

o1MY15006

Schlussbericht

evTrailer

Autarkes elektrisches Antriebskooperationssystem

für LKW-Trailer und Fahrzeuganhänger



CuroCon GmbH
Gernsheimer Str. 3
64673 Zwingenberg

Ansprechpartner: Michael Wißbach, Tel. 06251 - 704 708-2, email: michael.wissbach@curocon.de

Zwingenberg, den 26.03.2020



Gliederung

1. Kurzdarstellung (Verbundebene)
 - 1.1 Aufgabenstellung
 - 1.2 Voraussetzungen
 - 1.3 Planung und Ablauf
 - 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand
 - 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen
2. Teilvorhaben TCU Trailer Control Unit (CuroCon)
 - 2.1 Verwendung der Zuwendungen
 - 2.2 Wichtigste Positionen
 - 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit
 - 2.4 Voraussichtlicher Nutzen
 - 2.5 Bekannter Fortschritt Dritter
 - 2.6 Veröffentlichungen
3. Teilvorhaben evTrailer battery „evTrabat“ (Fraunhofer LBF)
 - 3.1 Verwendung der Zuwendungen
 - 3.2 Wichtigste Positionen
 - 3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit
 - 3.4 Voraussichtlicher Nutzen
 - 3.5 Bekannter Fortschritt Dritter
 - 3.6 Veröffentlichungen
4. Teilvorhaben Entwicklung des sensorischen King Pins (Fraunhofer IST)
 - 4.1 Verwendung der Zuwendungen
 - 4.2 Wichtigste Positionen
 - 4.3 Notwendigkeit und Angemessenheit
 - 4.4 Voraussichtlicher Nutzen
 - 4.5 Bekannter Fortschritt Dritter
 - 4.6 Veröffentlichungen
5. Teilvorhaben Transmitting or Recuperating Compact Electric Drive „TORRC“ (OSWALD)
 - 5.1 Verwendung der Zuwendungen
 - 5.2 Wichtigste Positionen
 - 5.3 Notwendigkeit und Angemessenheit
 - 5.4 Voraussichtlicher Nutzen
 - 5.5 Bekannter Fortschritt Dritter
 - 5.6 Veröffentlichungen
6. Teilvorhaben Simulation, Betriebsstrategie und Leistungsnachweis (TUD VKM)
 - 6.1 Verwendung der Zuwendungen
 - 6.2 Wichtigste Positionen
 - 6.3 Notwendigkeit und Angemessenheit
 - 6.4 Voraussichtlicher Nutzen
 - 6.5 Bekannter Fortschritt Dritter
 - 6.6 Veröffentlichungen



1. Kurzdarstellung (Verbundebene)

evTrailer ist ein Verbundvorhaben der Partner CuroCon GmbH, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. mit dem Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST und Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Oswald Elektromotoren GmbH, TU Darmstadt Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe vkm und dem assoziierten Partner Wilhelm Schwarzmüller GmbH. Zusätzlich im Unterauftrag wurde die FRAMO GmbH im Teilvorhaben der CuroCon mit eingebunden.

1.1. Aufgabenstellung

Der Nutzfahrzeugverkehr trägt heute einen großen Teil zum Verbrauch fossiler Energieträger und der Erzeugung von CO₂-Emissionen bei. Im Rahmen des Projekts ev(=electric vehicle)Trailer sollte ein innovatives Antriebssystem für insbesondere Nutzfahrzeug-Anhänger entwickelt werden. Die Besonderheit ist der völlig autarke elektrische Antrieb des Trailers, der damit die Verwendung mit beliebigen Zugmaschinen ermöglicht.

Die Unterstützung der Zugmaschine durch den Trailer-eigenen Antrieb mit integrierter Bremsenergienutzung (Rekuperation) birgt enorme Potenziale vor Allem in der Verbrauchs- und CO₂-Minderung. Darüber hinaus ergeben sich mit dem evTrailer interessante Möglichkeiten wie z. B. dynamische Fahrzeugstabilisierung und Traktionsunterstützung.

In dem Projekt evTrailer sollte eine aussagekräftige, wissenschaftliche und technische Basis geschaffen werden, einschließlich Entwicklung und Bau eines Demonstrators für den realen Leistungsnachweis.

Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Resultate sollen neben reinen Forschungsergebnissen auch die Basis für zukünftige konkrete Produkte liefern. Die Industriepartner in dem Konsortium beabsichtigen in anschließenden Schritten die Entwicklung und Vermarktung für Dienstleistungen und Produkte, bis hin zum Bau von Komponenten und Systemen für Serienfahrzeuge.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Realisierung des Projektes evTrailer bedarf den mit dem entsprechenden technischen Wissen und den entsprechenden Fertigungsmöglichkeiten versehenen Partnern, um zu einer erfolgreichen Realisierung des Gesamtsystems zu gelangen. Dieses Konsortium wurde aufgestellt inklusive dem assoziierten Partner Schwarzmüller, als Hersteller von Trailer-Fahrzeugen und potenziellem Anwender eines evTrailers, und der im Unterauftrag eingebundenen FRAMO GmbH, als Aufbauer für das Gesamtfahrzeug.

Das Kooperationsvorhaben und die Zuwendung durch den Projektträger an die Partnerfirmen ermöglichen erst die nötigen umfangreichen FuE-Tätigkeiten und die Nutzung von Synergieeffekten zwischen den Industriepartnern und den beteiligten Forschungsinstituten. Zeitraum, Umfang und Finanzierungsvolumen von der Systemdefinition bis zum fahrfertigen Demonstrator sind zu hoch, als das dies durch die Projektbeteiligten alleine aufgebracht werden konnten.



1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens wurde in 10 Arbeitspakete ausgeführt.

Als Konsortialführer erfolgte das Gesamtprojektmanagement im APO „Projektmanagement“ durch CuroCon.

Im AP1 „Festlegung Gesamtsystem“ wurde mit allen Partnern die Definition des Gesamtsystems und die Festlegung und Dimensionierung der Komponenten umgesetzt.

Im AP2 „Batteriesystem“ konzeptionierte und entwickelte das Fraunhofer LBF das benötigte Batteriesystem und hat dieses auch einbaufertig aufgebaut und geprüft.

In AP3 „Antriebsmodul“ entwickelte Oswald die elektrischen Motor-/Generatoreinheiten für die Trailerachse. Die gefertigten Motoren wurden im Prüffeld bei Oswald zusammen mit den benötigten Stirnradgetrieben und den benötigten Wechselrichter auf Funktionsfähigkeit geprüft, für den Einsatz im evTrailer optimiert und einbaufertig angeliefert.

In AP4 „Sensorischer King-Pin“ wurde der King-Pin des evTrailers mit sensorischen Systemen ausgestattet zur Messung der auf den King-Pin wirkenden Kräfte. Das System wurde mehrfach optimiert und erweitert zum Einsatz im evTrailer und einbaufertig angeliefert.

In AP5 „Trailer Control Unit“ wurde das Automatisierungskonzept zur Anbindung der Batterie, der Ladetechnik, der Sensorik und der Wechselrichter für die Leistungsversorgung der E-Maschinen in eine Automatisierungsumgebung entwickelt und ergänzt mit Komponenten zur Datensicherung und Aufbereitung und zur Visualisierung und Bedienung des elektrischen Gesamtsystems. Nach Auswahl der Automatisierungskomponenten wurden umfangreiche Softwaremodule für die einzelnen Komponenten entwickelt und zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengefügt und am evTrailer getestet und in Betrieb genommen.

Im AP6 „Betriebsstrategie“ wurde die Betriebsstrategie des elektrischen Antriebssystems festgelegt. Mit Hilfe der Betriebsstrategie wird flexibel entschieden, wann und wie stark rekuperiert wird, wann und wie stark elektrisch angetrieben wird und wann das System sich neutral verhält. Die Einflussparameter sind dabei als wesentliche Führungsgröße die Kräfte im Königszapfen, der Ladezustand der Batterie und das prognostizierte weitere Fahrprofil. Dabei werden übergeordnete Signale, wie z.B. sicherheitsrelevante Informationen berücksichtigt (z.B. Informationen zu Sensorausfällen, Situationen instabiler Fahrzustände, mangelnde Bodenhaftung der Antriebsräder, etc.). Die Betriebsstrategie wurde zur Implementierung in die Automatisierungskomponenten von der TU Darmstadt vkm zur Verfügung gestellt.

In AP7 „Demonstrator“ wurde der Demonstrator aus den von den anderen Partnern zur Verfügung gestellten Komponenten von FRAMO aufgebaut. Das Grundfahrzeug hat Schwarzmüller zur Verfügung gestellt. Weitere benötigten Komponenten für den Zusammenbau, wie z.B. die Achsträger für die elektrifizierte Achse, wurde von FRAMO konstruiert, gefertigt und eingebaut.

In AP8 „Leistungsnachweis Demonstrator“ wurden die definierten Funktionen des Demonstrators gemeinsam erprobt.

AP9 „Dokumentation“ wurde von allen Projektpartnern projektbegleitend bearbeitet.



1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

- a) Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Komponenten und Traktionssysteme für elektrifizierte Anhänger wurden von BOSCH Mobility Solutions konzipiert (<https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/nutzfahrzeuge/antriebssysteme/elektrifizierte-achse/>) und im Jahr 2018 im Hinblick auf die ressourcenschonende Kühlung der Ladung, eine effiziente Antriebsunterstützung sowie das ferngesteuerte Parken und Rangieren positioniert. Die von BOSCH Mobility Solutions hierfür genutzten Komponenten sind baugleich mit jenen, die vom Unternehmen für die Elektrotraktion von Pkw angeboten werden, d.h. u.a. die separate Motor-Generator-Baugruppe (SMG) sowie die passende Leistungselektronik und der Powertrain Domain Controller als zentrale E/E Architektur Komponente. Damit lassen sich dem evTrailer Projekt vergleichbare Ziele verfolgen, die im Fall der Traktionslösung von BOSCH Mobility Solutions aber nicht auf robuste und langlebige Komponenten für die Anforderungen des schweren Straßengütertransports ausgerichtet, also konzeptionell nicht für einen dauerhaften Betrieb vorgesehen sind. Andere – direkt mit dem Lösungsprinzip zur THG-Minderung von schweren Nutzfahrzeugen vergleichbare – technische Konzepte sind dem Konsortium nicht bekannt, weshalb das evTrailer Projekt eine deutliche technische Differenzierung und echte Alleinstellung realisierte.

- b) Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Hinblick auf die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen und –anhängern gibt es keine dezidierte Fachliteratur.

Ein in deutscher Sprache verfügbares Standardwerk zu den Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik ist von der MAN Academy im Sommer 2016 in der vierten Auflage erschienen (Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik LKW und Bus: Lehrbuch der MAN Academy; Taschenbuch – 1. Juni 2016). Ein weiteres Standardwerk zur Nutzfahrzeugtechnik ist im ATZ/MTZ Fachbuchverlag erschienen (Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten – ATZ/MTZ-Fachbuch; 8. Auflage, 2016) und behandelt vorrangig das Verständnis des Gesamtfahrzeugs.

Im Internet gibt es eine ganze Reihe von Informations- und Dokumentationsdiensten, die u.a. auch die Entwicklungen des nachhaltigen Straßengütertransports begleiten. Umfangreiche und häufig aktualisierte Informationen finden sich z.B. unter <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektro-lkw/> und wurden zu Recherchezwecken und Referenzierung auch in diesem Vorhaben genutzt.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für den Aufbau des elektrifizierten Sattelauflegers wurde ein Plateau-Fahrzeug der Fa. Schwarzmüller mit luftgefedertem 3-Achsaggregat als Basis genutzt. Fa. Schwarzmüller unterstützte die FuE-Leistungen des Konsortiums mit Informationen und technischen Daten zu diesem Fahrzeug.

Ein Teil der Umbauten des Plateau-Fahrzeugs wurde durch die FRAMO GmbH übernommen,



einem im Juli 2014 gegründeten Unternehmen, das heute als einer der großen Betriebe zum Umrüsten und Elektrifizieren von Lkw gilt. Der Fokus der FRAMO GmbH liegt auf der Kleinserienfertigung und dem Angebot von Komplettlösungen aus Fahrzeug, Batterie, Ladetechnik und Service, die auf spezifische Logistikprozesse zugeschnitten sind. Die bei der FRAMO GmbH zur Verfügung stehenden 3.600 Quadratmeter Produktionsfläche in Löbichau kann zur Fertigung bzw. Umrüstung von bis zu 250 Fahrzeugen pro Jahr genutzt werden.

Die Flächen, Werkzeuge und Vorrichtungen der FRAMO GmbH wurden vom Projektkonsortium genutzt, um in Löbichau das evTrailer Fahrzeug aufzubauen und dessen Funktionsfähigkeit nachzuweisen (Bild 1).



Bild 1: evTrailer Fahrzeug nach dessen vollständigen Aufbau bei FRAMO GmbH in Löbichau

Die Zulassung des evTrailer Fahrzeugs als Prototyp wurde von der DEKRA begleitet; aufgrund der vielfältigen Anforderungen im Hinblick auf eine Einzelbetriebserlaubnis konnte diese bis zum Abschluss des Projektes nicht erwirkt werden. Weiterhin gibt es bei den Zulassungsbehörden sowie dem Kraftfahrtbundesamt (KBA) noch keine Richtlinien für die Zulassungsfähigkeit von Schubanhängern, d.h. motorisierte Anhänger, die das ziehende Fahrzeug entlasten oder sogar anschieben können.

2. Teilvorhaben TCU Trailer Control Unit (CuroCon)

Für den aufgebauten Demonstrator hat CuroCon eine voll funktionsfähige Automatisierungsumgebung mit Steuerung, Regelung und Visualisierung und dem Herzstück der Trailer Control Unit (TCU) konzeptioniert, entwickelt, realisiert, in den Demonstrator eingebaut und das Gesamtsystem in Betrieb gesetzt. Die benötigten Softwareapplikationen wurden auf Grundlage des im Hause CuroCon vorhandenen Wissens für die benötigten Hardware-Komponenten neu entwickelt und implementiert. Die TCU mit ihren Subkomponenten für die umfassende Automatisierung des evTrailers hat es ermöglicht, dass der abschließende Leistungsnachweis mit dem Demonstrator durchgeführt werden konnte.



2.1 Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Zuwendungen wurden beantragt und verwendet in den Bereichen Personal, Material, Reisekosten und sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten. Als Konsortialführer hat CuroCon zusätzlich zu den technischen Themen auch die Aufgabe des Gesamtprojektmanagements ausgeführt und das Projekt zu einem erfolgreichen Abschluss geführt.

Das Gesamtsystem und die Teilsysteme wurden gemeinsam spezifiziert und die Ergebnisse von CuroCon zusammengeführt und im Projektverlauf regelmäßig aktualisiert. Das zum Anfang des Projektes erarbeitete Gesamtkonzept wurde im Projektverlauf konsequent verfolgt und erfolgreich umgesetzt.

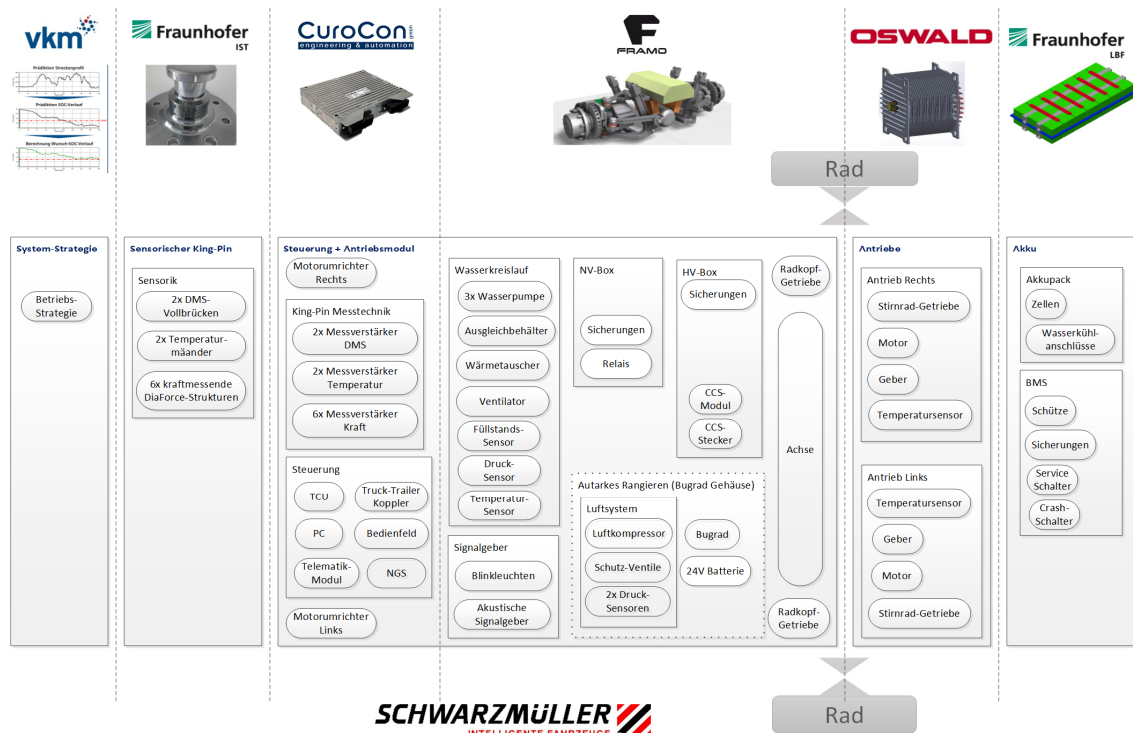


Bild 2: Gesamtsystem-Übersicht

Die Motordimensionierung wurde zusammen mit Oswald und der TU Darmstadt vkm in mehreren Iterationsschritten erarbeitet. Ausschlaggebend für die Auslegung zeigten sich die simulierten verschiedenen beispielhaften Fahrstrecken (Flachland, hügelig, Alpenüberquerung) und die benötigten Drehmomente aus dem Stillstand heraus zur Ermöglichung des autarken Rangierens. Die Vortests der E-Maschinen im Prüffeld bei Oswald in Verbindung mit der TCU (Trailer-Control-Unit) und den beschafften Wechselrichtern konnten erfolgreich gemeinsam mit Oswald durchgeführt werden und bereits im Prüffeld die benötigten Leistungsdaten für einen erfolgreichen Betrieb der Motoren im Demonstrator aufgezeigt werden.

Die elektrische Anbindung des Sensorischen Kin-Pins des Fraunhofer IST konnte, wie geplant, mit einem zur TCU (Trailer-Control-Unit) extern aufgebauten Subsystems in Sensornähe realisiert werden. Auch die benötigten sensorischen Erweiterungen des King-Pins konnten jeweils mit geringem Aufwand durch Erweiterung des Subsystems elektronisch erfolgreich angebunden werden an die TCU.



Bild 3 zeigt die Anschaltbox für den Signalanschluss des King-Pins an die Automatisierungstechnik.



Bild 3: Anschaltbox für die Signale vom King-Pin

Die benötigten Automatisierungskomponenten konnten zügig definiert und beschafft werden, so dass sich in der Abarbeitung dieses Arbeitspakets auf die umfangreiche Software-Entwicklung konzentriert werden konnte. Durch umfangreiche Vortests am Laboraufbau konnte die Inbetriebnahmezeit der Software am Demonstrator erheblich reduziert werden. Die geplanten Arbeitsschritte zur Softwareentwicklung konnten wie geplant abgearbeitet werden und erfolgreich umgesetzt werden.

Die Automatisierungskomponenten und die 24V-Verteilung für die Elektronikversorgungen wurde in 2 weitere Boxen eingebaut (Bild 4).

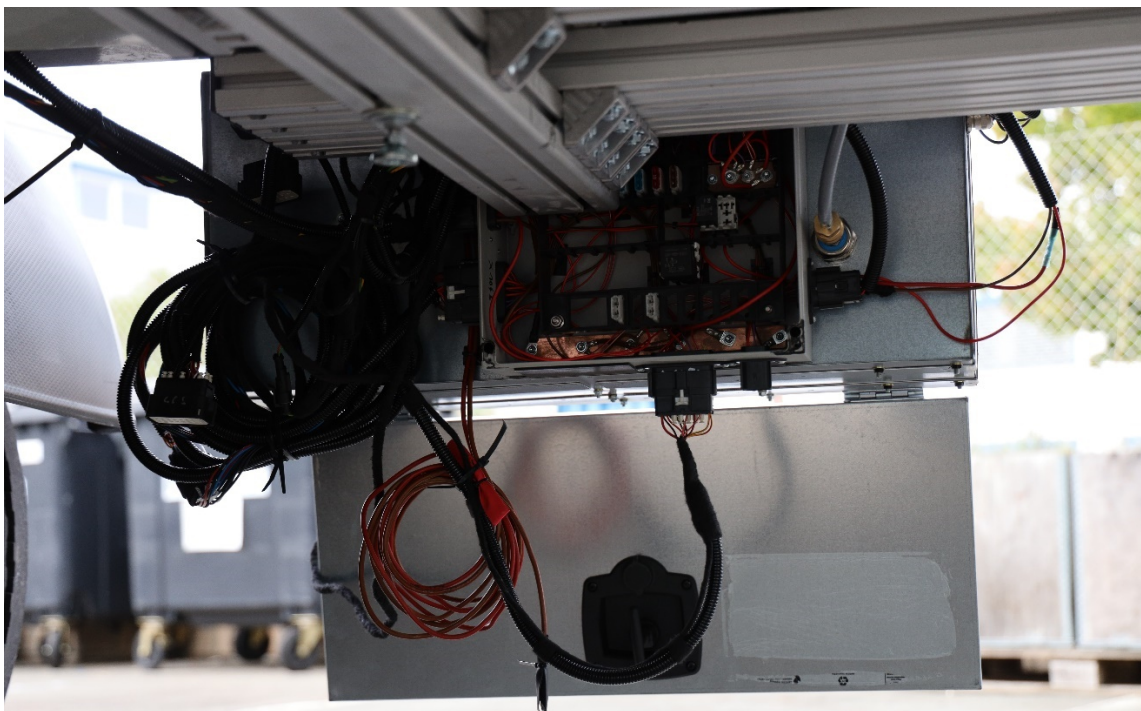


Bild 4: 24V-Verteilung auf der Rückseite der Automatisierungsbox



Bild 5 zeigt die elektronische Vernetzung der Trailer-Control-Unit (TCU) mit den weiteren für den Betrieb des evTrailers benötigten elektrischen Komponenten.

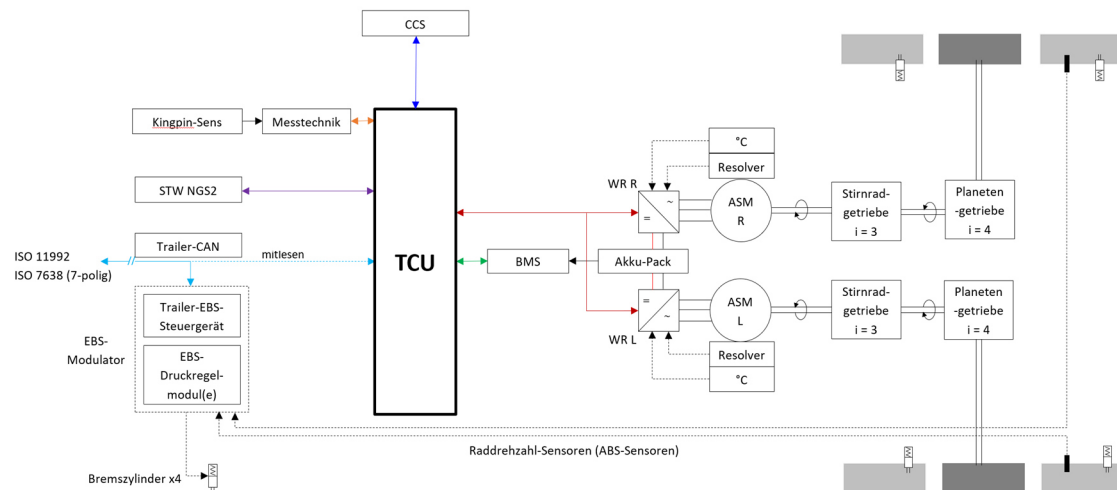


Bild 5: Übersicht Vernetzung der Trailer-Control-Unit TCU

Die zusammen mit der TU Darmstadt vkm entwickelte Betriebsstrategie wurde als 3-stufiges System, Cloud – Onboard-PC – TCU, umgesetzt. In der untersten Stufe ist nur die TCU (Trailer-Control-Unit) aktiv und gewährleistet den sicheren Betrieb der evTrailers. Diese hierarchische Abstufung halten wir für grundlegend wichtig für die Zulassungsfähigkeit des evTrailers für den Straßenverkehr.

<p>obere Stufe</p>	<p>Cloud liefert Streckenprofil der Route, Verkehrsdaten, Prädiktion des SOC</p> <p>evTrailer-PC Download des Streckenprofils, Aktualisierung von Verkehrsdaten & Prädiktion (1x pro Minute), Matlab-Modell liefert Sollwertvorgabe</p> <p>TCU verarbeitet Sollwertvorgaben für Antriebe</p>
<p>mittlere Stufe</p>	<p>Cloud keine Verbindung</p> <p>evTrailer-PC Verwendung von Streckenprofil & letzten Cloud-Daten für Matlab-Modell, oder Default-Werte, falls keine Verbindung ab Start</p> <p>TCU verarbeitet Sollwertvorgaben für Antriebe</p>
<p>untere Stufe</p> <p style="color: red; border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">Top-Priorität</p>	<p>Cloud keine Verbindung</p> <p>evTrailer-PC keine Verbindung</p> <p>TCU generiert Sollwertvorgaben aus Sensordaten (Kingpin, Trailer-CAN, Neigungs- & Gyroskopsensor) unter Beachtung SOC-, Leistungs- und Temperaturgrenzen</p>

Bild 6: Funktionelle Abstufungen der Betriebsstrategie

Die Konstruktion der Achsträger und der Einbau der Komponenten wurde von FRAMO (im



Unterauftrag von CuroCon) durchgeführt. Bild 7 zeigt die Achsträger und die Einbausituation und weitere benötigten Nahtteile für das Antriebsmodul.

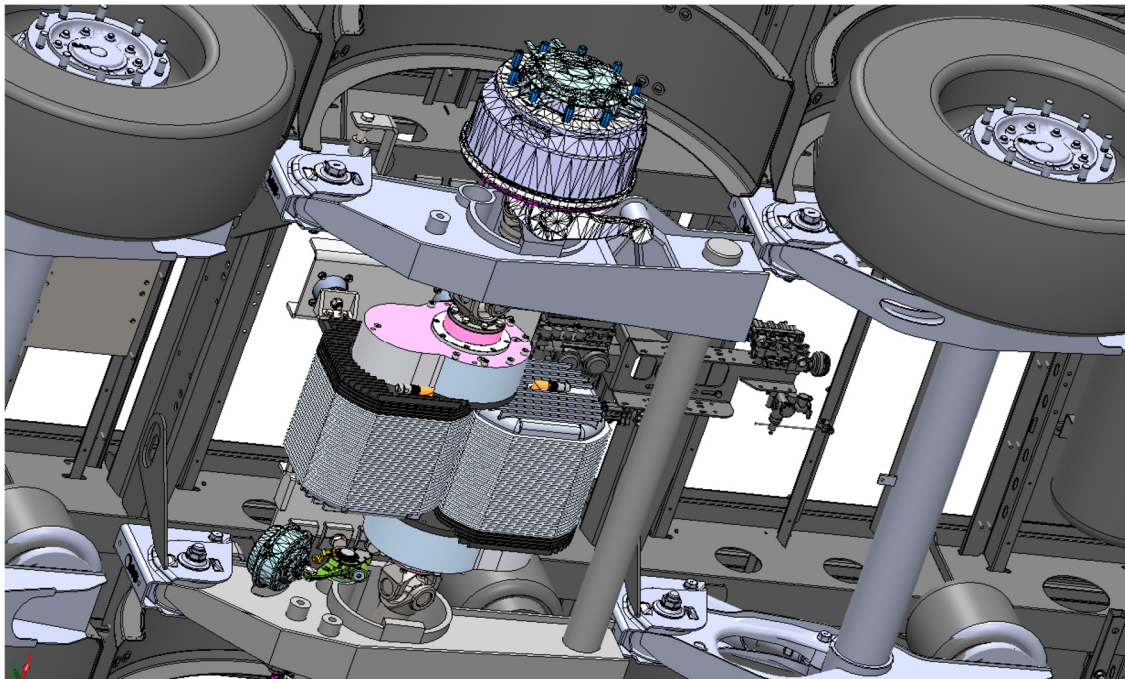


Bild 7: Antriebsmodul

Bild 8 und Bild 9 zeigen das eingebaute Antriebsmodul im evTrailer.

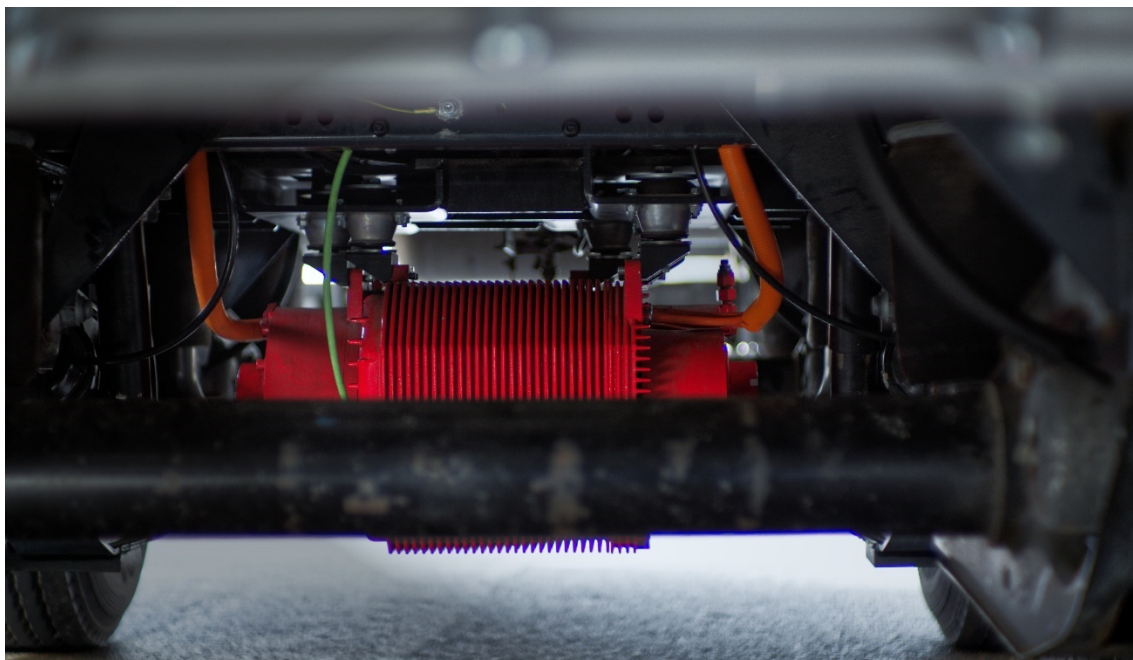


Bild 8: Antriebsmodul eingebaut im Demonstrator

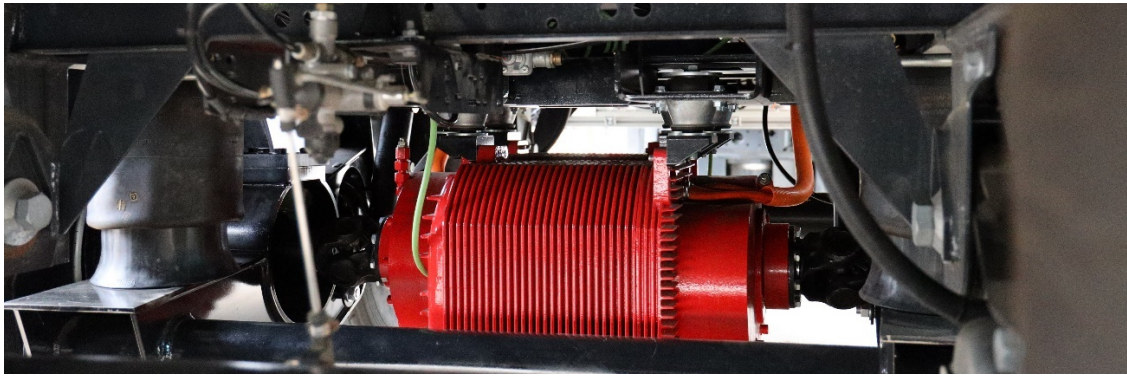


Bild 9: Antriebsmodul mit Achsträger eingebaut im Demonstrator

Die beiden Leistungswechselrichter für die elektrischen Antriebe von Oswald wurde in Achsnähe oberhalb der Motoren eingebaut (Bild 10).

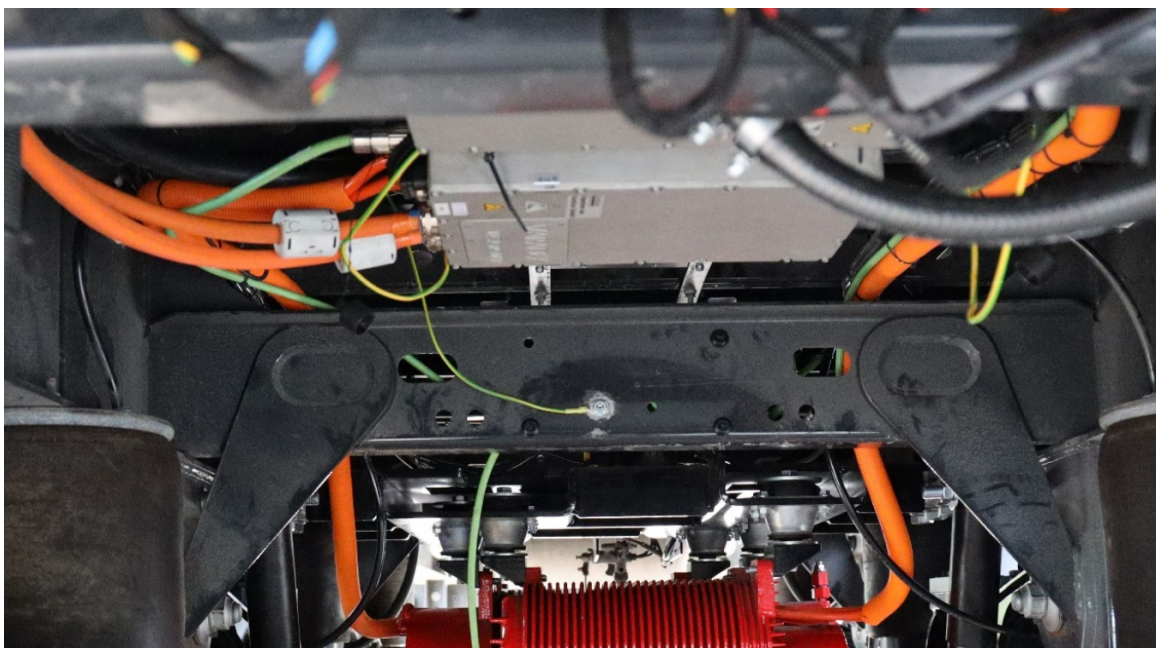


Bild 10: Einbau Leistungswechselrichter oberhalb der E-Motoren

Die Batterie des evTrailers vom Fraunhofer LBF wurde als flaches Modul ausgeführt, das zwischen den Längsträger des Trailers integriert werden kann und dadurch den nutzbaren Bauraum (z.B. für einen optimalen Palettenkasten unterhalb der Trailerbodens) des Fahrzeugs nicht einschränkt. Bild 11 zeigt das Batteriesystem vor dem Einbau durch FRAMO.



Bild 11: Batteriesystem vor dem Einbau zwischen den Längsträgern

Der Demonstrator konnte erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Für die Erprobung wurde ein MAN TGX 18.404 als Zugmaschine verwendet an der, wie im Konzept vorgesehen, keine Anpassungen durchgeführt wurden. Es wurde ausschließlich auf bereits existierende Standardschnittstellen wie dem King-Pin und dem Bremssystem (EBS) zurückgegriffen. Der Trailer befand sich während den Tests im unbeladenen Zustand. Die Kommunikation der verschiedenen Komponenten des Trailers wurde während den Testfahrten aufgezeichnet. Darunter z.B. Batteriestrom (Batterie Management System), Drehmomente der Motoren (Motor-Wechselrichter), Messwerte der King-Pin-Sensorik, Kommunikation der Bremssysteme zwischen Truck und Trailer und ein Beschleunigungssensor. Getestet wurde regeneratives Bremsen durch den Trailer, Beschleunigen auf der Geraden, anfahren auf rutschigem Untergrund und autarkes Rangieren.

Während einem normalen Bremsvorgang eignet sich die am King-Pin gemessene Kraft nicht als Regelungsgröße, da die Bremsanlage des Trailers unterstützt und die Kraft am King-Pin relativ klein gehalten wird. In Bild 12 ist ein Beschleunigungsvorgang, gefolgt von einem Bremsvorgang, abgebildet. Gut erkennbar ist der betragsmäßige Unterschied des Signals vom DMS des King-Pins während den beiden Fahrzuständen. Zum Zeitpunkt des Bremsvorgangs ist nur noch eine sehr kleine Differenz zum Ruhewert des Signals vom DMS am King-Pin messbar während beim Beschleunigungsvorgang ein deutlicher Ausschlag erkennbar ist

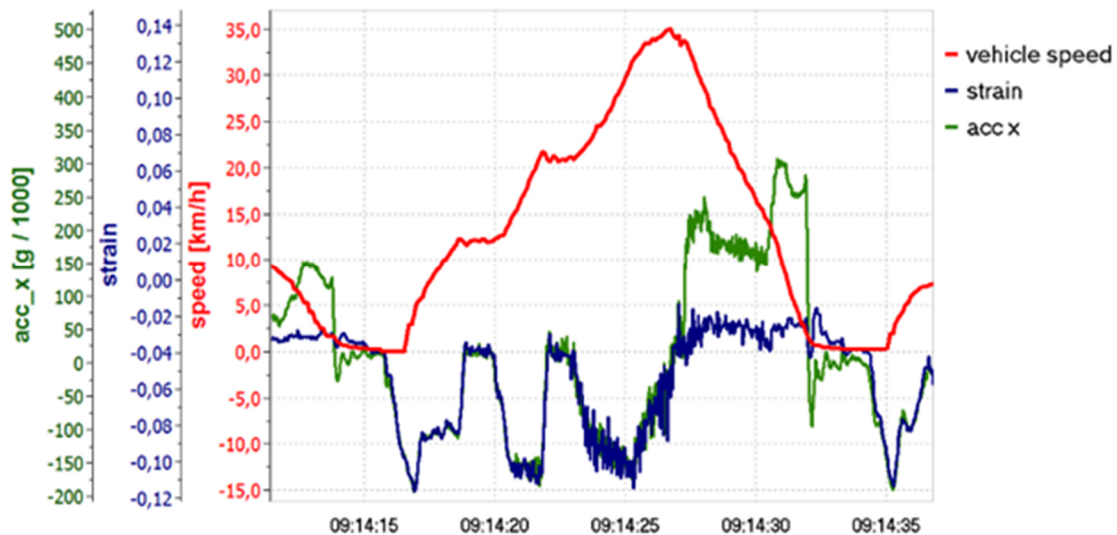


Bild 12: Verhalten der King-Pin Messwerte im Betrieb des evTrailers

Beschleunigt das Fahrzeug folgt die gemessene Dehnung (Bild 12, strain), die sich proportional zur Kraft am King-Pin verhält, der gemessenen Beschleunigung entlang der Fahrtrichtung des Trailers (Bild 12, acc x). Während des Bremsvorgangs ist eine deutliche Diskrepanz zwischen Beschleunigung und gemessener Dehnung sichtbar.

Deshalb wird bei Bremsvorgängen ein Signal im Trailer-CAN, der Kommunikationsschnittstelle zwischen Zugmaschine und Trailer (SAE J1939), ausgewertet. Dieses Signal enthält den vom Fahrer mittels Bremspedal angeforderten Bremsdruck und kann als Steuerwert für die Bremsleistung der Elektromotoren dienen. Unterstützen die Elektromotoren den Bremsvorgang wird am sensorischen King-Pin darauf geachtet, dass der Trailer immer eine mindestens leichte Schubkraft auf die Zugmaschine ausübt.

Zusätzlich werden bei einem Eingriff des Bremssteuergerätes die Elektromotoren passiv geschaltet. Optimalerweise ist die Verzögerung von Zugmaschine und Trailer bei einem Bremsvorgang identisch und die Kraft am King-Pin sehr klein. Bei einer Retarder-Bremsung kann hingegen wieder auf die am King-Pin gemessene Kraft geregelt werden, da in diesem Fall die Bremsanlage vom Trailer nur bedingt aktiv ist und eine ausreichend große Kraft am King-Pin anliegt.

Während der Erprobung konnte der Bremsvorgang erfolgreich durch die Elektromotoren des evTrailers unterstützt und die dabei gewonnene Energie zurück in den Akku gespeist werden. In Bild 13 ist ein solcher Bremsvorgang sichtbar. Abgebildet ist das zurückgemeldete Drehmoment eines der beiden Wechselrichter (ActTorque), der Strom des Wechselrichters (ActCurrentDC), der vom Fahrer angeforderte Bremsdruck (Service_brake_demand_value) und die Fahrzeuggeschwindigkeit (vehicle speed)

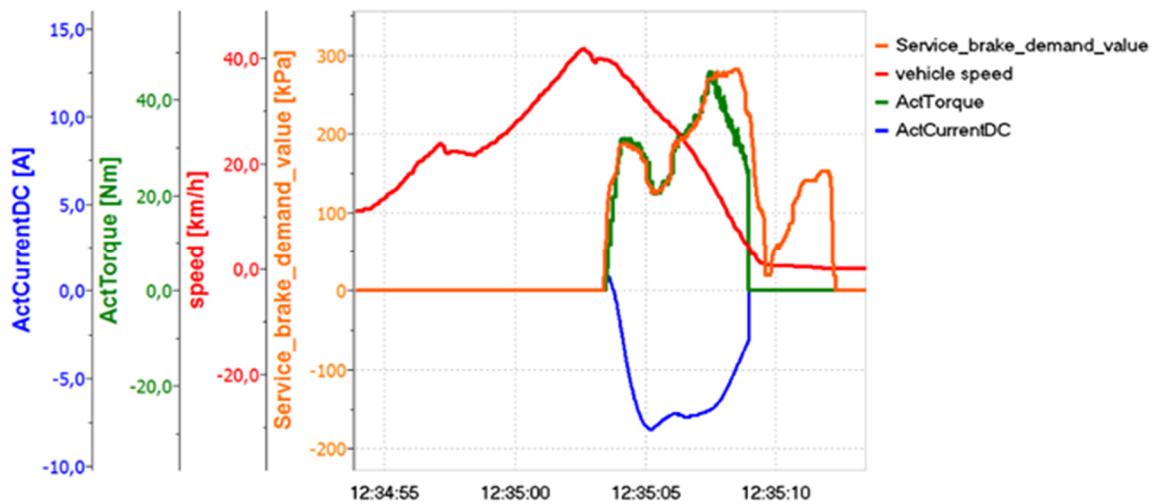


Bild 13: Energie-Rückgewinnung durch die Elektromotoren des evTrailers

Ebenfalls implementiert und erprobt wurde das elektrisch unterstützte Anfahren. Ziel ist es, den Verbrennungsmotor möglichst schnell in einem effizienten Drehzahlbereich betreiben zu können. Getestet wurde das Beschleunigungsverhalten auf einer geraden Landstraße sowie auf Schotter, um einen rutschigen Untergrund und fehlende Traktion zu simulieren. Durch das wiederholte Abfahren von bestimmten Streckenabschnitten und einer konstanten Gaspedalstellung von 100% konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Die Fahrversuche bestätigen, dass die Motoren des evTrailers die Zugmaschine beim Beschleunigen unterstützen und die Kraft am King-Pin verringert wird. Dabei ist zu erwähnen, dass der King-Pin während eines Gangwechsels nahezu kraftlos ist und die Motoren des Trailers zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützen. Dieses Verhalten ist jedoch eine sicherheitsrelevante Funktion. Um zu verhindern, dass die Motoren des Trailers zu einem ungewünschten Zeitpunkt aktiv werden, wurde festgelegt, dass nur bei einem definierten Zustand am King-Pin (Zug oder Schubkraft vorhanden) die Zugmaschine vom evTrailer unterstützt werden darf.

In den Fahrversuchen unterstützten die zwei Motoren des Trailers mit einem Drehmoment von jeweils bis zu 1800Nm (150Nm Motorseite) und forderten dabei bis zu 200A von der Traktionsbatterie. Das entspricht bei 600V Batteriespannung einer Leistung von 120 kW. Mittels eines Vergleichs zwischen dem elektrisch unterstützten und nicht unterstützten evTrailer auf einer Teststrecke wird der Einfluss des elektrischen Trailers auf das Verhalten der Zugmaschine dargestellt. Zum Vergleich ist in Bild 14 der aktuelle Gang in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit abgebildet. So können Rückschlüsse auf die von der Zugmaschine gesehene Last getroffen werden. Es hat sich gezeigt, dass die Zugmaschine deutlich schneller in einen höheren Gang schaltet, falls sie durch den evTrailer unterstützt wird.

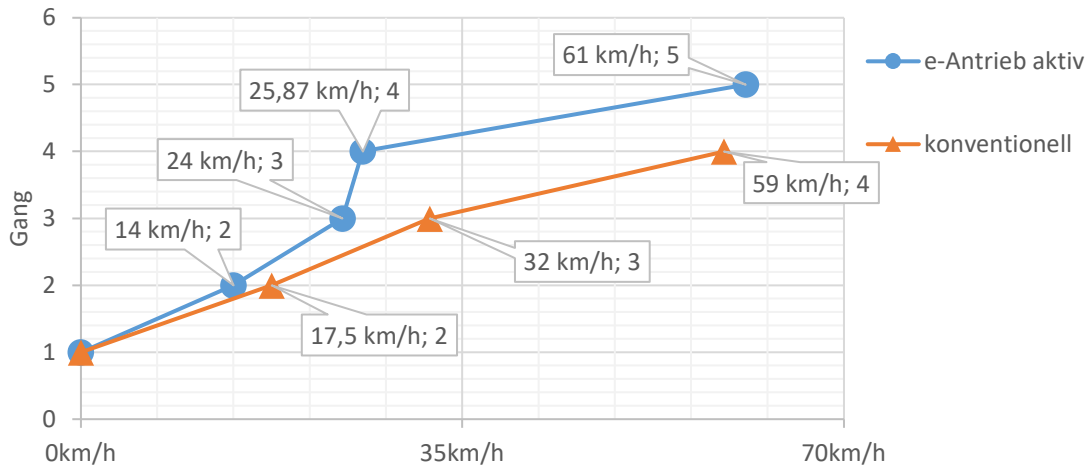


Bild 14: Schaltverhalten der Zugmaschine im Vergleich

Ein weiterer Vorteil eines motorisierten Trailers zeigt sich bei Anfahrversuchen auf einer Schotterstraße (siehe Bild 15). Ohne elektrische Unterstützung brauchte das Gespann ca. 13 Sekunden, um eine Geschwindigkeit von 15 km/h zu erreichen. Dabei verloren die Antriebsräder der Zugmaschine häufig die Traktion und drehten durch. Das lässt sich auch in Messungen an Schwankungen der Geschwindigkeit erkennen. Die Beschleunigung lag bei ca. $0,65 \text{ m/s}^2$.



Bild15: Anfahren auf rutschigem Untergrund

Wurde die Zugmaschine vom Trailer unterstützt, lag die Beschleunigung beim Anfahren bei ca. 1 m/s^2 . Die Räder der Zugmaschine verloren seltener die Traktion und erreichten schon nach ca. 7,5 Sekunden 15 km/h (Siehe Bild 16 und 17).

Mit aktiven Motoren des evTrailers weist die Beschleunigung in Fahrtrichtung (acc_x) einen ruhigeren Verlauf auf (kein Durchdrehen der Antriebsräder der Zugmaschine). Der Geschwindigkeitsverlauf ist mit Unterstützung ebenfalls glatter und besitzt in Bild 17 einen deutlich steileren Verlauf als in Bild 16.

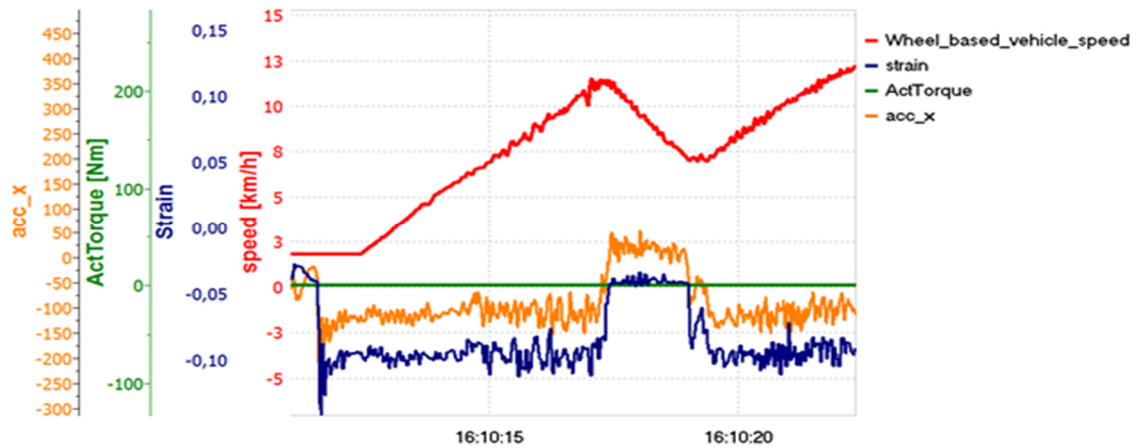


Bild 16: Anfahren auf Schotter, ohne Unterstützung durch den evTrailer

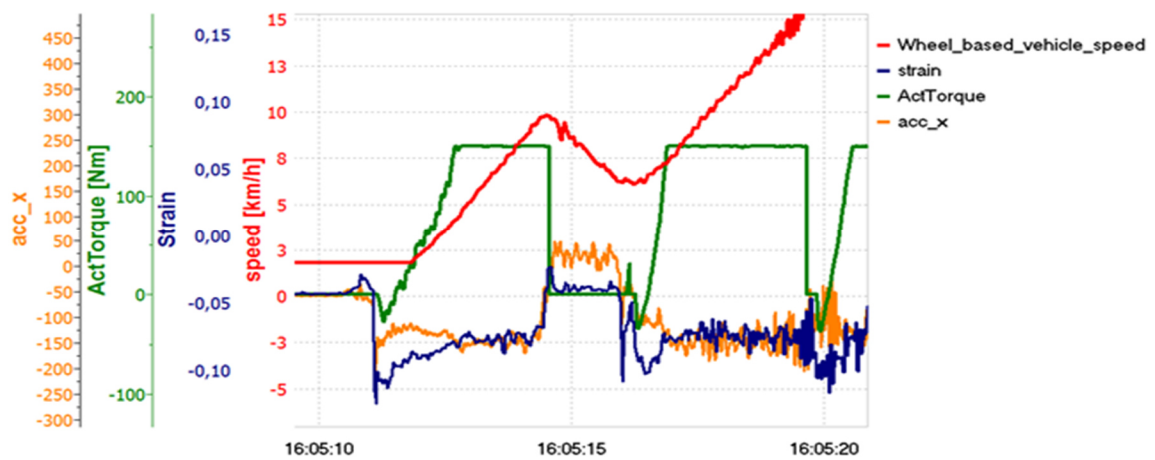


Bild 17: Anfahren auf Schotter, mit Unterstützung durch den evTrailer

Das autarke Rangieren konnte erfolgreich auf dem Werksgelände der Firma FRAMO getestet werden. Der Trailer wurde selbstständig ohne Zugmaschine über das Werksgelände bewegt, siehe Bild 18.



Bild 18: Autarkes Rangieren ohne Zugmaschine

Durch die zeitlich stark verzögerte Einsatzbereitschaft des evTrailers verblieb nur ein verkürzter



Zeitraum für den Probebetrieb, der nicht mehr ausreichend war alle geplanten Funktionalitäten ausreichend testen zu können. Die Fahrstabilität unter physikalischen Grenzbedingungen und das Torque-Vectoring in Kurvensituationen konnte nicht mehr getestet werden. Zeitlich war es auch nicht mehr möglich zum Abschluss des Projektes eine Einzelbetriebserlaubnis zu erlangen. Der Nachweis des Einsparpotenzials an Treibstoff in der Zugmaschine, der zunächst simuliert wurde (siehe Bild 19) konnte allerdings ausgiebig am Diesel-Motor-Prüfstand der TU Darmstadt vkm durchgeführt werden.

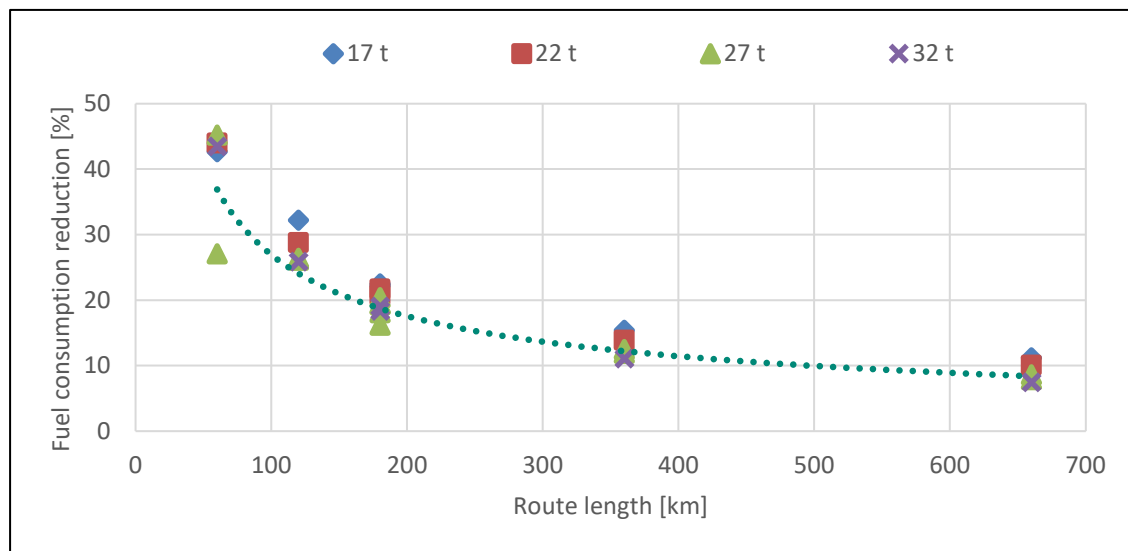


Bild 19: Treibstoff-Einsparpotenzial Simulationsergebnisse

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel im Bereich Personal, Reisekosten und Material wurden eingehalten und stimmen mit der Gesamtvorkalkulation überein, obwohl das Projekt insgesamt um 9 Monate verlängert wurde. Im Bereich des Personaleinsatzes wurde entsprechend pausiert, falls keine zwingenden Projektaktivitäten umzusetzen waren. Der verkürzte Zeitraum des Leistungsnachweises des Demonstrators wurde kompensiert durch entsprechende ausführlichere Vortests im eigenen Labor, wodurch die Erprobung des Demonstrators effektiver umgesetzt werden konnte.

Im Bereich der sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (Unterauftrag an die FRAMO GmbH) war aufgrund der verlängerten Montagezeit des Demonstrators und der jetzt zweistufigen Inbetriebnahme (zunächst mit stationärer DC-Quelle und im zweiten Schritt mit integriertem Batteriesystem) eine Mittelaufstockung nötig. Insgesamt konnten jedoch vorgesehene Umfänge teilweise nicht geleistet werden (z.B. für Einzelbetriebserlaubnis, Homologation, Lärmemissionsmessung und EMV-Test) und der Mittelabruf wurde entsprechend reduziert.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle Arbeiten zur Trailer-Control-Unit zur Umsetzung eines Gesamtsystems wurden zielgerichtet durch alle beteiligten Arbeitspakete erfolgreich umgesetzt. Alle vorgesehenen Funktionalitäten, Komponenten und Softwaremodule, die zum Betrieb des Demonstrators benötigt wurden, wurden im vorgesehenen Rahmen umgesetzt. Als zentrale Funktionseinheit ist die Trailer-



Control-Unit (TCU) mit allen implementierten Funktionalitäten unumgänglich nötig für den Betrieb des evTrailers als batterieelektrisches Fahrzeug.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Grundsätzlich fließen die entstandenen fahrzeugübergreifend Softwaremodule in die batterieelektrischen LKWs von FRAMO aktuell ein. Darüber hinaus bestehen verschiedenste Anfragen bezüglich des Einsatzes unserer TCU (Trailer-Control-Unit) in batterieelektrischen Nutzfahrzeugen (z.B. Kehrmaschinen, Bagger). Zusätzlich erwarten wir den Einsatz unserer Softwaremodule und Control-Units in batterieelektrischen Stadtbussen und elektrifizierten Kühltrailern für jetzt angebotene Projekte.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Idee des elektrifizierten Trailers wurde auch in weiteren vergleichbaren Projekten bereits untersucht und umgesetzt bzw. entsprechende Komponenten, wie die elektrifizierte Trailerachse, von verschiedenen Firmen vorgestellt. Innerhalb des EU-Förderprojektes Transformers und des Nachfolgeprojektes Aeroflex steht das Gesamtsystem des elektrifizierten Trailers im Fokus. Die Fa. Dethleffs zeigt mit Ihrem Prototyp e.home coco ein funktional vergleichbares Konzept zum evTrailer, umgesetzt für einen Caravan-Anhänger für PKWs. Auch von der Fa. Wabco ist zur IAA Nutzfahrzeug 2018 in Hannover der eTrailer mit einer zum evTrailer vergleichbar großen Antriebsleistung vorgestellt worden. Die Fa. BPW Bergische Achse KG zeigt mit Ihren ePower-Motoren einfach nachrüstbare Radnabenmotoren für Trailerachsen und die Firma SAF Holland mit der Elektroachse TRAKr eine Achse zur elektrischen Energiegewinnung und mit der Elektroachse TRAKe eine weitere Trailerachse, die auch für den Vortrieb genutzt werden kann.

Die drei wesentlichen Ziele des Projektes evTrailer sind die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs der Zugmaschine $\geq 20\%$, der autarke Betrieb des evTrailers an jeder handelsüblichen Sattelzugmaschine und das autarke Rangieren.

	evTrailer	eTrailer	ePower	TRAKr	TRAKe	e.home	Transform.	Aeroflex
Reduktion Kraftstoffverbr. $\geq 20\%$	✓					✓		
Akkukapazität $\geq 50\text{kWh}$	✓				✓	✓		
Antriebsleistung $\geq 150\text{kW}$	✓	✓						
Plug-In	✓			✓	✓	✓		
Radselektiver Antrieb	✓		✓			✓		
Autarkes System (Zugfahrzeugunabh.)	✓		✓	✓		✓		
Autarkes Rangieren	✓					✓		
Aerodynamik-Optimierung							✓	✓
Ladungs-Optimierung							✓	✓
Logistik-Effizienz-Steigerung								✓



Bild 20: Gegenüberstellung evTrailer mit vergleichbaren Projekten bzw. Technologien

Transformers und Aeroflex, die auch eine elektrifizierte Gesamtsystem im Trailer nutzen, sehen ihren Schwerpunkt in der Aerodynamik-Optimierung, Ladungs-Optimierung und Logistik-Effizienz-Steigerung. Die Kombination der Ergebnisse aus dem Projekt evTrailer mit den Projekten Transformers und Aeroflex (siehe Bild 20) birgt weitere Potenziale zur Optimierung und Effizienz-Steigerung des Gesamtsystems eines elektrifizierten Trailers.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Auf der IAA Nutzfahrzeuge vom 21. bis 29.9.2016 in Hannover wurde der evTrailer vom Aussteller FRAMO mit einem Infolyer beworben. Ebenso auf der IAA Nutzfahrzeuge vom 20. bis 27.9.2018.

Auf der Vernetzungskonferenz am 7.+8.11.2016 in Berlin wurde der evTrailer in einem Impulsvortrag dargestellt. Auf der Vernetzungskonferenz Elektromobilität am 12.+13.11.2018 in Berlin wurden Teile des evTrailer in der begleitenden Ausstellung gezeigt und das Gesamtsystem entsprechend dargestellt.

Unser Beitrag zum Gesamtsystem evTrailer wurde angenommen als Vortrag für das 6. Internationale Commercial Vehicle Technology Symposium 2020 www.cvt-symposium.de im Themenbereich „Verbrauchsoptimierung, Betriebsstrategien, Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte der Zukunft“. Zusätzlich ist geplant den evTrailer im Außengelände auszustellen.

Des Weiteren ist geplant den evTrailer auf der IAA Nutzfahrzeuge vom 20. bis 30.9.2020 in Hannover auszustellen.

Zusätzlich wurde bereits projektbegleitend die Inhalte des evTrailer auf der entsprechenden Homepage www.evtrailer.de öffentlich zugänglich gemacht. Die Homepage wird weiterhin nach Projektende gepflegt werden.

3. Teilvorhaben evTrailer battery „evTrabat“ (Fraunhofer LBF)

Die im Projekt angestrebte THG-Minderung (Treibhausgas-Minderung) macht einen Energiespeicher mit verhältnismäßig großer Kapazität notwendig, um die Traktionsleistung der Sattelzugmaschine und eine im Hinblick auf den Wirkungsgrad vorteilhafte Lastpunktverschiebung des Verbrennungskraftmotors zu unterstützen sowie beim generatorischen Bremsen im Gefälle einen möglichst hohen Betrag der potenziellen Energie in den Energiespeicher zu integrieren. Im Rahmen der im Projekt durchgeführten Arbeiten (→ AP1) wurde ermittelt, dass das THG-Minderungspotenzial unmittelbar von der Kapazität des Energiespeichers abhängig ist und bis zu einer Größenordnung von ≤ 100 kWh ausgebaut werden sollte. Gleichzeitig war die Lebensdauer des Energiespeichers auf eine Fahrstrecke von wenigstens 700.000 Kilometer auszulegen, d.h. bei einer solchen Fahrstrecke sollte ein alterungsbedingter Kapazitätsabbau auf höchstens 20 % der nominellen Kapazität des Energiespeichers begrenzt bleiben. Charakterisierung und Auswahl geeigneter Li-Ion Sekundärzellen wurden im Rahmen des Vorhabens sorgfältig – auch im Hinblick auf das Lebensdauerziel – durchgeführt und anschließend in eine fortschrittliche Konzeption eines Energiespeicher-Gesamtsystems überführt. Der Energiespeicher wurde aufgebaut, im Hinblick



auf seine Betriebseignung geprüft und in das Fahrzeug integriert. Die im autarken Fahrbetrieb sowie in Verbindung mit einer Sattelzugmaschine durchgeführten Manöver bestätigten die volle Funktionsfähigkeit des Energiespeichers.

3.1. Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ziel des Teilvorhabens war die Konzeption, Auslegung und Aufbau des Energiespeichers mit den Schwerpunkten Thermomanagement und Batteriemangement auf Basis der für das Fahrzeuggesamtsystem ermittelten Anforderungen (Kapazität Energiespeicher ≤ 100 kWh). Im Einzelnen wurden mit den Zuwendungen die folgenden Maßnahmen umgesetzt und entsprechende Ergebnisse erzielt:

- für den Aufbau des Energiespeichersystems geeignete Zellen wurden im Rahmen einer Screening-Strategie ausgewählt, charakterisiert und relevante Parameter für eine Alterungsmodellierung ermittelt,
- das Modulkonzept als Basis für eine Skalierbarkeit im Hinblick auf die notwendige Gesamtkapazität des Energiespeichers wurde entwickelt und im Rahmen eines prototypischen Demonstrators aufgebaut, um Verschaltung und Gestaltung der Stromverbinder für die im Modul angeordneten Einzelzellen darzustellen,
- ein gekoppeltes Simulationsmodell zur Berechnung elektrischer und thermischer Größen des Energiespeichers im Fahrbetrieb wurde entwickelt und zur Optimierung des Gesamtsystems genutzt,
- analog zum Belastungsprofil auf Basis der Fahrbetriebssimulation für das Gesamtfahrzeug wurden die ausgewählten Sekundärzellen mit zyklischen elektrischen Lasten beaufschlagt, um Alterungsmechanismen und Zelldegradation zu beschreiben,
- Dimensionierung und Komponentenauswahl für Peripherie, Elektronik sowie Konstruktion und Aufbau des Gehäuses wurden durchgeführt,
- Anfertigung spezieller Stromverbinder für die Verschaltung der Einzelzellen in den Modulen mittels Punktschweißen,
- vollständige Assemblierung aller Module für den Einbau in das Gesamtsystem,
- Integration der Kühlplatte in die Modulkonfiguration sowie Zusammenbau des Gesamtsystems,
- Integration von Sicherheitskreis und Batteriemagementsystem im Gesamtsystem,
- Funktionserprobung und sicherer Transport des kompletten Energiespeichers zum Standort des Fahrzeugs,
- Integration des Energiespeichers in das Fahrzeug.

Aufgrund von unabsehbaren Verzögerungen in der Bereitstellung einer hinreichend großen Anzahl von Li-Ion Sekundärzellen kam es zu deutlichen zeitlichen Verschiebungen gegenüber dem ursprünglichen Projektplan; final wurden in der durch den Projektträger genehmigten Laufzeitverlängerung alle Arbeiten wie geplant umgesetzt und abgeschlossen.



3.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen wurden vollständig und zielgerichtet eingesetzt; aufgrund der schwierigen Randbedingungen hinsichtlich öffentlicher Ausschreibung zur Beschaffung sowie grundsätzlichen Verfügbarkeit der Li-Sekundärzellen im Formfaktor 18650 musste die budgetneutrale Projektzeitverlängerung komplett ausgeschöpft werden. Die für das Vorhaben beantragten Mittel für Personal, Reisekosten und Material wurden eingehalten; einzelne Positionen – vorrangig Material- und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten – wurden als innerbetriebliche Leistungen umgewidmet und erreichten einen Betrag von insgesamt EUR 24.500,00.

Gegenüber der ursprünglichen Konzeption und Planung konnten für den Aufbau des Energiespeichers vorgesehene Technologieelemente (Stromverbinder mittels Laserbonding sowie „open source“ Batteriemanagementsystem) anderer Institute der Fraunhofer-Gesellschaft nicht eingesetzt werden und machten es im Projektverlauf notwendig, funktional vergleichbare Technologieelemente am Markt zu kaufen (Batteriemanagementsystem) bzw. durch Eigenleistungen an der Forschungsstelle sicherzustellen (Stromverbinder mittels Punktschweißen).

3.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das Energiespeichersystem ist eine der zentralen Traktionskomponenten des evTrailer Fahrzeugs und damit in Größe und Kapazität zwingend notwendig, um die im Vorhaben angestrebten THG-Minderungspotenziale nachzuweisen. Aufgrund der für ein schweres Nutzfahrzeug typischen Randbedingungen hinsichtlich Kosten- und Masseneffizienz war es unbedingt notwendig, das Energiespeichersystem konzeptionell für solche Randbedingungen auszulegen und deshalb große Aufwendungen für Selektion, Charakterisierung und Kennwertbestimmung der Sekundärzellen, des Thermomanagements sowie einer masseffizienten Gestaltung des Gesamtsystems einschließlich des Gehäuses vorzunehmen. Mit den final erreichten Ergebnissen hinsichtlich der Robustheit, Integrationsfähigkeit und Gesamtmasse des Energiespeichers (Bild 21) wird die Angemessenheit der geleisteten Arbeit in besonderer Weise dokumentiert.



Bild 21: In das Fahrzeug integrierter Energiespeicher

3.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der im Vorhaben entwickelte und prototypisch in ein Aufliegerfahrzeug integrierte Energiespeicher realisiert den grundsätzlichen Nachweis von Funktions- und Integrationsfähigkeit solch großer Energiespeicher für die Elektrifizierung von ursprünglich gezogenen Fahrzeugsystemen und begründet damit die Sinnhaftigkeit einer vollständig neuen Fahrzeugkategorie – nämlich die von elektrisch autark und/oder zusätzlich elektrisch betriebenen Fahrzeugaufliegern und –anhängern. Mit der im Vorhaben umgesetzten und nachgewiesenen Systemautarkie ist ein Alleinstellungsmerkmal entstanden, das große Aufmerksamkeit bei Tagungen, tagungsbegleitenden Ausstellungen sowie Fachmagazinen generiert. Im Sinne des Verwertungsplans werden umfangreiche Marketingaktivitäten, konkrete und gezielte Akquisitionsgespräche mit potenziellen Industriepartnern und –kunden geführt sowie Vorbereitungen für Lizenzverträge und weitere Anträge für Verbundforschungsvorhaben durchgeführt.

Entwicklung und Aufbau skalierbarer Energiespeicher-Module mit einer dauerhaften und besonders kosteneffizienten Fertigungstechnologie für die Stromverbinder sind wichtige Entwicklungsschritte und Ergebnisse für die Gestaltung robuster Energiespeicher im Bereich der Nutzfahrzeuge und können in verschiedenen Bauformen und –größen in einer großen Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge und Anhänger eingebaut werden, um dort im Rahmen elektrischer oder hybridelektrischer Traktion, elektrischer Aggregate sowie zur Bremsenergieerückgewinnung eingesetzt zu werden. Die an der Forschungsstelle erarbeiteten Lösungen können hierfür vorteilhaft und recht universell genutzt werden und versprechen damit ein großes Potenzial hinsichtlich

— Entwicklung industrieller Standards für robuste Energiespeicher in Nutzfahrzeugen,



- Technologietransfer speziell in die mittelständische Fahrzeug- und Sonderfahrzeugindustrie,
- Verwertungsperspektiven durch Lizenzen und weitere Drittmittelprojekte,
- Wissenstransfer durch Vorträge auf Tagungen und Konferenzen.

3.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Wesentliche, das Gesamtvorhaben motivierende Ziele des Projektes sind die deutliche Reduktion von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen des Sattelzugs im Fahrbetrieb auch auf längeren Strecken sowie das autarke Fahren und Rangieren des Sattelauflegers z.B. im Logistikzentrum, wofür eine entsprechend große Traktionsbatterie im Aufliegerfahrzeug notwendig ist. Eine solche technische Konzeption ist unverändert ein echtes Alleinstellungsmerkmal des evTrailer und bisher in keinem anderen Fahrzeugkonzept in einer vergleichbaren Weise umgesetzt.

Für leichte und mittelschwere Nutzfahrzeuge sowie auch für Sattelzugmaschinen sind Traktionsbatterien mit einer Kapazität bis 300 kWh entwickelt worden, aber bisher sind keine ähnlich großen und für die Traktion geeigneten Energiespeicher in Sattelauflegerfahrzeuge integriert worden.

3.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Im Projektverlauf wurden zwei Veröffentlichungen zu Kontext und Intention des Projektes sowie verfügbaren Ergebnissen vorbereitet und präsentiert:

- Anfang Juni 2017 wurde das Projekt mit dem Schwerpunkt des Teilvorhabens „Energiespeicher“ auf dem Kongress „Forum Elektromobilität“ in Berlin vorgestellt (Dautfest, A.; Thiem, M.: Overall vehicle concept & battery system design).
- Ende Februar 2018 wurde das Projekt mit dem Schwerpunkt des Teilvorhabens „Energiespeicher“ auf dem „15. Battery Experts Forum“ präsentiert (Dautfest, A.: Elektrifizierter LKW-Trailer zur autarken Traktionsunterstützung).
- Ursprünglich für Mitte März 2020 – also nach Fertigstellung aller Aktivitäten im Projekt – war eine Präsentation des Projekts mit dem Schwerpunkt des Teilvorhabens „Energiespeicher“ auf dem 6. Commercial Vehicle Technology Symposium in Kaiserslautern geplant (Heim, R.; Schönemann, A.; Biehl, S. N.; Stark, P.; Hadjebi, M.: Entwicklung eines HV-Energiespeichers für elektrifizierte Nfz-Sattelauflegerfahrzeuge); aufgrund der aktuellen Situation hinsichtlich der Gefährdung durch das Covid-19 Virus wurde diese Veranstaltung auf September 2020 verschoben.
- Für Sommer 2020 ist weiterhin eine Veröffentlichung zum Projekt mit dem Schwerpunkt des Teilvorhabens „Energiespeicher“ im Fachmagazin ATZheavyduty geplant (Heim, R.; Schönemann, A.; Biehl, S. N.: Hochvolt-Energiespeicher in Ultraleichtbauweise für elektrifizierte Sattelaufleger).



4. Teilvorhaben Entwicklung des sensorischen King Pins (Fraunhofer IST)

Das Fraunhofer IST hat sich der Herausforderung gestellt auf die komplex geformte Oberfläche eines 6 kg schweren Königszapfens (King-Pin) ein verschleißreduzierendes und zugleich sensorisches Schichtsystem in die Belastungsbereiche abzuscheiden und zu strukturieren. Diese Dünnschichtsensorik misst orts aufgelöst die Kräfte, die auf den Königszapfen in direktem Kontakt mit dem Verschleißhaken und dem Verschleißring während der Fahrt wirken. Dafür wurde die Oberfläche des King-Pins nur in den zu beschichtenden Bereichen poliert. Es durften keine weiteren Veränderungen wie z.B. Bohrungen durchgeführt werden, um eine spätere Straßenzulassung nicht zu gefährden. Dadurch erhöhte sich der Aufwand für die dreidimensionale Strukturierung erheblich. Zusätzlich wurden Dehnungsmessstreifen in das sensorische Schichtsystem in die Bereiche maximaler elastischer Dehnung strukturiert und sensorische Unterlegscheibensysteme wurden in die Schraubverbindungen des King-Pins integriert.

4.1. Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

In der ersten Phase des Projektes wurde das sensorische Konzept für den King-Pin erarbeitet, damit eine Kraftmessung für x- und y-Richtung ermöglicht wird. Dabei entstand das in Bild 22 dargestellte Konzept eines multifunktionalen Schichtsystems.

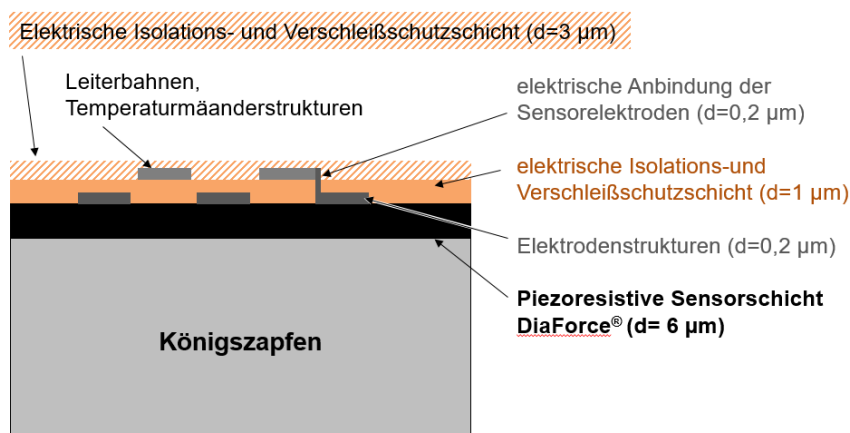


Bild 22: Schematische Darstellung des sensorischen Schichtsystems.

Die zusätzliche Integration von Temperatursensorstrukturen ist notwendig, da als Basis für das multifunktionale Schichtsystem die DiaForce® Schicht gewählt wurde. Dies ist eine amorphe Kohlenwasserstoffschicht, welche eine hohe Härte, im Bereich mit 24 GPa, mit einem piezoresistiven Verhalten kombiniert. Als halbleitende Schicht ist ihr elektrischer Widerstand auch von der Temperatur abhängig. Um diesen Einfluss zu kompensieren werden zusätzliche Temperatursensorstrukturen in das Dünnschichtsystem integriert. Das gesamte Schichtsystem weist eine Dicke im Bereich von 10-11 μm auf.

In der zweiten Projektphase werden die Prozessschritte entwickelt, um das multifunktionale Schichtsystem funktionstüchtig und haftfest auf die Oberfläche des King-Pins abzuscheiden und zu strukturieren. Die Voraussetzung dafür bildet eine polierte Stahloberfläche, da der King-Pin eine Ausgangsrauheit R_z (gemittelte Rautiefe) von 15,9 μm aufweist. Diese liegt höher als die Gesamtschichtdicke und wurde manuell auf einen R_z -Wert von 0,05 μm reduziert. Darauf folgt



die Abscheidung der DiaForce®-Schicht in der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PACVD), wofür eine Spezialhalterung angefertigt wurde. Viel Zeit wurde im Anschluss darauf verwendet die dreidimensionalen Strukturen zu realisieren. Diese wurden aus einer nur 200 nm dünnen Chromschicht gefertigt. Der Strukturierungsprozess war mehrstufig und kombinierte physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) mit Fotolithografie und nass-chemischer Ätzung. Geschützt werden diese Sensorstrukturen durch elektrisch isolierende Verschleißschutzschichten. Dabei erfolgte die Erprobung von Aluminiumoxid (Al₂O₃) im Vergleich mit einer mit Silizium und Sauerstoff modifizierenden Kohlenwasserstoffschicht (SiCON®).

Der Aufbau von sensorischen King-Pins erfolgte in der dritten Phase des Projektes. Dabei stellte sich heraus, dass die Haftfestigkeit von Al₂O₃ auf der komplex geformten Oberfläche deutlich besser ist im Vergleich zur SiCON®-Schicht in diesem Schichtverbund. Ein King-Pin mit vollständigem Schichtsystem ist in Bild 23 dargestellt. Die breiten Linienstrukturen im linken und rechten Bild sind dabei der kraftmessenden und die Mäanderstrukturen bzw. die sehr dünne Chromleiterbahn in der linken Abbildung, die den Kraftsensor umschließt, dienen der Temperaturmessung, die in nächster Nähe zum kraftmessenden Bereich erfolgt.

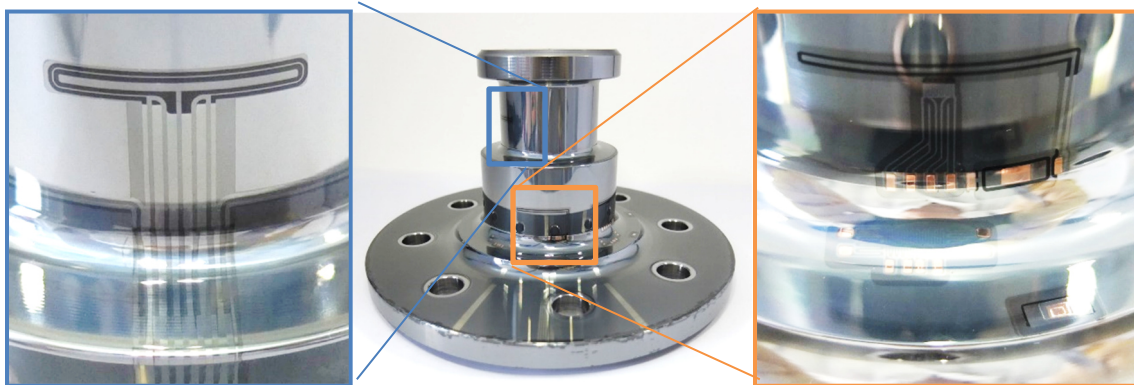


Bild 23: Sensorsicher King-Pin in der Mitte. Links sind Sensorstrukturen des oberen Bereiches dargestellt und rechts Sensorstrukturen des unteren Bereiches.

Um zusätzliche Informationen zu erhalten, entstand während des Projektes die Idee, Dehnungsmessstreifen (DMS) in Vollbrückenordnung in den unbelasteten gekrümmten unteren Teil des King-Pins zu integrieren, wie dies in Bild 24 gezeigt wird. Dieser erfährt während der Fahrt eine maximale Dehnung, wie in dem Simulationenbild links sehr gut erkennbar ist.

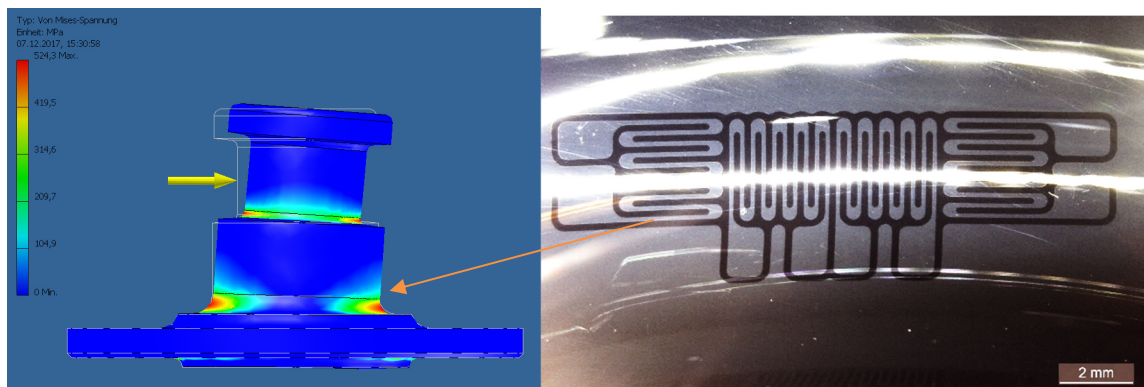


Bild 24: Links: Simulationsergebnis zur Bestimmung der optimalen Anordnung der DMS; rechts: Mikroskopie einer realisierten Vollbrückenordnung in dem gekrümmten Bereich auf dem King-Pin.



Im Anschluss an den Sensoraufbau erfolgte in der vierten Projektphase die Vorcharakterisierung zur Bestimmung der piezoresistiven Charakteristik und auch der thermoresistiven aller Dünnschichtsensoren. Dafür wurden an alle Strukturen geschirmte Messleitungen angelötet und mit Epoxidharz fixiert.

Die Bestimmung des thermoresistiven Verhaltens erfolgt in einem Ofen im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 100°C. Exemplarisch werden in Bild 25 die exponentiellen Kennlinienverläufe der kohlenstoffbasierten Sensorstrukturen und rechts im Bild der lineare Verlauf der chrombasierten Sensorstrukturen gezeigt.

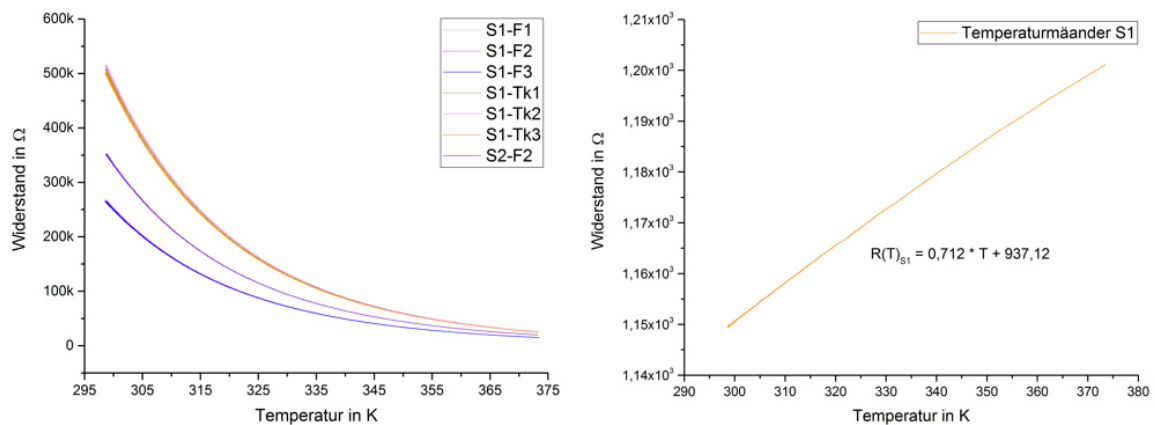


Bild 25: Links: Heißleitereffekt der kohlenstoffbasierten Sensorik auf einem King Pin; rechts: Kaltleitereffekt der chrombasierten Sensorstrukturen.

Die belastungsabhängigen Widerstandsmessungen erfolgten an den Sensorstrukturen in einem eigens dafür modifizierten Prüfstand, wie es links in Bild 26 gezeigt wird. Alle piezoresistiven Linienstrukturen weisen eine lineare Widerstandsabhängigkeit von der Belastung auf, wie es exemplarisch von einer Sensorstruktur in Bild 26 rechts dargestellt wird. Bei Entlastung erreichen sie auf demselben Weg den Ausgangswiderstand.

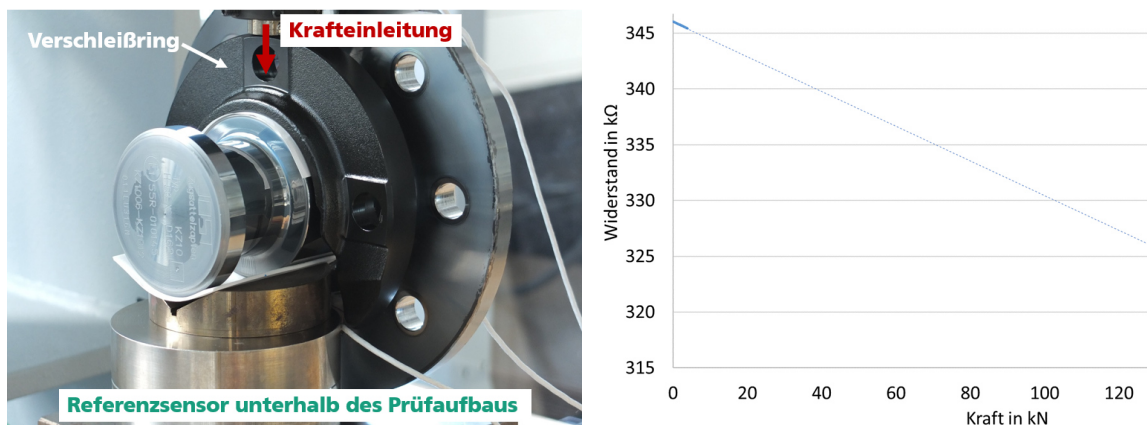


Bild 26: Mit dem Verschleißring werden in der oberen Region die Belastungen ausgeübt und zeitgleich werden die elektrischen Widerstandsänderungen der Sensorstruktur aufgenommen, so dass die lineare Widerstandsabhängigkeit, wie sie rechts im Bild gezeigt wird, aufgezeichnet wird.

Nach der Vorcharakterisierung im Labor wurden die Messdaten dem Projektpartner CuroCon gegeben, damit dieser sie für den Aufbau seiner Control Unit verwenden kann. Im Anschluss erfolgt der erfolgreiche Test der Kombination der Trailer Control Unit mit der Dünnschichtsen-



sorik im Labor, bevor es zu mit der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit im Trailer weiterging.

Zusätzlich zu dem sensorischen King-Pin ist während des Projektes in gemeinsamen Projektbesprechungen die Idee aufgekommen, sensorische Unterlegscheiben in die Schraubverbindungen des King-Pins zu integrieren und deren sensorische Aussagekräftigkeit in dieser Einbausituation ebenfalls zu testen. Es konnten finanzielle Mittel für den Erwerb der King-Pins zum Kauf von Unterlegscheibengrundkörpern umgewidmet werden, welche mit einem vergleichbaren Schichtsystem wie es in Bild 22 gezeigt wird aufgebaut wurden. Ein solches Unterlegscheibensystem kann in Bild 27 betrachtet werden.



Bild 27: Sensorisches Unterlegscheibensystem links mit Beschreibung der einzelnen Strukturen und rechts vollständig aufgebaut.

4.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen wurden vollständig und entsprechend des Antrags eingesetzt, um die herausfordernden Entwicklungen durchzuführen. Dies betrifft sowohl die Personalmittel wie auch die Sachmittel. Es kam zu einer geringfügigen Umwidmung in der Grundkörperbeschaffung da von der Firma Jost für die King-Pins Rabatt gewährt wurde und so noch Mittel für die Beschaffung von Unterlegscheiben zur Verfügung standen.

4.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das Fraunhofer IST hat sein Teilprojektziel die „Entwicklung des sensorischen Königszapfens“ erfolgreich innerhalb der vorgegebenen Projektlaufzeit von drei Jahren erreicht.

Über die im Antrag gestellten herausfordernden Entwicklungsinhalte hinaus wurden zusätzlich funktionstüchtige DMS in Vollbrückenordnung in das sensorische Schichtsystem des King-Pins integriert und sensorische Unterlegscheibensysteme aufgebaut und getestet.

4.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Entwicklung des sensorischen Königszapfens legt die Basis für eine Anpassung dieses Systems für den Automobilanhängerbereich zum Beispiel. Außerdem kann die Kombination aus sensorischen Königszapfen und Control Unit von CuroCon als eigenständiges Produkt von einem Verbindungselementhersteller wie die JOST-Werke Deutschland GmbH in Zukunft sehr interessant sein.



4.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Projektes wurden keine vergleichbaren Sensorentwicklungen für King-Pins weltweit bekannt. Daher wurden die Entwicklungen auch vom Fraunhofer IST zum Patent angemeldet.

4.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Bisher wurde eine Veröffentlichung im Newsletter der Fraunhofer Allianz Adaptronik 2019 vorgenommen und ein Projektblatt mit allen wichtigen Informationen steht zum Download auf der Website des Fraunhofer IST bereit.

Darüber hinaus werden auf dem CVT Symposium 2020 die evTrailer-Ergebnisse präsentiert inklusive der Entwicklung des sensorischen King-Pins und im begleitenden Tagungsband veröffentlicht.

5. Teilvorhaben *Transmitting or Recuperating Compact Electric Drive* „TORRC“ (OSWALD)

5.1. Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendungen wurden für die Erarbeitung der Antriebsdimensionierung und die Entwicklung und den Aufbau dreier Prototypen verwendet. Je ein Antrieb wurde an den Rädern des Trailers verbaut, ein Antrieb verblieb für weitere Tests im Prüffeld. Der wesentliche Anteil der Zuwendungen wurde für Personalausgaben verwendet. Im Folgenden werden die im Teilvorhaben TORRC durchgeführten Arbeitspakete mit den einzelnen Arbeitsschritten detailliert dargestellt und die Ergebnisse und Teilergebnisse mit der Aufgabenstellung abgeglichen.

AP1: Festlegung des Gesamtsystems

Der erste Teilabschnitt des Gesamtvorhabens befasste sich mit der Erarbeitung der Anforderungen an das gesamte Antriebssystem. Die Gesamtanforderungen technischer und wirtschaftlicher Natur waren weitgehend unbekannt und mussten erst definiert werden. Die Simulation verschiedener möglicher Betriebsszenarien und –zustände und die Ausarbeitung der Spezifikation jeder Teilkomponente standen im Vordergrund.

Leistungsanforderungen und Batteriekapazitäten mussten mit einer möglichst günstigen Verbrauchseinsparung in Einklang gebracht werden. Die Antriebsmodule betreffend wurden Eckdaten zum Einbauraum und der Kühlung und mögliche mechanische Anbindungen bereits grob festgelegt. Simulationen des Fahrzeug- bzw. Traktionsverhaltens in einigen wenigen repräsentativen Streckenprofilen an der TU Darmstadt lieferten schließlich die grundlegenden Drehmoment- und Drehzahlverläufe mit den nötigen Einschalt Dauern für die Antriebsmodule. Aus diesen Daten und den Vorgaben zur Spannungsebene konnten dann die Leistungskennlinien in den motorischen und generatorischen Betriebsquadranten ermittelt werden. Bild 28 zeigt ein typisches Referenzprofil für Raddrehzahl und –drehmoment, das nun



weitere Überlegungen zur Motorauslegung erlaubte.

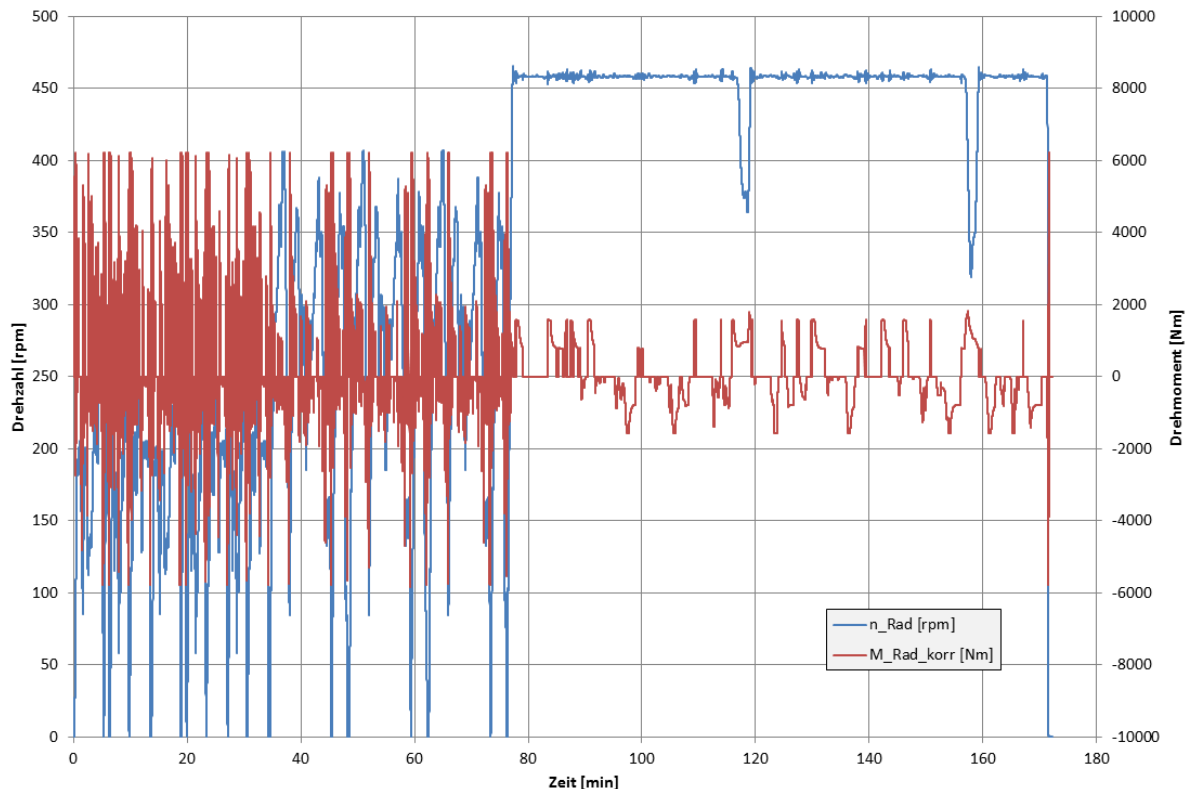


Bild 28: Drehzahl-Drehmoment Verlauf

Es ergibt sich ein repräsentatives Streckenprofil einer etwa dreistündigen Fahrt. Aus diesem Diagramm wurden im Nachgang Leistungsanforderungen nach einer 10-Minuten-, 1-Minuten- und Kurzzeitanforderung abgeleitet. Die 10-Minuten-Leistung ist als S9-Leistung zu betrachten (hier sind auch Betrachtungen zu nichtperiodischen Drehzahl- und Laständerungen berücksichtigt). Dies stellt somit die Nennleistung für das technische Datenblatt des Antriebsmoduls dar.

Folgendes Diagramm zeigt das Anforderungsprofil für die Antriebsperformance an einem Rad eines solchen Trailers, das nun im Folgenden Grundlage für die Motorauslegungen war.

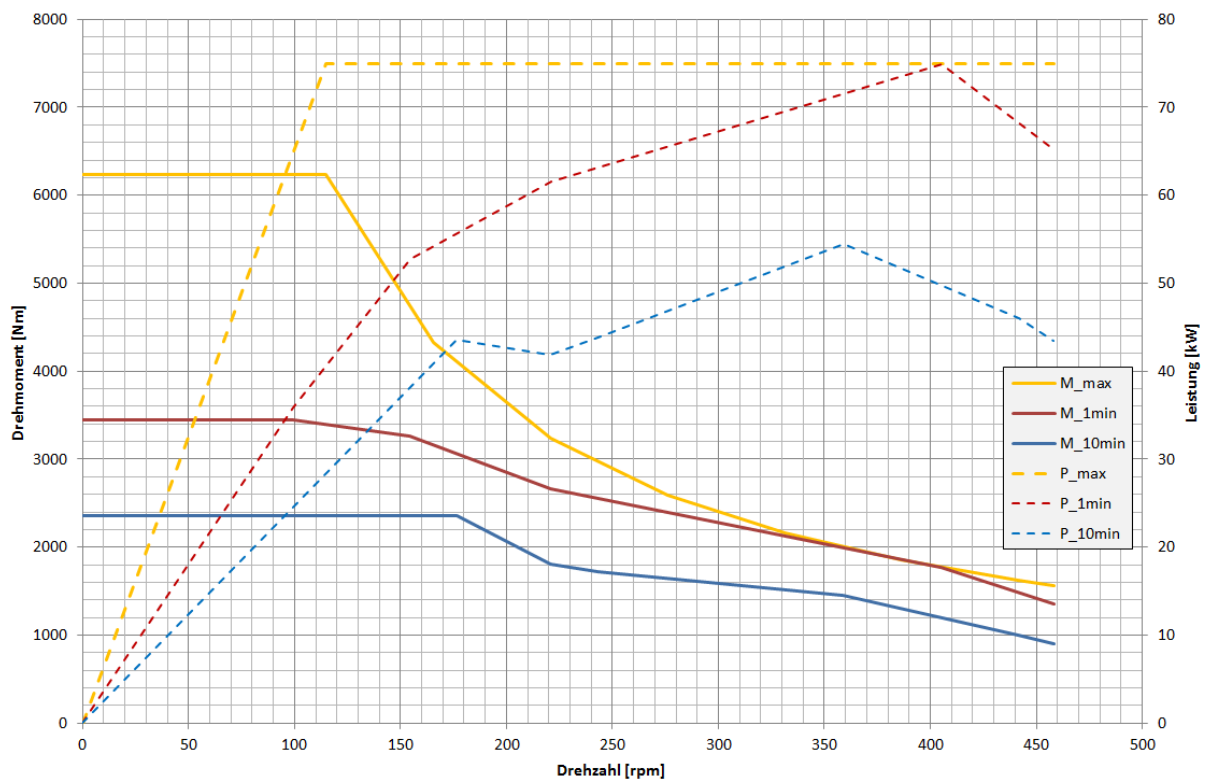


Bild 29: Rad-Anforderungsprofil an das Antriebsmodul

Drehmomente von etwa 6.000Nm pro Rad bzw. 12.000Nm an der Achse müssen für eine effektive Unterstützung der Sattelzugmaschine generiert werden. In diese Festlegung ist ein typischer Abrollumfang von 3,09m für eine in Frage kommende Radgröße einbezogen worden. Bei anderen verwendeten Rädern verändern sich Überlastmoment und Maximaldrehzahl entsprechend der gewählten Eckdaten des Rades. Die Antriebsspezifikation berücksichtigt aber diesen Umstand und erlaubt die Montage eines relativ großen Spektrums an Rädern.

Diese Kennlinie bildet nun die Grundlage für die Erarbeitung der weiteren Antriebsdetaill. Der Maschinentyp (z.B. Synchronmaschine oder Asynchronmaschine) und auch der mögliche Einsatz eines Getriebes muss nun im Folgenden festgelegt werden.

AP3: Antriebsmodul

Die Ergebnisse aus der Simulation und die ermittelte Antriebsperformance an der Achse bildeten nun im Arbeitspaket 3 die Grundlage für die Wahl der passenden Antriebskonfiguration. Zum einen muss das Antriebsmodul die technischen Vorgaben erfüllen, zum anderen liegt dabei der Fokus auf einer kostengünstigen Herstellbarkeit hinsichtlich der späteren Serienfertigung. Im weiteren Verlauf des Arbeitspakets wurden Magnetkreis und Bewicklung ausgelegt und die Motoren schließlich konstruiert, gefertigt und getestet



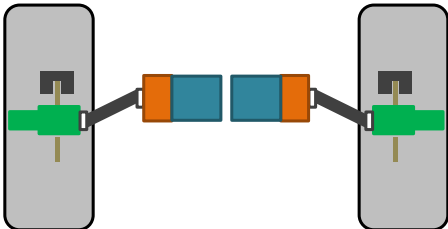
AS3.3/3.4 Dimensionierung/Konstruktion

Antriebstopologie

Bei der Festlegung der Motortopologie wurde neben verschiedenen Getriebelösungen auch ein Direktantrieb betrachtet.

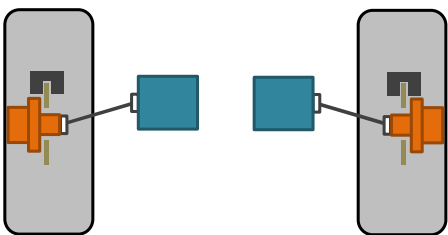
Prinzipiell wurden folgende Motor und Motor-Getriebe-Konzepte näher untersucht:

a)



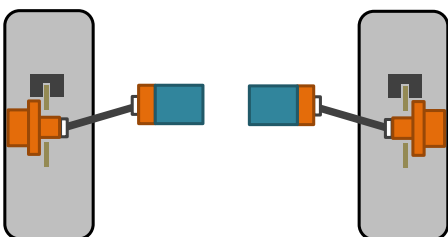
- Motor-Getriebe-Kombination
- Dicke Antriebswelle für hohe Drehmomente
- Einstufiges Getriebe mit Übersetzungsverhältnis z.B. $i=8$
- Mittleres Drehmomentlevel für E-Motor bis ca. 750Nm

b)



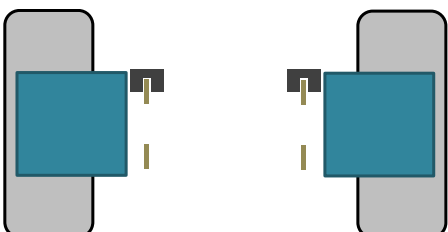
- Spezielles Radgetriebe
- Dünne Antriebswelle für hohe Drehzahlen
- Einstufiges Getriebe mit Übersetzungsverhältnis z.B. $i=7$
- Mittleres Drehmomentlevel für E-Motor bis ca. 850Nm

c)



- Standard-Radgetriebe + Motor-Getriebe-Kombination
- Mittlere Antriebswelle für mittlere Momente/Drehzahlen
- Radgetriebe z.B. $i=4$, Motorgetriebe z.B. $i=3$
- Mittleres Motor-Drehmomentlevel bis ca. 500Nm

d)



- Direktantrieb
- Kein Getriebe, keine Kardanwelle
- Hohes Drehmomentlevel bis 6000Nm

Bild 30: Antriebskonfigurationen



Sehr hohe Drehzahlen und kleine Drehmomentlevel lassen zwar auf hohe Leistungsdichten schließen, jedoch haben Konzepte in diese Richtung häufig mit unzulässig hohen Lagertemperaturen in Motor und Getriebe zu kämpfen. Hohe Getriebeübersetzungen sind nötig, im Schleppbetrieb entstehen hohe Verluste. Konzepte auf dieser Basis wurden im Vorfeld bereits verworfen.

Ein getriebeloser Direktantrieb müsste aufgrund der hohen Drehmomente als permanentmagneterregter Synchronmotor ausgeführt werden. Das Drehmoment hängt direkt mit der erforderlichen Baugröße zusammen, der begrenzte Bauraum reduziert die Möglichkeiten auf eine PM-Synchron-Variante. Bei Drehmomenten bis 6000Nm wird der Motor allerdings bereits in der Anschaffung so teuer, dass dies die Amortisation des Systems deutlich erschwert. Ein Return-On-Investment soll im Wesentlichen über Verbrauchseinsparungen innerhalb der Trailer-Lebensdauer erreicht werden. Die bereits hohen Kosten rein für die Herstellung der Motoren gemeinsam mit den relativ geringen Eingriffszeiten stehen diesem Ziel entgegen, sodass diese Möglichkeit verworfen wurde.

Für die Konzepte mit Getrieben wurden Gespräche mit diversen Getriebeherstellern geführt. Die bevorzugte Variante sah eine Lösung mit nur einem Getriebe vor, verbaut in der Radnabe (Bild 30b). Ein reines Radgetriebe in der entsprechenden Übersetzung war zu diesem Zeitpunkt kein Serienprodukt. Viele Hersteller bieten spezielle Getriebe für Fahranwendungen bereits an. Allerdings sind diese entweder auf hohe Drehmomente abgestimmt oder auf hohe Eintriebsdrehzahlen. Im Prinzip ist beides leistungsbeschränkend und die Suche nach einem passenden Getriebe in der 50kW- bis 75kW-Klasse gestaltete sich entsprechend schwierig. Zwischenzeitlich verlagerten sich die Bemühungen hin zur Variante Bild 30a, wofür ein passender Hersteller gefunden wurde. Diese mögliche Lösung wurde jedoch ebenfalls wieder verworfen aufgrund der Einbauproblematik. Die Gesamtbaulänge der Antriebsmodule resultierte in einen zu geringen Abstand zum Rad. Der Achsversatz von Motor zu Rad und der kurze Abstand resultierten in einen zu großen Winkel für die Antriebswelle. Schließlich war die Trennung der Getriebestufen nötig. Das Versatzproblem löste man durch den Anbau eines Stirnradgetriebes am Motor, das ein versetztes Einstecken der Antriebswellen zulässt. Diese Trennung und die Wahl eines Radgetriebes mit $i=4$ resultierte dann in eine neue Gesamtübersetzung von $i=12$, wodurch auch die Motorkennlinie nochmals angepasst werden musste. Die Motordrehzahlen stiegen, die Drehmomente wurden verringert auf maximal 500Nm pro Motor

E-Maschinentyp

Für die Betrachtungen zur Motor-Getriebekombination in den drei Motor-Getriebe-Anordnungen (Bild 30a bis 30c) wurden die folgenden E-Motor-Topologien näher hinsichtlich der Anforderungen im Trailer beleuchtet:

1. Asynchronmaschine mit Käfigläufer
2. PM-Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten
3. PM-Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten und Reluktanzmomentnutzung (Hybridsynchronmaschine)



Die geschaltete Reluktanzmaschine fällt aufgrund teurer Umrichtertechnik aus. Die Synchronreluktanzmaschine ist typischerweise für hohe Überlastung ungeeignet und auch die Leistungsdichte ist gering. Eine fremderregte Synchronmaschine mit zusätzlicher Erregerstromregelung wurde ebenfalls nicht näher betrachtet. Die detaillierteren Berechnungen umfassen die Asynchronmaschine mit verteilter Wicklung und die Synchronmaschine sowohl mit verteilter Wicklung als auch in einer Zahnspulenausführung. Dies in den Varianten mit Oberflächen- und auch mit eingebetteten Magneten.

Ein paar wichtige Ergebnisse aus den Berechnungen wurden in einer Tabelle gegenübergestellt. Bild 31 zeigt einen kleinen Auszug aus den diversen Berechnungen zur Vielzahl an möglichen Kombinationen und Motortypen. Die Berechnungen der Getriebevarianten beziehen sich noch auf die Auslegung mit $i=8$ und 750Nm Maximalmoment. Im weiteren Verlauf des Projektes nach der Wahl der Motortype wurde die Übersetzung auf $i=12$ verändert, sodass sich z.B. die Gewichte und Volumen reduzierten.

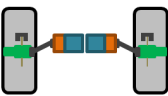
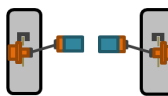
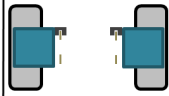
								
	ASM	PM-Synchron vert. Wicklung	PM-Synchron Zahnspule	ASM	PM-Synchron Zahnspule	PM-Synchron Zahnspule		
Polzahl	8	6	16	4	8	60		
Durchmesser x Länge	355 x 370 mm	300 x 340 mm	300 x 210 mm	270 x 350 mm	215 x 215 mm	510 x 345 mm		
Volumen	36,6 l	24,0 l	14,9 l	20,0 l	7,8 l	70,5 l		
Rotor	Aluminiumkäfig	Oberflächenmagn.	Oberflächenmagn.	Aluminiumkäfig	Oberflächenmagn.	Oberflächenmagn.		
Wirkungsgrad 45kW	93,5 %	94,5 %	94,5 %	95,0 %	95,5 %	87,0 %		
Leerlaufverluste bei 80km/h	300 W	1850 W	3350 W	1000 W	4700 W	4100 W		
Gewicht (Motor)	155 kg	84 kg	49 kg	86 kg	35 kg	198 kg		
Trägheit (Motor-Getriebe)	29,9 kg*m ²	3,9 kg*m ²	3,6 kg*m ²	43,2 kg*m ²	4,24 kg*m ²	4,3 kg*m ²		
Preis Motor (1000 Pcs./a)	1780 €	2160 €	1510 €	1350 €	1230 €	5270 €		

Bild 31: Berechnungsergebnisse

In der Tabelle ist auch nochmals der Direktantrieb aufgeführt, der zu Anfang näher mitbetrachtet wurde. Aufgrund der zahlreich vorhandenen rot markierten Felder wurde er schon in einer frühen Phase aussortiert. Bei den Synchronmaschinen sind hohe Leerlaufverluste vorhanden, die Asynchronmaschinen (ASM) haben hier deutlichen Vorteil, wobei Motorgewicht und Trägheit deutlich höher sind.

Die PM-Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten benötigt tendenziell einen hohen Anteil an teurem Magnetmaterial und hat den wesentlichen Nachteil, dass im Fehlerfall bei hoher Drehzahl eine hohe Spannung an den Klemmen ansteht. Entsprechend müssen zusätzlich Sicherheitsrichtlinien beachtet werden, die z.B. das Einschalten eines aktiven Kurzschlusses erfordern. Eine solche Maschine muss so ausgelegt sein, dass sie dabei weder entmagnetisiert, noch thermischen Schaden nimmt.

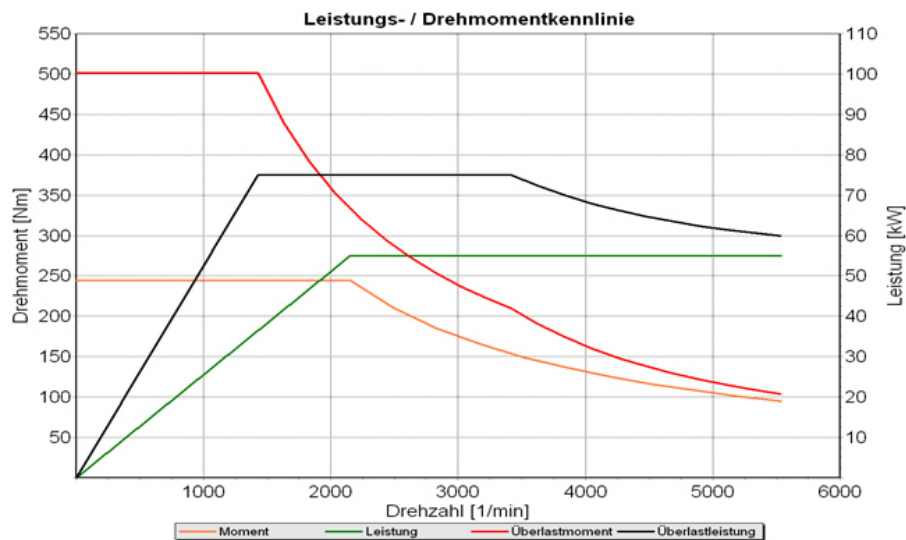
Die Asynchronmaschine ist robust, günstig und sicherheitstechnisch unbedenklich. Sie hat zudem den enormen Vorteil, während der anteilsmäßig langen Schleppzeiten nahezu verlustfrei zu arbeiten, ohne dass man sie abkuppeln muss. Jedoch ist sie tendenziell größer und schwerer als eine vergleichbare PM-Synchronmaschine. Um günstig in der Herstellung zu bleiben, wird ein Aluminiumkäfigläufer verwendet. Die hohen Leerlaufverluste der PM-Synchronmaschine erhöhen den Spritverbrauch in solch hohem Maße, dass dies ohne ein Abkuppeln die geplante Amortisation unmöglich macht. Das Abkuppeln erhöht die Initialkosten durch weitere



Bauelemente und es verlängern sich die Anregelzeiten in nicht tolerierbarem Maß zwischen dem Zeitpunkt der erkannten Bremsanforderung über das Hochdrehen des Motors, Einkuppeln und schließlich der Freigabe von Bremsmoment. Herstellkosten, Sicherheitsaspekte und Verluste sprechen also für die Asynchronmaschine. Das höhere Gewicht ist nachteilig, kann aber bei der Auslegung in Kauf genommen werden.

Letztlich wurde eine 8-polige Ausführung gewählt, die geringe Jochstärken und somit einen großen Bohrungsdurchmesser erlaubt. Es wurde eine spezielle Stator-Rotor-Nutvariante gewählt, die auf eine gute Überlastfähigkeit getrimmt ist, sodass ein Vorschub von bis zu 3.5 N/cm² für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge genutzt werden kann. Der Rotor kann günstig als Aluminiumguss-Käfigläufer ausgeführt werden. Der Wechsel auf die höhere Übersetzung resultierte in eine Erhöhung der Drehzahlen und damit erhöhte Grundfrequenzen bis annähernd 400Hz. Das erfordert eine spezielle Bewicklung. Die hohen Grundfrequenzen dürfen nicht zu einer nachteiligen Verlustentwicklung führen, was bei der Herstellung der Spulen und auch der Blechsauswahl berücksichtigt wurde. Die Maßnahmen konnten so gestaltet werden, dass es keine nennenswerte Erhöhung der Herstellkosten mit sich brachte.

Bild 32 zeigt das Datenblatt mit der Kennlinie der finalen Motorauslegung.



	Bemessung				Überlast			
	P _{red.}	P	Fs P _{kon.}	Fs P _{red.}	P _{red.}	P	Fs P _{kon.}	Fs P _{red.}
Spannung U [V]		360	450		280	360	450	450
Leistung mech. P [kW]		55	55		75	75	75	60
Nennstrom I [A]		130			225	170		
Magn.-Strom I _{mag} [A]		65			82	65		
Frequenz f [Hz]		145,0	372,0		98,0	145,0	230,0	372,0
Drehzahl n [min ⁻¹]		2151	5539		1429	2141	3416	5534
Moment M [Nm]		244	95		501	335	210	104
Leistungsfaktor cos φ [-]		0,74			0,77	0,78		
Wirkungsgrad η [%]		94,0			92,0	93,0		
M _{kopp} /M _{kon.}		2,5	1,6		1,6	1,9	1,9	1,5

Polzahl	8
Schaltung	Stern
Betriebsart	S9-Zyklus
zul. Umrichtertaktfrequenz ≥	4 kHz
zul. Impulsanstiegszeit ≥	0,3 μs

Ersatzschaltbild (jeweils Strangwerte)			
R1	12,1 mΩ	X1σ	123,0 mΩ
R2'	13,3 mΩ	X2σ'	159,0 mΩ
Xh	2,90 Ω	f	145,0 Hz

Widerstände R bei Raumtemperatur (20°C).
 Umrechnung auf Betriebstemp.: R_{warm} = R_{20°C} x 1,4.
 Reaktanzen bei Nennfrequenz f.
 Berechnung Induktivität: L = X / (2 x π x f).

Bild 32: Technisches Datenblatt Asynchronmaschine

Im weiteren Verlauf der Arbeiten im Arbeitspaket 3 wurde im zweiten Bearbeitungsjahr besonderes Augenmerk auf ein möglichst optimales und auf den Trailer abgestimmtes



Kühlkonzept gelegt. Aufgrund der hohen Spreizung von Überlastleistung zur Nennleistung und des damit verbundenen relativ großen Motors, waren die Gegebenheiten für eine reine Oberflächenluftkühlung günstig.

Thermische Betrachtung / Kühlkonzept

Die Maschine wurde in den verschiedenen repräsentativen Betriebspunkten berechnet und die Verlustverteilung im Motor ermittelt. Eine grobe Kalkulation anhand eines Quelle-Senke-Modells ermöglichte die Festlegung der nötigen Kühloberfläche für eine reine Oberflächenluftkühlung mithilfe des Fahrtwindes. Folgende Annahmen lagen dem Modell zugrunde:

- Motor wird homogen umströmt
- Gesamt Oberfläche entwärmt (außer A-Seite wegen Getriebeanbau)
- Luftgeschwindigkeit = Fahrzeuggeschwindigkeit
- α -Wert für längs angeströmte Metallwand¹
 - $v < 5\text{m/s}$: $\alpha = 5.8 + 4 \cdot v$
 - $v > 5\text{m/s}$: $\alpha = 7.14 \cdot v^{0.78}$

Im nachfolgenden Diagramm sind als Ergebnis die Verläufe der Oberflächentemperaturen bei verschiedenen Betriebspunkten dargestellt.

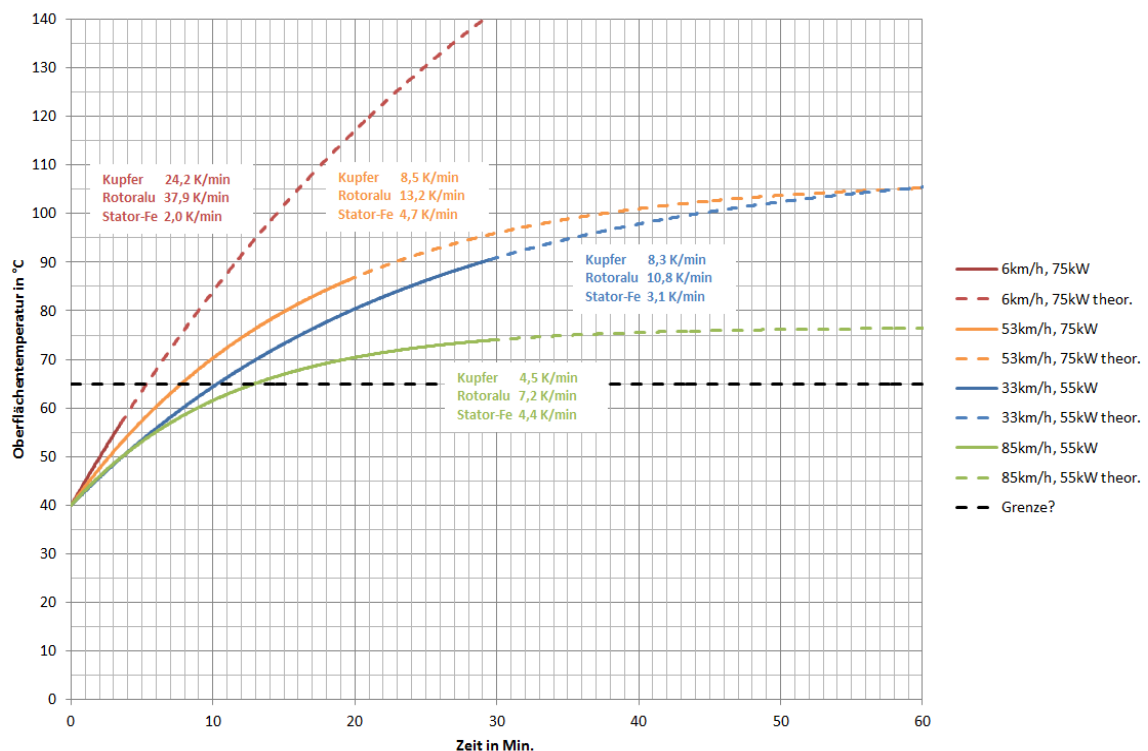


Bild 33: Verlauf der Oberflächentemperaturen

Die Oberfläche des Motors wurde anhand des Modells so eingestellt, dass bei 40°C Umgebungstemperatur (= Starttemperatur) und einer Belastung der Antriebe mit 55kW über 10 Minuten hinweg im motorischen Betrieb eine Oberflächentemperatur von 65°C nicht überschritten wird. In dieser Zeit würde man die Batterie um etwa 20kWh entladen. Die

¹ Nach www.schweizer-fn.de



Oberfläche des Motors wurde dabei von 0.4m² auf 1.1m² durch Verrippung vergrößert. Das fertige Gehäusegussmodell, wie es schließlich hergestellt wurde, verfügt sogar über eine Oberfläche von 1.3m², da die Anströmung durch den Einbau direkt hintereinander am Unterboden des Trailers nicht optimal mit Luft umströmt wird.

Im Bild 34 ist die Anordnung beider Motoren im Fahrzeug mit angebauten Stirnradgetrieben gezeigt.

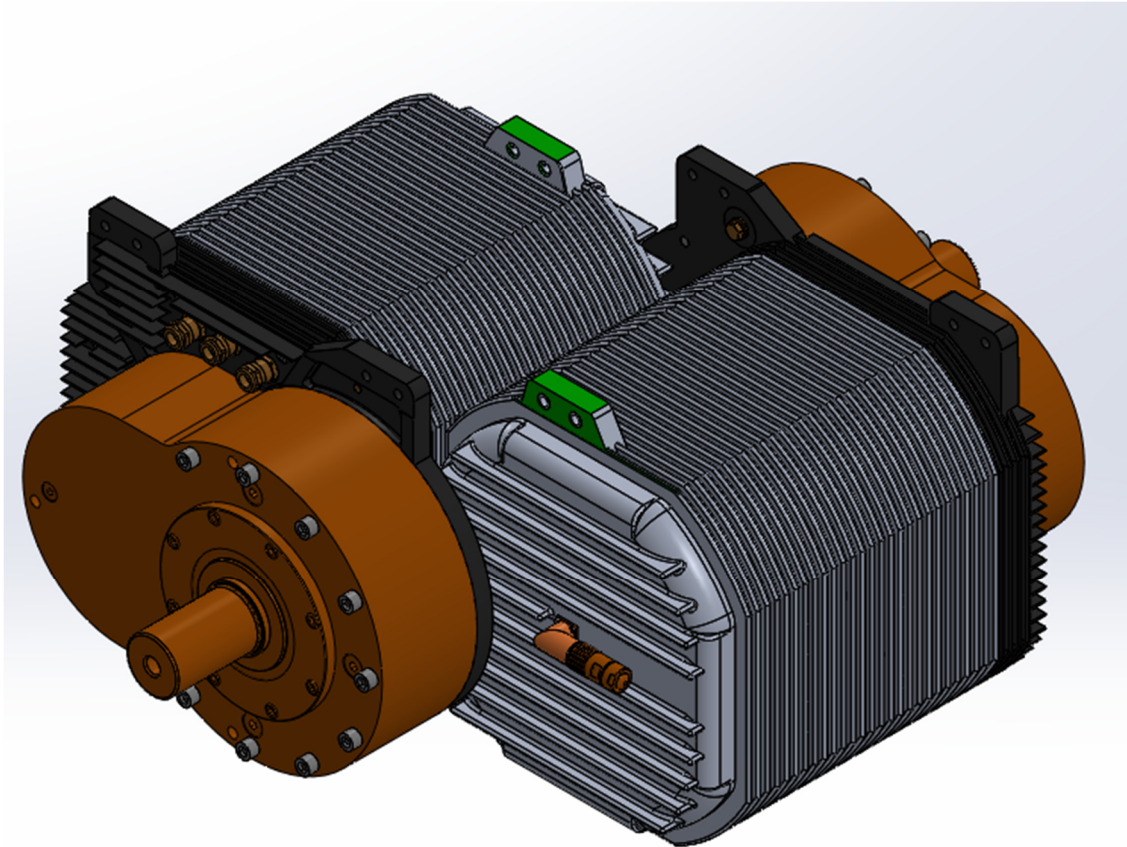


Bild 34: Motormodell, Einbaukonfiguration

AS3.5/3.6/3.7 Detailkonstruktion/Fertigung der Antriebsmodule

Der Motor selbst verfügt nur über ein einseitiges Stützlager auf der B-Seite. Auf der A-Seite wird die Welle des Motors in den gelagerten Eintrieb des Getriebes gesteckt. Als Drehzahlgeber wird ein VR-Resolver von Tamagawa verwendet, der b-seitig im Alugussgehäuse verbaut ist. Die Anschlüsse, sowie die der Temperatursensoren werden über einen wasserdichten Winkelstecker nach außen geführt. Die Leistungsanschlüsse werden direkt über drei EMV-geschirmte Einzelphasen-Leitungen ausgeführt. Die Motoren sind in der Schutzart IP65 für den Einsatz in rauer Umgebung aufgebaut.

Bild 35 zeigt das Antriebsmodul vor dem Einbau in den Trailer.

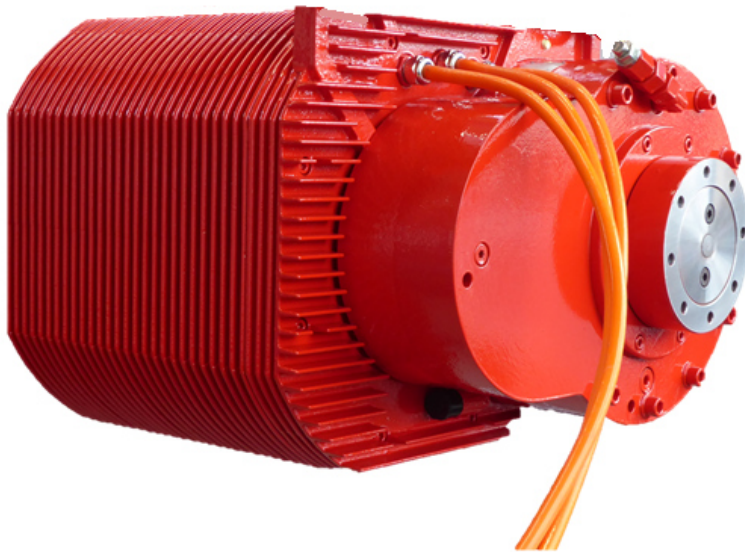


Bild 35: Antriebsmodul

AS3.8 Funktionsnachweis

Es wurden insgesamt drei Motoren aufgebaut, wovon ein erster mit sehr umfangreicher Sensorik für die Tests im Prüffeld ausgestattet wurde. In den Prüffeldtests wurden die diversen fahrzeugrelevanten Arbeitspunkte thermisch angefahren und mit den Vorberechnungen verglichen. Die Abbildungen 36 und 37 zeigen den mechanischen Prüfaufbau.



Bild 36: Mechanischer Prüfaufbau Motor (ohne Getriebe)

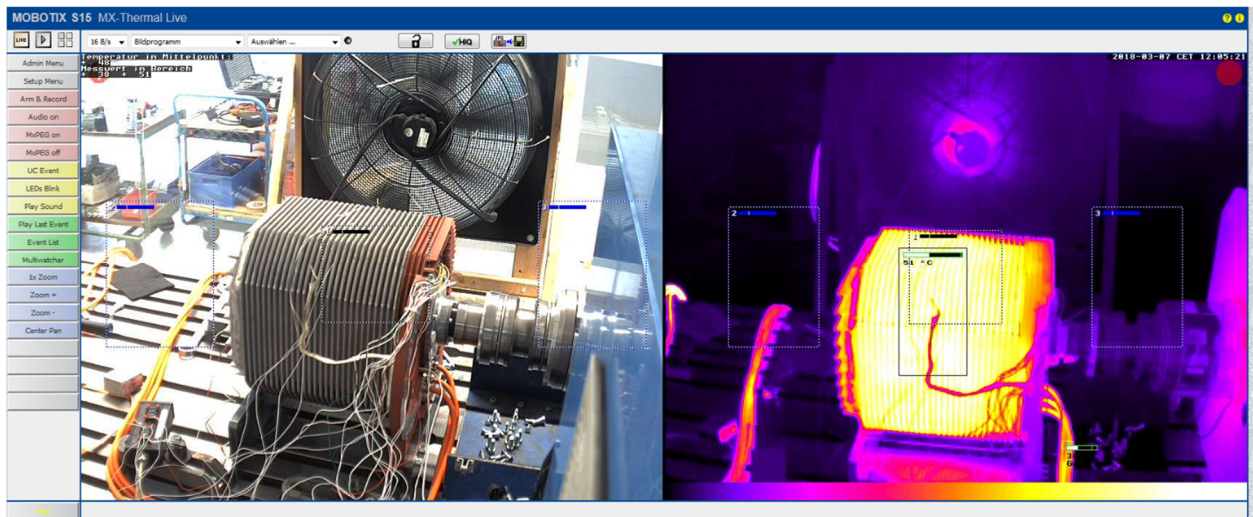


Bild 37: Thermische Überwachung im Test

Im Hintergrund in Bild 37 ist der Lüfter zu sehen, der den Fahrtwind simuliert. Anhand einer Drehzahlregelung konnte mit diesem der jeweilige Betriebszustand mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten getestet werden. Eine Thermokamera als Ergänzung zu den PT100-Temperatursensoren dokumentierte den zeitlichen Verlauf des thermischen Verhaltens der Maschine.

Die Belastungsversuche zeigten, dass die Motorauslegung passend gewählt wurde. Die Motorkennlinie mit Strom, Spannung und Leistung entsprach den Berechnungen. Auch die zuvor errechneten thermischen Modelle konnten im Prüffeld bestätigt werden. Aus dem Kaltzustand heraus kann das Überlastmoment von 500Nm eines Motors (mit $i=12$ 6000Nm pro Rad und 12.000Nm pro Achse) etwa 15 Minuten lang abgerufen werden bis die geplante Temperaturschwelle von 65°C an der Gehäuseoberfläche erreicht ist. Der gemessene Verlauf ist niedriger als die theoretische Kurve zeigt. Grund dafür ist die größere Kühlfläche am realen Motor und der fehlende Anbau des Getriebes. Tatsächlich ist das Getriebe eine Temperaturquelle, im Prüffeldaufbau wurde hier jedoch Wärme abgeführt. Insgesamt zeigten die Versuche, dass die Verläufe für den Betrieb im Trailer ausreichend sind und selbst bei Verschmutzung der Oberfläche im Trailer vermutlich noch Reserven vorhanden sind.

Die Wicklungstemperaturen im 75kW Überlastpunkt steigen auf 120°C an, 170°C wären zulässig (siehe Bild 38). Also auch Stator- und Rotortemperaturen sind in unkritischen Bereichen und verlängern die Lebensdauer des Isoliersystems.

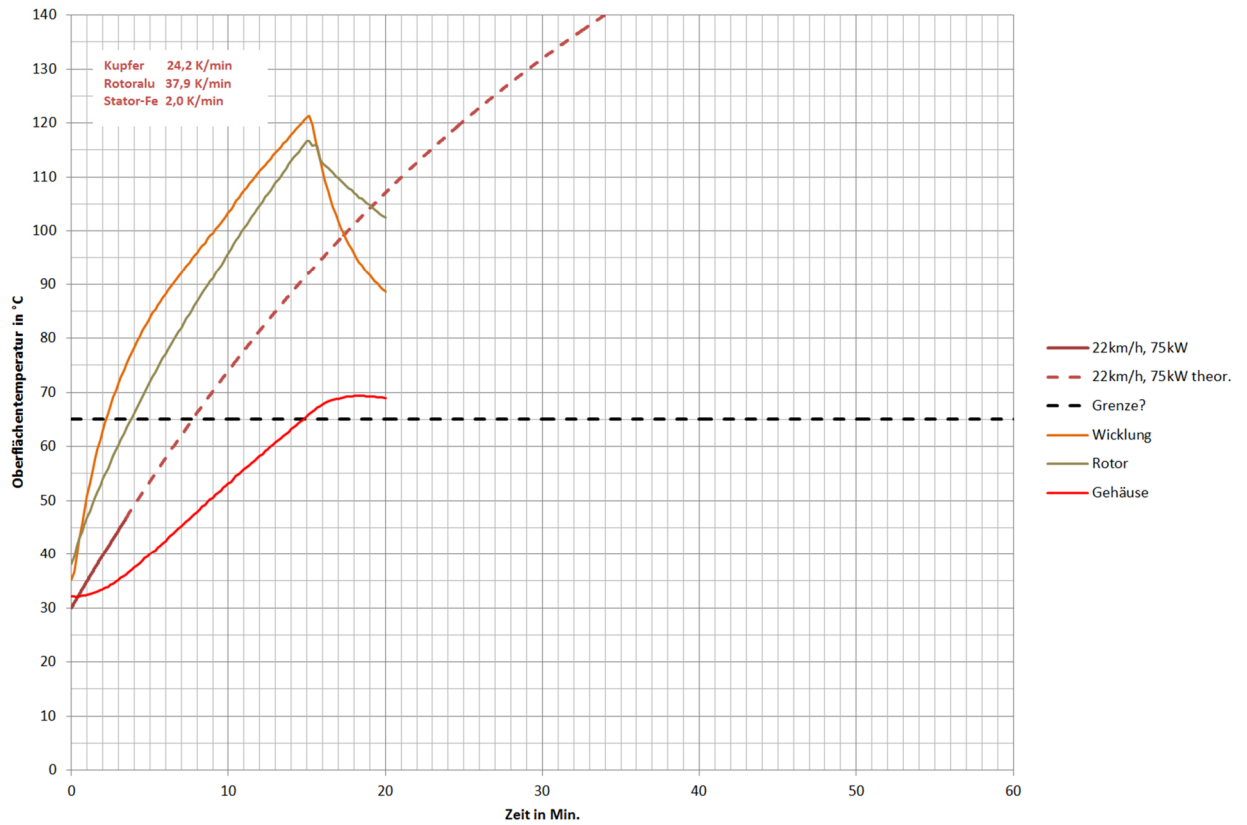


Bild 38: Messdaten 75kW-Betriebspunkt

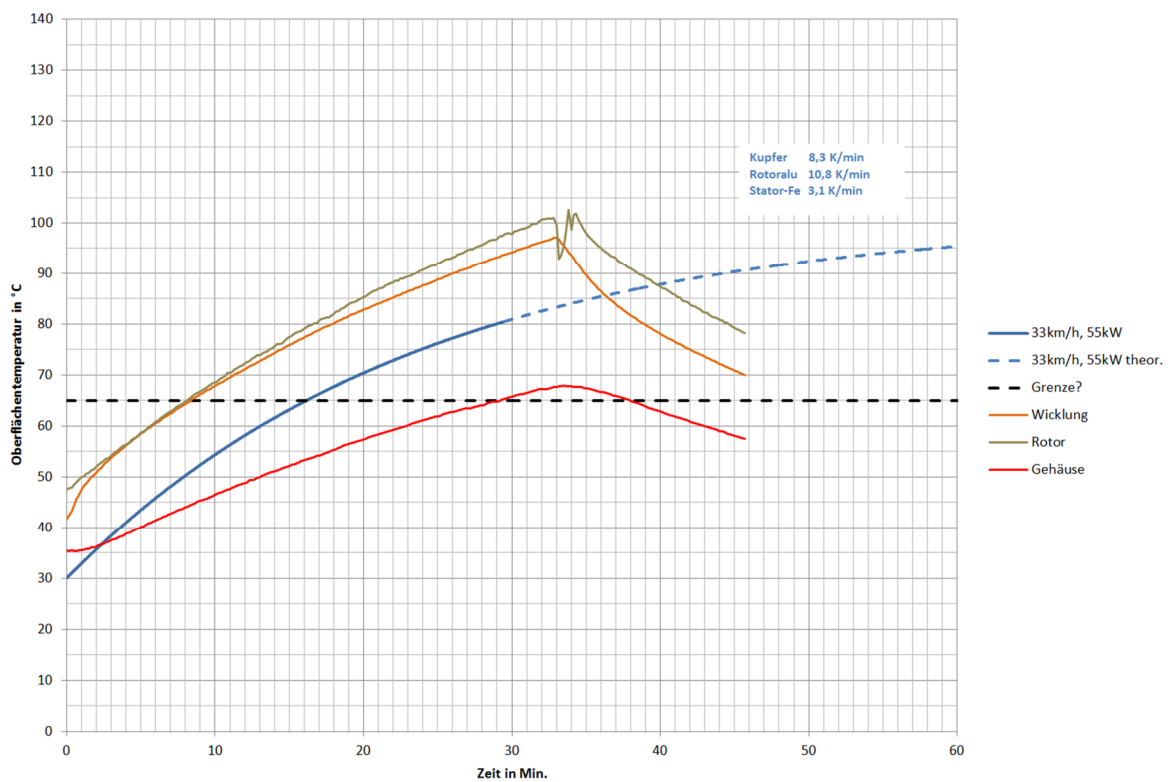


Bild 39: Messdaten 55kW-Betriebspunkt (10-Minuten-Leistung)

Auch die getestete 10-Minuten-Nennleistung des Motors im mittleren Geschwindigkeitsbereich liegt in einem guten Temperaturfenster. Auch hier wären noch ausreichend Reserven



vorhanden. Insgesamt ist festzustellen, dass der Motor auch unter schlechteren Kühlverhältnissen mit langer Lebensdauer betrieben werden kann.

Die Auslegungsdaten betreffen das aktuelle System mit einer mittleren Batteriegröße. Die Messergebnisse zeigen, dass mit den höheren Betriebsdauern auch eine vergrößerte Batterie zum Einsatz kommen dürfte und Betriebsdauern deutlich gesteigert werden können.

In einem weiteren Versuch wurde der Innenlüfter im Speziellen betrachtet, weil er zum einen für die Entwärmung des Rotors zuständig ist, zum anderen aber auch nicht zu groß sein darf wegen dann zu hohen Leerlaufverlusten. In der ersten Motorauslegung tendierte man eher hin zu größeren Flügelflächen, um auch sicher eine ausreichende Verlustabfuhr des Rotors an das Gehäuse und die Umgebung zu gewährleisten.

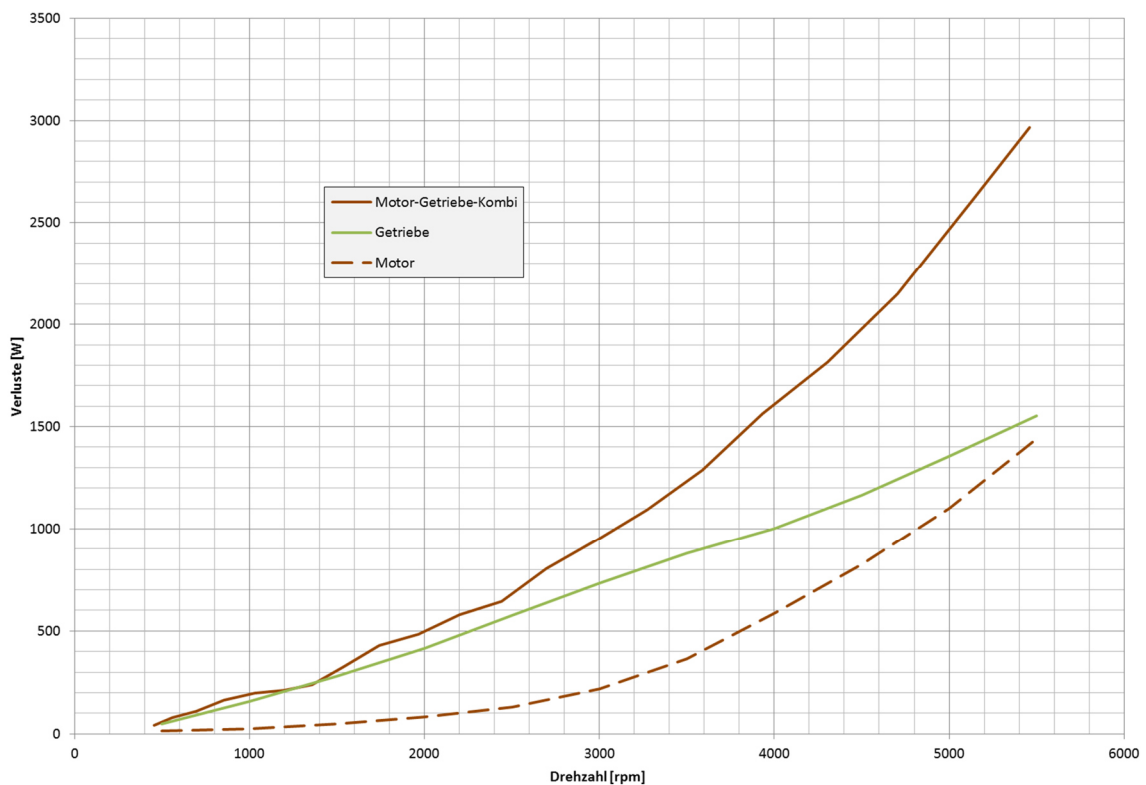


Bild 40: Austrudelversuche zur Verlustbestimmung im Leerlauf

Die braun gestrichelte Kennlinie ist neben einem kleinen Anteil an Lagerreibung im Wesentlichen auf die Luftreibung des Innenlüfters zurück zu führen. Die aufgenommenen Verläufe zeigen einen Leistungsbedarf von 1,4kW. Anhand der Messdaten und der Anpassung des thermischen Modells müsste man diese Verluste auf etwa die Hälfte reduzieren können bei trotzdem ausreichender Rotorentwärmung.

Vor allem fielen bei den Austrudelversuchen die hohen Verluste des Stirnradgetriebes auf (grüne Linie), die so im Vorfeld nicht zu erwarten waren. In Rücksprache mit dem Hersteller gibt es hier deutliches Verbesserungspotential. Die hohen Verluste führen hier sogar dazu, dass diese Getriebe mit einer aktiven Ölrückkühlung ausgestattet werden müssen, da sie ansonsten schon im Leerlauf über eine längere Betriebszeit der Gefahr einer Überhitzung ausgesetzt sind. Niedrigere Ölfüllmengen und eine Anpassung der Verzahnungsausführung sind für zukünftige Ausführungen eingeplant. Die Ergebnisse zeigen also, dass sowohl am Innenlüfter, wie auch im



Getriebe noch Verbesserungen zur Verringerung der Verluste im Schleppbetrieb gemacht werden müssen. An den aktuellen Motoren und Getrieben war eine Nachbesserung nicht mehr möglich.

AP5: Trailer-Control-Unit, TCU-Schnittstelle Wechselrichter

Für die Erwärmungsläufe der Motoren kam OSWALD-eigenes Umrichter-Equipment zum Einsatz. Um den Betrieb im Fahrzeug möglichst effektiv vorzubereiten ist es sinnvoll, das System bestehend aus Wechselrichter und Motor bereits am Prüfstand aufeinander abzustimmen. Dies wurde gemeinsam mit der CuroCon GmbH und dem Wechselrichterhersteller Aradex durchgeführt. Auch die nötigen Baugruppen der Trailer-Control-Unit wurden dabei schon mit eingebunden und alle Schnittstellen implementiert und getestet. Die Vorkonfiguration im Prüffeld erleichterte die spätere Inbetriebnahme des Trailers.

Für eine möglichst effiziente Verlustverteilung im Fahrbetrieb muss der Regler im Speziellen bei der Asynchronmaschine den Rotormagnetisierungsstrom der Lastanforderung anpassen. Eine hohe Drehmomentanforderung erfordert hohe Magnetisierungsströme, damit es nicht zu einem Kippen kommt. Das Drehmoment würde einbrechen. Diese Kippgrenzen wurden im Umrichter hinterlegt und die Regelung des Magnetisierungsstromes entsprechend justiert. So werden bei niedriger Drehmomentanforderung Erregerströme reduziert und somit auch die Rotorverluste und die Gesamtverluste minimiert. Entsprechend kann ein verlustoptimierter Betrieb über alle Betriebszustände realisiert werden. Bild 41 zeigt das anhand dieser Reglerparametrierung zu erwartende Effizienzdiagramm der Motoren.

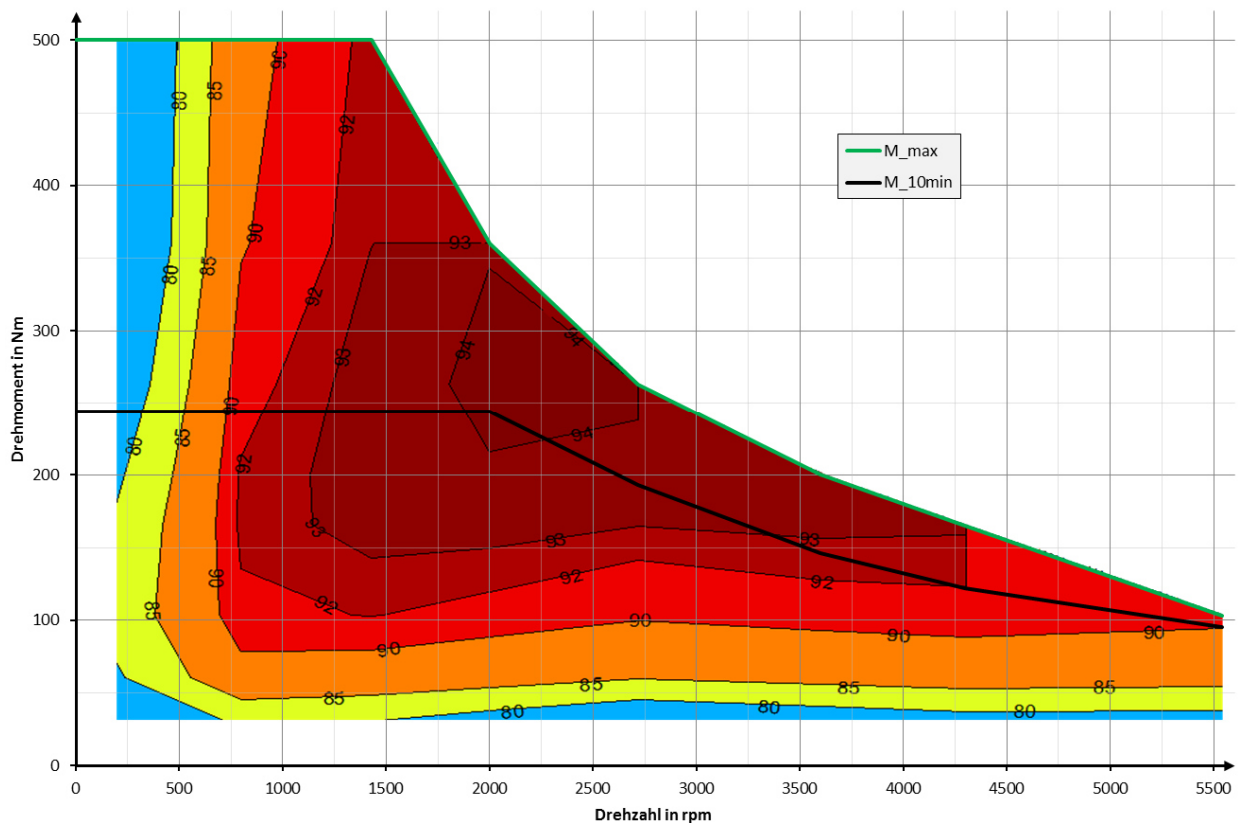


Bild 41: Effizienzdiagramm QD18

Im Diagramm sind die Messergebnisse aus den Austrudel- und Erwärmungsversuchen bereits



berücksichtigt. Aufgrund des noch etwas zu groß dimensionierten Innenlüfters fallen die hohen Wirkungsgrade im Drehzahlbereich ab 4000rpm mit sinkender Drehmomentbelastung stark ab. Dies ist noch an zukünftigen Motoren durch eine Verkleinerung der Lüfterflügel zu erreichen. Die roten Wirkungsgradbereiche erweitern sich dann nach unten hin zu niedrigen Drehmomenten. Die Antriebe werden im Trailer mit überwiegenden Zeitanteilen im Leerlauf betrieben und sollten in diesem Betriebsbereich möglichst geringe Verluste produzieren

AP7: Demonstrator, Konstruktion el./mech. Schnittstellen

Im Projektverlauf wurden die Annahmen aus der Planungsphase durch die Umsetzung und den Aufbau der Teilkomponenten nach und nach durch Erfahrungs- und Messwerte ersetzt. Die Erkenntnisse flossen in die konkrete Aufbauplanung des Demonstrators ein.

Am Beispiel des Kühlsystems war zu Anfang ein Wasserkühlsystem für die Motoren und eine Oberflächenkühlung des Getriebes eingeplant. Für das Getriebe wurde ein repräsentatives Wirkungsgraddiagramm eines ähnlichen Getriebetyps verwendet. Im zweiten Projektjahr veränderte sich dies dahingehend, dass die Motoren mit einer reinen Oberflächenluftkühlung ausgestattet werden konnten. Die Verlustabfuhr über ein Rückkühlsystem entfiel günstigerweise. Gleichzeitig stellte sich bei den Prüffeldversuchen zu den Antriebsmodulen jedoch heraus, dass man die Annahme eines über alle Betriebspunkte hinweg guten Getriebewirkungsgrades deutlich korrigieren musste. Die Stirnradgetriebe werden bereits im Leerlauf so heiß, dass das Getriebeöl bei längeren Fahrten über einen Ölkreislauf aktiv rückgekühlt werden muss. Während des Projektverlaufes konnte darauf nicht mehr begünstigend eingewirkt werden, weshalb zumindest für den Demonstrator eine solche aktive Kühlung notwendig ist und auch real aufgebaut werden musste.

Themen aus diesem Arbeitspaket wie die Detaillierung der Pläne zum Anbau aller Komponenten und der Erstellung aller mechanischen und elektrischen Verbindungen und Stromlaufpläne wurden sukzessive gemeinsam mit der CuroCon GmbH und der Framo GmbH bearbeitet.

Die effektive Vorinbetriebnahme im Prüffeld zur Ansteuerung und Regelung der Antriebsmodule reduzierte den Aufwand nach dem Einbau in den Demonstrator.

5.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben sind überwiegend den Personalkosten zuzuordnen. Etwa 85% der Ausgaben wurden hierfür verwendet. Die weiteren Ausgaben betreffen Material- (13%) und Reisekosten (2%).

Die angefallenen Kosten für die einzelnen Positionen über die gesamte Projektlaufzeit sind im Detail dem Verwendungsnachweis zu entnehmen, der gesondert dem Projektträger zugeht.

5.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Der Antrieb eines autark arbeitenden Trailers für den Einsatz im Fernverkehr mit hohem Transportvolumen und Gewichten stellt eine neue Herausforderung dar. Hinsichtlich der



technischen Einsatzart und vor allem auch der Wirtschaftlichkeit für ein sich anschließendes Serienprodukt ist ein besonderes Konzept notwendig. Alle Komponenten müssen so ausgelegt sein, dass sie im Zusammenspiel letztendlich für den Käufer und Betreiber des Trailers attraktiv sind. Hinzu kommen noch Aspekte, die einen zukünftigen bewussteren Umgang mit Ressourcen und Belastungen der Umwelt berücksichtigen müssen. Der Trailerantrieb reduziert den Schadstoffausstoß und den Treibstoffverbrauch des Sattelzuges.

Darauf basierend muss auch die Komponente ‚Antriebsmodul‘ als Hauptgegenstand der Entwicklung in diesem Teilvorhaben speziell hierfür angepasst sein. Eine umfangreiche Erarbeitung und Betrachtung aller Randbedingungen und Betriebsbereiche führte dazu, dass man für diesen Anwendungsfall nicht auf eine besonders leistungsdichte PM-Synchronmaschine setzen konnte. Die Vorteile einer speziellen Asynchronmaschine überwiegen deutlich und machen eine Amortisation überhaupt erst möglich. Eine hohe Drehmomententwicklung bei geringen Verlusten vor allem im Leerlauf und eine möglichst sinnvolle und effektive Kühlungsart erforderten die Umsetzung einer sehr speziellen Auslegung der Motoren. Alle dafür notwendigen Arbeitsschritte wurden effektiv bearbeitet, die Abstimmungen mit den Partnern wurden eng geführt. Zwei Antriebsmodule konnten schließlich termingerecht im zweiten Projektjahr begonnen und zum Meilenstein der Fertigstellung der Komponenten des Verbundprojektes evTrailer Anfang des dritten Projektjahres an die Framo GmbH für den Einbau geliefert werden.

Der Aufwand im Teilprojekt umfasste das Erarbeiten einer Antriebsspezifikation, den Aufbau der Antriebe und die Planung des Einbaus mit der nötigen Schnittstellenklärung im Demonstratorfahrzeug. Dies gemeinsam und in engem Austausch mit den Partnern im Verbundprojekt. Die Ziele wurden mit angemessenem Aufwand erreicht.

5.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Antriebsmodul

Das im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts entstandene Antriebsmodul in seiner aktuellen Auslegung hat sich als passend für diese Anwendung erwiesen. Die berechneten Vorteile der hochpoligen Asynchronmaschine als Achsantrieb haben sich in den Messungen bestätigt. Auch die Oberflächenkühlung und die sehr effiziente Innenumluftkühlung überzeugten und ermöglichen eine für Asynchrontechnik hohe Leistungs- und Drehmomentdichte der Antriebe. Mit einem noch verbesserten Getriebe und einem angepassten Innenlüfter im Motor dürfte der Antrieb sehr interessant für verschiedene Kunden sein. Da der Trailer vom bisher rein passiven Fahrzeug nun zum aktiven Fahrzeug mit eigenem Antrieb wird, müssen entsprechende Änderungen der Gesetzeslage gemacht werden. Das stetige Interesse der Firma Schwarzmüller als Trailerhersteller von Anfang bis Ende des Projektes lässt darauf schließen, dass bei entsprechender Anpassung der Gesetzeslage für ein vereinfachtes Zertifizierungs- und Zulassungsverfahren ein solider Markt für solche Konzepte eröffnet wird. Angesichts der Debatten um den CO₂-Ausstoß und die Bemühungen zur Begrenzung der Klimaerwärmung scheint das entstandene Antriebssystem für den evTrailer ein passendes Produkt zur passenden Zeit zu sein. OSWALD sieht gute Chancen auf einen Einstieg in diesen Markt. Im Falle einer angepassten Gesetzgebung ist man nun in der Lage, früh ein Produkt liefern zu können. Mit den aktuellen Antrieben ist theoretisch auch die Auslegung auf höhere Batteriekapazitäten und



damit eine höhere elektrische Unterstützung umsetzbar.

Die neuerliche Präsenz solcher Entwicklungen wie die in 2018 vorgestellten Antriebssysteme von Bosch und Wabco und auch der eTrailer von Trailer Dynamics in 2019 stimmen sehr zuversichtlich, ein schlagkräftiges Produkt in der Nutzfahrzeug- und Transportbranche etablieren zu können. In der Umsetzung einer reinen Oberflächenluftkühlung und der Asynchrontechnik bei unserem Antriebssystem sehen wir einen Mehrwert und eine Abgrenzung zu den Systemen der Wettbewerber. Es ergeben sich für den Kunden Vorteile hinsichtlich eines niedrigeren Anschaffungspreises und einer verbesserten Effizienz. Auch die gewählte Größe von Antriebsleistung und Batteriekapazität findet sich bei anderen Firmen wieder. Das stützt unsere bisher noch theoretischen Berechnungen, da man offensichtlich an anderer Stelle zu ähnlichem Ergebnis für eine sinnvolle Umsetzung gekommen ist.

Motorentechnik

Der Aufbau der Asynchronmaschinen bot einige weiterentwickelte technische Umsetzungen, die bei OSWALD in zukünftige Produkte im Sektor für mobile Antriebe einfließen können.

So kam beispielsweise ein neuer temperaturstabiler Typ für die EMV-Leistungskabel speziell für den direkten Anschluss im relativ heißen Wickelkopf des Motors und auch ein spezieller robuster VR-Resolver zum Einsatz. Auch die Auslegung des Lüfterrades und die Verifizierung des thermischen Modells mit einer Entwärmung des Rotors im sekundären Wärmekreislauf brachten nützliche Erkenntnisse. Ein zuvor berechnetes Wärmemodell wurde abgeglichen und kann die Basis für weitere Motoren bilden.

Robuste Bauweise in hoher Schutzart trotz der Anforderung eines möglichst leichten Designs ist ebenfalls zukünftig von Nutzen. Auch das Wissen um die Problematiken zu den Getrieben war aufschlussreich. Diesen Punkt hat man bei der Betrachtung des Gesamtpakets in der Planungsphase unterschätzt. Ein erfahrener Getriebepartner, der an der Optimierung des Antriebsstranges mitarbeitet, wäre im Nachhinein betrachtet sinnvoll gewesen.

Vernetzung in der Antriebsbranche

Nicht zuletzt ist die Vernetzung mit anderen Firmen und Instituten von besonderem Nutzen auf dem Sektor der mobilen Antriebe. Das Auftreten als möglicher Antriebslieferant weckt das Interesse potentieller Kunden. Es fand ein wichtiger Erfahrungsaustausch während der Projektlaufzeit zwischen Partnern, Interessenten, Wettbewerbern statt, vor allem auch im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit.

5.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der weltweit führende Bremsenhersteller WABCO zeigte auf der IAA Nutzfahrzeuge 2018 den ersten Prototypen eines elektrifizierten Trailers. Es sind hier einige Parallelen zu unserem Trailer zu erkennen. Die Antriebsleistung und Batteriegröße scheint ähnlich und es wurde mit ähnlicher Verbrauchsreduzierung geworben. Der Antrieb ist allerdings etwas anders aufgebaut. Es gibt einen Zentralmotor, der in ein Differenzial eintreibt, was z.B. keine gezielte Verteilung des Antriebs- oder Bremsmomentes ermöglicht. Die Veröffentlichung dieses Systems und zu diesem Zeitpunkt verdeutlichte, dass sich der Markt allmählich in diese Richtung entwickelt. Es wird inzwischen mit entsprechendem Aufwand an solchen Systemen gearbeitet.



Auch Bosch warb im August 2018 für ein Antriebssystem für Trailer. Hier wurde auch das autarke Rangieren hervorgehoben, das mit Boschs Zwei-Motoren-System zusätzlich möglich ist. Amortisierungszeiten von zwei Jahren werden angegeben, die vor allem auch bei Kühltrailern gut erreichbar sein sollen, da die zusätzliche Versorgung für die Kühlleistung entfallen kann. Auch die niedrige Geräusentwicklung ist ein deutlicher Vorteil. Systemgröße und Leistungsbereich sind ähnlich gelagert wie im Verbundprojekt evTrailer. Das stützt unsere Ergebnisse zur Dimensionierung.

Zum Ende des Projektes im September 2019 wurden wir noch auf einen weiteren Hersteller eines angetriebenen Trailers aufmerksam. Die Firma Trailer Dynamics stellt auf Ihrer Internetseite den NEWTON eTrailer vor. Sehr ähnlich in der Bewerbung des Trailers sind die autarke Unterstützung des Fahrverhaltens der Zugmaschine und die prediktive Streckenplanung. Diese unterstützt ähnlich unserer Betriebsstrategie vorausschauend den möglichst verbrauchsoptimierenden Einsatz der gespeicherten Energie. Deutliche Unterschiede gibt es jedoch in der Höhe der verbauten Antriebsleistung. Während wir 150kW Spitzenleistung und 50kWh an nutzbarer elektrischer Energie verbauen, sind beim NEWTON eTrailer 640kW Maximalleistung und 200kWh gespeicherte Energie verbaut. Dies in der deutlich schwereren LiFePo4-Batterietechnik. Aus Sicht des Beschleunigens sind solche hohen Motorleistungen nicht nötig. Die Zugmaschine selbst kommt mit etwa 450kW im Maximum aus. Hohe Leistungen mit großem Energiespeicher sprechen eher für eine hohe Rekuperationleistung im Bremsbetrieb. Die Motorentechnik ist nicht näher beschrieben.

5.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Ein Zwischenstand zur geplanten Antriebsauslegung und der Betriebsstrategie wurde im Mai 2017 auf der 14. Internationalen Fachtagung Nutzfahrzeuge in Friedrichshafen in einem Fachvortrag präsentiert. Die Inhalte dazu wurden eng mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen an der TU Darmstadt und der CuroCon GmbH ausgearbeitet.

Im Rahmen des Verbundprojektes evTrailer gab es gemeinsam mit den Partnern zum Gesamtvorhaben weitere Veröffentlichungen bei diversen Messen (IAA Nutzfahrzeuge 2018 – Flyer bei Framo-Messestand; Hannovermesse 2019 – Fraunhofer IST, Fr. Dr. Biehl, Ausstellung KingPin), Fachtagungen (BMW Vernetzungskonferenz 2018 – CuroCon, Hr. Wißbach, nur Plakat, Trailerausstellung wurde abgesagt) und in Fachzeitschriften (ATZ Heavy Duty – VKM Darmstadt, Hr. Thiem).

6. Teilvorhaben *Simulation, Betriebsstrategie und Leistungsnachweis* (TUD VKM)

Im Teilvorhaben Simulation, Betriebsstrategie und Leistungsnachweis wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der TU Darmstadt zu Beginn des Projektes der elektrische Antriebsstrang des Trailers auf Basis der Messkampagne sowie des Inputs der weiteren Projektpartner in einer multikriteriellen Optimierung unter verschiedenen Randbedingungen dimensioniert und ausgelegt. Als Ergebnis der Dimensionierung wurde der Antriebsstrang des Trailers, bestehend aus zwei Asynchronmaschinen mit jeweils 75 kW maximaler Leistung sowie der Traktionsbatterie mit einer maximalen Kapazität von 100 kWh definiert, woraufhin die beteiligten Konsortialpartner die Entwicklung der Komponenten



durchführen konnten.

Im weiteren Verlauf wurde für den definierten Antriebsstrang die Hybrid-Betriebsstrategie entwickelt und in einer realistischen Gesamtfahrzeugsimulation untersucht. Da die Einsatzszenarien der untersuchten Fahrzeugkategorie stark variieren, wurde eine routenprädiktive Betriebsstrategie entwickelt, welche den Einsatz der verfügbaren Batteriekapazität mit Priorität auf steile Bergabschnitte so einteilt, dass über die gesamte Streckenlänge ausreichend Kapazität zur Unterstützung zur Verfügung steht. Aus Gründen der Stabilität und der benötigten Rechenleistung wurde die Struktur der Betriebsstrategie in drei Module eingeteilt. Auf der unteren Ebene befindet sich dabei die schnell rechnende Zugkraftregelung, welche auf maximale Robustheit und Fahrsicherheit ausgelegt ist. In der nächst höheren Ebene mit deutlich reduzierter Taktzeit wird die von der Regelung ausgegebene elektrische Soll-Leistung mithilfe parametrierbarer Betriebsstrategie-Parameter in Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation, definiert durch die herrschende Zugkraft, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die Straßensteigung, limitiert. In der höchsten, optionalen Stufe werden diese Betriebsstrategie-Parameter durch eine routenprädiktive Optimierung auf die vor dem Fahrzeug liegende Strecke angepasst. Dieses Modul kann auf einem separaten Rechensystem außerhalb des Fahrzeuges stattfinden und benötigt daher keine zusätzliche Rechenleistung auf dem Hybrid-Steuergerät. Notwendig dazu ist eine mobilfunkbasierte Kommunikation zwischen Trailer und Cloud, welche mit sehr geringer Taktzeit stattfinden kann.

Im abschließenden Abschnitt wurde ein Leistungsnachweis an einem Heavy Duty Engine-in-the-Loop-Prüfstand des Instituts durchgeführt um die Simulationsergebnisse hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs zu validieren sowie die Einflüsse der Hybridisierung auf das Schadstoffemissionsverhalten des Verbrennungsmotors zu untersuchen. Der simulierte Kraftstoffverbrauch stimmte dabei mit hoher Güte mit dem real entstehenden überein und wurde somit als valide angenommen. In einer weiteren Untersuchung konnte ein positiver Einfluss des Hybridsystems auf die Stickoxid-Emissionen des Fahrzeugs festgestellt werden, obwohl die Betriebsstrategie ausschließlich auf Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂-Emissionen optimiert wurde.

6.1. Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Zuwendungen wurden beantragt im Bereich Personal, Software- und Rechnerkosten sowie Reisekosten.

Die Arbeitspakete wurden am Institut federführend von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der Stufe E13 durchgeführt und durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Da alle Arbeitspakete größtenteils auf simulativer Basis stattfanden, wurde für die Laufzeit des Projektes eine Lizenz für eine Gesamtfahrzeugsimulationssoftware gekauft. Ohne die Begleitung des Projekts durch Simulationsuntersuchungen hätte kein Ergebnis zustande kommen können.

Da im Laufe des Projektes weniger Reisekosten anfielen als bei der Beantragung prognostiziert, wurden die überschüssigen Mittel im Bereich Personalkosten verwendet, um Gehaltserhöhungen sowie zusätzliche Unterstützung durch studentische Hilfskräfte zu finanzieren.



Die Untersuchungen am Motorenprüfstand wurden in Eigeninitiative durchgeführt, ohne dafür Zuwendungen für Hardware, Software, Personal, Infrastruktur oder Kraftstoff zu beantragen.

6.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel im Bereich Personal, Software- und Rechnerkosten wurden eingehalten und stimmen mit der Gesamtvorkalkulation überein, obwohl das Projekt insgesamt um 9 Monate verlängert wurde. Im Bereich des Personaleinsatzes wurde entsprechend pausiert, falls keine zwingenden Projektaktivitäten umzusetzen waren. Es wurden im Laufe des Projektes weniger Dienstreisen notwendig als ursprünglich vorgesehen, die überschüssigen Mittel wurden im Bereich Personal aufgewendet.

Die Software- und Rechnerkosten wurden für die Lizenz der Simulationssoftware aufgewendet, mithilfe derer alle Simulationsuntersuchen im Teilvorhaben durchgeführt wurden.

6.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle Arbeiten zur Dimensionierung und Betriebsstrategie wurden zielgerichtet durch alle beteiligten Arbeitspakete erfolgreich umgesetzt.

Die Dimensionierung des Antriebsstrangs stellte den ersten Meilenstein im Verlauf des Projektes dar, welcher für die Konsortialpartner notwendig für die Entwicklung der Komponenten war.

Die für einen Einsatz in der Güterverkehrs-Fahrzeugflotte notwendigen Hybrid-Funktionalitäten wurden alle erstellt und implementiert, sodass ein Betrieb des Demonstratorfahrzeugs im realen Straßenverkehr möglich wäre.

Der abschließende Leistungsnachweis am Motorenprüfstand wurde zur Validierung der Simulationsergebnisse genutzt und lieferte gleichzeitig die Erkenntnis, dass das Hybridsystem nicht zu unerwünschten Effekten in Bezug auf die Schadstoffemission führt.

6.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Laufe des Projekts gewonnenen Erkenntnisse werden am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an verschiedenen Stellen genutzt. So fließen die Ergebnisse in die Lehre ein und werden den Studierenden in Form von Inhalten der Vorlesungen „Verbrennungskraftmaschinen I und II“ sowie „Advanced Vehicle Propulsion Systems“ nähergebracht.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Teilvorhabens mehrere Bachelor- und Masterarbeiten sowie Forschungsseminare, Advanced Design Projects (ADP) und Advanced Research Projects (ARP) durchgeführt und dadurch die fachliche Bildung der Studierenden gefördert.

Gleichzeitig wurde durch das Projekt der Erfahrungsschatz des Institutes hinsichtlich hybrider Antriebe weiter vergrößert, was in zukünftigen Forschungsprojekten von Vorteil sein wird.



6.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Themengebiete elektrifizierte Trailer, Antriebsstrangdimensionierung und prädiktive Hybrid-Betriebsstrategien werden an verschiedenen Stellen in Forschung und Literatur in unterschiedlichen Randbedingungen bearbeitet.

Die in diesem Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten waren jedoch angepasst auf den speziellen Fall eines Plug-In Hybridantriebsstranges auf einem elektrifizierten Trailer mit routenprädiktiver Betriebsstrategie. In Kombination aller Parameter sind stand heute keine zusätzlichen Forschungsergebnisse anderer Stellen bekannt.

6.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe war an folgenden Veröffentlichungen, bei welchen das Forschungsprojekt evTrailer Teil des Inhaltes war, beteiligt:

- **Eckert, Martin ; Thiem, Mikula ; Beidl, Christian** (2017):
Development of an Electric Powertrain System for Truck Trailers.
In: VDI-Tagung Nutzfahrzeuge 2017, [Konferenzveröffentlichung]
- **Dautfest, Alexander ; Thiem, Mikula ; Melz, Tobias ; Beidl, Christian** (2017):
Entwicklung eines Batteriesystems für elektrifizierte LKW-Anhänger.
In: Forum ElektroMobilität – KONGRESS 2017, Berlin, 1. Juni 2017, [Konferenzveröffentlichung]
- **Thiem, Mikula ; von Pyschow, Christian ; Beidl, Christian Berns, Karsten ; Dressler, Klaus ; Fleischmann, Patrick ; Görges, Daniel ; Kalmar, Ralf ; Sauer, Bernd ; Stephan, Nicole ; Teutsch, Roman ; Thul, Martin (Hrsg.)** (2018):
Entwicklung eines Hybridsystems für LKW mit elektrifiziertem Trailer in einer durchgängigen Simulationsumgebung.
In: Commercial Vehicle Technology 2018 - Proceedings of the 5th Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2018), Wiesbaden, Springer Vieweg, S. 468-480, DOI: [10.1007/978-3-658-21300-8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21300-8), [Buchkapitel]
- **Thiem, Mikula ; Hummel, Nicolas ; Beidl, Christian** (2019):
Impacts of powertrain hybridization on engine exhaust behavior of heavy-duty vehicles with electrified trailers.
In: 6th international engine congress, Baden-Baden, 26.02. - 27.02.2019, [Konferenzveröffentlichung]
- **Thiem, Mikula ; Mokros, Alexander ; Münz, Markus ; Beidl, Christian** (2019):
Konzepte für die Mobilität der Zukunft am Beispiel hybridisierter Nutzfahrzeuge und regenerativer Kraftstoffe.
In: Trends der Fahrzeugtechnik, Coburg, 21.05.2019, [Konferenzveröffentlichung]
- **Thiem, Mikula ; Hummel, Nicolas ; Beidl, Christian** (2019):



Betriebsbedingungen für Systeme zur Abgasnachbehandlung im hybridisierten Nutzfahrzeug.

12, In: ATZheavy duty, (2), Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 62-70, ISSN 2524-8782, DOI: [10.1007/s35746-019-0025-7](https://doi.org/10.1007/s35746-019-0025-7),
[Artikel]

- **Thiem, Mikula ; Hummel, Nicolas ; Beidl, Christian** (2019):
Betriebsbedingungen für Systeme zur Abgasnachbehandlung im hybridisierten Nutzfahrzeug.
80, In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift, (7-8), Springer, S. 94-101, ISSN 2192-8843, DOI: [10.1007/s35146-019-0087-1](https://doi.org/10.1007/s35146-019-0087-1),
[Artikel]
- **Thiem, Mikula ; Beidl, Christian** (2019):
Entwicklung von Hybridantrieben im Spannungsfeld zwischen Kosten, Luftreinhaltung und Klimaschutz.
Darmstadt, In: Fahrzeug- und Motortechnisches Seminar, Darmstadt,
[Konferenzveröffentlichung]
- **Hummel, Nicolas ; Thiem, Mikula ; Steinhaus, Tim ; Beidl, Christian** (2019):
Emissionsoptimierung am hybriden Sattelzug mittels Most-Relevant-Testing.
Springer Vieweg, In: Experten-Forum Powertrain: Ladungswechsel und Emissionierung 2019, Hanau, 23.-24.10.2019, ISSN 2198-7432, e-ISSN 2198-7440, ISBN 978-3-658-28708-5 ,
DOI: [10.1007/978-3-658-28709-2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-28709-2),
[Konferenzveröffentlichung]
- **Hummel, Nicolas ; Thiem, Mikula ; Beidl, Christian** (2020):
Emission reduction of a hybridized heavy-duty truck through SCR-temperature management.
In: 11th Int. AVL Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum 2020, Ludwigsburg
[Konferenzveröffentlichung]

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel evTrailer - Autarkes elektrisches Antriebskooperationssystem für LKW-Trailer und Fahrzeuganhänger	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Wißbach, Michael ¹ Heim, Rüdiger ² Biehl, Saskia ³ Eckert, Martin ⁴ Thiem, Mikula ⁵	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.09.2019
	6. Veröffentlichungsdatum 26.03.2020
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ¹ CuroCon GmbH, Gernsheimer Str. 3, 64673 Zwingenberg ² Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt ³ Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Bienroder Weg 54E, 38108 Braunschweig ⁴ Oswald Elektromotoren GmbH, Benzstr. 12, 63897 Miltenberg ⁵ Technische Universität Darmstadt, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (VKM), Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MY15006A, 01MY15006C, 01MY15006D, 01MY15006E, 01MY15006F
	11. Seitenzahl 49
	12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn
13. Literaturangaben 10	
14. Tabellen 5	
15. Abbildungen 36	
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Der Nutzfahrzeugverkehr trägt heute einen großen Teil zum Verbrauch fossiler Energieträger und der Erzeugung von CO ₂ -Emissionen bei. Die Elektromobilität kann zu einer erheblichen Reduzierung der CO ₂ -Emissionen beisteuern. Der Güterverkehr auf Fernstrecken kann aufgrund der aktuell zu geringen Energiedichte von elektrischen Batterien noch nicht komplett mit rein batterieelektrisch Fahrzeugen umgesetzt werden. Im Rahmen des Projekts ev(=electric vehicle)Trailer ist ein innovatives Antriebssystem für Nutzfahrzeug-Anhänger entwickelt worden, das eine Hybridisierung des Gesamtfahrzeugs mit einer CO ₂ -Reduzierung von 20% ermöglicht. Für eine schnelle Marktdurchdringung wurde ein autarkes elektrisches Antriebssystem im Trailer integriert, damit dieser eine Verwendung mit beliebigen Zugmaschinen ermöglicht. Bedingt durch den elektrischen Einzelradantrieb besteht zusätzlich die Möglichkeit, unterschiedlich große Antriebs- oder Bremsmomente an den Rädern aufzubringen und damit die Fahrstabilität des Gespannes bzw. Zuges zu verbessern (Torque-Vectoring). Des Weiteren bietet ein evTrailer die Möglichkeit, ohne Zugmaschine bewegt zu werden, indem bei Rangiermanövern die eigenen elektrischen Antriebe genutzt werden (autarkes Fahren) und dabei auch Kurvenfahrten realisiert werden können. In der Erprobung des aufgebauten Demonstrators konnte eine Verbrauchseinsparung bzw. CO ₂ -Reduktion im Bereich von 16-24%, das autarke Rangieren des evTrailers ohne Zugmaschine, eine signifikante Lärmemissionsreduzierung bei Anfahrvorgängen, ein verbessertes Anfahren auf glattem/rutschigem Untergrund und die Beschleunigung und Verzögerung der Zugmaschine mit Kraftregelung = 0 nachgewiesen werden. Mit dem evTrailer lässt sich daher eine signifikante Reduzierung der CO ₂ -Emissionen im Fernverkehr direkt realisieren inkl. eine Erhöhung der Fahrsicherheit und dem Mehrwert des elektrischen autarken und leisen Rangierens des Trailers auf z.B. Logistik-Betriebshöfen ohne Einsatz einer Zugmaschine und ohne Fahrer.	
19. Schlagwörter batterieelektrischer Trailer, autarker elektrischer Antrieb, elektrischer Hybridantrieb	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title evTrailer - Autarkic electric drive system for semitrailer	
4. author(s) (family name, first name(s)) Wißbach, Michael ¹ Heim, Rüdiger ² Biehl, Saskia ³ Eckert, Martin ⁴ Thiem, Mikula ⁵	5. end of project 31.09.2019
	6. publication date 26.03.2020
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) ¹ CuroCon GmbH, Gernsheimer Str. 3, 64673 Zwingenberg, Germany ² Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt, Germany ³ Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Bienroder Weg 54E, 38108 Braunschweig, Germany ⁴ Oswald Elektromotoren GmbH, Benzstr. 12, 63897 Miltenberg, Germany ⁵ Technische Universität Darmstadt, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (VKM), Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 01MY15006A, 01MY15006C, 01MY15006D, 01MY15006E, 01MY15006F
	11. no. of pages 49
	13. no. of references 10
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 36
	16. supplementary notes
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract 2008/5000 Today commercial vehicle traffic makes a large contribution to the consumption of fossil fuels and the generation of CO ₂ emissions. Electromobility can contribute to a significant reduction in CO ₂ emissions. Freight traffic on long-distance routes cannot yet be completely implemented with purely battery-electric vehicles due to the actually low energy density of electric batteries. As part of the ev(= electric vehicle)Trailer project, an innovative drive system for commercial vehicle trailers has been developed that enables hybridization of the entire vehicle with a CO ₂ reduction of 20%. For a quick market penetration, an autarkic electric drive system was integrated in the trailer so that it can be used with any tractor. Due to the electric single-wheel drive, there is also the possibility of applying different level of drive- or braking-torque to the wheels and thus improving the driving stability of the trailer or road train (torque vectoring). Furthermore, an evTrailer offers the possibility of being moved without a tractor, by using his own electric drives during maneuvering (autarkic driving) and also realizing cornering. In testing the assembled demonstrator, a reduction in fuel consumption and CO ₂ reduction in the range of 16-24%, the autonomous maneuvering of the evTrailer without a tractor, a significant reduction in noise emissions during start-up processes, improved starting on smooth / slippery surfaces and the acceleration and deceleration of the tractor with force control = 0 was proven. With the evTrailer, therefore, a significant reduction in CO ₂ emissions in long-distance transport can be realized directly, including an improved driving safety and the ectrically autarkic and quiet maneuvering of the trailer at e.g. logistics hubs without the use of a tractor and without a driver.	
19. keywords electrified trailer, autarkic electric drive, hybrid electric vehicl	
20. publisher	21. price