

SUE

SELF-DRIVING URBAN E-SHUTTLE

FÖRDERKENNZEICHEN

19A21047

LAUFZEIT

01.01.22 - 30.09.25

individueller

SCHLUSSBERICHT

FP-Fahrzeugtechnik

UE | STUDIOS



elringklinger



TUVNORD

Fraunhofer
EMFT

Technische Hochschule
Ingolstadt

NFF NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK
Ein Zentrum der TU Braunschweig

Landkreis
Kelheim

IFG INGOLSTADT



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kapitel I – Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Für den im Projekt SUE entwickelten autonom fahrenden People Mover wird eine vollständig neu konzipierte elektrische Antriebseinheit benötigt. Da bislang kein deutscher Hersteller ein vollständig autonom fahrendes Fahrzeug in Serie umgesetzt hat, existieren weder etablierte Referenzarchitekturen noch validierte Anforderungen an Batteriesysteme dieser Fahrzeugklasse. Zusätzlich besteht derzeit eine starke Abhängigkeit von ausländischen Batterieherstellern, während marktverfügbare People Mover häufig auf 400-V-Systemen basieren. 48-V-Systeme gelten bislang als zu leistungsschwach für solche Anwendungen, weshalb oftmals ungeeignete Automotive-Standardkomponenten für Spezialanwendungen zweckentfremdet werden.

Das Teilprojekt 4 - Antriebsstrang verfolgt daher das Ziel, ein leistungsfähiges, kompaktes und sicheres 48-V-Antriebssystem zu entwickeln, das den besonderen Anforderungen eines urbanen autonomen Fahrzeugs gerecht wird. Der verfügbare Bauraum ist im People Mover aufgrund des angestrebten maximalen Innenraumvolumens stark begrenzt; gleichzeitig ist eine besonders gute Zugänglichkeit der Batterie erforderlich. Somit sollen eine flache Bauform, reduzierte Sicherheitsanforderungen aufgrund der Niedervoltarchitektur und eine hohe Dauerstromfähigkeit gewährleistet werden, um sowohl die Traktionsmotoren als auch energieintensive Hardware – wie Sensorik, Kameras, Lidar und zentrale Recheneinheit – zuverlässig zu versorgen. Das System muss darüber hinaus die Fähigkeit besitzen, Steigungen bis zu 15 % bei voller Beladung zu überwinden.

Die Faissner Petermeier Fahrzeugtechnik AG (FP) übernimmt im Projekt die Aufgabe, den gesamten elektrischen Antriebsstrang zu entwickeln, zu vernetzen und so auszulegen, das die Steuerbefehle der autonomen Fahrregelung sicher, präzise und ohne menschlichen Operator in Fahrmanöver umgesetzt werden können. Hierzu ist eine intelligente Prozessarchitektur zwischen Fahrregelung und Antriebsstrang zu implementieren, die ein sicheres, robustes und vorhersehbares Fahrzeugverhalten auch in Fehlerszenarien gewährleistet. Das Bordnetz muss so konzipiert sein, dass die Komponenten Batterie–Inverter–Motor zuverlässig interagieren und jederzeit die benötigte Traktionsenergie bereitstellen. Eine zentrale Fahrzeug-Steuereinheit (VCU) überwacht und koordiniert als Master die sicherheitsrelevanten Abläufe des gesamten Antriebsstrangs.

2. Voraussetzungen für die Durchführung

Die Faissner Petermeier Fahrzeugtechnik AG verfügt über umfassende Erfahrung in der Systemintegration und Antriebsstrangentwicklung von 48-V-Systemen, wodurch bereits zu Projektbeginn fundiertes technisches Know-how vorlag. Dennoch war es erforderlich, die geeignete Systemarchitektur, die spezifischen Anforderungen eines autonomen 48-V-Antriebsstrangs und die passenden Einzelkomponenten zunächst systematisch zu definieren.

Zudem bestanden enge Kooperationen mit den Projektpartnern, wodurch Know-how aus den Bereichen Gesamtfahrzeugentwicklung, Batterietechnologie sowie autonomes Fahren gebündelt werden konnte.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan der FP-Fahrzeugtechnik im Rahmen des Gesamtprojektes gliederte sich in mehrere aufeinander abgestimmte Arbeitspakete:

- **AP 4.1 – Anforderungserhebung und Konzeptentwicklung des Skateboards**
Definition aller fahrzeugseitigen Anforderungen und Ableitung des Grundkonzepts.
- **AP 4.2 – Definition der EE-Architektur des Antriebsstrangs**
Festlegung der elektrischen und elektronischen Systemarchitektur inklusive Kommunikationsschnittstellen.
- **AP 4.3 – Entwicklungsphase Subsystem Antriebsstrang (Hardware und Software)**
Entwicklung und Absicherung der zentralen Subsysteme Batterie, Inverter, Motoren, Steuergeräte sowie der Softwarefunktionen.
- **AP 4.9 – Systemintegration, Inbetriebnahme und Erprobungstests Antriebsstrang**
Zusammenführung aller Komponenten, Integration am Teilsystemplatz Fahrzeug und erste Funktionsprüfungen.
- **AP 4.10 – Systemintegration, Inbetriebnahme und Testfahrten**
Integration in das Gesamtfahrzeug und Durchführung dynamischer Tests.
- **AP 4.11 – Validierung und Straßenzulassungstests**
Gesamtsystemvalidierung und Vorbereitung der straßenverkehrsrechtlichen Nachweise.

Eine besondere Herausforderung stellte die Entwicklung einer Middleware dar, die zwischen der autonomen Recheneinheit und den Aktuatoren für Antrieb, Lenkung und Bremse vermittelt. Ebenso wesentlich war die Berücksichtigung der Anforderungen der funktionalen Sicherheit gemäß ISO 26262, insbesondere aufgrund des vollautonomen Betriebs ohne menschlichen Operator.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn

Obwohl viele der zugrunde liegenden Technologien wie elektrische Antriebe, Batteriemanagement oder Niedervoltarchitekturen grundsätzlich bekannt waren, mussten sie für den Einsatz in einem vollständig autonomen 48-V-People Mover neu kombiniert, angepasst und weiterentwickelt werden.

FP übernahm dabei u. a. folgende Leistungen:

- Aufbau der Motor-Getriebeeinheit
- Integration der gesamten Verkabelung
- Entwicklung und Absicherung der Software für die Vehicle Control Unit (VCU) als zentrales Antriebssteuergerät
- Entwicklung des vollständigen Ladesystems (intern & extern)
- Implementierung einer regelungsbasierten Momentenverteilung für zwei radindividuelle Hinterachsantriebe
- Implementierung eines von FP entwickelten Torque-Vectoring-Systems zur Verbesserung des Wendekreises
- Auslegung von Thermo- und Energiemanagement
- Entwicklung eines Energie-Sicherheitskonzepts
- Implementierung einer stabilen 12-V-Versorgung

- Entwicklung der Body-Control-Funktionen (Türen, Wischer, Beleuchtung)
- Konzeption der 48-V-Ladetechnologie

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt war interdisziplinär ausgelegt und wurde gemeinsam mit mehreren Partnern umgesetzt:

Kern-Partner für den Umfang Antriebsentwicklung:

- **UE**
Verantwortlich für Design und Aufbau des Gesamtfahrzeugs
- **ElringKlinger**
Entwicklung der Traktionsbatterie, inklusive Zellmodulaufbau, Batteriemanagement und Gehäusekonzept.
- **NFF**
Entwicklung der autonomen Recheneinheit sowie der Sensordatenverarbeitung.

Die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern ermöglichte eine ganzheitliche Abstimmung der Teilkomponenten und stellte sicher, dass Fahrregelung, Energieversorgung, Antriebssteuerung und Fahrzeugarchitektur nahtlos ineinandergreifen.

Kapitel II – Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

Die Fördermittel wurden überwiegend für Personalaufwand, mechanische und elektrische Hardware, die Kabelbaumentwicklung, die Softwareentwicklung sowie mechanische Fertigungsanteile eingesetzt. Ein wesentlicher Bestandteil war die Entwicklung und Integration des elektrischen Bordnetzes sowie die Ausarbeitung sämtlicher Funktionen der funktionalen Sicherheit und die Durchführung umfassender Test- und Validierungsmaßnahmen.

Die Kosten blieben insgesamt innerhalb des geplanten Budgets. Durch den Austritt eines Projektpartners ergab sich jedoch ein zusätzlicher interner Mehraufwand, da FP weitere Software-Umfänge übernehmen und interne Abläufe reorganisieren musste. Diese Umverlagerung wurde erfolgreich kompensiert, ohne dass wesentliche Verzögerungen oder Budgetüberschreitungen eintraten.

AP 1.4 Systemanalyse und Definition der Anforderungen/Konzepterstellung (UE | STUDIOS, EK, FP, NFF)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Abstimmung und Konsolidierung mit Projektpartnern bzgl. Antriebsstrangfunktionen
- Abstimmung und Konsolidierung mit Projektpartnern bzgl. Sicherheitsanforderungen
- Die Abstimmung erfolgt in Workshops sowie bilateral

Zu Beginn des Projekts fanden mehrere Workshops und Abstimmungstreffen des gesamten Konsortiums zur Definition der Anforderungen an das elektrische System statt. Unter Leitung von Uedelhoven wurden diese Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene in einem Whiteboard erarbeitet. Diese frühe Phase ist entscheidend für den gesamten Entwicklungsprozess und das Endergebnis, da hierbei bereits Aspekte berücksichtigt werden müssen, die erst später im Projektverlauf relevant werden. Ein gutes Beispiel dafür ist die frühzeitige Einbindung der Anforderungen an Straßenzulassung und Homologation.

AP 1.5 Evaluierung vorhandener Systeme (UE | STUDIOS, DB, FP, KELHEIM, NFF)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Spezifikationsrecherche der beteiligten Komponenten und Abstimmung mit den jeweiligen Komponenten-verantwortlichen (Fokus ADA Fahrsteuerung, Motor/Inverter/Batterie)
- Funktionale Sicherheit: Spezifikationsrecherche der beteiligten Komponenten und Abstimmung mit den jeweiligen Komponentenverantwortlichen (Fokus ADA Fahrsteuerung, Motor/Inverter/Batterie/Brems- und Lenksystem)

Im Rahmen des AP 1.5 erfolgte eine Bewertung bestehender autonomer Fahrzeuge und relevanter Einzelsysteme hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile. Dieser Lessons-Learned-Prozess stellte einen wichtigen Baustein für die anschließende Anforderungsdefinition des SUE dar, da frühzeitig identifiziert werden konnte, welche technischen Konzepte sich bewährt haben und welche Risiken oder Einschränkungen zu berücksichtigen sind.

Ein großer Anteil des Aufwands floß in die Recherche von Normen und Gesetzgebungen wie die Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung – AFGBV, da es sich hier um neue Technologien handelte, in denen FP bisher noch keine Vorkenntnisse hatte. Das Wissen

war aber essenziell, um die relevanten Anforderungen im Laufe des Projekts in Funktionalitäten und funktionale Sicherheit zu überführen.

Die Evaluierung erfolgte in gemeinsamen Workshops mit allen Projektpartnern, um ein möglichst breites Erfahrungsspektrum einzubeziehen und das Wissen aus unterschiedlichen Fachbereichen zusammenzuführen. Dadurch konnten fundierte Anforderungen abgeleitet und die Grundlage für eine robuste Systemarchitektur geschaffen werden.

Unser FP-Team hat als Basis bekannte Komponenten und Architekturen aus vergangenen und laufenden FP-Projekten untersucht, ob diese für das SUE Projekt anwendbar sind. Peripheriekomponenten wie elektromechanische Komponenten und die VCU als zentrale Recheneinheit konnten durch diese Analyse frühzeitig bestätigt werden. Die VCU M560 von Pilnovo wurde bei zwei vorangegangenen Projekten bereits mit Erfolg eingesetzt. Dadurch konnten wir auf etablierte Tools und Prozesse zurückgreifen. Auch verfügt die VCU über einen speziellen funktionale Sicherheit Stack.

AP 1.6 Definition des Software- und Hardwarekonzepts (UE | STUDIOS, DB, FP, NFF)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Blockdiagrammerstellung Gesamtfahrzeug aus Sicht Antriebsstrang
- Item Definition, HARA-Analyse, erstes funktionales Sicherheitskonzept

Auf Basis der Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete wurde ein erstes Konzept des Gesamtsystems für Soft- und Hardware definiert. Dieser Schritt ist entscheidend, da hier die Schnittstellen und Aufgabenpartitionierungen zwischen den Funktionsverantwortlichen von Gesamtfahrzeug, Autonomer Steuerung, Middleware und Antrieb definiert werden.

In dieser Konzeptphase entstand bereits eine Grobarchitektur mit allen relevanten Komponenten des Antriebssystems, die Funktionspartitionierung und die Aufgabenverteilung unter den Projektpartnern im Teilpaket 4 sowie eine detailliertere Definition der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete. Aus Sicht funktionaler Sicherheit entstand ein erstes Konzept mit HARA-Analyse und Item-Definition

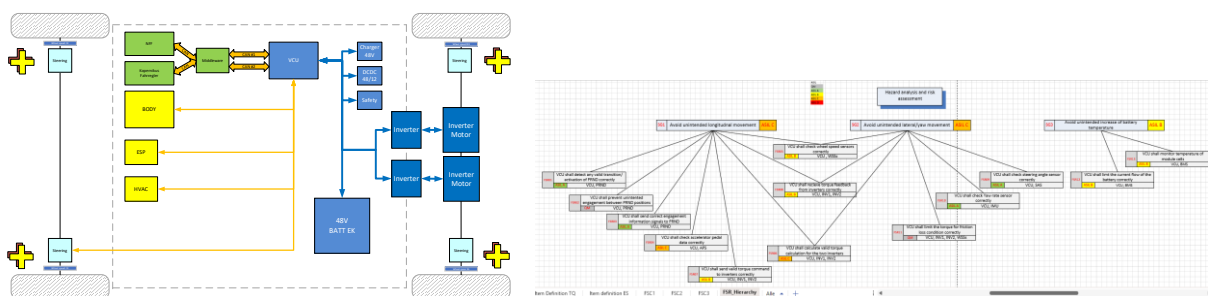


Abb. 1: Grobarchitektur der Hauptkomponenten des Antriebsstrangs + erstes FuSi-Konzept

TP04 Zulassungsfähige und redundante 48V Antriebseinheit / Skateboard Entwicklung (ElringKlinger EK)

Das Teilpaket 4 verfolgte das Ziel, einen vollständig funktionsfähigen elektrischen 48-V-Antriebsstrang für das automatisierte Shuttle zu entwickeln. Kernaufgaben des elektrischen Gesamtsystems ist es, die Antriebs- als auch die Bordnetzenergie bereitzustellen, die Befehle der autonomen Fahrsteuerung in konkrete sichere Fahrmanöver umsetzen, die sicherheitsrelevanten Funktionen wie Lenkung und Bremse steuern und überwachen sowie das Laden der Traktionsbatterie ermöglichen. Die Sicherheitsfunktionen wurden nach dem Standard ISO26262 entwickelt und abgesichert.

Zu den zentralen Komponenten des Systems gehören die Traktionsbatterie, die Antriebsmotoren, ein zentrales Steuergerät für die Antriebsregelung und als Middleware für die autonome Steuerung, ein weiteres Steuergerät zur Bedienung der Fahrzeugfunktionen wie Wischer, Türen und Anzeige sowie ein internes und ein externes 48-V-Hochleistungs-ladegerät. Ergänzend dazu wurde ein elektrisches Kabelbaum-System entwickelt und integriert, das die Energie- und Signalverteilung für Bordnetz und Antrieb sicherstellt.

Die Aufgaben innerhalb des Teilprojekts 4 gliederten sich in zwei Bereiche: ElringKlinger übernahm die Entwicklung der Traktionsbatterie, während FP-Fahrzeugtechnik für die Funktionen des Antriebs- und Bordnetzsystems verantwortlich war. Das Teilprojekt orientierte sich dabei durchgängig an den Entwicklungsprozessen des ASPICE-V-Modells.

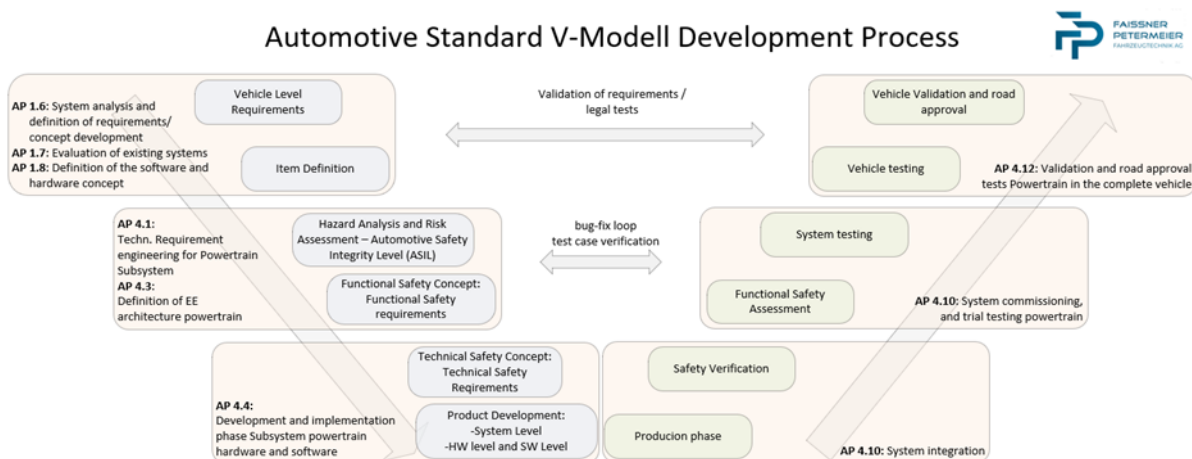


Abb.1: Entwicklungsprozess nach ASPICE V-Modell

AP 4.1 Anforderungserhebung und Konzeptentwicklung des Skateboards gemäß den Anforderungen (ElringKlinger EK, UE | STUDIOS, FP)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Anforderungen ableiten und Antriebsstrang-Spezifikation erstellen
- Sicherheitsanforderungen bewerten und HARA für Antrieb erstellen
- Test- und Validierungsplan zur Reifegradabsicherung entwickeln
- Redundanzkonzept für komplette Skateboard-Plattform erarbeiten
- Hardware recherchieren und mit Lieferanten abstimmen
- Komponentenpositionierung im Fahrzeug mittels CATIA V5 unterstützen

Die Aufgabe der FP-Fahrzeugtechnik in AP 4.1 bestand darin, die Gesamtfahrzeuganforderungen aus AP1.4. - AP 1.6. in technische Konzepte zu überführen, basierend auf den definierten Spezifikationen. Dazu gehörte der Entwurf einer Bordnetzarchitektur sowie die Definition der erforderlichen Komponenten. Alle Ergebnisse dieser Phase wurden im Dokument „SUE Kickoff TP4_v2“ zusammengefasst.

Haupterkennnis war, dass der Antriebsstrang mit zwei statt einem Motor aufgebaut werden sollte, da die hohe Zielleistung von 50kW mit 48V-Systemen zu hohe Ströme von bis zu 1500A zur Folge hätten. Das ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, da dann Kabelquerschnitte zu groß und nicht integrierbar und die Verluste durch Wärmeentwicklung zu hoch wären. Auch sind 48V-Motoren meist nur bis 30kW am Markt erhältlich. Auch steigen die EMV-Abstrahlungen exponentiell mit den Strömen, was uns Probleme im Zulassungsprozess bereitet hätte. Da unser gestecktes Projektziel eine 48V Architektur bleiben sollte, wurde entschieden, zwei Motoren einzusetzen, um die Leistung je Motor und damit die Ströme aufzuteilen. In einem vorangegangenen Projekt zwischen FP und EK kam ein von hofer/EK entwickeltes Torquevectoring (TV-) Getriebe zum Einsatz, das auf einer Achse den Betrieb von zwei Motoren ermöglicht, bei dem zudem jeder Motor unabhängig ein Rad antreiben kann. Das ermöglichte uns zudem im späteren Projektverlauf den Einsatz einer speziellen Motor-Momentenregelung, um den Wendekreis des Fahrzeugs zu optimieren. Mit diesem Getriebe konnten wir jetzt aus einem breiteren Spektrum an Traktionsmotoren auswählen.

Mit dieser Erkenntnis führte FP einen Benchmark potenzieller Antriebslieferanten durch. Dabei wurden Kriterien wie Kosten, Leistung, Performance, technischer Reifegrad, Integrationsaufwand und Lieferfähigkeit bewertet. Angefragt wurden die Hersteller VALEO, Mahle, Benevelli und Molabo. Mit allen Anbietern gab es mehrere technische Abstimmungsrunden. Die Ergebnisse und Bewertungen der Antriebe wurden im Dokument „Electric_Drive_Dimensioning_SUE“ dokumentiert.

Die erste Auswahl fiel auf den Antrieb von Benevelli, da wir für 48V-Antriebe die Kombination Benevelli-Motor und Curtis-Motorsteuerung schon in anderen Projekten mit Uedelhoven positive Erfahrungen gesammelt haben und dadurch auf Vorkenntnisse zurückgreifen konnten.

Für erste Implementierungen und Tests wurde ein Teilsystemplatz bei FP aufgebaut, an dem wir bereits das Zusammenspiel der VCU mit allen relevanten Komponenten wie Curtis-Controller, Ladegerät, DCDC Wandler und Peripherie programmieren und testen konnten (siehe AP4.3).

Configuration	Speed Requirement	Torque Requirement	Power Requirement
Karmagetriebe mit Benevelli an der Hinterachse (insgesamt 2 Motoren)	Max 60km/h	static torque at hill	
Karmagetriebe mit Benevelli an der Hinter- und Vorderachse (insgesamt 4 Motoren)	Max 60km/h		Power at Slope not enough
Valeo Motor Vorne und Hinten (2 Motoren)		far away	far away
Valeo Motor Hinten (1 Motor)		Torque too less for slope	Slope Speed max 30
Karmagetriebe mit Heinzmann (BMS 150) Motoren (insgesamt 4 Motoren)			
Mahle ?			
Benevelli SMAC 200-210 mit Diff Getriebe	Max 50km/h		Max 50km/h
2 SMAC105 an Karmagetriebe Hinterachse	max 50 kmh	20kmh 10% Steigung	
2 SMAC105 an Karmagetriebe Hinterachse (vmax drehzahlbegrenzt durch Motor)	max 60 kmh	30kmh 25% Steigung	
Molabo mit Karmagetriebe Hinterachse (vmax drehzahlbegrenzt durch Motor)	max 70 kmh	40kmh 25% Steigung	

Abb.2: Benchmark der verschiedenen Antriebe

Folgende Setups kamen in die engere Auswahl:

- Benevelli SMAC 210 jeweils auf Vorder- und Hinterachse hätte alle Parameter erfüllt, erfordert aber Bauraum in Vorder- und Hinterachse
- 2x SMAC210 mit TV-Getriebe Hinterachse passt nicht in Bauraum (210 zu breit)

- 2x SMAC157 mit TV-Getriebe passt in Bauraum erfüllt aber nicht die Zielparameter.
 - o Steigungsfahrt max 12%
 - o Leistung $v_{max} = 42\text{kmh}$

Da der Zielparameter 50km/h mit dem Setup nicht erreicht werden konnte und es zu großen Lieferverzögerungen kam, wurde das Setup TV-Getriebe mit MOLABO Motoren geprüft. Da mit Molabo alle Zielparameter erreicht werden konnten, fiel die Entscheidung für den Antriebslieferanten auf MOLABO.

Auch für die anderen Komponenten wie DCDC Wandler, Ladegerät, Pumpen Kabelbaum wurden vergleichbare Benchmarks durchgeführt. Die Auswahl basierte teilweise auch auf den Ergebnissen der Tests am Teilsystemplatz (AP4.3).

AP 4.2 Definition EE-Architektur Antriebsstrang (FP, ElringKlinger EK, UE | STUDIOS)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Erstellung der elektrischen Dokumentation
- Auslegung und elektrische Sicherheit des Bordnetzes
- Kommunikations- und Architekturdefinition
- Virtuelle Integration ins Fahrzeug mittels Zuken → später EPLAN
- BOM / Materialmanagement und Beschaffung

Die zentrale Aufgabe des AP 4.2 bestand darin, das elektrische System auf Grundlage des in AP 4.1 definierten Konzepts sowie der dort ausgewählten Komponenten weiterzuentwickeln. Der Fokus lag dabei auf zwei Ebenen: dem 12-V-Bordnetz inklusive aller Signalpfade sowie dem 48-V-Hochleistungsstromkreis für den Traktionsantrieb.

Da das Projektziel vorsah, für den Antriebsstrang eine Schutzkleinspannung unter 60 V DC einzusetzen und gleichzeitig eine Antriebsleistung von 50 kW zu realisieren, musste der Traktionsstromkreis für Ströme bis zu 1500 A ausgelegt werden. Dies stellte sowohl für die Traktionsbatterie als auch für Stromverteiler, Sicherungskonzept und Leitungen eine besondere technische Herausforderung dar. Die Dimensionierung der Leitungsquerschnitte erfolgte daher einerseits rechnerisch, andererseits durch praktische Tests am Teilsystemprüfplatz bei FP-Fahrzeugtechnik. Besonderes Augenmerk lag auf der Abschirmung der Stromleitungen und Komponenten des Traktionsstranges. Hier wurden geschirmte Leitungen aus dem Hochvolt-Fahrzeugbau eingesetzt und Stromverteiler in strahlungsgeschirmten Gehäusen untergebracht.

Infolge der hohen Ströme und damit großen Querschnitte und Biegeradien war eine geometrische Integration sehr herausfordernd. Gemeinsam mit den Konstrukteuren von FP und UE mussten Wege und Alternativen gefunden werden, um die Leitungen im Fahrzeug zu verlegen.

Auch Sicherungen und Schutzschalter mußten entsprechend ausgelegt und integriert werden. Dabei war unsere Erfahrung aus vorangegangenen Projekten im Hochvoltbereich sehr von Nutzen.

Im Rahmen von AP 4.2 wurden darüber hinaus die Schaltpläne und Pinning-Listen in EPLAN erstellt, sicherheitsrelevante Funktionen wie der Interlock-Kreis sowie EMV-Maßnahmen implementiert und eine vollständige Stückliste (BOM) aller eingesetzten und zu beschaffenden Komponenten erarbeitet.

Mit Hilfe von EPLAN konnte die gesamte elektrische Bordnetzarchitektur am Rechner im CAD Modell des Fahrzeugs vorintegriert werden. Das ermöglichte uns, in einer frühen Phase bereits mit den Konstrukteuren von UE geometrische Anforderungen an die Karosserie definieren und

Anpassungen einfließen lassen. Mit der virtuellen Integration und Build-to-Print Entwicklung war es uns möglich, den Kabelbaum mit minimalem Zugangszeitfenster zum Fahrzeug vorzufertigen und in das Fahrzeug zu integrieren. Das sparte dem Projekt viel Zeit, da dadurch parallele Arbeiten durch verschiedene Projektpartner möglich waren.

EPLAN ermöglicht auch eine virtuelle Integration von Komponenten und die Erstellung einer detaillierten Teileliste bis zum einzelnen Pin eines Steckers. Neben einem reibungslosen Beschaffungsprozess entsteht damit auch eine saubere Dokumentation zur späteren Fehlersuche und Systemanalyse.

Zum Quartalstreffen Q3/2022 konnte bereits das EE Architekturkonzept und die Funktionspartitionierung vorgestellt werden.

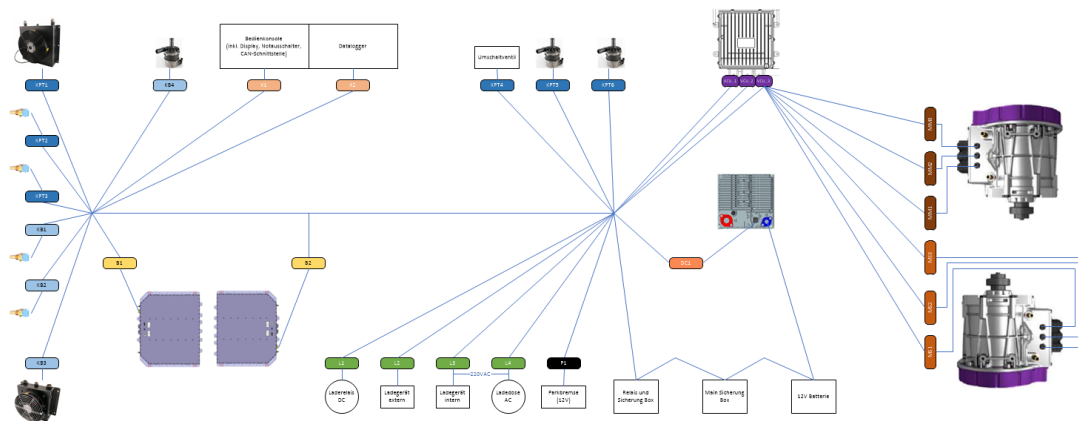


Abb.3: Funktionspartitionierung/Architekturkonzept EE

AP 4.3 Entwicklungsphase Subsystem Antriebsstrang Hard- und Software (FP, ElringKlinger EK)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Implementierung aller Antriebsstrang-Funktionen
- Softwareentwicklung für funktionale Sicherheit
- HIL-basierte Funktionsabsicherung
- Entwicklung des logischen und physischen 12V Bordnetzes und 48V-Systems

Innerhalb des AP 4.3 wurden Hard- und Software auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete entwickelt und zur Funktionsreife gebracht.

Hardwareseitig wurden die Motoren mit dem Getriebelock verheiratet. Dafür konstruierte und fertigte FP Adapterplatten mit integrierten Aufnahmen für Schwingungsdämpferbuchsen, in enger Abstimmung mit Uedelhoven, die die fahrzeugseitigen Antriebsaufnahmen verantworteten. Die erste Antriebsgeneration nutzte speziell durch FP Partner erodierte Wellenkupplungen, was eine sehr massive Adapterkonstruktion erforderte. In der zweiten Generation konnte die Rotorwelle direkt innenverzahnt werden, wodurch eine deutlich kompaktere und leichtere Ausführung des Gesamtantriebs erreicht wurde. Die Einsparung in der Breite betrug 150mm.

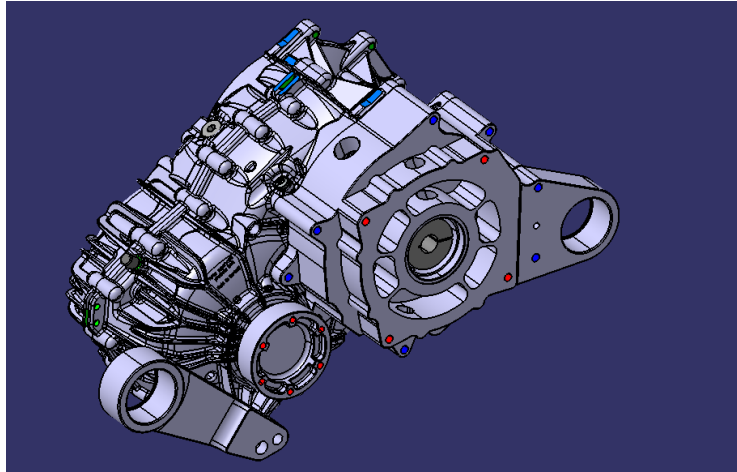


Abb.4: Adapterplatte MOLABO-Motor zu Getriebe am V1

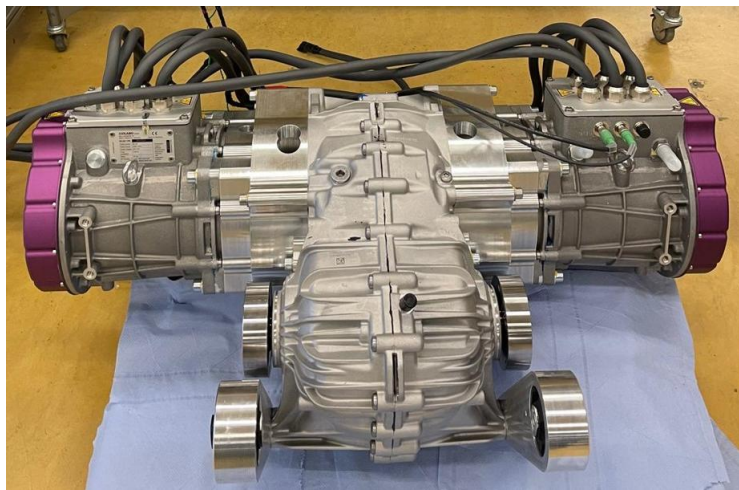


Abb.5: Antriebseinheit des Prototyp V1



Abb.6: Antriebseinheit des Prototyp V2 – schmalere Flanschplatten

Da das 48V-Ladegerät eine sehr hohe Abwärme aufgrund der hohen Leistung erzeugte, musste ein System zur Flüssigkeitskühlung entwickelt und umgesetzt werden. Dazu wurde von FP eine spezielle Kühlplatte konstruiert. Durch dieses Konzept konnte der Onboard-Charger eine Dauerladeleistung von 6kW erreichen.

Im weiteren Projektverlauf kamen die Fahrzeugprototypen V1 und V2 zum Einsatz, mit denen die Systemintegration sowie die finale Funktionsentwicklung und Fehlerbehebung fortgeführt wurden, um den Reifegrad des Gesamtsystems weiter zu steigern.



Abb.9: Präsentation des TSP im Rahmen des Quartalstreffens Q1/23 bei FP

AP 4.9 Systemintegration, Inbetriebnahme und Erprobungstests Antriebsstrang (FP, ElringKlinger EK)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Integration und Erstinbetriebnahme des Antriebsstrangs
- Fehlerrückführung und iterative Optimierung nach V-Modell
- Systemintegration zu vollständigen Gesamtsystem für einen fahrfähigen Prototypen
- Applikation, Funktionsabstimmung und Tests auf Gesamtfahrzeugebene
- Gemeinsame Absicherung und Fehleranalyse im Projektteam
- Nachweis der Funktionsfähigkeit durch Prüfstands- und Fahrttests

Das Hauptziel des AP 4.9 bestand darin, die zuvor entwickelten Hard- und Softwareumfänge in die beiden Prototypen V1 und V2 zu integrieren und umfangreiche Tests zur realitätsnahen Absicherung der Funktionen und Komponenten durchzuführen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen kontinuierlich in die Weiterentwicklung innerhalb des AP 4.3 zurück (siehe V-Modell und iterativer Entwicklungsprozess).

Erstmals konnte in diesem Rahmen der vollständige Systemverbund unter Einbeziehung der Traktionsbatterie erprobt werden. Dies ermöglichte die Kalibrierung der fahrdynamischen Funktionen, insbesondere des Torque-Vectoring-Systems. Durch das spezielle Split-Getriebe lassen sich das linke und rechte Rad individuell ansteuern, wodurch der Wendekreis des Fahrzeugs deutlich reduziert werden konnte. Die Erprobungen fanden auf der abgesperrten Carisma-Teststrecke in Ingolstadt statt. Dort erreichte der Prototyp V1 eine Geschwindigkeit von 25 km/h, während mit dem V2 Geschwindigkeiten bis 50 km/h realisiert wurden.



Abb.10: Testfahrt mit dem V1 auf der CARISMA Teststrecke

Die intensive Testphase lieferte wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung der Stromregelung sowie zur Reduzierung der Buslast, die anschließend in die Systemverbesserung einfließen. Besonders hilfreich war dabei die Möglichkeit, dass die FP-Entwickler per Fernzugriff die VCU sowie den MOLABO-Antrieb programmieren und kalibrieren konnten, selbst während sich das Fahrzeug bei NFF in Braunschweig auf der Teststrecke befand. Dadurch konnten Ausfall- und Transferzeiten erheblich reduziert werden.

Nach dem Ausfall eines Projektpartners übernahm FP zusätzlich die Implementierung und Absicherung der Middleware-Funktionen zwischen dem ADS (Autonomous Drive System) und den Funktionsblöcken Bremse, Lenkung und Antrieb. Mit dem Prototyp V2 konnte schließlich ein Feintuning des Antriebsverhaltens vorgenommen, die Endgeschwindigkeit von 50 km/h dargestellt und erstmals die Comfort-VCU zur Steuerung peripherer Fahrzeugfunktionen wie Wischer, Türen und Soundgenerator integriert werden.

AP 4.11 Validierung und Straßenzulassungstests Antriebsstrang im Gesamtfahrzeug (FP, ElringKlinger EK, UE | STUDIOS)

Ziele nach Vorhabensbeschreibung:

- Auswertung aller bisherigen Tests und Homologationsvorbereitung
- Planung, Vorbereitung und Durchführung der Zulassungstests
- Fehlerbehebung und technische Weiterentwicklung
- Sicherstellung der Anforderungen für die Einzelzulassung

Im Rahmen des AP 4.11 arbeitete FP-Fahrzeugtechnik eng mit den Kolleginnen und Kollegen des TÜV zusammen, um die erforderlichen Tests und Nachweise für die Straßenzulassung des SUE zu erbringen. Auf dem CARISMA-Testgelände wurden dazu verschiedene dynamische Prüfungen durchgeführt, darunter Beschleunigungs- und Bremswegmessungen, das Verhalten bei Notbremsungen, die Funktionsprüfung des Geräuschgenerators sowie der sicherheitskritische Nachweis, dass ADS-Steuerbefehle jederzeit durch einen manuellen Eingriff des Operators überschrieben werden können. Die Prüfungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit erfolgten bei der CSA Group Bayern GmbH in Plattling und wurden vor Ort durch FP begleitet.

Neben den praktischen Validierungsaktivitäten nahm auch die funktionale Sicherheit einen wesentlichen Stellenwert ein. Hier umfasste der Arbeitsanteil insbesondere die Dokumentation und das Review gemäß ISO 26262, einschließlich Sicherheitskonzept, Anforderungsdefinition, Item Definition und HARA.

- Safety_Manual_SUE_v1.2
- SUE_manual_v1.4
- Operating_Manual_v2
- FP Middleware Functions_v1.0
- Charging_Manual_v1

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten stellten – wie projekttypisch – den größten Kostenblock dar.

Aufgrund der technischen Weiterentwicklung gab es eine Budgetverschiebung von Fremdleistungen (823) nach Material (813), insbesondere verursacht durch die Umstellung des ursprünglichen Motor-/Inverter-Konzepts von Benevelli/Curtis nach Molabo sowie die Beschaffung zusätzlicher Komponenten wie Getriebe und 12-V-DC/DC-Wandlers.

Trotz dieser Umstrukturierungen wurde das Gesamtbudget vollständig eingehalten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele zwingend erforderlich. Die Tätigkeiten entsprachen den im Automobilbereich etablierten Entwicklungs- und Sicherheitsprozessen. Die Projektpartner arbeiteten ressourceneffizient und eng abgestimmt, sodass die Entwicklungszeiten optimal genutzt werden konnten.

Ein besonderer Anteil des Projektaufwands entfiel auf:

- die Entwicklung und Absicherung der funktionalen Sicherheit,
- die virtuelle Entwicklung des elektrischen Systems (Parallelisierung mit Fahrzeugaufbau),
- die intensive Software-Weiterentwicklung, auch remote und standortübergreifend.

Die Möglichkeit des Fernzugriffs auf das vernetzte Bordnetz stellte einen wesentlichen Effizienzgewinn dar, da die Partner parallel am realen Fahrzeug und an den virtuellen Entwicklungsumgebungen arbeiten konnten. Diese Arbeitsweise war notwendig und angemessen, um den hohen Innovationsgrad eines autonomen 48-V-Antriebsstrangs sicherzustellen.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts SUE schaffen die Grundlage für eine Weiterentwicklung in Richtung Serienfertigung eines urbanen autonomen E-Shuttle-Fahrzeugs. Aufgrund des hohen Reifegrads des demonstrierten Prototyps ist eine schnelle Überführung in marktreife Produkte möglich.

Die Projektresultate bieten für FP folgende Verwertungsperspektiven:

- Übernahme von Software- und Systemarchitekturkonzepten in zukünftige Entwicklungsprogramme

- Stärkung der Marktposition von FP als System-Integrator und Entwickler von E-Fahrzeugen und 48-V-Antrieben
- Know-how-Transfer in weitere Kundenprojekte, insbesondere in den Bereichen Energiemanagement, funktionale Sicherheit und Torque-Vectoring

2.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während des Projektzeitraums wurden weitere People-Mover-Projekte identifiziert, die jedoch überwiegend mit Spannungen oberhalb von 60 VDC arbeiten. Solche Hochvolt-Systeme erfordern aufwendigere Sicherheitskonzepte und verursachen höhere Entwicklungs- und Betriebskosten. Zudem verwenden einige dieser Projekte kostenintensive Sensorik für die Objekterkennung, was sie bezüglich Wirtschaftlichkeit und späterer Serienfähigkeit weniger attraktiv macht.

Der Ansatz von SUE – niedrige Spannung, hohe Sicherheit, kosteneffiziente Architektur – bleibt daher ein eigenständiger, innovativer Weg.

2.6 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurden seitens FP keine Veröffentlichungen erstellt.