 °C und 95 °C aufweist, beaufschlagt. Die Expansion in der Turbine senkt die Temperatur des Abgasstroms weiter und macht ihn so als Kühlmedium besonders attraktiv.

Erneut wurden automatisierte Parameterstudien durchgeführt, um zu prüfen, ob eine konventionelle Wasserkühlung ersetzt und die Funktion „Stator Kühlung“ mit der Funktion „Turbinenabströmung“ kombiniert werden kann. In der Konzeptphase zeigten eindimensionale Untersuchungen, dass die Wärmeabfuhr über die Turbinenabströmung die Wasserkühlung über den gesamten Betriebsbereich ersetzen kann. In einer späteren Entwicklungsphase, als ein detaillierteres Design vorlag, war die erforderliche ausreichende Wärmeabfuhr aus der Statorstruktur weiterhin die Hauptzielgröße für die Optimierung der Kühlfunktion. Darüber hinaus wurden die Wärmeübergangskoeffizienten lokal durch Modifikation der Strömung, insbesondere der Strömungsgeschwindigkeit und des Druckverlusts, durch verschiedene geometrische Parameter wie Kanalbreiten und -querschnitte sowie Strömungsleitstrukturen variiert. Details zu dieser multidisziplinären Analyse und Optimierung, die auch induzierte Wirbelstromverluste im Motorgehäuse berücksichtigt, finden sich in [35]. Das finale Design ist einfach, leicht und führt zu einer Lösung mit herausragend hoher spezifischer Leistung bei reduzierten Prozesskosten. Die Vergussmasse konnte entfernt werden, wodurch selbstredend auch der Vergussprozess entfällt, der durch einen einfacheren Imprägnierprozess für die Wicklungen ersetzt wurde. Doppelwände für Wasserkühlungskanäle sind nicht erforderlich.

In einer parallelen Studie wurden die Auswirkungen auf den Turbinenwirkungsgrad untersucht. Das konventionelle, indirekte Wasserkühlungskonzept in Kombination mit dem Hybridlager- und Systemradkonzept erfordert eine radiale Turbinenabströmung mit allen damit verbundenen negativen Auswirkungen auf den Bauraum, insbesondere dessen axiale Länge. Diese wirkt sich negativ auf die Rotordynamik aus und muss begrenzt werden. Allerdings limitiert die dadurch entstehende Verengung des Strömungskanals am Auslass den erreichbaren Wirkungsgrad. Daher unterstützte auch diese Untersuchung die Wahl der direkten Gaskühlung des Stators, die einen axialen Turbinenauslass erlaubt. Dieses Konzept muss zwar mit dem feuchten Abgasstrom (deionisiertes Wasser) einer Brennstoffzelle umgehen, was ein Entwicklungsrisiko darstellt, der axiale Kühlstrom verhindert aber auch das eventuelle Eindringen von Verunreinigungen aus den fettgeschmierten Wälzlagern in die Brennstoffzelle. Darüber hinaus bietet die Nutzung der Stator Kühlung gleichzeitig auch als Lagerspülung zusätzliche Vorteile. Die gesamte Druckluft kann dem Brennstoffzellenstapel zugeführt werden, ohne dass zusätzliche Installationen oder Rohrleitungen erforderlich sind, um Druckluft zum Luftlager zu leiten.

1.3.4 Nutzenloser Stator mit Ringkernwicklungen

Der neu entwickelte Elektromotor basiert auf einem nutzenlosen Stator. Bei diesem Motorkonzept besteht der Eisenkern des Stators aus einem ringförmigen Joch, das in Umfangsrichtung geteilt ist, um einen automatischen Wickelprozess zu ermöglichen. Zähne und Nuten, wie bei alternativen Systemen, entfallen. Die Wickelrichtung ist 90° gegenüber einem konventionellen Stator konzept gedreht. Groß aufbauende Wickel-

köpfe sind nicht erforderlich, was eine kürzere axiale Baulänge ermöglicht. Die Wickelrichtung erleichtert zudem eine axiale Durchströmung des Motorgehäuses zur Kühlung. Ein Vergleich eines konventionellen Stators mit Nuten und verteilter Wicklung mit einem nutenlosen Stator mit verteilten toroidalen Ringwicklungen ist in **Abbildung 13** dargestellt.

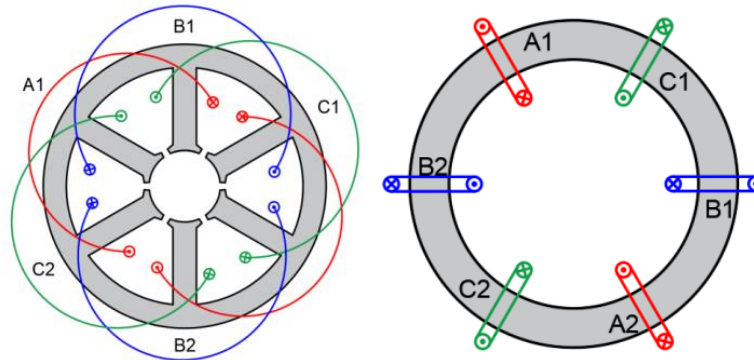


Abb 13: Vergleich eines Stators mit Nuten und verteilten Wicklungen (links) und einem nutenlosen Stator mit toroidalen Wicklungen (rechts) [36].

Dieses Motorkonzept zeichnet sich durch einen relativ großen magnetischen Luftspalt zwischen Rotor und Eisenkern aus. Dieser beeinflusst das Verhältnis von Motorstrom zu Motordrehmoment, sodass ein höherer Strom benötigt wird, um das gewünschte Motordrehmoment zu erreichen. Andererseits sind die Verluste im Rotor gering, da diese maßgeblich vom Abstand zwischen Magnet und Eisenkern sowie Oberwelligkeiten aus magnetischer Interaktion zwischen Zahn und Rotor beeinflusst werden [36]. Dies ist ein großer Vorteil, und die Rotortemperatur sinkt, was die Verwendung des vorteilhafteren Permanentmagnetmaterials NdFeB anstelle von SmCo ermöglicht. Neben den geringeren Kosten dieses Magnetmaterials bietet es auch bessere Eigenschaften hinsichtlich der Drehmomenterzeugung und auch der Verarbeitbarkeit. Reduzierte Rotorverluste tragen zu einer zuverlässigen Auslegung und Konstruktion der Magnethülse bei, da die Temperaturschwankungen im Betrieb mit unterschiedlichen Lasten und Bedingungen geringer sind. Dies ermöglicht zuverlässige Vorhersagen der Rotordynamik auch im Betrieb – lediglich eine geringe Wärmeausdehnung des Rotors muss kompensiert werden. In axialer Richtung trägt dies zur Realisierung minimaler Radspalte bei, obwohl der Fixpunkt des Rotors in axialer Richtung am freien Rotorende relativ weit entfernt ist. Darüber hinaus sind aufgrund des nutenlosen Stators ohne Zähne im Eisenkern, die eine Umfangsungleichmäßigkeit des Feldes erzeugen, geringere Geräusche und Vibrationen zu erwarten.

Ein neuartiges axiales Klemmkonzept der Statorfixierung gewährleistet Robustheit und erleichtert die Montage. **Abbildung 14** zeigt das Konzept, das auf drei Stiften und einem Klemmring basiert: Die Stifte dienen der Führung, der verschraubte Ring sorgt für die Vorspannung gegen die Auflageflächen im Gehäuse. Der Einfluss einer etwaigen verschlechterten Koaxialität zwischen Rotor und Stator wurde durch elektromagnetische Berechnungen über den Einfluss auf Radialkräfte und Drehmomenterzeugung bewertet. Zur Bewertung der mechanischen Festigkeit wurden statische und dynamische Berechnungen durchgeführt, welche die dauerhafte Zulässigkeit der erwarteten Amplituden bestätigten und die vorgesehenen Spalte verifizieren. **Abbildung 14** zeigt beispielhaft die berechneten Amplituden der Torsionsschwingung der Statorbau-Gruppe in übertriebener Darstellung.

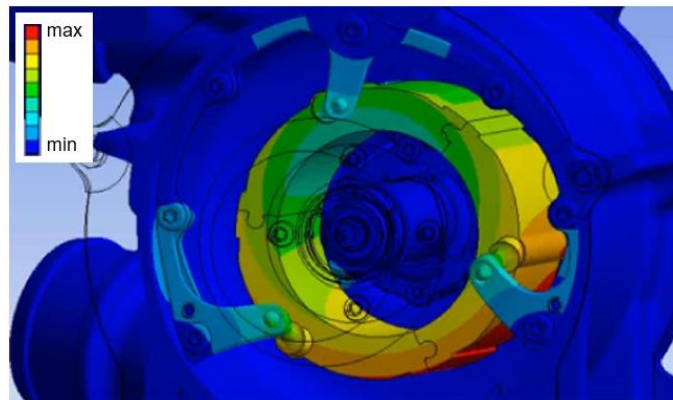
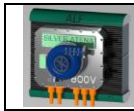


Abb 14: Berechnete Amplituden für den Drehschwingungsmodus der Statorbaugruppe mit axialer Fixierung.

Generell wird erwartet, dass der Wirkungsgrad eines solchen Elektromotorsystems auf einem ähnlichen Niveau wie bei vergleichbaren konventionellen Motorkonstruktionen liegt, obwohl ein größerer Rotor-Stator-Spalt vorliegt. Daher treten die Verluste verstärkt im Stator auf, der für die Kühlung leichter zugänglich ist. Allerdings müssen auch die induzierten Wirbelstromverluste im Gehäuse berücksichtigt werden. Dies führte zu Kompromissen bei der Bestimmung des Spalts zwischen Außengehäuse und Stator – ein kleinerer radialer Spalt verbessert die Kühlleistung, während ein größerer Abstand des Stators von der Motorgehäusewand die Wirbelstromverluste reduziert. Daher wurde, wie in **Abbildung 15** ausgeführt, schon in der Konzeptphase eine Optimierung des Abstandes zwischen der Außenhülle des Stators und der inneren Gehäusewand durchgeführt. Die mögliche Variation des Wärmeübergangs ist für die wichtigsten Betriebspunkte zu erkennen.

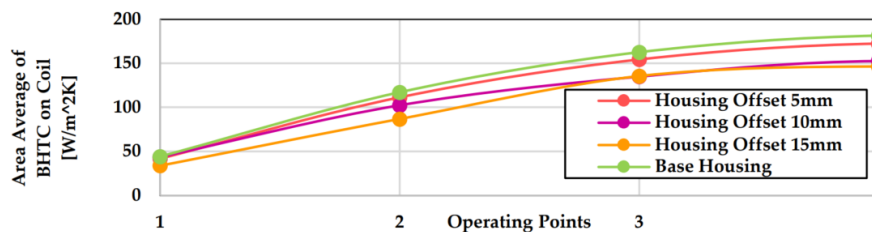


Abb 15: Flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizienten (BHTC) auf der Statoraußenhülle für verschiedene betrachtete Betriebspunkte und unterschiedliche Abstände zur inneren Gehäusewand.

Die Entwicklung komplexer Systeme erfordert eine konsequente Verifizierung und Validierung entlang des V-Zyklus. Nur so kann eine stetige Risikoreduzierung über die Projektlaufzeit gewährleistet werden. Basierend auf einem systematischen Ansatz sind numerische Kompetenz zur Verifizierung und Kreativität der Ingenieure erforderlich, um die relevantesten Untersuchungen zu definieren. Im nächsten Abschnitt wird der angewandte Prozess beschrieben.

1.4 Komponenten-, Subsystem- Systemverifizierung und Subsystemvalidierung

In einem effektiven und schlanken Produktentwicklungsprozess ist es unerlässlich, möglichst früh aussagekräftige Verifizierungen und Validierungen durchzuführen. Dies stellt sicher, dass notwendige Designänderungen mit minimalen Auswirkungen auf den gesamten Projektzeitplan umgesetzt werden können. Mit zunehmender Designreife

nehmen die Tiefe und die Komplexität der Untersuchungen zu, sie werden relevanter und detaillierter. Beispielsweise können Untersuchungen zum Wärmemanagement mit eindimensionalen Konzeptanalysen beginnen, sich zu zweidimensionalen Auswertungen weiterentwickeln und ihre höchste Genauigkeit erst erreichen, wenn das architektonische Design für eine dreidimensionale Analyse ausreichend definiert ist. Ingenieurskompetenz ist erforderlich, um die einfachsten, aber aussagekräftigsten Untersuchungen zur Risikobewertung zu identifizieren. Die größten technischen Risiken sollten priorisiert und gründlich bewertet werden. Darüber hinaus benötigen neue oder einzigartige Merkmale des Konzepts eine frühzeitige und zuverlässige Verifizierung auf Komponenten- oder Subsystemebene, um einen sicheren Projektverlauf zu gewährleisten. Sollten die Verifizierungsmethoden noch Unsicherheiten für den Entwicklungsingenieur hinterlassen, muss eine entsprechende Validierung bereits in frühen Projektphasen geplant werden. Ein Werkzeug zur Bestimmung der Relevanz und des Umfangs von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten ist die Design Structure Matrix (DSM) [37].

Mithilfe der DSM lassen sich die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemkomponenten über verschiedene Disziplinen hinweg – wie strukturelle Integrität (statisch und dynamisch), thermisches Verhalten, Aerodynamik und Elektromagnetik – visualisieren. Dies ermöglicht die Festlegung, welche Komponenten unabhängig auf Komponentenebene analysiert werden können und welche im Kontext des jeweiligen Subsystems oder des Gesamtsystems betrachtet werden müssen. Eine Übersicht über die Systemebenen ist in **Abbildung 16** dargestellt.

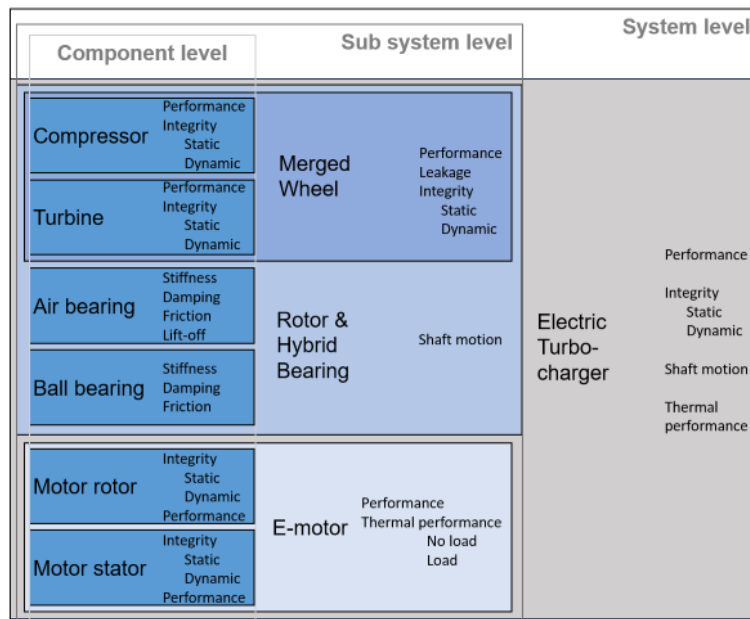


Abb. 16: Systematik der Systemebenen und Untersuchungen während der Verifizierung und Validierung.

Die DSM bietet zudem eine Methode zur Definition der relevanten Systemgrenzen und zur Bestimmung des geeigneten Detaillierungsgrades für numerische oder physikalische Modelle, die in Simulationen oder experimentellen Studien verschiedener Disziplinen verwendet werden. Dies geschieht durch die Klassifizierung der Art der Wechselwirkung (z. B. thermisch) und die anschließende Bewertung ihrer Stärke und ihres Einflusses auf die Hauptfunktion des Systems.

Der Kürze halber wird dieser Prozess hier nicht im Detail beschrieben. Ein wichtiges Ergebnis der DSM entlang des V-Zyklus bestand jedoch darin, dass die Aerodynamik des Systemrades frühzeitig bestätigt werden musste, da Turbinen- und Kompressorstufe für das Erreichen der Systemleistung am relevantesten sind. Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit einer experimentellen Validierung des Hybridlagerkonzepts mit der Ein-Durchmesser-Wellenkonstruktion hervorgehoben, die das zentrale Element der gewählten Designarchitektur darstellt. Die dritte wichtige Erkenntnis bestand darin, dass die thermische Analyse mithilfe eines vollständigen Systemmodells durchgeführt werden muss, das alle physikalischen Phänomene berücksichtigt, einschließlich der Thermo-Aerodynamik von Kompressor und Turbine, des Kühlmittelstroms aus dem Turbinenauslass, der Wärmeerzeugung durch Reibung und elektromagnetische Verluste sowie der Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Struktur.

Das Subsystem Elektromotor wird in dieser Arbeit nicht behandelt, ist aber Thema im Teilbericht des Partners Silver Atena GmbH.

State-of-the-art Verifikationsstudien [28] wurden sowohl für einzelne Komponenten und Unterbaugruppen als auch für die komplette Baugruppe erfolgreich durchgeführt. Diese reichten von der grundlegenden Festigkeitsanalyse isolierter Komponenten, wie z. B. Gehäusen unter Druckbelastung und Rädern unter Umfangslast, über komplexere strukturdynamische Analysen der Rotorbaugruppe unter Rotation bis hin zur Schwingungsanalyse der gesamten Gehäusebaugruppe mit integriertem Stator unter Berücksichtigung sowohl interner als auch externer Anregungen. In **Abbildung 14** wurde dazu schon ein beispielhaftes Berechnungsergebnis gezeigt. Die **Abbildungen 17** und **18** geben einen vollständigeren Überblick. Auch das Containment der Gehäuse ggü. einem Bruch des Systemrades wurde gemäß aktuellem Stand der Technik durch numerische Simulation abgesichert. Im Detail werden diese Berechnungen hier nicht vorgestellt, da die numerischen Methoden und die Grenzwerte zur Bewertung sensitives, wertvolles Know-How der Produktentwickler darstellen.

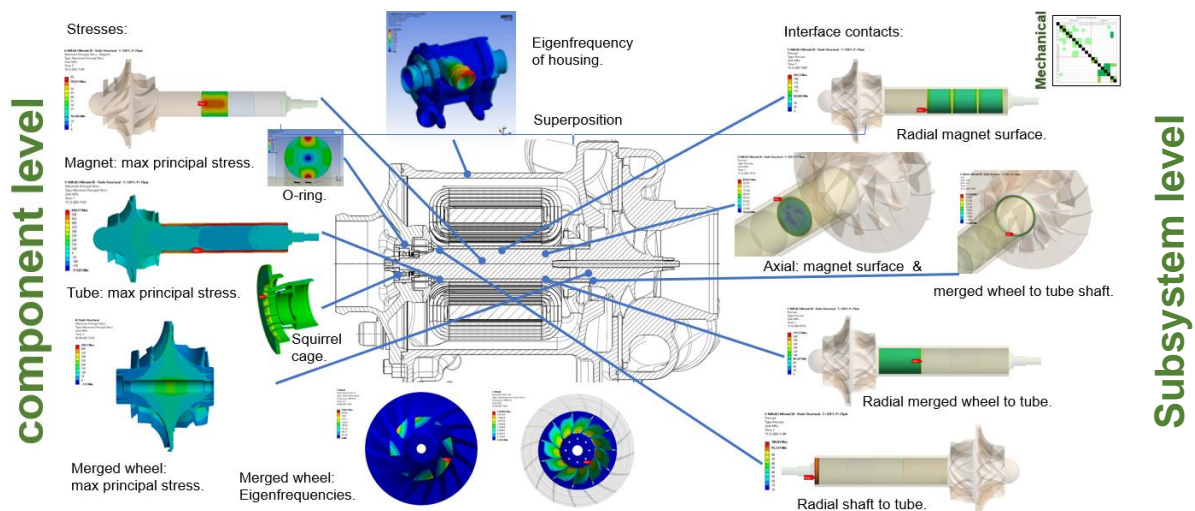


Abb 17: Übersicht mechanischer Verifikationsstudien auf Komponenten- bzw. Subsystemebene.

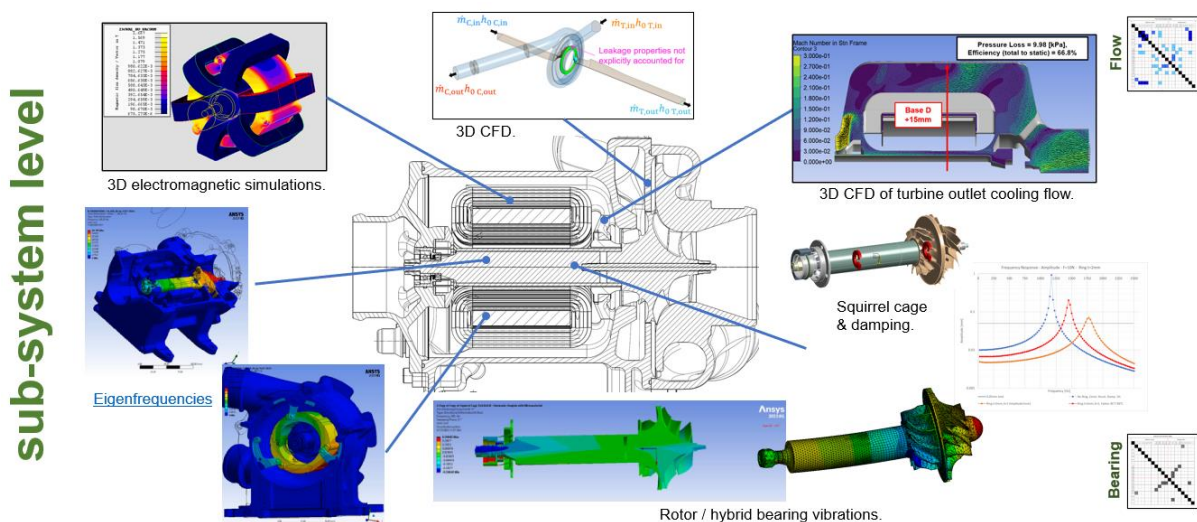


Abb 18: Übersicht der Verifikationsstudien auf Subsystemebene.

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Untersuchungen – Verifizierung und Subsystemvalidierung – zur Aerodynamik des Systemrades, der Rotordynamik und dem Wärmemanagement zusammengefasst.

1.4.1 Untersuchungen am Systemrad

Die aerodynamische Performance eines Turboladers ist von größter Bedeutung. Die simulative Überprüfung der Aerodynamik wurde mit bewährten 3D-CFD-Simulationsmethoden zur Bewertung der Kompressor- und der Turbinenstufe durchgeführt. Die Schaufelgeometrien wurden unter Berücksichtigung der zulässigen axialen Erstreckung bzw. Radmasse erstellt, die über die oben erläuterten Konstruktionsraumuntersuchungen definiert wurden. Die Form der Radnabe wurde für eine leistungsoptimierte Integration in die Wellenbaugruppe im Ein-Durchmesser-Design angepasst. Die Simulation bestätigte ein gutes Wirkungsgradniveau, das die Anforderungen, wie sie von Rathke et al. in [10] formuliert wurden, erfüllen kann. Angesichts der hohen Lastanforderungen für den vorgesehenen Einsatzzweck der HDT-Anwendung wurden bei der durchgeführten parametrisierten Optimierung Betriebsbedingungen für den Turbolader mit einem Kompressordruckverhältnis von über 2,0 stark bevorzugt.

Aufgrund des Druckunterschieds zwischen Kompressorauslass und Turbineneinlass muss eine gewisse Leckage zwischen den Stufen erwartet werden. Diese Leckage bedeutet einen Verlust in der Systemeffizienz und muss minimiert werden. Dazu ist es entscheidend, die lokalen Druckbedingungen entlang des Leckageströmungspfad zu verstehen, die durch verschiedene Konstruktionsmerkmale (auch den Reaktionsgrad der Turbine- und Verdichterstufen) angepasst werden können. Der Druckverlust zwischen Kompressorauslass und Turbineneinlass wird hauptsächlich durch den Druckabfall im Stack bestimmt, aber auch durch Strömungsverluste anderer Systemkomponenten beeinflusst, wie etwa durch die Rohrleitungen und den Gegendruck nach dem Turbinenaustritt. Daher ist es möglich, die Leckagesituation an die Bedingungen des Brennstoffzellensystems anzupassen. Die Definition solcher Konstruktionsänderungen erfordert ein geeignetes numerisches Modell zur Vorhersage. Die Verifizierung erfolgt durch simultane 3D-CFD-Simulationen der Kompressor- und Turbinenstufen. Die allgemeine Leckagesituation und der CFD-Bereich des vollständigen Modells sind in **Abbildung 19** vorgestellt.

Um die spezifische Strömungssituation besser zu verstehen, wurden einige grundlegende Geometrievariationen in Betracht gezogen. Diese ist jedoch aufgrund der lokalen Verwirbelung am Verdichterradauslass und am Turbineneinlass, die beide Gegenstand aktueller Forschungsinteressen sind, alles andere als einfach [38] [39]. Wenig überraschend wird die Höhe der Leckage maßgeblich von der Spalthöhe bestimmt, kann aber auch durch geometrische Variationen, Labyrinth o. ä. beeinflusst werden. Dennoch muss jedes Konstruktionsmerkmal Verschiebungen nicht nur in axialer, sondern auch in radialer Richtung ausreichend tolerieren, ohne dass es zu einem Kontakt zwischen dem rotierenden Teil und den Gehäusewänden kommt.

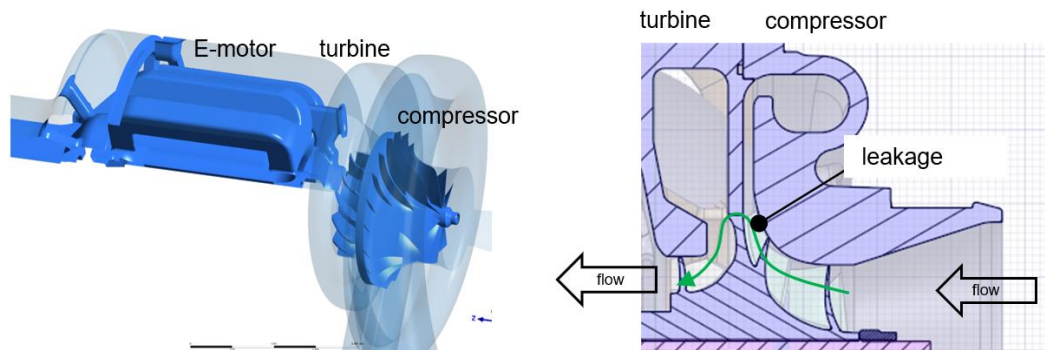


Abb 19: Darstellung der Leckagesituation zwischen Kompressor und Turbine (rechts); CFD-Bereich des Systems (links).

Abbildung 20 zeigt beispielhaft zwei mögliche Ausführungen des Leckagekanals. Konstruktion (b) weist die doppelte Kanallänge bzw. Rückwanddicke und eine um 50% höhere Kanalhöhe bzw. einen um 50% höheren Radialspalt als Konstruktion (a) auf.

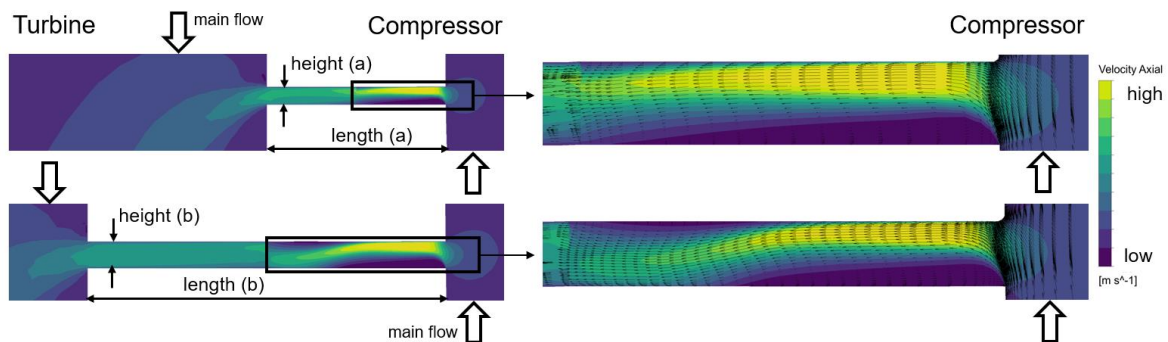


Abb 20: 3D-CFD-Berechnung der Leckage zwischen Kompressor- und Turbine im Systemrad.

CFD zeigt, dass die Leckage zwischen Verdichter und Turbine bei Hochlastbetrieb mit einem Druckverhältnis $>2,0$ bei Konstruktion (b) um 40 % höher ist. Der Radialspalt effekt dominiert. Die Strömungsstruktur zeigt, dass die Laufradaustrittsströmung auf die obere Ecke des Kanals trifft und in den Kanal geleitet wird. Daher reduziert die Einführung einer Stufe auf der Verdichterseite die Leckageströmung um 50 %, was etwa 3 % der gesamten Verdichtereintrittsströmung entspricht. Wie bereits erwähnt, geht diese Leckageströmung nicht vollständig verloren, sondern laut Simulation kann ein wesentlicher Anteil der zur Verdichtung der Leckageströmung verlorenen Leistung in der Turbine zurückgewonnen werden. Daher kann die Leckageströmung und ihr Einfluss auf die Verdichtungsleistung bei Hochlastbetrieb nahezu vernachlässigt werden. Sie muss jedoch berücksichtigt werden, um die nach Leckage bereitgestellte verdichtete Luftmenge an die benötigte Luftmenge des Brennstoffzellenantriebs anzupassen.

Moderne CFD-Simulationen liefern grundsätzlich zuverlässige Ergebnisse, aufgrund der Neuheit des Konzepts des Systemrades waren jedoch experimentelle Untersuchungen unabdingbar.

1.4.1.1 Aerodynamische Untersuchungen

Angesichts der Komplexität der Strömungssituation musste neben isolierten Verdichter- und Turbinenkennfeldmessungen auch eine experimentelle Validierung durch Subsystemtests frühzeitig im Projekt durchgeführt werden.

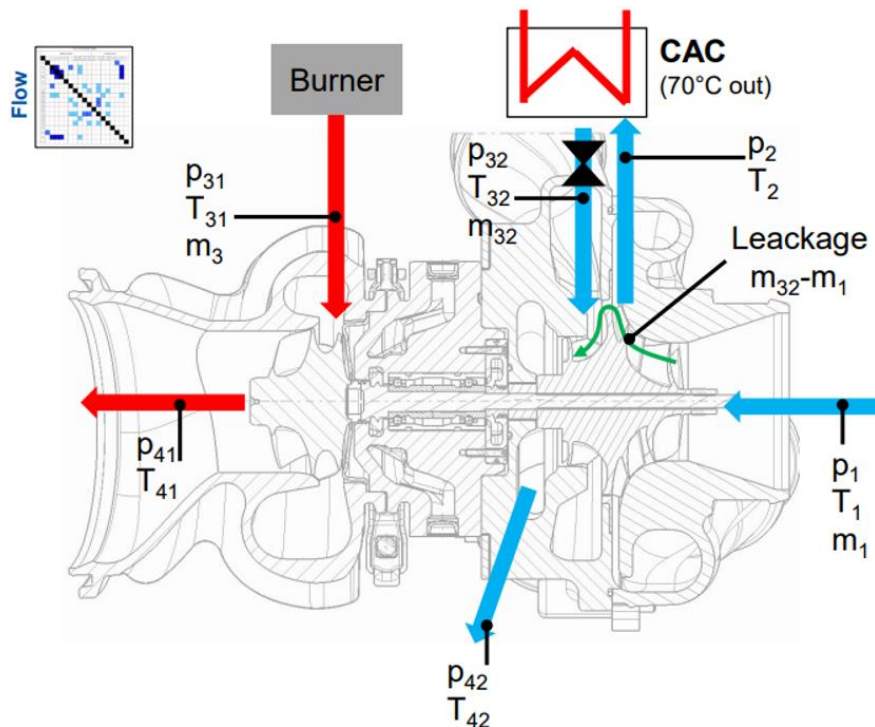


Abb 21: Schematische Darstellung des turbinengetriebenen Fahrzeug-Turboladers mit Systemrad anstelle einer herkömmlichen Verdichterstufe.

Um dies zu ermöglichen, wurde ein Subsystemtest mit einer turbinengetriebenen Baugruppe, die auf einem Standard-Turbolader für Automobilanwendungen basiert und die in der **Abbildung 21** schematisch und in **Abbildung 22** photographisch dargestellt ist, durchgeführt. Die ursprüngliche Verdichterstufe des Turboladers wurde jeweils durch die Verdichterstufe der Brennstoffzellen-Luftversorgung, die Turbinenstufe der Brennstoffzellen-Luftversorgung oder das Systemrad der Brennstoffzellen-Luftversorgung ersetzt. Die Kennfelder wurden mit dem Standardvorgehen bei thermodynamischen Messungen von Verdichtern und Turbinen vermessen [28].

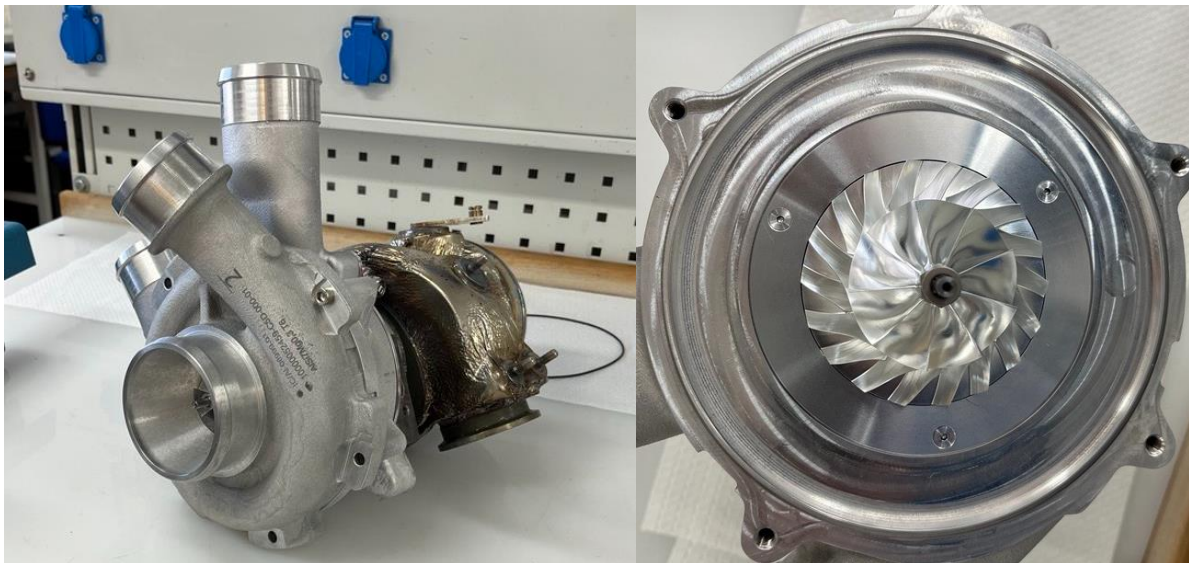


Abb 22: Turbinengetriebener Fahrzeug-Turbolader mit Systemrad anstelle einer herkömmlichen Verdichterstufe (links). Blick auf die Verdichterseite des Systemrads mit abgenommenem Gehäuse (rechts).

Abbildung 23 zeigt die gemessenen Kennfelder von Verdichter und Turbine im Komponentenaufbau. Die Ergebnisse für die Verdichter- und die Turbinenstufe entsprechen den numerischen Vorhersagen. Die Wirkungsgrade der leitgitterlosen, nicht variablen Ausführungen von Turbine und Verdichter sind konkurrenzfähig. Abhängig von den tatsächlichen Anforderungen an die Kennfeldbreiten kann der Wirkungsgrad durch den Einsatz von Diffusoraustrittsschaufeln beim Verdichter weiter gesteigert werden.

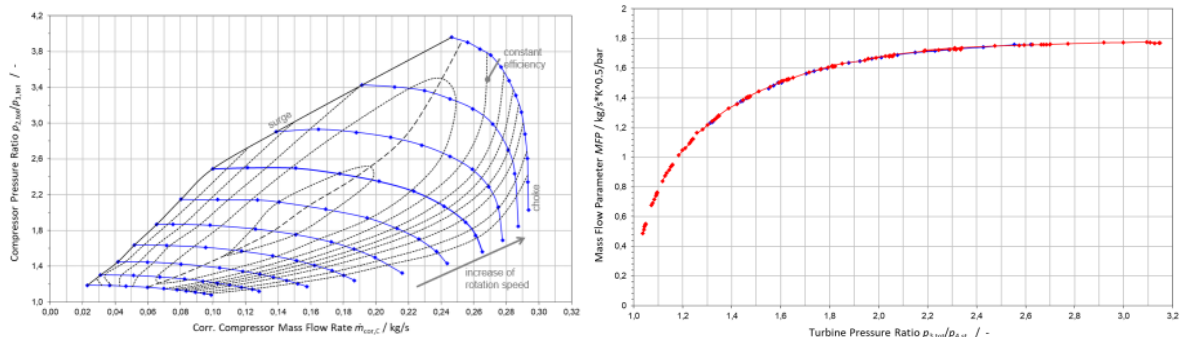


Abb 23: Verdichterkennfeld (links) und Turbinenkennfeld (rechts) aus der Prüfstandsmessung im Komponentenaufbau.

Wie bereits erwähnt, zeigte sich während der Simulationsphase, dass die Leckage im Systemrad durch lokale geometrische Merkmale modifiziert werden kann. Daher wurden geometrische Varianten erstellt und während einer Messkampagne mit dem Subsystemaufbau untersucht, um Erkenntnisse über notwendige oder mögliche Modifikationen zu gewinnen. Die Spaltdefinition muss auch Aspekte der Wellenbewegung während des Betriebs berücksichtigen. Alle aktuellen Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine weitere Spaltreduzierung möglich ist.

In diesem Teilsystemtest musste der Turbinenaustritt aufgrund von Konstruktionsbeschränkungen radial sein. Dies wurde in CFD durch die Erstellung entsprechender numerischer Modelle berücksichtigt. Das Systemmodell ist bereits in **Abbildung 19** dargestellt. Die Ergebnisse zur Leckage sind in **Abbildung 24** zusammengefasst.

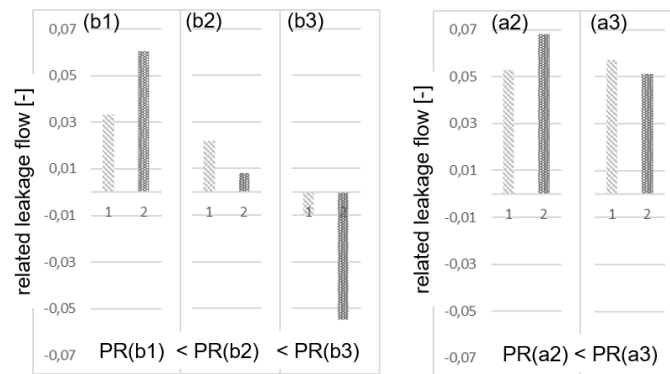
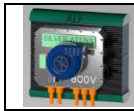


Abb 24: Vergleich der berechneten (1) und gemessenen (2) Leckage für den Aufbau des Teilsystems; Betrieb (a) näher am Pumpen; Betrieb (b) höherer Massenstrom; die Relation zwischen den Verdichterdrukverhältnissen (PR) ist angegeben.

Der Leckagestrom macht bis zu etwa 7 % des gesamten Verdichtereintrittsstroms aus, aber wie oben erklärt ist der Verlust an Systemleistung klein und nahezu vernachlässigbar. Bei Betrieb näher am Pumpen steigt der Leckagestrom. Mit höheren Druckverhältnissen sinkt der Leckagewert. Wie erwähnt ist das lokale Druckgleichgewicht am Spalt ausschlaggebend, das von den ausdrücklichen Randbedingungen des Betriebs abhängt. Aufmerksamkeit ist bei Betriebsbedingungen mit höherem Druckverhältnis und höherem Massenstrom geboten, bei denen sich die Leckagerichtung umkehrt. Dies ist nicht erwünscht und kann durch die erklärten Maßnahmen modifiziert werden. Für diesen ersten Konstruktionsentwurf wurde es dennoch akzeptiert. Für den vorgesehenen Betrieb an einer Brennstoffzelle wird das Risiko einer negativen Leckage von der Turbinen- zur Verdichterseite, die das Risiko einer Verunreinigung des Brennstoffzellenstacks mit sich bringen könnte, als gering eingeschätzt.

Basierend auf diesen numerischen und experimentellen Untersuchungen konnte die aerodynamische Funktion des neuartigen AC+eR -Designs nachgewiesen werden. Neben der Performance bedarf auch das anspruchsvolle Design des hochdrehenden Rotors einer gründlichen technischen Bewertung.

1.4.2 Hybridlagersystem

Die detaillierte Konstruktion des Rotor- und Lagerkonzepts wurde zunächst in einer harmonischen Analyse mit dem FEM-Werkzeug ANSYS Mechanical bewertet. Das Luftlager wurde mit Steifigkeits- und Dämpfungswerten aus früheren Komponentencharakterisierungstests simuliert [33]. Die Steifigkeit und Dämpfung der Aufnahme des Kugellagers wurden basierend auf der tatsächlichen Geometrie und verfügbaren Literaturdaten für EPDM-Elastomere berechnet [40]. In Kapitel 1.3.2 wurde das Vorgehen zur Definition der Steifigkeit beschrieben, die in die Konstruktion der Stützstruktur einfluss. Ausreichende Dämpfung wurde durch die Integration von Elastomerringen erreicht. Die Rotorunwucht wird mit dem Zweifachen der maximal zulässigen Unwucht der Baugruppe berücksichtigt. Die Ergebnisse in **Abbildung 25** zeigen, dass ein System ohne Dämpfung zu hohen Auslenkungen führen kann, die Frequenz jedoch außerhalb des Betriebsbereichs und unterhalb der Leerlaufdrehzahl liegt und somit das Konstruktionsziel erfüllt. Durch zusätzliche Dämpfung erhöht sich die Steifigkeit des Systems, wodurch die Resonanz leicht in den Betriebsbereich verschoben wird. Aufgrund der signifikanten Dämpfung sind die erwarteten Amplituden aber unkritisch. In

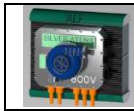


Abbildung 25 sind zwei Fälle mit modifizierter Dämpfung (a) und (b) dargestellt, die die Änderung des Verhaltens unter Alterungsbedingungen widerspiegeln [41].

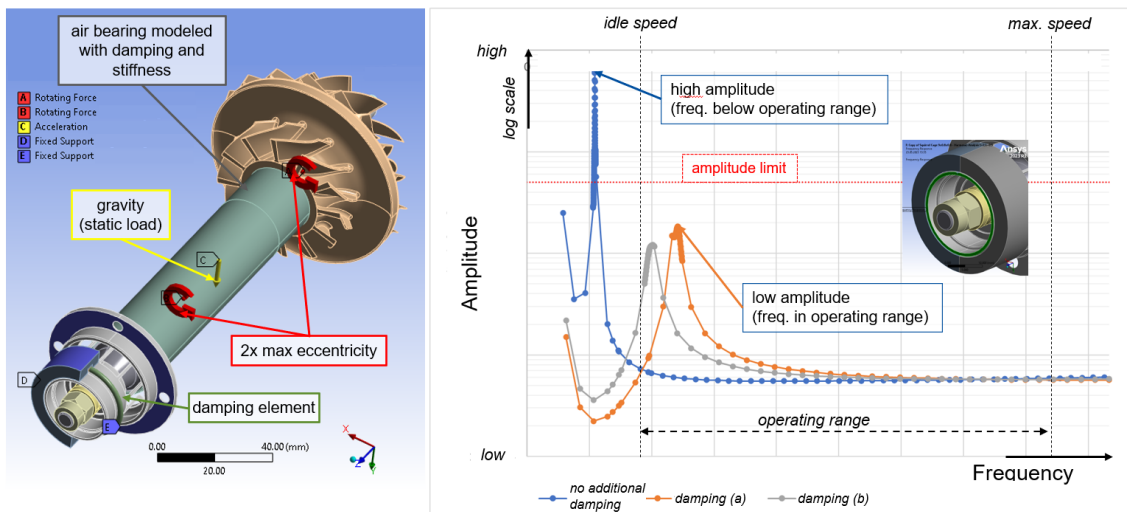


Abb 25: Hybridlager- und Rotormodell für die harmonische Analyse (links); Ergebnis für verschiedene Dämpfungskonfigurationen (rechts).

1.4.2.1 Validierung der Lageraufnahme und Messung der Wellenbewegung

Basierend auf dem dargestellten theoretischen Verständnis wurden vorbereitend verschiedene Untersuchungen an Komponenten und an Subsystemen, welche diese Komponenten einschließen, entwickelt, um das erwartete Verhalten des Hochgeschwindigkeitsrotors frühzeitig im Projekt zu bestätigen. Die Bestätigung der statischen und dynamischen Steifigkeit und Haltbarkeit der Aufnahme für das Kugellager wurde z.B. mit Tests auf Komponentenebene durchgeführt.

Dies erfolgte mithilfe eines Shaker-Aufbaus, wie er in **Abbildung 26** zu sehen ist. Es wurden Dummy-Massen auf die Lagerhalterung aufgebracht, um sicherzustellen, dass die relevanten Eigenfrequenzen, mit denen der tatsächlichen Rotorbaugruppe, übereinstimmen. In dynamischen Tests wurden die Dämpfungs- und Schwingungseigenschaften des Elements sowie Studien zum Einfluss auf die Veränderung des Dämpfungsverhaltens durch gealterte O-Ringe validiert. Das Subsystem wurde am Shaker-Prüfstand mit harmonischen Schwingungen bei einer konstanten Beschleunigung zwischen 100 Hz bis 1800 Hz angeregt. Auch erste Lebensdauertests lassen sich mit dem erarbeiteten Testaufbau realisieren.

In einem weiteren Versuchsaufbau, den **Abbildung 27** zeigt, wurden Haltbarkeits- und Alterungsstudien des Elastomer-Dämpfungselements unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen in einem Brennstoffzellen-Abgassystem durchgeführt.

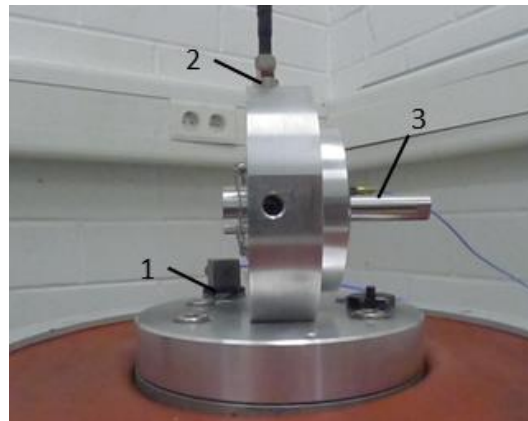
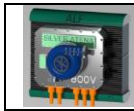


Abb 26: Shaker-Prüfstands Aufbau zur Messung der dynamischen Eigenschaften der Wälzlageraufnahme mit Beschleunigungssensoren am Fußpunkt (1), am Gehäuse (2) sowie Verschiebungsmessungen am Dummy-Rotor (3).

Die wichtigsten Alterungsfaktoren – Temperatur, Alterungszeit, Kompression und Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis – wurden auf ihre Auswirkungen auf die Materialeigenschaften analysiert. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Temperatur der signifikanteste Faktor ist. Mit höherer Einsatztemperatur nimmt die Sensitivität bzgl. Alterung zu. Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis spielt ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Eine in Relation größere Oberfläche erleichtert den Angriff der umgebenden Atmosphäre und damit die Alterung. Auf Basis der experimentellen Arbeiten wurde ein nicht-lineares Modell, das die Alterung der Untersuchten EPDM-O-Ringen in Bezug auf Dämpfung und Steifigkeit über der Zeit rudimentär beschreibt, erstellt. Die Zahl der durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieses Vorentwicklungsprojektes erlaubt noch keine statistische Sicherheit, die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass unter der zu erwartenden statischen und dynamischen sowie thermischen Beanspruchung zulässige Amplituden über mehrere 1.000 Stunden eingehalten werden können. Detaillierte Informationen sind bereits veröffentlicht und sind in [41] verfügbar.

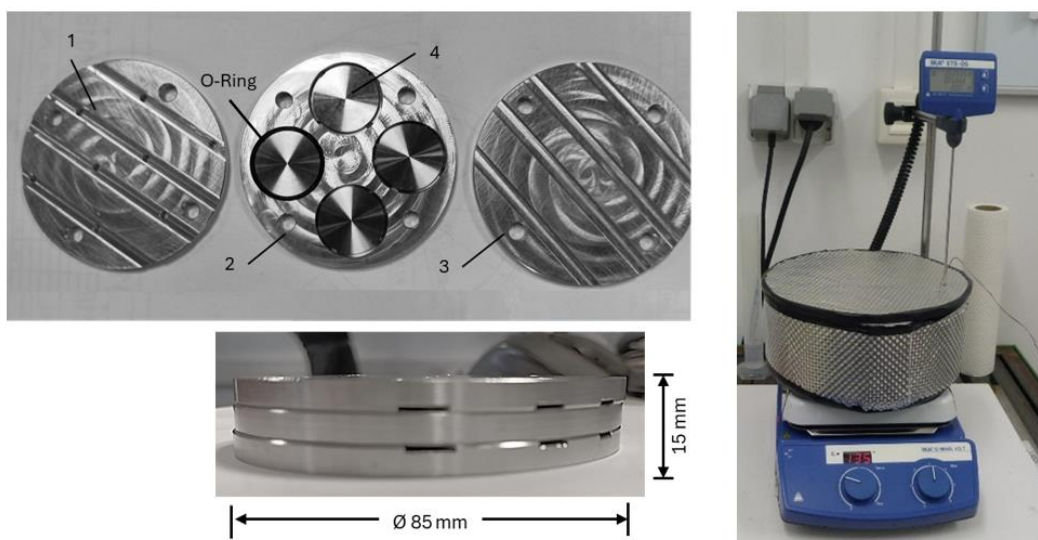


Abb 27: Zusammenbau zur Erzeugung der radialen Vorspannung der O-Ringe (links); Prü fzelle zur Aufnahme und Alterung der vorgespannten O-Ringe (rechts).

Die Tests der Luftlagerkomponenten beschränkten sich auf Reibungsmessungen, da es sich bei der verwendeten Ausführung des Luftlagers um ein validiertes Design handelt [32] [33]. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung des Lagers im Vergleich zu bereits validierten Designs aufgrund der erheblichen Gewichtsreduzierung des hier ausgeführten Rotors im Ein-Durchmesser-Design geringer ist und insofern als unkritisch eingestuft werden kann.

Das Lagersystem wurde als Subsystem in einem turbinengetriebenen Rotordynamik-Dummy getestet, der hinsichtlich Eigenfrequenzen, Schwerpunkt und Trägheit analoge Eigenschaften wie das Rotorsystem des Brennstoffzellen-Turboladers aufwies. Der Versuchsaufbau ist in **Abbildung 28** gezeigt. Die Tests des rotordynamischen Dummies wurden mit unterschiedlichen Dämpfungsgraden durchgeführt, es wurden jedoch auch Tests ohne zusätzliche Dämpfung durchgeführt. Die numerische oder analytische Modellierung der Dämpfung einer realen Struktur ist nach wie vor eine wissenschaftliche Herausforderung [40] und daher ist der zuverlässigste Vergleich zwischen Analyse und Experiment der Fall ohne Dämpfung. Die Unwucht des Systems konnte durch Hinzufügen von Gewichten am Rotor variabel eingestellt werden. Das in **Abbildung 29** dargestellte Diagramm zeigt die Ergebnisse der Wellenbahnmessungen mit der für das System spezifizierten maximal zulässigen Unwucht. Dargestellt sind die gemessenen Orbits an den beiden Wellenenden gegenüber der Rotationsgeschwindigkeit des Rotors im Versuchsaufbau des Sub-Systems.

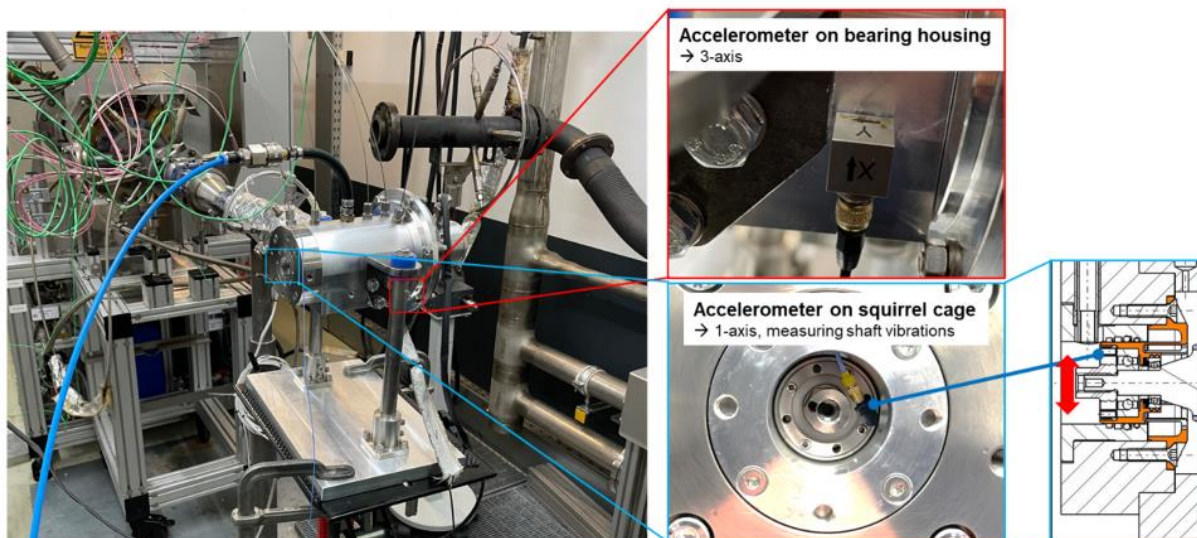
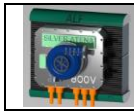


Abb 28: Prüfstands Aufbau mit Beschleunigungsaufnehmern: Gehäuse („bearing-housing“) und Wälzlageraufnahme („squirrel cage“).

Die Wellenbahnmessung belegt, dass die numerische Vorhersage der ungedämpften Rotorfrequenz im niedrigen Drehzahlbereich erwartungsgemäß ausreichend genau ist. Die Abweichung beträgt ca. 8,0 %. Der Effekt der Dämpfung wird deutlich. Die Verschiebung der kritischen Resonanzfrequenz durch den Versteifungseffekt, aber auch die deutliche Reduzierung der gemessenen Orbits sind erkennbar. An beiden Wellenenden reduzieren sich die Amplituden, wobei die höchsten Amplituden ungedämpft am Wellenende des Kugellagers gemessen werden. Mit Dämpfung reduzieren sich die Amplituden am Luftlager und am Wellenende des Kugellagers auf unkritische Werte. Die höchste Amplitude im Betriebsbereich wird weiterhin am Wellenende in der Nähe des Kugellagers gemessen. Die durchgeführte Festigkeitsbetrachtung mit Hilfe



der Finite-Elemente-Methode führte zu dem Schluss, dass diese Amplituden von der Aufnahme des Kugellagers dauerhaft ertragen werden können.

Auch der „lift-off“, also das Abheben, des Rotors vom Luftlager ist in dieser Messung erkennbar. Wie gewünscht liegt dieser deutlich unter der definierten Leerlaufdrehzahl des Rotors. Der Wert ist aufgrund der vorteilhaften Gewichtsreduzierung der Systemrad-Rotor-Baugruppe positiv niedrig.

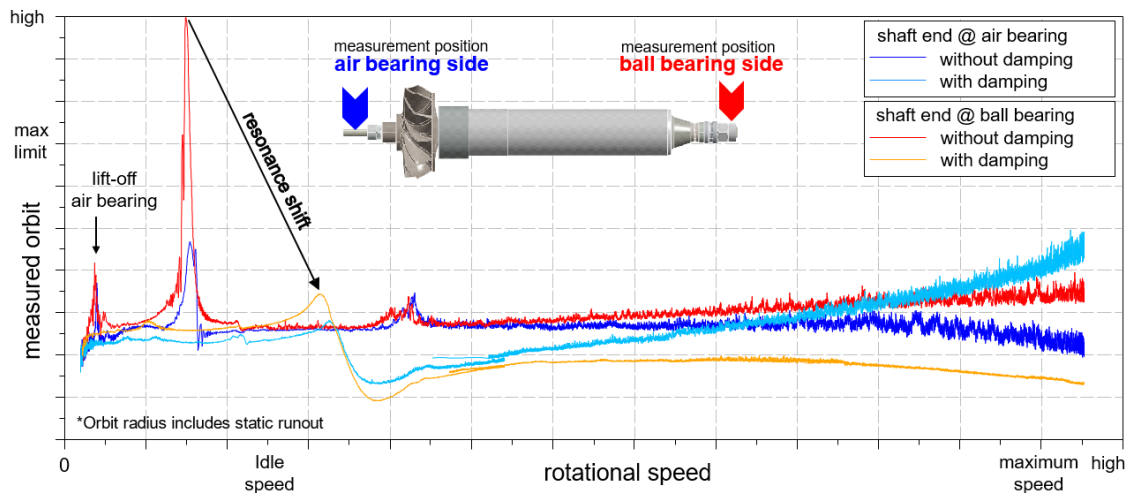


Abb 29: Ergebnisse der Wellenbahnmessung des Rotordynamik-Dummys mit und ohne Dämpfung.

Mit diesen Ergebnissen konnten die Anforderungen an die Rotorunwucht sowie die Dämpfungskonfiguration verifiziert werden. Diese erfolgreiche Subsystemvalidierung war wesentlich, um das Vertrauen in die neue Ausführung der Designarchitektur des Brennstoffzellen-Turboladers zu stärken.

Die dritte wesentliche Untersuchung betrifft das Wärmemanagement des Turboladers.

1.4.3 Wärmemanagement

Ein einziges Gehäuse umschließt den kompakten Elektromotor und die Turbomaschine. Aufgrund der neuartigen Nutzung des Turbinenabgasstroms als Kühlmedium für den Elektromotor und die Lager in Kombination mit dem neuen nutzenlosen Stator mit toroidalen Wicklungen wurde vor den Hardwaretests eine detaillierte simulative Untersuchung durchgeführt.

Während der Motorauslegung wurden mehrere grundlegende ein-, bzw. zweidimensionale Untersuchungen des Kühlkonzepts durchgeführt. In **Abbildung 30** ist die berechnete relative Kühlleistung und die dazugehörige relative Temperaturverteilung aus der einfachen numerischen Modellierung der indirekten Wasserkühlung im Vergleich zur direkten Luftkühlung für den Leistungspunkt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Abgaskühlung ebenso effektiv sein kann wie die konventionelle indirekte Flüssigkeitskühlung. Zudem bietet die hier vorgestellte Architektur, wie bereits erwähnt, einen zusätzlichen wesentlichen Vorteil: Der heiße Teil der Verdichterstufe ist durch die Turbinenanordnung vom Kern der Maschine abgeschirmt.

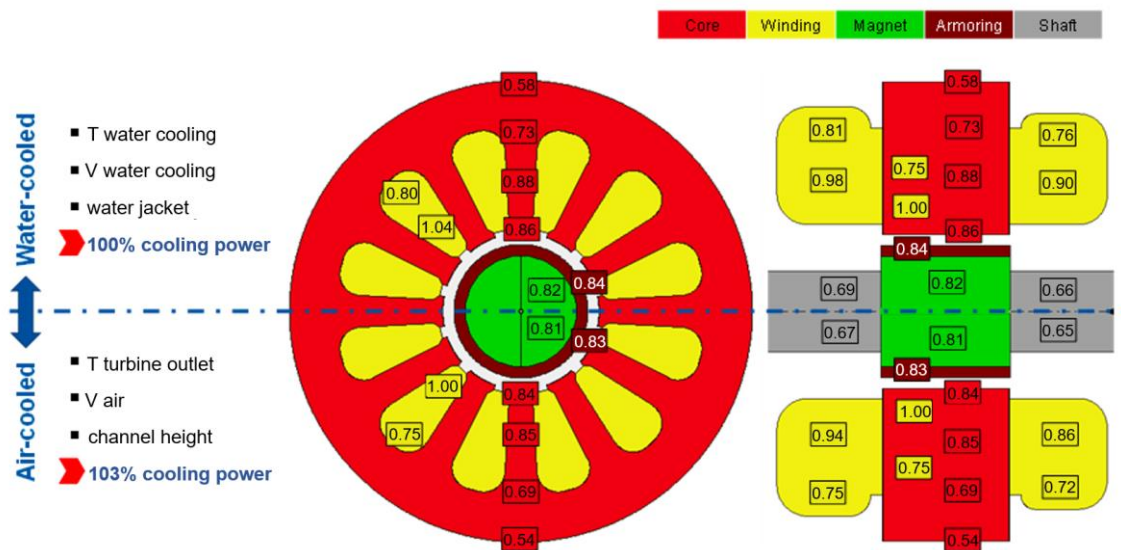


Abb 30: Berechnete relative Kühlleistung und relative Temperaturverteilung aus der einfachen numerischen Modellierung der indirekten Wasserkühlung (oben) im Vergleich zur direkten Luftkühlung (unten).

Aus der DSM geht hervor, dass detaillierte multiphysikalische Untersuchungen erforderlich sind. Es wurde eine schwache Kopplung der dreidimensionalen elektromagnetischen Analyse mit Altair Flux 3D mit einer dreidimensionalen CFD- und thermischen Berechnung mit ANSYS CFX und ANSYS Mechanical gewählt. Der prinzipielle Prozess ist in **Abbildung 31** dargestellt.

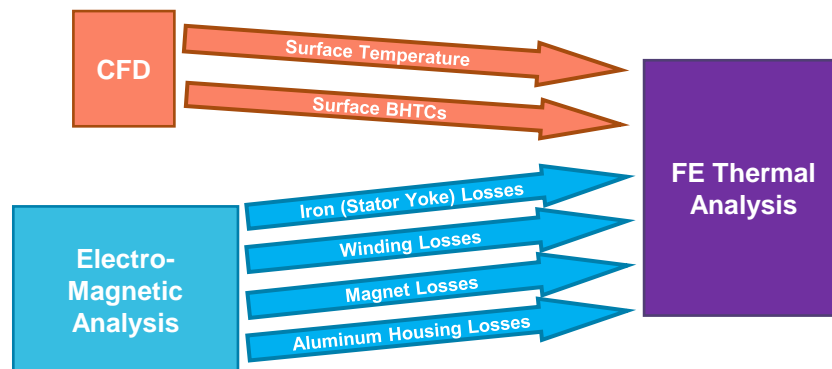


Abb 31: Schwacher Kopplungsansatz für das dreidimensionale detaillierte thermische Systemmodell.

Es wurde ein dreidimensionales stationäres CFD-Modell mit dem Verdichter- und Turbinenkanal sowie dem Motorraum erstellt (vgl. **Abbildung 20**) und daraus die Randbedingungen für das thermische Modell extrahiert. Die Berechnung erfolgte mit den Gaseigenschaften gesättigter, feuchter Luft, welche den Zustand des Brennstoffzellenabgases beschreibt. Aus Komplexitätsgründen wurde der Phasenwechsel des Wassers in diesem Modell nicht implementiert, was zu Unsicherheiten bei den lokalen Gastemperaturen sowie zu einer Unterschätzung der Wärmeübergangskoeffizienten im Motorraum führen kann. In Bezug auf die Temperaturberechnung wurde dies als konservativer Ansatz angesehen. Die Wärmeübertragung durch Konvektion wurde in der thermischen Berechnung mit der Finite-Elemente-Analyse durch Zuweisung lokaler Wärmeübergangskoeffizienten und Temperaturen modelliert.

Die dreidimensionale elektromagnetische Analyse bestätigte die erwarteten Hauptvorteile des nutzenlosen Stator-Konzepts und des größeren Luftspalts, nämlich das niedrige Rastmoment, kleine Drehmomentwelligkeiten und Luftspaltüberwellen sowie geringe Rotorverluste. Im Gegensatz dazu müssen die erhöhten Joule-Verluste innerhalb der Statorwicklung berücksichtigt werden und erfordern einen maximalen Kupferfüllfaktor und eine ausreichend gute Strombelastbarkeit des Wechselrichters. Das Gehäuse ist aufgrund seiner Nähe zu den Wicklungen anfällig für induzierte Wirbelströme [42]. Diese erzeugten Verluste, die in herkömmlichen elektrischen Maschinen normalerweise nicht vorhanden sind, müssen sorgfältig beobachtet werden. Es wurden verschiedene Modellierungen des Wickelkopfes evaluiert, um die Wirkung induzierter Wirbelstromverluste im Gehäuse zu untersuchen. Weitere Details zur Methodik finden sich in [35]. Die **Abbildung 32** zeigt beispielhafte Ergebnisse der räumlichen Verteilung der Wärmeübergangskoeffizienten und die resultierende berechnete dreidimensionale Temperaturverteilung am Nennleistungspunkt bei 120.000 U/min und 25 kW Motorleistung.

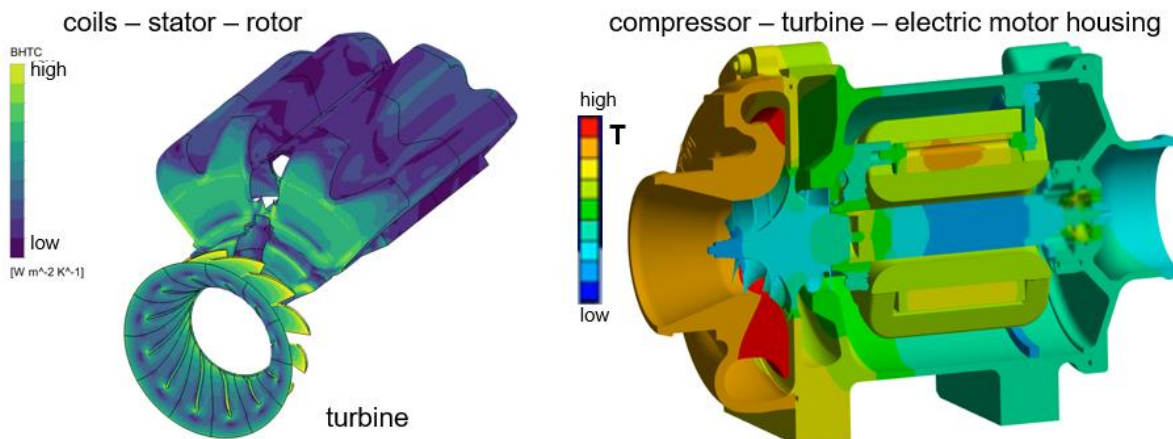


Abb 32: Wärmeübergangskoeffizienten am Stator und der Rotoroberfläche (links); berechnete Festkörpertemperaturen des Gesamtsystemmodells (rechts) für den maximalen Lastpunkt.

Die Temperaturen in allen Komponenten liegen unter der maximal zulässigen Materialtemperatur. Der heißeste Bereich befindet sich erwartungsgemäß in der Verdichterstufe, da die Verdichteraustrittstemperatur über 150 °C beträgt. Deutlich erkennbar ist die Wärmeübertragung vom heißen Verdichtergehäuse zum benachbarten Turbinengehäuse durch Wärmeleitung. Aufgrund der deutlich niedrigeren Turbineneintrittstemperatur sind die Gehäusewände in der Nähe des Elektromotors jedoch geschützt und weisen Temperaturen auf, die nur geringfügig über der Turbinentemperatur liegen. Neben dem Wärmestrom in der Turbomaschine wurden in der thermischen Berechnung auch Reibungsverluste der Lager und Luftwiderstandsverluste im Rotor- und Statorspalt des Motors berücksichtigt. Diese sind alle drehzahlabhängig. Entscheidend für eine zuverlässige Temperaturvorhersage sind die ausreichend gute Kenntnis der Verluste des Elektromotors aus der elektromagnetischen Analyse.

Das System nutzt die niedrige Kühltemperatur des Turbinenabgases, die im Nennleistungspunkt bei < 30 °C liegen kann. Dadurch ergeben sich in der Simulation vorteilhafte Temperaturwerte für Stator und Rotor. Insbesondere die Rotortemperatur wird optimistisch niedrig prognostiziert, was ein zuverlässiges Design unterstützt. Die Lagerstellen zeigen den Temperaturanstieg durch Lagerreibung. Das Kugellager mit den

konzentrierten Verlusten an den Laufringen weist lokal höhere Temperaturen auf, wobei die Werte unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Es ist wichtig zu bemerken, dass die getroffenen Annahmen und die Unsicherheiten des numerischen Modells eine experimentelle Validierung des Systems unverzichtbar machen.

Die Variabilität der Turbinenkühlung, resultierend aus Faktoren wie Eingangsdruck, Massenstrom und Temperatur entlang der typischen Betriebslinie eines Brennstoffzellenkompressors, erforderte eine Untersuchung des Schwachlastbetriebs. Die numerischen Ergebnisse zeigen, dass auch bei niedrigem Durchfluss die Temperaturen ausreichend niedrig bleiben. Die Kühlleistung, bedingt durch Strömungsgeschwindigkeit und Kühlgasmenge, und die wärmeerzeugenden Verluste in der Maschine, bedingt durch Drehzahl und elektrische Leistung, bleiben im Betriebsbereich in einem gesunden Verhältnis.

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse aus der Verifizierung und Validierung der Teilsysteme wurde das vollständige System gebaut und getestet.

1.5 Systemvalidierung und weitere Untersuchungen

Die Systemtests wurden an A-Mustern im Entwicklungsstadium durchgeführt, um die wichtigsten Systemmerkmale zu überprüfen: die elektromagnetischen Fähigkeiten des Motors, die thermodynamische Leistung und das thermische Verhalten des Systems sowie die dynamische Stabilität des Rotors. Begrenzte Dauerhaltbarkeitszyklen, die auf Basis von Anwendungserfahrungen und Ergebnissen der Antriebssystemsimulation von Rathke et al [10] definiert wurden, konnten durchgeführt werden. Eine Darstellung dieser vertraulichen Information erfolgt hier jedoch nicht. Die **Abbildungen 33** und **34** zeigen die Darstellung und Ausführung des neuartigen Brennstoffzellen-Turboladers, wie sie während der Systemtests verwendet wurden.

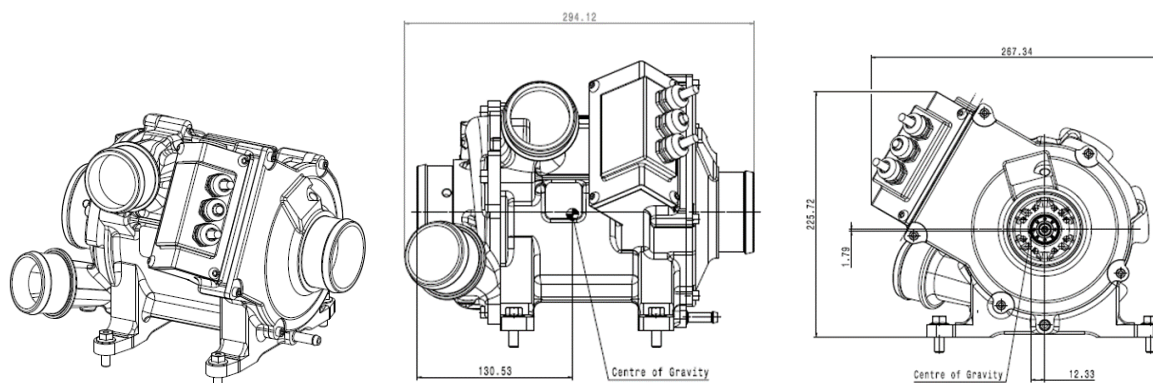


Abb 33: A-Muster-Prototyp: konstruktive Darstellung und Hauptabmessungen.

Die **Abbildung 35** zeigt einen verwendeten Versuchsaufbau, wie er zur Validierung des neuen Brennstoffzellenturboladers AC+eR Verwendung fand. Dazu wurde die bei IHI Charging Systems Intl. GmbH vorhandene Anlageninstallation angepasst, um eine Hochvolt- Spannungsversorgung mit zugehörigen Sicherheitseinrichtungen sowie Kreislaufbetrieb zwischen Verdichter und Turbine mit einem zwischengeschalteten Wärmetauscher zur Einregelung der Turbineneintrittstemperatur möglich zu machen.

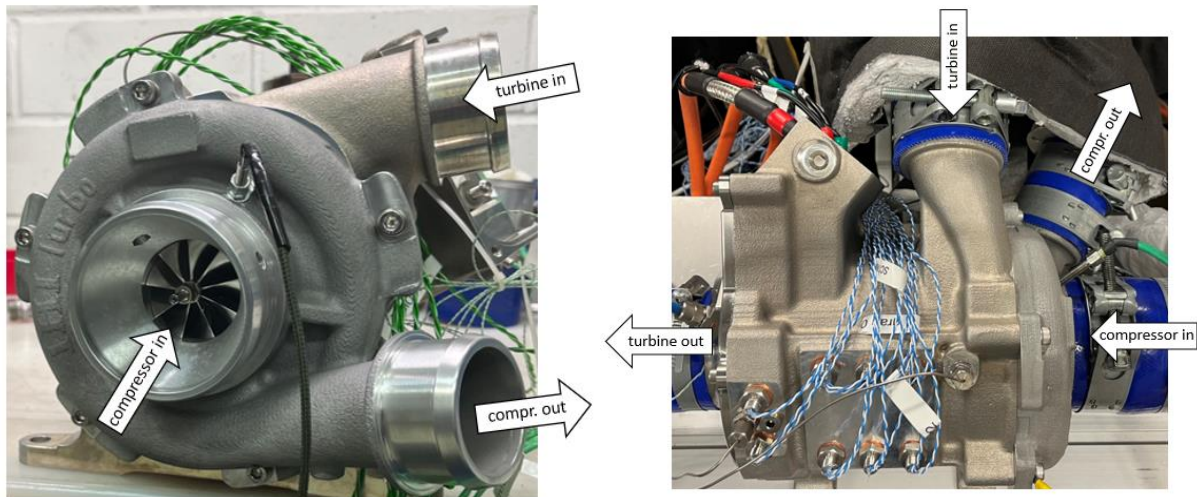


Abb 34: A-Muster-Prototyp: photographische Abbildung (links) und Prototypenbaugruppe während der Systemerprobung (rechts).

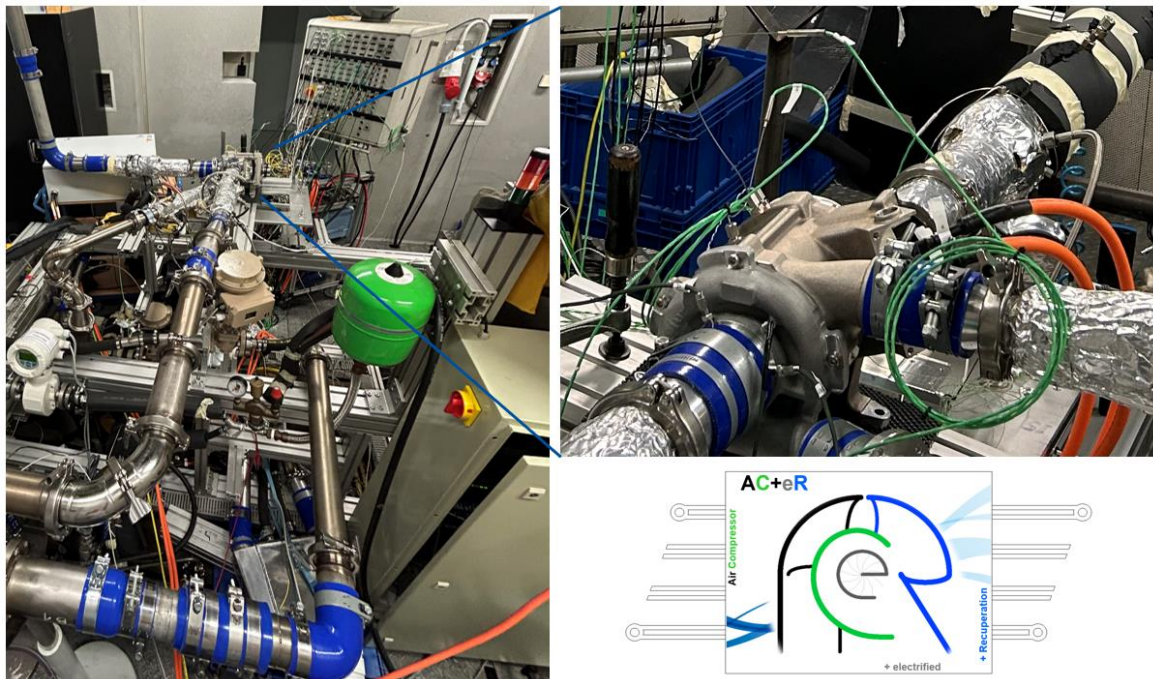


Abb 35: Versuchsaufbau zur Validierung des Brennstoffzellenturboladers AC+eR.

1.5.1 Wellenbewegungsmessungen

Die Ergebnisse der Wellenbewegungsmessung des Gesamtsystems stimmen mit den schon beschriebenen Ergebnissen aus den Tests des rotodynamischen Subsystems überein. **Abbildung 36** zeigt den entsprechenden Testaufbau mit installierter Messtechnik und der Ausrichtung der Wellenbahnsensoren am Gehäuse des Verdichters.

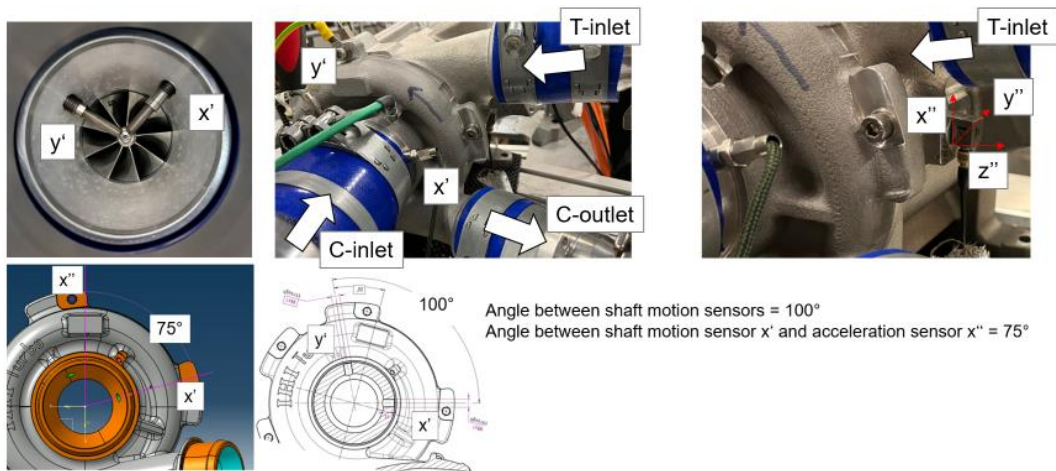


Abb 36: Testaufbau für die Rotordynamikversuche mit Verschiebungsmessung in zwei Achsen sowie Beschleunigungsaufnehmern.

Als ein beispielhaftes Ergebnis ist die gemessene Auslenkung für einen langsamen Hochlauf bzw. ein Herunterfahren über den gesamten Drehzahlbereich in **Abbildung 37** ersichtlich. Die Resonanz bei niedrigen Drehzahlen wird durch die entwickelte Wälzlageraufnahme mit angepasster Steifigkeit effizient gedämpft, und über den gesamten Drehzahlbereich sind keine kritischen Rotorauslenkungen sichtbar. Etwas erschwert ist diese Aussage, da der Rundlauffehler an der Messstelle („runout“) in der Auftragung nicht direkt, sondern nur graphisch korrigiert wurde. Allerdings liegt das zulässige Limit des Orbit Radius oberhalb der Skalierung der Ordinate in **Abbildung 37**.

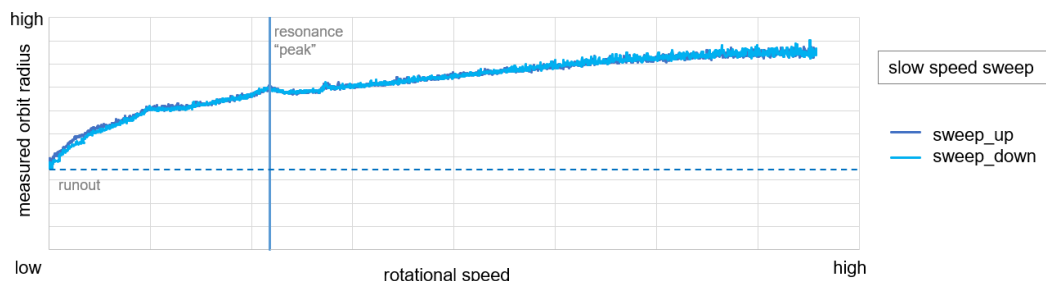


Abb 37: Gemessene Auslenkung im Hochlauf bzw. Herunterfahren über den Betriebsdrehzahlbereich.

1.5.2 Performance

Hinsichtlich der thermodynamischen Leistung wurden die Ergebnisse der vorherigen Tests auf Komponenten- und Subsystemebene ebenfalls bestätigt. Zur Qualitätssicherung der aufgebauten AC+eR wurden alle im Rahmen des Projekts aufgebauten Aggregate am Thermodynamikprüfstand vermessen. Für eine griffige Darstellung wird hier nur auf einen repräsentativen Betriebspunkt, wie er für drei Maschinen in **Abbildung 38** eingetragen ist eingegangen.

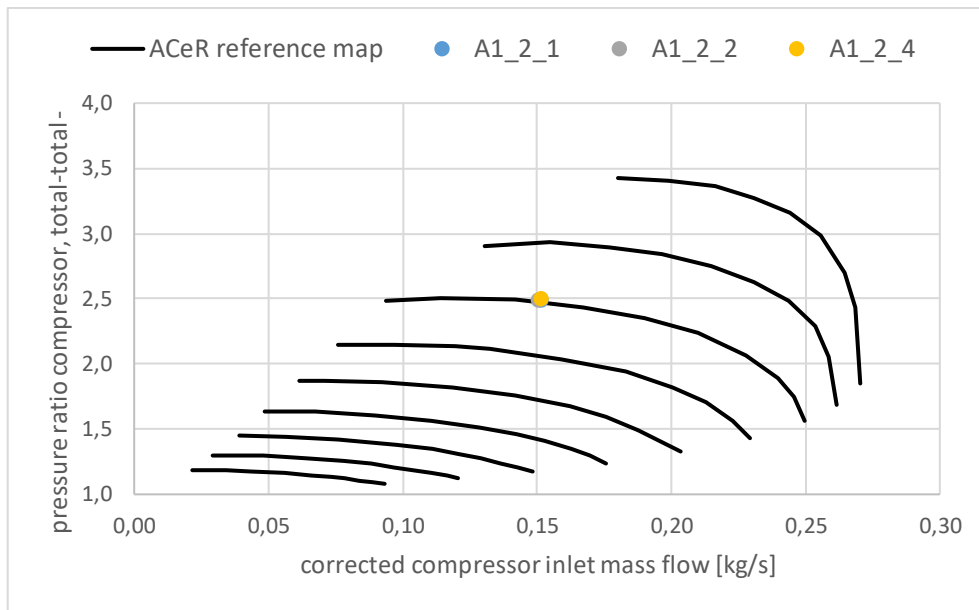
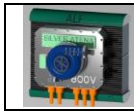


Abb 38: Darstellung des Referenzpunkts im Verdichterkennfeld für drei AC+eR.

Die zugehörigen wichtigsten Größen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Die Unterschiede der drei AC+eR sind klein - ~2% in der DC-Leistung - und akzeptabel. Die Werte entsprechen den Zielen der Auslegung.

Tab 2: Messdaten für den Referenzpunkt für drei AC+eR.

		A1_2_1	A1_2_2	A1_2_4
Power Supply Unit DC Voltage	V	700	700	700
pressure ratio compressor, total-total	-	2,49	2,50	2,50
corrected compressor inlet mass flow	[kg/s]	0,151	0,150	0,151
Turbine inlet temperature	°C	80,06	80,44	80,26
corrected AC+eR rotational speed	rpm	102388	102452	102969
efficiency compressor, total-total	-	0,81	0,81	0,81
Power Supply Unit DC Current	A	20,10	19,66	19,68
Power Supply Unit DC Power	kW	14,07	13,77	13,78

Somit sind die in den vorherigen Kapiteln auf Basis der Untersuchungen an den Subsystemen getroffenen Aussagen zu den beiden Hauptmerkmalen Rotorstabilität und Performance in den Systemtests bestätigt.

Hinsichtlich der Bewertung der Leckage zeigt **Abbildung 39** beispielhafte Messergebnisse, die die Subsystemprüfung mit der Systemprüfung vergleichen. Wie aufgrund der CFD-Untersuchungen des Systems zu erwarten, verschiebt sich die Leckage aufgrund der unterschiedlichen lokalen Druckverteilung am Spalt zu niedrigeren Werten. Dies bedeutet auch, dass der Übergang zwischen positiver und negativer Leckage bei niedrigeren Druckverhältnissen erfolgt, wie ein Vergleich von **Abbildung 24** und **Abbildung 39** zeigt.

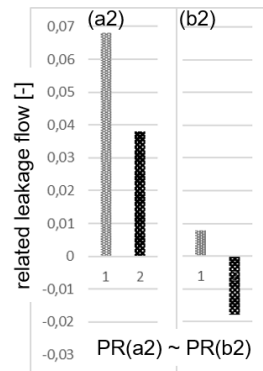
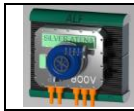


Abb 39: Vergleich der gemessenen Leckage für das getestete Teilsystem (1) und das getestete System (2); Betrieb (a) näher am Pumpen; Betrieb (b) höherer Massenstrom; die Beziehung zwischen den Druckverhältnissen des Verdichters (PR) ist angegeben.

Elektromagnetisch erreichte das System seine Maximaldrehzahl innerhalb der vorgegebenen Grenzen für die Leistungsaufnahme und -abgabe des Wechselrichters. Dies deutet darauf hin, dass Elektromotor und Wechselrichter mit dem vorgesehenen Wirkungsgrad arbeiten. Detaillierte Untersuchungen zur Beurteilung des Motorwirkungsgrads und der Verluste wurden bei der Silver Atena GmbH durchgeführt und sind in deren Teilbericht, bzw auch im Gesamtbericht aller Partner zu finden. Der Wechselrichter zeigte die erwartete Leistung und erreichte Wirkungsgrade von über 98 % über einen weiten Betriebs- und Spannungsbereich. Ein schnelles Hochfahren des Turboladers war mit <1,0 s vom Leerlauf auf 90 % der Maximaldrehzahl möglich. Ein Wert, der die Anforderungen von Standardanwendungen übertrifft.

1.5.3 Wärmemanagement

Abbildung 40 zeigt beispielhafte Temperaturverläufe entlang der Maschine, um das thermische Verhalten der entwickelten elektrifizierten Turbomaschine zu verdeutlichen.

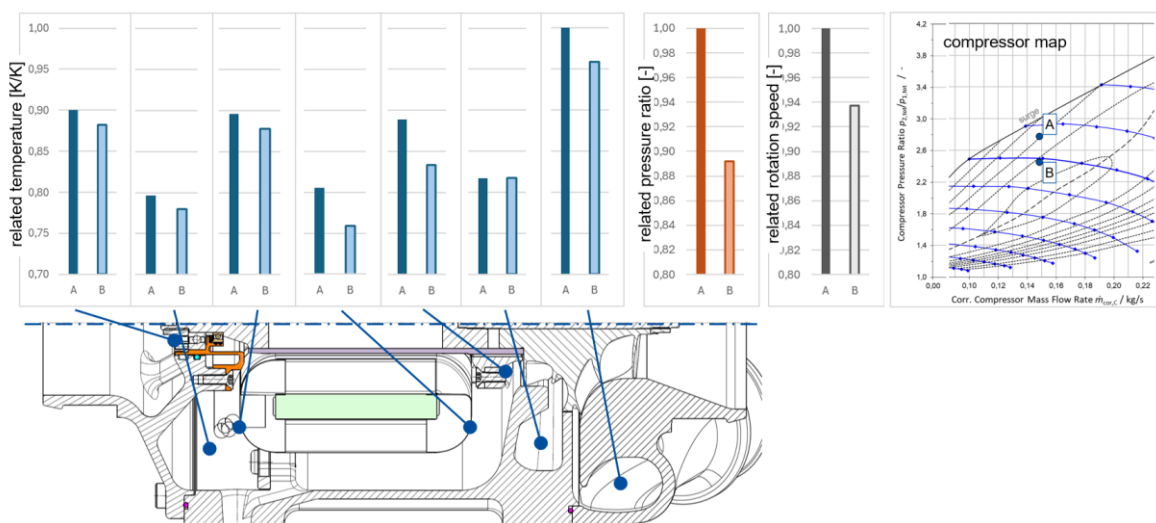
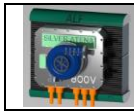


Abb 40: Temperaturmesswerte entlang der Maschine beim Betrieb mit zwei verschiedenen Kompressor-druckverhältnissen (A) und (B), während der Kompressormassenstrom konstant gehalten wird.

Dabei wurde der Fall der Reduzierung des Kompressor-druckverhältnisses bei konstantem Kompressormassenstrom gewählt, sodass die Brennstoffzellenanlage eine



feste Leistung erbringen kann. Die Betriebspunkte (A) und (B) sind im Kompressor-kennfeld skizziert. Die relative Änderung von Drehzahl und Druckverhältnis wird durch die Balkendiagramme dargestellt. Die gemessenen Temperaturen erfüllen die Kriterien für den stationären Zustand. Die relativen Werte in den Balkendiagrammen beziehen sich auf die Kompressoraustrittstemperatur beim höherem Druckverhältnis.

Wie bereits aus der Simulation bekannt, bleibt die höchste Temperatur im System unter beiden Bedingungen die Gastemperatur am Kompressoraustritt. Bei reduziertem Druckverhältnis sinkt die Kompressoraustrittstemperatur, während die Turbineneintrittstemperatur unverändert bleibt, da dieser Wert durch den Brennstoffzellenbetrieb bestimmt wird. Im Gegensatz dazu steigt die Temperatur des Kühlgases, d. h. die Turbinenaustrittstemperatur, mit abnehmendem Druckverhältnis. Das FCS-Verhalten wird im Versuchsaufbau durch Einstellen eines Druckverlusts zwischen Kompressoraustritt und Turbineneintritt simuliert. Im vorliegenden Versuchsaufbau wird ein Zeta-Wert gemäß [43] zwischen 0,6 und 0,8 erreicht. Obwohl die Kühlmitteltemperatur steigt, sinken alle gemessenen Metalltemperaturen. Dies ist auf den geringeren elektrischen Leistungsbedarf zurückzuführen, der beim niedrigeren Druckverhältnis nur 79 % im Vergleich zum Betrieb mit hohem Druckverhältnis beträgt. Insbesondere bei den Lagern ist dies auch auf die reduzierte Drehzahl zurückzuführen, die beim niedrigeren Druckverhältnis nur <94 % im Vergleich zum Betrieb mit hohem Druckverhältnis beträgt. Eine geringere Drehzahl führt zu einer geringeren Lagerreibung. Die Wicklungstemperaturen am Stator wurden an beiden Spulenden gemessen. Man erkennt, dass die Wicklungstemperaturen am Einlass aufgrund der niedrigen Kühlmitteltemperatur und des guten Strömungszugangs zum Stator niedriger sind als die Wicklungstemperaturen am Auslass des Systems. Die Austrittstemperatur des Kühlgases sinkt bei Betrieb mit niedrigerem Druckverhältnis ebenfalls, jedoch aufgrund der höheren Eintrittstemperatur nur in geringerem Maße. Die Statortemperaturen wurden auch entlang des Umfangs gemessen (hier nicht dargestellt) und es wurde eine Variation festgestellt. Diese wird durch eine asymmetrische Strömungsverteilung und die interne Verdrahtung der Statorspulen verursacht, die lokal erhöhte Strömungswiderstände bewirken. Dies kann Gegenstand zukünftiger Verbesserungen der Konstruktion, z.B. hinsichtlich Kabelführung, sein. Die Temperatur an der Statorspule konnte nicht direkt gemessen werden, aber basierend auf den Ergebnissen der Simulation und einem Abgleich mit gerechneten Oberflächentemperaturen am Stator schränken die erwarteten Kerntemperaturen im Stator den Betrieb nicht ein.

Eine offensichtliche Schlussfolgerung aus dieser Untersuchung ist die Tatsache, dass der Betrieb in Bezug auf Wärmemanagement und ausreichende Kühlung in der Nähe der Pumpengrenze des Kompressors am kritischsten ist, da hier das höchstmögliche Druckverhältnis mit dem niedrigsten Kompressorvolumenstrom kombiniert wird (vergleiche auch **Abbildung 40**). Aus diesem Grund wurden thermische Messungen in einem weiten Bereich des Kompressor-kennfelds durchgeführt, die diese Tatsache bestätigten. Noch wichtiger war jedoch, dass sie zeigten, dass im vorgesehenen Betriebsbereich hinsichtlich Druckverhältnis, Massenstrom, Elektromotorleistung und Drehzahl die gemessenen Temperaturen an den Komponenten unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen.

Die thermische Bewertung bleibt aufgrund der komplexen Strömungsverhältnisse Gegenstand weiterer Analysen. Wie bereits erwähnt, liegen die beobachteten Tempera-

turen bei beiden Lagern unterhalb der spezifizierten Grenzwerte. Eine direktere Kühlung des Kugellagers kann jedoch von Vorteil sein. Daher kann die interne Führung des Kühlstroms entlang des Luftlagers, des Stators und des Kugellagers Gegenstand zukünftiger Optimierungen sein. Eine entsprechende detaillierte Verbesserung des dreidimensionalen numerischen Modells basierend auf stationären, aber auch transienten Messerfahrungen ist möglich. Ein Schlüsselaspekt hierbei ist sicherlich ein detaillierteres Verständnis und eine optimale Quantifizierung der elektromagnetischen Verluste, die in dieser Studie jedoch nicht weiter behandelt werden.

1.5.4 Weitere Untersuchungen

Weitere Tests, darunter Untersuchungen zur Tropfenresistenz der Turbine, Möglichkeiten der Tropfenabscheidung und Untersuchungen zum Geräuschverhalten der elektrifizierten Turbomaschine wurden durchgeführt. Diese werden komprimiert ausgeführt, um den Umfang des Berichts nicht zu sprengen.

Zusammenfassend zeigt **Abbildung 41** den gemessenen totalen Schalldruckpegel für den AC+eR aus mehreren Stationärmessungen. Der Messaufbau und die Positionierung der Mikrofone ist an den Standard für die akustische Vermessung von Turboladern am Prüfstand angelehnt. Die Variation der Geräuschmessung zwischen minimaler Last und maximaler Last beträgt <10dB(A). Der höchste gemessene Wert bei maximaler Last liegt tiefer als bei einem schon von potenziellen Kunden positiv bewerteten Referenzprodukt. Absolute Werte werden aus Vertraulichkeitsgründen nicht angegeben.

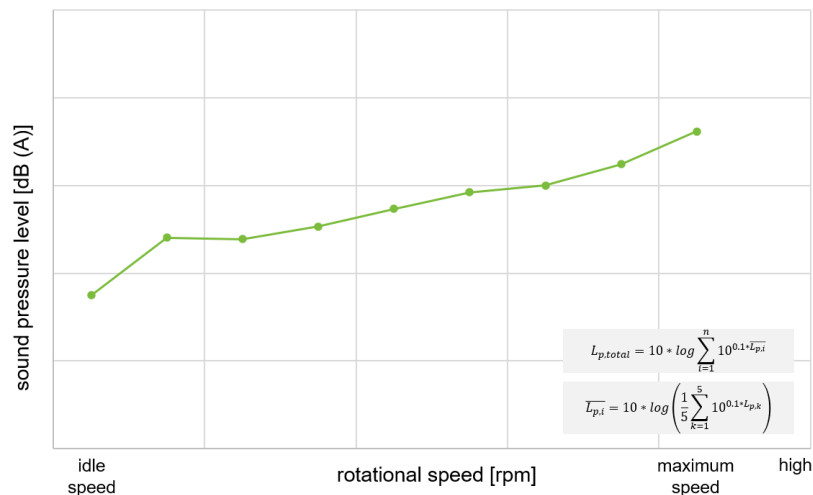


Abb41: Gemessener totaler Schalldruckpegel aus stationären Messungen am AC+eR.

In den Charakteristiken der Geräuschmessungen aus Drehzahlhochläufen sowie stationären Messungen bei konstanter Drehzahl sind die Effekte aus dem Konstruktionskonzept identifizierbar. Die drehzahlsynchronen Frequenzordnungen aus den Analysen mit Hilfe von Campbell Diagrammen lassen sich den Schaufelzahlen von Verdichter und Turbine, dem Wälzlager mit der Zahl der Wälzkörper und dem Luftlager sowie der Polzahl im Zusammenhang mit dem Statorconcept als auch der Schaltfrequenz der Leistungselektronik zuordnen. Der lokale totale Schalldruckpegel ist selbstredend beeinflusst von der Positionierung der einzelnen Mikrofone entlang der Maschine, aber

auch das Fehlen der Vergussmasse und die Ausführung der Kühlung nehmen Einfluss. Das gemessene Geräuschniveau am Prüfstand kann positiv bewertet werden. Ausschlaggebend ist allerdings im späteren Betrieb das Zusammenwirken des Turboladers mit der Umgebung (Rohrleitungen, Halter, Dämpfer) im Fahrzeugeinbau. Eine Vorhersage des Geräuschverhaltens am Fahrzeug aus einer Prüfstandsmessung ist nicht unmittelbar möglich und Gegenstand der Forschung [44].

Bezüglich der Untersuchungen zur Tropfenresistenz und die damit verbundenen aufwändigen Arbeiten zur Realisierung einer Prüfvorrichtung wird auf die Veröffentlichungen von Karakasis et al. [45] [46] verwiesen. An dieser Stelle werden die durchgeführten Versuche und die erzielten Ergebnisse grundsätzlich erläutert.

Zur Durchführung der Versuche wurde ein bestehender Heißgasprüfstand, der für Validierungsversuche an Abgasturboladern für Verbrennungsmotoren genutzt wird, modifiziert. Es wurden Versuche zur Charakterisierung von Tropfenabscheidern gemacht, deren Durchführung in [45] ausführlich erläutert ist. Dieser Versuchsaufbau wurde im Verlauf des Projekts auch verwendet, um analoge Untersuchungen zu Wasserabscheidern, die funktional in die Turbinenstufe integriert sind, durchzuführen. Dies ist eine weitere Option der Funktionenintegration mit entsprechend positiven Auswirkungen auf Bauraum und erwarteten Produktkosten. Die Effektivität dieser konstruktiven Lösungen wird aus Gründen der Vertraulichkeit in diesem öffentlichen Bericht nicht beschrieben.

Ein Highlight der Untersuchungen war die bildliche Erfassung der Tropfenstruktur am Turbineneintritt mit möglichst einfachen Mitteln. Der Versuchsaufbau mit seinen Hauptelementen – insbesondere der mit der Drehfrequenz des Turbinenrades synchronisierten Stroboskopkamera sowie dem mit Sichtfenstern ausgestatteten Turbinengehäuse - und der Angabe der Strömungsrichtung ist in **Abbildung 42** dargestellt. Die Untersuchungen wurden auch für diese Fragestellung kostengünstig und robust an einem AC+eR Ersatzmodell auf Basis eines Abgasturboladers durchgeführt. Die Ergebnisse dienen dem Abgleich mit parallel durchgeführten Simulationen, die in unterschiedlichen Modellierungstiefen die Strömungssituation am Eintritt einer in eine Brennstoffzelle integrierten Rekuperationsturbine auflösen. Mit einem einfachen Euler-Lagrange Ansatz zur Berechnung der Tropfentrajektorien konnten anhand ihres Durchmessers, bzw. ihrer Masse Tropfenklassen festgelegt werden, die sich über die Position ihres Auftreffens in der Komponente definieren. Dies stellt eine notwendige Information dar, um konstruktive Maßnahmen zur Robustheitssteigerung zu erarbeiten. In einem nächsten Schritt wurden mit Partnern numerische Modelle erarbeitet, die weitere Effekte, welche in einer mit Wasser beladener Luft beaufschlagten Turbine zu erwarten sind, abbilden können, oder abzubilden versuchen. Ein Startpunkt war hier die Untersuchungen an Verdichtern von Fahrzeugturboladern mit wasserbeladener Zuströmung [47], wie sie bei der Einführung von Niederdruck- Abgasrückführung in Verbrennungsmotoren entsteht. Beispiele sind hier Wandfilmbildung und -ablösung, Kantentrennung sowie Transport von Wasser im Film, Tropfenzerfall mit Abprallen und Spritzen, oder auch Agglomeration von Tropfen. Auch hier sind Forschungsaktivitäten im Gange (siehe z.B. [48] [49]), deren notwendige Anpassung an den Anwendungsfall oder sogar nur Schilderung im Rahmen dieses Projekts, das eine Komponentenentwicklung zum Ziel hat, zu weit führen würde. Nichtsdestotrotz konnte eine im konstruktiven Umfeld anwendbare numerische Vorgehensweise erarbeitet werden und die Visualisierung der Strömung in **Abbildung 43** zeigt, eine ausreichend gute qualitative

Übereinstimmung mit den Ergebnissen der CFD-Simulation. Die sekundäre Tropfenentstehung lässt sich im Bereich unmittelbar nach der Zunge des Turbinengehäuses im Experiment und in der Simulation erkennen [46].

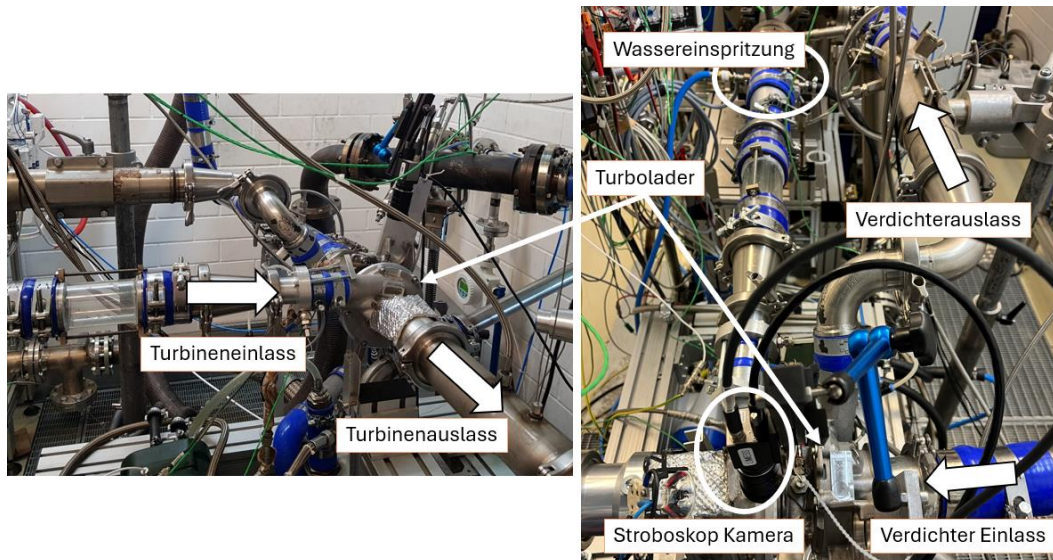


Abb 42: Experimenteller Aufbau der Untersuchungen zur Auswirkung von flüssigem Wasser im Luftpfad der Turbinenstufe. Der Verlauf des Luftpfads und die wichtigsten Komponenten sind gekennzeichnet und benannt.

Um einen Eindruck über eine mögliche Schädigung durch Wasserschlag zu bekommen, wurde ein neues Turbinenrad im AC+eR Ersatzmodell verbaut und ein Dauerlauf in begrenzter Laufzeit und unter zu erwartenden „worst-case“ Bedingungen beim Betrieb mit einer Brennstoffzelle durchgeführt. Die Geometrie des Turbinenrades wurde im Neuzustand digitalisiert (GOM) und stellt eine Referenz für die erwarteten Geometrieänderungen dar. Nach dem Dauerlauf wurden wiederum Mikroskopaufnahmen der Schaufeln des Turbinenrades und eine Digitalisierung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 44** dargestellt. Im linken Teil der Abbildung ist exemplarisch eine Schaufel des Turbinenrades als Photographie gezeigt, wohingegen im rechten Teil der Abbildung die Schädigung aus dem Vergleich der Digitalisierung der Geometrie vor und nach Dauerlauf zu erkennen ist. Im Wesentlichen ist erwartungsgemäß und im Einklang mit den numerischen Vorhersagen die Schaufelvorderkante beeinträchtigt. Es finden sich paarweise negative und positive Geometrieänderung, was den Schluss nahelegt, dass in dieser Versuchsführung die Änderungen in der Geometrie primär durch eine lokale plastische Verformung der Schaufel und nur sekundär durch einen Materialabtrag bedingt sind.

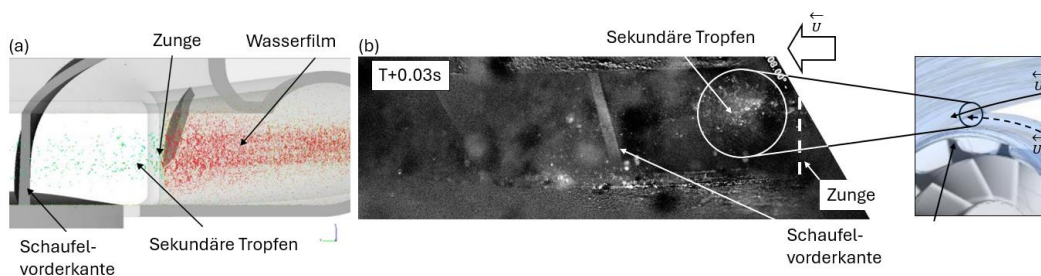


Abb 43: Qualitativer Vergleich der CFD-Ergebnisse (a) mit den experimentellen Aufnahmen zur Darstellung des sekundären Tropfenzerfalls an der Zunge des Turbinengehäuses (b).

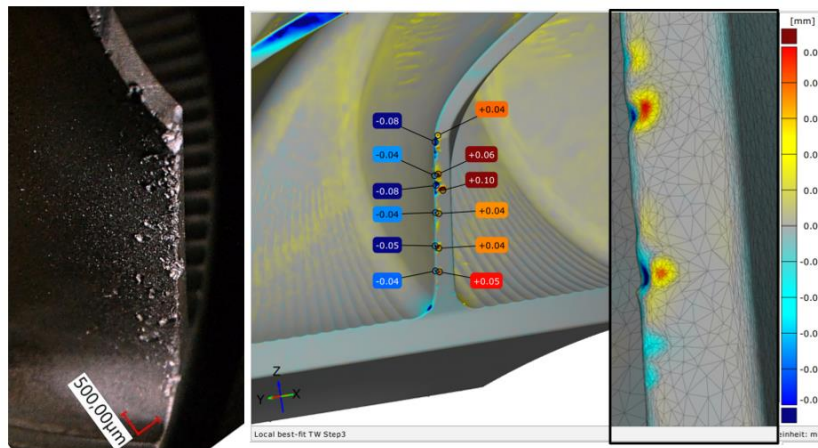


Abb 44: Mikroskopaufnahme einer Turbinenradschaufel nach dem Dauerlauf (links) und Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der GOM-Untersuchungen (rechts).

Dieses beispielhafte Versuchsergebnis als auch der Versuchsaufbau kann dazu dienen Referenzen zur Haltbarkeit von Turbinen in tropfenbeladener Zuströmung zur Verfügung zu stellen. Parametervariationen sind möglich, um Bedingungen, wie sie im Betrieb mit einer Brennstoffzelle zu erwarten sind, zu überprüfen.

1.6 Kostenbetrachtungen

Teilweise vertrauliche Information wurde in der genauen Analyse und Festlegung der Fertigung des AC+eR generiert. Gegenüber der Referenz konnte der Aufwand für die Fertigung wesentlich verringert werden. Die geringere Zahl der Bauteile, der vereinfachte Rotoraufbau, das Vorwuchten der Rotorbaugruppe außerhalb der Lagergruppe und die Montage von einer Seite, die axiale Rotorpositionierung über die Wälzlager sowie die neuartige Fixierung des Stators des Elektromotors sind dabei wesentliche Vorteile und erlauben reduzierte Fertigungskosten.

Für das Konzept wurde zudem eine intensive Kostenbewertung der Bauteile durchgeführt. Ziel der Bewertung war es, eine Kostenabschätzung für ein industrialisiertes Produkt (Massenfertigung) zu erarbeiten. Hierzu wurde ein Jahresproduktionsvolumen von 70.000 Stück gewählt. Gleichzeitig wurde aber auch ein Fertigungsvolumen von 1.000 Stück bewertet, da es notwendig ist Produktionsprojekte auch in geringeren Stückzahlen lukrativ umsetzbar zu gestalten, um so eine Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie zu unterstützen. Methodisch wurde die Kostenbewertung vorrangig mittels einer Deltakostenbetrachtung durchgeführt. Es lagen valide Angebote für ein aktuelles Produkt vor. Ausgehend von dieser Basis wurden Änderungen bzgl. Design, Material und Fertigungsverfahren bewertet und damit eine große Genauigkeit für die Kostenbewertung erreicht. Für neue Komponenten, für die es keine Vergleichsbasis gab, wurden Kalkulationen durchgeführt oder Lieferantenangebote eingeholt. In der Bewertung der Kosten, die hier für die elektrifizierte Strömungsmaschine (ohne Inverter) dargestellt sind, kam wesentliches Reduktionspotential von der Rotorbaugruppe: Hauptbeiträge zur Kostenreduktion sind das Magnetmaterial, das Armor Ring Material, das geringere Bauteilgewicht sowie eine deutlich reduzierte Anzahl der Teile; dem Lagersystem: Hauptbeiträge zur Kostenreduktion sind das Hybridlagersystem und damit der Entfall der beiden axialen sowie eines radialen Luftlagers;

dem Turbinengehäuse: durch Integration des Turbinengehäuses in das Motorgehäuse entfällt dieses Teil;
dem Stator des Elektromotors: Hauptbeiträge zur Kostenreduktion sind der Entfall der Vergussmasse und die einfache Fixierung im Gehäuse;
den restlichen Teilen: deutliche Reduktion der Anzahl an Schrauben, Dichtungen und Deckeln.

Abbildung 45 zeigt eindrücklich das gesamthaft Erreichte. Der relative Kostenvergleich belegt eine erwartete Kostenreduktion um mehr als 80% für alle Volumensszenarien. Dies gilt sowohl für ein angenommenes Produktionsvolumen von 1.000 Stk/a als auch für ein Produktionsvolumen von 70.000 Stk/a gegenüber einer zur Serienreife entwickelten Referenzmaschine.

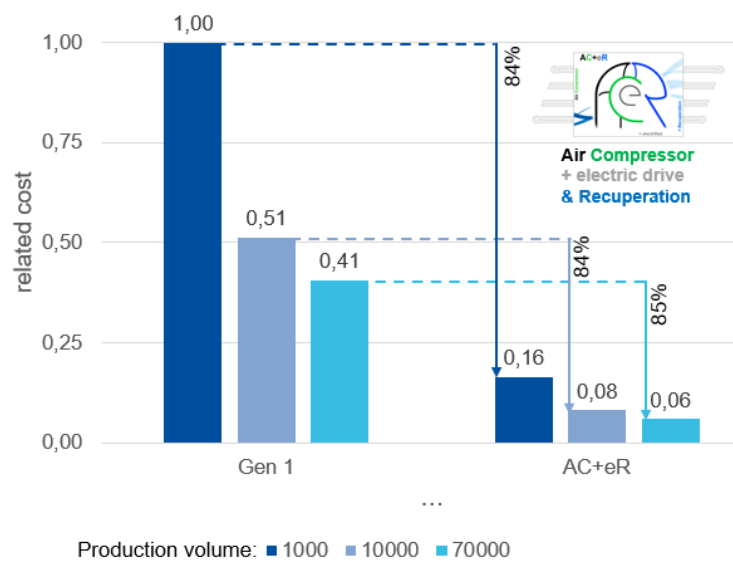


Abb 45: Relativer Kostenvergleich auf Basis “Costed BOM“.

Basierend auf den vorliegenden experimentellen Untersuchungen konnten das Konzept und die Architektur der Konstruktion erfolgreich bestätigt werden. Konsequente Funktionsintegration und Designvereinfachung führen zu einer deutlichen Gewichtsreduktion und damit zu einer Kostenreduzierung der Komponenten. Attraktive Produktkosten konnten durch die Verringerung der Komponentenanzahl und die konsequente Berücksichtigung von Fertigung und Montage in jeder Phase des Projektes erreicht werden.

1.7 Zusammenfassung

Im Rahmen des in diesem Bericht vorgestellten Dreijahresprogramms wurde ein Luftversorgungssystem für Brennstoffzellen entwickelt, das die Technologie von Radialverdichtern und Turbinenrekuperation als energieeffizienteste Technologien für diese Zwecke nutzt. **Tabelle 3** gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale des neuartigen Luftverdichters für mobile Brennstoffzellensysteme. 25 kW Dauerleistung des Elektromotors in Kombination mit Turbinenrekuperation und der maximalen Drehzahl des elektrifizierten Turboladers sind geeignet, um Brennstoffzellensysteme mit einer

Leistung von >150 kW effizient mit Luft zu versorgen. Das Gesamtgewicht dieser Turbomaschine ohne Wechselrichter beträgt 9,22 kg. Daraus ergibt sich eine spezifische elektrische Leistung von 2,71 kW/kg im gegebenen Bauraum.

Tab 3: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften (links) und CAD-Darstellung des AC+eR (rechts).

(w/o inverter)	AC+eR	
total weight	9.22 kg	
aluminum parts weight	5.20 kg	
rotor speed	125.000 rpm	
electric power (continuous output)	25 kW	
specific electric power	2.71 kW/kg	
t - idle to 90% max speed	< 1.0 sec	
package size (L x W x H)	294 x 237 x 187 mm	

Der Großteil des Gewichts entsteht durch die Aluminiumgehäuse. Das Gewicht der Bauteile aus Aluminium ist ausdrücklich angegeben, da sie am stärksten zum CO₂-Fußabdruck des Produkts (PCF) beitragen und der bei Primäraluminium im Bereich von 17 kgCO₂e/kgAl liegt [50]. Der durch eine Lebenszyklusanalyse ermittelte CO₂-Fußabdruck sollte neben den Kosten als Schlüsselkennzahl bei der Bewertung von Produkten für die Energiewende berücksichtigt werden. Für den elektrischen Turbolader (ohne Wechselrichter) wurde das CO₂-Äquivalent auf etwa 12 kgCO₂e/kg abgeschätzt, wobei die Motorrotorbaugruppe den größten spezifischen Beitrag leistet. Diese Werte basieren auf einer internen Untersuchung des PCF für elektrische Turbolader mit Luftlagerung gemäß der Norm ISO 14040. Die prozentuale Aufteilung der Beiträge der einzelnen Baugruppen ist in **Abbildung 46** illustriert. Bei konventionellen Konstruktionen korreliert die Gewichtsreduzierung typischerweise mit Kosteneinsparungen, sie unterstützt jedoch auch die Ressourcenschonung und senkt den PCF. Die Schonung sämtlicher Ressourcen, nicht nur der knappen und kritischen, muss ein primärer Antrieb bei allen nachhaltigen Neuentwicklungen sein.

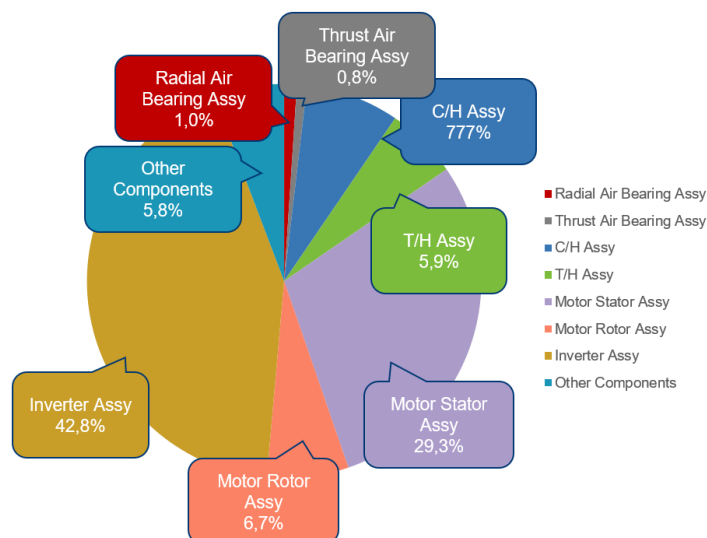
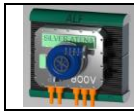


Abb 46: Prozentuale Aufteilung der Beiträge der einzelnen Baugruppen eines elektrischen Turboladers mit Luftlagerung zum Product Carbon Footprint gemäß der Norm ISO 14040.



In diesem öffentlich geförderten, werteoptimierenden Entwicklungsprojekt wurden bahnbrechende technische Lösungen zur Verringerung der Produktkosten und zur Reduzierung des Produktgewichts durch größtmögliche Vereinfachung und Funktionsintegration entwickelt und einer Verifizierung sowie vorläufigen Validierung unterzogen. Die systematische und konsequente Anwendung des Form-Funktions-Mappings nach der Identifizierung der Kostentreiber während Fertigung und Montage führte zu einer deutlichen Reduzierung der prognostizierten Produkt- und Fertigungskosten. Das V-Modell wurde konsequent angewendet, wobei die Design-Structure-Matrix zur Definition der effektivsten Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten genutzt wurde.

Der elektrische Luftkompressor für Brennstoffzellen mit Turbinenrekuperation umfasst vier Hauptmerkmale:

- i) das Systemrad, das Verdichter und Turbine vereint,
- ii) das Hybridlagersystem,
- iii) den Stator mit direkter aktiver Gaskühlung und
- iv) den nutzenlosen Stator mit toroidalen Wicklungen.

i) und ii) ermöglichen die Realisierung eines montage- und fertigungsoptimierten Rotors in einem Ein-Durchmesser Design und die optimierte Integration des spröden Permanentmagneten in die Rotorhülse. Die Vormontage des kompletten Rotors außerhalb der Gehäuse ist vor der Integration in den Stator möglich. Der eingestellte geringe Schub ermöglicht den Einsatz von Kugellagern zur Aufnahme der Axial- und Radiallast am freien Wellenende mit ausreichend kleinem Durchmesser. Der axiale Fixpunkt der Konstruktion wird durch ein Kugellager mit seiner sehr geringen axialen Toleranzkette bestimmt, wodurch vorteilhaft reduzierte Spalte der rotierenden Teile gegenüber den stationären Bauteilen möglich werden. Eine einfache drehmomentgesteuerte axiale Klemmung des kombinierten Rades ist ausreichend, da die Drehmomentbelastung an der verbleibenden Radschnittstelle reduziert ist. Dies ermöglicht zudem eine effiziente Radkonstruktion mit reduziertem Nabendurchmesser an der Verdichterseite. Das Turbinenrad profitiert von der Abströmsituation ohne plötzliche Querschnittsvergrößerung an der Nabe. Die Positionierung der Turbine fungiert als Wärmebarriere gegen den heißesten Teil der Maschine in der Verdichterstufe und erleichtert so das Wärmemanagement. Darüber hinaus entfällt durch die Nutzung des Turbinenauslassstroms zur Kühlung und Spülung des Luftlagers die Notwendigkeit Luft aus dem Verdichter abzuzweigen. Dies wirkt sich unmittelbar positiv auf die Systemeffizienz aus und minimiert das Risiko einer Verunreinigung des FCS durch die Kugellagerschmierung. All diesen Vorteilen steht lediglich die Notwendigkeit gegenüber, die Leckagesituation zwischen Kompressor und Turbine zu beherrschen. Jeder Luftstrom vom Kompressor zur Turbine erhöht dabei zumindest die Rekuperationsleistung und führt nicht zu einem vollständigen Verlust.

iii) und iv) sind ebenfalls das Ergebnis einer gründlichen Systemfunktionsanalyse. Das Wicklungsschema erleichtert eine direkte Luftkühlung des Stators aus der Abströmung der Turbine und eine damit verbundene drastische Vereinfachung der Konstruktion. Das toroidale Statorkonzept ermöglichte die Einführung einer optimierten Statorbaugruppe mit axialer Fixierung. Darüber hinaus ermöglichte das nutzenlose Spulenkonzept eine Verkürzung der axialen Länge der Konstruktion. Seine elektromagnetischen Eigenschaften versprechen reduzierte Rotorverluste und ebenso geringere thermische Dehnungen im Rotor. Wirbelstromverluste im Gehäuse wurden durch ein Gehäusedesign für optimierten Kühlstrom ausgeglichen.

Es liegt auf der Hand, dass diese Produktentwicklung stark von der Funktionsintegration profitiert. Dies führte zu höherer Kompaktheit, einer Reduzierung der Teileanzahl und letztlich zu besserer Kosteneffizienz und Gewichtseinsparungen. Andererseits kann Funktionsintegration auch die Produktflexibilität für zahlreiche Anwendungen einschränken. Sie kann zudem angepasste Betriebsstrategien erfordern. Im vorliegenden Fall muss eine Prozedur für das Abfahren vorgesehen werden, da die Motorkühlung den Turbinenauslassstrom nutzt, der durch den vom FCS-Betrieb abhängigen Medienkreislauf bestimmt wird.

Die durchgeführte Validierungskampagne bestätigte die Machbarkeit dieser neuen Architektur eines Brennstoffzellen-Luftkompressors mit Rekuperation. Die Leistungsziele für einen 150-kW-Brennstoffzellenantrieb wurden erfüllt. Die Temperaturgrenzen für Vollast- und Teillastbetrieb wurden eingehalten. Im zugehörigen Teilprojekt der Universität Chemnitz werden zusätzliche Untersuchungen am Brennstoffzellenprüfstand durchgeführt.

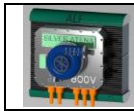
Weiteres Potenzial besteht in der Optimierung des Kühlstroms und der Konstruktion im Hinblick auf Wirbelstromverluste in Stator und Gehäuse. Darüber hinaus gibt es verschiedene weitere Designoptimierungen, wie z. B. alternative Kugellager, Schwingungsdämpfer und Schwingungstilger, die Nutzung magnetischer Kräfte zur Optimierung der Axiallast, V-Klemmflansche für eine freie Gehäuseausrichtung und optionale Schweißlösungen zur Befestigung des Schutzrings um den Magneten. Eine nächste Entwicklungsschleife dieses einzigartigen Designkonzepts für ein elektrifiziertes Luftversorgungssystem für Brennstoffzellen mit Radialverdichtertechnologie und Turbinenrekuperation kann also nach der hiermit vorliegenden Bestätigung des Konzepts zusätzlich gewinnbringend sein.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt wurde das beantragte Budget eingehalten und den vorgesehenen Projekteinhalten entsprechend verwendet.

Im Verlauf des Projekts gab es einige Mittelumwidmungen, um die Verfügbarkeit der Mittel an den veränderten Bedarf gegenüber der Kalkulation, die im Verlauf des Projekts aktualisiert wurde, anzupassen. Eine Überarbeitung der Fremdleistungskosten hat sich aufgrund des in der Konzeptphase definierten neuartigen Designkonzepts als notwendig erwiesen, da die Forschungsschwerpunkte entsprechend anzupassen waren. Die früh im Projekt getroffenen Grundsatzentscheide zu drastischen konstruktiven Vereinfachungen und Funktionenintegrationen erlaubten durch eine Fokussierung auf die Kernthemen eine Reduktion der Personalaufwände und Fremdleistungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung im Antrag.

Die Mittel wurden effektiv eingesetzt. Die erzielten Ergebnisse lösen die im Antrag gestellte Aufgabe vollständig und stehen in sehr guter Relation zum Aufwand.



3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen des in diesem Bericht vorgestellten Dreijahresprogramms wurde ein elektrifiziertes Luftversorgungssystem für Brennstoffzellen entwickelt, das die Technologie von Radialverdichtern und Turbinenrekuperation als energieeffizienteste Technologien für diese Zwecke nutzt. In dem werteoptimierenden Entwicklungsprojekt wurden neue technische Lösungen zur Optimierung der Produktkosten und zur Reduzierung des Produktgewichts durch größtmögliche Vereinfachung und Funktionenintegration entwickelt und einer Verifizierung sowie vorläufigen Validierung unterzogen. Die systematische und konsequente Anwendung des Form-Funktions-Mappings nach der Identifizierung der Kostentreiber während Fertigung und Montage führte zu einer deutlichen Reduzierung der prognostizierten Produkt- und Fertigungskosten. Der V-Zyklus wurde konsequent angewendet, wobei die Design-Struktur-Matrix zur Definition der effektivsten Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten genutzt wurde. Die Zielvorgabe der technischen Reifgraderhöhung wurde erreicht.

Die Ausarbeitung von Fertigungskonzepten für die Produktion in hohen Stückzahlen wurde notwendigerweise eingeschränkt umgesetzt. Das Interesse von geeigneten Lieferanten, deren Expertise für eine solche Studie notwendig ist, war angesichts der Marktentwicklung teilweise wenig intensiv. Ohne eine intensive Einbindung von Lieferanten ist jedoch jede Aussage zur Kostenstruktur in hohen Stückzahlen vage. Ihr Beitrag zu einer Kostenbewertung und insbesondere zu kostengetriebenen Designoptimierung ist unverzichtbar. Entwicklungs- und Fertigungskompetenz in einer Hand sind notwendig, um neue Technologien kostenattraktiv realisieren zu können.

Ein Teilziel des Projekts war die Erarbeitung einer Kostenabschätzung bestehend aus Produktkosten und Fertigungskosten für ein industrialisiertes Produkt (Massenfertigung). Dieses Ziel konnte für ein angenommenes Jahresproduktionsvolumen von 70.000 Stück erreicht werden. Gleichzeitig wurde aber auch ein deutlich geringeres Fertigungsvolumen von 1.000 Stück bewertet, da im Verlaufe des Projekts klar wurde, dass Produktionsprojekte auch in kleineren Stückzahlen lukrativ umsetzbar sein müssen, um eine Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie zu unterstützen. Auch diese Bewertung wurde mit positivem Ergebnis, d.h. mit einer erwarteten Reduktion der Kosten, welche die wirtschaftliche Attraktivität der Brennstoffzellen-Technologie wesentlich erhöht, abgeschlossen. Die Lieferantenstruktur und auch die Fertigungsmethoden sind volumenabhängig festzulegen. Es liegt aber auf der Hand, dass diese Produktentwicklung volumenunabhängig stark von den Designvereinfachungen und der Funktionsintegration profitiert. Dies führte zu höherer Kompaktheit, einer Reduzierung der Teileanzahl und letztlich zu Gewichtseinsparungen und besserer Kosteneffizienz. Entscheidend war zudem die konsequente Berücksichtigung von Fertigung und Montage in jeder Phase des Projektes.

Basierend auf den vorliegenden experimentellen Untersuchungen konnten das Konzept und die Architektur der Konstruktion erfolgreich bestätigt werden. Daneben wurden die für diese Entwicklungstätigkeit notwendigen analytischen und numerischen Methoden in den Partnerunternehmen ertüchtigt. Es wurde tiefes technisches Ver-

ständnis zum Verhalten der neuartigen Hybridlagerung des Rotors, der Integration einer elektrischen Maschine in eine hochdrehende Strömungsmaschine inklusive des thermischen Verhaltens, der Interaktion von Wassertropfen mit dem Betrieb einer Turbine sowie der Geräuschentwicklung in einer elektrifizierter Turbomaschinen generiert. Alle Erkenntnisse und die zugehörigen Technologien lassen sich auf weitere Anwendungen und Marktanforderungen übertragen. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Technologien m.E. skalierbar sind. Eine zukünftige gewinnbringende Verwertung des Erarbeiteten ist also nicht auf den Bereich bodengebundene Mobilität beschränkt, sondern kann darüber hinaus gehen.

Mit der konsequenten Anwendung der Entwicklungsmethodik basierend auf dem V-Zyklus, der Design-Struktur-Matrix und dem Form-Function-Mapping konnten in den Partnerorganisationen wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Diese stehen in den Häusern für die erfolgreiche Durchführung weiterer Entwicklungsprojekte zur Verfügung.

Der Verwertungsplan ist beeinflusst von der aktuellen Marktentwicklung für Brennstoffzellen in Antrieben für die bodengebundene Mobilität. Seit der Antragerstellung in 2021 wurde bzgl. Infrastruktur für die Zurverfügungstellung von grünem Wasserstoff für die Mobilität nur wenig Fortschritt erreicht. Insofern sind alle Anwendungen, die nicht höchste Anforderungen an Reichweite und Zuladung haben, aus dem Fokus der Fahrzeughersteller verschwunden. Zwar gibt es einzelne Projekte, die auf individuelle Mobilität abzielen – besonders bei asiatischen Herstellern -, doch diese weisen i.d.R. den Charakter einer Demonstrationsflotte auf. Solche Projekte können nur einen begrenzten Entwicklungsaufwand rechtfertigen.

Entsprechend ziehen sich die F&E Tätigkeiten sowie die Produktanwendungen für bodengebundene Mobilität auf den Bereich der Heavy Duty Trucks und für Long Haul oder auch Rail Anwendungen zurück. Hier ist ein Markt zu erwarten, allerdings wird dieser beschränkt sein. Zudem geht die Entwicklungen batterieelektrischer Antriebe unverändert intensiv voran. Auch der Ausbau der zugehörigen Lade-Infrastruktur findet im Vergleich zur Bereitstellung von grünem Wasserstoff deutlich intensiver statt. Allerdings besteht auch hier, insbesondere für energieintensive Antriebe, noch ein Mangel. Trotzdem werden mehr und mehr Marktsegmente mit batterieelektrischen Antrieben besetzt, was die Marktdurchdringung für Brennstoffzellen in der Mobilität zusätzlich erschwert.

Dahingehend erwarten die Autoren, übrigens im Einklang mit möglichen Kunden und Marktbegleitern sowie Brennstoffzellenherstellern und anderen potenziellen Zulieferer von BoP Komponenten, nicht vor 2030 attraktive Stückzahlen. Ein veranstalteter Work Shop mit Vertretern verschiedener Firmen konnte dies belegen. Es besteht also die Notwendigkeit, aber auch ausreichend Zeit, dass sich Zulieferer der Automobilindustrie nicht nur bzgl. Produkten, sondern auch bzgl. Zielmärkten transformieren. Dieser Prozess ist inzwischen im Gange, führt aber dazu, dass zumindest mittelfristig die Entwicklungstätigkeiten und die Einführung neuer Produkte für die bodengebundene Mobilität weniger intensiv betrieben wird.

Im Mittelpunkt der hier vorgestellten Produktentwicklung steht das Potenzial von grünem Wasserstoff – erzeugt aus erneuerbaren Energiequellen – als sauberer Kraftstoff

für Brennstoffzellenfahrzeuge. Mit dem Ausbau der Infrastruktur für grünen Wasserstoff und seiner verbesserten Verfügbarkeit wird erwartet, dass er eine wichtige Rolle bei der Emissionsreduzierung im Verkehrssektor spielen wird. Eine zentrale Herausforderung bleibt jedoch bestehen: Die für die flächendeckende Einführung von Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeugen erforderliche Infrastruktur ist noch nicht vorhanden. Der Mangel an Tankstellen und Vertriebsnetzen stellt ein Hindernis für den breiten Einsatz wasserstoffbetriebener LKW dar. Zudem wird der Bedarf an günstigem, grünem Wasserstoff in anderen Sektoren der Industrie immens sein. Zu erwähnen sind besonders die Zement- und auch die Stahlerzeugung. Anwendungen der Mobilität, die mit Wasserstoff bedient werden, können als Inkubator dienen, da hier zumindest für die Zeit der Markteinführung und aufgrund der Strafzahlungen für konventionelle Antriebe höhere Wasserstoffkosten ertragen werden können.

Die Entwicklung des AC+eR-Turboladers für mobile Brennstoffzellen zeigt den Beitrag der Projektpartner, diese Herausforderungen zu bewältigen und nachhaltigere, kostenattraktive Transportlösungen zu entwickeln. Die gelieferten Ergebnisse unterstreichen, wie fortschrittliche Technologie dazu beitragen kann, wasserstoffbetriebene Lösungen trotz anhaltender Infrastrukturprobleme der Realisierbarkeit näher zu bringen.

4. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind bisher keine vergleichbaren FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden. Das hier beschriebene Projekt hat eine Systemoptimierung aus dem Blick der Balance-of-Plant Komponente elektrifizierter Luftverdichter sowie der elektronischen Steuerung zum Ziel und unterscheidet sich so von anderen Systemprojekten. Es wird ausdrücklich spezifisches Know-How zur Auslegung und Optimierung der Komponenten in die Systemoptimierung eingebracht.

Im Fördercall der EU „HORIZON-JTI-CLEANH2-2024“, der inzwischen geschlossen ist, ist vorstellbar, dass ähnliche Fragestellungen bearbeitet werden, wie sie hier im Projektkonsortium bearbeitet wurden. So werden in diesem Förderrahmen Fragestellungen wie Skalierung und Optimierungen von Brennstoffzellensystemen mit Fokus auf „Balance of Plant“ (BoP) Komponenten adressiert. Der Luftverdichter ist die prominenteste BoP Komponente, so dass entsprechend Untersuchungen erwartet werden können. Detaillierte Inhalte sind selbstredend zum jetzigen Zeitpunkt nicht veröffentlicht.

In der Rückschau auf die Zeit der Beantragung des Förderprojekts im Jahr 2021, ist zu erkennen, dass die Anwendung von Brennstoffzellen in Antrieben für die bodengebundene Mobilität sich auf Trucks mit sehr hohen Anforderungen an Reichweite und Zuladung beschränken wird. Aus jetziger Sicht vorrausschauend, wurde die Mission für das untersuchte Brennstoffzellenfahrzeug passend definiert. Darüberhinausgehend fokussieren sich inzwischen viele Arbeiten auf andere Anwendungen, wie z.B. Industrie, Marine, Luftfahrt.

5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Schon während der Laufzeit des Projekts wurden Veröffentlichungen getätigt, um die neu gewonnen Erkenntnisse einem Fachpublikum zugänglich zu machen. Dabei bestätigte der zugehörige Prozess des Reviews die wissenschaftliche Qualität der durchgeführten Untersuchungen.

In großer Detailtiefe wurden die Ergebnisse studentischer Arbeiten zur thermischen Modellbildung des Brennstoffzellenluftverdichters mit Rekuperation (a), zur experimentellen Untersuchung der Steifigkeitsabstimmung und Dämpfung des Rollenlagers (b) sowie zum Versuchsaufbau und zur Versuchsführung von Tropfenschlag in der Turbine (c) und (d) dargestellt. Die Studien wurden in Fachvorträgen präsentiert und die zugehörigen technischen Berichte wurden in Konferenzbänden veröffentlicht.

An der FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz am 12.+13.11.2024 wurde das entwickelte Simulationsmodell vorgestellt (e). Der Stand der konstruktiven Arbeiten zum Brennstoffzellenluftverdichter sowie der Stand des Brennstoffzellen-Systemaufbaus an der Universität Chemnitz wurden dem interessierten Publikum mit einer Posterpräsentation nahegebracht (f). Vorbereitet sind die Berichte (g) und (h). (g) fasst die numerischen Untersuchungen zu Einflüssen auf die Gesamtbetriebskosten eines elektrifizierten Heavy Duty Truck Antriebes mit Brennstoffzelle zusammen. Erstmals wird eine solche Untersuchung auf Fahrzeug- und Missionslevel bis auf die Eigenschaften und technischen Varianten der Komponente Luftverdichter hinuntergebrochen. In (h) wird die Entwicklungsmethodik und der Entwicklungsprozess sowie Verifikations- und Validierungsergebnisse für den elektrisch angetriebenen Luftverdichter mit Rekuperation beschrieben. Um ein möglichst großes Publikum zu erreichen, ist vorgesehen (g) und (h) leicht zugänglich in einem Online-Journal zu veröffentlichen.

(a) Arvithis, G. S., Iosifidis, G., DeSantis, R., Rode, M., Burgmair, R., & Kalfas, A. I., Novel Modeling Methodology for Thermal Evaluation of an Electrically Assisted High-Speed Turbomachine. *Engineering Proceedings*, 90(1), 48. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090048>, 2025.

(b) Gaitanidou, A., Tränkner, M., Iosifidis, G., DeSantis, R., Efstathiadis, T., & Kalfas, A.: Degradation of Elastomer Damping Component for High-Speed Bearings. *Engineering Proceedings*, 90(1), 54. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090054>, 2025.

(c) Karakasis, G., Kunze, S., Iosifidis, G., Kalfas, A.: Development of a Test Stand for Electric Fuel Cell Turbocharger Integrity Testing, Part-1 Setup, XXVII Biennial Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, 2024.

(d) Karakasis G, Kunze S, Iosifidis G, Kalfas A.: The Development of a Test Stand for Electric Fuel-Cell Turbocharger Integrity Testing—Part 2: Results. *Engineering Proceedings*; 90(1):30. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090030>, 2025.

(e) Rathke, P., Di Modica, D.-V., Fink, S. K., Filsinger, D., Burgmair, R., von Unwerth, T.: Model Based Investigation on Drive Train Performance of a Heavy-Duty Fuel Cell

Truck Focusing on the Fuel Cell Air Delivery System, FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz, 12.+13.11.2024.

(f) Pohl, E., Wach, M., Burgmair, R., Slavic, S., Filsinger, D.: BZ_Turbolader - Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen, Poster Ausstellung, FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz, 12.+13.11.2024.

(g) Rathke, P., Pohl, E., Filsinger, D., Burgmair, R., Fink, S.-K.: Investigation on Total Cost of Ownership to Assess a Heavy-Duty Truck Fuel Cell Battery Electric Propulsion System, with Emphasis on the Air Supply, in preparation.

(h) Filsinger, D., Slavic, S., Rode, M., Value Optimized Electric Driven Compressor with Recuperation for Fuel Cell Systems, in preparation.

Die IHI Charging Systems GmbH hat zahlreiche Patentanmeldungen, die sich im Themenkreis der hier behandelten Entwicklungsaufgabe befinden, getätigt. Aufgrund der zurückhaltenden Marktsituation für Brennstoffzellen, die insbesondere im Bereich der bodengebundenen Mobilität deutlich weniger optimistisch bewertet wird, als dies bei Projektbeginn der Fall war, wurde eine Offenlegung und gleichzeitige Freigabe dieses Wissens beschlossen. Eine Liste der veröffentlichten Patentschriften ist in **Tabelle 4** zusammengestellt und kann interessierten Parteien als Übersicht und Ideengeber für weiterführende Entwicklungsarbeiten dienen.

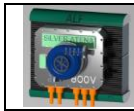
Tab 4: Liste der veröffentlichten, freigegebenen Patentschriften.

Keyword	Official ref. -Filing-
Fuel Cell Turbocharger Architecture (for ETC with Turbine) - einstückiges Systemrad	102021127331.5
Fuel Cell Turbocharger Architecture (for ETC with Turbine) - Wärmeübertragung Gehäuse	102021127332.3
Fuel Cell Turbocharger Architecture (for ETC with Turbine) - Luftansaugung über Motorgehäuse	102021127333.1
Ducting the flow to the turbine of a turbocharger for fuel cells - Spiralkanalströmung eines Abgasturboladers für eine Brennstoffzelle	PCT/DE2023/100685
Fuel Cell ETC – Bearing between back to back wheels, with overhang magnet	102023104856.2
Ducting the flow to the turbine of a turbocharger for fuel cells - Turbinengehäuse für einen Abgasturbolader für eine Brennstoffzelle	PCT/DE2023/100686
Fuel Cell ETC – Bearing inside the stator of PM (Permanent Magnet) synchronous motor	102023104857.0
Fuel Cell ETC – Hollow shaft rotor with hybrid bearing system	102023104858.9
Fuel Cell ETC – Squirrel cage sleeve for the rotor with hybrid bearing system of the fuel cell booster	102023116384.1
Spray tongue design	102024105800.5

Literatur zu Teil II

- [1] M Sens, C Danzer, C von Essen, M Brauer, R Wascheck, J Seebode, M Kratzsch, Hydrogen Powertrains in Competition to Fossil Fuel based Internal Combustion Engines and Battery Electric Powertrains, 42nd International Vienna Motor Symposium, 2021.
 - [2] M Thewes, D van der Put, M Walters, D Lückmann, A Schloßhauer, Y Liu, A Balazs, A Müller, R Beykirch, D Thien, S Tews, J Kexel, F Herkenrath, S Pischinger, Aging of Fuel Cell Systems for Heavy Duty Trucks – Mitigation Strategies and How to Validate Efficiently During the Development, 45th International Vienna Motor Symposium, 2024.
 - [3] J Marcinkoski, R Vijayagopal, J Adams, B James, J Kopasz, Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets; DOE Advanced Truck Technologies; DOE: Washington, DC, USA, 2019.
 - [4] NEDO. FCV-HDV Fuel Cell Technology Roadmap; Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council: Beijing, China, 2023.
 - [5] China SAE. Energy-Saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0; China Society of Automotive Engineers: Shanghai, China, 2020.
 - [6] Z Mu, F Zhao, F Bai, Z Liu, H Hao, Evaluating Fuel Cell vs. Battery Electric Trucks: Economic Perspectives in Alignment with China’s Carbon Neutrality Target, Sustainability, 16, 2427. <https://doi.org/10.3390/su16062427>, 2024.
 - [7] A Kerviel, A Pesyridis, A Mohammed, D Chalet, An Evaluation of Turbocharging and Supercharging Options for High-Efficiency Fuel Cell Electric Vehicles. Appl. Sci., 8, 2474. doi:10.3390/app8122474, 2018.
 - [8] F Uhrig, M Schinnerl, P Haluska, P Kurzweil, T von Unwerth, Comparative Study of Different Air Supply Systems for Automotive Fuel Cell Applications, SAE International Journal of Alternative Powertrains, pp. 29+, May 2019.
 - [9] C Doppler, B Lechner, A Romero Mancebo, D Schlueter, R Schruth, C Ahamer, B Schobesberger, E Wahlmüller, M Zarhuber, Operation of Fuel Cell Systems in Challenging Thermal Environmental Conditions, 45th International Vienna Motor Symposium, 2024.
 - [10] P Rathke, D V Di Modica, S K Fink, D Filsinger, R Burgmair, T von Unwerth, Model Based Investigation on Drive Train Performance of a Heavy-Duty Fuel Cell Truck Focusing on the Fuel Cell Air Delivery System, FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz, 12.+13.11.2024.
 - [11] P Rathke, D Filsinger, D V Di Modica, S K Fink, E Pohl, T von Unwerth, Investigation on Total Cost of Ownership for Fuel Cell Truck in Heavy Duty Long Haul Application and the Influence of Electric Turbocharger. Under review at Intl. Journal of Hydrogen Energy, 2025 (planned).
 - [12] Kitamura et al, Striving to Realize a Sustainable Mobility Society - Oil-free motorized turbocharger effectively utilized in an air supply system for fuel-cell vehicles, IHI Engineering Review, Vol. 54, No. 2, 2021.
 - [13] K Hayashi, S Kaneda, N Ikeya, Y Daito, K Kitamura, Development of Electric Turbocharger for Fuel Cell Systems to Contribute to the Realization of Carbon Neutrality, IHI Review, Vol 56, No 1, 2023.
 - [14] C Mohrdieck, S Dehn, The Intelligent Fuel Cell Plug-in Hybrid Drive System of the Mercedes-Benz GLC F-Cell, MTZ worldwide 01, 2019.
 - [15] O de Weck, Fundamentals of Systems Engineering: Systems Engineering Overview and Stakeholder Analysis, MIT Lecture Notes, MIT OpenCourseWare, 2015.
-

- [16] M Rode, D Filsinger, G Iosifidis, L Durbiano, Turbocharging for Combustion Engines in Hybrid Propulsion Systems, MTZ worldwide, 2021.
- [17] European Commission - Directorate-General for Climate Action, Vehicle energy consumption calculation tool - VECTO, Website URL https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en, 2025.
- [18] F Rodriguez, O Delgado, The future of VECTO: CO2 certification of advanced heavy-duty vehicles in the European Union, Tech. rep., International Council on Clean Transportation (ICCT), URL {https://www.researchgate.net/publication/336374950_The_future_of_VECTO_CO2_certification_of_advanced_heavy-duty_vehicles_in_the_European_Union}, 2019.
- [19] E Bitsanis, S Broekaert, A Tansini, D Savvidis, G Fontaras, Experimental evaluation of VECTO hybrid electric truck simulations, SAE Technical Paper Series, SAE International, doi:10.4271/2023-01-0485, 2023.
- [20] The European Commission's science and knowledge service, VECTO Workshop Ispra, https://climate.ec.europa.eu/document/download/c0b9671d-b48e-418f9b1f-e265f6ec2ffb_en?filename=201811_overview_en.pdf&prefLang=de, 2018.
- [21] D Filsinger, G Kuwata, N Ikeya, Tailored centrifugal turbomachinery for electric fuel cell turbocharger, Int. J. of Rotating Machinery, <https://doi.org/10.1155/2021/3972387>, 2021.
- [22] S Martinez-Boggio, D Di Blasio, T Fletcher, R Burke, A García, J Monsalve-Serrano, Optimization of the air loop system in a hydrogen fuel cell for vehicle application, Energy Conversion and Management 283, 116911, 2023.
- [23] W Yu, X Sichuan, H Ni, Air compressors for fuel cell vehicles: A systematic review. SAE Int. J. Alt. Power, 4, 115–122, 2015.
- [24] N Ahsan, M Mehmood, A A Zaidi, Fuel Cell designing with optimal high speed air compressor, Energy Thermofluids Eng. 1(1): 29-38, 2021.
- [25] M L Smith, A Fritot, D Di Blasio, R Burke, T Fletcher, Matching and Control Optimization of Variable Geometry Turbochargers with Hydrogen FCEVs, doi: 10.20944/preprints202503.0334.v1, 2025.
- [26] M Rode, T Suzuki, G Iosifidis, T Scheuermann, Electric Turbocharger Concept for Highly Efficient Internal Combustion Engines, MTZ worldwide, 2019.
- [27] M Rode, T Suzuki, G Iosifidis, L Durbiano, D Filsinger, A Starke, J Starzmann, N Kasprzyk, T Bamba, Boosting the Future with IHI: a comparative evaluation of state-of-the-art TGDI turbo concepts, Proc. 24th Supercharging Conference, Dresden, 2019.
- [28] D Filsinger, G Iosifidis, L Durbiano, C Kirschner, J Ehrhard, On Advanced Turbocharger Technology and Development, IHI Engineering Review, Vol. 56, No. 1, 2023.
- [29] P Wang, C Lusardi, Leveraging ICE Air System Technology for Fuel Cell System Cost Reduction, DoE Hydrogen Program, DE-EE0009620, Project ID: FC352, Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, 07.06.2023.
- [30] C Favi, M Germani, M Mandolini, Design for Manufacturing and Assembly vs. Design to Cost: toward a multi-objective approach for decision-making strategies during conceptual design of complex products, 26th CIRP Design Conference, Procedia CIRP 50, 275 – 280, 2016.
- [31] B Lüddecke, D Filsinger, J Ehrhard, On mixed flow turbines for automotive turbocharger applications, Int. Journal of Rotating Machinery, Volume 2012, Art.-ID 589720, doi: 10.1155/2012/589720, 2012.

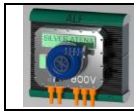


- [32] A Furuno, N Omori, Design and Performance Evaluation of Gas Foil Bearing for Turbo Blower, Japan Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [33] S Yoshinaga, S Aoyama, K Yamaguchi, T Jikumaru, IH Elemental Technologies to Realize Electrification of High-Speed Rotating Machinery, IHI Engineering Review, Vol 54, No. 1, 2020.
- [34] W Köhl, M Kreschel, D Filsinger, Modellabgleich eines Turboladerrotors in Schwimmbuchsenlagerung anhand gemessener Schwimmbuchsendrehzahlen, SIRM 2015 – 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen, Magdeburg, Deutschland. 23. – 25. Februar 2015.
- [35] G S Arvithis, G Iosifidis, R DeSantis, M Rode, R Burgmair, A I Kalfas, Novel Modeling Methodology for Thermal Evaluation of an Electrically Assisted High-Speed Turbomachine. Engineering Proceedings, 90(1), 48. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090048>, 2025.
- [36] F Xu, Investigation of High-Speed Permanent Magnet Motors with Toroidal Windings, PhD thesis, University of Sheffield, 2022.
- [37] C Gorbea, T Spielmannleitner, U Lindemann, E Fricke, Analysis of Hybrid Vehicle Architectures Using Multiple Domain Matrices, 10th Intl. Design Structure Matrix Conference, DSM'08, Stockholm, Sweden, 11 – 12 Nov, 2008.
- [38] T Leonard, S Spence, A Starke, D Filsinger, Numerical and Experimental Investigation of the Impact of Mixed Flow Turbine Inlet Cone Angle and Inlet Blade Angle, Journal of Turbomachinery, 141 (8), 081001, 1, 2019.
- [39] L Gibson, S Spence, S I Kim, C Stuart, M Schwitzke, A Starke, D Filsinger, An Investigation into the Effect of Clearance Aspect Ratio on the Performance of a Variable Geometry Vaned Diffuser for Automotive Turbocharger Application, ASME Turbo Expo, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [40] A Bormann, Elastomerringe zur Schwingungsberuhigung in der Rotordynamik Theorie, Messungen und optimierte Auslegung, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005.
- [41] A Gaitanidou, M Tränkner, G Iosifidis, R DeSantis, T Efstathiadis, A I Kalfas, Degradation of Elastomer Damping Component for High-Speed Bearings. Engineering Proceedings, 90(1), 54. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090054>, 2025.
- [42] M Adrian, L Marian, K Mariusz, Influence of an end-winding size on proximity losses in a high-speed PM synchronous motor, Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Kielce, Poland, 2015.
- [43] D Filsinger, J Ehrhard, G Kuwata, N Ikeya, Electric TC for Fuel Cells – IHI's contribution to sustainable mobility, FC³ Fuel Cell Conference Chemnitz, 2022.
- [44] F Duvigneau, S Schneider, F Doleschal, T Luft, H Rottengruber, J L Verhey, Die Akustik neuer Antriebskonzepte im Rahmen der Mobilitätswende, Akustik Journal 01 / 22, pp. 7-20, 2022.
- [45] G Karakasis, S Kunze, G Iosifidis, A I Kalfas, Development of a Test Stand for Electric Fuel Cell Turbocharger Integrity Testing, Part-1 Setup, XXVII Biennial Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, 2024.
- [46] G Karakasis, S Kunze, G Iosifidis, A I Kalfas, The Development of a Test Stand for Electric Fuel-Cell Turbocharger Integrity Testing—Part 2: Results. Engineering Proceedings; 90(1):30. <https://doi.org/10.3390/engproc2025090030>, 2025.
-

- [47] D Talmon-Gros, B Hurdeman, B Lüddecke, D Filsinger, Untersuchung von Komponenten für die Niederdruck-Abgasrückführung (Analysis of Components for Low-Pressure Exhaust Gas Recirculation). MTZ 03/2014. pp. 44-49, 2014.
- [48] G Agati, A Evangelisti, S Gabriele, F Rispoli, P Venturini, D Borello, Liquid Film Formation: Prediction Accuracy of Different Numerical Approaches”, Journal of Physics: Conference Series 2385 012138, 2022.
- [49] D Singh, F Schlegel, Entwicklung und Implementierung eines experimentell validierten 3D-CFD-Modells zur Untersuchung der Trennleistung von Tropfenabscheidern für Brennstoffzellensysteme, FVV Nr. 1455, Zwischenbericht, Heft R608, pp. 296-302, 2024.
- [50] International Aluminium Institute (IAI), Specifier’s Guide to IAI’s Carbon Footprint Methodology, <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2024/10/Good-Practice-Carbon-Footprint-October-2023.pdf>, 2023.

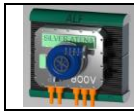
Zusätzliche Literatur (nicht im Text zitiert):

- **ATRI**, Understanding the CO2 Impacts of Zero-Emission Trucks - A Comparative Life-Cycle Analysis of Battery Electric, Hydrogen Fuel Cell and Traditional Diesel Trucks, Herausgeber: American Transportation Research Institute, 2022.
- **Basma & Rodriguez**, Race to zero – how manufacturers are positioned for zero-emission commercial trucks 6 busses in Europe, Herausgeber: ICCT the international council on clean transportation, 2021.
- **Böhme**, Vergleichende Betrachtungen zum Antrieb eines 40t-LKW mit einer H2-Brennstoffzelle (H2-BZ) und eines H2-Verbrennungsmotors (H2-VM) im Fernverkehr, Hrsg. Automotive Cluster Ostdeutschland ACOD, 2021.
- **Brown et al**, The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport, Herausgeber: IEA, 2020.
- **Danebergs**, Techno-economic Study of Hydrogen as a Heavy-duty Truck Fuel A Case Study on the Transport, Master Thesis, Department of Energy Technology Division of Heat and Power Technology SE-100 44 Stockholm, 2019.
- **Djunisic + Tsanova**, Hydrogen & Mobility, Intelligence report, Herausgeber: World hydrogen leaders, 2022.
- **Gérard et al**, Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans. Trinomics & LBST for the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Reference number: FCH / OP / Contract 234, 2020.
- **Grigoratos et al**, Development of Heavy Duty Vehicles CO2 certification for Heavy Buses and Medium Lorries, Herausgeber: European Commission, JRC technical reports, 2020.
- **Heid et al**, How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions, Herausgeber: McKinsey & Company, 2021.
- **Heinfellner et al**, Sachstandsbericht Mobilität und mögliche Zielpfade zur Erreichung der Klimaziele 2050 mit dem Zwischenziel 2030, Herausgeber: Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie, 2019.



- **HM government**, Transitioning to zero emission cars and vans: 2035 delivery plan, 2021.
 - **Hydrogen Council**, Path to hydrogen competitiveness, 2020.
 - Kramer et al, Energy Paths for Road Transport in the Future (Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft), MTZ 05, 2019.
 - **Kurth et al**, The concept of efficiency in the German climate policy debate on road transport, Herausgeber: Frontier, 2020.
 - **Labinsky**, Internationale Potenzial- und Marktanalyse für mobilitätsorientierte Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen, Herausgeber: Brennstoffzelle BW + prognos, 2022.
 - **Lattanzio et al**, Environmental Effects of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles, Herausgeber: Congressional Research Service, R46420, <https://crs-reports.congress.gov>, 2020.
 - **Ledna et al**, Decarbonizing Medium- & Heavy-Duty On-Road Vehicles: Zero-Emission Vehicles Cost Analysis, Herausgeber: NREL, 2022.
 - **Lozanovski et al**, Technical Evaluation and Life Cycle Assessment of Long-haul Heavy Duty Vehicles in 2050, Research Powertrain, ATZ heavy duty worldwide, pp. 56-60, 01|2020.
 - **Lindner**, Produktlebenszyklus, Stuttgart, 2019.
 - **Maier**, Die Rolle des Straßengüterverkehrs auf dem Weg zur Klimaneutralität, Herausgeber: LBFutureMobility + Agora, 2021.
 - **Mayr et al**, Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug -Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. Hrsg. Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, 2021.
 - **Mauler et al**, Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A U.S. case study, Journal of Energy Storage, 46, 103891, 2020.
 - **Miller et al**, Decarbonizing road transport by 2050 Accelerating the global transition to zero-emission vehicles, Herausgeber: ICCT ZEV Transition Council, 2021.
 - **Mock & Diaz**, Pathways to decarbonization: The European passenger car market in the years 2021-2035, ICCT white paper, 2021.
 - **Mohr dieck**, Fuel cell specifics for long-haul heavy duty, f-cell, Stuttgart, Cellcentric, 2021.
 - **Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)**, Ergebnisse der nationalen Plattform Zukunft der Mobilität - Ergebnisse aus drei Jahren NPM (2018-2021), Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2022.
 - **Neuhausen et al**, Making zero-emission trucking a reality Truck Study 2020: Routes to decarbonizing commercial vehicles, Herausgeber: Strategy & part of the PwC network, 2020.
 - **Nordic Innovation**, Next Nordic Green Transport Wave - Large Vehicles, Herausgeber: Nordic Innovation + Next Wave, 2021.
-

- **Power to X Alliance**, System efficiency of renewable energy in cars – e-fuels, e-gas, green hydrogen, battery, 2021.
 - **Rodríguez**, Market segmentation and duty cycles, Herausgeber: ICCT G20 transport task group: Deep dice to support heavy-duty vehicle efficiency labelling and standards meeting #4, 2018.
 - **Rodríguez & Delgado**, The future of VECTO: CO2 certification of advanced heavy-duty vehicles in the European Union, Herausgeber: ICCT the international council on clean transportation, 2019.
 - **Rodríguez & Posada**, Future heavy-duty emission standards – an opportunity for international harmonization, Herausgeber: ICCT the international council on clean transportation, 2019.
 - **Ruf et al**, Fuel Cells Hydrogen Trucks- Heavy-Duty’s High Performance Green Solution, Herausgeber: Roland Berger for the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU), doi: 10.2843/168949, ISBN: 978-92-9246-347-2, 2019.
 - **Schrank et al**, Wasserstoff- Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb, Hrsg. NOW GmbH, 02.03.2021.
 - **Stumpp**, Berylls Insights, Trucking 2030 – creating the electrified future of road transport, Herausgeber: Berylls, 2021.
 - **VDI**, Klimafreundliche Nutzfahrzeuge – Vergleich unterschiedlicher Technologiepfade für CO2-neutrale und -freie Antriebe, ISBN 978-3-931384-98-2, Herausgeber VDI+VDE, 2022.
 - **Zacharof et al**, Simulating City-Bus On-Road Operation With VECTO, Front. Mech. Eng., Sec. Engine and Automotive Engineering, <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00058>, 2019.
 - **Zacharof & Fontaras**, Report on VECTO Technology Simulation Capabilities and Future Outlook, Herausgeber: European Commission, JRC technical reports, 2016.
-



Verzeichnis der Abbildungen

Teil I		Seite
Abb 01	Qualitative Bewertung möglicher Antriebe für mobile Anwendungen unter den Aspekten Gesetzgebung, Brennstoffausnutzung, Investitionen und Kundennutzen mit der Annahme, dass grüne Energie zum Antrieb Verwendung findet.	4
Abb 02	Grundsätzlicher Effekt des Druckes im Luftsystem einer Brennstoffzelle auf deren Performance.	14
Abb 03	Topologie eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges und Zuordnung zu den Projektpartnern.	16
Teil II		
Abb 01	Simulationsmodell des Trucks mit batterieelektrischem Brennstoffzellenantrieb bestehend aus den Teilmodellen (1) bis (11) [11].	23
Abb 02	Modellierung des Luftpfades mit Turboaufladung (links) und einfache Darstellung des 0D-Ansatzes (rechts) [10].	23
Abb 03	Modell des elektrisch unterstützten Turboladers.	24
Abb 04	VECTO-Langstrecken-Missionsprofil: Entfernung 100 km, Durchschnittsgeschwindigkeit 80 km/h, Stoppzeit 67 s [20].	25
Abb 05	Leistungsbedarf des Antriebsstranges; zeitaufgelöst (links); Häufigkeitsverteilung (rechts)	25
Abb 06	Betriebsbereich (Druckverhältnis und relativer Durchsatz) eines exemplarischen Verdichters und Darstellung der Brennstoffzellenbetriebslinie (links); Betriebsbereich einer exemplarischen Turbine und Darstellung der Brennstoffzellenbetriebslinie (rechts).	26
Abb 07	Auftragung der notwendigen bezogenen Leistung zur Luftverdichtung über der relativen Brennstoffzellen Moduleistung mit (wt: blau) und ohne (wot: orange) Rekuperationsturbine.	26
Abb 08	Zusammenfassung der Auswirkungen auf die Betriebskosten bei Wahl verschiedener Technologien.	28


	BZ Turbolader: Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen	Abschlussbericht 2022 – 2024	Seite <div style="text-align: right;">80 von 86</div>
Abb 09	Optimierung der Systemarchitektur durch Form-Funktions-Mapping [30].	31	
Abb 10	Querschnitt des AC+eR mit hervorgehobenen innovativen Merkmalen.	32	
Abb 11	Systemrad oder „Merged Wheel“: Ein Systemrad erfüllt zwei Funktionen: Kompression und Rekuperation. Links: Systemintegration; rechts: Illustration der Strömungsrichtungen.	33	
Abb 12	Steifigkeitsvariation der Kugellageraufnahme (farbige Balken) und ihr Einfluss auf die Resonanzfrequenz des Eigenmodus Nr. 6.	35	
Abb 13	Vergleich eines Stators mit Nuten und verteilten Wicklungen (links) und einem nutenlosen Stator mit toroidalen Wicklungen (rechts) [36]	37	
Abb 14	Berechnete Amplituden für den Drehschwingungsmodus der Statorbaugruppe mit axialer Fixierung.	38	
Abb 15	Flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizienten (BHTC) auf der Statoraußenhülle für verschiedene betrachtete Betriebspunkte und unterschiedliche Abstände zur inneren Gehäusewand.	38	
Abb 16	Systematik der Systemebenen und Untersuchungen während der Verifizierung und Validierung.	39	
Abb 17	Übersicht mechanischer Verifikationsstudien auf Komponenten- bzw. Subsystemebene.	40	
Abb 18	Übersicht der Verifikationsstudien auf Subsystemebene.	41	
Abb 19	Darstellung der Leckagesituation zwischen Kompressor und Turbine (rechts); CFD-Bereich des Systems (links).	42	
Abb 20	3D-CFD-Berechnung der Leckage zwischen Kompressor- und Turbine im Systemrad.	42	
Abb 21	Schematische Darstellung des turbinengetriebenen Fahrzeug-Turboladers mit Systemrad anstelle einer herkömmlichen Verdichterstufe.	43	
Abb 22	Turbinengetriebener Fahrzeug-Turbolader mit Systemrad anstelle einer herkömmlichen Verdichterstufe (links). Blick auf die Verdichterseite des Systemrads mit abgenommenem Gehäuse (rechts).	44	

Abb 23	Verdichterkennfeld (links) und Turbinenkennfeld (rechts) aus der Prüfstandsmessung im Komponenten-aufbau.	44
Abb 24	Vergleich der berechneten (1) und gemessenen (2) Leckage für den Aufbau des Teilsystems; Betrieb (a) näher am Pumpen; Betrieb (b) höherer Massenstrom; die Relation zwischen den Verdichterdruckverhältnissen (PR) ist angegeben.	45
Abb 25	Hybridlager- und Rotormodell für die harmonische Analyse (links); Ergebnis für verschiedene Dämpfungskonfigurationen (rechts).	46
Abb 26	Shaker-Prüfstandsaufbau zur Messung der dynamischen Eigenschaften der Wälzlageraufnahme mit Beschleunigungssensoren am Fußpunkt (1), am Gehäuse (2) sowie Verschiebungsmessungen am Dummy-Rotor (3).	47
Abb 27	Zusammenbau zur Erzeugung der radialen Vorspannung der O-Ringe (links); Prü fzelle zur Aufnahme und Alterung der vorgespannten O-Ringe (rechts).	47
Abb 28	Prüfstandsaufbau mit Beschleunigungsaufnehmern: Gehäuse („bearing-housing“) und Wälzlageraufnahme („squirrel cage“).	48
Abb 29	Ergebnisse der Wellenbahnmessung des Rotordynamik-Dummys mit und ohne Dämpfung.	49
Abb 30	Berechnete relative Kühlleistung und relative Temperaturverteilung aus der einfachen numerischen Modellierung der indirekten Wasserkühlung (oben) im Vergleich zur direkten Luftkühlung (unten).	50
Abb 31	Schwacher Kopplungsansatz für das dreidimensionale detaillierte thermische Systemmodell.	50
Abb 32	Wärmeübergangskoeffizienten am Stator und der Rotoroberfläche (links); berechnete Festkörpertemperaturen des Gesamtsystemmodells (rechts) für den maximalen Lastpunkt.	51
Abb 33	A-Muster-Prototyp: konstruktive Darstellung und Hauptabmessungen.	52
Abb 34	A-Muster-Prototyp: photographische Abbildung (links) und Prototypenbaugruppe während der Systemerprobung (rechts).	53

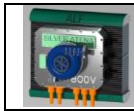
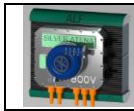
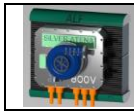


Abb 35	Versuchsaufbau zur Validierung des Brennstoffzellenturboladers AC+eR.	53
Abb 36	Testaufbau für die Rotordynamikversuche mit Verschiebungsmessung in zwei Achsen sowie Beschleunigungsaufnehmern.	54
Abb 37	Gemessene Auslenkung im Hochlauf bzw. Herunterfahren über den Betriebsdrehzahlbereich.	54
Abb 38	Darstellung des Referenzpunkts im Verdichterkenfeld für drei AC+eR.	55
Abb 39	Vergleich der gemessenen Leckage für das getestete Teilsystem (1) und das getestete System (2); Betrieb (a) näher am Pumpen; Betrieb (b) höherer Massenstrom; die Beziehung zwischen den Druckverhältnissen des Verdichters (PR) ist angegeben.	56
Abb 40	Temperaturmesswerte entlang der Maschine beim Betrieb mit zwei verschiedenen Kompressor-druck-verhältnissen (A) und (B), während der Kompressormassenstrom konstant gehalten wird.	56
Abb 41	Gemessener totaler Schalldruckpegel aus stationären Messungen am AC+eR.	58
Abb 42	Experimenteller Aufbau der Untersuchungen zur Auswirkung von flüssigem Wasser im Luftpfad der Turbinenstufe. Der Verlauf des Luftpfads und die wichtigsten Komponenten sind gekennzeichnet und benannt.	60
Abb 43	Qualitativer Vergleich der CFD-Ergebnisse (a) mit den experimentellen Aufnahmen zur Darstellung des sekundären Tropfenzerfalls an der Zunge des Turbinengehäuses (b).	60
Abb 44	Mikroskopaufnahme einer Turbinenradschaufel nach dem Dauerlauf (links) und Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der GOM-Untersuchungen (rechts).	61
Abb 45	Relativer Kostenvergleich auf Basis "Costed BOM".	62
Abb 46	Prozentuale Aufteilung der Beiträge der einzelnen Baugruppen eines elektrischen Turboladers mit Luftlagerung zum Product Carbon Footprint gemäß der Norm ISO 14040.	63



Verzeichnis der Tabellen

Teil I		Seite
Tab 01	Projektphasenplanung.	12
Tab 02	Qualitativer Vergleich von Verdichter-Technologien.	14
Teil II		
Tab 01	Übersicht der angenommenen Investitions- und Betriebskosten sowie der Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellenreferenzsystems aus [11]; die zugehörigen Quellen sind ebenfalls in [11] angegeben.	28
Tab 02	Messdaten für den Referenzpunkt für drei AC+eR.	55
Tab 03	Übersicht der wichtigsten Eigenschaften (links) und CAD-Darstellung des AC+eR (rechts).	63
Tab 04	Liste der veröffentlichten, freigegebenen Patentschriften.	72

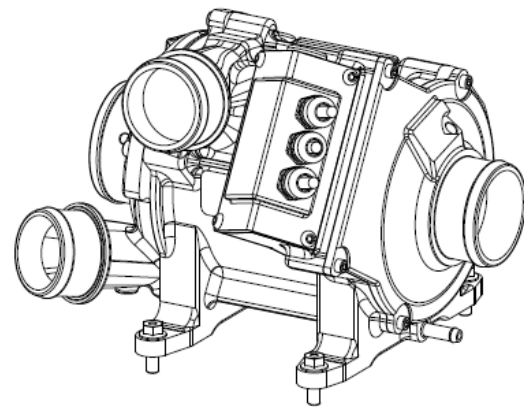
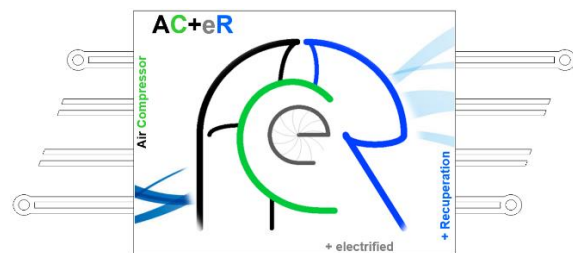


D A N K S A G U N G

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsstipendiums 19/21046A.

Die Autoren dieses Berichts sind für den Inhalt dieser Veröffentlichung verantwortlich, möchten sich jedoch ausdrücklich bei einem wahrhaft globalen Team:

M.Sc. Sasa Slavic,
M.Sc. Martin Rode,
Dipl.-Ing. Sven Altvater
Dipl.-Ing. ETH Roberto DeSantis,
Dr.-Ing. Dario Di Modica,
Dr. Lee Gibson PhD.,
Dr.-Ing Torsten Gramsch,
M.Sc. Kathrin Holz,
M.Sc. Nobuyuki Ikeya,
M.Sc. Akira Ito,
M.Sc. Lorenz Jaennike,
Dipl.-Ing. Daniel Just,
Kai-Uwe Krause,
Dr.-Ing. Sebastian Kunze,
Dr. Thomas Leonard PhD.,
M.Sc. Rohit Pawar,
Dr.-Ing. Johannes Ratz,
Dr.-Ing. Reimar Schaal,
M.Sc. Mario Tränkner,
M.Sc. Tooru Tanaka



für die hervorragende Zusammenarbeit und die unverzichtbaren Beiträge zum Erfolg dieses Projekts bedanken. Dies ist umso mehr wertzuschätzen, da im Zuge der Projektdurchführung eine bedeutsame Unternehmenstransformation bewältigt werden musste.

Die Autoren danken ihren Partnern an der Universität Chemnitz und bei der Silver Atena GmbH für die beispielhafte Kooperation: „So zahlen sich Partnerschaften aus!“

Die Autoren danken auch dem Management von IHI Charging System Intl. GmbH für die Unterstützung des Projekts.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel BZ_Turbolader – Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen. Teilvorhaben: Neuentwicklung eines Turbo-Aufladesystems und Reduzierung der Herstellkosten durch materialoptimierte Komponentenauslegung und fertigungsoptimierte Konstruktion.		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Filsinger, Dietmar, Dr.-Ing.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024	
	6. Veröffentlichungsdatum 29.06.2025	
	7. Form der Publikation Projektbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IHI Charging Systems International GmbH Wolff-Knippenberg-Strasse 2, 99334 Amt Wachsenburg OT Ichtershäusen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution n.a.	
	10. Förderkennzeichen 19I21046A	
	11. Seitenzahl 86	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 22 + 50	
	14. Tabellen 2 + 4	
	15. Abbildungen 3 + 46	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Rahmen des in diesem Bericht vorgestellten Dreijahresprogramms wurde ein elektrifiziertes Luftversorgungssystem für Brennstoffzellen entwickelt, das die Technologie von Radialverdichtern und Turbinenrekuperation als energieeffizienteste Technologien für diese Zwecke nutzt. In dem wertheoptimierenden Entwicklungsprojekt wurden neue technische Lösungen zur Optimierung der Produktkosten und zur Reduzierung des Produktgewichts durch größtmögliche Vereinfachung und Funktionenintegration entwickelt und einer Verifizierung sowie vorläufigen Validierung unterzogen. Die systematische und konsequente Anwendung des Form-Funktions-Mappings nach der Identifizierung der Kostentreiber während Fertigung und Montage führte zu einer deutlichen Reduzierung der prognostizierten Produkt- und Fertigungskosten. Der V-Zyklus wurde konsequent angewendet, wobei die Design-Struktur-Matrix zur Definition der effektivsten Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten genutzt wurde. Die Zielvorgabe der technischen Reifgraderhöhung wurde erreicht. Basierend auf den vorliegenden experimentellen Untersuchungen konnten das Konzept und die Architektur der Konstruktion erfolgreich bestätigt werden. Konsequente Funktionenintegration und Designvereinfachung führen zu einer deutlichen Gewichtsreduzierung und damit zu einer Kostenreduzierung der Komponenten. Attraktive Produktkosten konnten durch die Reduzierung der Komponentenanzahl und die konsequente Berücksichtigung von Fertigung und Montage in jeder Phase des Projektes erreicht werden. Mit der Entwicklung des AC+eR Turboladers für mobile Brennstoffzellen mit einer Systemleistung von bis zu ca. 150kW liefern die Projektpartner einen entscheidenden Beitrag, zur Steigerung der Kostenattraktivität von nachhaltigen Transportlösungen. Die gelieferten Ergebnisse unterstreichen, wie fortschrittliche Technologie dazu beitragen kann, wasserstoffbetriebene Lösungen trotz anhaltender Infrastrukturprobleme der Realisierbarkeit näher zu bringen.		
19. Schlagwörter Wasserstoff Brennstoffzelle, Luftsystem, Turbolader, Batterie elektrischer Brennstoffzellen LKW		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title BZ_Turbolader - Development of a recuperative air charging system for fuel cells; sub-project: New development of a turbocharging system and reduction of manufacturing costs through material-optimized component design and production-optimized construction.		
4. author(s) (family name, first name(s)) Filsinger, Dietmar, Dr.-Ing.	5. end of project 31.12.2024	
	6. publication date 20.07.2025	
	7. form of publication Report	
8. performing organization(s) (name, address) IHI Charging Systems International GmbH Wolff-Knippenberg-Strasse 2, 99334 Amt Wachsenburg OT Ichtershäusen	9. originator's report no. n.a.	
	10. reference no. 19I21046A	
	11. no. of pages 86	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 22 + 50	
	14. no. of tables 2 + 4	
	15. no. of figures 3 + 46	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract <p>Within the framework of the three-year program presented in this report, an electrified air supply system for fuel cells was developed that utilizes radial compressor technology and turbine recuperation as the most energy-efficient technologies for these purposes. In this value-optimizing development project, new technical solutions for optimizing product costs and reducing product weight through maximum simplification and functional integration were developed and subjected to verification and preliminary validation. The systematic and consistent application of form-function mapping after identifying cost drivers during manufacturing and assembly led to a significant reduction in projected product and manufacturing costs. The V-cycle was consistently applied, using the design-structure matrix to define the most effective verification and validation activities. The objective of increasing technical maturity was achieved.</p> <p>Based on the available experimental investigations, the design concept and architecture were successfully validated. Consistent functional integration and design simplification lead to a significant reduction in weight and thus in component costs. Attractive product costs were achieved by reducing the number of components and consistently considering manufacturing and assembly in every phase of the project.</p> <p>With the development of the AC+eR turbocharger for mobile fuel cells with approximate system power of 150kW, the project partners are making a decisive contribution to increasing the cost-effectiveness of sustainable transportation solutions. The results underscore how advanced technology can help bring hydrogen-powered solutions closer to feasibility despite ongoing infrastructure challenges.</p>		
19. keywords Hydrogen Fuel Cell, Air Supply, Turbocharger, Battery Electric Fuel Cell Truck		
20. publisher	21. price	