Individueller Schlussbericht der COMPREDICT GmbH für das DE4LoRa-Förderprojekt

ZE: COMPREDICT GmbH	**FKZ:** 19I20027E
Vorhabensbezeichnung: DE4LoRa – Universales hochintegriertes 800-Hybrid-Antriebssystem mit ganzheitlich optimierter Ökologie und Ökonomie	
Teilvorhaben: AP2.5 Ableitung Lastkollektive (AP-Manager), AP 8.4: Entwicklung Lebensdauer-Prädiktionsmodelle (AP-Manager), AP 8.5: Betriebsstrategie, AP 9.4: Erprobung und Optimierung Antriebsstrang, AP 11.4: Implementierung und Bewertung Online-Lebensdauerberechnung (AP-Manager), AP 11.5: Konzeptbewertung	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2021 – 30.09.2024	
Berichtszeitraum: 01.04.2021 – 30.09.2024	

1 Inhalt

2 Kurzdarstellung 4
2.1 Aufgabenstellung 4
2.2 Voraussetzungen 4
2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
2.4 Wissenschaftlich technischer Stand 5
2.4.1 Ableitung Lastkollektive 5
2.4.2 Entwicklung Lebensdauer-Prädiktionsmodelle 8
2.4.3 Betriebsstrategie 11
2.4.4 Optimierung des Antriebsstrangs 13
2.4.5 Implementierung und Bewertung Online-Lebensdauerberechnung 16
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 16
3 Eingehende Darstellung 17
3.1 Verwendung von Zuwendung und Ergebnissen 17
3.2 Zahlenmäßiger Nachweis 17
3.3 Notwendigkeit 18
3.4 Verwertbarkeit 18
3.5 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen 18
3.6 Veröffentlichungen 18
4 Anhang 19

Abbildung 1: Lastkollektiv Gesamtgetriebe 7
Abbildung 2: Lastkollektiv Elektromotor 8
Abbildung 3: Lastkollektiv Verbrennungsmotor 8
Abbildung 4: Hartes Bremsmanöver 9
Abbildung 5: Vollgasbeschleunigung 10
Abbildung 6: Normalfahrt 10
Abbildung 7: Beispiel Schädigungsvorhersage 11
Abbildung 8: Übersicht Betriebsstrategie mit Minimierung der Verbrauch und Schädigung 12
Abbildung 9: Übersicht Optimierungsmodell 13
Abbildung 10: Ersten funktionale Ergebnissen auf NEDC Fahrzyklus 13
Abbildung 11: Beispiel von Synthetische Fahrzyklus und den unterschiedlichen Dimensionen 14
Abbildung 12: 99% Fahrer Identifizierung 15
Abbildung 13:Fahrzyklenraffung 16
Abbildung 14: PDF Anlage1 Nebenbestimmungen 20
Abbildung 15: Logo 20

2 Kurzdarstellung

2.1 Aufgabenstellung

COMPREDICT ist für die Entwicklung einer Datenbasierten Methodik zur Optimierung von Fahrzeugbetriebsstrategien im Hinblick auf Lebensdauer und Belastung verantwortlich. Zunächst werden verschiedene Betriebsmodi, wie elektrischer Betrieb, Hybrid-Modi (seriell und parallel), sowie Zug- und Rekuperationsbetrieb identifiziert, die als Grundlage für die Auslegung dienen. Die Lastkollektive für die Komponenten werden für unterschiedliche Fahrsituationen abgeschätzt, und AI-basierte virtuelle Sensoren werden trainiert, um präzise Antriebsdrehmomente und Belastungsgrößen im Antriebsstrang in Echtzeit zu rekonstruieren.

Ein Schadensmodell wird erstellt, um die inkrementelle Schädigung der Komponenten pro Zeiteinheit, Fahrstrecke und Lastzyklus zu berechnen. Zusätzlich wird ein KI-Algorithmus entwickelt, der die Lebensdauer der Komponenten prognostiziert. Darauf basierend werden konkurrierende Optimierungsziele, wie Komponentenlebensdauer und Energieverbrauch, definiert und bewertet, mit Hilfe einer Zielfunktion zu entwickeln. Ein Optimierungsalgorithmus wird anschließend konzipiert, um die Betriebsstrategie mit Schwerpunkt auf Lebensdaueroptimierung zu identifizieren.

Die entwickelten Strategien werden simulativ mit rein energieverbrauchsorientierten Betriebsstrategien verglichen. Eine globale Analyse der Fahrzeugdaten hilft bei der Identifikation des "99%-Fahrers". Mit der driveREAL Methode werden Fahrzyklen abgeleitet und für Prüfstandsversuche komprimiert. Zudem werden präzise Lastkollektive für Komponenten des Antriebsstrangs erstellt, wie die E-Maschine, den Verbrennungsmotor, das Getriebe und die Seitenwellen, und mit Auslegungskollektiven abgeglichen.

Schließlich wird die Gesamtnutzungsdauer der Komponenten vorhergesagt und das Leichtbau-Potenzial sowie mögliche Optimierungsansätze identifiziert.

2.2 Voraussetzungen

Um die datenbasierte Methode zu ermöglichen sind Fahrtdaten notwendig. Dafür ist erstmal der Zugriff auf die Serienzustand-Fahrzeugdaten über den CAN-Bus erforderlich. Ergänzend dazu wurde das Fahrzeug mit einem Drehmoment-Sensor ausgestattet, um genaue Referenzwerte der Antriebsmoment zu erfassen. Ein im Fahrzeug installierter Datenlogger sammelte kontinuierlich alle relevanten Informationen während der Fahrten. Die Messungen wurden sowohl auf öffentlichen Straßen als auch auf Teststrecken durchgeführt, um eine Vielzahl von Nutzungsprofilen zu erfassen und die reale Einsatzvielfalt abzubilden. Darüber hinaus sind Konstruktionsdaten des Antriebsstrangs von Bedeutung, um die Schädigungsprognose zu kalibrieren und die Optimierungsmethodik an dieses Fahrzeug anzupassen.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Projekts wurden von der GVB verfolgt, mit gewissen Anpassungen nach dem Ausstieg von APS/APL aus dem Konsortium, wie dem Projektträger mitgeteilt wurde. In den Projektmonaten 4 bis 6 erfolgte planmäßig die Ausrüstung der Fahrzeuge mit einem Referenz-Drehmomentsensor und einem Datenlogger, gefolgt von Messungen. Darauf aufbauend wurde in den Projektmonaten 13 bis 19 die Entwicklung eines virtuellen Sensors zur Drehmomentabschätzung sowie zur Einschätzung von Komponentenschädigung und Lebensdauer durchgeführt. Parallel dazu

begann die Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien basierend auf den ermittelten Lebensdauer- und Schädigungsdaten, die gemäß dem angepassten Projektplan in den Projektmonaten 13 bis 30 stattfand. Im weiteren Verlauf wurde eine globale Analyse und Identifikation der 99 % Fahrer auf Basis von Simulationsdaten durchgeführt, da keine zusätzlichen Testdaten gemessen werden konnten. Der Projektfokus verlagerte sich daher auf Simulationsdaten, die durch die DriveReal-Methode ergänzt und für Prüfstandsversuche in den Projektmonaten 37 bis 42 zusammengefasst wurden. Schließlich wurde am Ende des Projekts eine Analyse des Leichtbaupotenzials unter Berücksichtigung von Over-Design und Verbesserungspotenzialen durchgeführt, gestützt auf die generierten Simulationsdaten.

2.4 Wissenschaftlich technischer Stand

2.4.1 Ableitung Lastkollektive

COMPREDICT arbeitet in diesem Arbeitspaket direkt mit Hyundai zusammen. Ziel dieses Arbeitspaketes aus COMPREDICTs Perspektive ist die Ableitung relevanter Betriebsmodi (u. a. elektrischer Betrieb, paralleler und serieller Hybrid-Betrieb, Zug- und Rekuperationsbetrieb) sowie die Abschätzung von Lastkollektiven für die Antriebsstrangkomponenten für verschiedene Fahrsituationen.

Voraussetzung für die Ableitung relevanter Betriebsmodi sowie der Lastkollektive ist die Erfassung und Analyse von Betriebsdaten der Zielfahrzeuge. Hierfür wurden in zwei Fahrzeugen von COMPREDICT entwickelte Datenlogger mit LTE-Schnittstelle von Hyundai fachgerecht mit dem CAN Bus des Fahrzeugs verbunden. Die erfassten Fahrzeugdaten werden direkt in die Cloud übertragen und dort weiter analysiert. Dafür wurden die nötigen Serverressourcen in der Cloud gemietet und eine entsprechende Datenbank aufgesetzt, um die Fahrzeugdaten zu speichern und zu verwalten. In dem Zusammenhang wurden auch Algorithmen benutzt, welche die Fahrzeugdaten vor dem Speichern in der Datenbank, auf Fehler und Konsistenz prüfen.

Zusätzlich wurden auch in einem Fahrzeug spezielle mit Dehnmessstreifen (DMS) applizierte Antriebswellen installiert. Diese messen präzise das aktuelle Antriebsdrehmoment. COMPREDICT hat hierfür ein zusätzliches Paar Antriebswellen gekauft und die Firma Manner beauftragt die DMS auf die Antriebswellen zu applizieren. Zusätzlich wurden die Antriebswellen auch kalibriert. COMPREDICT hat auch die für die Antriebswellen nötige Messtechnik gekauft. Die Antriebswellen wurden von Hyundai fachgerecht in das Fahrzeug eingebaut. Die Messtechnik wurde auch fachgerecht installiert und mit dem Datenlogger des Fahrzeugs verbunden. Die für die Ableitung der Lastkollektive wichtigen Antriebsdrehmomente werden auch bei jeder Fahrt erfasst und direkt mit den restlichen Fahrzeugdaten in der Cloud gespeichert.

Nachdem die Datenlogger erfolgreich in beiden Fahrzeugen und die Messwellen erfolgreich in einem Fahrzeug installiert wurden, haben Hyundai, COMPREDICT sowie andere Projektpartner verschiedene Testfahrten durchgeführt, welche ohne Ausfälle von dem Datenloggern aufgezeichnet wurden. COMPREDICT hat ein Fahrzeug auch über zwei Wochen vor Ort gehabt. In dieser Zeit wurden mehrere Fahrten auf einer nicht-öffentlichen Teststrecke sowie auch mehrere kürzere Stadtfahrten sowie längere Autobahn- und Überlandfahrten durchgeführt.

Nachdem durch Fahrten von Hyundai, COMPREDICT und weiterer Partner eine signifikante Datenmenge erhoben wurde, wurden die Fahrzeugdaten zuerst hinsichtlich der für die Auslegung relevanter Betriebsmodi analysiert. Da in dem Projekt vor allem das Getriebe im Fokus steht und dieses das Zusammenspiel zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor regelt, wurden die Betriebsmodi hinsichtlich des auf das Getriebe wirkenden Moments und der Zustände des

Elektromotors und des Verbrennungsmotors aufgeteilt. Vor dem Hintergrund ergibt sich die folgende Aufteilung, die alle Kombinationen abdeckt:

Identifizierte Betriebsmodi

- Modus 1: Elektromotor erzeugt zur Drehrichtung positives Moment, Verbrennungsmotor erzeugt kein Moment (Elektrofahrt)
- Modus 2: Elektromotor erzeugt zur Drehrichtung negatives Moment, Verbrennungsmotor erzeugt kein Moment (Rekuperation)
- Modus 3: Elektromotor erzeugt zur Drehrichtung negatives Moment, Verbrennungsmotor erzeugt positives Moment (Lastpunktverschiebung)
- Modus 4: Elektromotor erzeugt zur Drehrichtung positives Moment, Verbrennungsmotor erzeug positives Moment, Verbrennungsmotor direkt mit den Antriebsrädern gekoppelt (Paralleler Hybridmodus)
- Modus 5: Elektromotor erzeugt zur Drehrichtung positives Moment, Verbrennungsmotor erzeug positives Moment, Verbrennungsmotor nicht direkt mit den Antriebsrädern gekoppelt (Serieller Hybridmodus)
- Sonstige Betriebsmodi: Es ist kein Antriebsmoment vorhanden, Getriebe wird kaum belastet

- Boost-Modus (HV Batterie geladen, Elektro + Verbrennungsmotoren an Räder gekoppelt, Geschwindigkeit beider Motoren ist gleich)
- Hybrid-Modus (Verbrenner an und positives Drehmoment bei Verbrenner, beide Motoren sind nicht gekoppelt)
- Rekuperation (Elektromotor hat negatives Drehmoment)
- Sonstige Betriebsmodi (Z.B. kein Drehmoment an Antriebswellen, aber Verbrennungsmotor startet)

Die folgende Tabelle listet die Anteile der verschiedenen Modi über die gefahrene Zeit für Stadtfahrt, Landstraße und Autobahn auf. Grundsätzlich ist zu sehen, dass während der Stadtfahrt die Anteile in denen rein elektrisch gefahren wird, viel größer sind (Modus 1 und Modus 2). Während der Autobahnfahrt wird, hauptsächlich verbrennungsmotorisch im Modus 3, Modus 4 und Modus 5 gefahren.

	Stadtfahrt	Landstraße	Autobahn
Modus 1	31%	21%	5%
Modus 2	21%	14%	3%
Modus 3	20%	34%	50%
Modus 4	0%	2%	6%
Modus 5	22%	29%	34%
Sonstige Betriebsmodi	6%	0%	2%

Die identifizierten Betriebsmodi sind ausschlaggebend für die Validierung der Dimensionierung des Verbrennungsmotors, der Elektromotoren sowie der Getriebekomponenten. Da in unterschiedlichen

Betriebsmodi verschiedene Komponenten des Getriebes belastet werden, ist die Kombination der generierten Informationen über die Betriebsmodi mit der real gefahrenen Strecke und den dabei auftretenden Belastungen entscheidend. Um ein vergleichbares Niveau zu generieren, wird das Ausgangsmoment des Differentialgetriebes als Haupt-Belastungsgröße verwendet.

In Abstimmung mit Hyundai und dem Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt (IMS) wurden die erhobenen Fahrzeugdaten weiter analysiert. Hierfür wurden unter anderem auch bei COMPREDICT bereits vorhandene Algorithmen an die Zielsetzung angepasst. Mit diesen Werkzeugen wurden, die für die Auslegung der Komponenten relevanten Lastkollektive erstellt. Die folgenden Abbildungen stellen die Lastkollektive allgemein für das Getriebe, den Elektromotor und den Verbrennungsmotor dar. Diese Lastkollektive werden vom Institut für Mechatronische Systeme für die Auslegung der Dauerfestigkeit sowie Dimensionierung der Komponenten verwendet.

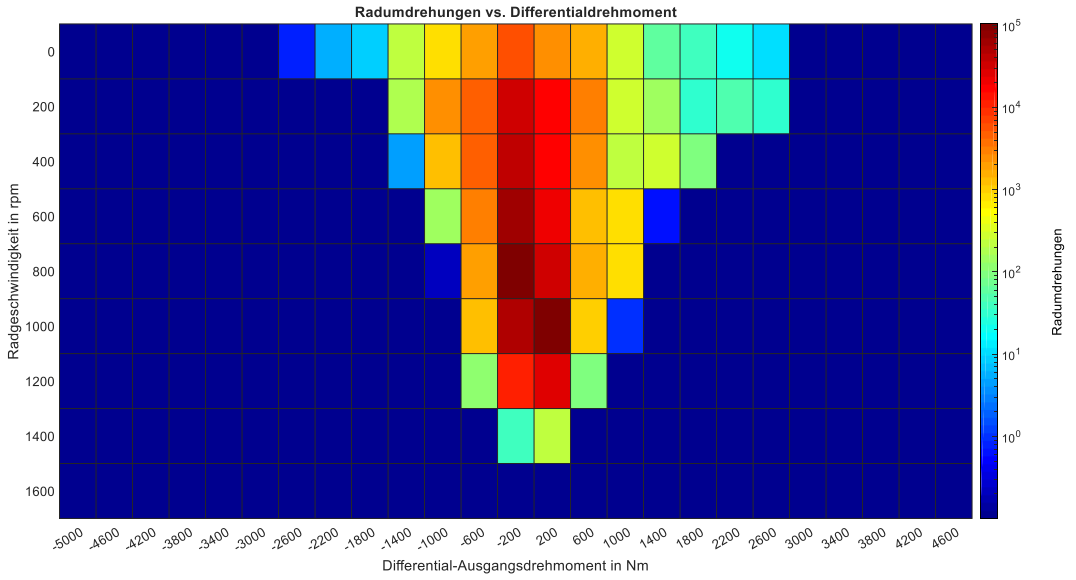

Abbildung 1: Lastkollektiv Gesamtgetriebe

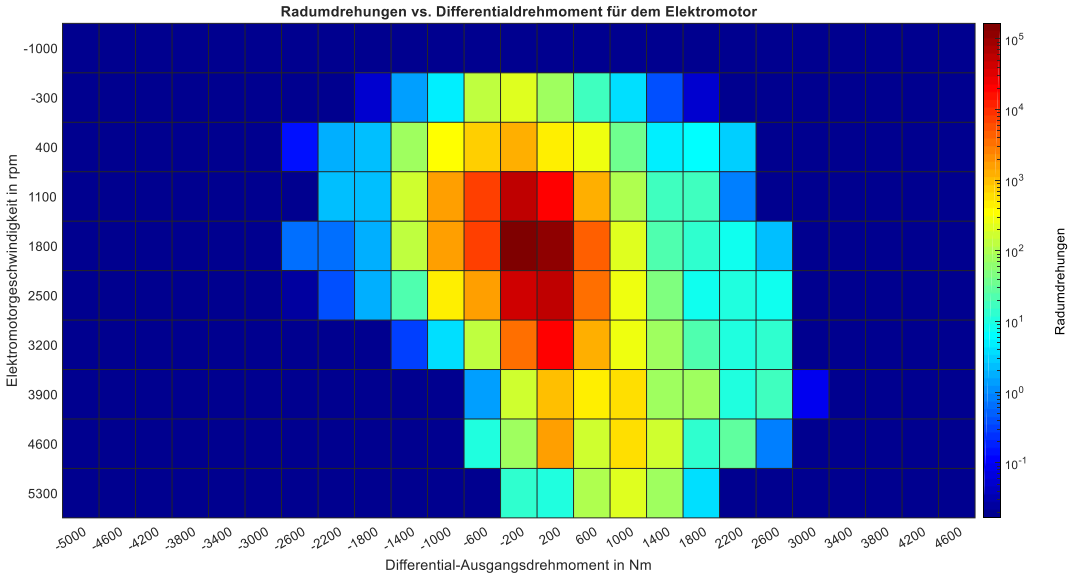

Abbildung 2: Lastkollektiv Elektromotor

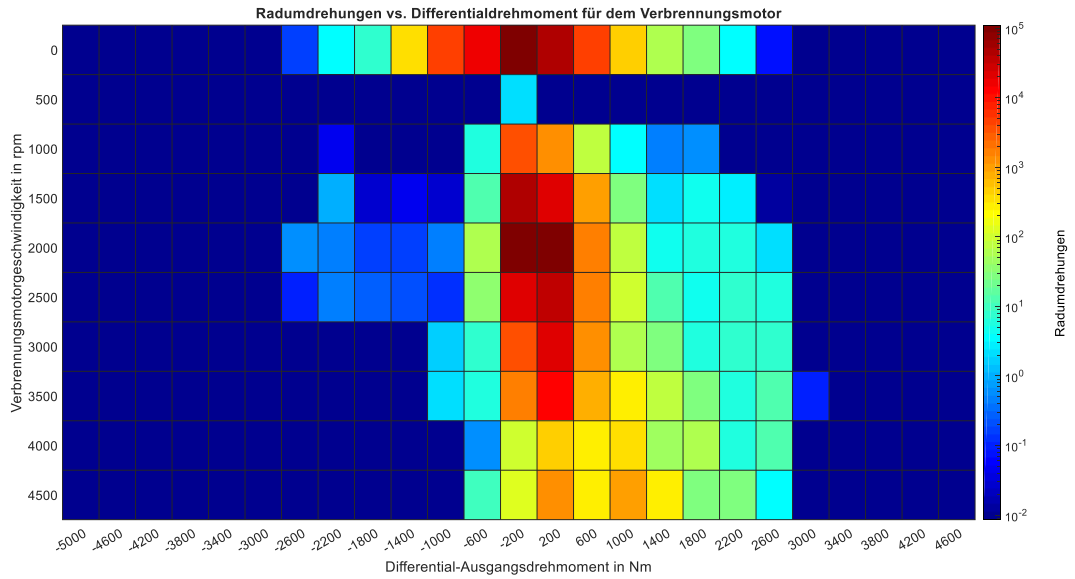

Abbildung 3: Lastkollektiv Verbrennungsmotor

2.4.2 Entwicklung Lebensdauer-Prädiktionsmodelle

Voraussetzung für das Training eines AI-basierten virtuellen Sensors zur präzisen Erfassung des Antriebsdrehmoments sind entsprechende Trainingsdaten. In Kombination mit dem von COMPREDICT entwickelten Datenloggern und die Erstellung von Lastkollektiven wurden insgesamt 6713 km bei Fahrzeug 1 und 8832 km bei Fahrzeug 2 aufgezeichnet. Für das Training der virtuellen Sensoren, können jedoch nur die Daten von Fahrzeug 2 verwendet werden, da bei diesem die Antriebswellen mit DMS ausgestattet sind.

Bei der Aufzeichnung der Messdaten wurde darauf geachtet, dass unterschiedliche Betriebsmodi abgedeckt werden. Neben einer realistischen Verteilung der in Arbeitspaket 2.5 identifizierten

Betriebsmodi wurde auch darauf geachtet, dass Sonderereignisse, die den Antriebsstrang besonders beanspruchen ausreichend vertreten sind. Als Beispiele wären hier zu nennen Vollgas Beschleunigung, plötzliche Lastwechsel sowie (aufgrund der Rekuperation) auch Vollbremsungen. Alle diese Daten wurden über die Mobilfunkschnittstellen der Datenlogger an die Datenbanken in der Cloud übertragen.

Das Ziel ist es einen virtuellen Sensor für das Antriebsmoment zu trainieren, sodass auch in dem anderen Fahrzeug, welches keine DMS auf den Antriebswellen montiert hat, das Antriebsdrehmoment einfach erfasst werden kann. Die virtuellen Sensoren nutzen zur Berechnung des Antriebsdrehmoment nur Signale der serienmäßig verbauten Sensoren. Aus den gesamten Messdaten von Fahrzeug 2 wurden hochdynamische Manöver identifiziert, welche sich besonders für das Training des virtuellen Sensors eignen. Diese Daten wurden gemäß den üblichen Vorgaben in ein Training- und ein Testing-Datensatz aufgeteilt. 70% der Daten wurden fürs Training des virtuellen Sensors verwendet. Die restlichen 30 % wurden dazu verwendet, um die Genauigkeit des virtuellen Sensors zu quantifizieren. In den folgenden Abbildungen sind erste Ergebnisse dargestellt. Es ist zu sehen, dass auch hochfrequente Schwingungen in dynamischen Fahrsituationen vom virtuellen Sensor genau reproduziert werden.

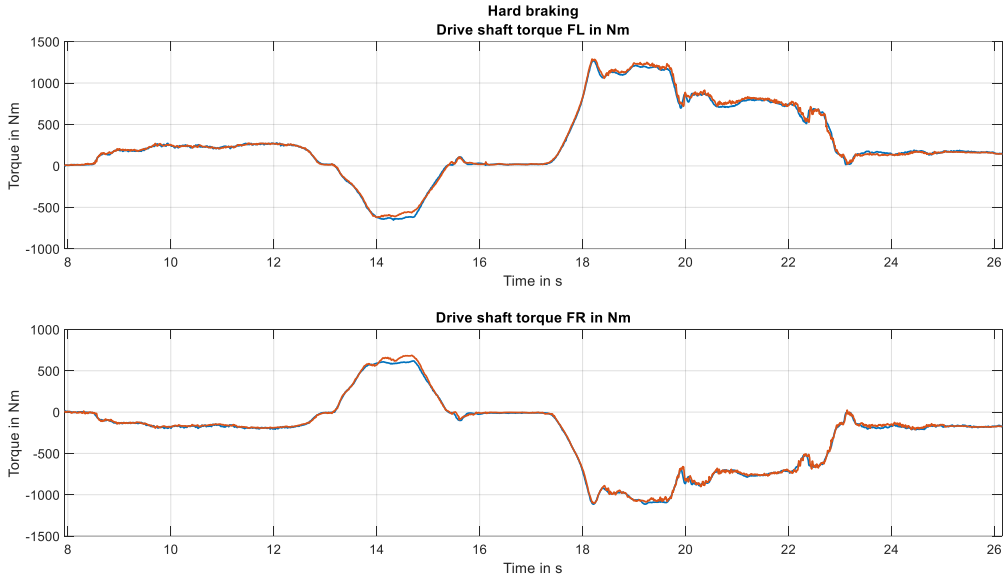

Abbildung 4: Hartes Bremsmanöver

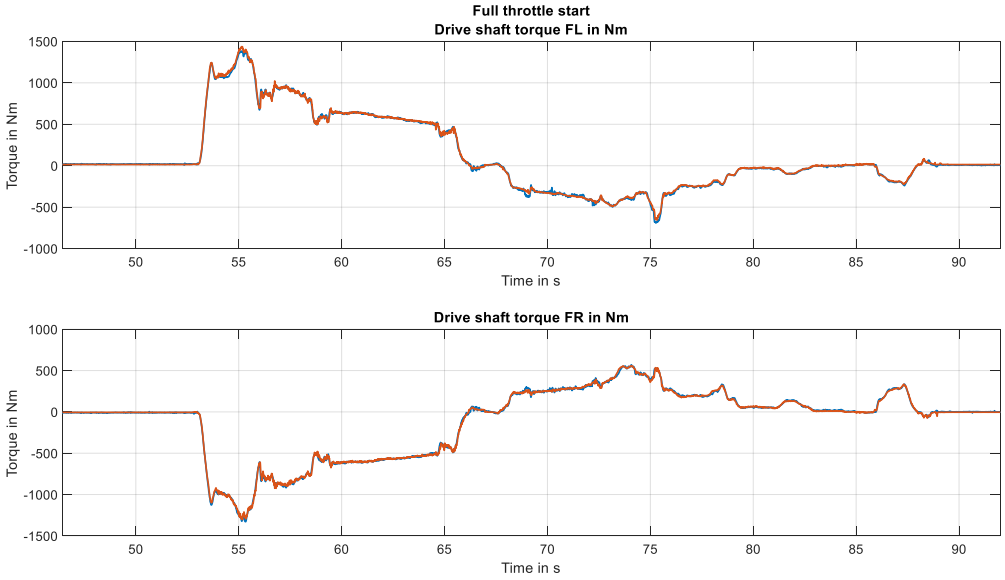

Abbildung 5: Vollgasbeschleunigung

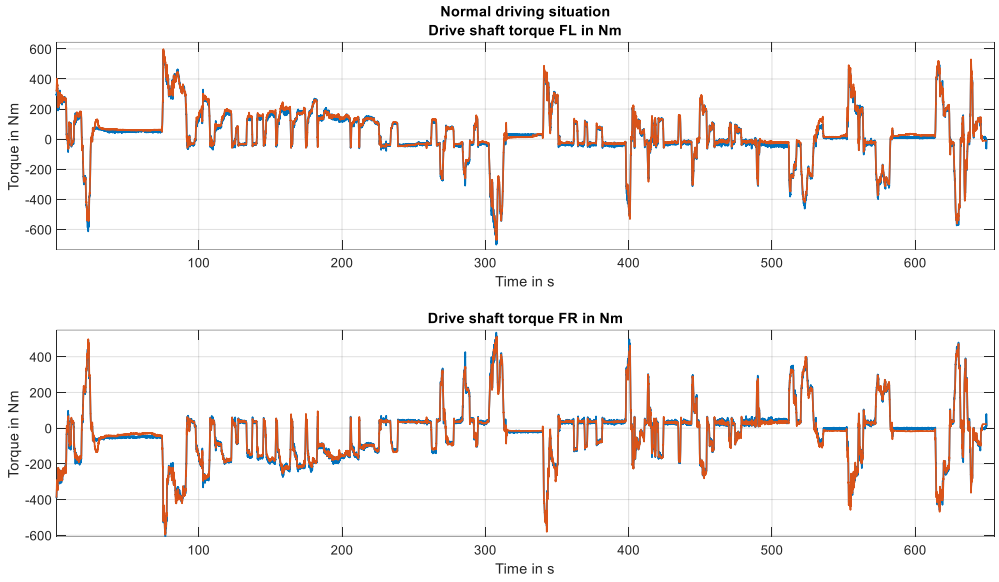

Abbildung 6: Normalfahrt

In der folgenden Tabelle sind die Abweichungen bei den Testdaten als RMSE dargestellt.

Messung	**RMSE FL in Nm**	**RMSE FR in Nm**
Vollbremsungen	23	19
Einpakmanöver Links	15	14
Einparkmanöver Rechts	13	12
Rückwärtsfahrt	25	18
Vollbeschleunigung	15	13
Normalfahrt 1	15	13
Mittelwert	19	16

Ein weiteres Ziel ist die Berechnung der Schädigung durch den Aufbau ein Schadensmodell. Dieses Modell erfasst die inkrementelle Schädigung in jedem Zeitschritt für ausgewählte Komponenten des Antriebsstrangs. Die inkrementellen Schädigungen werden aufsummiert, sodass das aktuelle Schädigungsniveau dargestellt sowie eine Vorhersage über die Restlebensdauer der Komponente zur Verfügung gestellt werden kann. Der Fokus ist hierbei auf Erfassung und Vorhersage der Schädigungen der 12 Zahnradstufen. Um die Drehmomente und Drehzahle, welche auf die einzelnen Zahnradstufen wirken, genau berechnen zu können, wurde ein Mehrkörper-Simulationsmodell erstellt, welches die von den virtuellen Sensoren erfassten Antriebswellen-Drehmomente, sowie die vom Elektromotor und Verbrennungsmotor abgegebenen Drehmomente als Eingang hat und je nach Betriebssituation diese realistisch auf die verschiedenen Zahnradstufen verteilt. Aus den auf die einzelnen Zahnradstufen wirkenden Drehmomente wurden nach DIN-Norm 3990 Spannungen berechnet. Von den Partnern Institut für Mechatronische Systeme der TU Darmstadt und ISAR Getriebe wurden entsprechende Konstruktionsdaten sowie Wöhlerlinien zur Verfügung gestellt. Basierend auf all den vorher erwähnten Daten wird eine Schädigungsberechnung durchgeführt.

Parallel zu der Zahnradschädigung, werden auch alle 22 Kugel- und Nagellagerschädigungen laut DIN-ISO-Norm 281 berechnet, um eine Abbildung der Schädigung von allen relevanten Antriebsstrangkomponenten zu schaffen.

Dieses Schädigungsberechnung wurde als Matlab-Skript entwickelt und bezüglich Rechenzeit dank Matrixberechnung optimiert. Die relevantesten Geometrische-Eckpunkte wurden als Parameter definiert, da die nicht alle während der Entwicklungszeit feststanden. Das erlaubt eine schnelle Parametrisierung im Nachgang.

Die Funktionalitäten wurden mit Funktionalentest geprüft bezüglich der Plausibilität der Ergebnisse mit Dummy-Daten. Effektive Referenzmessung mit einer bekannten Schädigung sind nämlich nicht vorhanden.

Auf Basis der Komponentenschädigungen wurde einen Cloud-Basierten AI-Algorithmus entwickelt, um die Lebensdauer zu schätzen. Ziel ist hier die vergangene Fahrverhalten einzulernen, um dem in der Zukunft zu projizieren und dadurch den Kilometerstand bis zum Komponente-Bruchpunkt zu finden. Die Schädigung über Kilometerstand wird eingelernt und die zukünftige Schädigung wird, auf Basis eines ähnlichen Fahrprofils, bis die Lebensdauer erreicht wird, vorhergesagt. Das Methode wurde eingelernt und ist für die Anwendung, sobald genug Daten zur Verfügung stehen werden, verfügbar (approximativ 1000km).

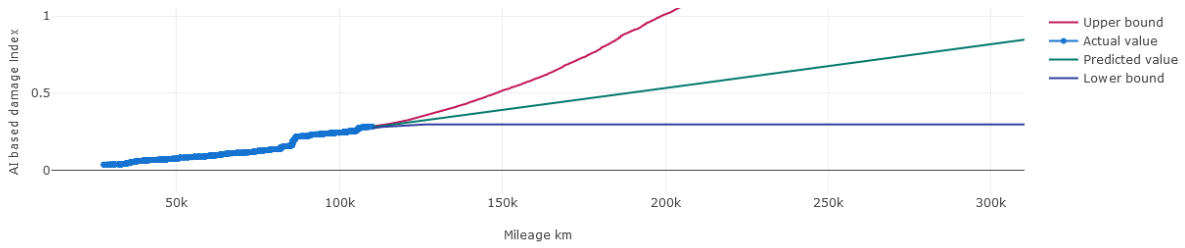

Abbildung 7: Beispiel Schädigungsvorhersage

2.4.3 Betriebsstrategie

Für diese Aktivität ist das Institut für Mechatronische Systeme (IMS) federführend. COMPREDICT ist für die Betrachtung von Schädigungsaspekten in der Betriebsstrategie verantwortlich. Dafür werden konkurrierenden Optimierungszielen definiert, dann einer Kostfunktion, um dieses Ziel zu vergleichen

und zu bewerten entwickelt. Letztendlich wird ein Optimierungsalgorithmus, um die Lebensdauerfaktor in der Betriebsstrategie zu betrachten, entwickelt und getestet.

Sieben konkurrierenden Optimierungsziele konnten identifiziert werden:

1. Energieverbrauch Minimierung: hier das Ziel ist der Getriebemodus mit dem kleinsten Energieverbrauch zu fahren, mit einer Potenzielle Gewichtung zwischen elektrische Energie und Erdgas.
2. Komponentenlebensdauer Maximierung: Die Antriebsstrangkonfiguration, welche die Komponenten- oder Gesamtsystemlebensdauer maximiert wird, bevorzugt.
3. Schadstoff- und Partikelemission Minimierung: Falls den Verbrennungsmotor benutzt wird, können die Emission minimiert werden durch ein gutes Thermomanagement des Abgashandlungssystem und der Optimierung der Start&Stop Strategie des Verbrenners.
4. Verfügbare Leistung Maximierung. Besonders im Sportmodus, ist die Fahrdynamik zu betrachten. Dafür muss die Betriebsstrategie ausgelegt werden, um bereit zu sein schnell Leistung and die Räder zu bringen.
5. Komfort Maximierung: Eine unterbrechungslose Radkraftfluss ist für den Fahrer das Kernfaktor für ein Komfortable Fahrgefühl. Die Schaltstrategie kann dafür ausgelegt werden.
6. Betriebskosten Minimierung: Neben die Energiekosten, können die Wartungskosten, um ein Total Cost of Ownership (TCO) zu bilden, auch betrachtet werden. Damit kann die Gesamt-Fahrzeugbenutzung für ein Flottenbetreiber optimiert werden.
7. Route-Optimierung: Mit Information über dem Ziel und Verkehr auf dem Weg, ob bestimmte Orte durchgefahren werden (z.B. Stadt, wo man Elektrofahrt vorziehen soll) oder bestimmte Fahrstrecke, wo mehr Leistung gebraucht wird (z.B. Steigung), kann die Betriebsstrategie optimiert werden, um die Nebenziele zu erreichen.

Das Fokus ist auf Energieverbrauch und Komponentenlebensdauer gelegt, auf Basis der verfügbaren Information und technische Möglichkeiten. Die Einschränkungen des Verbrennungsmotor-Managements werden als externe Faktoren betrachtet und sind noch nicht bekannt. Dafür wurde eine Zielfunktion entwickelt, um die Energie- und Schädigungsaspekte zu bewerten.

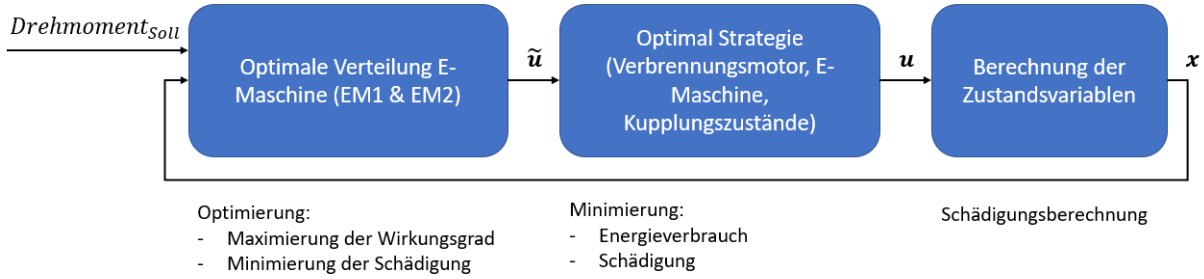

Abbildung 8: Übersicht Betriebsstrategie mit Minimierung der Verbrauch und Schädigung

Die Optimierung wurde in ein Simulink-Modell entwickelt und mit IMS geteilt, um die Arbitration mit der Verbrauchsorientierte Strategie zu starten. Die erste Implementierung der Schädigungsorientierte Betriebsstrategie ist so weit wie abgeschlossen. Eine selbstentwickelte Verbrauchsorientierte Betriebsstrategie und eine Simulationsumgebung, um ein Fahrprofil zu folgen und die Fahrzeugantwort zu berechnen wurde entwickelt. Damit konnten die ersten funktionalen Tests durchgeführt werden und beweist werden, dass das Soll-Fahrverhalten gefolgt wird, und zwischen den Fahrmodi geschaltet wird.

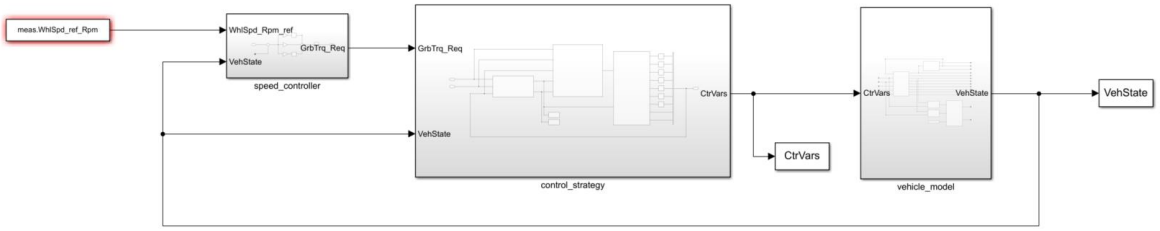

Abbildung 9: Übersicht Optimierungsmodell

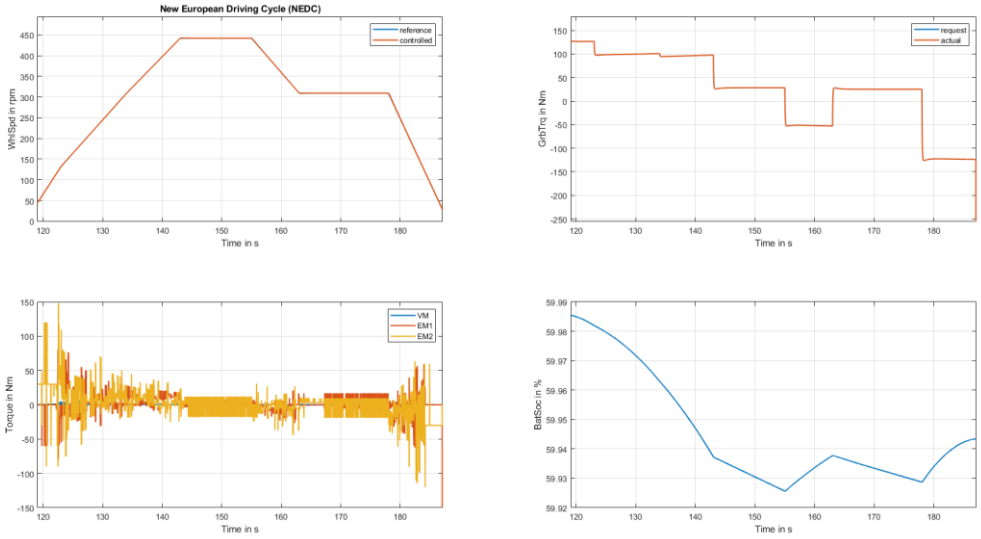

Abbildung 10: Ersten funktionale Ergebnissen auf NEDC Fahrzyklus

Die Betriebsstrategie wurde am IMS geliefert für die Integration im Gesamt-Getriebesteuerungssoftware.

2.4.4 Optimierung des Antriebsstrangs

Auf Basis der simulierten Fahrdaten wurden zusätzliche synthetische Daten erzeugt. Synthetische Daten bedeuten, dass es sich nicht um reale, gefahrene Daten handelt, aber dass alle physikalischen Randbedingungen eingehalten werden und sie somit theoretisch auch fahrbar sind. Um den Antriebsstrang vollständig zu beschreiben, werden 6-dimensionale Fahrzyklen erzeugt, basierend auf der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem Ausgangsdrehmoment, den drei Motorendrehmomenten (E-Maschine 1, E-Maschine 2, Verbrenner) sowie dem Gang der Getriebezustand. Aus diesen Daten

können die weiteren Eingänge (z.B. die Drehzahl) für das Schädigungsberechnungsmodell abgeleitet werden.

Siehe Abbildung 1 für ein Beispiel eines generierten Fahrzyklus

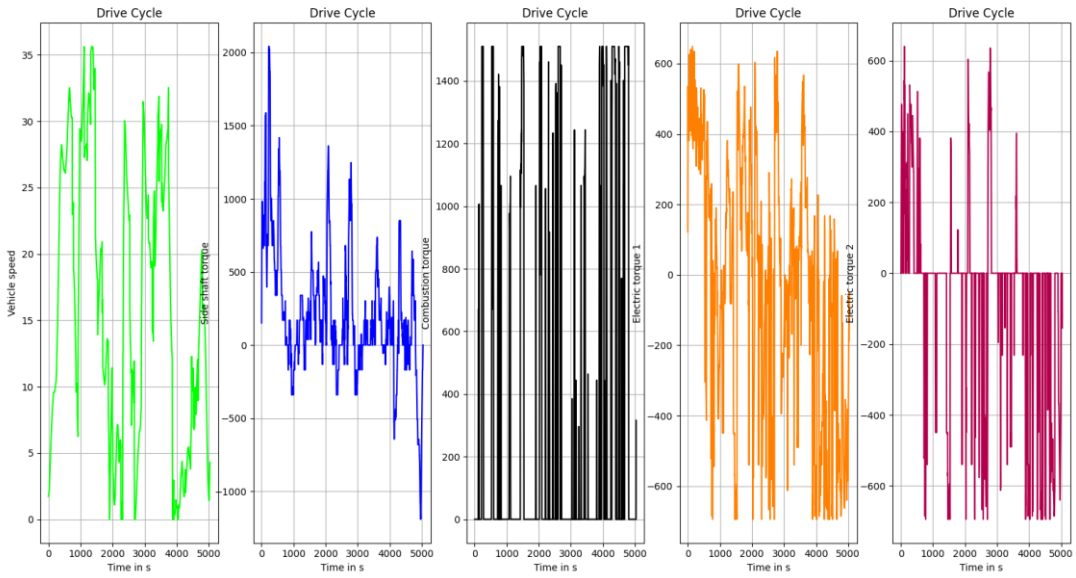

Abbildung 11: Beispiel von Synthetische Fahrzyklus und den unterschiedlichen Dimensionen

Aus dieser Datenmenge müssen die auslegungsrelevanten Daten ausgewählt werden, das bedeutet, dass besonders beanspruchende Situationen als Auslegungsziel für den Antriebsstrang verwendet werden sollen. Aktuell werden solche Ziele auf Erfahrungs- und Historie-Basis ausgewählt, was für ein innovatives Konzept wie De4LoRa nicht anwendbar ist. Daher wird eine datenbasierte Methode entwickelt, um die Antriebsstrangbelastung von jedem Fahrer zu bewerten und anschließend eine Methode anzuwenden, um einen statistischen Anteil abzubilden. Hierbei wird ein 99%-Quantil der Fahrer (99% Fahrer) gewählt, was bedeutet, dass 1% der extremen Fälle zu einem früheren Antriebsstrangausfall führen, was dem Stand der Technik im Markt entspricht.

Jeder Fahrer oder Fahrstil wird durch einen synthetischen Fahrzyklus abgebildet. Im Idealfall müssen die Daten aus einer langen Messperiode pro Fahrer stammen, aber im Projekt wird die Methode mit einer reduzierten Datenmenge demonstriert. Jeder Fahrer erzeugt eine spezifische Schädigung, die sich für die 54 intern betrachteten Komponenten (Zahnräder-Fuß, Zahnräder-Flanke, Lagern) unterscheidet. Diese Komponentenschädigungen werden auf Basis der Schädigungsmodelle berechnet, die für die Betriebsstrategie im AP 8.5 entwickelt wurden.

Um die Fahrer zu sortieren und das 99%-Quantil auszuwählen, wird die patentierte EcoLIFE^3-Methode angepasst. Es wird das kleinste 54-dimensionale Hypervolumen gesucht, das 99% der Fahrstile abdeckt und als Auslegungsziel genommen. Wichtig zu beachten ist, dass eine einfache Sortierung der 54 Schädigungswerte einzeln betrachtet nicht zu einer realistischen Fahrerbewertung führt, da der anspruchsvollste Fahrer wahrscheinlich nicht die maximalen Schädigungswerte für alle Komponenten erzeugt.

Ein Beispielergebnis ist in Abbildung 2 zu sehen. Alle 54 Komponenten werden auf der Horizontalachse angezeigt, die Schädigungswerte pro Fahrer auf der Vertikalachse. Die Streuung

zeigt die Unterschiede zwischen der Nutzung der Fahrer. Der 99%-Fahrer wird als roter Punkt markiert

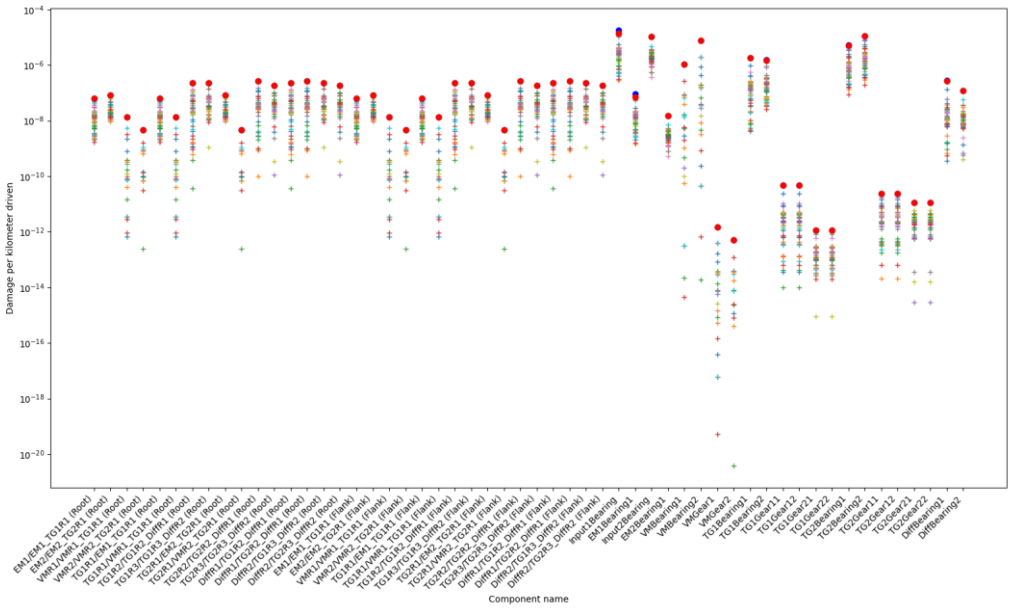

Abbildung 12: 99% Fahrer Identifizierung

Diese Ergebnisse werden als Grundlage für das Leichtbaupotenzial-Bewertung genutzt. Um die Auslegungsziele vollständig auszuschöpfen, müssen die Fahrzyklen auf einem Prüfstand reproduziert werden, um die Antriebsstrangauslegung zu testen. Aufgrund der hohen Betriebskosten müssen die Prüfstandtests so kurz wie möglich gehalten werden. Die Zeitserien, die als 99%-Fahrer identifiziert wurden, sollen daher verkürzt werden.

Dafür wurde eine Methode angepasst, um eine Zielschädigung aller Komponenten möglichst schnell zu reproduzieren. Die Betriebspunkte werden dann verschoben, solange die resultierende Schädigung ähnlich bleibt. Durch eine Diskretisierung des Betriebsfelds und eine Optimierung des Testzyklus wird die Testzeit um 40% reduziert, bei ähnlicher Komponentenschädigung.

In Abbildung 3 sieht man die Schädigung pro Komponente (Horizontalachse) für die ursprünglichen (blaue Punkte) und verkürzten Zyklen (rote Kreuze). Obwohl die Zeit um 42% reduziert wurde, sind die Schädigungen sehr ähnlich.

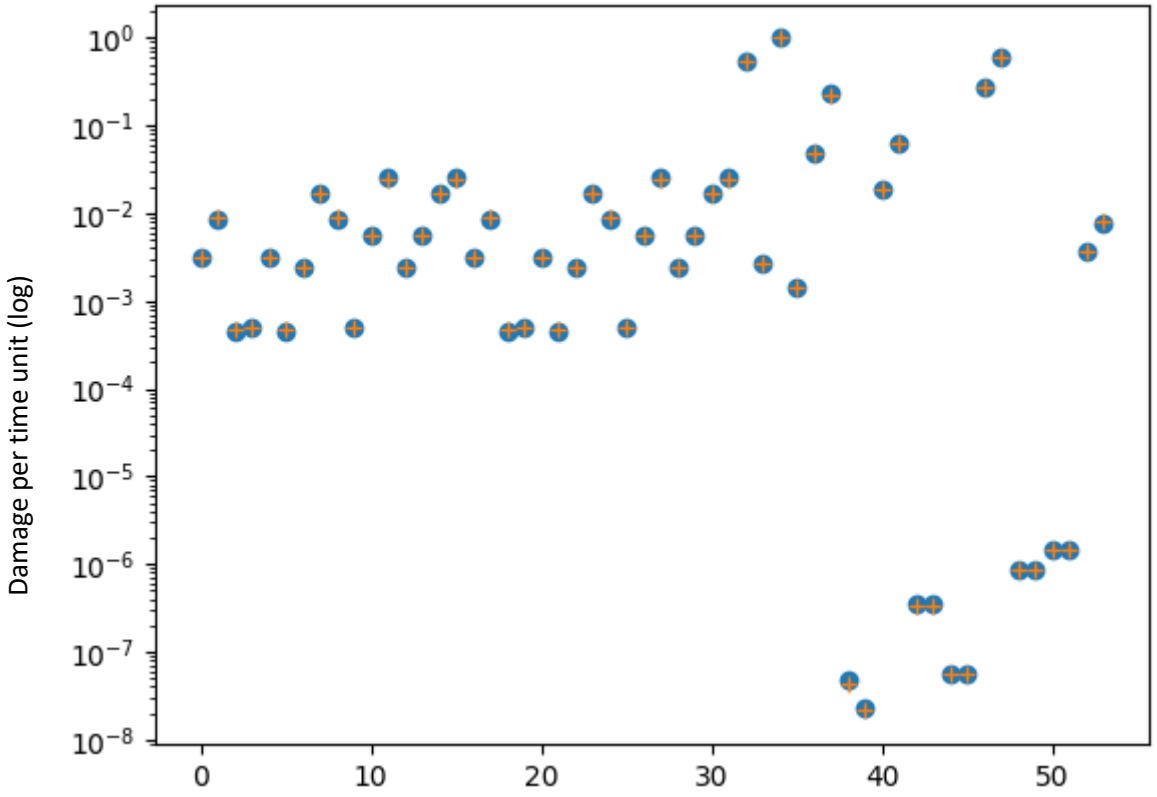

Abbildung 13:Fahrzyklenraffung

2.4.5 Implementierung und Bewertung Online-Lebensdauerberechnung

Aufgrund des Fehlens realer Messdaten ist eine Anpassung der Aufgabenstellung erforderlich. Der virtuelle Sensor kann in seiner aktuellen Form nicht kalibriert werden, weshalb stattdessen Simulationsdaten herangezogen werden.

Die Analyse basiert auf Informationen, die aus der Untersuchung von 99 % der Fahrer gewonnen wurden (vgl. Abbildung X). Im Idealfall ist die Schädigung der einzelnen Komponenten gleichmäßig verteilt und korrespondiert mit der Zielreichweite, was in der grafischen Darstellung durch eine horizontale Linie symbolisiert wird.

Der niedrigste Wert in der Analyse weist darauf hin, welche Komponente prioritär verstärkt oder optimiert werden sollte. Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse auf Simulationsdaten basieren und daher durch reale Messdaten validiert werden müssen, um eine belastbare Aussage treffen zu können.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Projektarbeit erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern, um die technischen Anforderungen und Projektziele zu erfüllen. Mit Hyundai wurde die Integration des Datenloggers sowie der Zugriff auf die Fahrzeugdaten und die Installation von Drehmomentsensoren koordiniert, um eine reibungslose Datenerhebung sicherzustellen. ISAR Getriebe stellte wertvolle Konstruktionsdaten, wie die Wöhler-Linie, bereit, die für die Kalibrierung der Lebensdauerabschätzung unverzichtbar sind und wurde im Austausch zu technischen Details eingebunden. VKM unterstützte das Projekt durch die Bereitstellung relevanter Daten und

kontinuierlichen Austausch, um eine konsistente Datengrundlage zu gewährleisten. Eine besonders enge Zusammenarbeit bestand mit IMS, die in Fragen zu Konstruktionsdaten und der Entwicklung der Betriebsstrategie beratend zur Seite standen und so maßgeblich zur Verfeinerung der Projektumsetzung beitrugen. Diese partnerschaftliche Zusammenarbeit ermöglichte einen ganzheitlichen Ansatz und eine effiziente Umsetzung der Projektziele.

3 Eingehende Darstellung

3.1 Verwendung von Zuwendung und Ergebnissen

Im Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den ursprünglichen Zielsetzungen zeigt sich, dass alle Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet wurden. Ein wichtiger Erfolg war die Ableitung der relevanten Betriebsmodi, darunter elektrischer Betrieb, paralleler und serieller Hybrid-Betrieb sowie Zug- und Rekuperationsbetrieb, die als Grundlage für die Systemauslegung dienten. Zudem konnten präzise Lastkollektive für unterschiedliche Fahrsituationen definiert werden, wodurch eine realistische Abschätzung der Beanspruchungen der einzelnen Komponenten möglich wurde. Ein signifikanter Fortschritt wurde durch das Training eines KI-basierten virtuellen Sensors zur genauen Erfassung des Antriebsdrehmoments sowie durch den Aufbau eines Schadensmodells erzielt, das die inkrementelle Schädigung pro Komponente in Abhängigkeit von Zeit, Fahrstrecke und Lastzyklus berechnet. Darüber hinaus wurde ein KI-Algorithmus zur Vorhersage der Komponentenlebensdauer trainiert, und konkurrierende Optimierungsziele wie Energieverbrauch und Lebensdauer wurden definiert und in einer Zielfunktion zusammengeführt. Dies ermöglichte die Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus, der eine lebensdauerorientierte Betriebsstrategie identifiziert, die schließlich in Simulationen mit einer rein energieverbrauchsorientierten Strategie verglichen wurde.

Ebenfalls wie geplant durchgeführt, jedoch ausschließlich mit Simulationsdaten und ohne Qualitätseinbußen, wurden die globale Analyse von Serienfahrzeugdaten zur Identifikation des 99%-Fahrers sowie die Nutzung dieser Daten zur Ableitung von Fahrzyklen mittels der driveREAL-Methode. Diese Datenbasis ermöglichte zudem die Verdichtung der Fahrzyklen für Prüfstandsversuche und die Erstellung präziser Lastkollektive für repräsentative Antriebskomponenten, darunter E-Maschine, Verbrennungsmotor, Getriebe und Seitenwellen. Der Abgleich mit den Auslegungskollektiven, die nutzungsbasierte Lebensdauervorhersage der Komponenten sowie die Bewertung des Leichtbaupotentials wurden ebenfalls erfolgreich abgeschlossen und führten zur Identifikation konkreter Verbesserungspotentiale

3.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die Ausgaben- bzw. Kostenplanung ist in den Kostengruppen F0838 (Reisen Inland und außereuropäische Reisen) und in der Kostengruppe F0850 (Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten) um mehr als 20% von der ursprünglichen Planung abgewichen.

Bei der Kostengruppe F0838 ist der Grund für die Abweichung in den Auswirkungen der Covid-Pandemie und den in der Folge stark eingeschränkten und auch aktiv reduzierten Reisemöglichkeiten- und -tätigkeiten für unsere Mitarbeiter zu sehen.

Die Abweichung von der Gesamtvorkalkulation in der Kostengruppe F0850 insbesondere bei den Positionen 1-4 hängt damit zusammen, dass der Anbieter für die Cloud-Lösung (AWS) keine geeignete Abrechnungsart, die ein Kostensplitting für einzelne Services ausgewiesen hätte, zur Verfügung stellen konnte. Da zusätzlich die Datenmenge viel geringer war als ursprünglich erwartet, haben wir uns dafür entschieden, die ebenfalls geringen Kosten nicht geltend zu machen.

3.3 Notwendigkeit

Das Projekt ist für COMPREDICT von entscheidender Bedeutung, da es die Möglichkeit bietet, die ecoLIFE3-Methode an einem hybriden Antriebssystem umfassend zu erproben – von der Auslegung über die Implementierung bis zur Nutzungsphase. Diese Methode ermöglicht durch ihren innovativen Ansatz nicht nur das Erschließen von Leichtbaupotenzialen und nachhaltigen Materialkosteneinsparungen, sondern auch die Optimierung der Predictive Maintenance Software Plattform, die ein zentraler Bestandteil des Angebots für COMPREDICTs Kunden im Automobilbereich ist. Das Projekt schafft so einen wesentlichen Wissensvorsprung, der nach Projektabschluss gezielt zur Akquise neuer Kunden genutzt wird, was COMPREDICTs Marktreichweite erheblich erweitern und direkt zur Schaffung neuer Arbeitsplätze beitragen kann. Zudem eröffnet die ecoLIFE3-Methode durch den erfolgreichen Projektabschluss neue Möglichkeiten für die Anwendung in anderen Industrien wie Haushaltsgeräte und Industrieanlagen, sodass das Unternehmen strategisch breit aufgestellt und zukunftssicher agieren kann

3.4 Verwertbarkeit

Die Verwertbarkeit der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden ist für COMPREDICT von großem strategischem Nutzen. Durch die umfangreiche Erfahrung mit hybriden und komplexen Antriebssträngen stärkt COMPREDICT seine Expertise im Bereich innovativer Antriebstechnologien und differenziert sich als kompetenter Partner für Automobilhersteller. Die Erweiterung der Pipeline zur Entwicklung virtueller Sensoren eröffnet zudem neue Möglichkeiten zur präzisen Überwachung und Steuerung von Antriebskomponenten, was die Effizienz und Zuverlässigkeit der Systeme signifikant erhöht. Mit konkreten Beispielen für die Umsetzung von Closed-Loop-Engineering, bei denen durch datenbasierte Rückführungen eine leichtere, präzisere und nachhaltigere Auslegung von Komponenten ermöglicht wird, kann COMPREDICT die Leistungsfähigkeit der driveREAL- und ecoLIFE³-Methoden eindrucksvoll demonstrieren. Diese Ansätze bieten einen klaren Mehrwert für Kunden und positionieren COMPREDICT als Vorreiter für nachhaltige und optimierte Entwicklungsprozesse in der Automobilindustrie.

3.5 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine Ergebnisse von dritter Seite mit Relevanz für die Durchführung des Vorhabens bekannt.

3.6 Veröffentlichungen

Es wurden keine Veröffentlichung eingereicht noch geplant.

4 Anhang

- Erfolgskontrollbericht (nicht öffentlich)
- Berichtsblatt
- Document Control Sheet
- Schriftliche Bestätigung über Versand des Schlussberichtes (formlos)

Anlage 2
(zu Nr. 8.2 NKBF 98)

Muster
Schlussbericht zu Nr. 8.2

I. Kurze Darstellung zu

1 Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,
3. Planung und Ablauf des Vorhabens,
4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere
   - Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,
   - Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des ZE oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den ZG ausdrücklich darauf hinzuweisen.

III. Dem Schlussbericht ist als Anlage ein kurzgefasster Erfolgskontrollbericht beizufügen, der nicht veröffentlicht wird. Dieser muss darstellen:

1. den Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts),- soweit dies möglich ist-,
2. das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen,
3. die Fortschreibung des Verwertungsplans. Dieser soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden):
   - Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten,
   - Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien in der Bundesrepublik Deutschland oder dem EWR, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt),
   - Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen,
   - Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse,
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben,
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z. B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt),
6. die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung.

Im Erfolgskontrollbericht kann auf Abschnitte des Schlussberichts (Nrn. I. u. II.) verwiesen werden.

IV. Mit dem Schlussbericht ist außerdem eine „Kurzfassung" (Berichtsblatt) des wesentlichen fachlichen Inhalts des Schlussberichts nach den dem Zuwendungsbescheid beigefügten „Hinweisen zur Ausfüllung des Berichtsblattes" vorzulegen.

Abbildung 14: PDF Anlage1 Nebenbestimmungen

DE4LoRa

Abbildung 15: Logo

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)
-	Schlussbericht

3. Titel
Individueller Schlussbericht der COMPREDICT GmbH für das DE4LoRa-Förderprojekt

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens
Zeller, Martin	September 2024
	6. Veröffentlichungsdatum 13.12.2024
	7. Form der Publikation

8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
COMPREDICT GmbH Rheinstr. 40-42 64297 Darmstadt	- 10. Förderkennzeichen 19I20027E
	11. Seitenzahl 20

12. Fördernde Institution (Name, Adresse)	13. Literaturangaben
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	- 14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 13

16. Zusätzliche Angaben
-

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)
-

18. Kurzfassung

COMPREDICT ist für die Entwicklung einer Datenbasierten Methodik zur Optimierung von Fahrzeugbetriebsstrategien im Hinblick auf Lebensdauer und Belastung verantwortlich. Zunächst werden verschiedene Betriebsmodi, wie elektrischer Betrieb, Hybrid-Modi (seriell und parallel), sowie Zug- und Rekuperationsbetrieb identifiziert, die als Grundlage für die Auslegung dienen. Die Lastkollektive für die Komponenten werden für unterschiedliche Fahrsituationen abgeschätzt, und AI-basierte virtuelle Sensoren werden trainiert, um präzise Antriebsdrehmomente und Belastungsgrößen im Antriebsstrang in Echtzeit zu rekonstruieren.Ein Schadensmodell wird erstellt, um die inkrementelle Schädigung der Komponenten pro Zeiteinheit, Fahrstrecke und Lastzyklus zu berechnen. Zusätzlich wird ein KI-Algorithmus entwickelt, der die Lebensdauer der Komponenten prognostiziert. Darauf basierend werden konkurrierende Optimierungsziele, wie Komponentenlebensdauer und Energieverbrauch, definiert und bewertet, mit Hilfe einer Zielfunktion zu entwickeln. Ein Optimierungsalgorithmus wird anschließend konzipiert, um die Betriebsstrategie mit Schwerpunkt auf Lebensdaueroptimierung zu identifizieren.

Die entwickelten Strategien werden simulativ mit rein energieverbrauchsorientierten Betriebsstrategien verglichen. Eine globale Analyse der Fahrzeugdaten hilft bei der Identifikation des "99%-Fahrers". Mit der driveREAL Methode werden Fahrzyklen abgeleitet und für Prüfstandsversuche komprimiert. Zudem werden präzise Lastkollektive für Komponenten des Antriebsstrangs erstellt, wie die E-Maschine, den Verbrennungsmotor, das Getriebe und die Seitenwellen, und mit Auslegungskollektiven abgeglichen.

Schließlich wird die Gesamtnutzungsdauer der Komponenten vorhergesagt und das Leichtbau-Potenzial sowie mögliche Optimierungsansätze identifiziert.

19. Schlagwörter
Antriebsstrang, Lastkollektive, Lebensdauer-Prädikationsmodelle, DE4LoRa

20. Verlag	21. Preis
-	-

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Individual Final report of COMPREDICT GmbH for DE4LoRa Sponsorship Project	
4. author(s) (family name, first name(s)) Zeller, Martin	5. end of project September 2024
	6. publication date 13.12.2024
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) COMPREDICT GmbH Rheinstr. 40.42 64283 Darmstadt	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19I20027E
	11. no. of pages 20
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references -
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 13
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	

18. abstract

COMPREDICT is responsible for the development of a data-based methodology for optimising vehicle operating strategies with regard to service life and load. First, different operating modes, such as electric operation, hybrid modes (serial and parallel), as well as traction and recuperation operation, are identified, which serve as a basis for the design. The load spectra for the components are estimated for different driving situations, and AI-based virtual sensors are trained to reconstruct precise drive torques and load variables in the drivetrain in real time, and a damage model is created to calculate the incremental damage to the components per time unit, driving distance and load cycle. In addition, an AI algorithm is developed that predicts the service life of the components. Based on this, competing optimisation targets, such as component service life and energy consumption, are defined and evaluated using an objective function. An optimisation algorithm is then designed to identify the operating strategy with a focus on service life optimisation.

The strategies developed are simulatively compared with purely energy consumption-orientated operating strategies. A global analysis of the vehicle data helps to identify the '99% driver'. The driveREAL method is used to derive driving cycles and compress them for test bench tests. In addition, precise load spectra are created for drivetrain components such as the electric motor, the combustion engine, the transmission and the side shafts, and compared with design spectra.

Finally, the total service life of the components is predicted, and the lightweight construction potential and possible optimisation approaches are identified.

19. keywords

Drivetrain, load spectra, service life predication models, DE4LoRa

20. publisher -	21. price -