



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 12. Dezember 2025

Elektrischer Allradantrieb leichter Nutzfahrzeuge

Ökologischer und allradbetriebener 3.5t Elektro-Gütertransport-Lieferwagen



Quelle: © Flux Mobility AG, 2025



FLUX

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Subventionsempfänger/innen:

Flux Mobility AG
CH-8406 Winterthur
www.fluxmobility.ch

MAN Truck & Bus (Schweiz) AG
CH-8112 Otelfingen
<https://www.man.eu/ch/de/ueber-uns/unternehmen/man-schweiz/man-schweiz-.html>

Berner Fachhochschule
CH-2560 Nidau
www.bfh.ch

Novidem Swiss AG
CH-5632 Buttwil
www.novidem.ch

Tiefbauamt Kanton Basel-Stadt
CH-4053 Basel
www.bs.ch/

Autor/in:

Andreas Freese, Flux Mobility AG, andreas.freese@fluxmobility.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502405-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt „Elektrischer Allradantrieb leichter Nutzfahrzeuge“ adressiert eine zentrale Herausforderung im Nutzfahrzeugmarkt: Während Städte, Gemeinden und Unternehmen ihre CO₂-Emissionen reduzieren müssen, fehlen bislang elektrische leichte Nutzfahrzeuge, die gleichzeitig hohe Traktion, grosse Anhängelasten und zuverlässige Performance unter alpinen und winterlichen Bedingungen bieten. Konventionelle Elektro-Transporter stossen insbesondere bei Steigungen, tiefen Temperaturen, rutschigen Fahrbahnen sowie im Anhängerbetrieb an ihre Grenzen. Gleichzeitig gehören Allradfahrzeuge im Alpenraum und in Skandinavien zu den meistnachgefragten Konfigurationen – im Segment der leichten elektrischen Nutzfahrzeuge existierte bislang jedoch keine seriennahe Lösung.

Vor diesem Hintergrund demonstriert das Projekt die erfolgreiche Entwicklung und Integration eines vollelektrischen Dual-Motor-Allradantriebs auf Basis der Flux-Plattform („Flux 2.0“). Das entwickelte Fahrzeug verfügt über zwei unabhängig ansteuerbare Permanentensynchronmotoren sowie eine 112-kWh-NMC-Batterie. Die Dual-Motor-Architektur ermöglicht den Verzicht auf mechanische Komponenten klassischer Allradsysteme und reduziert dadurch Verluste im Antriebsstrang. Gleichzeitig wird eine hohe Gesamtperformance erreicht, ohne den Energieverbrauch signifikant zu erhöhen.

Zu den zentralen Innovationen zählen:

- eine modulare, seriennahe Dual-Motor-Architektur mit direkter Achskopplung und hoher Regelpräzision,
- die Rekuperation über beide Achsen, welche Effizienz und Fahrstabilität insbesondere bei Bergabfahrten und auf rutschigem Untergrund verbessert,
- ein neu entwickelter, vormontierbarer Geräteträger, der sowohl AWD- als auch RWD-Varianten ermöglicht und deutliche Vorteile für Industrialisierung und Variantenvielfalt bietet,
- sowie ein robustes Sicherheits- und Thermomanagement, das auch den Dauerbetrieb unter hoher Last und im Anhängerbetrieb erlaubt.

Das Fahrzeug wurde umfassend geprüft – sowohl auf Prüfständen und Testgeländen (u. a. DTC Vauffelin) als auch im realen Strasseneinsatz unter Sommer- und Winterbedingungen. Die Tests umfassten Temperaturen von -12 °C bis +35 °C, Fahrten auf Schnee, Eis, nasser und trockener Fahrbahn sowie Anhängerbetrieb bis zu 8,0 t Gesamtzuggewicht. Zudem wurden standardisierte Vergleichsfahrten mit einer heckgetriebenen Flux-Variante (RWD) durchgeführt.

Quantitative Ergebnisse zum Energieverbrauch zeigen, dass sich der elektrische Allradantrieb und der Heckantrieb auf einem sehr ähnlichen Effizienzniveau bewegen. Über mehrere standardisierten Testfahrten auf einer repräsentativen 120-km-Referenzstrecke lag der gemessene Verbrauch – abhängig von Jahreszeit, Witterung und Fahrprofil – typischerweise im Bereich von rund 30 bis 35 kWh/100 km.

Unter winterlichen Bedingungen (-4 °C, nasse bzw. teilweise schneebedeckte Fahrbahn) wurden Verbrauchswerte von 34.2 kWh/100 km (AWD) und 34.36 kWh/100 km (RWD) gemessen. Bei sommerlichen Bedingungen (ca. 16 °C, trockene Fahrbahn) lagen die Werte bei 31.2 kWh/100 km (AWD) und 30.0 kWh/100 km (RWD). Weitere Messfahrten zeigten sowohl leicht niedrigere als auch leicht höhere Verbrauchswerte des AWD gegenüber dem RWD, ohne einen systematischen Unterschied erkennen zu lassen. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass der elektrische Allradantrieb keinen relevanten Mehrverbrauch verursacht; die beobachteten Abweichungen liegen im Bereich weniger Prozentpunkte und sind primär auf Fahrstil, Witterungseinflüsse und Komfortverbraucher zurückzuführen.

Neben der Energieeffizienz zeigten die Tests deutliche Vorteile des Allradantriebs in der Fahrdynamik: Das Anfahrverhalten sowie die Traktion auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn waren signifikant verbessert, während der Wirkungsgrad des Frontmotors unter realen Fahrbedingungen bis zu 98 % bei 80 km/h erreichte. Sämtliche EMV-, Hochvolt- und Sicherheitsprüfungen wurden ohne kritische Befunde bestanden.



Die Ergebnisse belegen, dass der elektrische Dual-Motor-Allradantrieb technisch ausgereift, sicher und wirtschaftlich darstellbar ist. Besonders gut funktioniert haben die deutlichen Traktions- und Stabilitätsgewinne unter anspruchsvollen Bedingungen bei gleichzeitig praktisch unverändertem Energieverbrauch sowie die hohe Modularität und Industrialisierungsreife der Plattform. Herausfordernd bleiben zusätzliche Systemkosten durch die zweite Antriebseinheit, die statische Drehmomentverteilung (60/40) sowie weiteres Optimierungspotenzial im thermischen Management unter extremer Dauerlast.

Insgesamt schliesst das Projekt eine wesentliche Marktlücke und zeigt, dass elektrische Allrad-Nutzfahrzeuge bereits heute einen substanziellen Beitrag zur Dekarbonisierung und zur Erweiterung der Einsatzflexibilität in anspruchsvollen Einsatzumgebungen leisten können.



Résumé

Le projet « Transmission intégrale électrique pour véhicules utilitaires légers » répond à un défi majeur du marché des véhicules utilitaires : alors que les villes, les collectivités et les entreprises doivent réduire leurs émissions de CO₂, il manque encore des véhicules utilitaires légers électriques capables d'offrir une traction élevée, de fortes capacités de remorquage et des performances fiables dans des conditions alpines et hivernales. Les utilitaires électriques conventionnels atteignent rapidement leurs limites sur les fortes pentes, à basse température, sur chaussées glissantes ou en mode remorquage. Parallèlement, les véhicules à transmission intégrale figurent parmi les configurations les plus demandées dans les régions alpines et en Scandinavie, alors qu'aucune solution électrique proche de la production n'existait jusqu'à présent dans ce segment.

Dans ce contexte, le projet démontre le développement et l'intégration réussis d'un système de transmission intégrale entièrement électrique à deux moteurs, basé sur la plateforme Flux (« Flux 2.0 »). Le véhicule est équipé de deux moteurs synchrones à aimants permanents commandés indépendamment (90 kW à l'avant, 100 kW à l'arrière) ainsi que d'une batterie NMC de 112 kWh. L'architecture bimoteur permet de renoncer aux composants mécaniques des transmissions intégrales classiques (arbre de transmission, boîte de transfert), réduisant ainsi les pertes dans la chaîne cinématique, tout en offrant de hautes performances sans augmentation significative de la consommation d'énergie.

Les principales innovations comprennent :

- une architecture bimoteur modulaire et proche de la production, avec un contrôle précis du couple,
- la récupération d'énergie sur les deux essieux, améliorant l'efficacité et la stabilité, notamment en descente et sur chaussée glissante,
- un porte-équipements préassemblé nouvellement développé, compatible avec les variantes AWD et RWD et avantageux pour l'industrialisation,
- ainsi qu'une architecture de sécurité et de gestion thermique robuste, adaptée au fonctionnement continu sous forte charge et au remorquage.

Le véhicule a été soumis à des essais approfondis sur bancs d'essai et sur pistes (notamment au DTC de Vauffelin), ainsi qu'en conditions réelles sur route, en été comme en hiver. Les essais ont couvert des températures de -12 °C à +35 °C, des conditions de neige, glace, routes humides et sèches, ainsi que le remorquage jusqu'à 8,0 t de poids total roulant. Des essais comparatifs standardisés ont également été réalisés avec une version Flux à propulsion arrière (RWD).

Les résultats quantitatifs de consommation énergétique montrent que la transmission intégrale électrique et la propulsion arrière présentent des niveaux d'efficacité très similaires. Sur plusieurs trajets d'essai standardisés de 120 km, la consommation mesurée se situait généralement, selon la saison, les conditions météorologiques et le style de conduite, entre environ 30 et 35 kWh/100 km.

En conditions hivernales (-4 °C, chaussée humide ou partiellement enneigée), des valeurs de 34,2 kWh/100 km (AWD) et 34,36 kWh/100 km (RWD) ont été relevées. En conditions estivales (environ 16 °C, chaussée sèche), les consommations étaient de 31,2 kWh/100 km (AWD) et 30,0 kWh/100 km (RWD). D'autres essais ont montré tantôt des valeurs légèrement inférieures, tantôt légèrement supérieures pour la version AWD, sans tendance systématique identifiable. Les résultats confirment ainsi que la transmission intégrale électrique n'entraîne pas de surconsommation significative ; les écarts observés, de l'ordre de quelques pourcents, sont principalement dus au style de conduite, aux conditions extérieures et aux consommateurs de confort.

Outre l'efficacité énergétique, les essais ont mis en évidence des avantages marqués de la transmission intégrale en matière de dynamique de conduite : le comportement au démarrage et la traction sur neige, glace et chaussée humide ont été nettement améliorés, tandis que le rendement du moteur avant a atteint jusqu'à 98 % à 80 km/h en conditions réelles. L'ensemble des essais EMV, haute tension et sécurité ont été validés sans constat critique.



Les résultats démontrent que la transmission intégrale électrique à deux moteurs est techniquement aboutie, sûre et économiquement viable. Les gains significatifs en traction et en stabilité, combinés à une consommation d'énergie pratiquement inchangée, ainsi que la forte modularité et la maturité industrielle de la plateforme constituent des atouts majeurs. Les défis restants concernent principalement les coûts supplémentaires liés au second moteur, la répartition de couple statique (60/40) et le potentiel d'optimisation du système thermique en charge continue extrême.

Dans l'ensemble, le projet comble une lacune importante du marché et montre que les véhicules utilitaires légers électriques à transmission intégrale peuvent dès aujourd'hui apporter une contribution significative à la décarbonation et à l'extension des domaines d'utilisation dans des environnements exigeants.



Summary

The project “Electric All-Wheel Drive for Light Commercial Vehicles” addresses a key challenge in the utility vehicle market: while cities, municipalities and companies must reduce CO₂ emissions, there is still a lack of electric light commercial vehicles that combine high traction, substantial towing capacity and reliable performance under alpine and winter conditions. Conventional electric vans quickly reach their limits on steep gradients, at low temperatures, on slippery roads or during trailer operation. At the same time, all-wheel-drive vehicles are among the most demanded configurations in alpine regions and Scandinavia, yet no production-ready electric solution had previously been available in this segment.

Against this background, the project demonstrates the successful development and integration of a fully electric dual-motor all-wheel-drive system based on the Flux platform (“Flux 2.0”). The vehicle is equipped with two independently controlled permanent-magnet synchronous motors (90 kW at the front axle and 100 kW at the rear axle) and a 112 kWh NMC battery. The dual-motor architecture eliminates the mechanical components of conventional AWD systems (such as driveshafts and transfer cases), thereby reducing drivetrain losses while delivering high overall performance without a significant increase in energy consumption.

Key innovations include:

- a modular, production-ready dual-motor architecture with precise torque control,
- energy recuperation on both axles, improving efficiency and vehicle stability, especially on downhill sections and slippery surfaces,
- a newly developed pre-assembled equipment carrier enabling both AWD and RWD variants and offering clear industrialisation benefits,
- and a robust safety and thermal management architecture suitable for continuous high-load operation and trailer towing.

The vehicle underwent extensive testing on test benches and proving grounds (including DTC Vauffelin) as well as in real-world road operation during both summer and winter. Test conditions covered temperatures from –12 °C to +35 °C, driving on snow, ice, wet and dry roads, and trailer operation up to a gross train weight of 8.0 t. In addition, standardised comparison tests were conducted against a rear-wheel-drive (RWD) Flux vehicle.

Quantitative energy consumption results show that the electric all-wheel-drive and rear-wheel-drive configurations operate at a very similar efficiency level. Across several standardised 120 km reference runs, measured consumption typically ranged—depending on season, weather conditions and driving style—between approximately 30 and 35 kWh/100 km. Under winter conditions (–4 °C, wet or partially snow-covered roads), consumption values of 34.2 kWh/100 km (AWD) and 34.36 kWh/100 km (RWD) were recorded. Under summer conditions (around 16 °C, dry roads), values of 31.2 kWh/100 km (AWD) and 30.0 kWh/100 km (RWD) were measured. Further test runs showed both slightly lower and slightly higher consumption values for the AWD variant compared to the RWD, without any systematic trend. Overall, the results confirm that the electric AWD system does not cause a relevant increase in energy consumption; the observed differences—within a few percent—are primarily attributable to driving behaviour, environmental conditions and comfort-related loads.

Beyond energy efficiency, the tests revealed clear advantages of the AWD system in terms of driving dynamics: starting behaviour and traction on snow, ice and wet roads were significantly improved, while the front motor achieved efficiencies of up to 98% at 80 km/h under real-world conditions. All EMC, high-voltage and safety tests were successfully completed without critical findings.

The results demonstrate that the electric dual-motor AWD system is technically mature, safe and economically feasible. Major strengths include the substantial gains in traction and stability under demanding conditions combined with virtually unchanged energy consumption, as well as the high modularity and industrial readiness of the platform. Remaining challenges relate mainly to the additional cost of the



second drive unit, the static torque split (60/40) and further optimisation potential in thermal management under extreme continuous load.

Overall, the project closes a significant market gap and shows that electric all-wheel-drive light commercial vehicles can already make a meaningful contribution to decarbonisation and to expanding operational flexibility in demanding environments.



Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Das vollelektrische Allradfahrzeug von Flux Mobility zeigt im direkten Vergleich mit seinem Heckantrieb Pendant, eine besser Fahrdynamik und eine leicht bessere Energieeffizienz – bei voller Alltagstauglichkeit im kommunalen Einsatz.
- Die getestete Elektro-Allradlösung kombiniert technologische Reife mit praxisnaher Alltagstauglichkeit - ideal für planbare Einsätze in anspruchsvollem Gelände, bei Schnee oder innerstädtisch, wo emissionsfreie Mobilität zunehmend gefordert ist.
- Das Projekt schliesst eine bisher ungelöste Marktlücke im Segment leichter elektrischer Allradfahrzeuge und schafft eine nachhaltige, serienreife Alternative zu Dieselmodellen – ein konkreter Beitrag zur Umsetzung der Schweizer Klimaziele.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	5
Summary	7
Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....	9
Inhaltsverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	13
1.1 Kontext und Motivation	13
1.2 Projektziele	15
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion.....	15
2.1 Grundlagen	15
2.1.1. Der Flux Umbau.....	15
2.1.2. Flux 2.0 «AWD».....	15
2.1.3. Spezifikationen Flux 2.0.....	16
2.1.4. Systembeschreibung	16
2.1.4.1. E/E Architektur	17
2.1.4.2. Mechanischer Aufbau	18
2.2 Vorgehen	20
2.2.1. Ausgangslage	20
2.2.2. Vorgehen	20
2.3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	22
2.3.1. Anforderungsanalyse.....	22
2.3.2. Komponentenevaluation	23
2.3.3. Mechanische Entwicklung	23
2.3.4. Softwareentwicklung.....	29
2.3.5. Prototypenaufbau	30
2.3.6. Systemtests	31
2.3.7. Gesamtfahrzeugtests.....	33
2.3.7.1. Überprüfung der Anforderungen.....	33
2.3.7.2. Überprüfung der gesetzlichen Anforderungen	38
2.3.7.3. Umwelterprobung	38
2.3.8. Gegenüberstellung der Systeme im Strasseneinsatz	39
2.3.8.1. Spezifikation Testfahrzeuge	39
2.3.8.2. Streckendefinition	40
2.3.8.3. Rahmenbedingungen Testfahrten	40
2.3.8.4. Testfahrten.....	41



2.3.8.5.	Fahrverhalten und Traktion	42
2.3.8.6.	Energieeffizienz und Rekuperation.....	43
2.3.8.6.1.	Testresultate	43
2.3.8.6.2.	Fazit	45
2.3.8.7.	Ergebnisse	46
2.3.9.	Optimierung für die Serienproduktion	46
2.4	Ergebnisse.....	47
2.5	Diskussion	48
3	Schlussfolgerungen und Ausblick	49
3.1	Schlussfolgerungen	49
3.1.1.	Technische Innovationen – Was besonders gut funktioniert hat.....	49
3.1.2.	Was man aus heutiger Sicht anders machen würde	49
3.1.3.	Lohnt sich der elektrische Allradantrieb – und wann nicht?	50
3.2	Optimierungspotenzial – technisch und wirtschaftlich	51
4	Nationale und internationale Zusammenarbeit	52
5	Publikationen und andere Kommunikation	53
6	Literaturverzeichnis	54
7	Interne Kontrolle des Projekts (vertraulich)	55
7.1	Projektorganisation	55
7.2	Qualitätsmanagement	55
7.3	Risikomanagement	55
7.4	Kosten- und Terminüberwachung	55
7.5	Ergebnis der internen Kontrolle	56
8	Interner Datenmanagementplan und Open Access-Strategie/Daten/Modell (vertraulich)	56
8.1	Datenerfassung und -struktur	56
8.2	Datensicherung und Zugriff	56
8.3	Datenqualität und Nachvollziehbarkeit	57
8.4	Open-Access-Strategie	57
8.5	Datenweitergabe und Nachnutzung	57



Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current, Wechselstrom
AWD	All Wheel Drive, Allradantrieb
BFE	Bundesamt für Energie
BFH	Berner Fachhochschule
CAN	Controller Area Network
CAD	Computer Aided Design
DC	Direct Current, Gleichstrom
DTC	Dynamic Test Center AG
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ERP	Enterprise Resource Planning, betriebsinternes Planungssystem
HVDU	High Voltage Distribution Unit, Hochvoltverteilereinheit
HV	Hochvolt
ISO	Internationale Organisation für Normung
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt (Batteriezellchemie)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
RWD	Rear Wheel Drive, Heckantrieb
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe (Regelwerke / Fahrzeugnormen)
USP	Unique Selling Proposition (Alleinstellungsmerkmal)
VCU	Vehicle Control Unit, Steuereinheit des Fahrzeuges
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (standardisierter Fahrzyklus)



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Die Ausgangslage zur Entwicklung eines elektrischen leichten Nutzfahrzeugs ist geprägt von verschiedenen Faktoren. Einerseits haben immer mehr Unternehmen und Städte das Ziel, ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Andererseits gibt es auch gesetzliche Vorgaben zur Reduktion von Schadstoffemissionen, insbesondere in städtischen Gebieten. Hier spielen leichte Nutzfahrzeuge eine wichtige Rolle, da sie oft für den Warentransport oder Arbeiten innerhalb der Städte eingesetzt werden. Elektrische leichte Nutzfahrzeuge finden ihren Einsatz in verschiedenen Bereichen, in denen robuste und leistungsstarke Fahrzeuge benötigt werden, die zudem umweltfreundlich und wirtschaftlich betrieben werden müssen. Zu den häufigsten Einsatz-bereichen gehören:

- **Liefer- und Zustelldienste in städtischen Gebieten:** Elektrische Nutzfahrzeuge können emissionsfrei betrieben werden und sind somit eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Diesel-Transportern. Durch den Allradantrieb können auch schwierige Strecken und Witterungsbedingungen bewältigt werden.
- **Wartungs- und Reparaturarbeiten:** Insbesondere in abgelegenen oder schwer zugänglichen Gebieten wie Baustellen oder Waldgebieten werden leichte Allrad-Nutzfahrzeuge benötigt. Die elektrische Variante ist hier besonders geeignet, da sie geräuscharm und emissionsfrei betrieben werden kann.
- **Tourismus:** Für den Transport von Personen und Gepäck auf abgelegenen oder unebenen Strecken können elektrische leichte Allrad-Nutzfahrzeuge ebenfalls eingesetzt werden, beispielsweise in Gebieten mit schlechter Infrastruktur oder in den Bergen.

Allradfahrzeuge erfreuen sich im Alpenraum oder in Skandinavien einer hohen Beliebtheit. In Skandinavien machen die Allradversion bis zu 83% der Verkäufe aus. (Swisscamion, 2023)

Es ist zu erkennen, dass es sich bei den Allrad Nutzfahrzeugen, aus Sicht eines grossen OEMs, um einen Nischenmarkt handelt. Weiter verschärft sich dies durch die Kostensicht. Bei elektrischen Allradfahrzeugen wird üblicherweise ein Dual-Motor Konzept eingesetzt. Dabei wird für die Front und Heckachse ein dedizierter Elektromotor verbaut, wodurch die Zusatzkosten höher sind, als dies bei einem Verbrenner der Fall wäre. Zudem ergeben sich weitere komplexe Schnittstellen im mechanischen, Hochvolt- und Kommunikationssystemen. Entsprechend komplex ist die Integration in ein Baukastensystem eines OEM. Insgesamt bieten elektrische leichte Allrad-Nutzfahrzeuge eine vielseitige und nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Diesel-Fahrzeugen, die in vielen verschiedenen Einsatzbereichen eingesetzt werden können. Besonders im Bereich der leichten Allrad-Nutzfahrzeuge gibt es derzeit noch eine Lücke auf dem Markt, die durch die Neuentwicklung von Flux Mobility geschlossen werden kann. Durch die Möglichkeit, die Fahrzeuge individuell an die Anforderungen der Kunden anzupassen, wird ein massgeschneidertes und effizientes Nutzfahrzeug geschaffen, das es in dieser Form bisher nicht gibt.



Die Vorteile einer erhöhten Traktion ist bei konventionell betriebenen Fahrzeugen bereits lange bekannt und erbracht. Aufgrund der vielen Getriebestufen und Umlenkungen haben allradangetriebene Verbrennerfahrzeuge eine geringere Effizienz als reine front- oder heckgetriebene Fahrzeuge. Dieser Nachteil kann bei einem elektrischen Fahrzeug durch ein Dual-Motor Konzept mit dedizierten Achsantrieben verbessert werden. Weiter bietet ein elektrisches Allradfahrzeug weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung:

- Unterschiedliche Getriebeübersetzung an der Vorder-, bzw. Hinterachse erlauben es die Frontachse für hohe Geschwindigkeiten und Heckachse für das Anfahrverhalten zu optimieren. Dadurch kann ein effizienter Einsatz in einem weiten Arbeitsbereich gewährleistet werden.
- Durch den Frontantrieb kann die Rekuperation verbessert werden. Dies kommt insbesondere bei bergab Fahrten oder bei Fahrten auf rutschigem Untergrund zu tragen.

Eine besondere Herausforderung für Elektrofahrzeuge sind schwere Anhängelasten. Elektrofahrzeuge werden üblicherweise mit einem 1-Gang Getriebe konzipiert. Dies hat zur Folge, dass ein Kompromiss zwischen Anfahrvermögen (Antriebsmoment) und maximal erreichbarer Geschwindigkeiten (Motorleistung, erreichbare Drehzahl) gefunden werden muss.

Durch den zusätzlichen Frontantrieb steht dem Fahrzeug markant mehr Antriebsmoment und -leistung zur Verfügung, was das Ziehen von Anhängern mit bis zu 3.5t ermöglicht.

Mit der Entwicklung eines elektrischen Allradfahrzeugs können die Einsatzgebiete eines elektrischen Nutzfahrzeugs erweitert werden. Dies ist insbesondere bei Anwendungen, welche eine erhöhte Traktion erfordern, relevant.

- Blaulichtfahrzeuge mit einer erhöhten Anforderung an die Geländegängigkeit und Geschwindigkeit (Bsp. Feuerwehr)
- Ziehen von schweren Anhängelasten
- Höhere Effizienz in topologisch anspruchsvollen Geländen (Bsp. Passfahrten) und über einen grösseren Geschwindigkeitsbereich

Die Motivation hinter der Allrad-Neuentwicklung von elektrischen leichten Nutzfahrzeugen liegt darin, den Markt für elektrische Nutzfahrzeuge weiter zu erschliessen und die Nachfrage nach umweltfreundlichen und kosteneffizienten Transportlösungen branchenübergreifend zu bedienen. Insbesondere im Bereich des schweren Einsatzes, in dem eine hohe Geländetauglichkeit und Allradantrieb gefragt sind, gibt es derzeit noch keine elektrische Option. Durch die Neuentwicklung wird die Lücke auf dem Markt geschlossen werden und eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Diesel-Nutzfahrzeugen geboten.



1.2 Projektziele

Das Projekt wird Erkenntnisse in den folgenden Punkten liefern:

- Die Integration eines Allradantriebs in ein Elektrofahrzeug erfordert spezielle Anforderungen an die Steuerungs- und Regelungssysteme, um die Leistung und Traktion effektiv zu verwalten und gleichzeitig die Batterielebensdauer zu maximieren.
- Die Auswahl und Integration der Komponenten, einschliesslich der Motoren, Batterien und Steuerungselemente, spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung eines leistungsfähigen und effizienten elektrischen Allradantriebs.
- Die Entwicklung von intelligenten Energiesparfunktionen, wie z.B. eine adaptive Regelung der Antriebsleistung, kann die Effizienz des elektrischen Allradantriebs verbessern und die Batterielebensdauer verlängern.
- Die Kombination von Allradantrieb und Elektromobilität kann eine grössere Reichweite und höhere Flexibilität in anspruchsvollen Fahrbedingungen bieten, wie z.B. bei schwerem Gelände oder bei schlechten Wetterbedingungen.
- Die Kosten für die Entwicklung von elektrischen Allradfahrzeugen sind derzeit noch höher als bei konventionellen Allradfahrzeugen, aber mit zunehmender Produktion und Skalierung wird erwartet, dass diese Kosten sinken werden.

Insgesamt bieten elektrische Allradfahrzeuge eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge und können eine wichtige Rolle bei der Umstellung auf nachhaltige Mobilität spielen.

2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

2.1 Grundlagen

2.1.1. Der Flux Umbau

Flux Mobility rüstet konventionell angetriebene MAN TGE auf elektrische Fahrzeuge um. Dabei wird der komplette Dieselantriebsstrang ausgebaut und die betroffenen Systeme durch die entsprechenden elektrischen äquivalente ersetzt.

Ein Elektrofahrzeug stellt andere Anforderungen an die Bedienung der Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Fahrer. Daher werden die Bedienelemente und Anzeigen auf die entsprechenden Bedürfnisse angepasst.

2.1.2. Flux 2.0 «AWD»

Der Flux 2.0 ist das Serienfahrzeug von Flux Mobility. Der Entwicklungsschritt hat zum Ziel, die Flux-Plattform fit für den Nischenmarkt zu machen und neue USPs zu erschliessen. Dazu wird eine zweite Antriebsachse ins Fahrzeug integriert, wodurch das Fahrzeug als Allrad betrieben werden kann. Weiter wird ein leistungsstarker elektrischer Nebenantrieb integriert. Dieser dient zum Betrieb von Aufbauten, wie beispielsweise ein Reinigungsfahrzeug und betreibt ein Hydraulikaggregat. Daneben werden im Entwicklungsschritt zahlreiche Herstelloptimierungen vorgenommen.

Die Integration der Frontantriebsachse und der damit verbundene Entwicklungsaufwand bzgl. Die Steuerung, die Regelung sowie die energetische Betrachtung wird im Rahmen dieses Förderprojektes unterstützt.



2.1.3. Spezifikationen Flux 2.0

Tabelle 1 Spezifikationen Flux 2.0

Batteriekapazität	112 kWh (Ampherr NMC)
Batterieleistung	112 kW kontinuierliche Leistung 250 kW Spitzenleistung
Frontmotor	Cascadia eDM Permanentsynchron Motor
Leistung FWD	90 kW kontinuierliche Leistung 150 kW Spitzenleistung
Antriebsmoment FWD	1'140 Nm kontinuierliches Drehmoment 2'280 Nm Spitzendrehmoment
Heckmotor	Dana TM4 SUMO LD HV1200 Permanentsynchron Motor
Leistung RWD	100 kW kontinuierliche Leistung 200 kW Spitzenleistung
Antriebsmoment RWD	2'444 Nm kontinuierliches Drehmoment 5'640 Nm Spitzendrehmoment
Laden	22 kW (AC) 112kW (DC)

2.1.4. Systembeschreibung

Durch den Umbau zum elektrischen Fahrzeug werden beim Verbrenner-Basisfahrzeug sämtliche Komponenten entfernt, welche mit dem ursprünglichen Antriebsstrang in Verbindung standen. Dazu zählen neben dem Motor, auch die Treibstoffaufbereitung, Abgasnachbehandlung und diverse Support Systeme. Die ausgebauten Systeme werden durch elektrische äquivalente Systeme ersetzt und simuliert. Dadurch entstehen neben Kommunikationsschnittstellen (CAN, digitale Ein- und Ausgänge) auch diverse physikalische Schnittstellen, wie Drehmomentübertragung, Vakuumerzeugung, Kühlwasser und weitere.



2.1.4.1. E/E Architektur

In Abbildung 1 ist das Vernetzungsdiagramm mit den Schnittstellen zum Basisfahrzeug. Die Steuerung des Antriebssystems wird von einer zentralen Steuerung Vehicle Control Unit (VCU) übernommen. Diese steuert sämtliche Systeme vom Antrieb über das Thermomanagement der Batterie und bis hin zur Schnittstelle mit dem Basisfahrzeug.

Die Leistung wird von der Batterie an die High Voltage Distribution Unit (HVDU) transferiert und von dort an die verschiedenen Verbraucher verteilt.

Zur Integration der Fronteinheit ergeben sich somit im Wesentlichen vier Schnittstellen:

- **Steuerung**
Die Steuerung übernimmt die Kontrolle über die zusätzliche Antriebseinheit. Die Aufteilung des geforderten Antriebsmoment für das Gesamtfahrzeug ist eine wesentliche Fragestellung des Projekts.
- **Mechanische Integration**
Volumetrisch muss die Antriebseinheit in den vorhandenen Bauraum untergebracht werden. Die auftretenden Momente und Kräfte müssen geeignet in das Fahrzeug eingeleitet werden.
- **Drehmomentübertragung**
Das Drehmoment wird von der Antriebseinheit direkt auf die Vorderräder übertragen. Entsprechend ist die Integration eines Achsendifferential in der Antriebseinheit vorzusehen
- **Hochvolt-System Integration**
Damit die Antriebseinheit mit Energieversorgt wird, ist die HVDU um den entsprechenden Verbraucher zu erweitern und abzusichern.

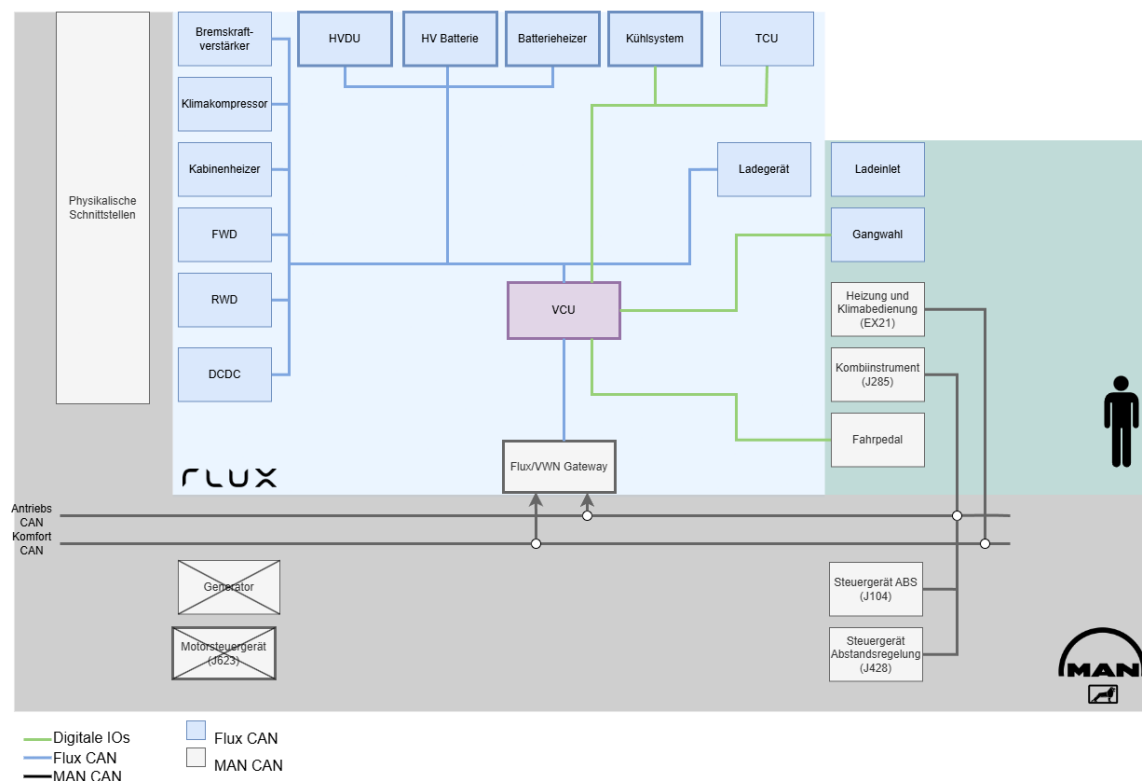


Abbildung 1 Vernetzung und Schnittstellen der Flux Fahrzeuge



2.1.4.2. Mechanischer Aufbau

Die notwendigen elektrischen und mechanischen Komponenten werden in den, durch den Ausbau des Dieselaggregat freigewordenen Bauraum, integriert. Dies beschränkt sich im Wesentlichen auf den Motorraum und den Unterboden.

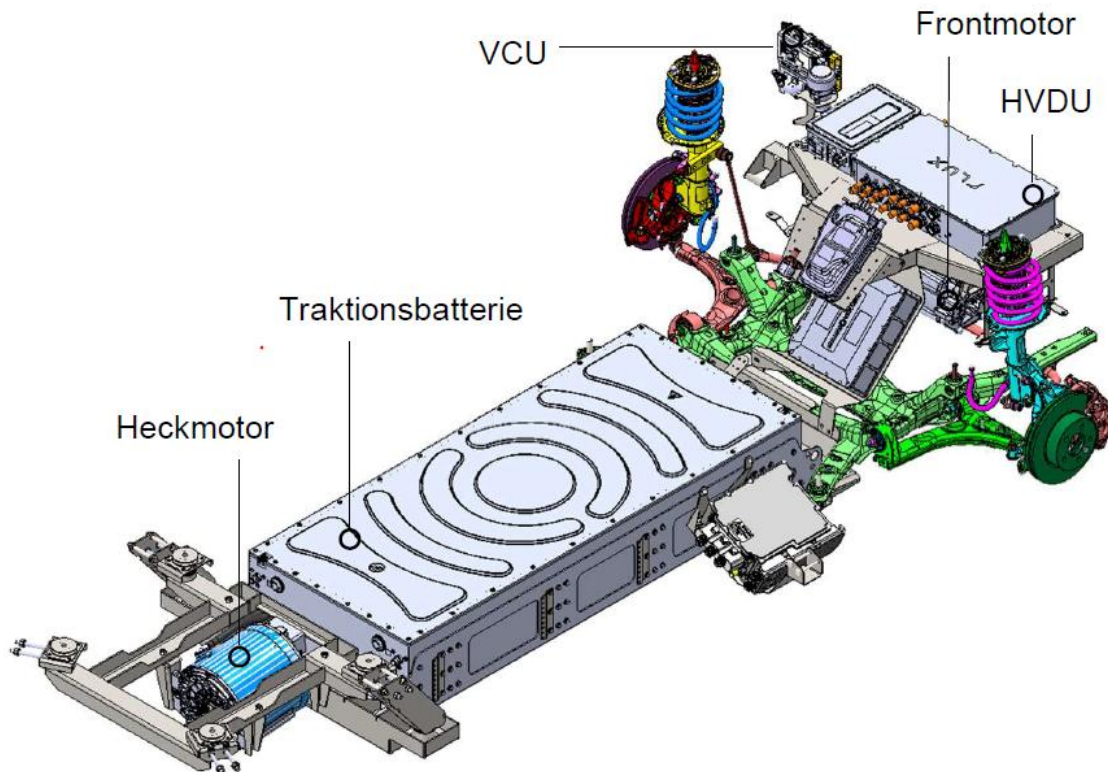


Abbildung 2 Gesamtkonzept Allradantrieb

Die Frontachse wird durch einen eigenen Motor angetrieben, somit ist keine Kardanwelle in Längsrichtung erforderlich und die Batterie kann zentral im Fahrzeug integriert werden. Direkt hinter der Batterie wird der Heckmotor platziert. Im Motorraum über dem Frontmotor finden die restlichen Komponenten Platz.

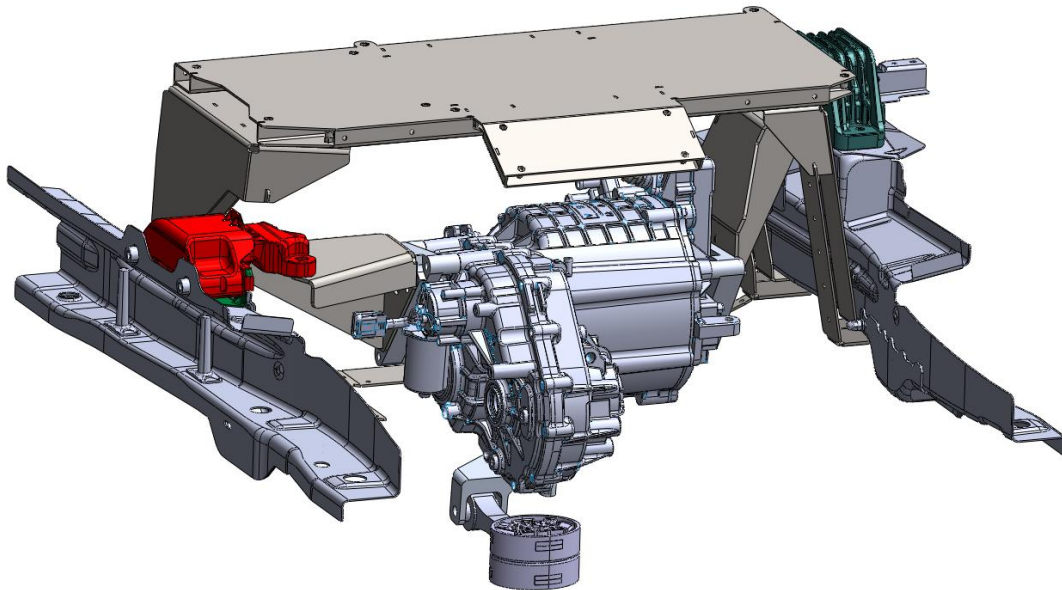


Abbildung 3 Mechanische Integration des Frontmotors

In Abbildung 3 ist die mechanische Integration des Frontmotors ersichtlich. Der Frontmotor wird links und rechts an denselben Befestigungspunkten wie der quer eingebaute Dieselmotor befestigt. Weiter wird die Pendelstütze wie im Dieselfahrzeug zur Stabilisierung der Frontmotors verwendet.

Über dem Motor kann der Inverter für den Frontmotor, sowie die weiteren HV-Komponenten verbaut werden. Dieser Träger lässt sich auch ohne Frontmotor nutzen.



2.2 Vorgehen

2.2.1. Ausgangslage

Im Rahmen des Förderprojekts wird die Integration der elektrischen Frontantriebseinheit entwickelt. Nutzfahrzeuge mit Allradantrieb stellen auf den ersten Blick einen Nischenmarkt dar, insbesondere im Bereich des elektrischen Allradantriebs. Aufgrund der topografischen und klimatischen Anforderungen sind solche Fahrzeuge aber besonders in der Schweiz und im alpinen Raum stark nachgefragt.

2.2.2. Vorgehen

Der Entwicklungsprozess bei Flux Mobility sieht fünf Phasen vor, welche unterschiedliche Ziele und Fragestellungen beantwortet.

Innovation

- Klärung der Kunden- und Marktanforderungen
- Klärung der gesetzlichen Anforderungen
- Definition der Nutzungsszenarien
- Analyse der Technischen Machbarkeit
- Technische Grobkonzept

Konzeptphase

- Auslegung der Teilsysteme
- Bauteilevaluation der relevanten Komponenten
- Erstellung der konzeptionellen Schemata

Entwicklung

- Umsetzung der Konzepte in den klassischen Disziplinen
 - Mechanische Konstruktion
 - Elektrische Entwicklung
 - Softwareentwicklung
- Erstellung der Herstellunterlagen
- Komponententests

Realisierung

- Aufbau des Prototyps
- Systemtests
- Gesamtfahrzeugtests



Industrialisierung

- Optimierung für die Serienproduktion
- Anpassung von Fertigungsverfahren und Lieferantenaufbau
- Erstellen der Fertigungsunterlagen

Der Entwicklungsprozess ist als Bestandteil eines Problemlösungszyklus zu verstehen, wodurch der Prozess mehrfach durchlaufen werden kann und die Trennung der einzelnen Schritte nicht immer scharf ist.

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Entwicklungsprozess. Innerhalb des Förderprojekts werden die Schritten 1 (Innovation) bis 4 (Realisieren) betrachtet.



Abbildung 4 Entwicklungsprozess bei Flux Mobility



2.3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.3.1. Anforderungsanalyse

Als Basisanforderungen wird gestellt, dass die bisherigen, bewährten Systeme und Komponenten der «First Mover» beibehalten werden können. Auf die Spezifikation der Frontantriebseinheit hat dies einen wesentlichen Einfluss bezüglich Systemspannung, Leistung, mechanischer Aufbau/Bauraum, Kühlung und Ansteuerung. Zudem müssen die Systeme am Markt verfügbar sein.

Es ist davon auszugehen, dass ein Allrad-Fahrzeug vorwiegend im alpinen Raum eingesetzt wird. Dabei ist mit langanhaltenden und steilen Anstiegen zu rechnen. Als Beispiel ist hier der Flüelen Pass zu nennen, welcher während 11.5km 963m ansteigt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Steigung von 8.4%, bei einer zu erwartenden Fahrzeit von ca. 15min. Als steiles Autobahn Stück ist die San Bernadino Südrampe zu nennen. Diese steigt, während 18km um 980m, was einer durchschnittlichen Steigung von 5.4% entspricht. Kurzzeitig können Passstrassen auch deutlich steilere Passagen aufweisen.

Das Chassis der Flux Fahrzeuge ermöglicht das Ziehen von grossen Lasten. Die obige Anwendungsbeschreibung legt dar, dass anhaltenden Steilpassagen mit vollem Gesamtzugsgewicht (8.0t) zu bewältigen sind. Die Leistungs- und Drehmomentanforderung der Frontantriebseinheit ist so zu wählen, dass die Nutzungsszenarien in Kombination mit dem bestehenden Heckmotor erfüllt werden. Die Abbildung 4 verdeutlicht das durch die Frontantriebseinheit zu erbringende Dauermoment, sodass die gestellten Anforderungen erfüllt werden können.

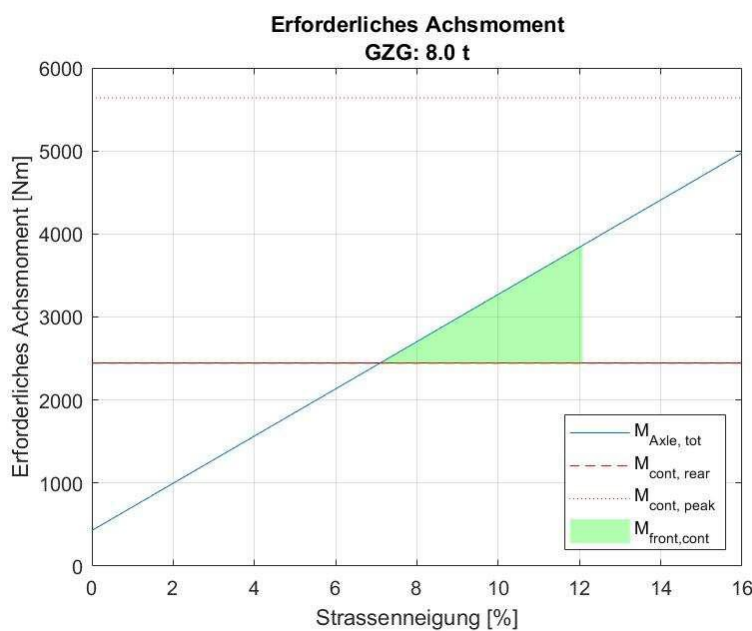


Abbildung 5 Achsmoment in Abhängigkeit der Strassenneigung. (grün: benötigtes Antriebsmoment des Frontmotor)



2.3.2. Komponentenevaluation

Die Evaluation einer geeigneten Antriebseinheit erwies sich als anspruchsvolle und zeitaufwändige Aufgabe aus verschiedenen Gründen. Flux Mobility setzt hauptsächlich Komponenten aus dem LKW- und Bussegment ein, wodurch die Systemspannung bei 655VDC (nominal) liegt. Im Vergleich dazu beträgt die übliche Systemspannung bei Personenkraftwagen bis zu 400VDC. Zudem ist ein vollintegriertes System mit Inverter, Motor und Differentialgetriebe wünschenswert, um eine reibungslose spätere Industrialisierung zu gewährleisten. Dadurch war die Auswahl begrenzt und die Abklärungen dauerten entsprechend lange. Zusätzlich haben die allgemeine Chipkrise und die Verfügbarkeit von Bauteilen einen erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit und Lieferzeiten der Antriebseinheiten. Die eingesetzte Kombination aus Inverter und Antriebseinheit von Cascadia Motion stellt einen guten Kompromiss dar, der den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Fahrzeuge werden als N2-Fahrzeuge eingesetzt, wodurch die maximale Geschwindigkeit auf 90 km/h begrenzt ist. Bei Einsatzfahrzeugen mit Blaulicht werden jedoch Geschwindigkeiten von über 120 km/h gefordert. Daher ist es wichtig, dass die Antriebseinheit auch bei hohen Geschwindigkeiten eine gute Effizienz aufweist.

2.3.3. Mechanische Entwicklung

Der Bauraum im Fond des Fahrzeugs ist bereits durch die Baugruppe Geräteträger stark ausgenutzt (siehe Abbildung 6). Die Bauraumanalyse während der Evaluation hat gezeigt, dass Konflikte zwischen der bisherigen Baugruppe und einer zusätzlichen Baugruppe für die Antriebseinheit besteht. Weiter hat es sich als schwierig erwiesen die entstehenden Drehmomente abzustützen. Entsprechend wurde ein neues Platzierungs-, Montage- und Konstruktionskonzept erarbeitet.

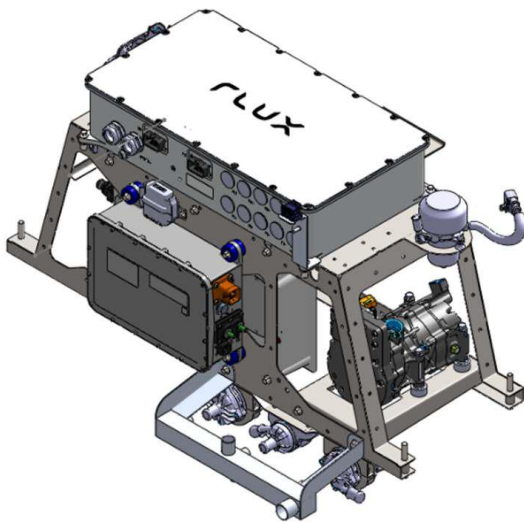


Abbildung 6 Geräteträger Flux 1.0 im CAD



Abbildung 7 Flux 1.0 Geräteträger nach Abschluss der Vormontage

Der Geräteträger kann ausserhalb des Fahrzeuges vormontiert werden und als gesamte Baugruppe im Fahrzeug montiert werden.

Die Neuentwicklung des Geräteträgers soll genau diese einfache Montagemöglichkeit ausserhalb des Fahrzeuges beibehalten. Weiter soll das Konzept so ausgelegt werden, dass mit oder ohne Frontmotor dieselben Blechteile verbaut, werden können. Wie in Abbildung 8 1. Konzept des Geräteträger Flux 2.0 inkl Frontmotor Abbildung 8 ersichtlich wurden diese Punkte im Konzept berücksichtigt.

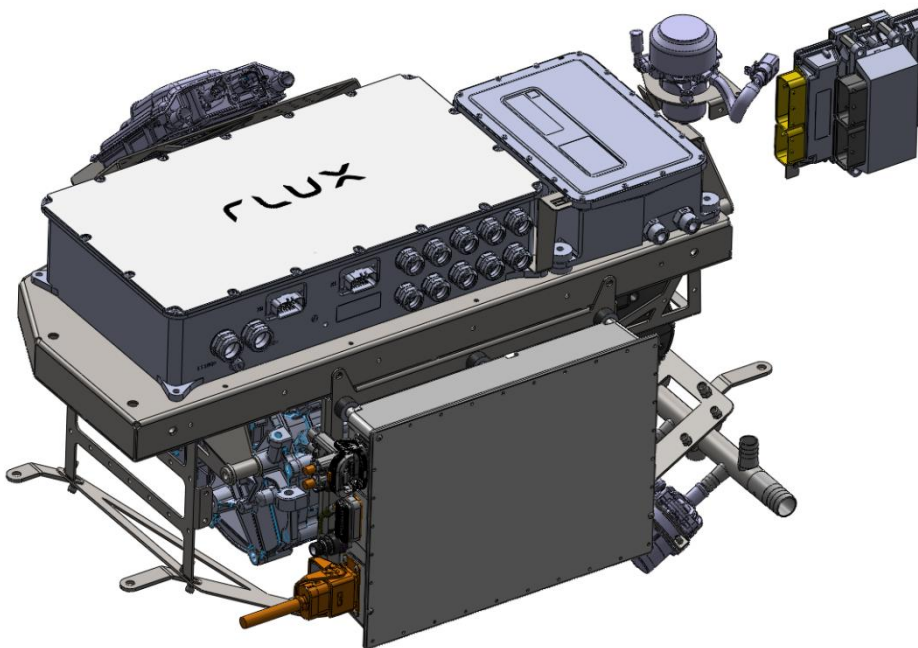


Abbildung 8 1. Konzept des Geräteträger Flux 2.0 inkl Frontmotor



Abbildung 9 Geräteträger Flux 2.0 nach der Vormontage

In Abbildung 9 ist der vormontierte Geräteträger dargestellt. Dank der Vormontage auf einer Europalette kann der Geräteträger mit einem Flurförderfahrzeug direkt in das Fahrzeug eingebracht werden.



Abbildung 10 Bauraum für den Frontmotor im Geräteträger Flux 2.0 ohne Frontmotor

Unterhalb des vormontierten Geräteträgers steht der für die Integration des Frontmotors erforderliche Bauraum zur Verfügung, wie in Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 11 Geräteträger Flux 2.0 im Fahrzeug montiert

Abbildung 11 zeigt den im Fahrzeug verbauten Geräteträger in seiner finalen Einbaulage. Die Darstellung verdeutlicht die Positionierung innerhalb des Motorraums sowie die Schnittstellen zu den angrenzenden Baugruppen.



Während der Prüfungen im DTC kam es bei der ursprünglichen Frontträgerkonstruktion zu einem Bruch der Aufhängung des Frontmotors (siehe Abbildung 12) Abbildung 12 Bruch der Aufhängung des Frontmotors infolge von Resonanzanregungen durch die ABS-Regelung.



Abbildung 12 Bruch der Aufhängung des Frontmotors

Die anschliessende FEM-Schwingungsanalyse zeigte eine Eigenfrequenz der Halterung im Bereich der ABS-Regelfrequenz (rund 10 Hz).

Durch konstruktive Anpassungen – insbesondere geschweisste Stützhülsen und steifere Seitenplatten – wurde die Steifigkeit deutlich erhöht und die Eigenfrequenz aus dem kritischen Bereich angehoben.

Bei allen weiteren Fahrversuchen trat kein strukturelles Versagen mehr auf.

Der Geräteträger wird an den Montagepunkten des quereingebauten Verbrennungsmotor montiert. Die Drehmomentabstützung erfolgt dabei am Achsträger. Die Krafteinleitung ins Fahrzeug erfolgt somit analog zu einem Dieselfahrzeug.

Die ausgeführte Konstruktion weist, wie dies die Abbildung 13 verdeutlicht, eine sehr gute Steifigkeit auf. Dies ist eine solide Basis, welche aber auch ein gutes Potential für Gewichtsoptimierung bietet. Die Integration der Antriebseinheit in das elektrische System und Kühlsystem stellen konzeptionell keine grossen Hürden dar.

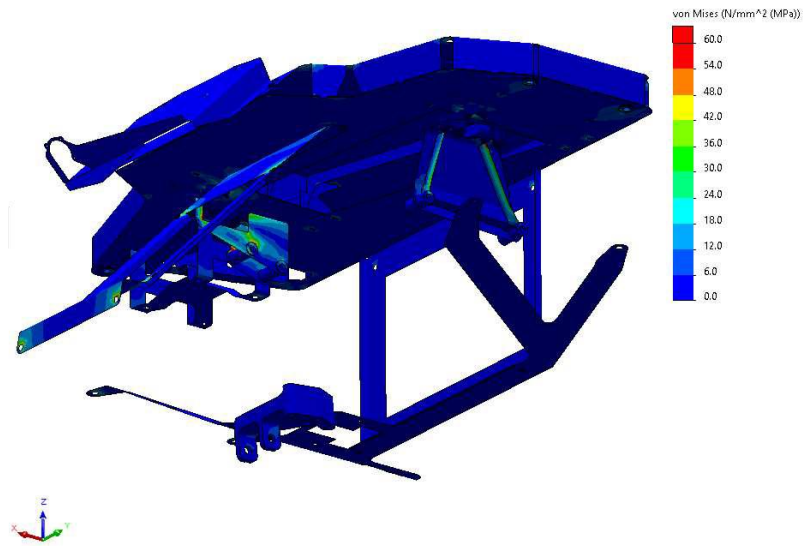


Abbildung 13 Resultat FEM Analyse des Geräteträger Flux 2.0



2.3.4. Softwareentwicklung

Steuerungstechnisch wird die Fahrsoftware von Flux Mobility um eine Antriebsachse erweitert. Dabei erfolgt die Berechnung des Drehmoments auf Fahrzeugebene und wird über ein Balancing an die jeweiligen Achsen verteilt. Dabei werden Drehmomentlimitierung aufgrund von äusseren Einflüssen, wie Eingriffe des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) oder Limitierung von Komponenten (Antriebsmotoren, Traktionsbatterie), sowohl auf Fahrzeugebene, falls notwendig, auf Achsenebene berücksichtigt. Die Abbildung 14 zeigt eine schematische Darstellung der Drehmomentberechnung in der Fahrzeugsteuerung.

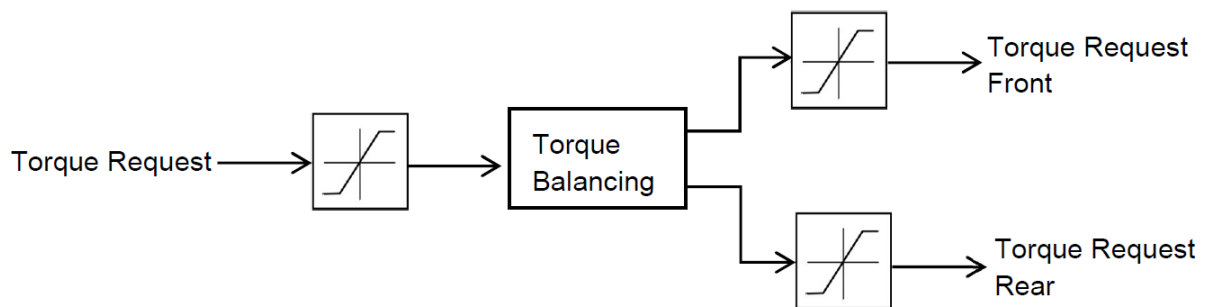


Abbildung 14 Verarbeitung des Drehmoments

Eine weitere Herausforderung ist die Implementierung eines Tempomaten, da die beiden Motoren gleich angesteuert werden müssen und sich nicht gegenseitig aufschwingen dürfen. Die Umsetzung des Tempomaten stellt sich als schwere heraus als gedacht.

Das Drehmoment Balancing wurde aufgrund der Schwierigkeiten in der Tempomat Entwicklung statisch umgesetzt. Entsprechend werden 60% des Drehmoments vom Heckmotor und 40% des Drehmomentes vom Frontmotor zur Verfügung gestellt.



2.3.5. Prototypenaufbau

Sämtliche Komponenten und Materialien sind beschafft und in Herstellung. Mit dem Aufbau des Prototyps wurde mit dem Eintreffen des Chassis am 06.03.23 begonnen. Die Montage und Inbetriebnahme konnten bis Ende April erfolgreich abgeschlossen werden.

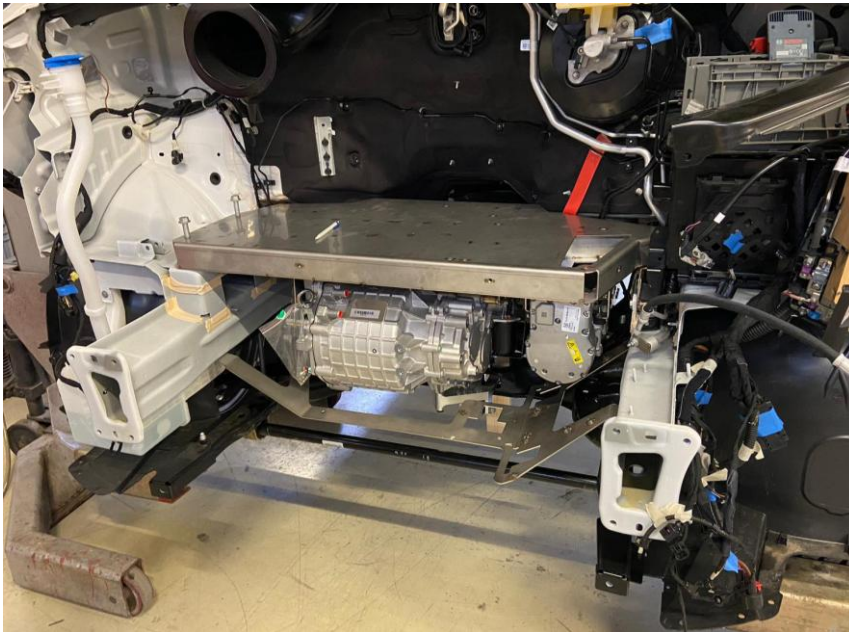


Abbildung 15 Einbau des Fronträgers

Während dem Aufbau des Fahrzeuges wurden die ersten Verbesserungspunkte aufgenommen. So wurden mehr Befestigungspunkte für HV-Kabel und Kühlwasserschlauche aufgenommen, um diese in die Weiterentwicklung mit einfließen zu lassen.

Der Aufbau des ersten Fahrzeuges verlief ohne grosse Probleme. Bei der Inbetriebnahme wurde ein besonderes Augenmerk auf den Frontmotor gelegt, da der erst des Systems mehrheitlich bestehen blieb.



Abbildung 16 AWD-Prototyp nach Fertigstellung



2.3.6. Systemtests

Im Anschluss an den erfolgreichen Aufbau des Prototyps wurden umfangreiche Systemtests durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit aller neu integrierten Komponenten zu überprüfen. Ziel dieser Tests war es, das Zusammenspiel der Subsysteme (Antrieb, Energiemanagement, Kühlung, Steuerung und Sicherheit) zu validieren und mögliche Schwachstellen vor den Gesamtfahrzeugtests zu identifizieren.

EMV-Prüfungen

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) des Fahrzeugs gemäss den geltenden Normen geprüft. Dabei standen die Aspekte Störabstrahlung, Störfestigkeit und leitungsgebundene Emissionen im Fokus.

Die Tests wurden im stationären Zustand (siehe Abbildung 17) durchgeführt. Die Messergebnisse bestätigten, dass sämtliche Komponenten innerhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Besonders die Kommunikation zwischen der Vehicle Control Unit (VCU) und den Invertern erwies sich als störungsfrei und stabil.



Abbildung 17 Prototypen Fahrzeug im EMV-Labor

Hochvoltsicherheit

Zur Überprüfung der Hochvoltsicherheit wurden Isolationsmessungen und Tests der Not-Aus-Funktionen durchgeführt. Dabei wurde sichergestellt, dass im Fehlerfall eine sichere Trennung der Hochvolt-Batterie vom Bordnetz erfolgt.

Die Isolation entsprach in allen Prüffällen den Vorgaben nach ECE R100. Zudem wurde der Erdungswiderstand gemessen und als unkritisch bewertet.



Kommunikations- und Softwaretests

Die Kommunikation über den CAN-Bus wurde umfassend geprüft. Die Drehmomentanforderungen wurden korrekt verteilt und alle Sicherheitsfunktionen (z. B. Drehmomentbegrenzung bei Fehlerzuständen) funktionierten wie vorgesehen.

Darüber hinaus wurde das Software-Update-System erfolgreich getestet, wodurch spätere Anpassungen „over the wire“ (z. B. per Diagnoseschnittstelle) möglich sind.

Thermomanagement

Das Kühlkonzept wurde unter Dauerlast überprüft. Dabei wurde die Temperaturentwicklung in den Motoren, Invertern und der Batterie gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass das System auch bei Umgebungstemperaturen von über 30 °C stabil arbeitet. Die maximale Batterietemperatur blieb innerhalb des zulässigen Bereichs. Eine Optimierung des Kühlkreislaufs wird für die Serienversion vorgesehen, um die Effizienz weiter zu verbessern.

Sicherheitsfunktionen

Zur Absicherung des Systems wurden gezielte Fehlersimulationen durchgeführt (Übertemperatur, Kommunikationsunterbruch). Die Schutzmechanismen griffen in allen Fällen ordnungsgemäss.

Besonders wichtig war die Verifikation des sicheren Zustands bei Ausfall des Frontmotors. In diesem Szenario bleibt das Fahrzeug weiterhin fahrfähig (Heckantrieb aktiv), wodurch die Betriebssicherheit gewährleistet ist.

Ergebnis

Alle Systemtests wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse bestätigen die Robustheit der gewählten Komponenten und die Zuverlässigkeit der Systemarchitektur. Damit waren die Voraussetzungen für die anschliessenden Gesamtfahrzeugtests erfüllt.



2.3.7. Gesamtfahrzeugtests

Das Gesamtfahrzeug wurde unter Unterschiedlichen Bedingungen für unterschiedliche Anforderungen getestet. Als erstes wurden die Anforderungen von Flux Mobility an das Fahrzeug überprüft. Anschließend wurde das Fahrzeug in Zusammenarbeit mit dem Dynamic Test Center (DTC) in Vauffelin auf die gesetzlichen Anforderungen überprüft. Zum Schluss wurde das Fahrzeug unter realen Bedingungen auf der Strasse getestet.

2.3.7.1. Überprüfung der Anforderungen

Nach Abschluss der Systemtests wurde das Gesamtfahrzeug hinsichtlich der im Projekt definierten technischen und funktionalen Anforderungen geprüft. Ziel war es, die Einhaltung der Leistungs-, Effizienz- und Sicherheitsziele des elektrischen Allradantriebs unter realen Bedingungen zu verifizieren.

Leistungsanforderungen

Die Überprüfung der Fahrleistungen erfolgte auf abgesperrter Teststrecke sowie im öffentlichen Straßenverkehr. Gemessen wurden Beschleunigung, maximale Steigfähigkeit und Dauerleistung unter Last.

Das Fahrzeug erreichte eine Steigfähigkeit von 9 % bei vollem Gesamtzuggewicht von 8'000 kg und maximaler Geschwindigkeit von 90km/h und erfüllte damit die Zielvorgabe. Mit reduzierter Geschwindigkeit schafft der AWD 18% Steigung mit Gesamtzuggewicht von 8'000 kg. Die Beschleunigungswerte entsprachen den Erwartungen und lagen trotz zusätzlichem Gewicht der Frontantriebseinheit auf Niveau der Heckantriebsversion.



Abbildung 18 AWD-Prototyp mit Anhänger für Leistungstest mit Gesamtzuggewicht



In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Novidem Swiss AG wurde der Frontmotor auf dem Rollenprüfstand getestet. Dabei wurden die Leistungsdaten des Frontmotors überprüft. Aufgrund der Prüfstandgrösse wurde nur der Frontmotor einzeln getestet.



Abbildung 19 AWD-Prototyp auf dem Rollenprüfstand

Folgende Leistungs- und Effizienzdaten konnten ermittelt werden.

Tabelle 2 Leistungsdaten und Wirkungsgrad des Frontmotors bei 60km/h

Drehmoment des Prüfstandes [Nm]	Leistung des Prüfstandes [kW]	Drehmoment des Frontmotors [Nm]	Leistung des Frontmotors [kW]	Batterieleistung [kW]	Wirkungsgrad [%]
61	24.3	60.2	24.3	26.3	92.5
109	43.3	105	42.8	45.0	94.0
163	64.6	155.6	63.0	66.3	94.8
216	85.6	207	84.0	87.3	95.7

Der Frontmotor erreicht die geforderten Leistungsdaten. Weiter ist auch der Wirkungsgrad wie erwartet. Der Anstieg des Wirkungsgrades ist auf die konstante Leistung aller restlichen Komponenten im Fahrzeug zurückzuführen. Dies beträgt ca. 2 kW und fällt bei kleineren Leistungen des Frontmotors entsprechend stärker ins Gewicht.



Tabelle 3 Leistungsdaten und Wirkungsgrad des Frontmotors bei 80km/h

Drehmoment des Prüfstandes [Nm]t	Leistung des Prüfstandes [kW]	Drehmoment des Frontmotors [Nm]	Leistung des Frontmotors [kW]	Batterieleistung [kW]	Wirkungsgrad [%]
58	30.6	61	32.6	33.9	96.0
81	42.6	82.8	44.3	45.8	97.0
104	54.9	104.9	56.3	57.8	97.4
125	66.9	125.3	67.3	68.7	98.0
146	77.1	145.5	78.3	79.6	98.4
157	82.7	155.8	83.9	85	98.4

Wie auch in Tabelle 3 ersichtlich, erfüllt der Frontmotor auch bei 80km/h seine Leistungsdaten. Auch hier gilt dasselbe wie bei 60km/h bezüglich des Wirkungsgrades.



Energieeffizienz und Reichweite

Im Rahmen von standardisierten Fahrzyklen (kombinierter Stadt-/Land- und Autobahnbetrieb) wurde der Energieverbrauch mit der RWD-Variante verglichen. Diverse Messungen über unterschiedliche Strecken ergaben nicht die bessere Energieeffizienz des AWD, welche nachweisbar wäre. So konnte bei Probefahrten teilweise ein leicht geringerer Verbrauch gegenüber dem RWD festgestellt werden. Jedoch kam es auch zu den gegenteiligen Resultaten, bei welchem der RWD den besseren Verbrauch aufweist.

Somit bleibt auch die nutzbare Reichweite zwischen ungefähr 240 und 300 Kilometern, welche unverändert zum Diesel ist. Dies erfüllt jedoch die Projektanforderungen.

Aufgrund der statischen Drehmomentverteilung und des Permanenten Allradantrieb gibt es im Bereich der Energieeffizienz noch weiteres Potential, welches nach dem Projekt angegangen werden kann.



Abbildung 20 AWD-Prototyp mit Anhänger an der Ladesäule während Reichweiten- und Effizienztests

Fahrverhalten und Traktion

Besonderes Augenmerk galt der Fahrstabilität und Traktion bei wechselnden Strassenbedingungen. Die AWD-Version zeigte in allen Situationen ein neutrales und sicheres Fahrverhalten.

Auf Schnee und nasser Fahrbahn konnte ein deutlich verbessertes Anfahrmoment festgestellt werden. Die elektronische Drehmomentverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse reagierte präzise und schnell, wodurch das Durchdrehen einzelner Räder verhindert wurde.



Betriebssicherheit

Alle sicherheitsrelevanten Funktionen, insbesondere das Zusammenspiel von VCU, Inverter und Bremsregelsystem, wurden geprüft. Fehlerfälle (z. B. Ausfall einer Achse, Kommunikationsunterbruch, Übertemperatur) wurden simuliert und führten jeweils zu den vorgesehenen Schutzmassnahmen. Die Anforderungen an funktionale Sicherheit nach ISO 26262 wurden im Rahmen der Projektvalidierung eingehalten.

Ergebnis

Die Überprüfung bestätigte, dass sämtliche definierten Anforderungen an den elektrischen Allradantrieb erfüllt oder übertroffen wurden. Das Fahrzeug zeigte im praktischen Einsatz ein hohes Mass an Zuverlässigkeit, Stabilität und Effizienz. Damit war die Grundlage für die nachfolgende gesetzliche Validierung geschaffen.



2.3.7.2. Überprüfung der gesetzlichen Anforderungen

Im DTC wurde überprüft, dass das Fahrzeug die gesetzlichen Anforderungen erfüllt. Dazu gehört die Überprüfung des elektronischen Stabilitätsprogramms, Spurhaltewarnsysteme, Notbremsassistentensysteme sowie verschiedene Bremstests.

Da es sich um einen Umbau eines Dieselfahrzeugs handelt und mit den Tests keine Typengenehmigung angestrebt wurde, wurde nur ein Vergleich zur Dieselvariante des Basisfahrzeuges getestet.

Für die Einzelzulassung war die Überprüfung der folgenden UNECE Artikel zwingend notwendig.

- ECE R13, umfasst die Bremssysteme
- ECE R130, umfasst Spurhaltewarnsysteme
- ECE R131, umfasst fahrzeugseitige Systeme zur Verhinderung oder Abmilderung eines Auffahrunfalls in derselben Fahrspur

Alle Prüfungen wurden vom DTC durchgeführt und erfolgreich bestanden.

2.3.7.3. Umwelterprobung

Im Anschluss an die funktionalen Systemtests wurde das Fahrzeug unter realen Einsatzbedingungen umfassend erprobt. Ziel war es, das Verhalten des Gesamtsystems in unterschiedlichen klimatischen und topographischen Bedingungen zu validieren.

Klimatische Bedingungen

Das Fahrzeug wurde bei Temperaturen zwischen -10 °C und $+35\text{ °C}$ getestet. Unter winterlichen Bedingungen wurde insbesondere das Anfahrverhalten auf verschneiter Fahrbahn, die Rekuperationsfähigkeit sowie die Funktion des Batteriethermomanagements untersucht. Das Fahrzeug zeigte auch bei tiefen Temperaturen ein stabiles Fahrverhalten.

Bei hohen Umgebungstemperaturen wurde die Kühlleistung des Systems verifiziert. Die Motor- und Invertertemperaturen blieben im zulässigen Bereich; die Batterietemperatur überschritt zu keinem Zeitpunkt die festgelegten Grenzwerte.

Topographische Tests

Ein Schwerpunkt lag auf Passfahrten und Dauersteigungen. Trotz voller Beladung und Anhängerbetrieb blieb die Leistungsabgabe konstant. Die Zusatzleistung des Frontmotors trug wesentlich zur Traktionsicherheit bei, insbesondere auf unbefestigten oder steilen Streckenabschnitten.

Ergebnis

Die Umwelterprobung bestätigte die Eignung des Fahrzeugs für den Alltagsbetrieb unter verschiedensten klimatischen und geografischen Bedingungen. Alle Systeme funktionierten zuverlässig, und es traten keine sicherheitsrelevanten oder dauerhaften Schäden auf.



2.3.8. Gegenüberstellung der Systeme im Strasseneinsatz

Das Allrad-Prototypenfahrzeug wurde mit dem heckgetriebenen Fahrzeug verglichen. Dafür wurde eine für die Schweiz repräsentative Referenzstrecke definiert.

2.3.8.1. Spezifikation Testfahrzeuge

Tabelle 4 Spezifikation Testfahrzeuge

	Flux Avior Allradantrieb	Flux Avior Heckantrieb
Fahrzeugtyp	Doppelkabine	Einzelkabine
Testgewicht	3'118 kg	2'878 kg
Achslast Vorderachse	1'782 kg	1'548 kg
Achslast Hinterachse	1'336 kg	1'330 kg
Antrieb	Allrad	Heck
Antriebsleistung	182 kW	140 kW
Batterie	Ampherr 112 kWh (NMC)	Ampherr 112 kWh (NMC)
Konfiguration Hinterachse	Supersingle	Einzelbereifung
Basischassis	5.5 t	3.5 t

Die für die Tests eingesetzten Fahrzeuge wurden hinsichtlich Ausstattung und Konfiguration weitgehend harmonisiert, um eine hohe Vergleichbarkeit sicherzustellen. Das Allradfahrzeug weist jedoch aufgrund des zusätzlich verbauten Frontmotors eine erhöhte Vorderachslast auf. Abgesehen von diesem konstruktionsbedingten Gewichtsunterschied sind die Fahrzeuge in ihren übrigen Parametern nahezu identisch ausgeführt.

Der erhöhte Achslastanteil wirkt sich grundsätzlich auf das Rekuperationsverhalten aus, da ein höheres Fahrzeuggewicht potenziell zu einer grösseren rekuperierbaren Bremsleistung führen kann. Da jedoch die Rekuperation in beiden Fahrzeugvarianten softwareseitig identisch begrenzt ist, resultiert aus dem Gewichtsunterschied kein signifikanter Einfluss auf das reale Rekuperationspotenzial. Auch das leichtere Fahrzeug erreicht unter den gegebenen Bedingungen die maximale Rekuperationsleistung.



2.3.8.2. Streckendefinition

Diese Referenzstrecke führt von Winterthur über Gossau ZH, durch das Zürcher Oberland und zurück nach Winterthur. Die Strecke ist 120km lang und weist eine Vielzahl von Streckeneigenschaften auf. So enthält sie Autobahnabschnitte, Überlandstrecken, Passstrassen und Innerortsabschnitte. Diese Strecke wurde mit den Fahrzeugkonfigurationen Allrad- und Heckantrieb sowie unterschiedlichen Zuladungen abgefahren.

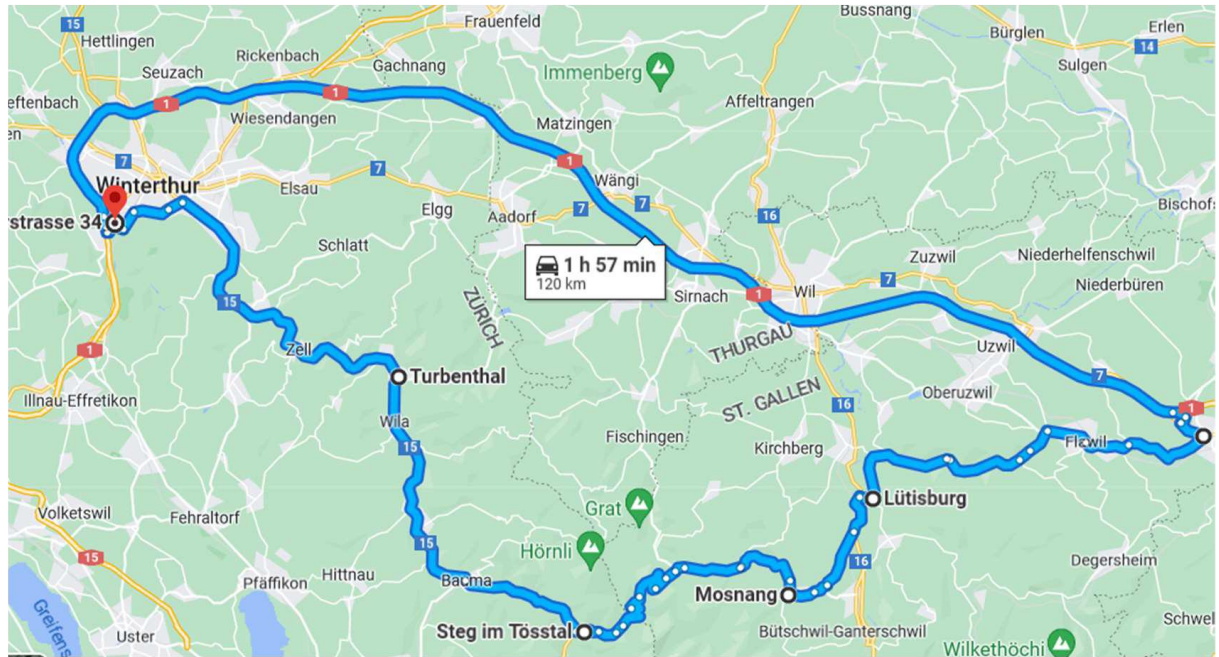


Abbildung 21 Referenzstrecke gemäss Google Maps

2.3.8.3. Rahmenbedingungen Testfahrten

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der einzelnen Testfahrten sicherzustellen, wurden einheitliche Rahmenbedingungen festgelegt und konsequent eingehalten. Vor Beginn jeder Testfahrt wurden die Fahrzeuge vollständig geladen (AC-Ladung mit 22 kW), um identische Ausgangsladezustände und damit reproduzierbare Energiebilanzen zu gewährleisten.

Da die Testfahrten nicht zeitgleich durchgeführt werden konnten, wurde besonders darauf geachtet, dass die massgeblichen Umwelt- und Betriebsbedingungen während der jeweiligen Testdurchführungen vergleichbar blieben. Dies betrifft insbesondere Aussentemperatur, Witterungseinflüsse, Verkehrsaufkommen sowie den Strassenzustand.



2.3.8.4. Testfahrten

Es wurden zu verschiedenen Jahreszeiten Testfahrten durchgeführt.

- **Winter:** Testfahrten bei Temperaturen $<5^{\circ}\text{C}$ und trockener als auch nasser/schneebedeckter Fahrbahn
- **Frühling/Herbst:** Testfahrten bei Temperaturen $<20^{\circ}\text{C}$ und trockener Fahrbahn
- **Sommer:** Testfahrten bei Temperaturen $>20^{\circ}\text{C}$ und trockener als auch nasser Fahrbahn

Die Testfahrten wurden sowohl unter winterlichen als auch unter sommerlichen Bedingungen durchgeführt. Da insbesondere die im Winter vorherrschenden Bedingungen – wie niedrige Temperaturen, reduzierte Reibwerte sowie Schnee- oder Eisbeläge – deutlich besser geeignet sind, um das fahrdynamische Verhalten und die Traktion der Fahrzeuge zu beurteilen, wurde der Grossteil der Tests bewusst in die Winterperiode verlegt. Unter sommerlichen Bedingungen lassen sich die relevanten Traktionsanforderungen hingegen auch mit einem reinen Heckantrieb problemlos bewältigen, sodass für aussagekräftige Traktionsvergleiche vor allem winterliche Fahrzustände herangezogen wurden.

~~Es wurde mehrheitlich im Winter getestet, da im Sommer die Allradfunktion nicht gleich zum Tragen kommt wie im Winter.~~



Abbildung 22 Allradfahrzeug (orange) auf Testfahrt bei winterlichen Bedingungen



2.3.8.5. Fahrverhalten und Traktion

Der elektrische Heckantrieb zeigte auf trockenen und gleichmässig griffigen Fahrbahnen ein stabiles und effizientes Anfahrverhalten. Unter winterlichen Bedingungen kam es jedoch insbesondere beim Anfahren auf glatten oder ansteigenden Abschnitten vereinzelt zu Traktionsverlusten an der Hinterachse, wodurch das Fahrzeug kurzzeitig instabil reagieren konnte.

Der elektrische Allradantrieb konnte hier deutliche Vorteile erzielen. Durch die aktive Momentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse erfolgte das Anfahren auf Schnee oder Eis kontrolliert, schlupfarm und mit minimaler Verzögerung. Das System reagierte adaptiv auf wechselnde Haftbedingungen und passte das Drehmoment nahezu verzögerungsfrei an. Auch bei Nässe oder auf ungleichmässig griffigem Untergrund im Frühjahr und Herbst blieb die Traktion konstant hoch.

Im Fahrverhalten offenbarte der elektrische Heckantrieb ein dynamisch ausgeprägtes, aber in kritischen Reibwertsituationen leicht übersteuerndes Verhalten. Insbesondere bei Lastwechseln auf nassen oder schneebedeckten Fahrbahnen war eine erhöhte Korrekturarbeit durch den Fahrer erforderlich.

Der elektrische Allradantrieb zeigte demgegenüber ein neutrales bis leicht untersteuerndes Eigenlenkverhalten mit sehr präziser Reaktion auf Lenk- und Beschleunigungsbefehle. Richtungswechsel konnten unabhängig von der Fahrbahnbeschaffenheit stabil und reproduzierbar umgesetzt werden. Besonders bei variierenden Reibwerten und niedrigen Temperaturen resultierte daraus eine signifikant verbesserte Fahrzeugkontrolle und erhöhte Fahrstabilität.

Im Winter zeigte sich somit, dass der elektrische Allradantrieb eine höhere Traktionssicherheit, ein ausgewogeneres Fahrverhalten und eine gesteigerte Gesamtfahrdynamik bietet, insbesondere unter anspruchsvollen Witterungs- und Streckenbedingungen. Dieser Vorteil ist während den anderen Jahreszeiten weit weniger ausgeprägt und die Fahrzeuge verhalten sich nahezu identisch.



2.3.8.6. Energieeffizienz und Rekuperation

Die Bewertung der Energieeffizienz sowie der Wirkung der Rekuperation erfolgte unter praxisnahen winterlichen Bedingungen im öffentlichen Strassenverkehr. Beide Fahrzeugvarianten – elektrischer Heckantrieb und elektrischer Allradantrieb – wurden auf identischen Streckenprofilen mit vergleichbarem Fahrprofil und gleicher Beladung erprobt. Besondere Berücksichtigung fanden Steigungs- und Gefällstrecken, innerstädtischer Stop-and-Go-Verkehr sowie längere Überlandabschnitte bei Umgebungstemperaturen zwischen -12 °C und -4 °C , also unter Bedingungen mit typischerweise erhöhtem Energiebedarf.

2.3.8.6.1. Testresultate

Nachfolgend werden exemplarisch ausgewählte Testergebnisse dargestellt, die die wichtigsten Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchsreihen verdeutlichen.

Tabelle 5 Testresultate 14.02.2025

	Flux Avior Allradantrieb	Flux Avior Heckantrieb
Datum	14.02.2025	14.02.2025
Zeit	09:00 Uhr	09:00 Uhr
Temperatur bei Start	-4 °C	-4 °C
Witterung	nass, teilweise schneebedeckt	nass, teilweise schneebedeckt
Distanz	120 km	120 km
Verbrauch	41.04 kWh	41.24 kWh
Verbrauch/100 km	34.2 kWh	34.36 kWh

In diesem Test (Tabelle 5) Tabelle 5 Testresultate 14.02.2025 wiesen beide Fahrzeuge nahezu identische Energieverbräuche auf. Der geringfügig niedrigere Verbrauch des Allradfahrzeugs kann auf verschiedene Einflussfaktoren zurückgeführt werden. So können bereits minimale Unterschiede in der Einstellung der Heizleistung zu Abweichungen im Energiebedarf führen. Ebenso ist es möglich, dass die verbesserten Traktionsverhältnisse des Allradantriebs unter den gegebenen Bedingungen zu einem effizienteren Kraftschluss und damit zu einem leicht reduzierten Gesamtverbrauch beigetragen haben.



Tabelle 6 Testresultate 27.06.25

	Flux Avior Allradantrieb	Flux Avior Heckantrieb
Datum	27.06.2025	27.06.2025
Zeit	09:00 Uhr	09:00 Uhr
Temperatur bei Start	16 °C	16 °C
Witterung	trocken	trocken
Distanz	120 km	120 km
Verbrauch	37.44 kWh	36.05 kWh
Verbrauch/100 km	31.2 kWh	30.04 kWh

Im Test vom 27.06.2025 (siehe Tabelle 6) wies das Fahrzeug mit Heckantrieb den geringeren Energieverbrauch auf. Der höhere Verbrauch des Allradfahrzeugs ist in diesem Fall primär auf Unterschiede im Fahrverhalten der jeweiligen Testfahrer zurückzuführen.

Der Fahrer des Allradfahrzeugs wählte ein deutlich dynamischeres Fahrprofil, das durch stärkere und häufigere Beschleunigungsvorgänge gekennzeichnet war. Dadurch entstanden höhere kurzfristige Leistungsanforderungen an den Antriebsstrang, was unmittelbar zu einem erhöhten Energiebedarf führte.

Im Gegensatz dazu wurde das Fahrzeug mit Heckantrieb mit einem gleichmässigeren und weniger leistungsintensiven Fahrprofil bewegt, wodurch Spitzenlasten im Antrieb reduziert und insgesamt niedrigere Verbrauchswerte erzielt wurden.

Tabelle 7 Testresultate 23.04.2025

	Flux Avior Allradantrieb	Flux Avior Heckantrieb
Datum	23.04.2025	23.04.2025
Zeit	09:00 Uhr	09:00 Uhr
Temperatur bei Start	12°C	12°C
Witterung	nass	nass
Distanz	120 km	120 km
Verbrauch	38.07 kWh	38.53 kWh
Verbrauch/100 km	31.73 kWh	32.11 kWh

Auf den nassen Strassenverhältnissen am 23.04.2025 zeigten beide Fahrzeuge nahezu identische Energieverbräuche (Tabelle 7). Die geringe Differenz lässt sich keinem einzelnen Einflussfaktor eindeutig zuordnen. Wie bereits in vorherigen Tests beschrieben, kann sie aus dem Zusammenspiel verschiedener Grössen resultieren, insbesondere aus den variierenden Traktionsbedingungen, den individuellen Fahrprofilen sowie Komfortanforderungen der Fahrer. Eine klare Gewichtung dieser Einflussfaktoren ist unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich.



Tabelle 8 Testresultate 25.09.2024

	Flux Avior Allradantrieb	Flux Avior Heckantrieb
Datum	25.09.2024	25.09.2024
Zeit	09:00 Uhr	13:00 Uhr
Temperatur bei Start	15°C	17°C
Witterung	trocken	trocken
Distanz	120 km	120 km
Verbrauch	36.84 kWh	37.41 kWh
Verbrauch/100 km	30.7 kWh	31.18 kWh

Am 25.09.2025 wies das allradgetriebene Fahrzeug einen leicht geringeren Energieverbrauch auf (siehe Tabelle 8). Auch in diesem Fall lässt sich der beobachtete Unterschied keiner einzelnen Ursache eindeutig zuordnen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der Verbrauchsvorteil aus dem Zusammenwirken verschiedener Einflussgrößen resultiert, deren individuelle Wirkung im Rahmen dieses Tests nicht klar abgegrenzt werden kann.

2.3.8.6.2. Fazit

Die Verbrauchsunterschiede zwischen Allrad- und Heckantrieb des Flux Avior sind gering und stark von äusseren Bedingungen sowie dem Fahrverhalten abhängig.

Folgende Erkenntnisse wurden aus den Tests (Kapitel 432.3.8.6) gewonnen:

1. Beide Antriebsvarianten liegen bezüglich Energieverbrauch sehr nahe beieinander
2. Das Fahrverhalten ist einer der stärksten Einflussfaktoren
3. Witterung und Traktion beeinflussen den Verbrauch, aber nicht eindeutig zugunsten einer Variante.



2.3.8.7. Ergebnisse

Unter winterlichen Bedingungen zeigt der Allradantrieb seine Vorteile, vor allem in der Fahrdynamik, gegenüber dem Heckantrieb. Diese Vorteile sind unter normalen Bedingungen jedoch kaum spürbar. Dies zeigt, dass der elektrische Allradantrieb in den alpinen Regionen der Schweiz dem Heckantrieb mehr Zuverlässigkeit und Flexibilität aufweist.

Über die gesamten Tests konnten keine signifikanten Unterschiede im Energieverbrauch festgestellt werden. Teilweise war der Energieverbrauch auf 100km beim Allradantrieb tiefer als beim Heckantrieb, teilweise war er höher. Da Unterschiede sind marginal und lassen sie sich mit den nicht identischen Umwelt- und Verkehrseinflüssen erklären. Entsprechend sind die Verbräuche der Antriebsversionen nahezu identisch. Dies hat den F

Wie in Kapitel 2.3.4 bereits beschrieben, ist die Drehmomentverteilung beim Allrad fix umgesetzt. Weiter ist die maximale Rekuperation dieselbe wie beim Heckantrieb, um das Fahrgefühl für den Fahrer in allen Antriebsvarianten gleich zu halten. Dies führt dazu, dass in der Allradvariante viel Potential ungenutzt bleibt. Aufgrund dessen kann der elektrische Allradantrieb in naher Zukunft weiter verbessert werden.

2.3.9. Optimierung für die Serienproduktion

Im Rahmen der Industrialisierung wurden verschiedene Optimierungsmassnahmen zur Vorbereitung einer Kleinserie eingeleitet:

- **Bauteilvereinheitlichung:** Der neu entwickelte Geräteträger kann sowohl für die RWD- als auch für die AWD-Variante eingesetzt werden, wodurch der Teileumfang reduziert, und die Fertigung vereinfacht wird.
- **Montageoptimierung:** Durch geänderte Kabelführung und modular aufgebaute Komponenten konnte die Montagezeit um rund 15 % reduziert werden.
- **Lieferantenentwicklung:** Für Schlüsselkomponenten (z. B. Inverter, Achsantriebseinheit) wurden strategische Partnerschaften aufgebaut, um Versorgungssicherheit und Skalierung zu gewährleisten.
- **Software-Modularisierung:** Die Steuerungssoftware wurde in Module gegliedert, sodass Anpassungen an unterschiedliche Fahrzeugtypen effizient umgesetzt werden können.
- **Qualitätssicherung:** Ein standardisierter Prüfprozess mit End-of-Line-Test wurde definiert, um Serienkonsistenz sicherzustellen.

Diese Optimierungen bilden die Grundlage für den Übergang der Prototyp- zur Serienfertigung.



2.4 Ergebnisse

Die Entwicklungsziele des Projekts wurden vollständig erreicht. Der elektrische Allradantrieb wurde erfolgreich integriert, getestet und validiert. Die wichtigsten Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Technische Machbarkeit:** Der elektrische Dual-Motor-Antrieb ist für leichte Nutzfahrzeuge realisierbar und erfüllt sämtliche sicherheits- und leistungsrelevanten Anforderungen.
- **Fahrdynamik:** Verbesserte Traktion, Stabilität und Performance in allen Fahrsituationen, insbesondere bei Steigungen und auf rutschigen Untergründen.
- **Effizienz:** Energieverbrauch vergleichbar mit dem reinen Heckantrieb, Reichweitenverlust vernachlässigbar.
- **Zuverlässigkeit:** Keine kritischen Ausfälle während der System- und Fahrversuche.
- **Wirtschaftlichkeit:** Serienproduktion in kleinen Stückzahlen technisch und finanziell machbar.



2.5 Diskussion

Die erzielten Ergebnisse bestätigen die technische Reife des entwickelten Systems und zeigen das Marktpotenzial für elektrische Allrad-Nutzfahrzeuge deutlich auf.

Trotz der positiven Resultate bestehen einige Herausforderungen:

- **Kostenstruktur:** Die Integration einer zweiten Antriebseinheit erhöht die Produktionskosten deutlich. Eine Reduktion ist erst bei höheren Stückzahlen zu erwarten.
- **Bauraum- und Gewichtsmanagement:** Die zusätzliche Antriebseinheit führt zu einem leicht höheren Fahrzeuggewicht. Durch Leichtbaukomponenten kann dieses in der nächsten Entwicklungsstufe reduziert werden.
- **Thermische Optimierung:** Das Wärmemanagement unter hoher Dauerlast bietet weiteres Verbesserungspotenzial.
- **Regulatorische Aspekte:** Die Einhaltung der UNECE-Vorschriften wurde bestätigt; für eine Typgenehmigung in Grossserie wären jedoch ergänzende Nachweise erforderlich.

Insgesamt stellt die entwickelte Lösung einen wichtigen Schritt hin zu einer nachhaltigen elektrischen Nutzfahrzeugmobilität dar und eröffnet neue Einsatzmöglichkeiten im anspruchsvollen Gelände sowie im kommunalen Bereich.



3 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.1 Schlussfolgerungen

Die im Projekt entwickelte elektrische Allradarchitektur zeigt deutlich, dass die Dual-Motor-Konfiguration nicht nur technisch machbar ist, sondern in mehreren Bereichen einen substanziellen Mehrwert gegenüber herkömmlichen Antriebslösungen bietet. Besonders hervorzuheben ist die hohe Systemeffizienz, die trotz der zusätzlichen Antriebseinheit nahezu auf dem Niveau der Heckantriebsversion bleibt. Dies bestätigt, dass die direkte Achszuordnung ohne mechanische Verluste durch Kardanwelle oder Verteilergetriebe eine zentrale technische Stärke des Konzepts ist. Die Rekuperation über beide Achsen sowie die sehr präzise Momentenregelung tragen zu dieser Effizienz bei und wurden im praktischen Einsatz bestätigt.

3.1.1. Technische Innovationen – Was besonders gut funktioniert hat

Mehrere technische Neuerungen haben sich im Projekt als besonders wirkungsvoll erwiesen:

- **Modulare Dual-Motor-Architektur:** Sie erlaubt eine klare funktionale Trennung der Achsantriebe und sorgt für kurze Regelzeiten, hohes Anfahrmoment und stabile Traktion selbst unter schwierigen Bedingungen (Schnee, Steigungen, Anhängelast). Dies verbesserte die Fahrsicherheit signifikant.
- **Integration ohne Eingriff in Basisfahrzeug-Struktur:** Die neue Geräteträgerkonstruktion ermöglicht den Einbau des Frontmotors an bestehenden OEM-Aufnahmepunkten. Dies ist gleichzeitig eine industrielle wie technische Innovation, da die Serienprozesse dadurch stark vereinfacht wurden.
- **Geringe Verluste im Antriebsstrang:** Durch den Wegfall mechanischer Umlenkungen des klassischen AWD, wie Verteilergetriebe oder Kardanwelle, steigt die Gesamteffizienz – ein Vorteil, der nur dem elektrischen Antrieb vorbehalten ist.
- **Hohe Betriebssicherheit:** Ausfälle des Frontmotors können durch den weiterhin funktionstüchtigen Heckantrieb abgefangen werden. Die Redundanz erhöht die Einsatzsicherheit und bestätigt das robuste Steuerungskonzept.

3.1.2. Was man aus heutiger Sicht anders machen würde

Im Projekt zeigte sich, dass einige Designentscheidungen – getroffen unter den damaligen industriellen und zeitlichen Rahmenbedingungen – heute weiter optimiert werden könnten:

- **Drehmomentverteilung:** Durch die statische 60/40-Verteilung bleibt Potenzial für Effizienzsteigerung ungenutzt. Ein adaptives, dynamisches Torque-Vectoring würde Traktion, Effizienz und Fahrdynamik weiter verbessern.
- **Mechanische Steifigkeit des Geräteträgers:** Erste Tests führten zur notwendigen Verstärkung der Frontmotorhalterungen. Künftig könnte ein optimiertes Leichtbaukonzept Material einsparen und gleichzeitig die Schwingungsanfälligkeit weiter verringern.
- **Thermisches Management unter hoher Dauerlast:** Das System erfüllt alle Anforderungen, dennoch zeigen lange Steigungen und hohe Aussentemperaturen, dass eine noch proaktivere Temperaturführung Effizienzreserven erschliessen könnte.



3.1.3. Lohnt sich der elektrische Allradantrieb – und wann nicht?

Die Tests haben gezeigt, dass der elektrische Allradantrieb **unter bestimmten Einsatzbedingungen deutliche Vorteile bietet**, während er unter normalen Bedingungen **keine Effizienzvorteile**, aber auch keine nennenswerten Nachteile aufweist.

Wann lohnt sich AWD eindeutig?

- **Alpine Regionen & winterliche Bedingungen:** Deutlich bessere Traktion und Fahrstabilität auf Schnee, Eis und nassen Steigungen. Der Allradantrieb liefert hier ein Sicherheits- und Produktivitätsplus (weniger Durchdrehen, sichereres Anfahren).
- **Hohe Anhängelasten:** Der kombinierte Antrieb stellt genügend Drehmoment bereit, um 8 t Gesamtzuggewicht auch auf langen Steigungen sicher zu bewegen – ein klarer Wettbewerbsvorteil gegenüber reinen Heckantrieben.
- **Baustellen, kommunale Einsätze, Offroad-Passagen:** Konstante Traktion und geringerer Reifenverschleiss durch bessere Kraftverteilung.
- **Einsatzfahrzeuge (Feuerwehr, Rettung):** Hohe Anforderungen an Beschleunigung, Traktion und Verfügbarkeit profitieren stark vom Dual-Motor-System.

Wann lohnen sich die Zusatzkosten weniger?

- **Überwiegender Einsatz im Flachland oder urbanen Umfeld:** Hier sind die Vorteile des Allrads selten spürbar, und der Heckantrieb deckt den Bedarf meist vollständig ab.
- **Energieeffizienz als höchste Priorität:** Da beide Varianten nahezu identische Verbrauchswerte zeigen, entsteht kein Effizienzvorteil. Wer rein energetisch bewertet, profitiert nicht zwingend vom AWD.
- **Wenn keine Anhängelast oder Offroadfähigkeit erforderlich ist:** Der Mehrwert des Frontmotors entfällt und rechtfertigt wirtschaftlich nicht immer den Aufpreis.



3.2 Optimierungspotenzial – technisch und wirtschaftlich

Basierend auf den Ergebnissen und Praxisversuchen ergeben sich mehrere klare Verbesserungsmöglichkeiten:

Technisches Potenzial

1. **Dynamisches Drehmomentmanagement:** Adaptive Regelung, abhängig von Reibwert, Last und Fahrzustand – Effizienzsteigerung + bessere Fahrdynamik.
2. **Erhöhte Rekuperationsleistung über beide Achsen:** Die derzeitige Gleichbehandlung mit der RWD-Version limitiert das Rekuperationspotenzial unnötig.
3. **Gewichtsreduktion (Geräteträger & Achskomponenten):** Verbesserte FEM-Analyse und Leichtbau würden Reichweite und Nutzlast steigern.

Wirtschaftliches Potenzial

1. **Skalierung der Stückzahlen:** Hohe Kosten der zweiten Antriebseinheit sinken spürbar bei grösseren Serien.
2. **Bauteilvereinheitlichung zwischen AWD und RWD:** Das neue Geräteträgerkonzept hat bereits in diese Richtung gewirkt; weitere Vereinheitlichung ist möglich.
3. **Optimierung der Produktionsprozesse:** Modulare Baugruppen, kürzere Montagezeiten, standardisierte End-of-Line-Tests.
4. **Strategische Partnerschaften für Achsantriebe und Inverter:** Sichern Versorgungsketten und reduzieren Marktpreisrisiken.



4 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit nationalen Industrie- und Forschungspartnern durchgeführt:

- Berner Fachhochschule (BFH): Unterstützung bei Messdatenerfassung, Versuchsauswertung und Simulationen
- MAN Truck & Bus (Schweiz) AG: Bereitstellung des Basisfahrzeugs MAN TGE und technischer Support bei Fahrwerksintegration.
- Novidem Swiss AG: Unterstützung bei der Auslegung der Antriebseinheit und Überprüfung der Leistungsdaten.
- Kanton Basel-Stadt: Testen des Prototyps.



5 Publikationen und andere Kommunikation

Die Projektergebnisse wurden intern und extern auf verschiedenen Plattformen kommuniziert:

- Veröffentlichung einer Kurzbeschreibung des Projekts auf der Website der Flux Mobility AG.
- Veröffentlichung auf LinkedIn und Instagram von Flux Mobility AG



6 Literaturverzeichnis

Swisscamion. (März 2023). Abgerufen am 2023 von <https://www.swisscamion.ch/article/der-4x4-sehr-geschaetzt-in-der-schweiz/>



7 Interne Kontrolle des Projekts (vertraulich)

Die interne Projektkontrolle erfolgte fortlaufend über die gesamte Projektdauer von Januar 2023 bis Oktober 2025. Ziel war es, eine transparente Planung, effiziente Umsetzung sowie die Einhaltung von Budget, Terminen und Qualitätsanforderungen sicherzustellen.

7.1 Projektorganisation

Das Projekt wurde von Flux Mobility AG geleitet. Innerhalb des Unternehmens war ein interdisziplinäres Kernteam aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion, Software, Produktion und Qualitätssicherung eingesetzt.

Die Projektleitung war für die technische und administrative Gesamtverantwortung zuständig und koordinierte die Arbeiten mit den externen Partnern (BFH, MAN Truck & Bus, Novidem, DTC).

Zur Unterstützung der Projektsteuerung wurde ein internes Reporting-System eingerichtet, das monatliche Statusberichte zu Kosten, Meilensteinen und Risiken umfasste.

Alle Änderungen im technischen Umfang oder Zeitplan wurden über ein Änderungsprotokoll dokumentiert und von der Projektleitung freigegeben.

7.2 Qualitätsmanagement

Die Entwicklungsarbeiten unterlagen den Qualitätsstandards der Flux Mobility AG, basierend auf ISO 9001 und den unternehmensinternen Prozessen für Produktentwicklung.

Wesentliche Arbeitspakete (z. B. Design-Freigaben, Integrationstests, Prüfberichte) wurden jeweils einer internen Freigabeprüfung unterzogen.

7.3 Risikomanagement

Potenzielle Projektrisiken (z. B. Lieferengpässe bei Antriebskomponenten, Softwareverzögerungen, regulatorische Änderungen) wurden in einer fortlaufenden Risikoanalyse bewertet und überwacht.

Die wichtigsten Massnahmen umfassten:

- Aufbau alternativer Lieferantenbeziehungen für kritische Komponenten
- Pufferzeiten in der Test- und Validierungsphase
- Detaillierte Abstimmung mit dem DTC zur rechtzeitigen Klärung gesetzlicher Anforderungen

Keines der identifizierten Risiken führte zu einer signifikanten Verzögerung oder Kostenüberschreitung.

7.4 Kosten- und Terminüberwachung

Die finanzielle Kontrolle erfolgte über das ERP-System der Flux Mobility AG. Die Projektkosten wurden quartalsweise mit dem genehmigten BFE-Budget abgeglichen.

Abweichungen von mehr als 5 % wurden der Geschäftsleitung gemeldet und – sofern relevant – mit dem BFE-Projektbetreuer abgestimmt.

Alle zentralen Meilensteine (Konstruktion, Prototyp, Test, Abschlussbericht) wurden termingerecht erreicht.



7.5 Ergebnis der internen Kontrolle

Die interne Kontrolle bestätigte eine strukturierte und transparente Durchführung des Projekts. Das Projekt wurde innerhalb des vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmens abgeschlossen.

Alle geplanten Arbeitspakete wurden umgesetzt, und die Qualitätsziele konnten vollständig erreicht werden.

8 Interner Datenmanagementplan und Open Access-Strategie/Daten/Modell (vertraulich)

Der interne Datenmanagementplan definiert die Richtlinien für Erfassung, Speicherung, Nachvollziehbarkeit und Sicherung aller im Projekt generierten Daten. Ziel ist es, die langfristige Verfügbarkeit der Projektergebnisse sicherzustellen und deren Nachnutzung innerhalb von Flux Mobility sowie durch die Projektpartner zu ermöglichen.

8.1 Datenerfassung und -struktur

Alle Entwicklungs-, Test- und Versuchsdaten wurden in strukturierter Form innerhalb des zentralen Servernetzwerks der Flux Mobility AG abgelegt. Die Datenstruktur gliederte sich in folgende Hauptbereiche:

- **Konstruktion und CAD-Daten:** 3D-Modelle, Zeichnungen, Stücklisten (
- **Softwareentwicklung:** Quellcodes, Firmwareversionen und Parametrierungen (verwaltet im Git-Repository mit Versionskontrolle)
- **Test- und Versuchsdaten:** Messprotokolle, Fahrdaten, Leistungsdiagramme, EMV-Berichte (
- **Projektdokumentation:** Berichte, Sitzungsprotokolle, Budgetübersichten und Freigabedokumente

Alle Daten wurden nach standardisierten Namenskonventionen erfasst. Dies gewährleistet eine eindeutige Rückverfolgbarkeit der gesamten Projektentwicklung.

8.2 Datensicherung und Zugriff

Die Sicherung der Projektdaten erfolgte automatisiert auf redundanten Servern am Standort Winterthur mit täglichem Backup.

Zugriffsrechte waren rollenbasiert definiert: Nur autorisierte Mitarbeitende der Entwicklungs- und Testabteilungen sowie die Projektleitung hatten Schreibrechte; Partnerinstitutionen verfügten über kontrollierten Lesezugang zu relevanten Datensätzen.

Bei Projektende wurde ein vollständiger Datensatz auf einem verschlüsselten Archivlaufwerk abgelegt und dokumentiert. Dieses Archiv bleibt für mindestens 10 Jahre aufbewahrt.



8.3 Datenqualität und Nachvollziehbarkeit

Für alle relevanten Daten galt das interne Vier-Augen-Prinzip: jede Messreihe und Softwarefreigabe mussten durch eine zweite qualifizierte Person validiert werden.

Änderungen an Daten oder Modellen wurden ausschliesslich über definierte Freigabeprozesse durchgeführt, um eine konsistente Nachverfolgbarkeit sicherzustellen.

8.4 Open-Access-Strategie

Im Einklang mit den Vorgaben des BFE werden nicht vertrauliche Projektergebnisse (z. B. zusammengefasste Versuchsergebnisse, technische Erkenntnisse ohne Betriebsgeheimnisse) öffentlich zugänglich gemacht.

Vertrauliche Daten (z. B. CAD-Modelle, Softwarecodes, interne Testdaten) bleiben im Eigentum der Flux Mobility AG und werden nicht öffentlich freigegeben.

8.5 Datenweitergabe und Nachnutzung

Im Falle von Folgeprojekten oder Kooperationen können relevante Datensätze auf Anfrage und nach Unterzeichnung eines Vertraulichkeitsabkommens bereitgestellt werden.

Ziel ist es, eine effiziente Weiterverwendung der Ergebnisse in Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu fördern, ohne die betrieblichen Schutzinteressen zu gefährden.