

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

14/04/2023

Projekttitle: Emissionsreduzierendes CVT- Getriebe mit elektrischem Variator für Nutzfahrzeuge

Projektnummer: 876516

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	05. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/07/2019
Projektende	31/12/2022
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	42 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH
AnsprechpartnerIn	Dipl.-Ing. Simon Frank, IWE
Postadresse	Lamprechtshausener Straße 61, 5282 Ranshofen/Braunau
Telefon	+43 664 8251062
Fax	+43 (0)50550-6952
E-mail	simon.frank@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at

Emissionsreduzierendes CVT-Getriebe mit elektrischem Variator für Nutzfahrzeuge

eCVT

AutorInnen:

Simon Frank, Lukas Kiessling, Scheuermann Peter, Franz Fuka, Naglstrasser Markus, Popp Hartmut

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung und Ergebnisse	7
3.1	Spezifikationen und Einsatzszenarien	7
3.1.1	Start Versuchsfahrten in diversen Betriebsmodi (Boki)	7
3.1.2	Erstellung eines Einsatzprofils und Vergleich baugleicher Fahrzeuge	9
3.2	Vorkonzeptionierung eines eCVT-Getriebes (Getrieblayout)	10
3.3	Entwicklung der elektrischen Antriebskomponenten	12
3.3.1	Gehäusekonzepte	13
3.3.2	SiC-Inverter	17
3.3.3	Radialflussmaschine/Axialflussmaschine	24
3.3.4	Batteriepaket	24
3.3.5	Kühlsystem der E-Maschine, Inverter, Batterie und Getriebe	26
3.3.6	Gesamtpackaging	26
3.4	Zusammenbau der Antriebskomponenten	26
3.4.1	Dualmotor-Einheit	26
3.4.2	Stator und Rotor der RFM/AFM	28
3.5	Steuerung von Fahrzeugantrieb und Nebenantriebe	29
3.5.1	Steuerungssoftware des Antriebssystems auf dem Prüfstand	29
3.5.2	Steuerungssoftware des Antriebssystems im Prototypenfahrzeug	30
3.6	Erprobung des eCVT-Antriebsstranges auf dem Prüfstand	30
3.6.1	Initiale Maschinenvermessung	30
3.6.2	Funktionstests am Prüfstand	31
3.6.3	Lasterprobung am Prüfstand	32
3.6.4	Resümee der Funktionstests am Prüfstand	33
3.7	Integration in das Versuchsfahrzeug	33
4	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	34
4.1	Erprobung, Bewertung und Verwertung	34
4.1.1	Vergleichsfahrten zum direkten Getriebevergleich	34
4.1.2	Verwertungsstrategie	37
4.1.3	Publikationen	37
4.1.4	Presseaussendungen	37
5	Kontaktdaten	38

2 Einleitung

Durch immer strengere Gesetzgebungen der Schadstoff- und Lärmemissionen moderner Fahrzeuge ist nicht nur der Individualverkehr betroffen, sondern auch die aktuellen Lösungen im Bereich der Kommunal- und Einsatzfahrzeuge. Zur Unterstützung der klassischen Verbrennungskraftmaschine (VKM) beim Beschleunigen oder für den Betrieb zusätzlicher Geräte hat sich in den letzten Jahren vor allem im Bereich landwirtschaftlich genutzter Fahrzeuge bereits ein hydrostatisches Hybrid-System etabliert.

Dieses hydrostatisch-mechanische Hybrid-System, das zu der Gruppe der leistungsverzweigten Hybride zählt, ist in der Lage mit der hydraulischen Einheit den Antrieb zu unterstützen, alleinig für Vortrieb zu sorgen und kann eben auch für den Betrieb der Zusatzgeräte eines typischen Kommunalfahrzeugs (z.B. Rasenmäher-Modul) herangezogen werden. Durch ein CVT-Getriebe (Continuously variable transmission) kann die Drehzahl der VKM unabhängig von der Drehzahl der hydraulischen Einheit gewählt werden, während ein Planetenradsatz für die Kopplung der zwei Leistungspfade zuständig ist.

Ein Problem dieses Hybridsystems ist jedoch die Effizienz bzw. die ökologische Bilanz. Während die Funktionalität bereits sehr gut und erwiesen ist, kann die VKM für den Betrieb der Zusatzmodule nicht in dem eigentlich besten Betriebspunkt verweilen. Dies hat zur Folge, dass trotz sehr geringer Fahrzeuggeschwindigkeiten die VKM unter Vollast läuft und somit sehr hohe Schadstoff- und Schallemissionen ausstößt.

Daher soll in diesem Vorhaben ein Ersatz der hydrostatischen Einheit aus einem bestehenden Getriebe durch elektrische Maschinen untersucht werden. Um die Effizienz dieser fortan elektrischen eCVT-Einheit weiter zu steigern, sollen für den elektrischen Generator (zur Speisung einer im Fahrzeug verbauten Batterie) und für die Elektromotor- und -generatoreinheiten (als Verstärkung der downsizing-VKM im Antriebsstrang bei Maximalleistungsanforderungen, sowie zur Rückgewinnung ansonsten verlorener Energien in Schubphasen des Fahrzeugs) innovative und kosteneffiziente elektrische Komponenten verbaut werden.

Die innovativen Komponenten müssen sich einem Funktionstest unterziehen und ihre Eignung ist durch Simulation der Lastfälle eines Referenzfahrzeugs abzusichern. Anschließend müssen diese Bauteile ausgewählt, beschaffen oder gebaut werden. Dabei muss für erste Funktionstests der zu entwickelnden Getriebeeinheit auch ein Gehäuse konstruiert und hergestellt werden, welches auch in der Lage ist die Kühlung der Komponenten zu gewährleisten. Alle einzelnen Komponenten der eCVT-Antriebseinheit werden spezifisch entwickelt, hergestellt, zusammgebaut und am Prüfstand und in einem Versuchsfahrzeug erprobt, um eine umfangreiche Bewertung von Hardware und komplexer Steuerung zu ermöglichen.

Stufenlosgetriebe mit hydrostatisch- mechanischer Leistungsverzweigung in Traktoren entsprechen heute dem Stand der Technik. In Anwendungen in Kommunalfahrzeugen, Handlingfahrzeugen, Forstmaschinen oder ähnlichen Einsatzbereichen sind sie nur vereinzelt zu finden. VDS hat mit dem VTP450 Getriebe ein CVT-System auf dieser Grundlage entwickelt. Für spezielle Geländefahrzeuge bietet VDS entsprechende Umbausätze an.

Durch die Verwendung eines elektrischen Variators anstatt des hydrostatischen und die Anpassung des mechanischen Getriebes und die Erweiterung durch einen elektrischen Speicher kann eine einzigartige

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Funktionalität erreicht werden. Im folgenden Bild (s. Abb. 1) ist das VTP450 Getriebe mit der vorgesehenen Position des elektrischen Variators und den an der Entwicklung des Variators und des integrierten Umrichters beteiligten Projektpartnern gezeigt.

Das im VTP (= Variable Twin Planet) System realisierte Übertragungsprinzip hat seine Funktionalität in mehreren Anwendungen mit hydrostatischen Variatoren bewiesen, bestehend aus einer variablen Kolbenpumpe, die mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist, und einem Hydromotor mit fester oder variabler Verdrängung. Durch die sehr spezifische Anordnung der Funktionseinheiten kann das Fahrzeug im reinen "Variator-Modus" bei niedrigen Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeiten und in zwei oder drei Überlagerungsbereichen in programmierten Betriebsmodi verwendet werden. In jedem Überlagerungsbereich gibt es spezifische Betriebszustände mit aktivem oder Blindleistungsfluss im Getriebesystem. In einigen Betriebspunkten muss der Variatormotor hohe Drehmomente bei sehr geringen Drehzahlen aufbringen, was sehr einzigartig ist und besondere Vorkehrungen für die Kühlung und eine entsprechende Steuerung erfordert, um übermäßig lange Betriebszeiten in diesen kritischen Bedingungen zu vermeiden.

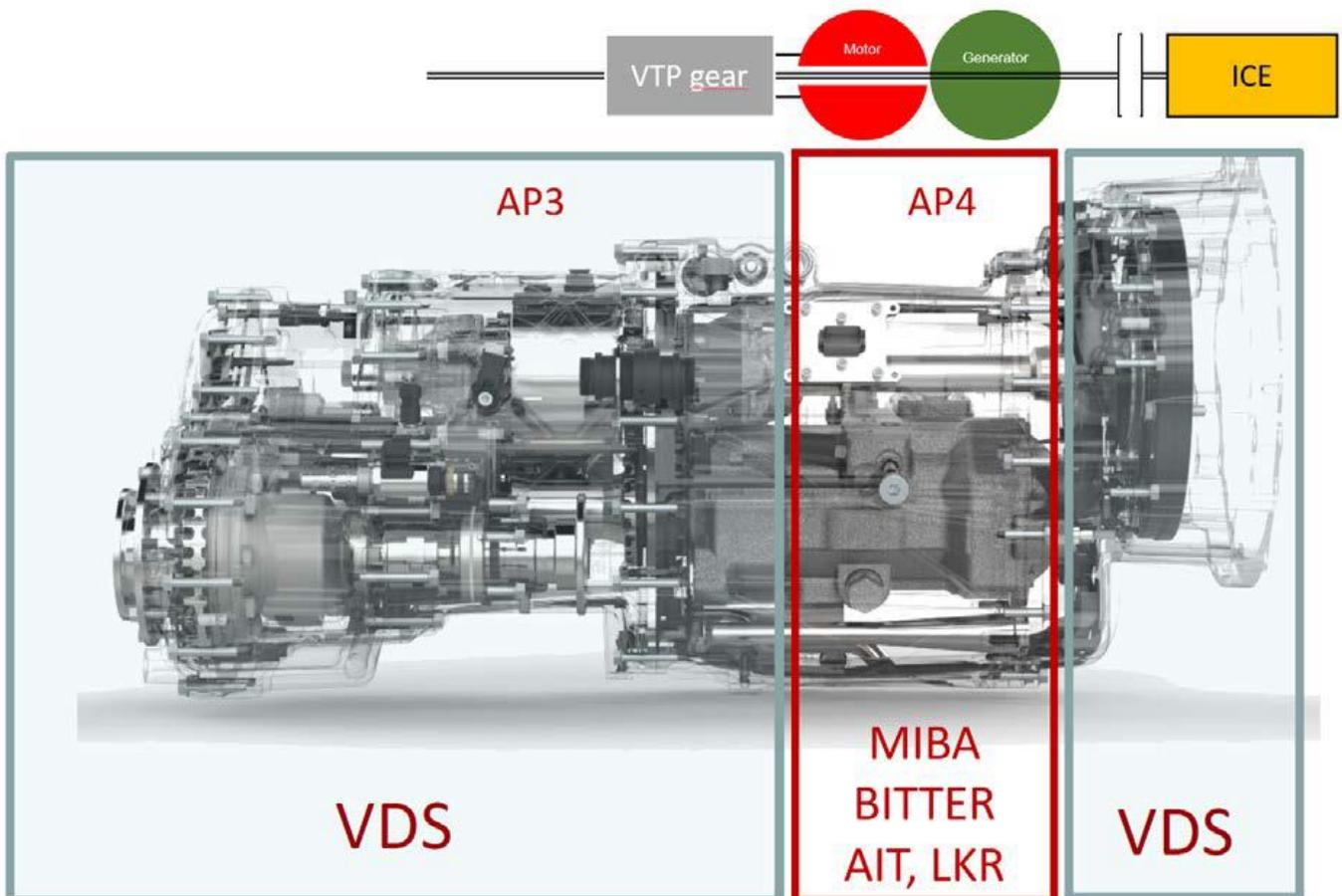


Abbildung 1 - Darstellung der geplanten Bauweise des eCVT-Getriebes mit zwei integrierten e-Motor/Generatoren (statt des konventionellen hydraulischen Variators) [Kollage: VDS, LKR] +AIT

Die zentrale Problemstellung umfasst die Entwicklung eines innovativen stufenlosen Antriebssystems für einen Geräteträger auf Grundlage eines hybriden Ansatzes. Das Fahrzeug muss folgende Eigenschaften aufweisen:

- keine Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit (bspw. darf die Zuladung durch den an Bord befindlichen Energieträger nicht signifikant geschmälert werden)
- die Nutzung des Fahrzeuges muss – ohne Unterbrechung – im 3-Schichtbetrieb möglich sein (d.h. keine Unterbrechung der Arbeitsaktivitäten durch Batterieladung)
- ein schadstofffreier bzw. schadstoffarmer und lärmreduzierter Betrieb muss möglich sein
- ein effizienter (d.h. energiesparender) Betrieb muss möglich sein
- Anbaugeräte müssen mit konstanter Drehzahl unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit betrieben werden können

3 Inhaltliche Darstellung und Ergebnisse

3.1 Spezifikationen und Einsatzszenarien

3.1.1 Start Versuchsfahrten in diversen Betriebsmodi (Boki)

Das Ziel ist die Durchführung einer genauen Kraftstoffverbrauchsmessung. Dabei müssen feste Rahmenbedingungen für den Messablauf festgelegt werden, um die Vergleichbarkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Ein praktikables Mess- und Auswertungsverfahren zur Ermittlung der relevanten Daten wurde entwickelt, zum Schluss wurden die Resultate validiert und das Messkonzept verifiziert. Die Strecke besteht aus einer Schleife (6,70 km) und der dazugehörige Hin- und Rückweg. Bei einer Testfahrt wird drei Mal um die Schleife gefahren und somit wird eine Distanz laut Google Maps von ungefähr 26 Kilometer zurückgelegt (s. Abb. 2, 3, 4).

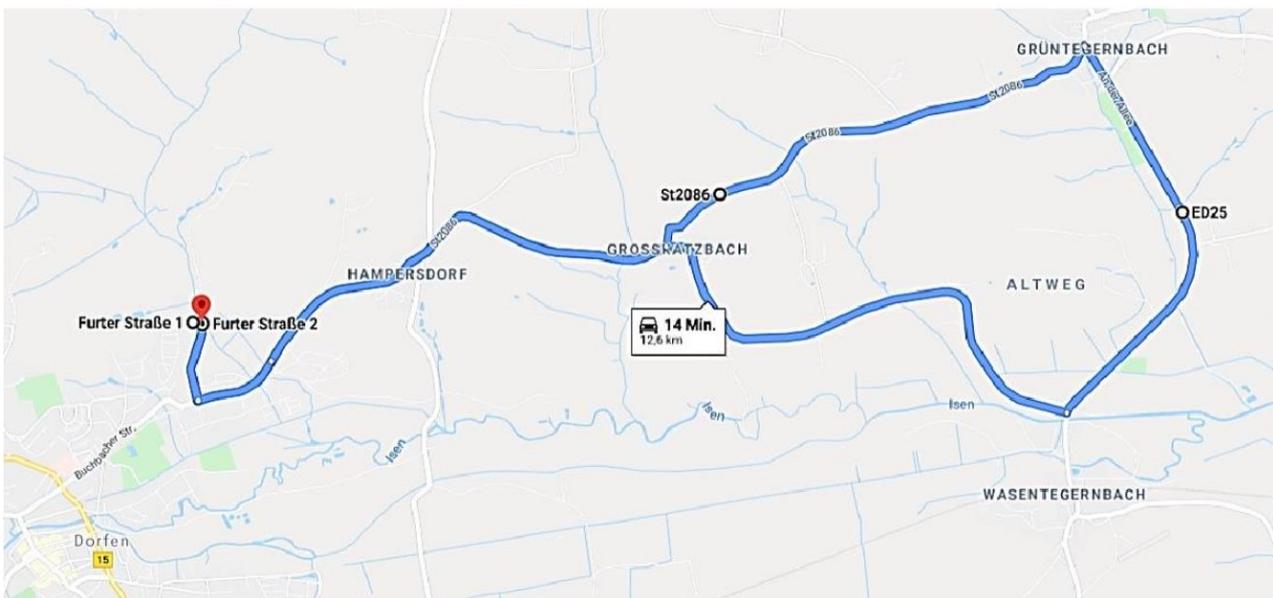


Abbildung 2 - Länge und Verlauf der Messstrecke. Quelle: Google Maps

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

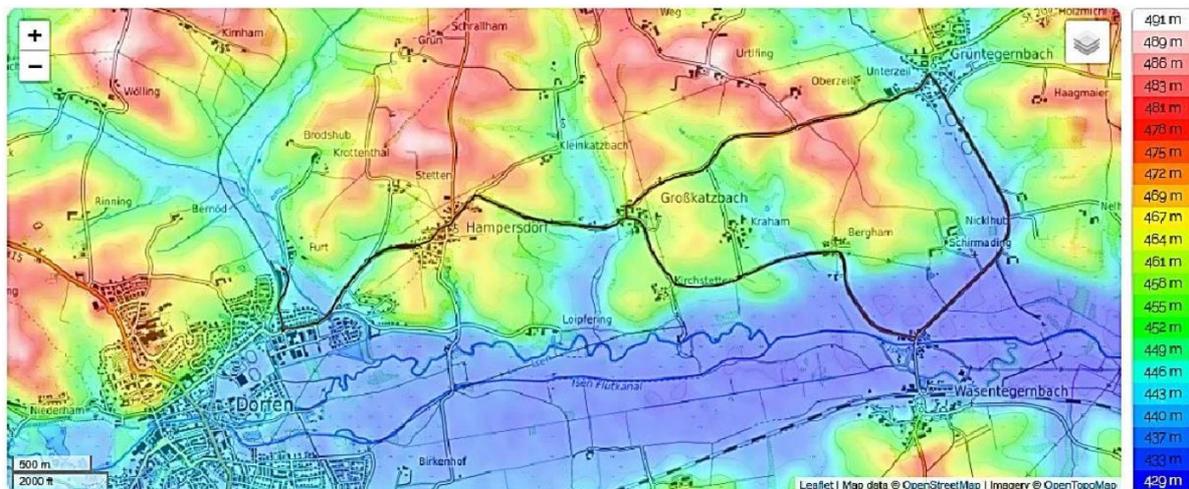


Abbildung 3 - Topografische Karte. Quelle: TopoMap



Abbildung 4 - Höhenprofil der Strecke. Quelle: Google Maps

	Alpha 1 H750	Alpha eCVT
Gemessenes Gewicht ohne Fahrer:	VA: 3355 kg / HA: 4169 kg	VA: 3077 kg / HA: 4482 kg
Kilometerstand vor der Messung:	2335 km	N/A
Kilometerstand nach der Messung:	2364 km	N/A
Außentemperatur:	10 °C	5-6 °C
Kontrollierter Reifendruck:	7,0 bar	7,0 bar
Fahrbahn:	trocken	Trocken
Fahrzeit:	35 min.	35 min.
Gemessener Verbrauch:	9,3 Liter	7,1 Liter
Durchschnittsgeschwindigkeit:	49,71 km/h	48 - 49,71 km/h
Verbrauch pro 100 km:	32,06 L/100km	25,36 - 24,5 L/100km

Abbildung 5 - Verbrauchsmessung beladen im Fahrmodus ECO Drive

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Obwohl die Genauigkeit des Messverfahrens unzureichend ist, lassen sich trotzdem Rückschlüsse ziehen, da sich die Messstörungen von beiden Messungen bei einem direkten Vergleich aufheben.

Der direkte Vergleich im ECO-Drive-Modus und mit unbeladenen Fahrzeug zeigt eine Kraftstoffersparnis von ca. 2,5 Liter auf 100km. Dieser Wert mag auf dem ersten Moment überraschen, aber es ist zu bedenken, dass das umgebaute Fahrzeug um knapp 500kg schwerer ist.

Bei der zweiten Messung ist eine deutlich höhere Kraftstoffersparnis zu beobachten. Bei annähernd gleicher Beladung sind Werte zwischen 6,70 und 7,56 Liter pro 100 Kilometer zu messen und das ist eine deutliche Ersparnis.

Das eCVT-Getriebe ist gegenüber dem reinen hydrostatischen Antriebsstrang deutlich energieeffizienter.

3.1.2 Erstellung eines Einsatzprofiles und Vergleich baugleicher Fahrzeuge

Das Einsatzprofil typischer Anwendungsfälle für das Fahrzeug wurde erstellt, wobei für jede Anwendung die typischen Geräte und Anwendungsarten definiert wurden (s. Abb. 6). Die einzelnen Arbeitseinsätze (Fahr- und Arbeitsgerätebetrieb) wurden aus einer Auswahl von mehreren repräsentativen Betriebsmodi ausgewählt.

Anwendung	Typische Geräte	Gesamtgewicht	Anwendungsart	Fahrtrieb				Geräteantrieb PTO
				0 - 10 km/h	11 - 20 km/h	21 - 40 km/h	41 - 70 km/h	
Transport	Kipper beladen	7,5 t	Beschleunigung	100 kW 5 s	100 kW 5 s	100 kW 10 s	100 kW 20 s	---
			Überlandfahrt	---	---	---	50 - 100 kW Dauer	---
			Bergfahrt	100 kW 30 s	100 kW Dauer	100 kW Dauer	---	---
			Talfahrt	- 50 kW 30 s	- 50 kW Dauer	- 50 kW Dauer	---	---
			Kippen	---	---	---	---	10 kW 30 s
Straßenreinigung	Kehrmaschine mit Saugkontainer	7,5 t	Kehrbetrieb	15 kW Dauer	---	---	---	85 kW Dauer
Mäharbeiten	Sichelmäher mit Saugkontainer	7,5 t	Mähbetrieb	15 kW Dauer	---	---	---	85 kW Dauer
Schneeräumung	Schneeschild und Splitstreuer	7,5 t	Räumung Parkplatz	50 kW 10 s Reversierbetrieb	50 kW 10 s Reversierbetrieb	---	---	30 kW Dauer
			Räumung Landstraße	60 kW 10 s	80 kW Dauer	80 kW Dauer	80 kW Dauer	30 kW Dauer

Abbildung 6 - Einsatzprofil typischer Anwendungen für den BOKI Alpha 750

Um eine Vergleichsbasis für die Erprobung nach dem Umbau mit dem eCVT-Antriebsstrang zu schaffen, wurden entsprechende Versuchsfahrten zur Funktionsbeurteilung, Leistungsmessung und Verbrauchsmessung durchgeführt und mit dem Einsatzprofil abgeglichen.

3.2 Vorkonzeptionierung eines eCVT-Getriebes (GetriebeLayout)

In diesem Projektabschnitt wurde das VTP450 Stufenlosgetriebe zu einem eCVT-System mit ergänzender Funktionalität als reiner Elektroantrieb sowie Hybridantrieb im Zusammenspiel mit dem Verbrennungskraftmotor erweitert. Die Ausarbeitung des GetriebeLayouts und eine Festlegung des Bauraums für das Getriebe und die Peripherie wurden durchgeführt. Auch wurden die vorhandenen Berechnungs- und Auslegungstools um die Funktionalität der elektrischen Variatoren erweitert. Zusätzlich wurden neue Modelle für die Simulation von Fahrzyklen erstellt. Das Getriebe ist in folgende Abschnitte gegliedert (s. Abb. 7):

1. VKM-Motorflansch-Gehäuse mit integriertem Dämpfer
2. Elektro-Antriebseinheit mit (generatorischer) Axialflussmaschine und Radialflussmaschine als Verstellmotor inklusive einer integrierten Trennkupplung zum Verbrennungskraftmotor und der Antriebs-Ritzelwelle des Verstellmotors als mechanische Verbindung zu den Sonnenritzelwellen des VTP-Planetenradsatzes.
3. Hydraulische Einheit für die System- und Schmierdruckversorgung des Getriebes
4. VTP450 Stufenlosgetriebe mit Bereichseinheit, VTP-Planetenradsatz, mechanischem Abtrieb und Differential (PTO)

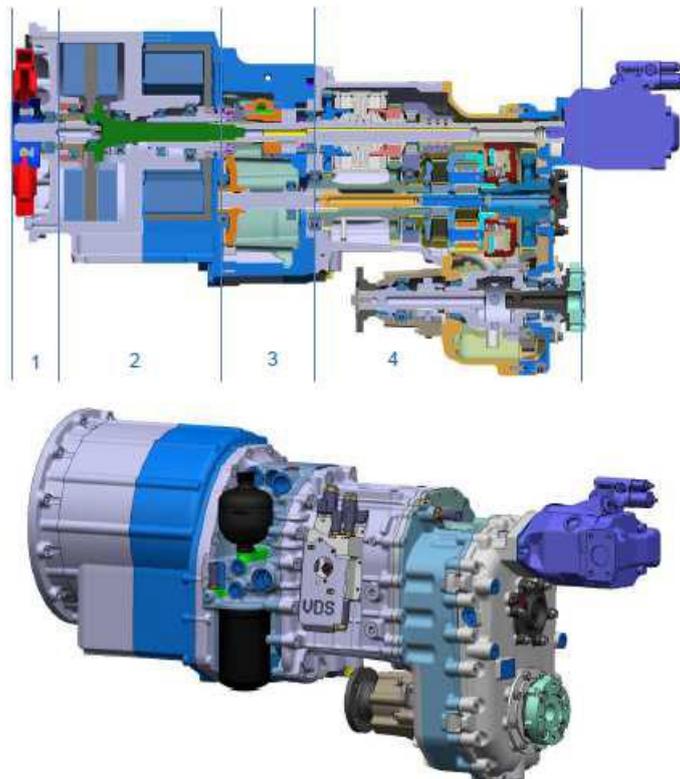


Abbildung 7 - GetriebeLayout

Das Fahrzeug ist ursprünglich mit einem einstufigen hydrostatischen Antrieb ausgestattet gewesen. Um die für das eCVT notwendige größere Baulänge zu ermöglichen, war eine Fahrzeugverlängerung (Radstand) von zumindest 260 mm erforderlich. Mittlerweile wurde eine Verlängerung um 300 mm vereinbart und fixiert, die auch an dem Prototyp-Fahrgestell von Reform umgesetzt wurde (s. Abb. 8).

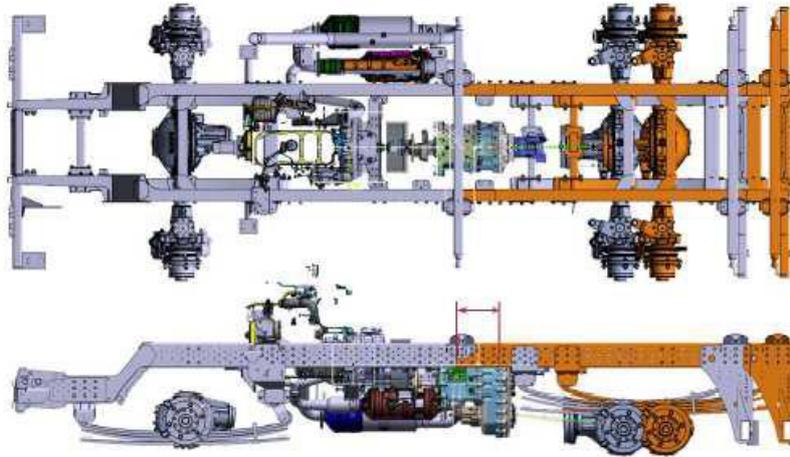


Abbildung 8 - Bauraum für Getriebe und Peripheri, Radstandsverlängerung um 300mm

Um die Auslegung der Elektroeinheiten abzusichern und die Performance des eCVT-Getriebesystems darstellen zu können, war eine Erweiterung der vorhandenen Simulationsmodelle und -tools erforderlich. Dazu wurden in folgenden Schritten die vorhandenen VTP-Modelle erweitert bzw. neue Tools erstellt und angewendet:

- Vollast-Modell: Erweiterung des bestehenden VTP-Berechnungsmodells zur Berechnung der Getriebepformance um einen elektrischen Variator anstelle einer hydrostatischen Verstelleinheit. Dieses Modell deckt „Normal Driving“ = Hybridbetrieb ohne Berücksichtigung der Batterie ab und dient zur grundsätzlichen Auslegung der erforderlichen Leistungsfähigkeit der Elektroeinheiten.
- Simulationsmodell für Fahrsimulation: Auf Basis des Vollast-Modells wurden Fahrsimulationen im Hybridbetrieb für das Anfahren in der Ebene und auf Steigungen für unterschiedliche Konstellationen der Elektro-Einheiten (Nennwerten oder maximal) sowie die Simulation des Fahrtriebes in den Fahrzyklen „Kehren“ (langsamer Arbeitsmodus) und „Transport“ (schnellere Überstellfahrt) durchgeführt.
- Neues Vollast-Modell für den rein elektrischen Betrieb BEV, um die Potentiale der Elektro-Einheiten für diesen Fall bestmöglich einsetzen zu können.
- Parallel zu der bei VDS laufenden Erweiterung der Berechnungs- und Auslegungstools wurde mit Ende 2019 eine Masterarbeit initiiert. Im Rahmen derer wurden Simulationsmodelle auf Basis MATLAB/Simulink für die Betriebsmodi Hybrid und BEV erstellt. Diese dienen zum Ver- und Abgleich bestehender Modelle, zur Auswertung relevanter Systemdaten sowie zur Ableitung notwendiger bzw. möglicher Regelstrategien in den unterschiedlichen Betriebsarten.

Neben der simulativen Vorkonzeptionierung wurden Detailzeichnungen aller Getriebekomponenten zur Beauftragung von Prototypen, Zusammenstellungszeichnungen, Stückliste, Fertigungszeichnungen sowie die Beschreibung der Montagefolge angefertigt (s. Abb. 9).

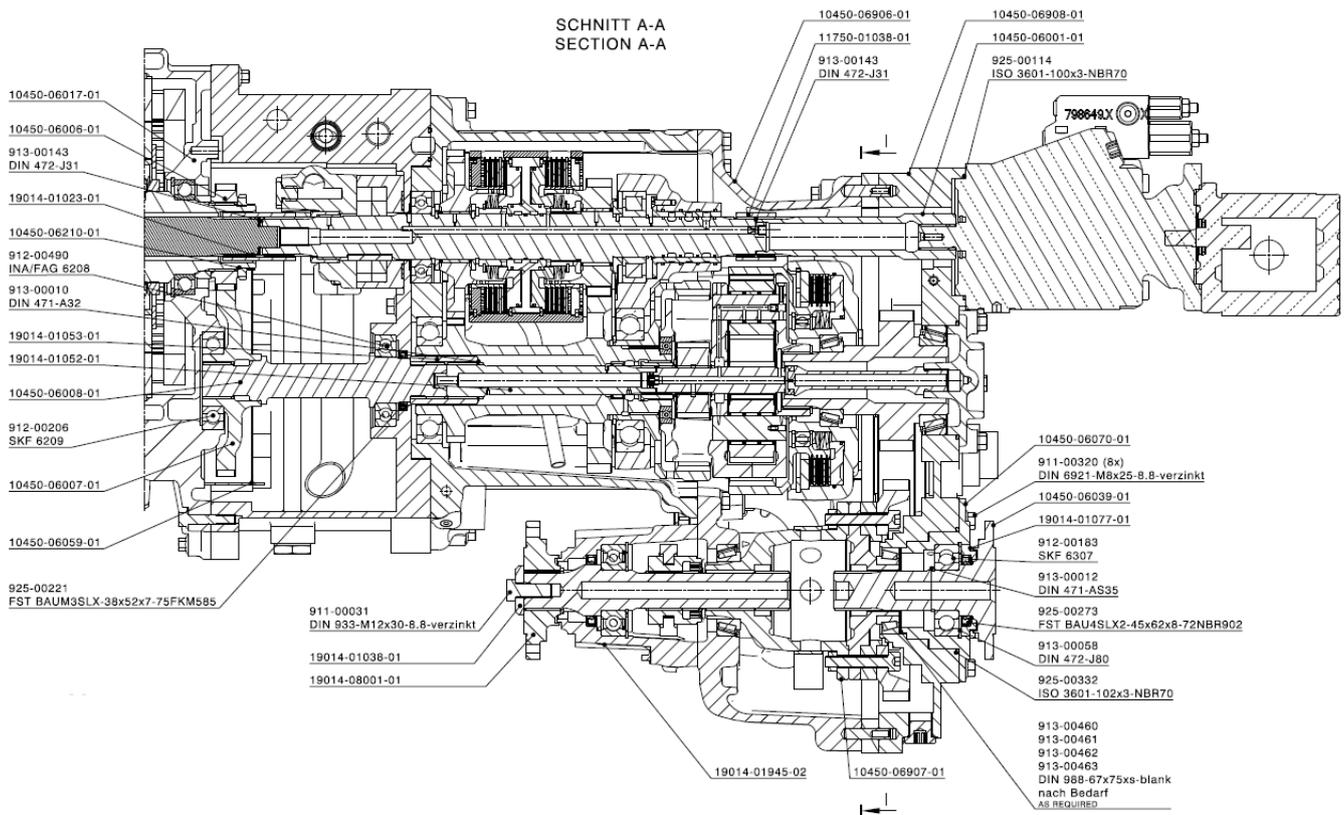


Abbildung 9 - Schnittbild eCVT-Getriebeeinheit mit Allrad-Abtrieb, PTO und externen Hydraulikpumpen

3.3 Entwicklung der elektrischen Antriebskomponenten

In diesem Projektabschnitt wurde eine hoch integrierte E-Antriebseinheit, welche für den Betrieb des CVT-Getriebes einen Motor und einen Generator in koaxialer Bauweise aufnimmt und somit das zentrale Bauteil zwischen Verbrennungskraftmaschine und CVT-Getriebe darstellt, entwickelt. Des Weiteren wurde eine Kühlung der Motoren, der Batterie, des Getriebes und der Inverter dimensioniert, konstruiert und aufgebaut. Die Konstruktion und der Aufbau der Batterie wurden ebenfalls in diesem Arbeitspaket abgeschlossen.

Basierend auf dem Konzept der Antriebseinheit wurde die Konstruktion in allen Bereichen weiter detailliert (s. Abb. 10). Dies inkludiert auch die finale Auslegung aller Maschinenelemente wie z.B. der Kugellager, Schraubverbindungen, Passfedern, etc. Eine besondere Herausforderung hierbei war das Finden und Integrieren passender Encoder. Durch die koaxiale Anordnung der beiden Antriebsmaschinen und die dadurch notwendige Verwendung von Hohlwellen entstehen sehr große Wellendurchmesser. Weiters gibt es somit auch keine freien Wellenenden an welcher die Position des Rotors abgegriffen werden kann. Durch intensive Abstimmung mit dem LCM und AIT inklusive Änderung der Konstruktion konnte eine Lösung gefunden werden. Die extrem kompakte Bauform der koaxialen Anordnung und die hohen magnetischen Kräfte (vor allem bei der Axialflussmaschine) während des Montagevorgangs, machten es notwendig, ein detailliertes Montagekonzept aufzubereiten und entsprechende Montagewerkzeuge zu konstruieren. Für die geometrische Gestaltung und Optimierung der Kühlkanäle der Motorgehäuse wurden CFD-Simulationen unterschiedlichster Konzepte durchgeführt. Die ermittelten Strömungswiderstände dienten als Basis für die Auslegung des gesamten

Kühlungssystem und somit auch dem Leistungsbedarf für die Kühlmittelpumpe. Das 3-teilige Motorengehäuse, welches im Sandgussverfahren hergestellt wird, wurde in enger Abstimmung mit dem LKR auf die fertigungstechnischen Anforderungen des Verfahrens optimiert.

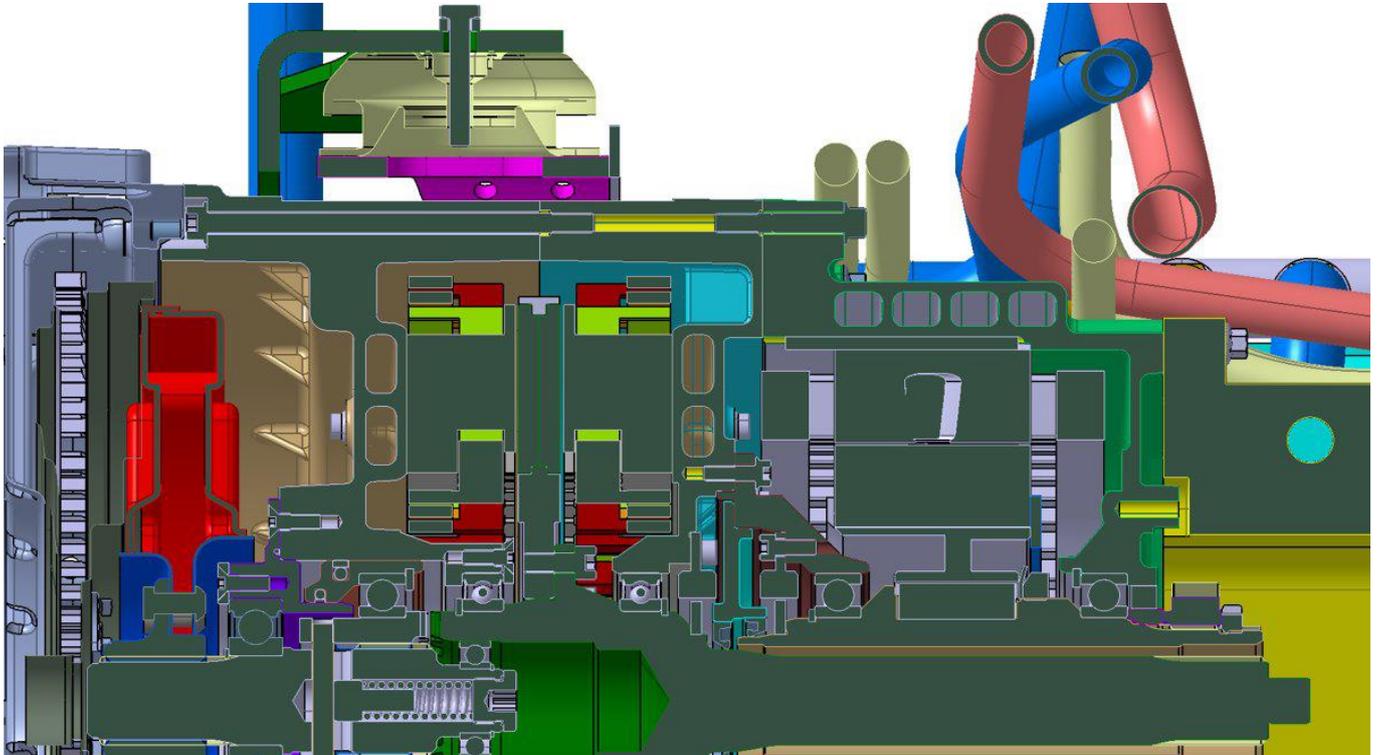


Abbildung 10 - Schnittbild durch die Antriebseinheit

Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus sind für Motor/Inverter und für die Batterie zwei getrennte Kühlkreisläufe vorgesehen. Das Kühlsystem für die Batterie wurde von Miba Battery Systems konzipiert. Auf Basis der vorliegenden Bauraumsituation wurden die Auslegung des Kühlsystems und der Einzelkomponenten für Motor und Inverter von Bitter durchgeführt. Für die Auswahl der passenden elektrischen Kühlmittelpumpe wurde eine 1D-Simulation des Kühlkreislaufes aufgebaut, um die Druckverluste und auch die Aufteilung der Volumenströme in parallelen Zweigen zu beurteilen können.

3.3.1 Gehäusekonzepte

Bei der Konstruktion der Antriebsgehäuse gab es sehr viele innovative Ansätze wie man z.B. bei den Kühlkanälen den Wärmeübergang verbessern, additive Fertigungsverfahren verwenden und auch die Inverter in das System integrieren kann. Diese Varianten sind jedoch mit einem hohen Entwicklungsrisiko behaftet, weshalb man sich im ersten Schritt für einen konventionelleren Lösungsweg entschlossen hat. Im der ersten Projekthälfte wurde jedoch bereits intensiv an der Konzeptkonstruktion für die innovative Gehäusevariante gearbeitet (s. Abb. 11). Diese Entwicklungsschritte fanden in Abstimmung mit dem LKR (additive Fertigungstechnik) und dem AIT (Inverterintegration) statt. Dies bedingte auch die Erstellung der Konzeptkonstruktion für die Gehäuse der SiC-Inverter welche bauraumoptimiert in den Antriebsstrang teilintegriert sind. Herausforderung bei diesen Konzepten waren wiederum die hohe Integrationsdichte und die Montierbarkeit der einzelnen Komponenten.

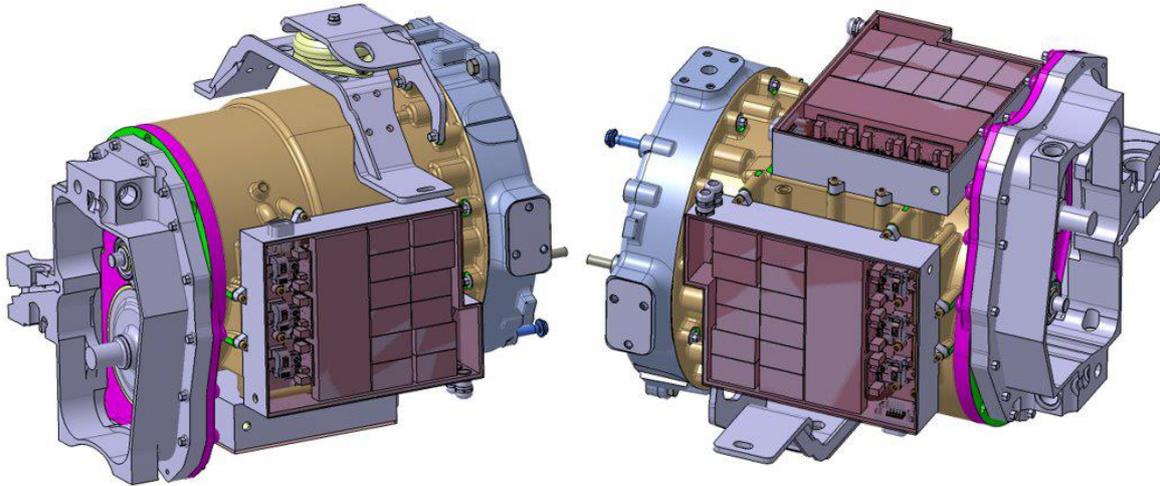


Abbildung 11 - Innovatives Gehäusekonzept mit teilintegrierten Invertern

Für die von Bitter zur Verfügung gestellten Konstruktionen 3er Getriebegehäuse-Varianten wurde durch das LKR jeweils ein Gießkonzept erstellt, das sowohl ein Kühlkonzept als auch das Anguss- und Speisersystem sowie die notwendigen Sandkerne beinhaltet (s. Abb. 12).

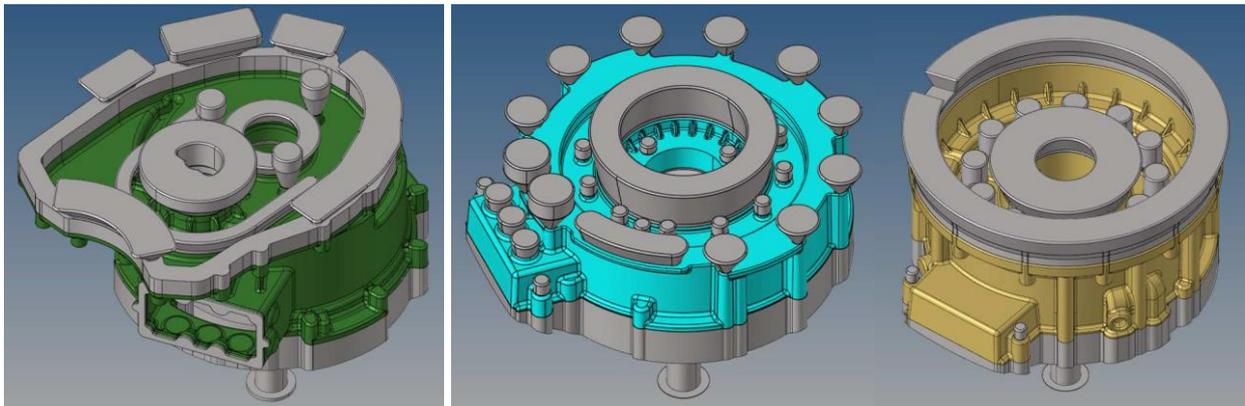


Abbildung 12 - Gussgehäuse 1, 2 und 3 inkl. Anguss- und Speisersystem

Bezüglich der Datenübergabe, der gießgerechten Konstruktion und der nachfolgenden Bearbeitung wurden mehrere Besprechungen zwischen Bitter und LKR abgehalten. Alle 3 Bauteile wurden mit der Gießsimulationssoftware NovaFlow & Solid CV simuliert und über mehrere Schleifen optimiert. Dafür notwendige Konstruktionsanpassungen gab es sowohl seitens Bitter als auch LKR. Insgesamt waren 5 Simulationsschleifen bis zur finalen Variante notwendig, deren Ziel die Optimierung der Gussqualität (Vermeidung von Materialanhäufungen bzw. eine „Verschiebung“ der entstehenden Lunker durch die Modifikation von Angusssystem, Speisern und Kühlkonzept) und die Optimierung der nachfolgenden Bearbeitung war. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Füllungs- und Erstarrungssimulation für Schleife 1 und 5. Anhand der reduzierten Anzahl und Größe der Lunker (in rot) ist die durch die Konstruktions- und gießtechnischen Anpassungen erreichte Optimierung zu erkennen.

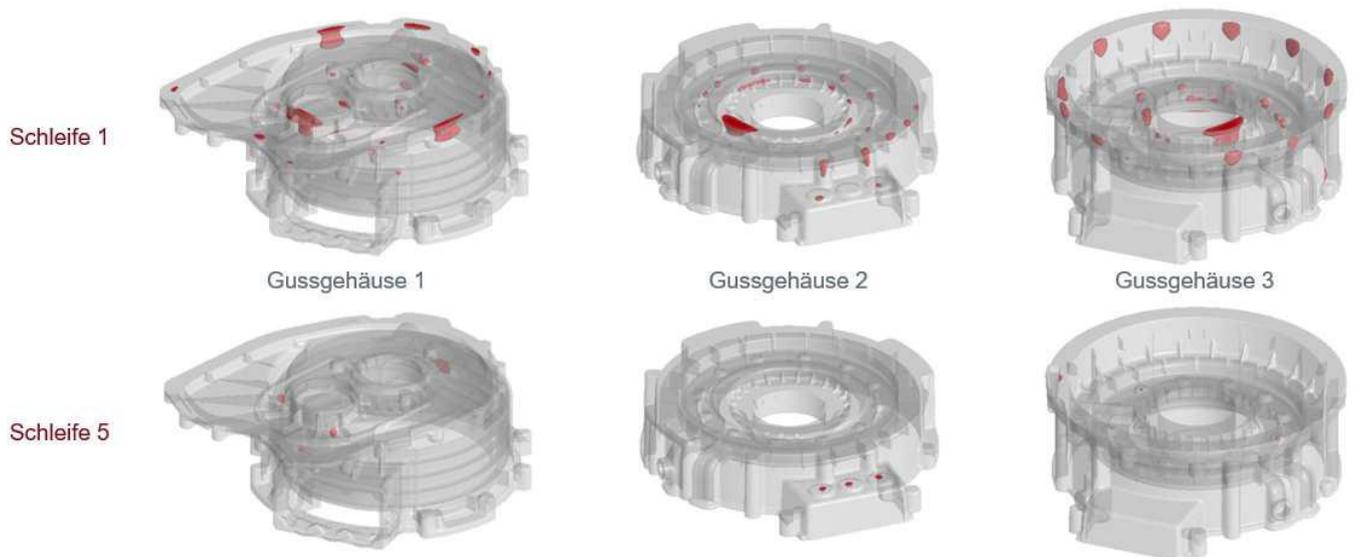


Abbildung 13 - Füllungs- und Erstarrungssimulation von Schleife 1 im Vergleich zu Schleife 5 und Darstellung der daraus resultierenden Optimierung der Gussqualität

Für die Umsetzung einer im nächsten Entwicklungsschritt angedachten innovativen Gehäusevariante mit Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM) gab es enge Abstimmungen zwischen Bitter und LKR. Eine Vorab-Konstruktion wurde von Bitter zur Verfügung gestellt, um am LKR erste Vorarbeiten zum finalen Bauteil beginnen zu können. Anhand eines ersten Drafts von Firma Bitter wurde das Modell seitens LKR auf Gießbarkeit analysiert und in Zusammenarbeit mit Firma Bitter leicht optimiert. Hier galten die Parameter Prozessfähigkeit, Bauteilqualität und Schweißbarkeit als übergeordnetes Ziel – anders als bei der konventionellen Gehäusevariante wurde hier die Legierung AISi10MnMg verwendet, welche aufgrund ihrer guten Fließeigenschaften optimal für diesen Anwendungsfall geeignet ist. Nach den konstruktiven Anpassungen am Bauteil wurde das Gussbauteil für die Simulation am LKR vorbereitet. Dies beinhaltete die Integration eines strömungstechnisch optimierten Angussystems und zur Bauteilgeometrie angepasste Prozessparameter.

Um einen möglichst hohen Wärmeübertrag durch gewollte Verwirbelungen/Strömungsabriss und einer Maximierung der wärmeabführenden Fläche im integrierten Kühlkanal des Gussbauteiles selbst zu realisieren, wurden durch Firma Bitter nachträglich Turbulenzerzeuger in die digitale Geometrie des innovativen Demonstrators eingebracht. Diese wurden, wie in Abbildung 14 im Bereich des Kühlkanals flächig verteilt und vielzählig eingebracht. LKR war es möglich, diese Turbulenzerzeuger per WAAM in das Gussbauteil einzubringen. Lediglich die Form der gezeigten Turbulenzerzeuger wurde leicht angepasst und gleicht einer ganzen Kugel/Schweißperle. Durch die Kombination aus WAAM und Guss wurde der Innovationsgrad des zu gießenden Gehäuseelementes erheblich gesteigert. Die Pin-Einbringung mittels WAAM ist ein LKR-entwickelter Prozess, bei dem eine Vielzahl an Formen und Größen aus unterschiedlichsten Legierungen realisiert werden kann.

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

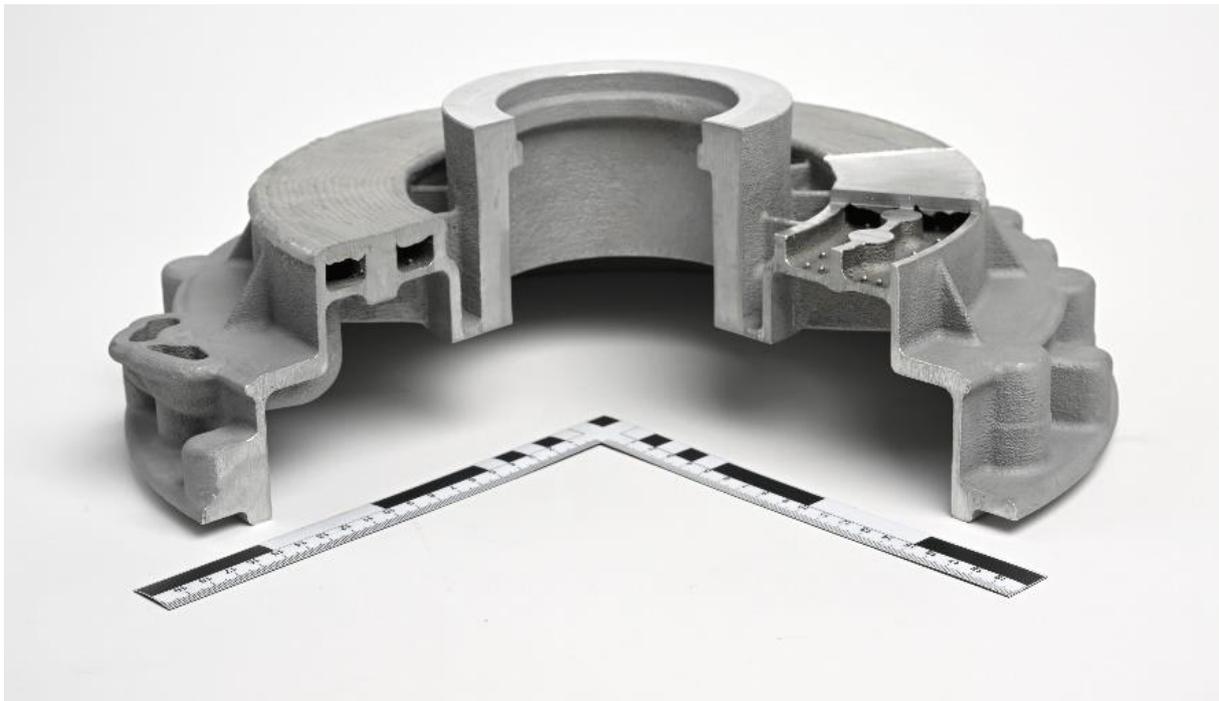


Abbildung 14 - Innovative Gehäusevariante mit eingebrachten Turbulenzerzeugern und mittels WAAM-Verfahren geschlossener Kühlkanalstruktur

Ein Gehäusekonzept und CAD-Modell für das Redesign des SiC-Umrichter wurde erstellt und mit Bitter abgestimmt (s. Abb. 15). Die effektive Kühlung der Leistungsmodule spielt dabei eine wesentliche Rolle.

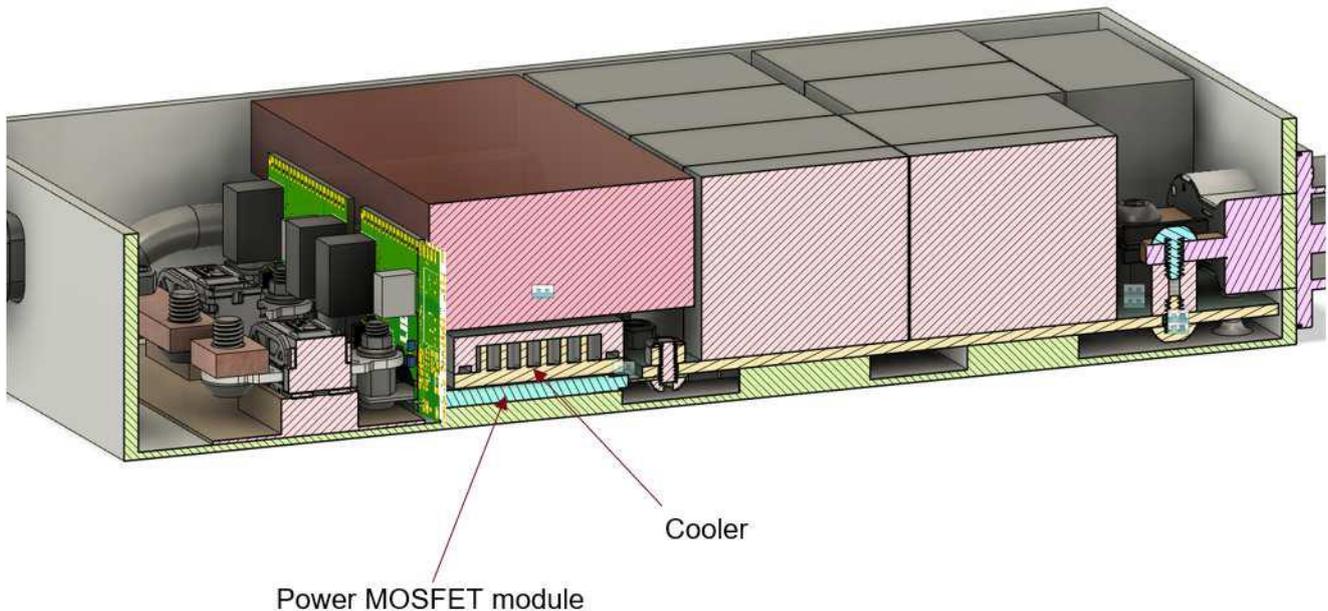


Abbildung 15 - Gehäusekonzept SiC-Umrichter

Um die Wärmeabfuhr zu optimieren, wurde dazu eine CFD-Simulation und Parameterstudie durchgeführt. Die Geometrie des Pinfin-Designs des Kühlkörpers wurde in verschiedenen Dimensionen

einer Optimierung unterzogen. Das Redesign der Printplatten wurde begonnen, um den Bauraum des integrierten Gehäuses optimal ausnützen zu können.

3.3.2 SiC-Inverter

Nachdem das Gehäuse des SiC-Inverters festgelegt und alle wesentlichen Bauteile ausgewählt und positioniert wurden, erfolgte die Anpassung des elektrischen Designs auf Schaltungsebene (s. Abb. 16), um anschließend mit der Anpassung der Software beginnen zu können. Es wurden auch weitere CFD Simulationen zur Optimierung durchgeführt.

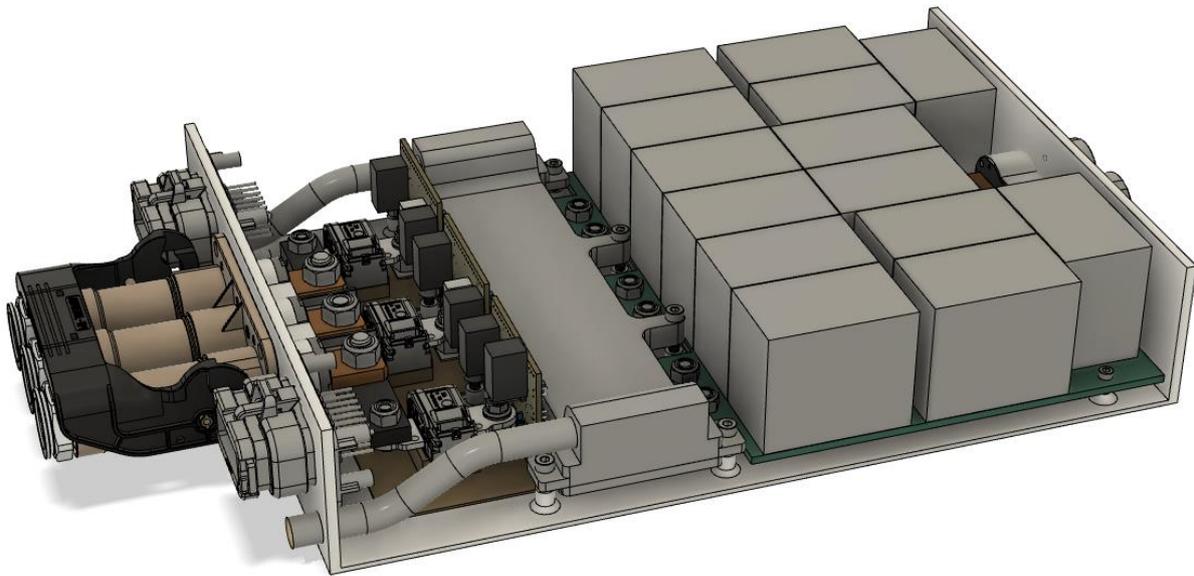


Abbildung 16 - Schematische Darstellung SiC-Inverter

3.3.2.1 Hardware elektrisches Designs

Das Schaltverhalten der Treiber wurde getestet und angepasst. Die Funktionalität und Sicherheit im Schaltbetrieb wurden ebenfalls getestet. Um den SiC-Inverter mit der AFM oder der RFM am Prüfstand vermessen zu können, wurde die Schaltgeschwindigkeit der SiC-Halbleiter auf 20kV/us bei maximaler Zwischenkreisspannung eingestellt. Im Vergleich dazu kann ein vergleichbarer IGBT-Umrichter mit ca. 5-10kV/us schalten. Durch noch schnelleres Schalten könnten zwar die Schaltverluste weiter reduziert werden, jedoch stellt dies eine zusätzliche Belastung der Isolierung der Maschine dar und erhöht das Risiko eines Ausfalls. Die SiC-Dioden haben ein besseres Schaltverhalten, was zu einer Reduzierung der Schaltverluste führt und mit den gewählten 20kV/us eine gute Relation darstellt. Durch die höhere EMV-Belastung aufgrund des schnellen Schaltens der SiC-Halbleiter waren insbesondere an den Resolver-Auswerteschaltungen zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um eine saubere Auswertung in der Software zu ermöglichen. Der Einfluss der Maschinen, die erst nach der Fertigstellung des Umrichters angeschlossen und durch das schnellere Schalten - verursacht durch kapazitive Kopplungen und Rückwirkungen über das Gehäuse und die beiden Resolver - verstärkt wurden, war sehr groß. Aus diesem Grund wurde im letzten Redesign versucht, EMV-Probleme vorab zu minimieren.

Anschließend wurden umfassende Tests mit Treibern und Schnittstellen durchgeführt und schrittweise in Verbindung mit der Software in Betrieb genommen.

3.3.2.2 CFD-Simulationen

Eine numerische Analyse der Wärmeübertragung innerhalb des Wechselrichtergehäuses wurde durchgeführt. Das ursprüngliche Design des Wechselrichtergehäuses wurde so modifiziert, dass die Einlasstelle leicht geneigt und der Durchmesser standardisiert wurde. In der Hauptkammer wurden Balken zur strukturellen Stabilität eingeführt. Diese Modifikationen wurden mittels Numerischer Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics - CFD) hinsichtlich der Eigenschaften von Strömung und Wärmeübertragung analysiert. Zu diesem Zweck wurde der OpenFoam CFD Solver mit konjugierter Wärmeübertragung (zwischen dem festen Gehäuse und flüssigem Kältemittel) verwendet. Die Geometrie und die Randbedingungen sind in Abbildung 17 dargestellt.

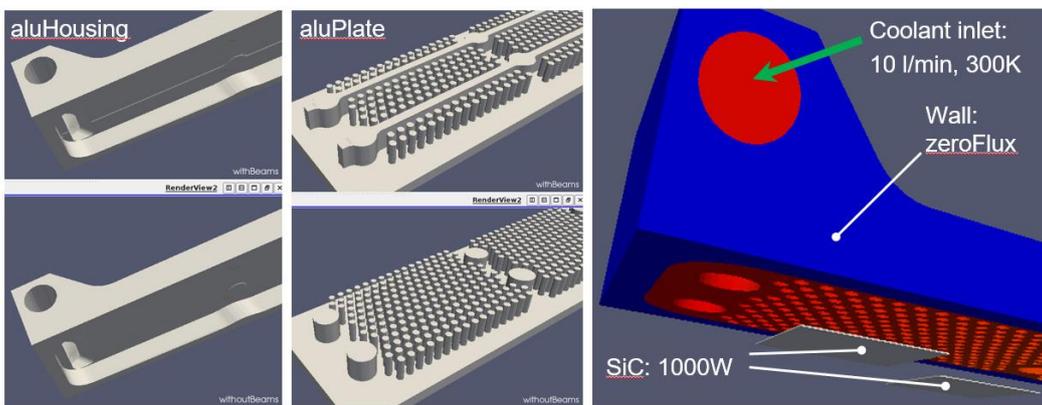


Abbildung 17 - Geometrie und Randbedingungen des Wechselrichters

Wie in Abbildung 18 gezeigt, wurde die stationäre Lösung für das modifizierte Design (oben) erhalten und mit dem ursprünglichen Design (unten) verglichen. Der größte Unterschied zwischen den beiden Konstruktionen liegt im Strömungsmuster des Kältemittels: Die eingeführten Balken verbessern die Strömungsgestaltung innerhalb der Hauptkammer (s. Abb. 18 links) und reduzieren dadurch den Gesamtdruckabfall über das Gehäuse (s. Abb. 18 Mitte). Die maximal auftretenden Temperaturen sind nahezu identisch, obwohl im modifizierten Fall die Zone erhöhter Kältemitteltemperatur deutlich kleiner ist als im Ausgangsfall (s. Abb. 18 rechts).

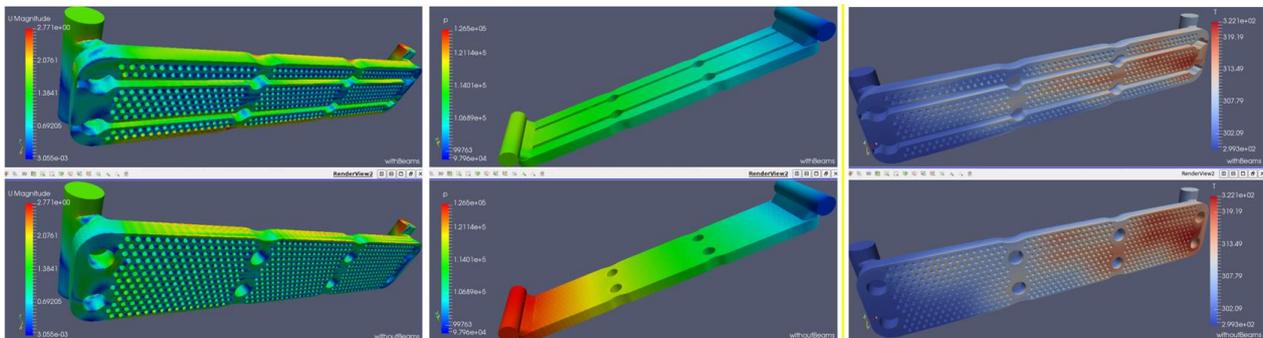


Abbildung 18 - Verteilung von Geschwindigkeit (links), Druck (Mitte) und Temperatur (rechts) innerhalb des Wechselrichtergehäuses

3.3.2.3 Inverter-Vergleich

Wirkungsgradmessung

Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten des eigens entwickelten SiC-Inverters von AIT, wurde dieser mit der „Off-the-Shelf“-Lösung (PM150DZ) von Cascadia Motion verglichen. Hierbei wurden die Geometrien des finalen Gehäuses sowie die Leistungskenndaten verglichen. Unter Last und gleichen Rahmenbedingungen (Arbeitspunkte, Schaltfrequenz, DC-Spannung sowie Kühlung) wurden Wirkungsgradkennfelder ermittelt (s. Abb. 19 und 20) und Verlustleistung sowie Erwärmung der Inverter bei den systemrelevanten Nennpunkten bestimmt. Als Last wurde hierbei die im Projekt entwickelte Axialflussmaschine herangezogen. Der Vergleich konnte eine deutliche technologiebedingte Reduktion der Verluste des SiC-Inverters und in weiterer Folge die Vorteile bezüglich Reichweite und der Batterieausnutzung aufzeigen sowie eine Verminderung der Anforderungen an den Kühlkreislauf. Besonders im Teillastbereich ist eine höhere Effizienz zu erkennen. Für die Bestimmung der Wirkungsgradkennfelder wurden 380 Arbeitspunkte über Drehzahl / Drehmoment angefahren (200-4000 RPM; 12Nm – 350Nm) und die Verlustleistungen des Umrichters und der Maschine bestimmt. Deutlich erkennbar durch Vergleich der ermittelten Wirkungsgradkennfelder ist der Vorteil der technologisch bedingten geringeren Schaltverluste der SiC-Halbleiter. Bei der Nenndrehzahl (2179 RPM; elctr. ~290 Hz) weist der SiC-Inverter bereits Wirkungsgrade von über 98% (Vergleich IGBT: ~96%) auf und erreicht sein maximum bei 99,8 % (Vergleich IGBT: 98,5%) für höhere Lastpunkte und Drehzahlen. Der Vergleich konnte hierbei zeigen, dass im Fahrzeugbetrieb durch die deutlich geringeren durchschnittlichen Inverter-Verluste (speziell im Nennpunkt) mit geringeren Gesamtverlusten in einem durchschnittlichen Fahrzyklus zu rechnen ist. Dies führt in weiterer Folge zu geringeren Ansprüchen an den Kühlkreislauf, sowie zu einer besseren Ausnutzung der Batteriekapazität.

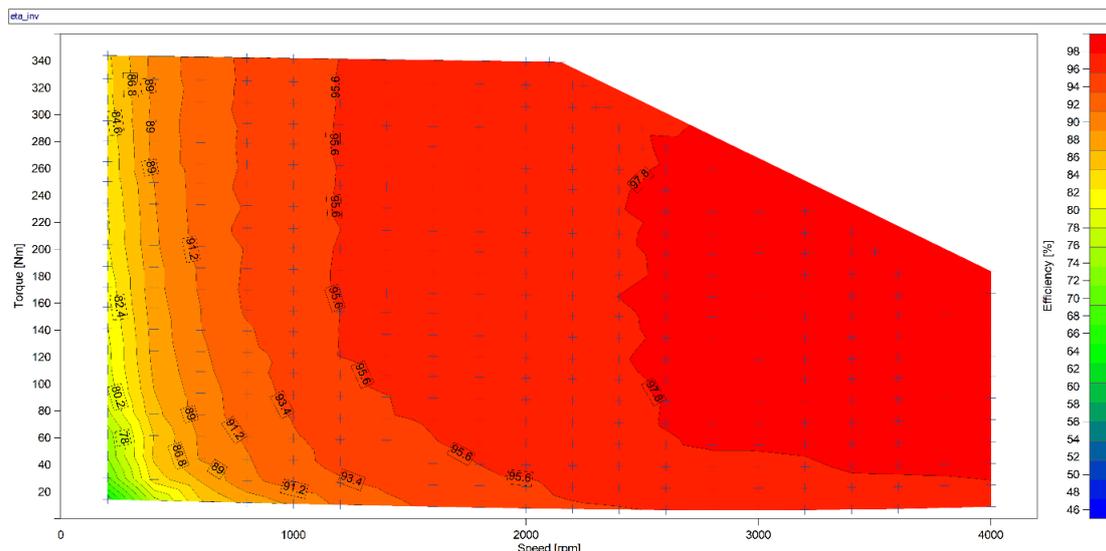


Abbildung 19 - Wirkungsgrad IGBT Inverter

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

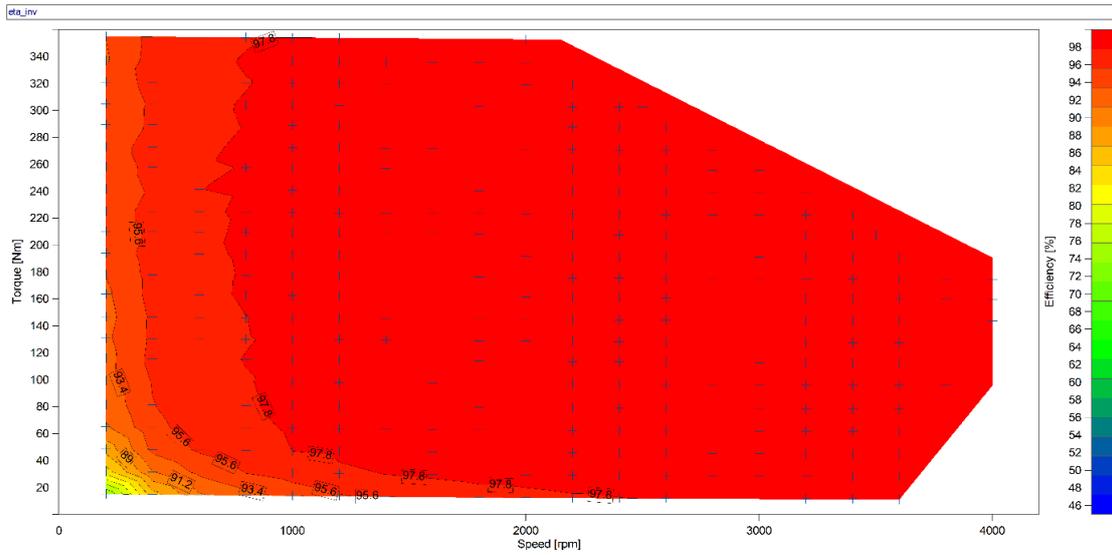


Abbildung 20 - Wirkungsgrad SiC Inverter

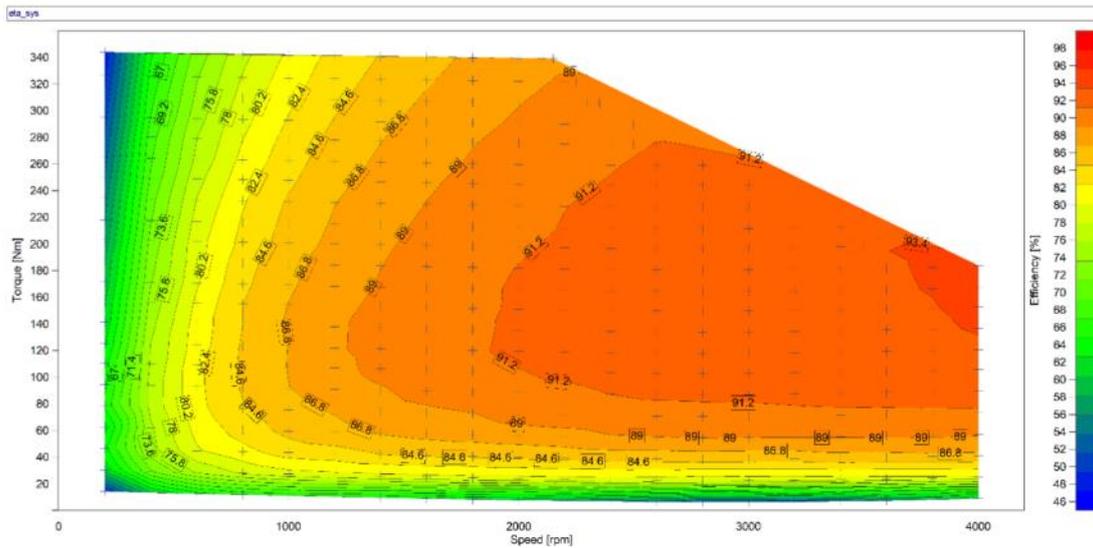


Abbildung 21 - Gesamtwirkungsgrad IGBT + Maschine

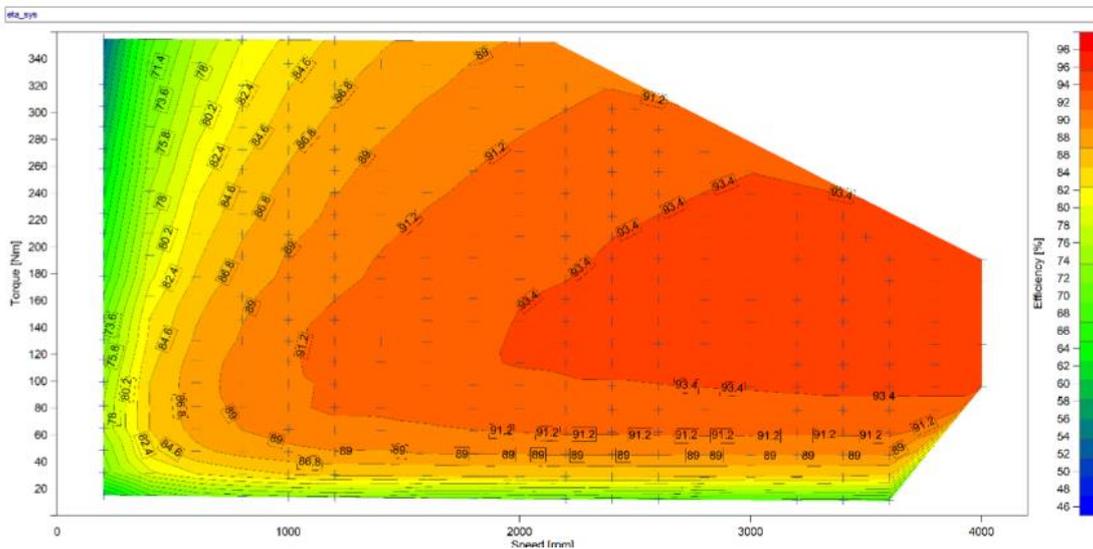


Abbildung 22 - Gesamtwirkungsgrad SiC + Maschine

Thermisches Verhalten

Es wurden in Kombination mit der im Projekt entwickelten Axialflussmaschine Erwärmungsläufe in den Maschinenrelevanten Betriebspunkten durchgeführt. Beide Umrichter wurden hierbei nicht an ihre Leistungsgrenzen getrieben, da die Lastmaschine (AFM) kurzfristige Spitzenleistungen von 75-80kW verträgt. Einschwingvorgänge sind weiters nur bei geringeren Leistungen (<50kW) möglich, da hier die Wicklungs- und Rotortemperaturen aufgrund der deutlich kleineren Zeitkonstanten hier zu vorzeitigen Abbruchkriterien führen. Weiters ist ein direkter Vergleich beider Inverter aufgrund unterschiedlicher Positionierung der Temperatursensoren nicht möglich. Der Inverter von Cascadia weist in jedem Phasenmodul einen integrierten Temperatursensor auf. Durch die enge Anbindung des Sensors und Kopplung an den Kühlkörper ergeben sich hier kleine Zeitkonstanten der gemessenen Temperaturen, welche nach kurzen Lastsprüngen bereits eingeschwingen sind. In Abbildung 23 ist die Auswirkung des im Vergleich geringeren Wirkungsgrades ersichtlich. Im Nennpunkt ergeben sich bereits 1-2kW an Verlusten, welche sich auch in den Modultemperaturen widerspiegeln. Die vorhandene Kühlleistung ist allerdings ausreichend, um die Temperaturen stabil zu halten.

Speed [RPM]	Torque [Nm]	PDC [kW]	Phase Current [Arms]	VDC [V]	Mod A [°C]	Mod B [°C]	Mod C [°C]	Eta [%]	Losses [kW]
2000	121	27,5	73	700	27,5	27,5	28,3	97,1	0,7986
2000	245	57,2	133,5	700	31,5	31,5	32,5	97,3	1,5444
2000	331	78,5	186,3	700	35,5	35,5	37	97,3	2,1195
4000	120	53,4	73	700	27,5	27,5	28,3	98,4	0,8544

Abbildung 23 - Temperaturentwicklung der Module des Cascadia Inverters - Auszug aus Deliverable 4.1

Im Vergleich hierzu ist in Abbildung 24 die Auswirkung des höheren Wirkungsgrades zu sehen. Gemessen wurden hier allerdings eine Temperatur eines Moduls an der Oberfläche, sowie die Temperatur zweier Kondensatoren des Zwischenkreises. In allen Betriebspunkten ist mit Verlusten deutlich unter 1kW zu rechnen. Im Nennpunkt ergeben sich aufgrund des Wirkungsgrades über 99%, Verluste von unter 0,5kW. Die Temperaturentwicklung pendelt sich für geringe Leistungen (<50kW) bei unter 30°C ein. Allerdings konnte bei höheren Leistungen keine Endtemperatur ermittelt werden, da aufgrund der zu hohen Temperaturen der Phasenwicklungen die Messung abgebrochen werden musste. Allerdings ist hier davon auszugehen, dass aufgrund der geringen Verluste von 0,5 - 0,8kW, und der vorhandenen Kühlleistung keine deutliche Erwärmung mehr stattfinden wird.

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Speed [RPM]	Torque [Nm]	PDC [kW]	Phase Current [Arms]	VDC [V]	TIM [°C]	C_DC1 [°C]	C_DC2 [°C]	Eta [%]	Losses [kW]
4000	60	27,2	35,4	700	27,8	25,1	26,75	99,5	0,136
4000	120	53,75	69,4	700	28	25,4	27,05	99,6	0,2203
2000	130	29	68,8	700	27,9	25,4	27	99,2	0,232
2000	260	60	140	700	28,6*	27*	28*	99,1	0,54
2000	345	80	194	700	28,7*	27*	28,1*	99	0,8

* Temperatur bei Abbruch der Messung aufgrund zu hoher Wicklungstemperaturen der Maschine

Abbildung 24 - Temperaturentwicklung des SiC-Umrichters – Auszug aus Deliverable 4.1

Mechanische Kenngrößen

Durch die geringeren Modulgrößen und der reduzierte Kühlbedarf und in weiterer Folge geringeren Kühlflächen, konnte das Gehäuse des SiC-Inverters (s. Abb. 25,27) im Vergleich zum IGBT-Inverter (s. Abb. 26,28) geringer ausfallen. Konkret wurde eine Reduktion des Volumens von 28% erzielt.

Länge	Höhe	Breite	Volumen
331mm	70mm	235mm	5,44495 L

Abbildung 25 - Mechanische Kenngrößen SiC-Inverter

Länge	Höhe	Breite	Volumen
436mm	87mm	200mm	7,5864 L

Abbildung 26 - Mechanische Kenngrößen IGBT-Inverter

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

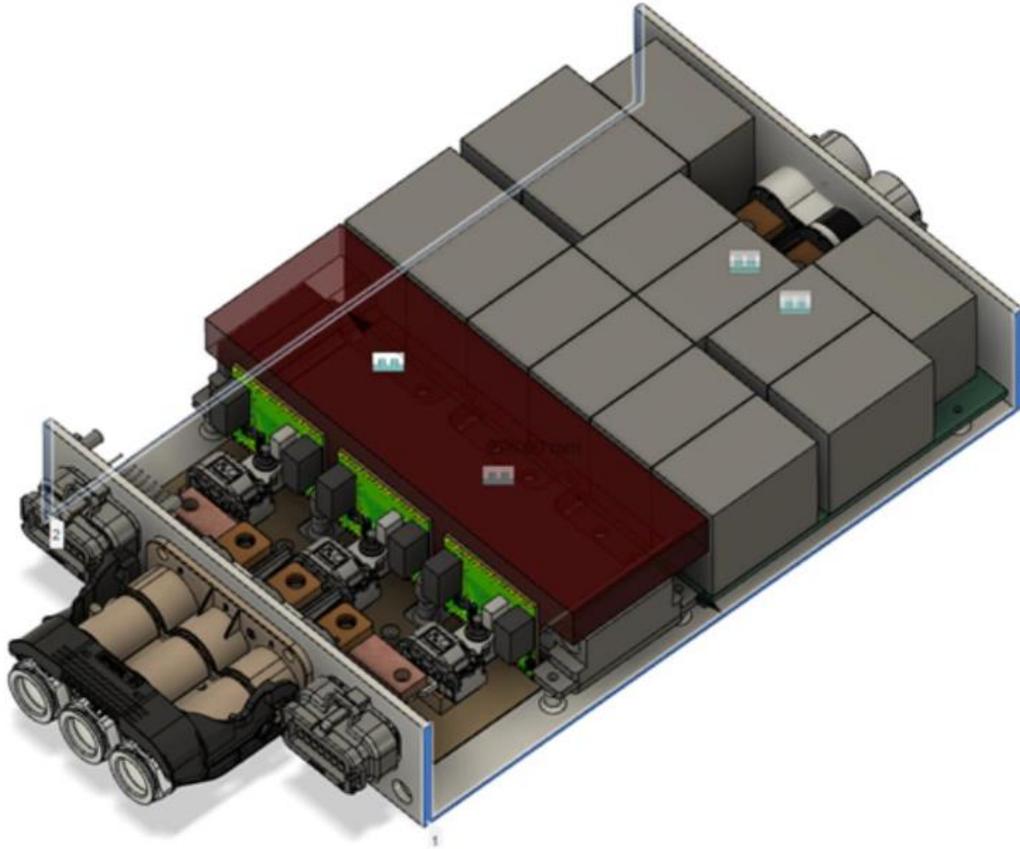


Abbildung 27 - SiC-Inverter Gehäuse (Quelle: Bitter)



Abbildung 28 - IGBT-Inverter von Cascadia Motion

3.3.3 Radialflussmaschine/Axialflussmaschine

Auf Basis von Simulations- bzw. Optimierungsaufgaben, sind Detailsimulationen durchgeführt worden. Für eine detaillierte Verlustbeschreibung sind alle Simulationen für die Radialflussmaschine (RFM), aber auch die Simulationen für die Axialflussmaschine (AFM) mittel 3D-Modellierung durchgeführt worden. Durch diese Simulation konnten abermals die Verluste in den Permanentmagneten durch Segmentieren der Permanentmagnete minimiert werden. Das notwendige Wicklungssystem wurde auf Basis der vorangegangenen Simulation ausgelegt und entsprechen der Spezifikationen konstruiert.

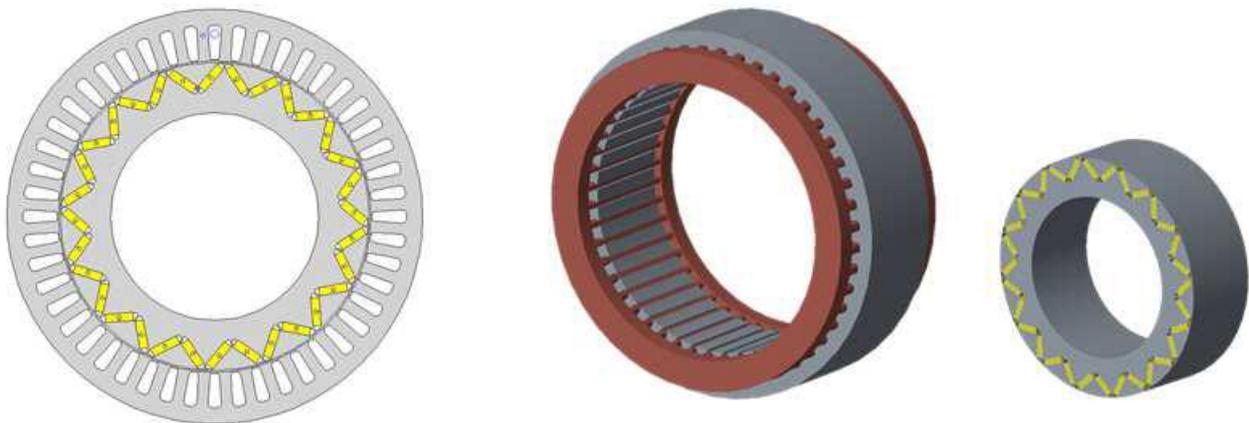


Abbildung 29 - Querschnitt Stator- und Rotormodell der RFM

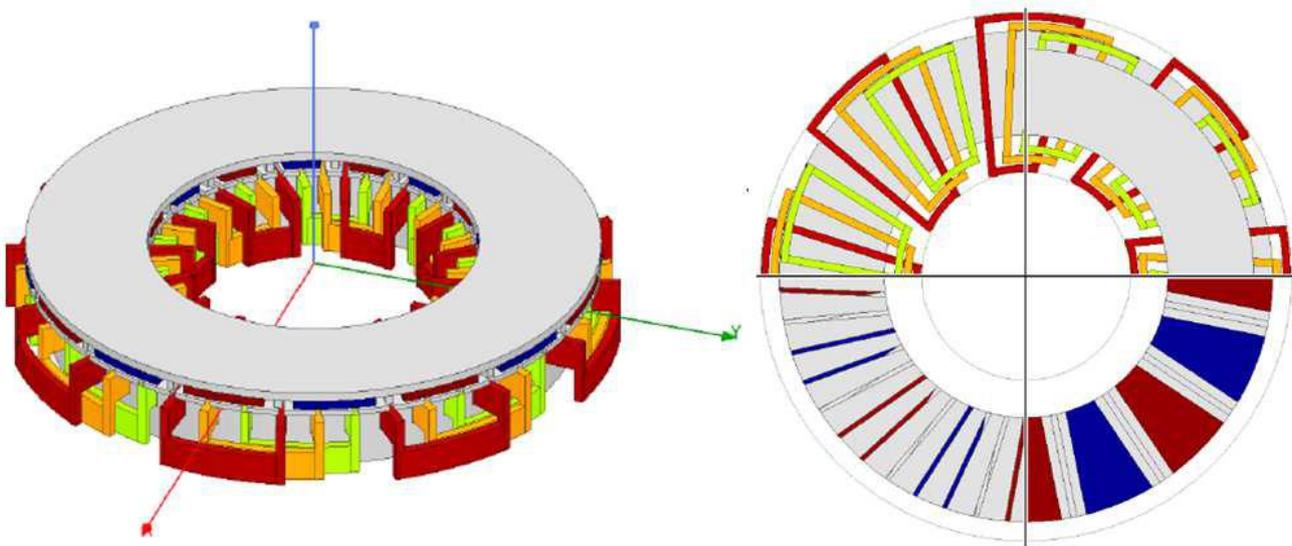


Abbildung 30 - 3D-Modell und sektionaler Querschnitt der AFM

3.3.4 Batteriepaket

Gemeinsam mit den Konsortialpartnern wurde das eCVT-Gesamtsystem samt Schnittstellen weiter definiert. Miba Battery Systems' Anteil lag dabei in der Auslegung der elektrischen Energieversorgung, die aus Batterie, Batteriekühlung und der externen Ladeinheit sowie dem Interface zur HV (High Voltage) und LV (Low Voltage) Versorgung bestand. Sämtliche Komponenten wurden im CAD ausreichend detailliert ausgearbeitet und, in passendem CAD-Format, dem Konsortium zur Verfügung gestellt.

Im Entwicklungszyklus des Batteriepaketes gab es zwei Varianten zur Herstellung. Variante 1 beschrieb den Einsatz von Li-Ionen-Zellen im Format 21700, Variante 2 beschrieb den Einsatz von Li-Ionen Zellen

im Format 18650. In enger Zusammenarbeit wurde Variante 2 für die Umsetzung am eCVT gewählt. Auf Basis interner Konstruktionsrichtlinien für 18650 Makrozellen bei Miba Battery Systems wurde ein Batteriepaket mit integrierter Wasser-Glykol-Kühlung und BMS (Batterie Management System) elektrisch und mechanisch ausgelegt (s. Abb. 31). Während mechanische Anforderungen an Zellhalter bereits vorhanden waren, wurde das Gehäuse und dessen Anbindungspunkte zum Fahrzeug entsprechend dimensioniert und analytisch überprüft. Anschließend wurden sämtliche Makrozellen (Parallelverbund von Einzelzellen) in der Laserschweißzelle hergestellt und in der Prototypenwerkstatt mit dem BMS und den Kühl- und Sicherheitselementen von Miba Battery Systems händisch zum Batteriepaket verbaut. Bei der abschließenden Prüfung anhand eines Controlplan für Prototypen wurde das Batteriepaket ausgiebig getestet.

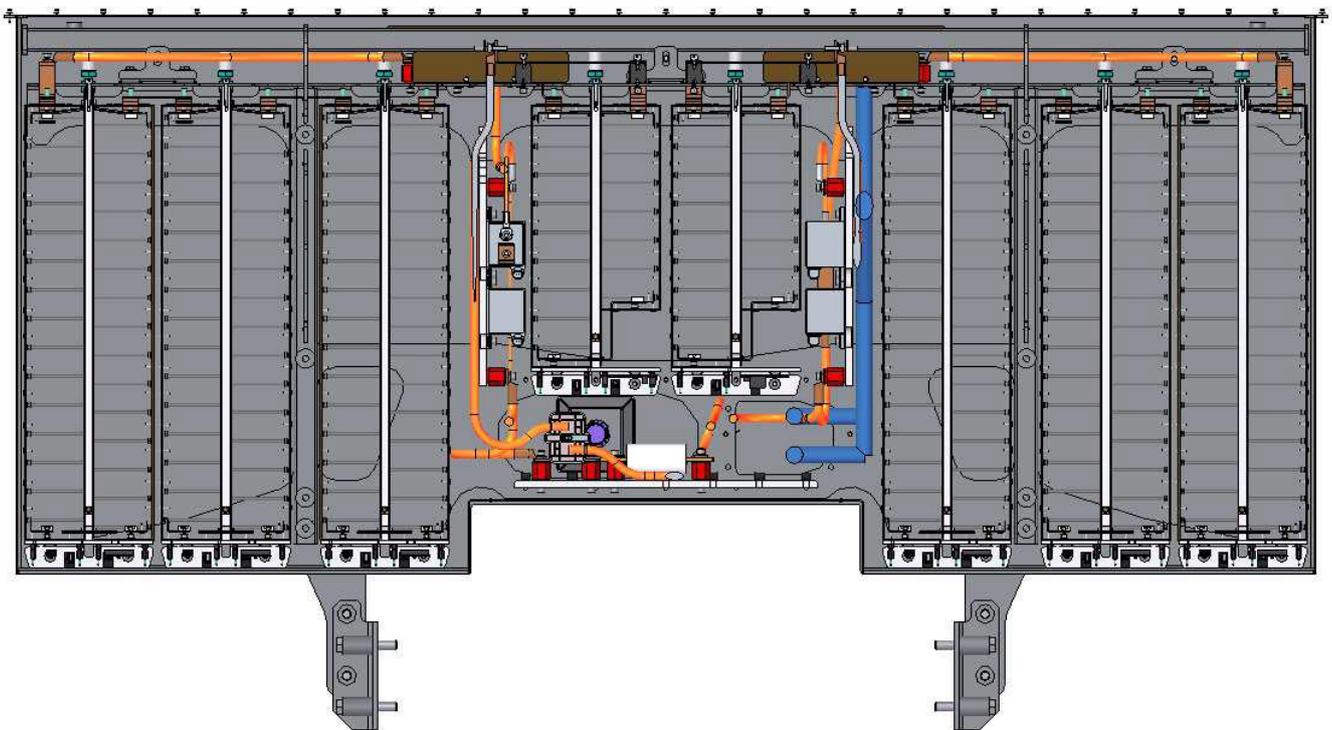


Abbildung 31 - Schnitt durch das Batteriepaket

Während das BMS eine maßgeschneiderte Eigenentwicklung von Miba Battery Systems ist, wurden Komponenten zum Laden (On-Board Charger) und Spannungswandler zugekauft. Eine weitere Sidebox bietet Platz für den OBC (On-Board Charger) zum Laden mittels IEC 62196 TYP2 EV Ladestecker und den DC-DC Wandler zur Versorgung des 12V Bordnetzes des eCVT-Fahrzeuges. Zudem befindet sich darin der Knotenpunkt der Can-BUS Kommunikation zwischen Fahrzeug, OBC, DC-DC Wandler und Batterie. Die Kühlung des OBC und DC-DC Wandlers wird dabei vom Kühlkreislauf, der u.a. auch die Inverter kühlt, übernommen. Abschließend wurde eine Betriebsanleitung für das Batteriesystem erarbeitet, um einen sicheren Betrieb im eCVT-Fahrzeug zu gewährleisten. Die Betriebsanleitung wurde VDS zur Verfügung gestellt und dient u.a. als Grundlage zur Schulung von Personal zur Benützung des eCVT-Fahrzeuges.

3.3.5 Kühlsystem der E-Maschine, Inverter, Batterie und Getriebe

Die Kühlung der Batterie wurde von Miba Battery Systems in Form einer eigenen Kühlbox realisiert. Diese Kühlbox wälzt ein Wasser-Glykol Gemisch um, welche temperaturgeregelt dessen Kühlleistung variiert. Die Kühlung der Komponenten in der Sidebox wird vom Kühlkreislauf übernommen, der u.a. die Inverter kühlt. Sämtliche flüssigkeitsgekühlten Komponenten wurden bei Miba Battery Systems auf Dichtheit und Funktion geprüft.

3.3.6 Gesamtpackaging

Firma Bitter übernahm nach der Neu-Entwicklung aller elektronischen Antriebskomponenten das Packaging im Fahrzeug. Bei der Integration der Komponenten in das Gesamtfahrzeug (s. Abb. 32) durch einen alleinigen Projektpartner konnte somit die Verwaltung des gesamten Fahrzeugbauraumes während der Integration überwacht werden. Notwendige Anpassungen hätten bei Integrationsproblemen direkt erkannt und umgesetzt werden können.

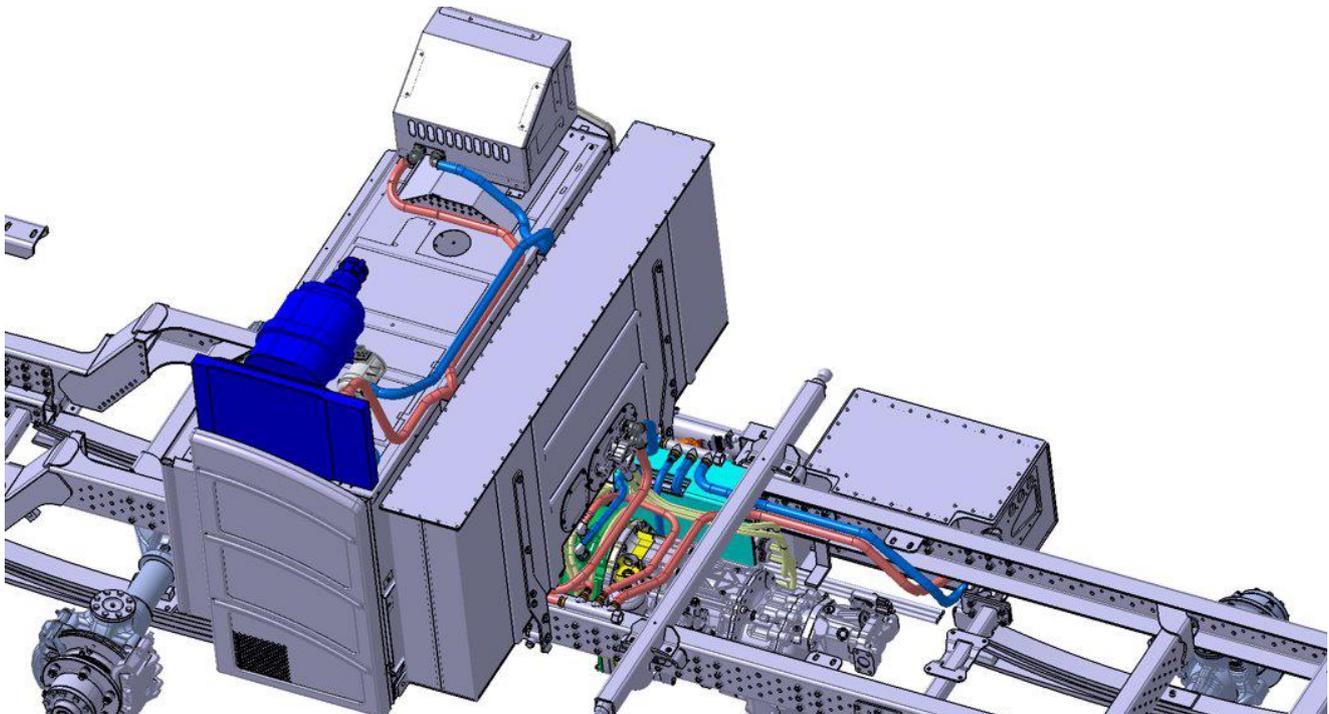


Abbildung 32 - Packaging Gesamtsystem im Fahrzeug und Kühlungsponenten

3.4 Zusammenbau der elektrischen Antriebskomponenten

3.4.1 Dualmotor-Einheit

Der nächste Schritte im Projekt war die Montage der gesamten Dualmotor-Einheit. Diese umfasste den Verguss der elektromagnetischen Wicklungssysteme, den Einbau aller notwendigen Maschinenelemente, die Vormontage und den Einbau der Rotoren, sowie die Konfiguration von Verschaltung und der Kabelauslässe.

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 33 - RFM mit vergossenem Stator und eingebautem Rotor



Abbildung 34 - AFM mit vergossenem Stator

Die Antriebseinheit wurde nach ersten funktionalen Prüfungen dem AIT übergeben, um dort den Anschluss der Inverter und die Testläufe auf dem Prüfstand durchzuführen. Für die Planung der Motortests am AIT wurden Prüfabläufe und Ansteuerungstabellen für die beiden Motoreinheiten erstellt. Weitere Schritte nach dem Aufbau der Maschinenkomponente umfassten die Unterstützungstätigkeiten in AP6 am Prüfstand bzw. in AP8 bei Erprobung und Bewertung.

3.4.2 Stator und Rotor der RFM/AFM

Auf Basis der Detailsimulation ist in weiterer Folge, in enger Abstimmung mit den Partnern Bitter sowie Miba, die Gehäuseintegration bzw. die Anbindung der rotierenden Teile an geeigneten Wellen konstruktiv gelöst worden. Es wurden die Schnittstellen der Wicklungssysteme, der Sensorik sowie der Kühlungsanschlüsse gelöst. Erst nach Abschluss der Detailkonstruktion der gesamten Motoreinheit, sowie der Festlegung eines geeigneten Positionsmesssystems ist der Beschaffungsvorgang aller notwendigen Bauteile gestartet worden. Auf den Statorblechpaketen sowohl für die Axialflussmaschine (s. Abb. 35) als auch für die Radialflussmaschine (s. Abb. 36) wurden anschließend die Wicklungssysteme aufgebaut.



Abbildung 35 - Fertig aufgebauter Stator sowie Rotor AFM



Abbildung 36 - Fertig aufgebauter Stator RFM

3.5 Steuerung von Fahrzeugantrieb und Nebenantriebe

Im Laufe des Projektzyklus wurden die bestehenden Simulationswerkzeuge um die Module „elektrische Maschinen“ und „elektrischer Speicher“ erweitert. Dabei wird die Software zur Steuerung des eCVT-Getriebes im Zusammenwirken mit dem elektrischen Variator, der Fahrfunktionen inkl. PTO und Nutzung der Energie im Akkumulator zum effizienten Betrieb des Gesamtsystems bei minimalem Verbrauch von Treibstoff entwickelt. Die Erweiterung der Software für elektrische Maschinen und Speicher wurde durchgeführt, entsprechend wurden erforderliche Steuerungsstrategien für unterschiedliche Fahrzustände erstellt und vorab bereits virtuell getestet. Die reale Inbetriebnahme der Software erfolgt nach Eintreffen der Elektroeinheit und Komplettierung der eCVT-Antriebseinheit. Die Erweiterung der Software für elektrische Maschinen und Speicher wurde durchgeführt, entsprechend wurden erforderliche Steuerungsstrategien für unterschiedliche Fahrzustände erstellt und vorab bereits virtuell getestet. Das Batterie-Management-System (BMS) wurde als Teil des Batteriepacks von Miba Battery Systems entwickelt und gemeinsam mit der Batterie verbaut. Dabei wurde auf ein Master/Slave-Konzept gesetzt, welches mittels CAN-Bus mit der Sidebox und dem restlichen Fahrzeug kommuniziert. Sämtliche Funktionen des BMS wurden bei der Inbetriebnahme des Batteriepacks bei Miba Battery Systems überprüft und im Controlplan für Prototypen vermerkt. Die CAN-Bus Nachrichten wurden im Annex der Betriebsanleitung festgehalten.

3.5.1 Steuerungssoftware des Antriebssystems auf dem Prüfstand

Das Getriebesteuergerät wurde am Prüfstandsaufbau in Betrieb genommen und die Kommunikation mit den Invertern, der HV - Batterie und allen Sensoren und Aktuatoren hergestellt. Es wurden automatisierte Routinen zum Hoch- und Herunterfahren des gesamten HV-Systems erstellt und getestet. Durchführung erster Schaltversuche des VTP-Getriebes im BEV-Betrieb (kein Prüfstandsmotor an Eingangs- /Abtriebswelle) und Anpassen der Regelparameter des RFM-Inverters für höhere Regeldynamik. Implementierung einer automatisierten Ansteuerung der Diesel-Kupplung (Klauenkupplung) mit integrierter Synchronisation zwischen Dieselmotor und AFM-Elektroeinheit. Erfolgreiche Durchführung von Schaltversuchen im lastlosen Hybridbetrieb (Prüfstandsmotor am Getriebeeingang) und im BEV-Betrieb, ohne Auffälligkeiten. Im Lastbetrieb (Wirbelstrombremse am Getriebeabtrieb) kam es reproduzierbar zu Fehlverhalten während der Schaltung von Bereich 2F auf 1F am AFM- und RFM-Inverter durch Überströme. Diese sind bedingt durch die erforderliche hohe Verstelldynamik des Systems. Ebenfalls kam es zur kurzzeitigen Unterbrechung der Schmierölversorgung durch Einbruch der Eingangsdrehzahl. Die Software zur Getriebe- und HV-Systemsteuerung wurde am Prüfstand in Betrieb genommen und alle Grundfunktionen erfolgreich getestet. Die Schaltversuche im lastlosen Betrieb wurden sowohl im BEV, als auch im Hybridmodus erfolgreich durchgeführt. Im Lastbetrieb sind in beiden Betriebsmodi Auffälligkeiten durch interne Fehlerdiagnosen der Inverter und den Einbruch der Schmierölversorgung aufgetreten. Dieses Fehlverhalten wurde während der Erprobung im Prototypenfahrzeug, auf Grund der geänderten Dämpfung des Antriebstrangs und der Charakteristik des Dieselmotors, weiter untersucht und verbessert.

3.5.2 Steuerungssoftware des Antriebssystems im Prototypenfahrzeug

Aufgrund der hohen Komplexität der Steuerungssoftware waren eine Vielzahl an Schritten notwendig, um die Steuerungssoftware mit den Komponenten des Prototypenfahrzeug zu verbinden:

- Integration des Getriebesteuergeräts (TCU) in die Fahrzeugkommunikation und Herstellen der Kommunikation mit dem Body-Controller (BCU) und dem Engine Controller (ECU) via Can-Bus Schnittstelle.
- Integration der Fahrzeugbedienelemente in die Getriebesteuerung.
- Ansteuern des AFM-Inverters im drehmomentgeregelten Betrieb (drehzahl geregelt während Prüfstanderprobung).
- Durchführung erster Fahrversuche bei geringer Geschwindigkeit im Hybridmodus (mit permanent eingekuppeltem Dieselmotor).
- Anpassen der Dieselmotorkupplungssteuerung an Motordrehzahl und Durchführen von Wechsel zwischen Hybrid und BEV-Modus bei Stillstand des Fahrzeugs. Der unmittelbare Wechsel von BEV zu Hybrid ist auf Grund von Spannungseinbrüchen des 12V-Bordnetzes bei Diesel-Start nicht möglich.
- Durchführen von Schaltversuchen im Hybrid- und BEV-Modus während Fahrzeugerprobung und Anpassung der Steuerungsparameter zur Optimierung der Getriebebeschaltungen bei höheren Geschwindigkeiten.
- Überprüfen des HV-Batteriemanagements durch elektrische Leistungsbilanz während Hybrid-Fahrbetrieb.

Die Ansteuerung des VTP-Getriebes und des HV-Systems im Prototypenfahrzeug wurde erfolgreich eingerichtet und getestet. Alle erforderlichen Bedienelemente werden ausgelesen bzw. angesteuert. Der Fahrbetrieb des Fahrzeugs ist im Hybrid- und BEV-Modus gewährleistet. Mit der umgesetzten Steuerungssoftware können die vorgesehenen Verbrauchsmessungen durchgeführt werden.

3.6 Erprobung des eCVT-Antriebsstranges auf dem Prüfstand

3.6.1 Initiale Maschinenvermessung

Die Maschine wurde an das AIT übergeben. Beide integrierten Maschinen, Axialflussmaschine (AFM) und Radialflussmaschine (RFM), wurden abwechselnd an einer Lastmaschine im Antriebslabor am AIT vermessen und mit den Simulationsdaten verglichen (s. Abb. 37). Dafür wurden zwei Exemplare des Cascadia-Inverters in Betrieb genommen und für beide Maschinen parametrisiert (Resolverkalibrierung, Stromregler-Optimierung, Limits etc). Die Vermessung beider Maschinen beinhaltete die Messung der Generatorspannung sowie des Moments bei Fremdantrieb durch die Lastmaschine, als auch das Verhalten der Maschinen an den Nenn- und Spitzenwerten (Drehmoment, Drehzahl).

Dabei ergab sich eine deutlich erhöhte Abweichung der Leerlaufverluste der RFM, als auch ein zu geringes Drehmoment der AFM, was zu Anpassungen am Kühlkreislauf für die RFM, als auch zu Anpassung der Leistungskennfelder für die Zyklusvermessung der AFM führte.

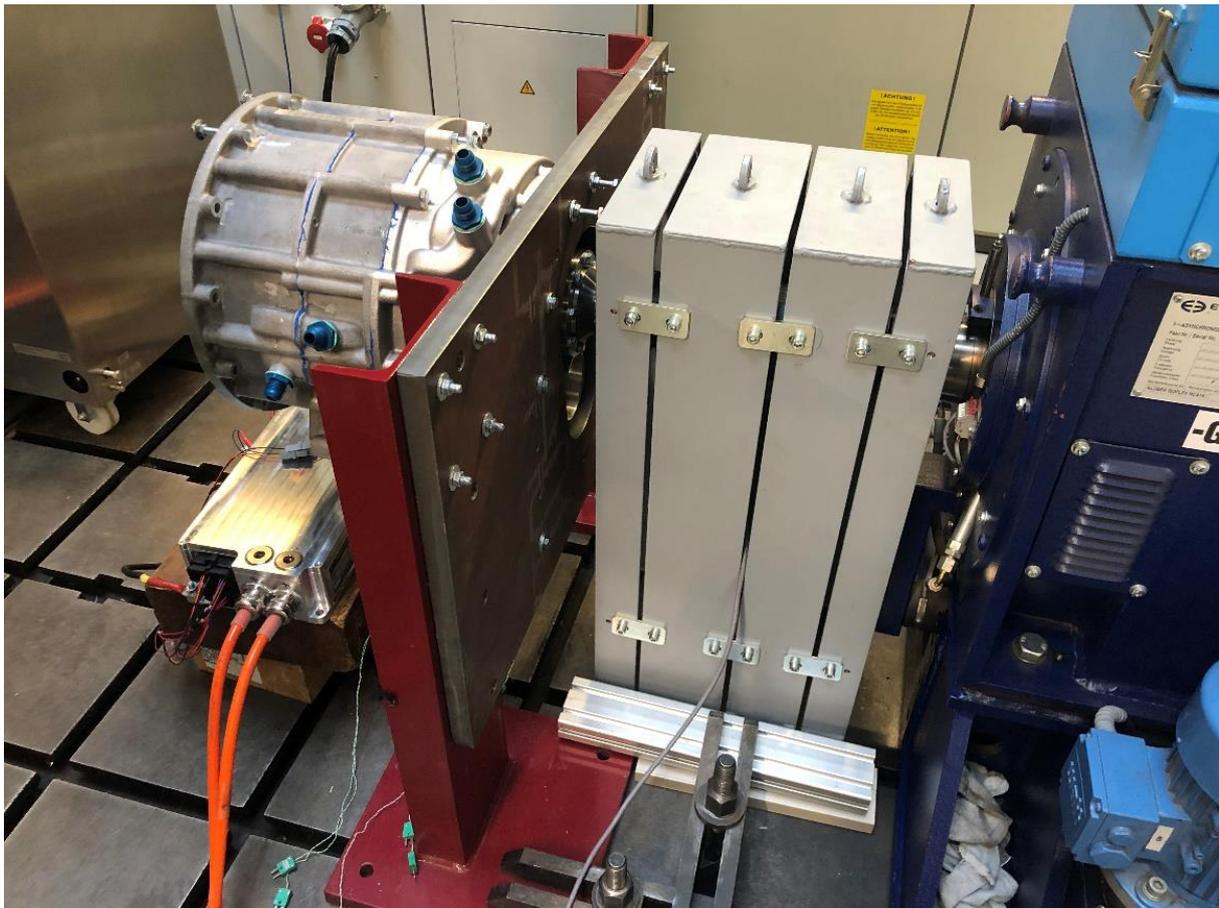


Abbildung 37 - Vermessungsaufbau, Maschine und Inverter (links), Lastmaschine (rechts)

3.6.2 Funktionstests am Prüfstand

Für die fahrzeugunabhängigen Tests wurden die Komponenten auf einen eigens von VDS angefertigten Träger (Prüfrack) montiert (s. Abb. 38) und gemeinsam mit den Projektpartnern verkabelt bzw. verrohrt. Er beinhaltet alle elektro-mechanischen Komponenten und Kühlkreisläufe. Auf diesem Träger wurden die Batterie, Umrichter und die Motoren in Betrieb genommen. Ebenfalls wurde die erste Version der Getriebesteuerungssoftware darauf entwickelt. Diese steuert die Getriebefunktionen und ist hier auch für die Ansteuerung der beiden Elektromotore verantwortlich. Die hierbei entwickelte Kabelbaumsystematik wurde später auch im Fahrzeug umgesetzt werden.



Abbildung 38 - eCVT-Antriebsstrang montiert auf Träger (Prüfrack)

3.6.3 Lasterprobung am Prüfstand

Für die nachfolgenden Tests mit Antrieb und Last wurde der oben beschriebene Träger bei VDS auf einem Prüfstand montiert. Antriebsseitig wurde ein Elektromotor mit einer Momentenmesswelle angekoppelt. Abtriebsseitig wurde eine Wirbelstrombremse angekoppelt. In Abbildung 39 im Hintergrund orange umrandet erkennbar. Der Prüfstand verfügt neben einer Steuerung für Umrichter und Bremse über eine Datenerfassung für die Messung der vielzähligen Signale und CAN-Botschaften. Weiters tauscht sich diese Prüfstandssteuerung mit dem Getriebesteuergerät (in Abbildung 39 blau umrahmt) aus.

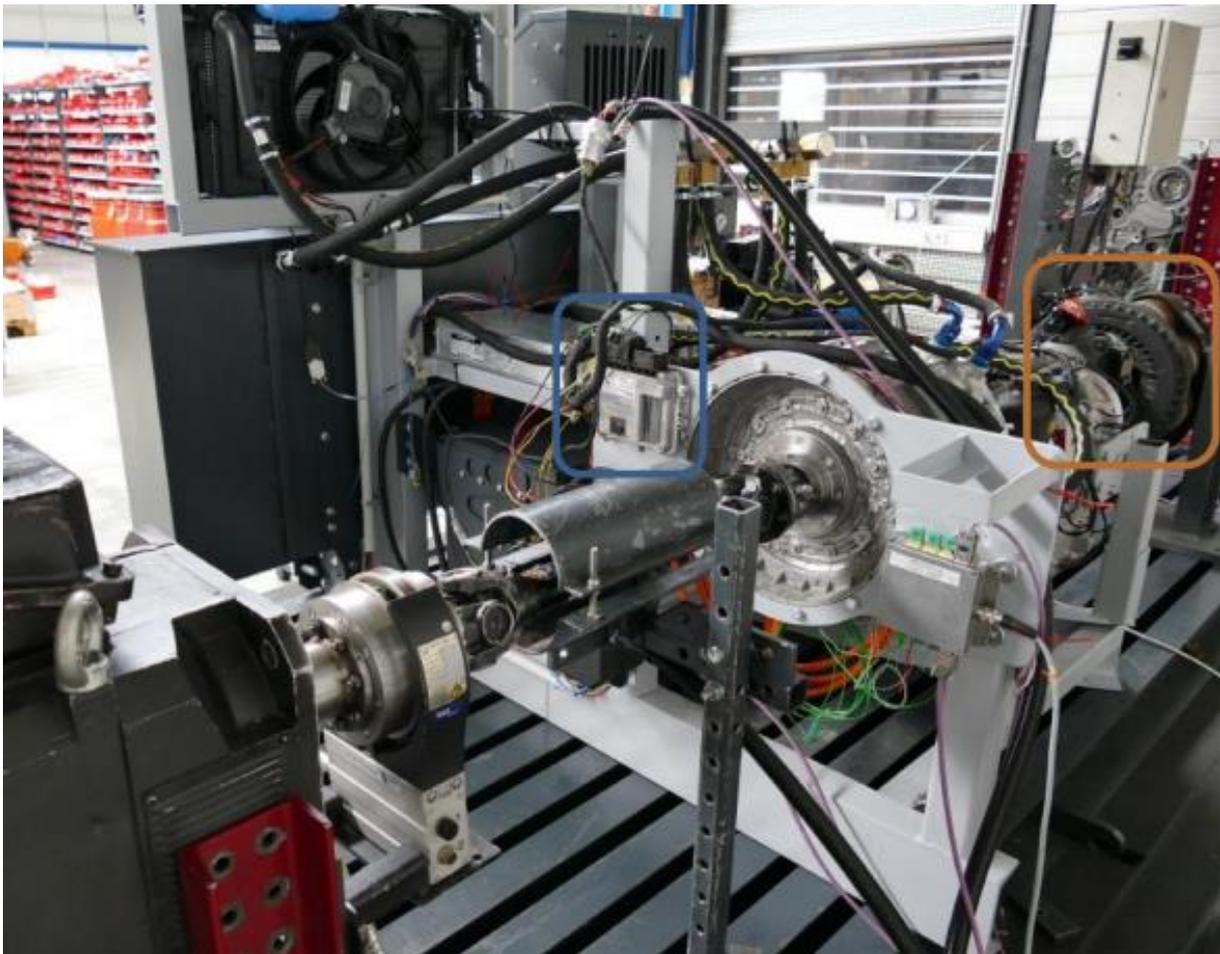


Abbildung 39 - eCVT Komponenten samt Prüfack auf Prüfstand für Lasterprobung

Die hier verwendete Antriebsart entspricht dem Modus B – BEV Driving und Modus D – Normal Driving:

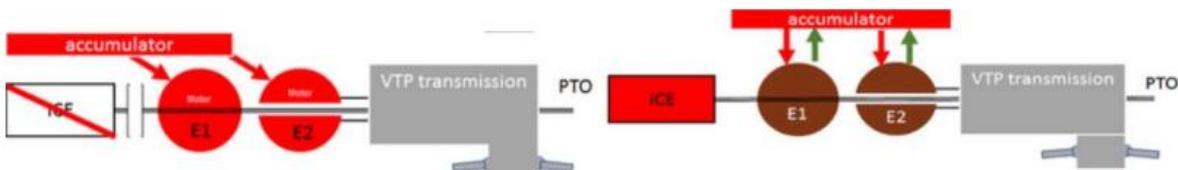


Abbildung 40 - Schaubild der einzelnen Antriebsarten am Prüfstand

Der Motor E1 hat im eingekoppelten Zustand die gleiche Drehzahl wie der Antrieb.

3.6.4 Resümee der Funktionstests am Prüfstand

- Da das dynamische Verhalten des Prüfstandes mit dem 150kW E-Motor und der Wirbelstrombremse anders als im Fahrzeug ist, macht eine Feinabstimmung in der Regel am Prüfstand problematisch. Im Idealfall treten die hier beobachteten Störungen im Fzg nicht auf, weil zB der Diesel gedrückt werden kann, was mit dem E-Motor kaum möglich ist und auch die Masse des Fahrzeugs eine schnelle Änderung der Getriebeabtriebsdrehzahl verhindert.
- Das Getriebe zusammen mit den E-Motoren funktioniert im Prinzip.
- Die Schmierölversorgung und Druckölversorgung ist ausreichend und stabil.
- Einkuppeln mit automatischer E1-Synchronisierung funktioniert sehr gut
- Die Kupplung vom eCVT zum Diesel ist beim Auskuppeln problematisch, da sie nur bei einem Momentennulldurchgang öffnet. Hier wurde in der E1-Ansteuerungssoftware eine entsprechende Funktion implementiert.

3.7 Integration in das Versuchsfahrzeug

Die elektro-mechanische Getriebeeinheit mit externen Pumpen für die Arbeits- und Lenkhydraulik wurden bei VDS in das Versuchsfahrzeug eingebaut. Die Komplettierung mit allen zusätzlich erforderlichen Systemkomponenten wie das Batteriepaket inkl. Sidebox und dem primären Kühlkreislauf, die Umrichter mit dem sekundären Kühlkreislauf und alle Verkabelungen, Verrohrungen und Verschlauchungen wurden gemeinsam mit den Projektpartnern durchgeführt (siehe Abb. 41). Reform hat ein Konzept für die eCVT spezifische Anpassung der Hydraulikfunktionen Lenkung, Bremse, Aktuatorik und Kühlung erstellt. Mit der Aktivierung der Steuerung des Fahrzeugantriebes und der Nebenantriebe wurde das Fahrzeug in enger Abstimmung zwischen Reform und VDS in Betrieb genommen und getestet. Aufgrund der Komplexität und des eingeschränkten Bauraumes konnte eine vollwertige Arbeitshydraulik nicht dargestellt werden. Um eine effiziente Abarbeitung zu gewährleisten, wurde das Fahrzeug mehrfach überstellt.



Abbildung 41- Impressionen des Fahrzeugs und Antriebsstranges nach der Integration

Für die Integration ins Fahrzeug wurden bei Bitter noch folgende Konstruktionstätigkeiten durchgeführt:

- Eine Neukonstruktion der Motorlagerung, da die bestehende Motorlagerung durch die geänderte Geometrie des Antriebsstranges nicht mehr zu verwenden war.
- Konstruktion eine Halterahmens der Inverter für die Aufhängung am Fahrzeugrahmen inklusiv eines Hitzeschutzblechs, zum Schutz der Inverter vor der Strahlungswärme der Abgasanlage.
- Montagekonzept Antriebseinheit und Kühlkreislauf, Aufbereitung von Montageanleitungen
- Abstimmungen mit VDS betreffend Fahrzeugaufbau
- Des Weiteren wurde eine Dokumentation über den Einbau der Antriebseinheit und den Aufbau des Kühlsystems erstellt.

Als eine Herausforderung beim Aufbau des Kühlsystems gestaltete sich die schlechte Verfügbarkeit der benötigten Komponenten, deswegen mussten mehrmals Anpassungen an der Verschlauchung wegen Lieferschwierigkeiten bei den Kühlerschläuchen durchgeführt werden.

Ebenso wie beim Prüfstand wurde der Kühlkreislauf des Fahrzeuges von Bitter Mitarbeitern in der Werkshalle von VDS aufgebaut und unter Vakuum befüllt.

4 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

4.1 Erprobung, Bewertung und Verwertung

4.1.1 Vergleichsfahrten zum direkten Getriebevergleich

Das Prototyp Fahrzeug wurde zur Vergleichsfahrt überstellt und entsprechend vorbereitet. Es wurde eine zur Ausgangsmessung vergleichbare Fahrzeugkonfiguration auf zulässiges Gesamtgewicht aufgebaut. Bereifung, Beladung und Tankfüllstand wurden angepasst. Es wurden mehrere Verbrauchsmessfahrten durchgeführt, sowohl unbeladen als auch im beladenen Zustand im Leistungsmodus „ECO“. Obwohl die Genauigkeit des Messverfahrens unzureichend ist, lassen sich trotzdem Rückschlüsse ziehen, weil die Messfehler von beiden Messungen sich bei einem direkten Vergleich weitgehend aufheben.

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

	Alpha 1 H750	Alpha eCVT
Gemessenes Gewicht ohne Fahrer:	VA: 2765 kg / HA: 1508 kg	VA: 2936 / HA: 1859
Kilometerstand vor der Messung:	2279 km	N/A
Kilometerstand nach der Messung:	2307 km	N/A
Außentemperatur:	8 °C	5-6 °C
Kontrollierter Reifendruck:	7,0 bar	7,0 bar
Fahrbahn:	trocken	trocken
Fahrzeit:	33 min.	33 min
Gemessener Verbrauch:	7,1 Liter	6,4 Liter
Durchschnittsgeschwindigkeit:	50,9 km/h	50,9 km/h
Verbrauch pro 100 km:	25,35 L/100km	22,85 L/100km

Abbildung 42- Verbrauchsmessung Nr. 1 unbeladen im Fahrmodus ECO Drive, Alpha 1 H750 zu Alpha eCVT

	Alpha 1 H750
Gemessenes Gewicht ohne Fahrer:	VA: 2765 kg / HA: 1508 kg
Kilometerstand vor der Messung:	2307 km
Kilometerstand nach der Messung:	2335 km
Außentemperatur:	9 °C
Kontrollierter Reifendruck:	7,0 bar
Fahrbahn:	trocken
Fahrzeit:	33 min.
Gemessener Verbrauch:	7,7 Liter
Durchschnittsgeschwindigkeit	50,9 km/h
Verbrauch pro 100 km:	27,5 L/100km

Abbildung 43 - Verbrauchsmessung Nr. 2 unbeladen im Fahrmodus Power

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

	Alpha 1 H750	Alpha eCVT
Gemessenes Gewicht ohne Fahrer:	VA: 3355 kg / HA: 4169 kg	VA: 3077 kg / HA: 4482 kg
Kilometerstand vor der Messung:	2335 km	N/A
Kilometerstand nach der Messung:	2364 km	N/A
Außentemperatur:	10 °C	5-6 °C
Kontrollierter Reifendruck:	7,0 bar	7,0 bar
Fahrbahn:	trocken	Trocken
Fahrzeit:	35 min.	35 min.
Gemessener Verbrauch:	9,3 Liter	7,1 Liter
Durchschnittsgeschwindigkeit:	49,71 km/h	48 - 49,71 km/h
Verbrauch pro 100 km:	32,06 L/100km	25,36 - 24,5 L/100km

Abbildung 44 - Verbrauchsmessung Nr. 3 beladen im Fahrmodus ECO Drive, Alpha 1 H750 zu Alpha eCVT

	Alpha 1 H750
Gemessenes Gewicht ohne Fahrer:	VA: 3355 kg / HA: 4169 kg
Kilometerstand vor der Messung:	2364 km
Kilometerstand nach der Messung:	2392 km
Außentemperatur:	10 °C
Kontrollierter Reifendruck:	7,0 bar
Fahrbahn:	trocken
Fahrzeit:	35,5 min.
Gemessener Verbrauch:	9,5 Liter
Durchschnittsgeschwindigkeit:	47,32 km/h
Verbrauch pro 100 km:	33,93 L/100km

Abbildung 45 - Verbrauchsmessung Nr. 4 beladen im Fahrmodus Power

Der direkte Vergleich im ECO-Drive-Modus und mit unbeladenen Fahrzeug zeigt eine Kraftstoffersparnis von ca. 2,5 Liter auf 100km. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das umgebaute Fahrzeug unbeladen um knapp 500kg schwerer ist, was die Energiebilanz des eCVT mindert.

Beim Vergleich im beladenen Zustand ist eine deutlich höhere Kraftstoffersparnis zu beobachten. Bei annähernd gleicher Beladung sind auf der Testrunde Werte zwischen 6,7 und 7,56 Liter zu messen und das ist eine deutliche Ersparnis gegenüber den 9,3-9,5 Liter beim Dieselantrieb auf der Testrunde. Umgelegt auf 100km wären das ~25 Liter/100km beim eCVT gegenüber ~32 Liter/100km beim Diesel.

Das eCVT-Getriebe ist gegenüber dem konventionellen Diesel Antriebsstrang deutlich energieeffizienter.

4.1.2 Verwertungsstrategie

Alle teilnehmenden Unternehmen haben sich für die Kooperation in eCVT entschieden, weil sie Fortschritte gegenüber dem eigenen Stand der Technik und sogar gegenüber dem allg. SdT erreichen können. Dieser Wissenszuwachs ermöglicht nachfolgend die Entwicklung von weiteren Produkten und Dienstleistungen, die entlang der Wertschöpfungskette im eCVT-Konsortium (mit REFORM als OEM an der Spitze) und auch gegenüber Dritten angeboten werden können. Spezifisch gehen bedeutet dies:

Die Ergebnisse des CVT-F&E-Projektes bieten der **Nordfels GmbH** eine weitere Möglichkeit sich erfolgreich am Markt zu positionieren. Maßnahme die Kompetenz zu stärken sind u.a:

- Website: Präsentation des Projektes auf der Website inkl. Detailinformationen zum Thema Batterieentwicklung für HYBRID-Fahrzeuge;
- Social Media: Laufende und abschließende Informationen auf Facebook und LinkedIn um Aufmerksamkeit für das Projekt aber auch das Unternehmen zu generieren;
- Unternehmensfolder: Integration des Projektes in Druckunterlagen und Integration des Projektes als Beispiel für gelungene Entwicklungsprojekte in Unternehmenspräsentation.

4.1.3 Publikationen

17th OpenFOAM Workshop, Cambridge UK: Präsentation der CFD-Kühlkörpersimulation des SiC Inverters aus dem eCVT-Getriebe

4.1.4 Presseaussendungen

BMK: <https://infothek.bmk.gv.at/ait-entwickelt-effizientes-stufenlosgetriebe-fuer-e-nutzfahrzeuge/>

GSV (Newsletter s. 7): <https://www.a3ps.at/>

Automobil Cluster/Biz-Up: <https://www.automobil->

[cluster.at/partnerunternehmen/partnernews/detail/news/auf-dem-weg-zum-klimavertraeglichen-nutzfahrzeug](https://www.automobil-cluster.at/partnerunternehmen/partnernews/detail/news/auf-dem-weg-zum-klimavertraeglichen-nutzfahrzeug)

Ecarandbike: <https://ecarandbike.com/auf-dem-weg-zum-klimavertraeglichen-nutzfahrzeug/>

1truck.tv: <https://1truck.tv/?id=11&item=4015>

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Regionews:

https://www.regionews.at/newsdetail/Auf_dem_Weg_zum_klimavertraeglichen_Nutzfahrzeug-496770

APA-Science: <https://science.apa.at/power-search/5285032156259279664>

Austrian Roadmap 2050: <https://www.roadmap2050.at/auf-dem-weg-zum-klimavertraeglichen-nutzfahrzeug/>

5 Kontaktdaten

ProjektleiterIn

Institut/Unternehmen

Kontaktadresse (Adresse, Tel/Fax, e-mail; Webpage des Instituts/Unternehmen; Webpage des gegenständlichen Projekts, falls vorhanden)

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

Dipl.-Ing. Simon Frank, IWE

Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH

Lamprechtshausener Straße 61, 5282 Ranshofen/Braunau

+43 (0) 664 8251062

+43 (0) 50550-6952

simon.frank@ait.ac.at

www.ait.ac.at

Dipl.-Ing. Christian Sandner

Miba eMobility GmbH

R. Mitterbauer-Str.3, 4655 Vorchdorf

+43 (0) 7614 6541 3313

+43 (0) 664 4510194

christian.sandner@miba.com

www.miba.com

DI(FH) Peter Scheuermann

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 2, 1210 Wien

+43 (0) 664 8251380

+43 (0) 50550-6529

Peter.scheuermann@ait.ac.at

www.ait.ac.at

Energieforschungsprogramm - 05. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Markus Naglstrasser
Bitter GmbH
Gewerbestraße 12, 4522 Sierning
+43 (0) 676 832 432 72
+43 (0) 7259 32223 72
naglstrasser@bitter.at
www.bitter.at

Dr. Hubert Mitterhofer
Linz Center of Mechatronics GmbH
Altenberger Straße 69, 4040 Linz
+43 (0) 664 8481 274
+43 (0) 732 2468 6085
hubert.mitterhofer@lcm.at
www.lcm.at

DI(FH) Helmut Freudenthaler
Reform-Werke Bauer & Co. Gesellschaft m.b.H.
Haidenstraße 40, 4600 Wels
+43 (0) 664 60 231 155
+43 (0) 7242 232 1155
helmut.freudenthaler@reform.at
www.reform.at

Franz Fuka
VDS Getriebe GmbH
Gewerbepark 6, 4493 Wolfers
+43 (0) 7253 88080 17
franz.funka@vds-getriebe.at
www.vds-getriebe.at

Dr. Hartmut Popp
Miba Battery Systems
Maximilianstraße 4, 4190 Bad Leonfeld
+43 (0) 660 40 90 629
+43 (0) 7213 20 400 9445
hartmut.popp@miba.com
www.mibabattery.com