26. JULI 2022

FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

Technologieerprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung - Oberleitungs-LKW

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.01.2018 bis: 31.12.2021 (verlängert)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
(Auflistung aller Verbundpartner)	*(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)*
Volkswagen Aktiengesellschaft	16EM3165-1
Siemens Mobility GmbH	16EM3165-2

Schlussbericht

Technologieerprobung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Energieversorgung per Oberleitung - Oberleitungs-LKW

Vorhabennummer: 16EM3165-1 und -2

Laufzeit: 01.01.2018 bis 31.12.2021 (verlängert)

Berichtszeitraum: 01.01.2018 bis 31.12.2021

Gemeinsamer Abschlussbericht der Konsortialpartner zum oben genannten Vorhaben.

Konsortialführer:
Volkswagen AG

38436 Wolfsburg

Ansprechpartner:
Henning S. Vogt
Brieffach 011/17773
38436 Wolfsburg
Tel.: +49 5361 9-20398

Verbundpartner:
Siemens Mobility GmbH
Technology & Innovation
81739 München

Ansprechpartner:
Bernhard Mayer
Werner-von-Siemens-Str. 65
91052 Erlangen
Mobil: +49 172 1089476
E-Mail: bernhard.mayer@siemens.com

26. JULI 2022

Inhalt

1 Zusammenfassung 6

2 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes 15

2.1 AP 0: Projektleitung 15

2.2 AP 1a: Auslegung des Basisantriebskonzepts inkl. erste Betriebsstrategie und Antriebskonzept Next Gen 16

2.2.1 Erweiterung einer vorhandenen Längsdynamiksimulationsumgebung für schwere Nutzfahrzeuge mit einer Anbindung an Oberleitungssysteme 16

2.2.2 Generierung virtueller OL-Szenarien basierend auf realen Autobahnabschnitten ... 20

2.2.3 Bewertung potenzieller CO_2-Einsparungen anhand von Sensitivitätsanalysen 21

2.2.4 Rekuperationsenergie bei Bergabfahrten im Oberleitungs-LKW 23

2.3 AP1b Auslegung und Optimierung des Antriebskonzepts mit Ausrichtung auf die hardwarenahe Umsetzung 27

2.3.1 Einleitung 27

2.3.2 Analyse, Auswahl und Bewertung von synthetischen und realen, kundennahen Fahrprofilen 27

2.3.3 Simulation Gesamtfahrzeug und Auslegung der Komponenten des Antriebsstrangs 30

2.3.4 Simulative Auslegung der Antriebsstrangkomponenten und Festlegung der Lastkollektive 30

2.4 AP2.1 Forschungsinhalte Fahrzeugkonstruktion – Package LKW 40

2.5 AP 2.2: Forschungsinhalte Fahrzeugkonstruktion – Package Antriebskomponenten 44

2.6 AP 3: Pantograph (Siemens Mobility) 44

2.6.1 PAN.1 45

2.6.2 PAN.2 47

2.6.3 PAN.3 47

2.6.4 PAN.4 48

2.6.5 PAN.5 50

2.6.6 PAN.6 52

2.6.7 PAN.7 -Aufstockung „HV-ready“ 53

2.7 AP 4: Prototypenfahrzeuge 54

2.7.1 Prototypen-LKW 54

2.7.2 Trailer 63

2.8 AP 5: Innovatives Kühlungssystem und Thermomanagement 64

2.8.1 Einfluss der elektrischen Einspeisung auf den Wärmehaushalt 64

2.8.2 Analyse der Thermomanagement-Topologie in LKW 65

2.8.3 Ableitung von spezifischen thermischen Anforderungen 68
2.9 AP 6: Batterie 68
2.9.1 Grundlagen 68
2.9.2 AP 6.1 Analyse der Profile Laden/Entladen und Ableitung relevanter Belastungen für Oberleitungs-LKW 69
2.9.3 AP 6.3 Entwicklung von alterungsoptimalen Ladeverfahren und Verifikation 71
2.9.4 AP 6.2 Zelltests auf Prüfstandebene 72
2.9.5 AP 6.4 Adaption der Ladeverfahren für die Anwendung und Erprobung im Prototypen-LKW 76
2.9.6 AP 6.5 Vergleich mit zukünftiger Zellgeneration 77
2.10 AP 7: E-Maschine 79
2.10.0 LKW-spezifische Anforderungen und Schnittstellen 80
2.10.1 Erstellung universeller Lebensdauermodelle der Wicklung in el. Maschinen 83
2.10.2 Bewertung der Lastkollektive für NFZ 87
2.10.3 Auslegung einer E-Maschine für NFZ 90
2.10.4 Konzept und Konstruktion der E-Maschine 95
2.10.5 Ermittlung der Parameter für das Lebensdauermodell 101
2.10.6 Optimierung der Komponente 111
2.11 AP 8: Leistungselektronik 116
2.11.1 LKW-spezifische Anforderungen 117
2.11.2 Lebensdauerbetrachtung und Modellbildung 122
2.11.3 Aufbaukonzept und Optimierungsansätze 128
2.11.4 Hochvoltsystembetrachtung 129
2.12 AP 9: Future High Voltage System Design 140
2.12.1 Systemspannung zukünftiger Oberleitungs-LKW sowie –infrastruktur 141
2.12.2 Bewertung der Leitungsquerschnitte 142
2.12.3 Betrachtungen zur HV-Sicherheit bei nicht-isolierendem DC-Wandler 145
2.12.4 Messtechnische Analyse und Bearbeitung von Auffälligkeiten im HV-System, Datenakquise zur Unterstützung der HV-Systemsimulation 158
2.13 AP 10: HV Systemsimulation 161
Ergebnisse 161
2.14 AP 11: DHT 166
2.14.1 AP 11.1 Getriebestruktur 166
2.14.2 AP 11.2 Schmierung, Kühlung 170
2.14.3 AP 11.3 Bauteilanalyse 172
2.14.4 AP 11.4 Aktuatorik 172

2.14.5 AP 11.5 DHT-Ansteuerung 174
2.14.6 AP 11.6 Wissenschaftliche Erkenntnisse 175
2.15 AP 12: Datenlogging und –analyse 175
2.15.1 Inbetriebnahme und Betrieb der Datenlogger 175
2.15.2 Datenmenge 177
2.15.3 Begleitende Diagnose 177
2.15.4 Unterstützung bei der Auslegung von Infrastruktur und Fahrzeug 180
2.15.5 Datenschutz 181
2.16 AP 13a: Fahrzeuginbetriebnahme, Test und Applikation 181
2.17 AP 13b: Untersuchungen zur Akustik 188
2.17.1 Einleitung 188
2.17.2 Vorgehen und Messdurchführungen 188
2.17.3 Vorbeifahrtmessungen „El Camino“ 190
2.17.4 Vorbeifahrtmessungen „El Pancho“ 197
2.17.5 Innenraummessungen „El Camino“ und „El Pancho” 205
2.17.6 Zusammenfassung 207
2.18 AP 14a: Strategie, Funktionsentwicklung 207
2.19 AP 14b: Funktionsentwicklung und Betriebsstrategie Antriebsstrangsteuerung 209
2.19.1 Kick-Off Workshop mit Scania in Södertälje 209
2.19.2 Untersuchung Rekuperationspotentiale 209
2.19.3 Untersuchungen des Spannungsverhaltens an der Oberleitungsstrecke mit mehreren LKWs 211
2.19.4 Untersuchungen “Anwohnerschutz” 212
2.19.5 “Multi-Truck”-Analyse 215
2.20 AP 15: Bewertung und Strategischer Ausblick: Elektrifizierter Schwerlastverkehr 2050 220
2.20.1 Einleitung 220
2.20.2 Einführung in die Software REMod 220
2.20.3 Szenarienentwicklung 221
2.20.4 Parametrierung des Modells REMod 235
2.20.5 Auswertung der Ergebnisse 238
2.20.6 Literatur 252
2.21 AP 16: Umweltverträglichkeit 253
2.21.1 Ziel und Umfang 253
2.21.2 Materialzusammensetzung der Fahrzeuge 254
2.21.3 Nutzungsphase 256

26. JULI 2022

2.21.4 Wartung 256
2.21.5 Ergebnisse zur Umweltverträglichkeit 256
2.21.6 Fazit zur Umweltverträglichkeit 261

1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „Oberleitungs-LKW" hat die zugehörige Thematik im Förderzeitraum von 2018 bis 2021 aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Entsprechend der zugehörigen Kooperationsvereinbarung haben die Konsortialpartner Volkswagen und Siemens den erfolgreichen Abschluss der Forschungsarbeiten förmlich erklärt, mit letzter Unterschrift am 20.04.2022. An dieser Stelle werden die Kern-Ergebnisse in Kurzform angegeben und auf die weiteren Abschnitte dieses Berichts zur Vertiefung verwiesen.

Grundsätzliche Erkenntnisse zum Antriebskonzept wurden in Arbeitspaket 1a (**Kapitel 2.2** dieses Berichts) erarbeitet.

1. Der Oberleitungsbetrieb, bei dem der E-Motor seinen Strom direkt aus dem Fahrdraht bezieht, ist im Vergleich zu anderen Konzepten ein **besonders effizienter Antrieb** (77% well-to-wheel Wirkungsgrad).
2. **Gefällestrecken sollten nicht mit einer Oberleitung (OL) ausgestattet werden.** Die durch Rekuperation gewonnene Energie sollte in der Fahrzeugbatterie gespeichert werden. Eine alternative DC-Netzeinspeisung für entgegenkommende, bergauf fahrende LKWs ist meist weniger effizient. Eine Rückspeisung ins Mittelspannungsnetz würde zudem erhöhte Investitionskosten benötigen.
3. Um 100% der Strecken rein elektrisch fahren zu können, ist eine **Abdeckung von 40-60% mit einer OL-Infrastruktur ausreichend**, wenn die elektrische Antriebsleistung, die Größe der Batterie und die Ladeleistung im Fahrzeug ausreichend dimensioniert sind.
   a. Die **minimale Batteriegröße bei Hybrid-OL-LKW** sollte auch nicht mit Oberleitung abgedeckte Streckenanteile berücksichtigen (Vermeidung VKM-Start). Für 10km wären etwa **15kWh nutzbare Energie** erforderlich.
   b. Bei **reinen BEV-OL-LKW** sollten Fahrten zur und von der Autobahn möglich sein. Außerdem sollten auch größere Lücken im Oberleitung-Netz (zB wegen Betriebsstörungen) bewältigt werden können. Eine **Batteriekapazität von 150kWh** (100km) scheint sinnvoll.
   c. Die Ladeleistung unter der Oberleitung muss mindestens die benötigte durchschnittliche elektrische Leistung abdecken. Bei 50% OL-Anteil und Geschwindigkeit von 80km/h wären ca. **120kW Batterie-Ladeleistung** notwendig.
   d. Die **elektrische Dauerantriebsleistung** von rein elektrisch angetriebenen OL-LKWs sollte auf dem Niveau von heute typischen Diesel-LKW liegen, um eine gleichmäßige Geschwindigkeit auf der rechten Fahrspur zu realisieren. Diese liegt bei etwa **330KW** (450PS).

Die Untersuchung des Antriebskonzepts anhand von konkreten Fahrzeug-Parametern (validiert durch Ausrollversuche) und OL-Strecken erfolgte in Arbeitspaket 1b (**Kapitel 2.3** dieses Berichts). Für die Pilotstrecke auf der **A1 bei Lübeck** wurde ermittelt, dass für rein-elektrische Fahrt eines dort typischen LKW-Pendelbetriebs aufgrund der notwendigen Ladeleistung eine Batterie mit 7 Modulen erforderlich

wäre. Um eine begrenzte Batterie-Größe (hier durch Package max. 4 Module) einhalten zu können könnte man entweder

- **stationäres Laden an den Verladeorten** realisieren (30kWh pro Zyklus; wird im Folgenden unterstellt) oder die
- **Länge der Oberleitung verdoppeln** (was aktuell nicht vorgesehen möglich ist) oder eine
- **bewusste Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit unter der Oberleitung** (zur Erhöhung der Ladezeit) vornehmen.

Während der **Typ1-LKW (130kW E-Maschine)** unter der Oberleitung ohnehin temporär nur 75km/h schaffen würde, könnte der **Typ2-LKW (260kW E-Maschinen-Leistung)** dem Fahrprofil ohne Abweichungen folgen.

Für die Pilotstrecke auf der **B462 im Murgtal** wurden unterschiedliche Ausbauszenarien (2,8 km - 6,7 km Elektrifizierungsanteil) simulativ bewertet. Für einen dort typischen Pendelverkehr wurden bis zu 50% CO2-Einsparung gegenüber konventionellen LKW ermittelt. Für die letztlich umgesetzte Variante (2,8km) immerhin noch 25%.

- Die im Vergleich zur Autobahn **geringere Durchschnittsgeschwindigkeit ist für die Elektrifizierung sogar vorteilhaft** (längere Ladezeit unter der Oberleitung und geringerer Fahrwiderstand).
- **Eine Ampel im elektrifizierten Abschnitt ergibt keine Vorteile**, da der Energiebedarf durch den Brems- und Anfahrvorgang deutlich höher ist, als die Energie, welche im Stillstand an der Ampel geladen werden kann.

Die **notwendige Batterie-Größe zur Rekuperation auf Gefällestrecken** wurde anhand der Kasseler Berge und am **Brenner-Pass** simulativ ermittelt: Die Batterie sollte mindestens **25kWh** Ladekapazität aufweisen. Andernfalls wäre es sinnvoll doch eine Netzrückspeisung vorzuhalten, um Rekuperationspotentiale ausnutzen zu können.

Forschungsinhalte bezüglich der Fahrzeugkonstruktion wurden im Arbeitspaket 2 behandelt (**Kapitel 2.4** dieses Berichts). Die betrachteten Oberleitungs-LKW basieren auf dem **Modulsystem** des Herstellers Scania. Hier **vorhandene Konzepte für HEV bzw. PHEV** werden für den OL-Betrieb um **relative geringe Umfänge (insb. Pantograph) ergänzt**. Um die Logik des Modulsystems nicht aufzubrechen, wurden die Arbeiten auf notwendige Unterstützungen anderer Pakete beschränkt.

Für die Einrüstung von Messtechnik (Strom- und Spannung) sowie von aktiven Komponenten (Regler für Wieder-Ankopplung) und passiven Komponenten (Drossel) im Hochvolt-System wurden Package- und Konstruktions-Lösungen erarbeitet, hergestellt und integriert. Hierbei wurden Aspekte der mechanischen Befestigung, Abwärme-Situation und der elektrischen Isolation bzw. Potential-Ebene berücksichtigt.

Der Pantograph an sich sowie zugehörige Systemumfänge wurden detailliert im Arbeitspaket 3 behandelt (**Kapitel 2.6** dieses Berichts). Hierzu zählte die Spezifikation, Fertigung und Inbetriebnahme von zwei Pantographen der Generation 3.0.1 auf zwei Fahrzeugen, inklusive Labor- und Straßentests in insgesamt 33 Testszenarien.

Zusätzlich wurde eine **regelmäßige Auswertung von Felddaten** durchgeführt. Hieraus wurden insgesamt 37 Änderungen abgeleitet und in den Generationen 3.0.2 sowie 3.1 eingebracht. Teilumfänge

wurden auch unmittelbar in die zwei Versuchsfahrzeuge des Projekts integriert und trugen zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit bei. Auch das Verhalten des Kontakts zur Oberleitung mittels Schleifleiste wurde untersucht und zB **hinsichtlich Verschleiß optimiert** mittels behutsamerem Anbügeln.

Das Pneumatiksystem des Pantographen hat sich als temperaturanfällig herausgestellt. Es müssen daher zusammen mit zu den systematisch auszuregelnden Effekten (beim Heben, Senken, Andrahten und bei Höhenlageveränderungen) **Druckschwankungen von bis zu 2,5 bar** kompensiert werden. Die Beherrschung des Systems ist zB wichtig um die rechtzeitige Absenkung analog der Fahrdrahtabsenkung vor Brücken zu realisieren. Hier ist eine **Reaktionszeit von 490 ms** einzuhalten.

Auch die **innere Federsteifigkeit des Systems** bedarf besonderer Beachtung. Für Oberleitungen im Bereich 5,20m muss zB noch eine Mindestkontaktkraft realisiert werden. Andererseits soll in Bodenwellen keine Überschreitung der maximalen Höhe erfolgen. Hierfür wurde eine Versteifung des Endanschlags erprobt und letztlich beibehalten. Im Projektverlauf wurde eine **Positioniervorrichtung** entwickelt, die den Zeitaufwand für die mechanische Einstellung des Stromabnehmers um etwa 2/3 reduziert.

Aufgrund der im Projekt erarbeiteten Empfehlung die Systemspannung zukünftig auf **1200V** zu erhöhen, wurden bereits **Anpassungen an Komponenten** (zB Überspannungsableiter, Sicherungen, Kriechstrecken, Isolatoren) vorbereitet und teilweise umgesetzt. Mangels Verfügbarkeit eines geeigneten Isometers am Markt wurde ein Lieferant gesucht und eine Entwicklung gestartet. Die Verbesserung der Isolatoren wurde zusätzlich durch Feld-Erfahrungen mit **Salz- und Schmutzablagerungen** motiviert und unter anderem durch eine **hydrophobe Beschichtung** realisiert.

Da die **Isolationsmessung auf verschiedenen Isolationsebenen mit verschiedenen Isometern** stattfindet, wurde hier im Austausch mit dem Fahrzeughersteller eine **zeitliche Koordination** erarbeitet, die Quer-Beeinflussungen minimiert. Eine standardisierte nachträgliche Integrierbarkeit von Energiezählern im Pantographen ist berücksichtigt worden. Des Weiteren konnte auf die Verwendung eines RFID-Scanners verzichtet werden, was insgesamt zur **Vereinfachung des Systems** beiträgt.

Um die Systemarchitektur und Sicherheitsbetrachtung des Pantographen weiter zu vereinfachen, ist eine Lösung in Hard- und Software erarbeitet worden, welche selbstständig die sicherheitsrelevante **Detektion der Oberleitung und korrekte Positionierung** übernimmt. Hierzu konnte eine Technologievorauswahl durchgeführt werden und Erprobungen mit Lidar, Radar, ToF und LF-Modulation durchgeführt werden.

Zur Beurteilung des Oberleitungs-Betriebs hinsichtlich Rückwirkungen in das Mittel- und Hochspannungsnetz wurde ein Simulation mit mehreren Fahrzeugen aufgesetzt. Aus der Simulation wird ersichtlich, dass Störungen der Kontaktgüte zwischen Fahrzeug und Oberleitung keine Auswirkung auf das AC-Speisenetz haben, bis auf die auftretende Stromspitze, der sich wie ein kurzfristiger Lastsprung darstellt. Auffällig bei der Betrachtung zur Total Harmonic Distortion ist, dass bei geringer Last am Unterwerk die Kurvenform der Gleichrichtung auf der Mittelspannungsversorgung gut zu erkennen ist und einen entsprechenden Wert von ca. 13% liefert.

Das Arbeitspaket 4 (**Kapitel 2.7** dieses Berichts) diente speziell den im Projekt eingesetzten Fahrzeugen. Hierbei handelte es sich um **Hybrid-OL-LKW**, was bei dem aktuell geringen Infrastruktur-Ausbau als sinnvolle Technologie eingeschätzt werden kann. Bei höherem Ausbaugrad können auch rein batterie-elektrische Oberleitungs-LKW (**BEV-OL-LKW**) sinnvoll sein.

Für eine echte Marktdurchdringung wäre es sinnvoll, dass **weitere LKW-Hersteller** in die Oberleitungs-Technologie einsteigen. Außerdem ist es wünschenswert, dass es **weitere Komponentenanbieter** gibt, insbesondere natürlich für den Pantographen. Mit dem Einstieg von Continental, als großem Automobilzulieferer, in die Pantographen-Fertigung zusammen mit Siemens, ist diesbezüglich ein erster Schritt erfolgt.

Eine besondere Attraktivität könnten Oberleitungs-LKW entfalten, sobald **voll-automatische Fahrt** von LKW möglich wird. Da für den Fahrer dann keine besonderen Pausen mehr eingehalten werden müssen, würde jegliche „Ladepause" einen Zeitverlust bedeuten. Oberleitungs-LKW könnten in diesem Szenario bei guter Oberleitungs-Netzabdeckung **durchgehend im Fahrbetrieb** bleiben.

Hinsichtlich der Technik wäre (beim aktuellen Entwicklungsstand) eine **erhöhte Robustheit** der Oberleitungs-Ankopplung (zB ggü. kurzen Störungen) wünschenswert. Bei der Fahrt unter der Oberleitung könnte der Fahrer besser unterstützt werden, insbesondere durch

- optisches und/oder akustisches **Feedback bezüglich des Anbügelvorgangs** sowie
- **automatisierte genaue Spurhaltung**, um das Oberleitungs-Fahren über weite Strecken zu erleichtern und
- eine manuelle Bedienung des Pantographen über **Tasten am Lenkrad**.

Eine gesonderte Betrachtung des Kühlungssystems und des Thermomanagement der Fahrzeuge erfolgte im Arbeitspaket 5 (**Kapitel 2.8** dieses Berichts). Für die verwendeten Oberleitungs-LKW wird, auch **hinsichtlich Kühlsystem und Thermomanagement, die Technik von elektrifizierten LKW** als Basis verwendet und simulativ, auch für die Verwendung in zukünftigen Szenarien, untersucht.

Aus dem Betrieb als OL-LKW und den zugehörigen Komponenten ergeben sich keine thermisch-kritischen Anforderungen, die Änderungen erfordern würden. Aufgrund der konzeptuellen Nähe zwischen PHEV und BEV beim Kühlsystem ist auch für den Übergang zu rein-elektrischen OL-LKW in der Zukunft **kein wesentlicher OL-spezifischer Mehraufwand** zu erwarten.

Im Vergleich zu PKW zeigen sich vor allem höhere Klimatisierungsbedarfe für die verhältnismäßig große Fahrerkabine und die Batterie. Dementsprechend ist die Effizienz des elektrischen Klimakompressors (Pel=8 kW) auch von hoher Bedeutung für den Gesamt-Energieaufwand des Thermomanagements für den elektrifizierten Antriebsstrang. Als zentrale Herausforderung wurde ferner die Verteilung von Kühlmittel-Strömen und –Kapazitäten festgestellt. Die vorliegenden Systeme (Typ 1 & Typ 2) bieten hierzu keine ausreichende Variations-Möglichkeit.

Die Batterie wurde im Arbeitspaket 6 (**Kapitel 2.9** dieses Berichts) ausführlich behandelt. Die per DC-Wandler verfügbare Leistung (180kW im Typ2) kann mit der aktuellen Zellchemie, angesichts der Randbedingungen von Energieinhalt und Verschaltung der Zellen, nicht dauerhaft abgerufen werden. Mit dem Ziel eine **höchstmögliche Ladeleistung bei geringstmöglicher Alterung** zu realisieren wurde ein stufenförmiges Ladeverfahren erarbeitet.

Eine **Ladung der Zellen mit ≥ 4C** ist anzustreben, damit auch kurze Ladephasen gut ausgenutzt werden können. Derartige Zellen sind derzeit im Forschungsstadium. Insbesondere für die intensive Anwendung bei Nutzfahrzeugen sollte die **Zyklenstabilität deutlich über 1.000 Vollzyklen** liegen. Dies ist dabei eine besondere Herausforderung.

Die Eigenschaften „Schnellladefähigkeit", „Zyklenstabilität" (Lebensdauer) und (hohe) „Energiedichte" sind aktuell nur mit Kompromissen überein zu bekommen. Bei geringer Netzabdeckung der Oberleitung hat die Schnell-Ladefähigkeit eine höhere Rolle. Bei hoher Netzabdeckung könnte letztlich die **Batterie sogar verkleinert und/oder kostengünstig ausgeführt** werden. Aus Batterie-Sicht wäre eine **Oberleitungs-Infrastruktur mit jeweils kurzen Lade- und Entladephasen** zu bevorzugen (geringe Entladetiefe).

Für die aktuelle Zellchemie wurde auf Basis von Laborversuchen eine simulative Lebensdauerprognose erstellt. Definiert man das Lebensdauer-Ende bei einem State of Health von 80%, dann kann bei einem geringen **OL-Ausbaugrad (10%) eine Laufleistung von ca. 400.000km** für die Batterie erwartet werden. Bei einem wünschenswerten **Ausbaugrad (50%) jedoch nur ca. 200.000km**. Dies zeigt, dass parallel zum Netzausbau auch eine Weiterentwicklung der Zellchemie erfolgen sollte.

Eine detaillierte Betrachtung der E-Maschine erfolgte im Arbeitspaket 7 (**Kapitel 2.10** dieses Berichts). Für die vorliegende E-Maschine wurden einerseits konstruktive Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Durch **optimierte elektromagnetische Auslegung** und Einsatz einer effizienten **Wickelkopf-Ölkühlung (mehrere Düsen am gesamten Umfang verteilt)** könnte das Drehmoment und die Leistung zwischen 10% und 30% erhöht werden.

Eine Untersuchung anhand von repräsentativen Lastzyklen für PKW und LKW zeigte, dass das Isolationssystem einer LKW E-Maschine bedeutend stärker belastet ist:

- thermisch durch **höhere mittlere Temperaturen** (Wicklungstemperatur beim Koblenz-Trier Zyklus bei 155 °C im Vergleich zu WLTP beim PKW mit 92 °C)
- mechanisch durch **höhere Gradienten von dT/dt**
- elektrisch durch **höhere Spannung** (800 V vgl. mit 400 V) sowie durch **höhere dU/dt** (deutlich über 10 kV/µs aufgrund der potenziell eingesetzten Siliziumkarbid (SiC) Technologie)

Das untersuchte Isolationssystem wurde im Labor einer beschleunigten thermischen Zyklisierung (dT/dt) unterworfen und zeigte hierbei keine nennenswerte Verschlechterung der geprüften Eigenschaften (Einsetzspannung der Teilentladung sowie Anzahl der Teilentladungen pro Spannungslevel nach 500 h). Als Projektergebnis wird der Aufbau des Isolationssystems mit **Drahtisolierung (160 - 200 µm)**, **Nutisolierung (NKN Laminat mit 200 µm)** und die Imprägnierung mittels **Träufeln des Imprägnierharzes** vorgeschlagen. Optional können Isolationsmaterialien mit zusätzlichen **coronaresistenten Polyimide-Schichten** eingesetzt werden, um die Beständigkeit des Isolationssystems gegenüber elektrischer Erosion durch hohe dU/dt (Betrieb E-Maschine mit SiC Umrichter) zu erhöhen.

Die Leistungselektronik wurde detailliert im Arbeitspaket 8 (**Kapitel 2.11** dieses Berichts) betrachtet. Der gegenwärtige Technologietrend bei PKW zur Nutzung von **Siliziumkarbid-Halbleitern** im Antriebsumrichter bringt im betrachteten LKW-Zyklus jedoch keine nachweislichen Effizienzvorteile, maßgeblich weil die Teillast-Umfänge geringer ausfallen. Trotzdem könnten auch LKW-Konzepte mit **Bauraum- oder zukünftig gar Kostenvorteilen** aus den PKW-Technologieentwicklungen profitieren.

Das Belastungsszenario der Komponente in der betrachteten LKW-Anwendung weicht deutlich von den im PKW-Bereich gefundenen Szenarien ab (Betriebsdauer 55000h vs. 8000h, Lastwechselzeit 50-500s vs. 1-5s). Neue langzeitzuverlässige Aufbautechniken zeigen hier **neuartige Ausfallmechanismen (Risse in der Chip-Metallisierung)**, für die geeignete Lebensdauermodelle derzeit noch Forschungsge-

26. JULI 2022

genstand sind. Bei Anwendung von Siliziumkarbid werden dabei **andere Ausfallszenarien** als bei Siliziumelektroniken gefunden (**Fehlerposition Rand vs. Zentrum**), wohlmöglich aufgrund der geringeren Elastizität des SiC-Kristalls.

Für die betrachtete LKW-Anwendung wurde unter Einsatz neuer Aufbautechnologien (direkt-gekühlte Leistungsmodule, gesinterte Chips mit Bondbuffer-Technologie, zentrale Kühlplatte, anwendungsspezifischer Folienkondensator) ein ca. **30% verkleinertes Umrichterpackage als Vorschlag erarbeitet.**

Simulationen auf Basis eines Hochvoltsystem-Modells zeigen, dass grundsätzlich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Resonanzeffekte im Oberleitungsnetz zwischen LKWs und Unterwerken (bzw. deren 300Hz Restwelligkeit) besteht. Filtermaßnahmen (**fahrzeugseitige Drossel**) könnten die anregungsfähigen Überhöhungen bedämpfen, es entstehen jedoch komplexe höherfrequente Resonanzen (350-550Hz je nach Entfernung vom Unterwerk, bei mehreren LKW im Abschnitt auch 550-1000Hz), deren Beherrschung im System noch offen bleibt.

Im Arbeitspaket 9 (**Kapitel 2.12** dieses Berichts) wurde das Hochvolt-System im Detail bearbeitet. Hierzu zählte insbesondere eine **neuartiges Sicherheitskonzept** als Alternative zur isolierten Stromversorgung bzw. zur mehrstufigen Isolierung, das eine **symmetrische Spannungslage der Fahrleitungsversorgung ggü. dem Erdpotenzial** sowie eine **Modusumschaltung der Sicherheits-Überwachung zwischen Batterie- und Oberleitungsbetrieb** beinhaltet.

In Kombination mit anderen Arbeitspaketen wurde **U_{nenn}=1200V als Empfehlung zur optimalen Systemspannung der Oberleitung** erarbeitet. Unter anderem aufgrund der maximal möglichen Reduzierung der Verluste bei **Einhaltung der Niederspannungsgrenze.**

Für den Hochvolt-Leitungsstrang wurde ferner eine **thermische Leitungs-Simulation mit Oberleitungs-spezifischen Lastszenarien** durchgeführt. Laut dessen Ergebnis können Leitungsquerschnitte ggü. der konservativen Dauerlastauslegung reduziert werden. In Einzelfällen um bis zu 70%.

In Arbeitspaket 10 (**Kapitel 2.13** dieses Berichts) erfolgte eine **HV Systemsimulation** insbesondere bezogen auf den DCDC-Wandler. Die erstellten Simulationsmodelle haben eine generische Form und können diverse Topologien nachstellen. Als Neben-Ergebnis konnte ein Technologievergleich von Si und SiC im DC-Wandler durchgeführt werden und der Nachweis erbracht werden, dass auch in diesem Fall der **Einsatz von SiC keine Vorteile** bringt.

Das im Typ2-LKW eingesetzte Getriebe der Gattung **„Dedicated Hybrid Transmission"** wurde im Arbeitspaket 11 (**Kapitel 2.14** dieses Berichts) untersucht. Hier wurde der mechanische Aufwand reduziert wurde um Platz zu schaffen für zwei leistungsstarke E-Maschinen. Diese werden zur **Zugkraftunterstützung und Synchronisierung im hybridischen Fahren** genutzt. Hierfür ist eine HV-Batterie mit wenig Energieinhalt ausreichend, da eine E-Maschine motorisch und die zweite E-Maschine generatorisch betrieben wird. Darüber hinaus bietet das Konzept die **Möglichkeit in fünf Gängen batterieelektrisch zu fahren**. Die Umsetzung der Getriebestruktur wurde **im Bauraum des konventionellen Getriebes** realisiert. Um bei Verwendung einer kleinen Batterie hybridisch sowie elektrisch zu fahren und zugkraftneutral zu schalten, ist die gewählte Struktur mit zwei E-Maschinen und zwei Planetengetrieben gut geeignet.

Bei der Getriebeerprobung sind Bauteilbeschädigungen und -ausfälle aufgetreten, die nach eingehender Designanalyse auf unzureichend steif gelagerte Getriebewellen zurückgeführt werden konnten. Es

wurde hierauf ein Lagerungskonzept mit nur geringfügiger Änderung im Hybridteil des Getriebes erarbeitet, welches dessen **Dauerhaltbarkeit verbessert**.

Ferner wurde eine Optimierung des Aktuatorkonzepts erarbeitet. Die 9 Schaltelemente wurden im Grundentwurf von 7 pneumatischen Aktuatoren betätigt. Der neue Vorschlag sieht stattdessen 4 **elektromechanische Aktuatoren** vor. Dies ermöglicht eine Energieeinsparung von 75% für die Aktuatorik und würde das Getriebe insbesondere vorbereiten für den Fall, dass im LKW ein Entfall des Druckluftsystems vorgesehen ist.

Das **Beölungs- und Kühlungskonzept des Getriebes** wurde mithilfe einer **Öl-Partikel-Simulation** optimiert. Hierbei wurden vor allem strömungsungünstige Übergänge (Reduzierungen, Winkel und Verzweigungen) in den Ölleitungen der Ölgalerie des Gehäuses festgestellt und unter anderem durch, zum Patent angemeldete, Strömungsoptimierte Stopfen behoben. Die Strömungsverluste in Ölgalerien konnten um bis zu 45% reduziert und die Ölverteilung in den unterschiedlichen Versorgungszweigen balanciert werden.

Datenlogging und –analyse für das Gesamtprojekt erfolgte im Arbeitspaket 12 (**Kapitel 2.15** dieses Berichts). Hierfür wurden 2 Datenlogger (Speicherkarte: kompletter CAN; Online-Übertragung: 100 ausgewählte Signale) in beiden Projektfahrzeugen installiert, zwecks Erfassung der Betriebsdaten aus den OL-LKW in einem lokalen Datenhaltungssystem. Insgesamt wurden auf **40.000km Fahrstrecke** etwa **300GB Daten** aufgezeichnet.

Es erfolgte eine Analyse der Daten hinsichtlich fachlicher Fragestellungen (Batterienutzung, Oberleitungs-Nutzung, Energieumsätze, Spur-Haltung ...) und eine Verhaltensanalyse der Fahrzeuge und Komponenten im Fehlerfall. Für zukünftige Projekte wird der Erhalt der Kombination Online/Offline-Logging empfohlen, aber online mit gröberem Zeitraster (100ms→1000ms). Ferner sollte die Speicherung in einem Cloud-System erfolgen.

Fahrzeuginbetriebnahme, Test und Applikation wurden im Arbeitspaket 13a (**Kapitel 2.16** dieses Berichts) abgedeckt. Inbetriebnahme und Betrieb stellten sich dabei grundsätzlich vergleichbar mit PKW dar, was den Hybridisierungsgrad (PHEV) angeht. Zusätzlicher Aufwand entstand jedoch durch den Oberleitungs-Aspekt (Pantograph). So stand nur **eine einzige abgesperrte Teststrecke** (Groß-Dölln) zur Verfügung. Die Robustheit gegenüber kurzen Kontaktstörungen, das exakte systemgestützte Spurhalten und die Optimierung des Anbügelvorgangs waren Oberleitungs-spezifische, und insofern zusätzliche, Arbeitspunkte.

Ein besonderer Arbeitspunkt waren messtechnische und simulative Untersuchungen zum Verhalten des Kontakts Pantograph-Fahrleitung sowie zu elektrischen Schwingungsphänomenen. Hier wurde teils auch eine **Erprobung von Gegenmaßnahmen** (Drossel, Stromregler für Wieder-Kontaktierung) durchgeführt und mit deren erfolgreicher Bestätigung abgeschlossen.

Vor dem Erfahrungs-Hintergrund der PKW-Erprobung war die Einstellung unterschiedlicher Lastsituationen ebenfalls mit einem höheren Aufwand verbunden. Hierfür wurden Trailer mit unterschiedliche vielen Betongewichten (je 2t) an- bzw. umgekoppelt. Bei besonderen Lastwünschen erfolgte eine Beladungs-Änderung mit Hilfe eines Schwerlast-Gabelstaplers und anschließend erneute Ladungssicherung.

Um die Präsenz im öffentlichen Raum zu erhöhen sowie Strecken und Fahrzeuge in einem breiteren Spektrum zu testen, erfolgten **Versuchsfahrten auf allen drei Pilotstrecken in Deutschland**. Außerdem im Harz zur **Erprobung in anspruchsvollem Gelände.** Ein besonderes Highlight war die erfolgreich durchgeführte **gleichzeitige Fahrt mehrerer OL-LKW auf dem eHighway in Hessen.**

Gesonderte Tests zur akustischen Vermessung wurden im Arbeitspaket 13b (**Kapitel 2.17** dieses Berichts) durchgeführt und ausgewertet.

1. **Bei niedrigen Geschwindigkeiten (15km/h)** ist eine **deutliche Reduktion des Schalldruckpegels** bei Nutzung des Elektromotors ggü. Dieselbetrieb beobachtbar (>10dB(A)).
2. Bei zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Vorteil ab **(bei 50km/h ist der Schalldruckpegel 1-2 dB(A) geringer ggü. Dieselbetrieb)**, was vorwiegend auf den zunehmenden Einfluss der Wind- und Abrollgeräusche zurückzuführen ist.
3. **Bei 90km/h** lässt sich **kein signifikanter Unterschied im Schalldruckpegel** mehr ermitteln.

Aufgrund der akustischen Vorteile im niedrigen Geschwindigkeitsbereich könnten Wohngebiete, die aktuell durch behördlich angeordnete Nachtruhen für Nutzfahrzeuge gesperrt sind, durch niedrigere Immissionen des OL-LKW freigegeben werden. Der Gütertransport könnte so optimiert werden und den Verkehr in Stoßzeiten entlasten.

Die grundsätzliche Betrachtung von Funktionsentwicklung und Betriebsstrategie erfolgte in Arbeitspaket 14a (**Kapitel 2.18** dieses Berichts). Im Rahmen des Projektes zählte hierzu insbesondere die Abbildung der Betriebsstrategie in dem verwendeten Simulations-Modell, welches für viele Fragestellungen und Arbeitspakete genutzt wurde. Oberleitungs-spezifische Umfänge waren hierbei insbesondere

- prädiktive Entladung der Traktionsbatterie vor Erreichen eines Oberleitungsabschnitts zur Nutzung des gesamten Ladungspotenzials und
- priorisierte rein elektrische Fahrt bei Oberleitungsanbindung bei gleichzeitiger Ladung der Traktionsbatterie.

Konkrete Arbeiten hinsichtlich der Funktionsentwicklung und Betriebsstrategie erfolgten in Arbeitspaket 14b (**Kapitel 2.19** dieses Berichts), mit besonderem Fokus auf prädiktives Agieren der Antriebsstrangsteuerung. In diesem Rahmen wurde unter anderem die Sicherstellung der Nutzung von Rekuperationspotentialen bei Bergabfahrt herausgearbeitet. Die Betriebsstrategie muss dafür sorgen, dass die Batterie (hinsichtlich SoC, aber zB auch Temperatur) in der Lage ist, die jeweils zu erwartende Energiemenge (zB Brenner-Abfahrt: 25kWh) aufzunehmen.

Ein besonderes Highlight war die Erarbeitung einer **Anwohnerschutzfunktion**, motiviert durch die Pilotstrecke im Murgtal auf der B462. Prototypisch können hier (zB in bebauten Gebieten) Zonen des Verbots von Verbrennungsmotorbetrieb eingerichtet werden sowie ggf. Zonen des bevorzugten Betriebs. Hiermit wären dann auch **Fahrten in der Nacht möglich**, die ansonsten für Unmut in der Bevölkerung sorgen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die CO2-Reduktionspotentiale durch die Oberleitungs-Elektrifizierung nur marginal (3%) zurückgehen, selbst wenn ein vollständiger Anwohnerschutz implementiert wird.

Zur Abschätzung der zukünftigen **Belastung des Oberleitungs-Netzes** durch den Betrieb mehrerer LKW gleichzeitig erfolgte hierfür eine **Multi-Truck-Simulation** mit gemischten Nutzlast-Beladungen.

26. JULI 2022

- Bei der aktuellen Spannungslage von 650 V können pro Speiseabschnitt (aktuell 2km) bis zu **3 LKW parallel mit Energie aus der OL gefahren und gleichzeitig mit maximaler Leistung geladen** werden.
- Bei einer Erhöhung auf ~1200V kann die Anzahl der LKW verdoppelt werden. Alternativ oder zusätzlich **könnte die Anzahl der Unterwerke erhöht werden**, damit der Speiseabschnitt entsprechend verkürzt werden kann.

Eine Bewertung zur Kompatibilität von Oberleitungs-LKW mit dem gesamten Energiesystem in Deutschland wurde in Arbeitspaket 15 (**Kapitel 2.20** dieses Berichts) vorgenommen. Hierfür wurden Mobilitätsszenarien für den **Straßengüterverkehr im Jahr 2050** entworfen und analysiert. Die langfristige Perspektive von Oberleitungs-Lkws im Kontext einer energiesystematischen Betrachtung wurde innerhalb dieser Szenarien (**4000/11700km Oberleitungs-Netz, mit/ohne automatischem Fahren**) bewertet.

Die maximalen Stromnachfragen durch Oberleitungs-Lkw sind in den Szenarien relevant (bis zu 18 GW), liegen aber **innerhalb der auftretenden Volatilität der 100%-erneuerbaren Energieerzeugung** (positive Residual-Last für etwa 1/3 der Jahres-Stunden, gänzlich ohne Oberleitungs-LKW wären es etwa 3% weniger). Der **Oberleitungsverkehr lässt sich** in allen untersuchten Szenarien **in das zukünftige erneuerbare Energiesystem integrieren.**

Den Abschluss dieses Berichts (**Kapitel 2.21**) bildet das Arbeitspaket 16 zur Umweltverträglichkeit.

1. Für verschiedene Antriebsvarianten (Diesel, Brennstoffzelle, elektrisch mit 840kWh-Batterie, OL-LKW mit 150kWh-Batterie) wurden Umweltbewertungen im Form von **Life Cycle Assessments** (Produktion + 1,5 Mio.km Nutzung) durchgeführt.
2. Insbesondere bei der Kategorie Treibhauseffekt (in CO2-eq.) hat der Oberleitungs-LKW das größte **Potenzial für einen niedrigen Carbon Footprint.**
3. Mit EU-Energie-Mix 2016 ergibt sich in Mio. kg CO2-eq: Diesel-ICE 1,39; Diesel-HEV 1,32; BEV 1,33; OL-BEV 0,98; FCEV 1,46.
4. In einer Prognose für das Jahr 2025 (Verbesserung Strom-Mix, Batterie-Technologie, Kraftstoff-Verbrauch) ergibt sich: Diesel-ICE 1,27; Diesel-HEV 1,24; BEV 1,01; OL-BEV 0,81; FCEV 1,21.
5. Mit Strom bzw. H2 vollständig aus erneuerbaren Quellen ergäbe sich in Mio. kg CO2-eq: BEV 0,37; OL-BEV 0,12; FCEV 0,24
6. Gegenüber konventionellen Antrieben hat der OL-LKW-den **Vorteil in der Nutzungsphase**, der sich zukünftig weiter vergrößert je grüner der Strommix wird. Gegenüber einem elektrischen LKW mit großer Batterie hat der OL-LKW den Vorteil, dass **keine so große Li-Ionen-Batterie erforderlich** ist, die einen relativ großen CO2-Rucksack mit sich bringt.
7. Die Infrastruktur wurde nicht berücksichtigt. Bei einer großen Anzahl von OL-LKW mit entsprechend hoher Nutzung der OL-Netze wird nur ein sehr geringer Einfluss auf die CO2-Bilanz erwartet.

26. JULI 2022

2 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes

2.1 AP 0: Projektleitung

Im Arbeitspaket „Projektleitung" wurden parallel zur fachlichen Projektarbeit kontinuierlich die geplanten Koordinationsaufgaben durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten fanden regelmäßig Abstimmungen auf Arbeitspaket- und Projektleiterebene statt. Weitere Aufgaben innerhalb dieses APs waren der Abschluss des Kooperationsvertrages zwischen der Volkswagen AG und Siemens und die Organisation von jährlichen Statusgesprächen bei dem der Projektträger und der Fördergeber über den Projektfortschritt informiert wurden.

Im Rahmen der fachlich-wissenschaftlichen Arbeit stand die Abstimmung zwischen den einzelnen Arbeitspaketen im Mittelpunkt. Zur Koordination der internen Arbeiten bei Volkswagen fanden regelmäßig Abstimmgespräche in den APs und wöchentlich ein übergreifendes Projektgespräch statt. Die Vorbereitung des Projektgespräches und die Dokumentation der Ergebnisse, sind ebenfalls Teil der Arbeiten im AP. Weitere Aufgabe war die Abstimmung der Nutzungsbedingungen für die Teststrecken.

Nach Beginn der Corona-Pandemie war das Projekt stark durch deren negative Auswirkungen geprägt Insbesondere öffentliche und interne Reiserestriktionen und Corona-Schutzmaßnahmen erschwerten die Versuchsfahrten. So dass nur ein Teil der geplanten Fahrten durchgeführt werden konnte.

Zusätzlich kam es beim Hersteller Scania für die OL-LKWs aufgrund von längerer Kurzarbeit im Sommer 2020 und anschließender Reisebeschränkungen zu weiteren Verzögerungen. Die Auslieferung des 2. OL-LKW verzögerte sich dadurch. Da absehbar war, dass wichtige geplante Forschungsarbeiten ohne den 2. LKW nicht möglich sind, wurde ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung bis zum 30.06.2021 gestellt. Dieser wurde mit Bescheid vom 11.11.2020 bewilligt. Der aktualisierte Zeitplan zum Zeitpunkt des Verlängerungsantrags findet sich in Abbildung 1.

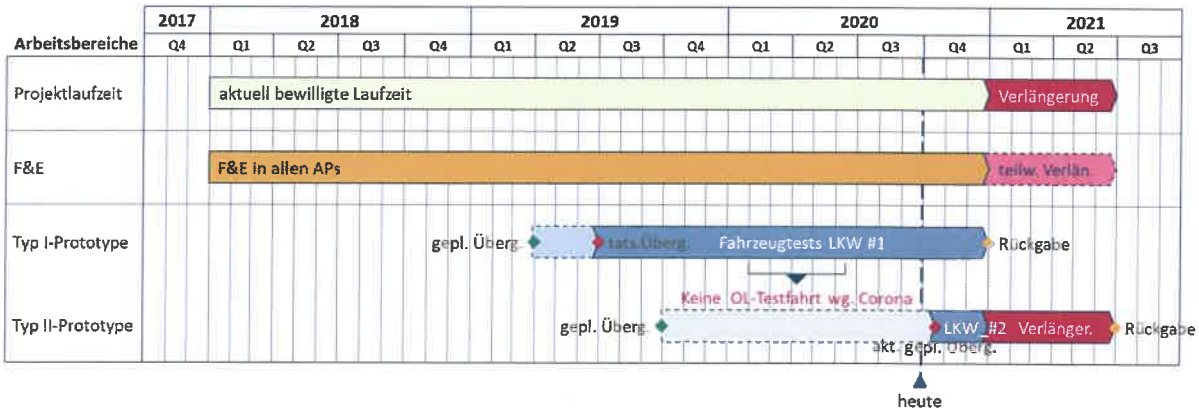


Abbildung 1: Terminplan zum Zeitpunkt der 1. Verlängerung

Zum Ende 2020 und Anfang 2021 hat sich bereits angedeutet, dass die Corona-Pandemie zu einer weiteren Verzögerung bei der Auslieferung des 2. LKW führen wird.

Der erste von Scania gemietete LKW erforderte nach einem Software-Update Ende 2020 eine Nachbesserung. Corona-bedingt war die Durchführung von Geschäftsreisen aus Schweden und Versuchsfahrten in den ersten Monaten schwierig. Insbesondere die Einreise- und Quarantäne-Bestimmung

26. JULI 2022

machten eine schnelle Behebung der Auffälligkeiten am ersten und eine finale Inbetriebnahme des zweiten LKW für die Kollegen von Scania nur mit Zeitverzug möglich. Die Auslieferung des zweiten LKW verzögerte sich dadurch erneut.

Eine Durchführung von Fahrversuchen war deshalb auch Anfang 2021 zunächst nicht möglich. So dass an den Fahrzeug-relevanten Arbeitspaketen kaum gearbeitet werden konnte. Die Arbeiten hieran wurden Anfang 2021 zunächst für ca. 5 Monate unterbrochen. An den übrigen, vom Fahrbetrieb mit den LKWs unabhängigen Arbeitspaketen konnte gearbeitet werden. Diese kamen auch gut voran und konnten größtenteils termingerecht abgeschlossen werden.

Im Mai 2021 wurde deshalb eine 2. Verlängerung für das Gesamtprojekt bis zum 31.12.2021 beantragt. Da Siemens nicht so stark von den Verzögerungen betroffen war, wurde für dieses Teilprojekt nur eine Verlängerung bis zum 30.09.2021 beantragt. Der Terminplan zur 2. Verlängerung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Beiden Anträgen wurde stattgegeben und das Gesamtprojekt zum 31.12. abgeschlossen.

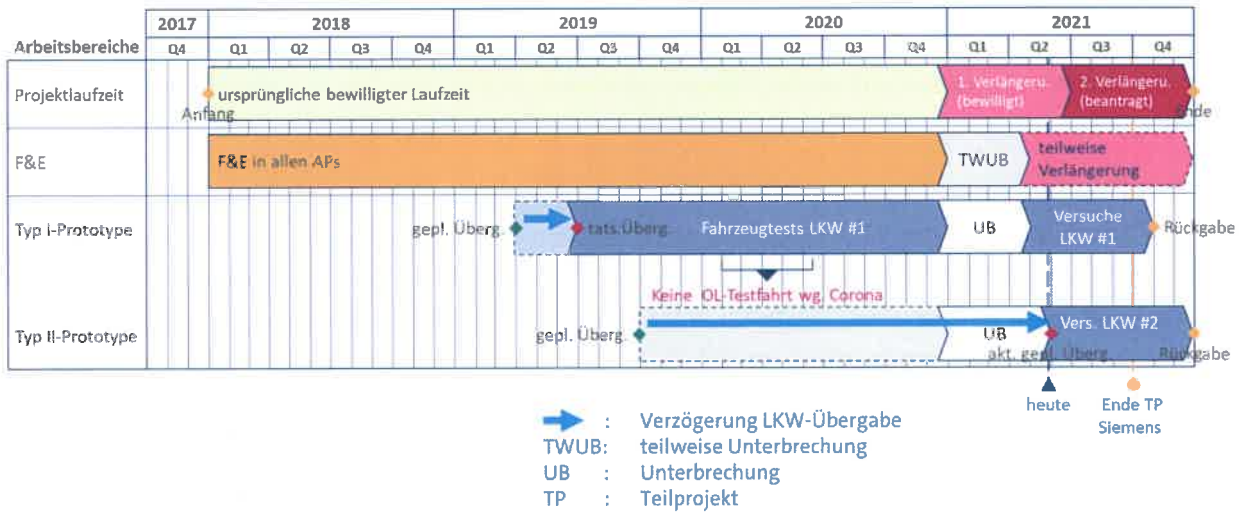


Abbildung 2: Terminplan zum Zeitpunkt der 2. Verlängerung

2.2 AP 1a: Auslegung des Basisantriebskonzepts inkl. erste Betriebsstrategie und Antriebskonzept Next Gen

2.2.1 Erweiterung einer vorhandenen Längsdynamiksimulationsumgebung für schwere Nutzfahrzeuge mit einer Anbindung an Oberleitungssysteme

Ein wesentlicher Punkt des AP1a ist die Erweiterung einer vorhandenen Längsdynamiksimulationsumgebung um spezifische Umfänge von schweren Nutzfahrzeugen mit einer Anbindung an Oberleitungssysteme. Dies bildet die Grundlage der weiteren Arbeiten im AP1a, von der Auslegung und Bewertung unterschiedlicher Antriebsstränge über die Prognosen von Lastkollektiven zu der Berechnung von Fahrzeugeigenschaften und Verbräuchen.

Als Basis dient eine in der Software Matlab® programmierte Simulationsumgebung für die Konzeptbewertung von PKW- und Nutzfahrzeugantrieben. Genutzt wird dabei ein sogenannter vorwärtsbasierter Ansatz (siehe Abbildung 3). Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass – analog zum realen Fahrzeug – ein Fahrer(modell) ein Brems- und Fahrpedal betätigt. Diese werden in einem Steuergerät in

einen Drehmomentenwunsch umgerechnet und dieses wiederum in Abhängigkeit diverser Parameter als Sollvorgabe an die E-Maschine und/oder den Verbrennungsmotor weitergeleitet. Die gestellten Drehmomente werden über das Getriebe an das Rad übertragen und in Abhängigkeit der Fahrwiderstände in eine Fahrzeuggeschwindigkeit umgerechnet. Je nach Abweichung der tatsächlichen Geschwindigkeit von der gewünschten Sollgeschwindigkeit werden in einer Schleife die Fahrpedalwerte durch den Fahrer im nächsten Zeitschritt angepasst. Das Hauptanwendungsgebiet ist die Ermittlung von Energieverbrauch und CO_2-Ausstoß über längere und ggf. eine hohe Anzahl von Fahrzyklen. Es ist weiterhin möglich, Fahrzeuge mit einem reinen elektro- oder verbrennungsmotorischen Antrieb als auch Hybridfahrzeuge, bei denen beide in einem Antriebs kombiniert werden, zu simulieren.

Die Simulationsumgebung ist so aufgebaut, dass sowohl die Antriebsarchitektur als auch die Komponentenbedatung variiert werden können. Ersteres bietet die Möglichkeit, die Anzahl und Anordnung der Komponenten zu verändern. Die Komponentenbedatung definiert dagegen die genaue Ausgestaltung der Antriebskomponenten, wie z.B. die Leistung der E-Maschine(n) oder den Energieinhalt der Batterie. In Summe können also unterschiedlichste Antriebsstrangkonfigurationen simuliert und bewertet werden – vorausgesetzt geeignete Basisdaten stehen zur Verfügung.

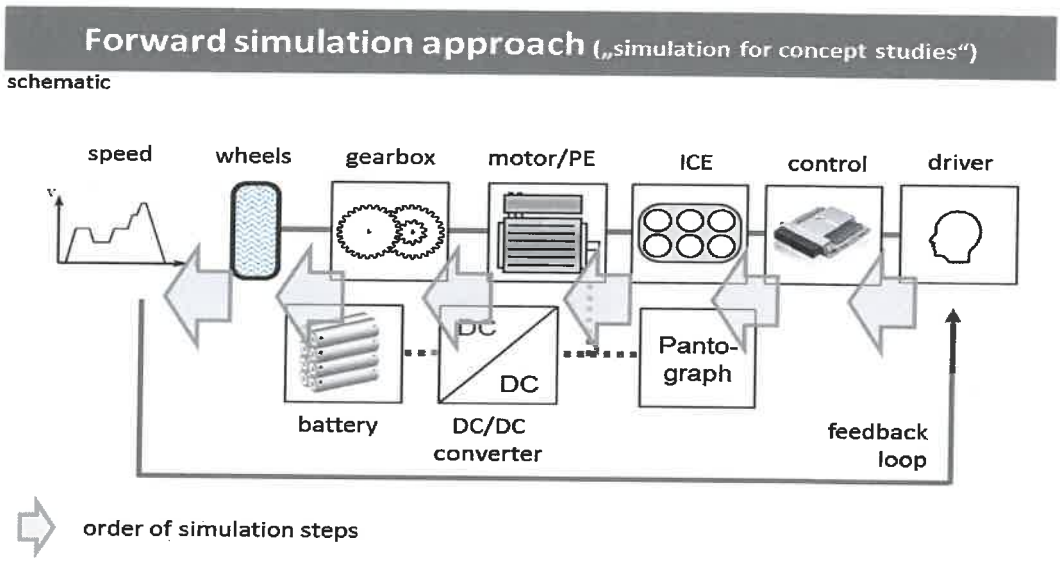


Abbildung 3: Vorwärtsbasierter Simulationsansatz

Für den hier behandelten Anwendungsfall wurde der Antriebsstrang um ein Pantographmodell erweitert. Der Pantograph ermöglicht die externe Einspeisung von elektrischer Leistung während der Fahrt unter einer Oberleitung. Diese Leistung kann entweder direkt über einen Bypass für den Antrieb (E-Maschine) oder über einen DC/DC bzw. Gleichspannungswandler zum Laden der Batterie genutzt werden. Die Information, wann an die Oberleitung angekoppelt werden kann und wie groß die maximal nutzbare Leistung aus dieser ist, wird über die zu fahrende Strecke zur Verfügung gestellt. So können real existierende Strecken mit einer beliebigen „virtuellen" Oberleitungsabdeckung simuliert werden. Eine weitere Ergänzung sind sogenannte „Deratingmodelle" für die Batterie und die E-Maschine. Mit diesen Modellerweiterungen kann das Zeitverhalten dieser Komponenten abgeschätzt werden. So nimmt beispielsweise die maximale Ladeleistung von Lithium-Ionen-Zellen, wie sie in aktuellen Traktionsbatterien verwendet werden, über der Zeit signifikant ab. Dies ist für das Laden unter der Oberleitung relevant und kann die Bewertung der Technologie maßgeblich beeinflussen.

26. JULI 2022

Ein weiterer Vorteil der verwenden Simulationsumgebung ist die Möglichkeit, beliebige Änderungen und Anpassungen der Antriebssteuerung / Betriebsstrategie vorzunehmen. Diese definiert u.a. in Abhängigkeit des Ladezustands der Traktionsbatterie ob rein elektrisch, verbrennungsmotorisch oder kombiniert gefahren werden soll. Bei der Programmierung der Betriebsstrategie für Oberleitungs-LKWs war es das Ziel, den elektrischen Energieumsatz während der Fahrt zu maximieren und dadurch den Kraftstoffverbrauch und die CO_2-Emissionen zu minimieren. Wie Abbildung 4 zeigt, wird dies durch einige übergeordnete Regeln erreicht. Ist der Pantograph nicht an die Oberleitung gekoppelt, wird bei sehr hohem Ladezustand (SOC, engl. für State of Charge) angestrebt, die Antriebsleistung hauptsächlich aus elektrischer Energie zu bedienen. Dies führt zu einer hohen E-Maschinenleistung und starken Entladung der Batterie. Dadurch wird gewährleistet, dass beim nächsten Gefälle (Rekuperation) oder Oberleitungskontakt, die Batterie wieder geladen werden kann. Im mittleren SOC-Bereich wird die Batterie moderat entladen. Dies erfolgt durch den wirkungsgradoptimalen Einsatz der E-Maschine(n), z.B. durch elektrisches Fahren bei geringen Lastanforderungen. Die Einhaltung eines Mindestladezustands kann schließlich das Nachladen der Batterie über den Verbrennungsmotor erfordern. Sobald der Pantograph an die Oberleitung gekoppelt ist, wird angestrebt, die dadurch zur Verfügung stehende elektrische Leistung optimal auszunutzen. So wird möglichst rein elektrisch gefahren und die Batterie mit ihrer maximalen Ladeleistung geladen.

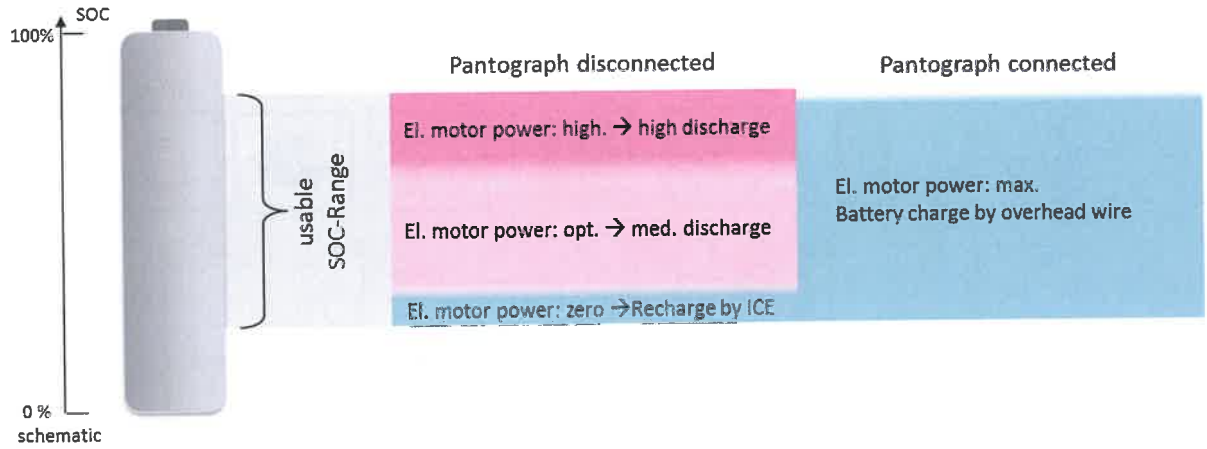


Abbildung 4: Ladezustandsbasierte Betriebsstrategie

Selbst in dem Fall des hohen SOC und maximaler E-Maschinenleistung kann es dazu kommen, dass der Verbrennungsmotor angeschaltet bleiben bzw. gestartet werden muss. Dies ist notwendig, wenn die E-Maschine(n) die erforderliche Antriebsleistung nicht alleine aufbringen können (z.B. an Steigungen oder bei Beschleunigungen). So wird sichergestellt, dass der Hybrid-LKW mit Oberleitungsanbindung ein LKW-typisches Beschleunigungsverhalten aufweist und nicht als Verkehrshindernis wahrgenommen wird. Wie Abbildung 5 zeigt, werden dabei zwei Bedingungen für einen Verbrennungsmotorstart appliziert. Zum einen wird ein Beschleunigungskriterium definiert: Wenn im rein elektrischen Fahren das aufgebrachte Drehmoment über eine gewisse Zeit unter dem Soll-Drehmoment liegt, wird ein Start angefordert. Während der Kopplung an die Oberleitung ist dieses Kriterium außer Kraft gesetzt, solange eine Mindestgeschwindigkeit (hier 75 km/h) gehalten werden kann. Erst wenn diese Grenze unterschritten wird, kommt es zum Verbrennungsmotorstart. So wird die optimale Ausnutzung der Oberleitung unter Einhaltung einer Mindestfahrleistung (vergleichbar mit einem konventionellen Antrieb mit 330 kW Verbrennungsmotor bei 40 t zGG) gewährleistet.

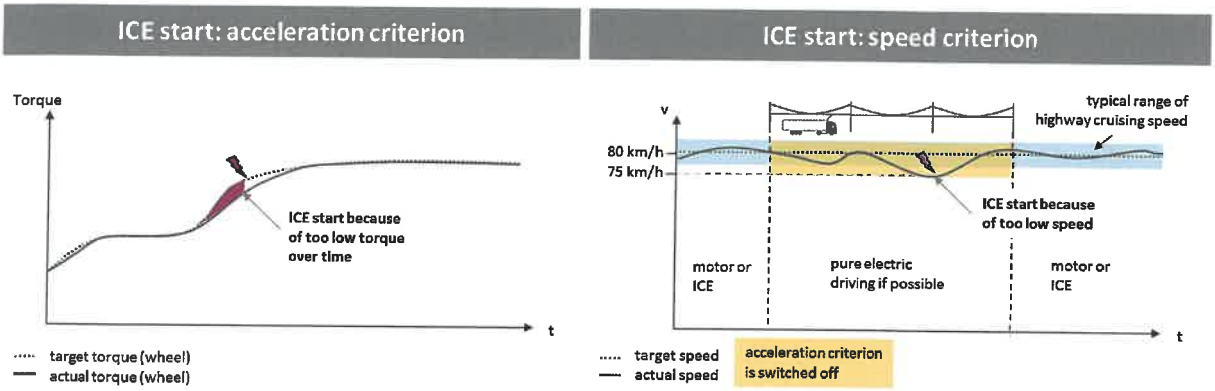


Abbildung 5: Bedingungen für einen Verbrennungsmotorstart

Abbildung 6 zeigt zur Demonstration der Funktionalität der Simulationsumgebung beispielhaft das Simulationsergebnis eines Trucks mit 35 t Gesamtgewicht und einem Hybridantriebsstrang bestehend aus einem 330 kW Verbrennungsmotor und 2x 130 kW E-Maschinen. Der Energieinhalt der Batterie beträgt hier 60 kWh, die maximale Leistung des DC/DC-Wandlers 180 kW. Das Getriebe verfügt über 6 feste und weitere variable Gänge. Die zu fahrende Strecke entspricht einem 30 km langen Abschnitt der A48 von Koblenz nach Trier, wobei hier die mittleren 10 km „virtuell" mit einer Oberleitung versehen sind. Die maximal entnehmbare Leistung aus der Oberleitung wird dabei nicht begrenzt.

Das aus der Betriebsstrategie resultierende Betriebsverhalten wird anhand markanter Punkte im Folgenden kurz beschrieben: Direkt zu Beginn der Fahrt (Punkt 1) findet aufgrund der hohen Steigung ein Verbrennungsmotorstart statt (Beschleunigungskriterium); die E-Maschinen könnten alleine die Leistungsanforderungen nicht erfüllen. Die Betriebsstrategie ist im Folgenden aufgrund des hohen SOCs bestrebt, die Traktionsbatterie zu entladen (Punkt 2). Dies erfolgt über das „Boosten" mit den E-Maschinen. Ab Kilometer 5 wird bergab gefahren und der Leistungsbedarf sinkt. Dies führt dazu, dass der Verbrennungsmotor ausgeschaltet und anschließend rein elektrisch gefahren werden kann (Punkt 3). Bei Kilometer 10 wird an die Oberleitung angekoppelt und über diese die Batterie geladen und der elektrische Antrieb gespeist. Die Ladeleistung ist anfangs durch den DC/DC-Wandler auf 180 kW begrenzt (positive Leistungswerte entsprechen dem Laden, negative dem Entladen), anschließend sinkt die maximale Ladeleistung aufgrund des Deratingverhaltens und des hohen SOCs (bei hohem SOC wird die Ladeleistung entsprechend der Spezifikation begrenzt). An der Steigung im Punkt 5 kann die Geschwindigkeit alleine über die E-Maschinen nicht mehr gehalten werden und der Verbrennungsmotor wird bei Unterschreiten der 75 km/h Grenze gestartet. Insgesamt ist der Verbrennungsmotor über ca. 50% der Strecke ausgeschaltet.

26. JULI 2022

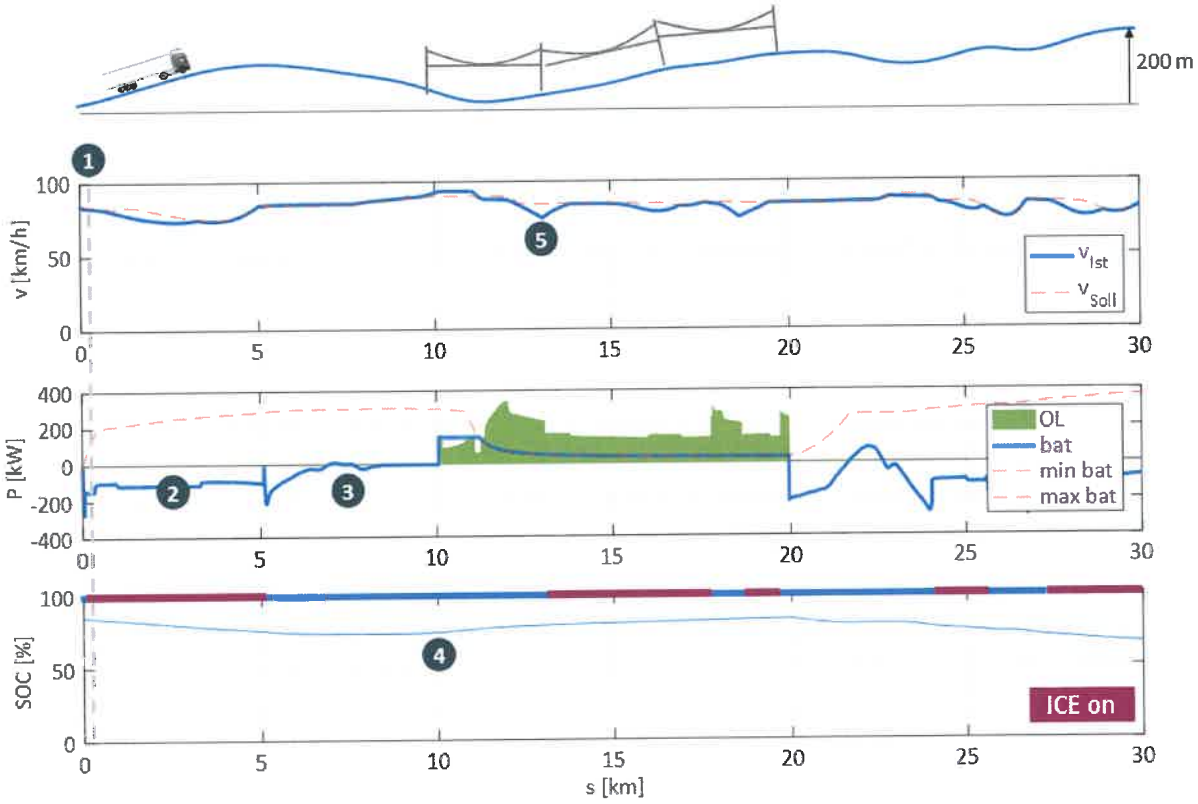


Abbildung 6: Beispielhafte Simulation eines Trucks mit Oberleitungsanbindung

In diesem Unterkapitel wurde die Erweiterung einer eigenentwickelten Simulationsumgebung für spezifische Umfänge von Oberleitungs-LKWs beschrieben. Anhand eines Beispiels wurde außerdem das aus der Modellierung des Antriebs und der Betriebsstrategie resultierende Betriebsverhalten aufgezeigt. Mit dieser Basis lassen sich im nächsten Schritt diverse Antriebs- und Oberleitungsvarianten auf das Potenzial hin, den lokalen CO_2-Ausstoß zu senken, bewerten.

2.2.2 Generierung virtueller OL-Szenarien basierend auf realen Autobahnabschnitten

Mit Hilfe der entwickelten Simulationswerkzeuge wurden sowohl die Teststrecken (Hessen, Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg) als auch ein großflächiger Einsatz der Oberleitungstechnologie untersucht und bewertet. Dafür wurden einerseits reale Streckenverläufe modelliert als auch eine beliebige Platzierung von Oberleitungen auf diesen virtuell abgebildet. Zur Modellierung der Strecken wurden aus öffentlich verfügbaren Quellen die Höchstgeschwindigkeit, Haltepunkte sowie das Höhenprofil gesammelt. Mit diesen Informationen konnte bereits der Betrieb eines LKWs auf dieser Strecke simuliert und beispielsweise der Energieverbrauch ermittelt werden. Im nächsten Schritt konnte virtuell eine Oberleitung auf dieser Strecke platziert werden. Im Falle der Teststrecken erfolgte dies händisch an den tatsächlichen Streckenabschnitten. Für Sensitivitätsanalysen wurde dagegen ein Algorithmus entwickelt, der in Abhängigkeit diverser Parameter (gewünschte Abdeckung in %, minimale Länge eines OL-Abschnitts, maximaler Abstand zwischen zwei OL-Abschnitten, Fahrtrichtung, etc.) automatisch die Oberleitungsabschnitte auf der ausgewählten Strecke positioniert. Das Ziel der Optimierung ist dabei, den Energieumsatz unter der Oberleitung zu maximieren. Dies führt z.B. dazu, dass die Oberleitungen bevorzugt an Steigungen und in der Ebene platziert werden. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis des Positionierungsalgorithmus für eine 40% Abdeckung auf der Strecke von Hannover nach Magdeburg auf der A2, die blauen Streifen markieren dabei die Oberleitungsabschnitte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das dargestellte Optimum für eine Fahrtrichtung gilt. Für die entgegengesetzte Fahrt-

26. JULI 2022

richtung würde sich eine abweichende Verteilung ergeben. Es ist noch zu untersuchen, ob es aus globaler Sicht sinnvoller ist immer beide Fahrtrichtungen gleichzeitig (nachteilig aus Fahrzeugsicht) oder getrennt (nachteilig aus Infrastruktursicht) zu elektrifizieren.

Abbildung 7: Virtuelle Positionierung der Oberleitung auf einer exemplarischen Strecke von Hannover nach Magdeburg (Kartendarstellung basierend auf © OpenStreetMap)

Mit den erarbeiteten Werkzeugen können Fahrten von konventionellen und OL-LKWs auf beliebigen Strecken modelliert und simuliert werden. Der automatische Positionierungsalgorithmus ermöglicht dabei die Variation der Oberleitungsabdeckung, wodurch im nächsten Schritt der Einfluss der Oberleitungsabdeckung auf die CO_2-Einsparungen bestimmt werden kann.

2.2.3 Bewertung potenzieller CO_2-Einsparungen anhand von Sensitivitätsanalysen

Bei der Untersuchung von OL-LKWs wird entsprechend Abbildung 8 zwischen zwei Einsatzszenarien unterschieden: Dem Einsatz des OL-LKWs für Auslieferungszwecke sowie für den Langstreckentransport. Im ersten Fall pendelt das Fahrzeug zwischen zwei Standorten (z.B. Be- und Entladung). Es fährt somit immer wieder dieselbe, eher kurze, Strecke in beiden Richtungen. In diesem Szenario kann die Batterie ggf. an einem Standort geladen werden. Weil die Strecke relativ kurz ist, hat der Batterieladezustand zu Beginn der Fahrt einen großen Einfluss auf den elektrischen Fahranteil und damit auf die CO_2-Einsparungen. Das Auslieferungsszenario entspricht am ehesten den drei realisierten Teststrecken. Es bietet sich vor allem bei noch geringer Durchdringung der Oberleitungstechnologie an, weil hier die intensive Nutzung durch OL-LKWs garantiert werden kann. Andererseits stellen aufgrund der relativ kurzen Strecken hier rein batterieelektrische LKWs eine Alternative dar.

Beim Langstreckentransport werden dagegen (sehr) lange Strecken – häufig über Ländergrenzen hinweg – zurückgelegt. Am Tag werden dabei in der Regel Strecken von bis zu 800 km zurückgelegt. Dies ist im Wesentlichen begrenzt durch die erlaubte Einsatzdauer der Fahrer. Dieses Einsatzszenario erfordert eine höhere Durchdringung der Oberleitungstechnologie (z.B. länderübergreifend auf den Hauptverkehrsrouten), hat jedoch den größten Hebel auf die CO_2-Emissionen des Schwerlastverkehrs. Der Batterieenergieinhalt ist in diesem Fall bezogen auf den Energiebedarf für die gesamte Strecke sehr klein. Aus diesem Grund hat der Batterieladezustand zu Beginn der Fahrt nahezu keinen Einfluss auf den elektrischen Fahranteil und damit auf die CO_2-Einsparungen. Häufig reicht es aus, nur einen Teilabschnitt der gesamten Strecke zu simulieren und dabei von einem ausgeglichenen Batterieladezustand auszugehen (d.h. der Ladezustand ist bei Start und Ende identisch).

26. JULI 2022

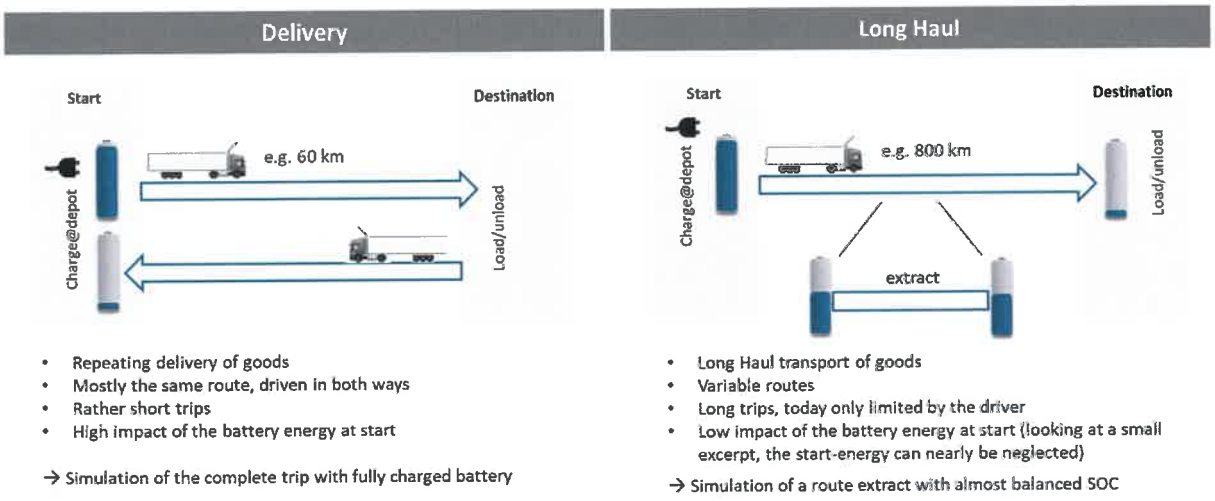


Abbildung 8: Unterscheidung von Auslieferungs- („Delivery") und Langstreckenszenarien („Long Haul")

Eine grundsätzliche Frage, die Rahmen des AP1a bearbeitet wurde, ist die nach der sinnvollen Abdeckung mit Oberleitungsabschnitten: „Wieviel Prozent der Strecke sollten mit Oberleitungen versehen werden?". Diese Frage hat eine Vielzahl von Aspekten, die berücksichtigt werden können - z.B. in Bezug auf den Blickwinkel Fahrzeug, Fahrer und Infrastruktur oder in Bezug auf die Zielgrößen wie minimale Kosten pro CO_2-Einsparung oder maximale absolute CO_2-Einsparung. Sie lässt sich daher nicht pauschal beantworten. Weil der wichtigste Treiber die Reduktion der CO_2-Emissionen ist, wurde der Einfluss des Oberleitungsanteils auf diese untersucht. Aufgrund der größeren Relevanz (siehe oben) wurde dafür das Langstreckenszenario betrachtet.

Abbildung 9 zeigt die potenzielle CO_2-Einsparung eines Typ 2 OL-LKWs (2x 130 kW E-Maschinen, 74 kWh Batterieenergieinhalt, 180 kW DC/DC-Wandler) im Langstreckenbetrieb gegenüber konventionellen LKWs in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils. Dafür wurde eine repräsentative 500 km lange Autobahnstrecke (A10-A2-A30) mit OL-Abschnitten versehen und simuliert. Es zeigt sich, dass mit steigendem Oberleitungsanteil mehr CO_2 eingespart werden kann. Bei ca. 45% Anteil kommt es zu einer Sättigung. 100% Einsparung wird mit dem Typ 2 nie erreicht, weil für einige Beschleunigungsvorgänge die zusätzliche Leistung des Verbrennungsmotors benötigt wird. Mit einer größeren E-Maschinenleistung entfällt dies jedoch („Type II+ increased EM-power"), sodass ab 45% Abdeckung dauerhaft rein elektrisch gefahren werden kann. Die optionale Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit auf 80 km/h unter der Oberleitung führt dazu, dass eine größere Energiemenge nachgeladen werden kann, und erhöht zusätzlich die CO_2-Einsparungen bei gleichem Oberleitungsanteil.

Bei diesen Simulationen ist zu berücksichtigen, dass zum Abgleich des Simulationsmodells im Rahmen der Projektlaufzeit vom Typ 2-LKW keine ausreichenden Messdaten zur Verfügung gestanden haben. Trotzdem können diese Ergebnisse aber als ein guter Indikator angesehen werden.

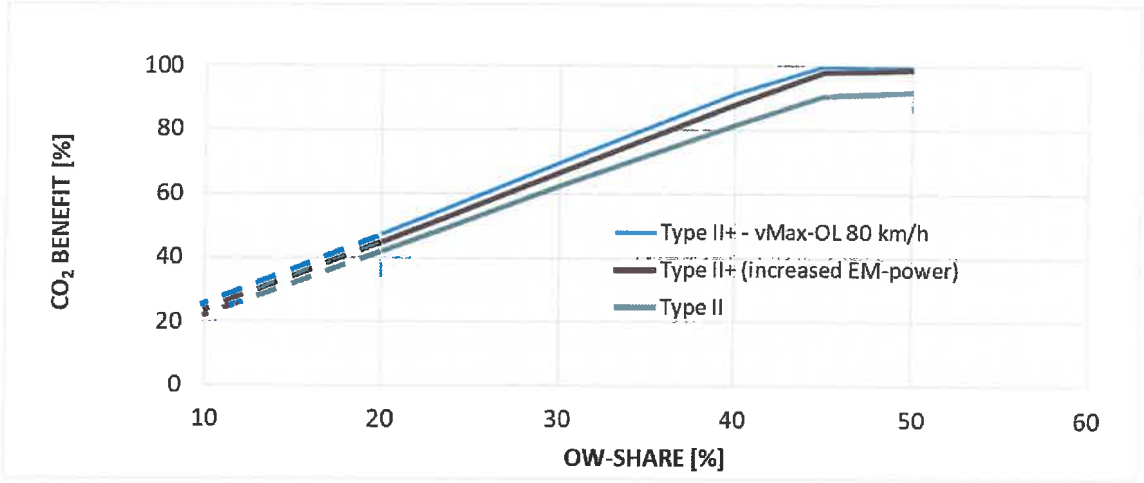


Abbildung 9: Potenzielle CO_2-Einsparung exemplarischer OL-LKWs im Langstreckenbetrieb gegenüber konventionellen LKWs in Abhängigkeit des Oberleitungsanteils

Die im AP1a erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass bereits mit relativ geringem Oberteilungsanteil signifikante CO_2-Einsparungen erreicht werden können. Einfache Maßnahmen, wie die Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit unter der Oberleitung sowie Steigerung der E-Maschinenleistung, können diese Einsparung nochmals erhöhen. Möglich ist dies jedoch nur mit einer relativ großen Traktionsbatterie (bzgl. Leistung und Energie) im OL-LKW. Der Vorteil einer größeren OL-Abdeckung wäre, dass die OL-LKWs mit kleineren und damit günstigeren Traktionsbatterien auskommen würden.

2.2.4 Rekuperationsenergie bei Bergabfahrten im Oberleitungs-LKW

Der Oberleitungsbetrieb, bei dem der E-Motor seinen Strom direkt aus dem Fahrdraht bezieht, ist im Vergleich zu anderen Konzepten besonders effizient (77% well-to-wheel Wirkungsgrad, vgl. **Abbildung 10**). In diesem Unterkapitel soll detailliert untersucht werden, ob auch eine Rückspeisung in das Oberleitungs-Netz oder sogar in das Mittelspannungs-Netz sinnvoll ist.

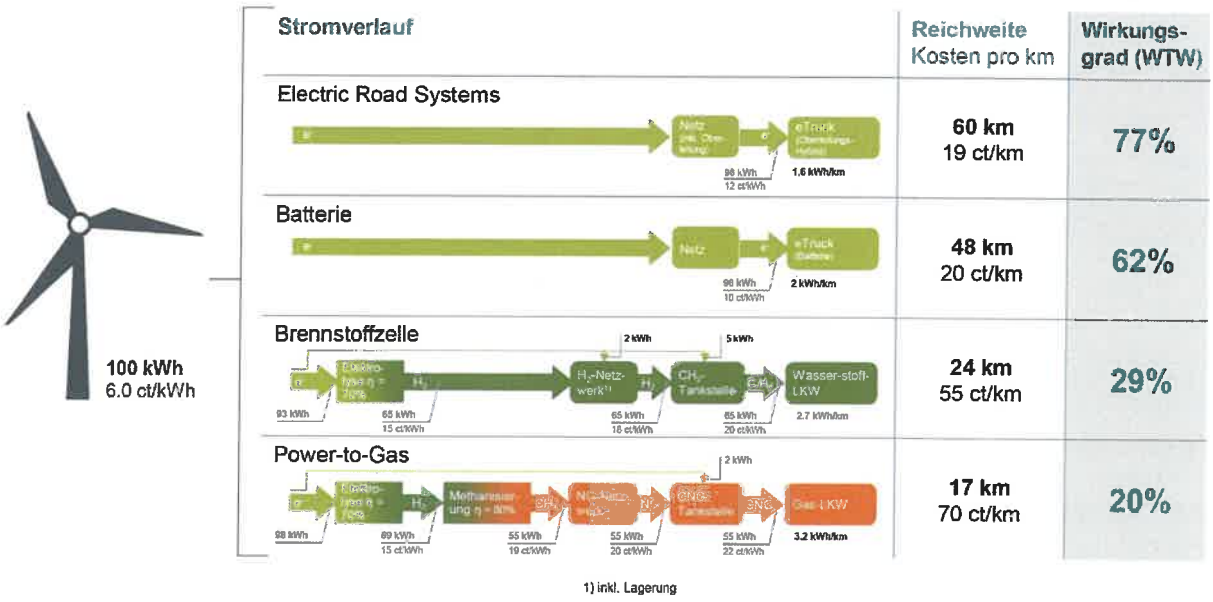


Abbildung 10: Technologie-Vergleich für LKW-Elektrifizierung (Quelle: Siemens2017, BMU2013)

Auch schon beim Fahren in der Ebene ist Antriebsleistung notwendig, um Roll- und Luftwiderstände zu überwinden. Fährt ein Fahrzeug zusätzlich bergauf, ist zusätzliche Antriebsleistung notwendig, um

die Fahrgeschwindigkeit konstant zu halten. Die benötigte Leistung steigt mit zunehmender Steigung. Ist die Strecke abschüssig, nimmt die benötigte Leistung mit stärkerem Gefälle ab. Bei einem bestimmten Gefälle wird keine Antriebsleistung mehr benötigt. Hier sind Hangabtriebskraft und Fahrwiderstände identisch. Steigt das Gefälle weiter an, nimmt die Fahrgeschwindigkeit zu. Um diese konstant zu halten und die maximal zulässige Geschwindigkeit nicht zu überschreiten, muss das Fahrzeug abgebremst werden. Bei konventionellen LKWs erfolgt das zunächst über verschleißfreie Zusatzbremsen, wie die Abgasbremse oder einen Retarder. Erst wenn deren Bremsleistungen nicht ausreichen, werden die mechanischen Bremsen an den Rädern verwendet. In jedem Fall wird die Energie dabei in Wärme gewandelt und kann somit nicht genutzt werden.

Bei hybridischen oder rein elektrischen Fahrzeugen besteht die Möglichkeit das Fahrzeug mit der vorhandenen E-Maschine abzubremsen. Diese wird dann generatorisch betrieben. Es stellt sich nun aber die Frage, wo die vom Generator abgegebene Leistung bleibt. Natürlich könnte man auch diese z.B. über einen Bremswiderstand wieder in Wärme wandeln. Das wäre aber genauso wenig effizient wie bei den mechanischen Systemen oben.

In batteriebetriebenen Fahrzeugen besteht die Möglichkeit, diese Bremsenergie aus der E-Maschine in der vorhandenen Batterie zu speichern. Diesen Vorgang bezeichnet man als Rekuperation (Bremsenergie-Rückgewinnung).

In Abbildung 11 ist die Struktur des Antriebs dargestellt. Unter der OL muss der „Switch" geöffnet und der „Bypass" geschlossen sein. Das Laden und Entladen der Batterie erfolgt in diesem Fall über den DC/DC-Wandler. Ohne OL ist bei geschlossenem „Switch" ein direktes Laden der Batterie aus der E-Maschine möglich.

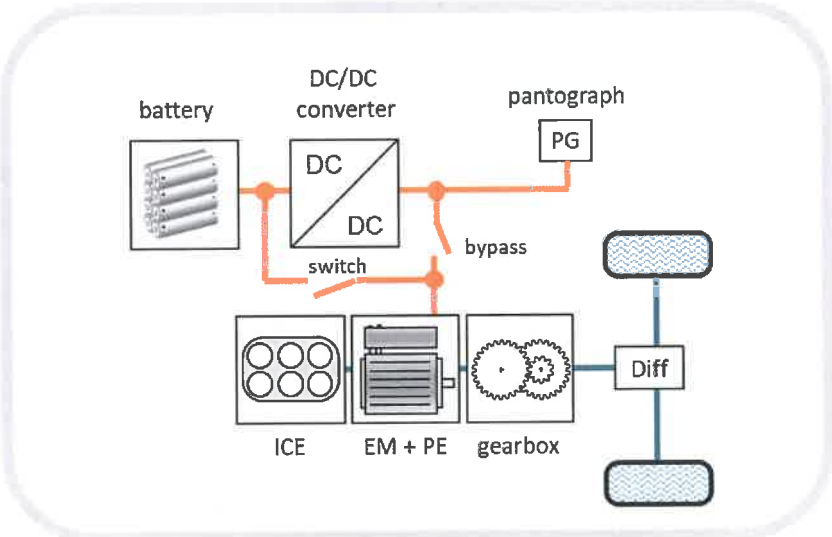


Abbildung 11: Antriebsstruktur eines Oberleitungs-LKWs

Bei Oberleitungs-LKWs gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten für eine Nutzung dieser Energie (Abbildung 12). Zum einen könnte die Leistung von einem anderen LKW aufgenommen werden, der in der anderen Fahrtrichtung im selben Unterwerkabschnitt gerade den Berg hinauffährt (Power-to-Truck, PtT). Oder die Leistung könnte über das Unterwerk wieder in das Mittelspannungsnetz (Power-to-Grid, PtG) eingespeist werden.

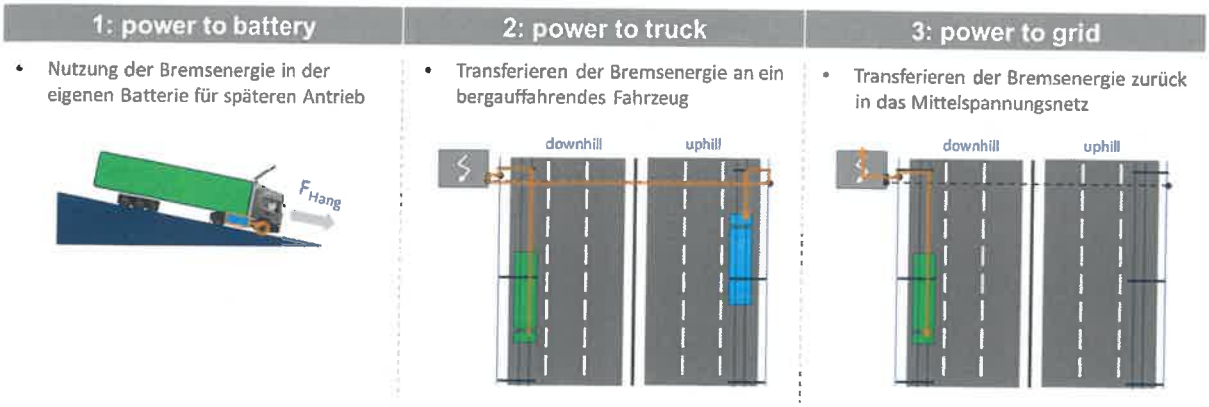


Abbildung 12: Nutzungsmöglichkeit der Bremsenergie bei Bergabfahrt

Die Fragestellung ist nun, welche dieser drei theoretischen Möglichkeiten genutzt werden sollten. Dazu wurden zunächst die Potentiale, Wirkungsgrade und Kosten betrachtet.

Betrachtet man zunächst die Potentiale, dann kann man zeigen, dass für den Typ II-LKW aus dem Projekt mit einem Gesamtgewicht von 35t und bei 80km/h bis ca. 1,3% Gefälle noch Antriebsleistung aufgebracht werden muss (siehe Abbildung 13). Bis zu einem Gefälle von 4,3% kann die Leistung in die Batterie rekuperiert werden. Hier wird die Leistungsgrenze der beiden DC/DC-Wandler von zusammen 180kW erreicht. (Dieses gilt für den Fall, dass der Pantograph an die OL gekoppelt ist. Ohne OL wäre ein ggf. stärkeres Laden möglich). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit bis etwa 5,5% Gefälle und 260kW Leistung noch Energie in die Oberleitung zurückzuspeisen, solange sich die E-Maschine nicht im Derating befindet (d.h. Leistungsreduktion aufgrund von Erreichen der Maximaltemperatur). Erst darüber hinaus kann die notwendige Bremsleistung nicht rekuperiert werden und es muss zusätzlich mechanisch gebremst werden.

Der Anteil der Autobahnen mit Steigung über 4,3 Prozent ist allerdings in Deutschland relativ gering, so dass schon aus diesem Grund eine Rückspeisung über die Oberleitung als PtT oder PtG nur selten notwendig sein wird, wenn noch freie Ladekapazität in der Batterie vorhanden ist.

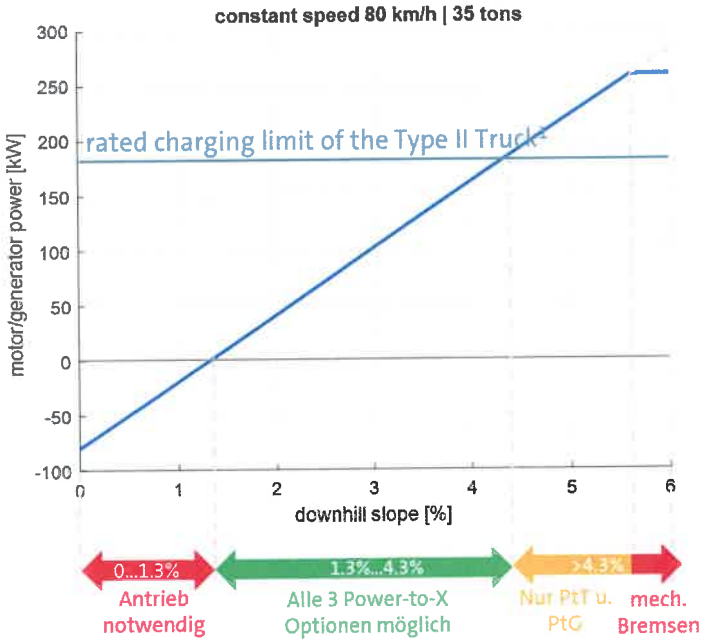


Abbildung 13: Rekuperationsmöglichkeiten

Für eine tiefergehende Bewertung sollen die Wirkungsgrade der drei Möglichkeiten in der Weise verglichen werden, dass die Verluste von der Erzeugung im bergabfahrenden LKW bis zur Weiterverwendung betrachtet werden.

Für die Nutzung im eigenen OL-LKW ergeben sich also die Verluste im DC/DC-Wandler, Laden in der Batterie und Entladen der Batterie als Verlustquellen. Hierbei wurde zu Vergleichszwecken ein Gesamtwirkungsgrad von 93% angesetzt.

Bei der direkten Nutzung durch einen anderen bergauffahrenden LKW im selben Netzabschnitt entstehen zwar keine Wandlungsverluste, durch die relativ lange Distanz zum anderen Fahrzeug wurde im Mittel ein Wirkungsgrad von 95% angesetzt.

Bei der Rückspeisung zurück ins Mittelspannungsnetz muss eine DC/AC Wandlung stattfinden. Daher wurde der Wirkungsgrad mit 90% angesetzt.

Betrachtet man die zusätzlichen Kosten in der Infrastruktur, dann ist für die Power-to-Grid-Variante ein bidirektionaler Transformator notwendig, der die Kosten erhöht.

Ein weiterer Punkt, der bei der Bewertung berücksichtigt werden muss, ist die Frage nach einer finanziellen Abgeltung der rückgespeisten Energie. Ein entsprechendes Bezahlmodell müsste entwickelt werden. Es ist davon auszugehen, dass das Entgelt pro kWh für eine Rückspeisung geringer als für den Bezug ausfällt. Trotz des minimal geringeren Wirkungsgrades bei der Eigennutzung, würde sich eine Einspeisung für das bergabfahrende Fahrzeug also kaum lohnen und wäre auch schon aus diesem Grund unattraktiv und die Speicherung in der eigenen Batterie für eine spätere Nutzung zu bevorzugen.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass eine Rückspeisung, egal ob PtT oder PtG, insgesamt wenig sinnvoll ist. Es wird deshalb eine direkte Nutzung und Speicherung in der eigenen Batterie empfohlen.

Zusätzlich kann man zeigen, dass die Ausstattung von Bergabstrecken mit Oberleitungen aus Kostengründen ineffektiv ist. Um mit möglich geringer Oberleitungslänge möglich viel rein elektrische Reichweite zu erzielen, sollten zunächst die Strecken ausgebaut werden, bei denen eine möglichst hohe Leistung von der OL in das Fahrzeug fließt. Diese maximale Leistung setzt sich aus Fahr- und Batterieladeleistung zusammen. D.h. aus dieser Perspektive sind Bergaufstrecken primär zu bauen. Dann kommen Strecken in der Ebene. Bei Bergabstrecken würde, wenn überhaupt, nur ein Teil der Ladeleistung über die Oberleitung abgenommen werden. Auf einen Bau von Oberleitungsstrecken auf Bergabstrecken sollte also zunächst verzichtet werden.

2.3 AP1b Auslegung und Optimierung des Antriebskonzepts mit Ausrichtung auf die hardwarenahe Umsetzung

2.3.1 Einleitung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die verfügbaren O-LKW (Type 1 und Type 2) betrachtet und im Hinblick auf den realen Einsatz und den vorhandenen Versuchsstrecken

- „FESH – Feldversuch eHighway an der BAB A1 in Schleswig-Holstein“,
- „ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen“ auf der BAB 5 in Hessen
- eWayBW „Pilotprojekt zu Hybrid-Oberleitungs-LKW auf der B462“ in Baden-Württemberg

bewertet. Hierzu wurden zu Beginn (in der Planungsphase der Versuchsstrecken) typische Fahrprofile in Abstimmung mit den beteiligten Akteuren generiert und simulativ die Nutzungsszenarien analysiert.

Im weiteren Verlauf wurden die Simulationswerkzeuge mit den realen Fahrzeugen abgeglichen, sofern dies bei Verfügbarkeit der Fahrzeuge möglich war. Insbesondere bedingt durch die Corona-Pandemie war die Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeiten des Type 2 LKW nicht ausreichend gegeben, wodurch hier ein Abgleich nicht möglich war.

Zum Abschluss wurden Analysen zu Nutzungsszenarien, welche über die Feldversuche hinaus gehen, durchgeführt. Hier wurde u.a. eine Bewertung möglicher Rekuperationspotentiale in Deutschland und dem europäischen Ausland durchgeführt.

Im Nachgang sind die Tätigkeiten der jeweiligen Unter-Arbeitspaketen ausgeführt.

2.3.2 Analyse, Auswahl und Bewertung von synthetischen und realen, kundennahen Fahrprofilen

Ein relevanter Anteil des Arbeitspaket bestand in der Erstellung von kundennahen Fahrzyklen. Die Generierung dieser bestand aus drei Kernbestandteilen. Zunächst sind die bekannten Teststrecken in Deutschland (welche zum Bearbeitungszeitraum teilweise noch in der Planung waren) in relevante Kundennutzungsszenarien eingebunden worden. Zu diesem Zweck stand die Volkswagen AG mit mehreren Speditionen in der Nähe der Teststrecken in Kontakt. Auf Basis erhobener Fahrdaten ließen sich im zweiten Schritt repräsentative Zyklen ableiten, die sich in einem Zeit- oder Streckenprofil beschreiben lassen. Im dritten Schritt war es nötig, das Höhenprofil mit einzubeziehen. Auf Basis dieser Eingangsdaten ist es möglich mittels eines Simulationsmodells des OL-LKW Aussagen über den Verbrauch und die Belastungen im Antriebsstrang zu ermitteln.

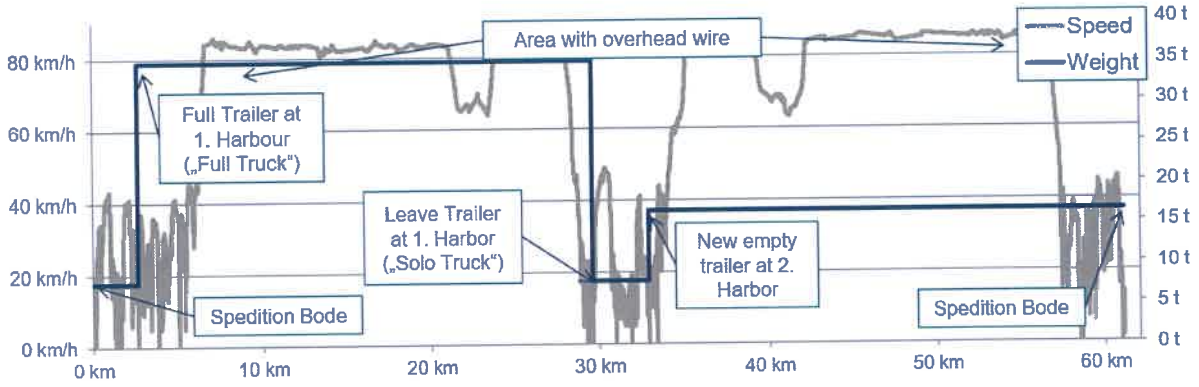


Abbildung 14: Exemplarischer Fahrzyklus und Nutzungsprofil Lübeck

In der zuvor dargestellten Abbildung 14 ist ein relevanter Kundenzyklus de Fa. Bode dargestellt. Hier ist neben einem Geschwindigkeitsverlauf auch ein typisches Beladungsprofil dargestellt. Neben kundennahen Zyklen spielen allerdings auch generische Zyklen eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang ist das Fahrzeugverhalten auch unter zukünftigen Aspekten zu bewerten, wenn sich die Oberleitungen perspektivisch weiter verbreiten.

Für die Erzeugung synthetischer Fahrprofile kam die bei Volkswagen entwickelte *Digital Reality Workbench* zum Einsatz. Mit Hilfe dieses Werkzeugs können nominelle Geschwindigkeits- und Höhenprofile hypothetischer Fahrten (ohne Einfluss von Wetter, Verkehrslage etc.) erzeugt werden und konnten somit für die Analysen in diesem Arbeitspaket verwendet werden.

Durch die Fusion der realen Fahrdaten inkl. typischen Beladungsprofilen und der synthetischen Fahrdaten wie beispielsweise das Höhenprofil konnten umfangreiche Bewertung verschiedener Auslegungsszenarien durchgeführt werden. Weiterhin konnten anhand dieser Daten auch spezifische Komponentenbewertungen durchgeführt werden, wie dies z.B. in Kapitel 2.9.4 für die Batterie vorgenommen wurde.

Anhand der Fahrprofile wurden daraufhin in diesem Arbeitspaket diverse Simulationen durchgeführt. Ziel der Bewertung war es beispielsweise, einen vollständig lokal emissionsfreien Betrieb der LKW in dem in Abbildung 14 dargestellten Szenario auf der Oberleitungs-Versuchstrecke FESH bei Lübeck zu erhalten, unter Berücksichtigung des damaligen Planungsstandes. Für einen lokal emissionsfreien Betrieb wären dazu beispielsweise folgende Szenarien denkbar:

i. Ausstattung des LKW mit sieben Batterie-Modulen: Ausschlaggebend für diese Auslegung ist dabei nicht die mitgeführte Energie in den Batteriemodulen, sondern stattdessen die verfügbare Ladeleistung durch die begrenzte Länge der Oberleitung. D.h. durch die ca. 6 km Oberleitung je Fahrtrichtung muss in diesem Fall für je ca. 4,5 Minuten (Σ 9 Min.) die Energie für die gesamte Fahrtstrecke „eingesammelt" werden. Dies war u.a. aus Packagegründen im LKW und der erforderlichen Ladeleistung unrealistisch. Durch das Package im geplanten LKW konnten zum Planungsstand max. 4 Batteriemodule verbaut werden.

ii. Alternativ ist es denkbar, die Fahrtgeschwindigkeit unter der Oberleitung zu reduzieren. Durch die Reduktion der Fahrtgeschwindigkeit werden direkt zwei Punkte adressiert. Zum einen wird durch die gesenkte Fahrgeschwindigkeit die benötigte Energie reduziert. Zum anderen wird

dadurch eine längere Ladedauer unter der Oberleitung erreicht. Hierdurch kann beispielsweise durch eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h auf 60 km/h eine Steigerung der Ladezeit von ~33 % erreicht werden, wodurch die Ladeleistung auch dementsprechend reduziert werden könnte. Weiterhin vorteilhaft wäre hierdurch auch eine mögliche Optimierung der Lebensdauer beispielsweise der Batterie. Nachteilig bei diesem Konzept wäre die Behinderung des Verkehrsflusses und eine Erhöhung der Fahrtzeit.

iii. Als weitere Maßnahme zur Erhöhung der Fahrtdauer unter der Oberleitung kann weiterhin logischerweise auch die Länge der Oberleitung vergrößert werden. Hierdurch kann insgesamt die Belastung aller Komponenten (im LKW und in der Infrastruktur) reduziert werden, da wiederrum mehr Zeit zur Verfügung steht, in dem die notwendige Fahrtenergie in eine Batterie geladen werden kann. Zusätzlich kann hier auch die Batteriegröße (bezogen auf den Energieinhalt) reduziert werden, da ein weiterer Teil der Fahrenergie direkt aus eine Oberleitung im Fahrmotor gewandelt werden kann und nicht zuvor erst in einer Batterie zwischengespeichert werden muss. Dies bedeutet allerdings auch einen höheren Planungs- und Investitionsbedarf auf Seiten der Infrastruktur und war zum Projektstand ebenfalls nicht angedacht.

iv. Als weitere Maßnahme konnte selbstverständlich auch ein zusätzliches stationäres Laden vorgesehen werden (hier: 30kWh pro Zyklus). Dies ist beispielsweise dann möglich bzw. sinnvoll, wenn die LKW wie am Beispiel der Spedition regelmäßig mit einer ohnehin geplanten Wartezeit z.B. ein Speditions- oder Hafengelände anfahren. Allerdings sind hierzu Infrastrukturmaßnahmen notwendig, da z.B. eine Ladestation vorgesehen oder ggf. ein „Oberleitungs-Teilstück" zum Laden über den Pantograf vorgesehen werden muss.

Zuletzt wurde in diesem Zusammenhang auch die Bewertung der unterschiedlichen LKW-Konfigurationen (Typ1 vs. Typ2) durchgeführt. Der Unterschied der Fahrzeuge besteht u.a. bei der Getriebekonfiguration, EM-Leistungen und Batteriegrößen. Hier zeigte sich u.a. dass der Typ1-LKW mit einer EM-Leistung von 130 kW den gegebenen Fahrzyklus ohne Verbrennungsmotor (rein elektrisch) nur eingeschränkt fahren kann. Beispielsweise kann der LKW mit 40 t auf der Autobahn die Geschwindigkeit von 80 km/h rein-elektrisch nicht halten, sondern wird auf 75 km/h reduziert – bedingt durch die unzureichende EM-Leistung bezogen auf das tatsächliche Fahrzeuggewicht („Leistungsgewicht" 3,25 kW/t). Dies wird in Deutschland durch § 35 StVZO untermauert, wo min. 5 kW/t gefordert werden – in dem Fall des Typ1-LKW muss also der Verbrennungsmotor einspringen, damit das erforderliche Leistungsgewicht erreicht werden kann. Der Typ2-LKW ist mit einer EM-Leistung von 260 kW ausgestattet. Dieser LKW kann dem Fahrzyklus ohne Abweichungen folgen.

Der Einsatz synthetischer Fahrprofile erfolgte insbesondere zur Untersuchung des Einflusses der Topographie (Höhenprofil). Hügeliges oder bergiges Gelände führt im Fahrbetrieb zu einem Rekuperations-Angebot (Hangabtriebskraft übersteigt Luft- und Roll-Widerstand, vgl. hierzu Abschnitt 2.2.4). Von Interesse ist hierbei zum einen die Frage, wie groß die Fahrzeug-Batterie dimensioniert werden muss, um kein Rekuperations-Potential zu vergeuden. Zweitens kann der Frage nachgegangen werden, ob darüber hinaus eine Rückspeisung von Energie in das Netz sinnvoll wäre. Als ausgewählte Beispiele wurden eine simulierte Autobahn-Fahrt von Flensburg nach Füssen sowie von Innsbruck nach Bozen näher analysiert. Diese Szenarien wurden stellvertretend aufgrund der „Kasseler Berge" und dem „Brenner-Pass" ausgewählt.

26. JULI 2022

Eine Mischung aus synthetischem und realem Fahrprofil erfolgte für die Analyse des eWayBW im Murgtal. Aufgezeichnete Fahrten, die durch das Fraunhofer ICT zur Verfügung gestellt worden sind, wurden hier durch weitere Streckenabschnitte und das Höhenprofil aus der Digital Reality Workbench ergänzt. Insbesondere erfolgte eine virtuelle Variation der elektrifizierten Streckenabschnitte. Hierdurch war es möglich, Empfehlungen für eine optimierte Elektrifizierung zu erarbeiten, die Beispielsweise elektrische Fahr-Anteile, CO2-Einsparung oder Anwohnerschutz maximiert. Die folgende Abbildung 15 zeigt in grün das als Median der Grundgesamtheit (27 Fahrten) bestimmte und um virtuelle (blau hinterlegte) Streckenabschnitte ergänzte Fahrprofil.

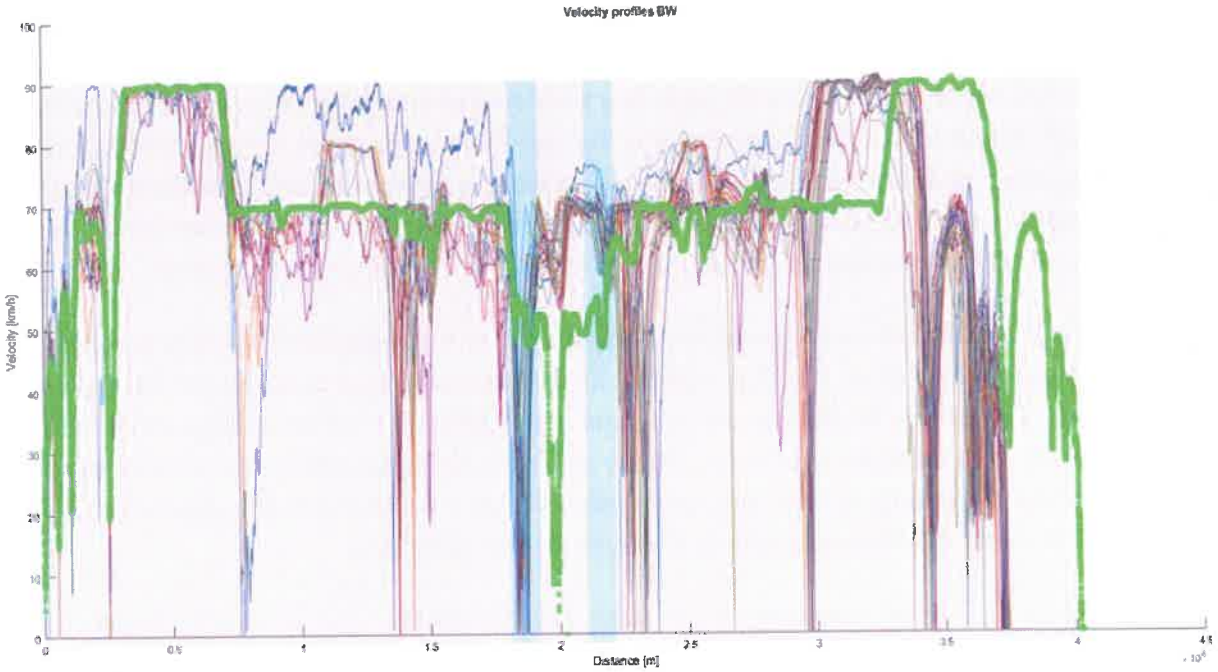


Abbildung 15: eWayBW: Synthetischer Fahrzyklus generiert aus 27 Einzelfahrten

2.3.3 Simulation Gesamtfahrzeug und Auslegung der Komponenten des Antriebsstrangs

Für die vorbekannte Simulation der Strecke Reinfeld-Lübeck in Schleswig-Holstein erfolgte eine Erweiterung auf den Fall mehrerer, gleichzeitig unter der Oberleitung befindlicher, Oberleitungs-LKW. Hierbei wurde durch Variation einer angenommenen Elektrifizierung (Position der Unterwerke, Nennspannung, Stromgrenze) eine Untersuchung vorgenommen, bis zu welcher Anzahl an LKW ein uneingeschränkter Betrieb möglich ist beziehungsweise welche Einschränkungen bei weiter steigenden Anzahlen resultieren.

Als Zuarbeit erfolgte eine Verknüpfung mit dem Arbeitspaket 9, insbesondere für eine Temperatur-Simulation der Hochvolt-Verkabelung, sowie mit dem Arbeitspaket 5 zwecks Detail-Simulation des Wärmehaushalts von Oberleitungs-LKW.

2.3.4 Simulative Auslegung der Antriebsstrangkomponenten und Festlegung der Lastkollektive

2.3.4.1 Rekuperationspotential

In einer weiteren Untersuchung wurde das mögliche Potential zur Rekuperation einer Bergabfahrt bewertet. In Abschnitt 2.2.4 wurde bereits erläutert, welche Potentiale und technischen Möglichkeiten zur Energieumwandlung-/Nutzung während einer Bergabfahrt/Rekuperation es gibt:

26. JULI 2022

- Rückspeisung in die Oberleitung und das Mittelspannungsnetz
- Nutzung durch benachbarte LKW durch Rückspeisung in die Oberleitung
- Speicherung in der eigenen Hochvoltbatterie

Die jeweiligen Vor- und Nachteile wurden bereits ausreichend beschrieben und herausgestellt, dass es u.a. sinnvoll sein kann, die Energie direkt im eigenen Fahrzeug in der Batterie zu speichern, da dies u a. die Komplexität der Oberleitungsinfrastruktur vereinfachen kann. In diesem Punkt wurde nun bewertet, welche Anforderungen sich daraus ableiten lassen.

Zu diesem Zweck wurden exemplarische Strecken herausgesucht, in denen LKW ein hohes Rekuperationspotential aufweisen können. Der Fokus der Streckenauswahl lag auf typischen Autobahnen. U.a. wurde hier die BAB 7 von Flensburg nach Füssen ausgewählt, weil dies beispielsweise in Deutschland die längste zusammenhängende Autobahn ist. Hier befinden sich u.a. die Kasseler berge, welche über einen sehr langen Bereich eine „hügelige" Umgebung für ein LKW-Fahrprofil aufweist. Weiterhin wurde der „Brenner Pass" ausgewählt, da dieser in einem sehr kurzem Bereich für Autobahnen ein relativ hohes Steigungs- bzw. Gefälle-Potential aufweist. Zu erwähnen sei an dieser Stelle, dass die Strecken nicht nach der typischen und tatsächlichen Nutzung von LKW Fahrten ausgewählt wurden und daher nicht unbedingt repräsentativ sind, sondern eher eine Maxima-Betrachtung darstellen, z.B. um eine minimale bzw. verfügbare Speicherkapazität von Batterien ermitteln zu können

Im Fokus stand hier, welches Potential an kinetischer Energie ein LKW auf diesen Beispielstrecken generiert um dieses in einer Batterie zwischenspeichern zu können. Zu diesem Punkt wurde auch bereits beschrieben, dass das Potential für eine Rekuperation von der Stärke des Gefälles abhängt. D.h. bei einem niedrigen Gefälle (< 1,3 %) muss weiterhin Energie aufgewendet werden, um die Fahrwiderstände zu überwinden um das Fahrzeug auf der gewünschten Geschwindigkeit zu halten. Erst ab einem stärkeren Gefälle (> 4,3 %) kann darüber hinaus Energie rekuperiert werden (vgl. Abbildung 13). Sollte das Gefälle zu groß werden, muss zusätzlich mechanisch gebremst werden, da entweder die Elektromaschine oder die Batterie eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufweist.

Da eine reale Straße bzw. Geländeprofil keine konstantes Gefälle aufweist, kommt es im realen Betrieb dazu dass die verschiedenen Fahrsituationen (Antreiben, Rekuperieren und mechanisches Bremsen) kontinuierlich und unregelmäßig wechseln, wodurch eine zusammenhängende Rekuperationsphase (d.h. Laden der Batterie) durchaus von Antriebsphasen (d.h. Entladen der Batterie) unterbrochen wird. Als Rekuperationsphase wird daher eine Phase gesucht, in der zu einem Zeitpunkt t_1 von einem lokalen minimalen Ladezustand der Batterie (SOC_1) ausgehend ein lokales Maximum des Ladezustandes (SOC_2) erreicht wird ($SOC_1 < SOC_2$), welches durch anschließende Antriebsphase anschließend wieder unterhalb des ursprünglichen minimalen SOC_1 entladen wird. Der Zeitpunkt, in der der SOC wieder unter die Schwelle von SOC_1 fällt, wird als Ende der Rekuperationsphase betrachtet $t_2 = t(SOC < SOC_1, t_2 > t_1)$. Das entsprechende $\Delta SOC = SOC_2 - SOC_1$ (bzw. die dazugehörige Energie) wird dann als minimaler Speicherbedarf pro Rekuperationsphase definiert.

In der nachfolgenden Abbildung 16 ist das Verfahren hierzu schematisch dargestellt:

26 JULI 2

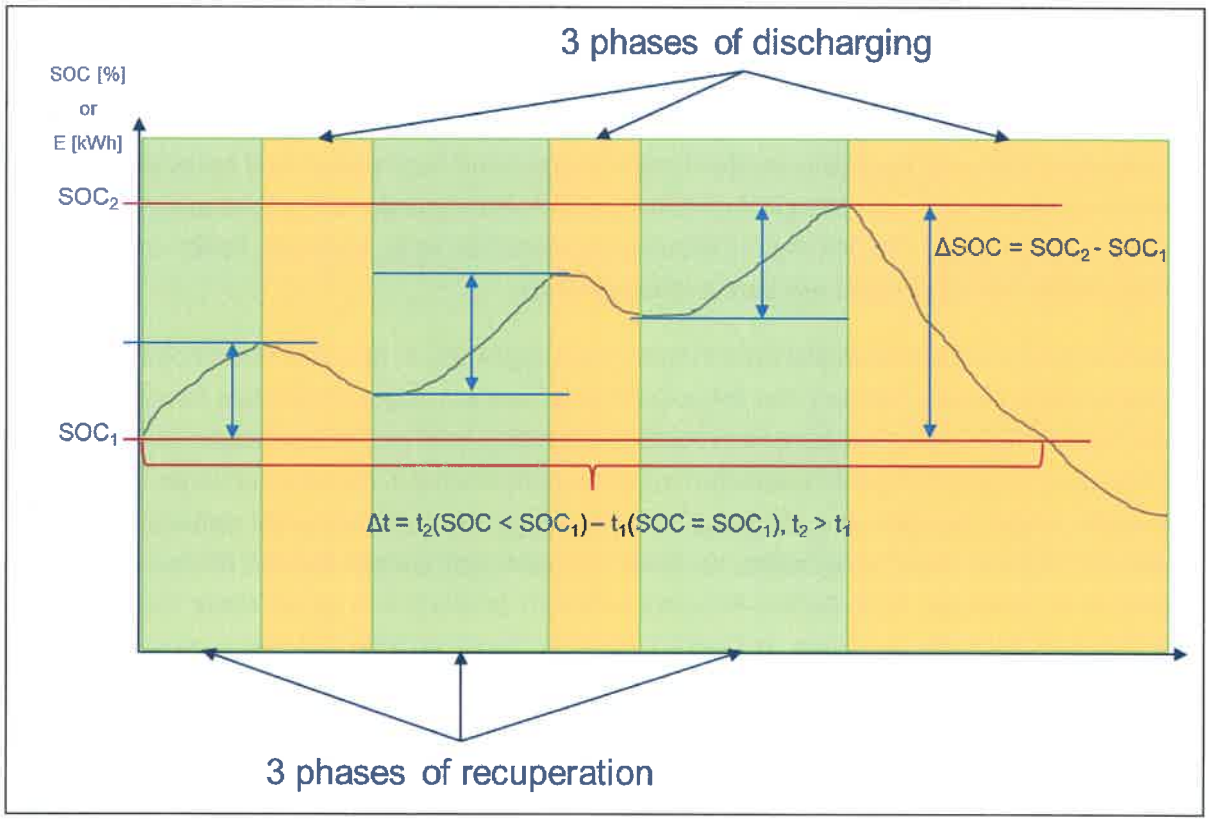


Abbildung 16: Prinzip der Rekuperationsanalyse

Mit dem oben dargestellten Verfahren wurden daraufhin die genannten beispielhaften Fahrzyklen analysiert. Im Folgenden ist hierzu die Auswertung für das Beispiel der BAB 7 aufgeführt (Abbildung 17):

26. JULI 2022

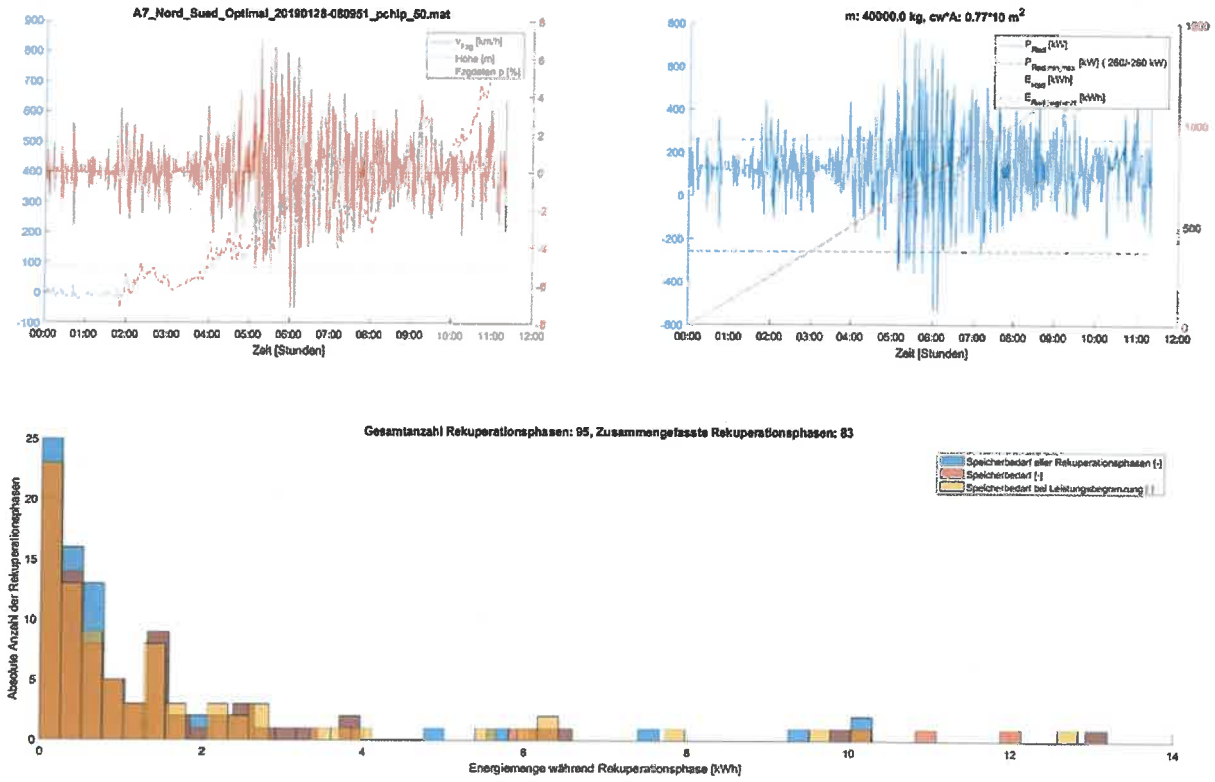


Abbildung 17: Rekuperationsanalyse am Beispiel der BAB 7

In den beiden oberen Diagrammen ist dazu das Geschwindigkeits- ‚Höhen-, Leistungs- und Energieprofil dargestellt. Evtl. erforderliche Pausen oder auftretende Staus wurden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Im unteren Histogramm ist dazu auf der Ordinatenachse die Häufigkeit der jeweils ermittelten Rekuperationsphase aufgeführt. Die Klassifizierung der Rekuperationsphasen ist auf der Abszissenachse dargestellt und erfolgte einmal als generell auftretende Rekuperationsphase (ohne die oben beschriebene Zusammenfassung) in blau dargestellt und einmal mit der oben aufgeführten Zusammenfassung der Rekuperationsphase (orange). Der Vollständigkeit halber ist weiterhin eine mögliche Leistungsbegrenzung (z.B. durch die Elektromaschine oder Batterie) berücksichtigt (gelb).

In dem Diagramm wird ersichtlich, dass für einen Großteil der Rekuperationsphasen ein Speicherbedarf von < 4 kWh ausreichend ist. Dies resultiert u.a. davon, dass beispielsweise ein LKW bedingt durch den hohen Luftwiderstand deutliche größere Fahrwiderstände aufweist und somit auch bei vielen Gefällefahrten zusätzliche Antriebsleistung benötigen. Weiterhin sind in diesem Beispiel maximale Rekuperationsenergiemengen von vereinzelt bis zu ca. 13 kWh zu erwarten. Dies bedeutet, dass die Auslegung der Batterie oder die zugrundeliegende Betriebsstrategie diesen freien Speicherbedarf berücksichtigen muss, damit die Energie entsprechend im eigenen Fahrzeug genutzt werden kann. Alternativ muss beispielsweise über eine Kosten-Nutzen-Rechnung die Sinnhaftigkeit einer entsprechend groß dimensionierten Batterie bewertet werden, oder ob alternativ die Energie direkt in die Oberleitung bzw. sogar das Mittelspannungsnetz zurück gespeist wird. Sollte auch dies nicht möglich sein, muss wie bisher üblich mechanisch zusätzlich gebremst werden, wobei die Energie in Wärme umgewandelt wird und somit (im Sinne der Energieeffizienz) verloren ist.

Nachfolgend (Abbildung 18) ist dazu eine äquivalente Abbildung der Simulation vom „Brenner Pass“ dargestellt:

26. JULI 2022

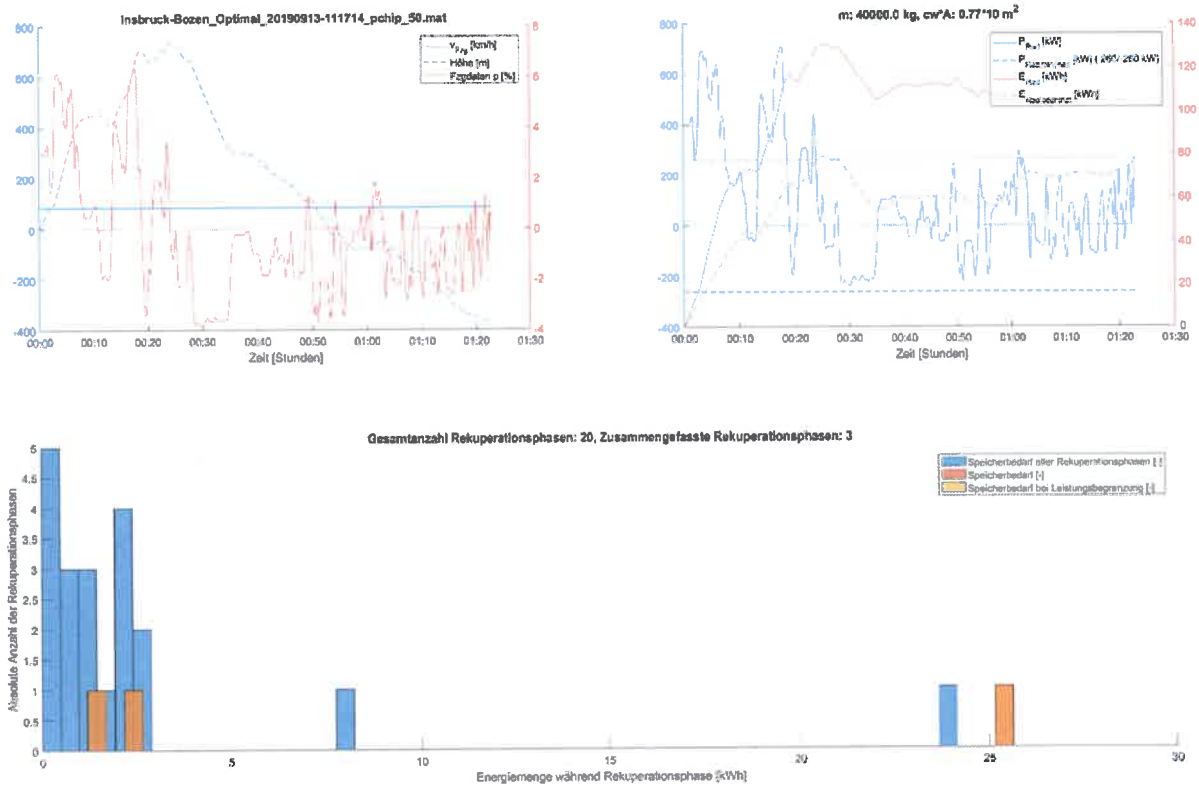


Abbildung 18: Rekuperationsanalyse am Beispiel des "Brenner Pass"

Im Gegensatz zu der Bewertung der Fahrt auf der BAB 7 fällt hier auf, dass eine deutlich geringere Anzahl an Rekuperationsphasen auftritt, was aber in erster Linie auf eine deutlich kleineren Simulationsdauer zurück zu führen ist (ca. 12 %). Zusätzlich ist hier gut zu erkennen, wie die „Einzelrekuperationsphasen" (ohne Zusammenfassung, blau) in wenige zusammengefasste Rekuperationsphasen resultieren (orange), wodurch die summierte Energiemenge entsprechend ansteigt. Hier zeigt sich, dass bei der Fahrt über den „Brenner" zur Speicherung der anfallenden Rekuperationsenergie eine Batterie eine Speicherkapazität von bis zu 25 kWh aufweisen muss, damit bei der Bergabfahrt diese auch wieder in der Batterie gespeichert werden kann. Eine Ladestrategie muss ebenfalls dahingehend optimiert werden, damit beispielsweise nicht über den Verbrennungsmotor vorab die Batterie aufgeladen wird.

2.3.4.2 Ausrollversuche

Zum Abgleich der Simulationsumgebung mit dem realen Fahrzeug wurden im weiteren Verlauf der Arbeiten Ausrollversuche mit dem LKW durchgeführt. Diese Ausrollversuche sind dazu gedacht, die Fahrwiderstände eines Fahrzeuges zu ermitteln. Ziel ist es, in der Simulation die Fahrwiderstände des simulierten Fahrzeuges in einer identischen Größenordnung zu verwenden, wie Sie auch im realen Fahrbetrieb auftreten.

In der nachfolgenden Abbildung 19 ist die Berechnung des Fahrwiderstands grafisch dargestellt.

26. JULI 2022

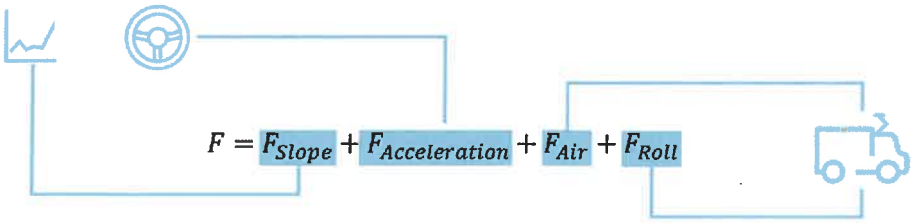


Abbildung 19: Zusammensetzung der Fahrwiderstände

Der Fahrwiderstand setzt sich dabei aus folgenden Bestandteilen zusammen:

1. Steigungswiderstand (F_{Slope}), resultiert aus dem Höhenprofil der Straße.
2. Beschleunigungswiderstand ($F_{Acceleration}$), welcher durch den Fahrer bzw. die Zielgeschwindigkeit beeinflusst wird und die Beschleunigung des Fahrzeuges abbildet.
3. Luftwiderstand (F_{Air}), welcher durch die Fahrzeuggeometrie definiert wird.
4. Rollwiderstand (F_{Roll}), welcher z.B. durch die Reifen, Räder und Verluste an rotierenden Massen bestimmt wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Faktoren F_{Slope} und $F_{Acceleration}$ von der Umgebung bzw. Fahrer dominiert wird und F_{Air} und F_{Roll} nahezu ausschließlich durch die Fahrzeugparameter bestimmt wird:

$$F_{Air} = c_W * A * \frac{\rho_{Air} * v_{Rel}{}^2}{2}$$

$$F_{Roll} = f_{Roll} * m * g * \cos(\alpha)$$

Aus diesem Grund werden die Ausrollversuche durchgeführt, um diese Widerstände (F_{Air} und F_{Roll}) bestimmen zu können. Anzumerken sei dabei, dass mit den Versuchen nicht versucht wird, die Fahrzeugeigenschaften (z.B. (c_W*A oder Rollwiderstandskoeffizient f_{Roll}) eindeutig und separat zu bestimmen, sondern stattdessen nur die Auswirkung dieser beiden Koeffizienten auf das Fahrzeugverhalten zu ermitteln. Bei der Ausführung der Versuche wird dazu das Fahrzeug beschleunigt (z.B. 85 km/h) und anschließend ausrollen gelassen (Zugkraft F=0). Dies resultiert dann darin, dass die Fahrwiderstände F_{Slope}, F_{Air} und F_{Roll} in einer Verzögerung, also $-F_{Acceleration}$ resultieren, wobei F_{Slope} im Idealfall bei den Versuchen 0 ist.

$$F = \cancel{F_{Slope}} + F_{Acceleration} + F_{Air} + F_{Roll}$$

$$-F_{Accelaration} = \cancel{F_{Slope}} + F_{Air} + F_{Roll}$$

Die Schwierigkeit bei diesen Versuchen besteht darin, dass im Regelfall hierzu separat ausgewiesene und zertifizierte und gerade Versuchstrecken verwendet werden. Diese Strecken weisen im Normalfall keine Steigung auf (vgl. α in F_{Roll}) und der Windeinfluss (vgl. v_{Rel} in F_{Air}, d.h. $v_{Rel} = v_{Fzg}$) sollte zum Versuchszeitpunkt ebenfalls nicht relevant sein. Eine Querbeschleunigung durch Lenkbewegungen tritt ebenfalls nicht auf. Die Fahrzeugmasse (m) wird zuvor so genau wie möglich bestimmt und die Erdbeschleunigung (g) bzw. Luftdichte (ρ_{Air}) werden aus der Literatur übernommen. Um weitere Rest- oder

26. JULI 2022

Störeinflüsse zu eliminieren werden die Ausrollversuche auf den Versuchsstrecken in beiden Richtungen durchfahren, damit beispielsweise der Windeinfluss in der einen Fahrrichtung eine „antreibende" Wirkung aufweist und dagegen in der zweiten Fahrtrichtung das Fahrzeug „abbremst". Aus diesen beiden Messfahrten kann anschließend der Messwert um den Windeinfluss bereinigt, z.B. ein Mittelwert gebildet werden.

Eine derartige Versuchsstrecke, welche mit einer Oberleitung ausgestattet ist, ist derzeit nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden diese Versuche auf der Versuchsanlage in Groß Dölln durchgeführt, welche hierzu nur bedingt geeignet ist. Beispielsweise wird für die Beschleunigung eines LKW mit 40 t Gesamtmasse auf min. 85 km/h eine Strecke von fast 1 km benötigt. Für eine Ausrollung unter idealen Bedingungen waren ca. 4 km zu erwarten. Die Versuchsanlage in Groß Dölln hat allerdings nur eine Gesamtlänge von ca. 2,5 km, wobei nur ca. 1,8 km mit einer Oberleitung ausgestattet sind. Zudem ist auf der Anlage eine leichte Steigung vorhanden und die Oberleitungsstrecke weist einen Kurvenverlauf auf.

Nachfolgend ist eine Übersicht der Versuchsanlage in Groß Dölln dargestellt (Abbildung 20). Der öffentlich zugängliche Bereich konnte leider zu Beschleunigungszwecken nicht genutzt werden, da hier vom dort ansässigen „Driving Center" eine Veranstaltung stattfand.

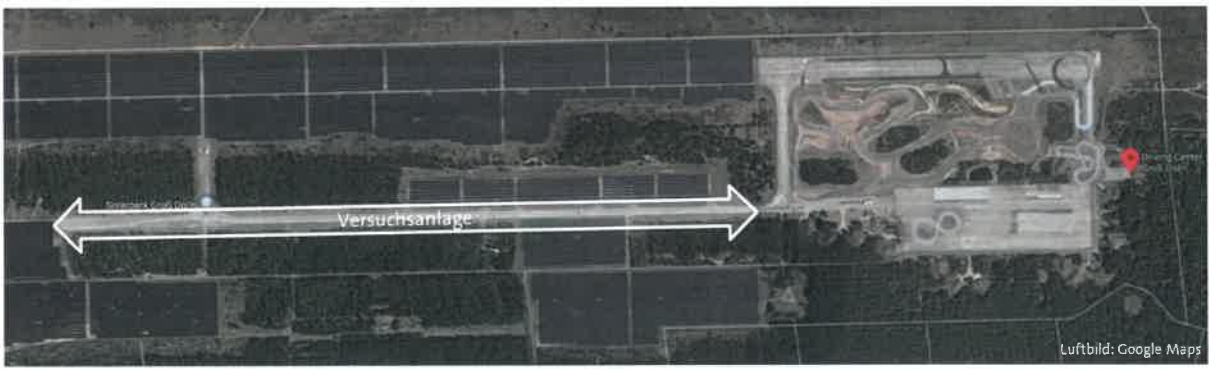


Abbildung 20: Übersicht des Versuchsgeländes

Aus diesem Grund mussten die notwendigen Versuche aufgeteilt werden, damit die verfügbare Strecke als Beschleunigungs- und Rollstrecke ausreichend ist, was den Messfehler erhöht. Die Versuche konnten allerdings in beiden Fahrtrichtungen durchgeführt werden, da die Polarität der Oberleitung getauscht werden konnte.

Die Versuchsreihen wurden in verschiedenen Ausführungen und Fahrzeugkonfigurationen durchgeführt, um den Einfluss der jeweiligen Parameter identifizieren können:

- Ohne Pantograf und Oberleitung
- Mit fixiertem Pantograf (auf Höhe der Oberleitung), ohne Schleifkontakt zur Oberleitung
- Mit „angebügeltem" Pantograf

Die Fahrten mit fixiertem Pantograf auf dem Niveau der Oberleitung hatten die Absicht, die Unterschiede zwischen dem reinen „Luftwiderstand" durch den Pantograf und zusätzlichen Verlust durch den Schleifkontakt ableiten zu können. Hierzu wurde der Pantograf manuell (mit Hilfe der integrierten Druckluftanlage) unter die Oberleitung angehoben und durch „Drähte" in dieser Position fixiert. Dies hatte den Vorteil, dass auch während der Fahrt eine Dämpfung vorhanden war. Der Aufbau ist dazu in der nachfolgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 21).

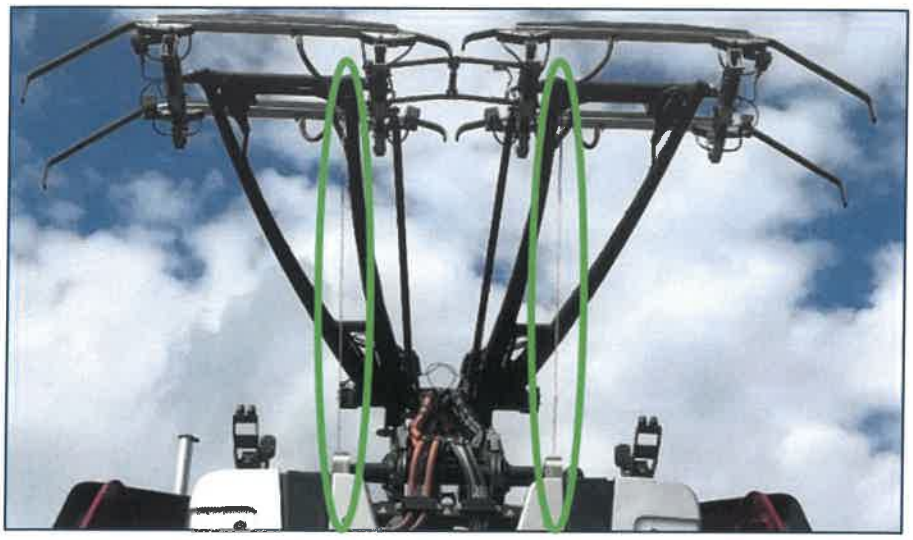


Abbildung 21: Fixierung des Pantografen auf Höhe der Oberleitung

Insgesamt wurden 18 Versuchsreihen durchgeführt, welche durch die mehrfachen Fahrten auf über 50 Messungen resultierten.

Nur Zugmaschine (~ 9,2 t) → **Ohne PAN und OCL**
Mit leerem Trailer (~15,9 t) → **Mit fixiertem PAN ohne OCL**
Voll beladen (~40 t) → **Mit PAN an OCL**

Fahrtrichtung Westen ← → Fahrtrichtung Osten

Σ 18 Versuchsreihen

Aus diesen Messungen wurde für je zwei Versuchsreihen (Fahrrichtung Ost und West) eine Ausgleichskurve ermittelt. Hierzu wurden zu Beginn die jeweiligen Messfahren der unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche zu einer Kurve zeitlich verschoben und fusioniert, so dass für jede Fahrzeugkonfiguration eine Ausrollkurve vorliegt.

In den nachfolgenden Abbildungen ist dieses Verfahren grafisch skizziert. In der ersten Abbildung sind die separaten Geschwindigkeitsverläufe der jeweiligen Fahrtrichtung abgebildet. Dargestellt ist bereits der Verlauf inkl. der zeitlichen Verschiebung, so dass sich eine gesamte Ausrollung von ca. 85 km/h auf 10 km/h ergibt.

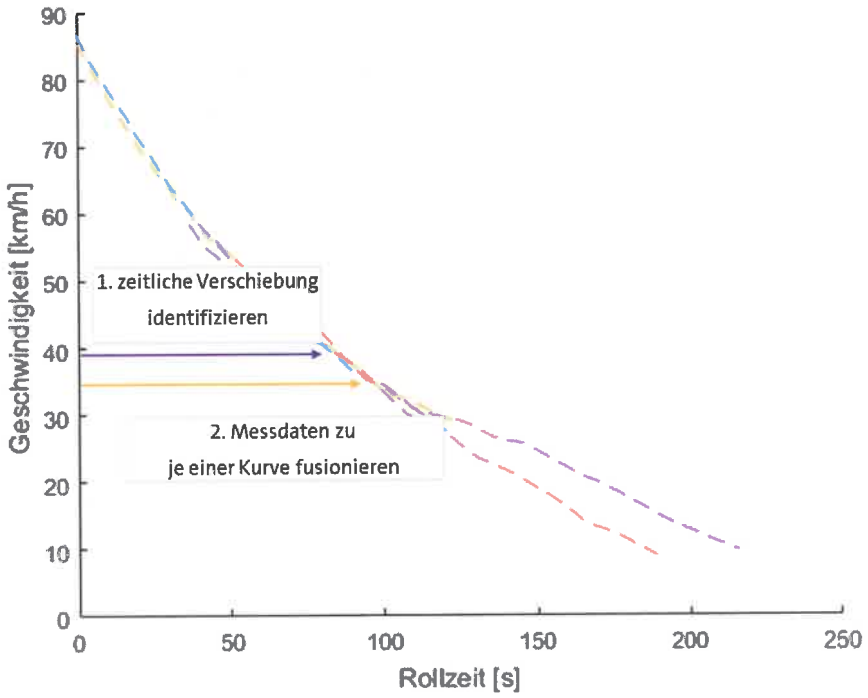


Abbildung 22: Verfahren zur Generation der Ausrollkurve I

In der weiteren Abbildung wurden die separaten zeitlich verschobenen Einzelmessungen zu je einer Messkurve fusioniert und im Anschluss die Ausgleichskurve aus der Ost- und Westfahrtrichtung zu ermitteln. Zu erkennen ist hier, dass der verbleibende Einfluss des Wind- und Steigungswiderstands zu einem unterschiedlichen Geschwindigkeitsverlauf der jeweiligen Fahrtrichtung führt, was durch die Ausgleichskurve eliminiert wird.

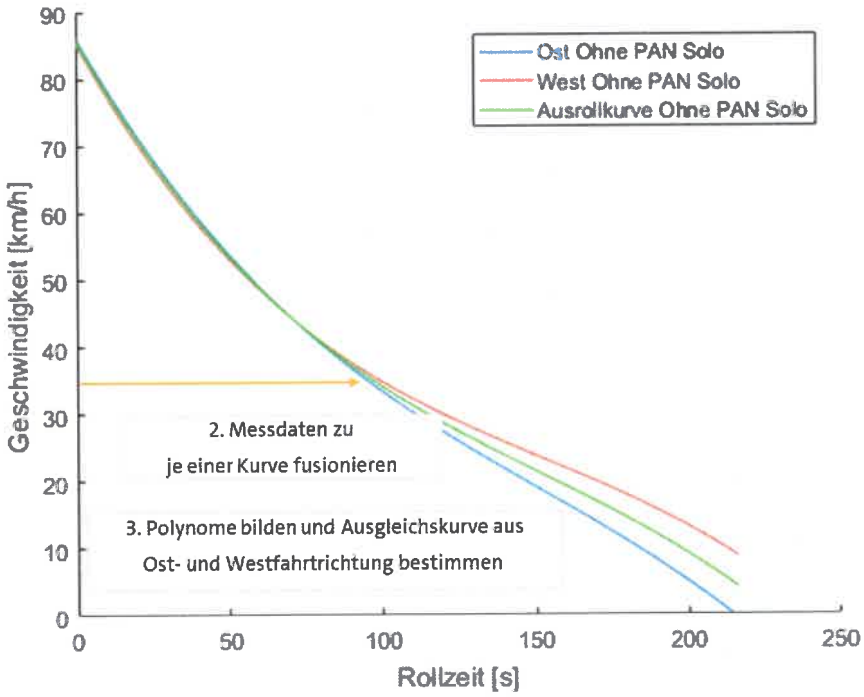


Abbildung 23: Verfahren zur Generation der Ausrollkurve II

26. JULI 2022

Im weiteren Verlauf wurden die Resultate der Ausrollversuche analysiert. Hierbei zeigte sich, dass das Verhalten der Fahrzeuge während der Ausrollversuche in einige Messungen nicht plausibel sein kann bzw. das Verhalten nicht dem erwarteten entspricht.

Zu erwarten war, dass der LKW (unabhängig vom Beladungszustand) ohne Oberleitungsbetrieb die längste Ausrollstrecke aufweist. Sollte der Pantograf aufgestellt werden, führt dies zu einem erhöhten Luftwiderstand bzw. aerodynamisch wirksame Querschnittsfläche, was zu einer zusätzlichen Verzögerung führt. Sollte der Pantograf noch mit der Oberleitung verbunden sein, kommt hier zusätzlich noch der Schleifwiderstand zwischen Stromabnehmer (Kohleschleifleiste) und Fahrdraht hinzu. Dies sollte erwartungsgemäß zur kürzesten Rollstrecke führen, sofern der Unterschied messbar ist.

In einigen Messungen zeigte sich allerdings ein Verhalten, wo beispielsweise das Fahrzeug im angekoppelten Zustand nicht die kürzeste Rollstrecke aufweist. Die Ursache für diese Fehlmessungen kann in den unzureichenden Bedingungen vor Ort liegen. Beispielsweise könnte Wind oder andere Straßenverhältnisse das Verhalten beeinflussen, da u.a. das Fahrzeug mit hochgefahrenem und nicht mit der Oberleitung gekoppelten Pantograf nur auf einer separaten Parallelfahrbahn ausgerollt werden konnte, um einen Kontakt mit dem Fahrdraht zu vermeiden. Diese Parallelfahrbahn führte u.a. zu stärkeren Lenkmanövern.

Im weiteren Verlauf der Messungen, sollte das Verfahren der Ausrollung optimiert werden und insb. die Ausrollungen mit dem neuen LKW „Type 2" durchgeführt werden und in in Bezug auf die bekannten Auffälligkeiten gezielt optimiert werden, damit solche Unplausibilitäten weitgehend ausgeschlossen werden können. Allerdings stand bis zum Projektabschluss kein LKW „Type 2" in ausreichend guter Betriebsfähigkeit zur Verfügung, so dass diese weiteren und optimierten Ausrollversuche nicht durchgeführt werden konnten.

Im weiteren Verlauf wurden die bisherigen Auswertungen und das verwendete Simulationsmodell mit den Ergebnissen der Ausrollversuche verglichen. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

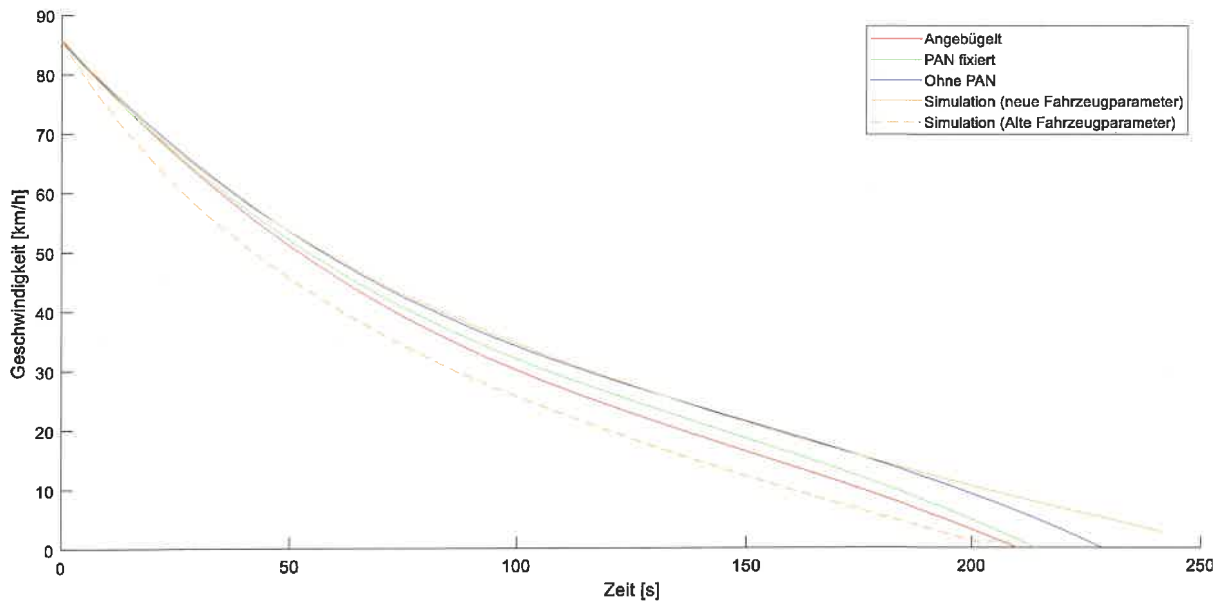


Abbildung 24: Vergleich der Ausrollkurven mit der Simulation

Hierzu wurde u.a. die durchgeführte Ausrollung ebenso in der Simulation durchgeführt und im Anschluss verglichen. Hier zeigte sich u.a. dass die frühreren Simulationen mit Fahrzeugparametern von einer früheren LKW-Generation durchgeführt wurden, was erwartungsgemäß zu schlechteren Ergebnissen führt. Nach der Bereitstellung des Oberleitungs-LKW wurden diese Parameter an die neue Fahrzeuggeneration angepasst und die Ergebnisse der Simulation sind im relevanten Geschwindigkeitsbereich nun vergleichbar mit den Ausrollkurven der Versuche.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Versuchsergebnisse der Ausrollversuche zwar nicht erwartungsgemäß waren und absolute Fehler aufwiesen, dennoch konnten die relativen Fehler in Bezug auf Variation der Fahrszenarien (z.B. unterschiedliche Beladungszustände, Solo-Zugmaschine) auch in der Simulation dargestellt werden und waren mit den Versuchsergebnissen vergleichbar.

2.4 AP2.1 Forschungsinhalte Fahrzeugkonstruktion – Package LKW

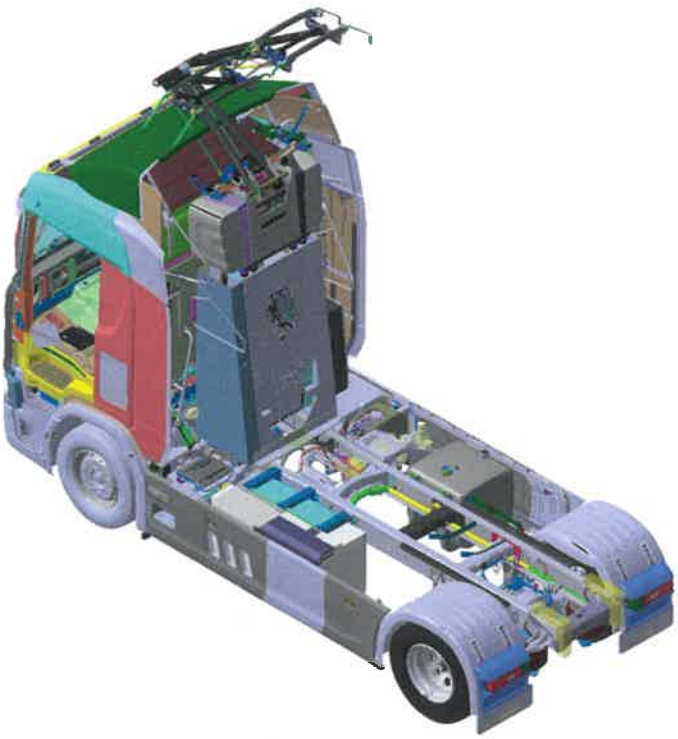
Die Arbeitspakete 2.1 und 2.2 wurden gemeinsam durchgeführt, woran sich auch dieser Bericht orientiert.

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde ein Workshop im Södertälje (SWE) durchgeführt, um die jeweiligen Konstruktionsdaten-Verwaltungssysteme der Unternehmen Scania und Volkswagen kennen zu lernen. Des Weiteren wurde abgestimmt, auf welchem Wege Konstruktionsdaten zwischen den Häusern ausgetauscht werden sollten.

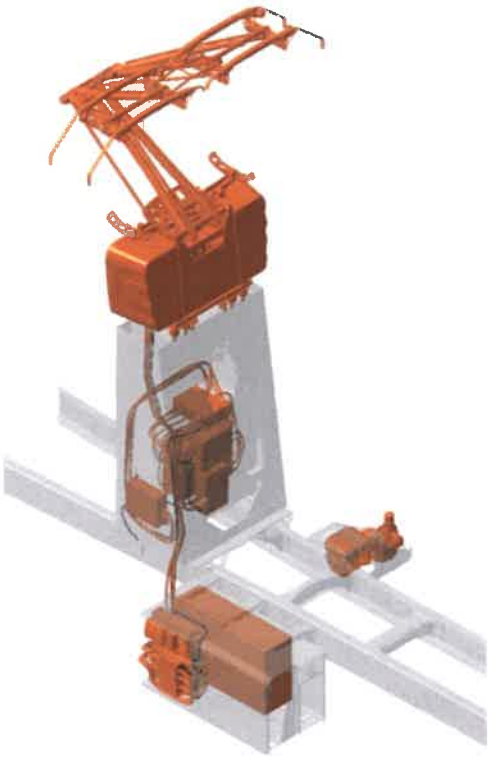
Im Laufe des Projekts hat sich nach erneuter Abstimmung mit Scania herausgestellt, dass gemeinsame Untersuchungen an der Fahrzeugstruktur reduziert werden können. In diesem Sinne sind die Inhalte des Arbeitspakets entsprechend angepasst worden.

Im ersten Schritt sind die notwendigen Daten zur Bewertung und Ausarbeitung von Änderungen im spezifischen Umfangs des Pantographen und dessen Peripherie von Scania zur Verfügung gestellt worden (siehe Darstellung unten).

Die ursprünglich geplanten Änderungsvorschläge für die Grundstruktur wurden nicht erarbeitet, da Sie im Modulsystem eines Fahrzeugherstellers als nicht umsetzbar angesehen werden. Die im weiteren Verlauf des Projektes durchgeführten Arbeiten beschränkten sich im Wesentlichen auf Zuarbeiten zu anderen Arbeitspaketen. Unverändert war auch hierzu die Beschaffung der Konstruktionsdaten des Gesamtfahrzeugs erforderlich. Ein entsprechende Aufbereitung ist in der folgenden Grafik dargestellt.

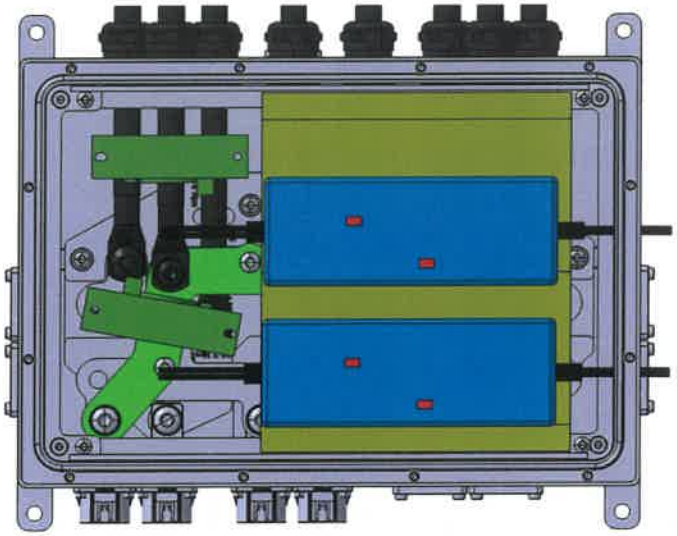


Von besonderem Interesse für mehrere Arbeitspakete sind dabei die Umfänge aus dem Hochvolt-Bordnetz. Diese Komponenten übernehmen wesentliche Anteile des Fahrzeug-Antriebs oder weiterer Funktionen die zum Betrieb des Fahrzeugs erforderlich sind. Durch die hohe Spannungslage bedürfen sie jedoch auch einer besonderen sicherheitstechnischen Beachtung. Zu diesem Zweck wurde eine besondere Daten-Aufbereitung erstellt, in der alle Hochvolt-Komponenten in orange eingefärbt sind. Dies entspricht der auch im tatsächlichen Fahrzeug gewählten Farbgebung für Hochvolt-Leitungen und Steckverbinder. Eine zugehörige Ansicht ist im Folgenden dargestellt.



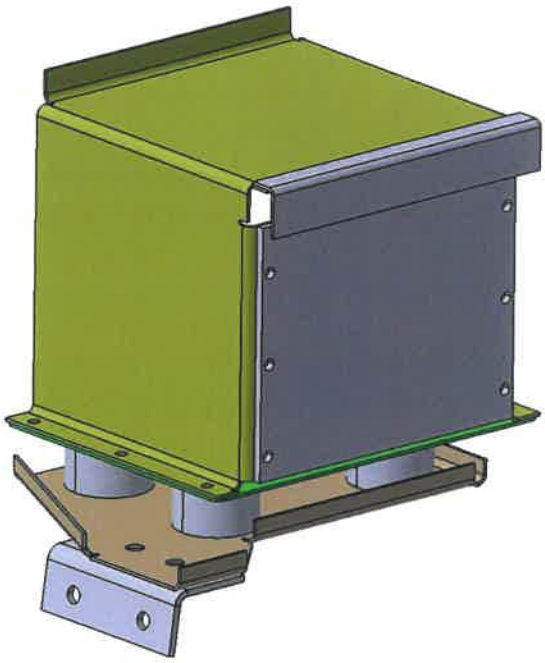
Im Rahmen des AP9 bestand der Bedarf nach einer hochfrequenten Messung von Strömen und Spannungen im HV-Bordnetz. Um eine solche Messung zu ermöglichen war es erforderlich Zugänge zu offenen Leitern des Hochvolt-Bordnetzes zu schaffen, dies jedoch im Rahmen der Wahrung der elektrischen Sicherheit. Hierfür wurde eine Analyse der Komponenten des Bordnetzes vorgenommen um festzustellen, wo ein solcher Zugang in geeigneter Weise geschaffen werden kann. Als Ergebnis der Untersuchung wurde beschlossen sogenannte Traktionsnetz-Verteiler für die Schaffung von Zugängen zu nutzen. Innerhalb dieser Komponenten erfolgt eine Verknüpfung beziehungsweise Teilung von Leitungssträngen. Eintretende Leitungen sind beispielsweise auf Schraubbolzen geführt und die Leitungen mit Stromschienen fortgeführt beziehungsweise verbunden. An solchen Stellen liegen die elektrischen Leiter „offen" vor (ohne Schirmung), weshalb Spannungen direkt gemessen werden können, Ströme mit Hilfe von Stromzangen beziehungsweise ringförmigen Stromwandlern, die eine äquivalente Mess-Spannung abgeben. Ein geöffneter Traktionsnetz-Verteiler mit eingerüsteter Messtechnik ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

26. JULI 2022



Die Konstruktions-Aufgabe bestand im Detail darin, die messtechnischen Komponenten im Inneren des Traktionsnetz-Verteilers zu platzieren und auch eine Befestigung zu realisieren. Hierbei wurde versucht die Grundstruktur weitgehend unangetastet zu lassen beziehungsweise weiter zu nutzen. Notwendige Änderungen wurden beispielsweise in Form eines geänderten Deckels realisiert.

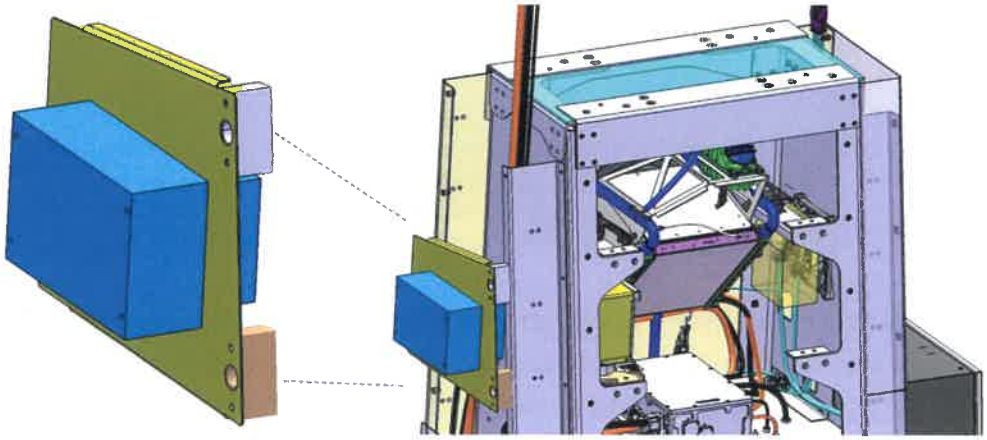
Im Rahmen der Messungen des Hochvolt-Bordnetzes konnten insbesondere Schwingungsphänomene beobachtet werden. Zur Bedämpfung dieser Schwingungsphänomene wurde die Einrüstung einer Drossel (Induktivität) im Hochvolt-Bordnetz in Betracht gezogen. Für diese Komponente wurde demnach eine Platzierung im Fahrzeug gesucht, die eine zusätzliche Einbringung in das Bordnetz ermöglicht, dabei jedoch die nicht unerheblichen Abmaße und das Gewicht der Drossel berücksichtigt. Das erstellte Gehäuse inklusive der mechanischen Anbringungspunkte ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Im Rahmen der Zuarbeit zu anderen Arbeitspaketen erfolgte eine Unterstützung des AP13a. Die dort beschriebene Vorrichtung zur Stromregelung bei einer Wiederkontaktierung wurde mit Hilfe von 3D-

26. JULI 2022

CAD im Package des Pantographen-Turms integriert. Neben der zuverlässigen Befestigung der Vorrichtung selbst, war hierbei zu beachten, dass diese isoliert gegenüber dem Pantographen-Turm sein muss, da das Gehäuse der Vorrichtung dem „intermediate potential" zugeordnet ist, während der Turm dem Chassis-Potential des Fahrzeugs zugeordnet ist. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, ist die Vorrichtung selbst ist als geschlossener Kasten mit Kühlkörper auf der Rückseite ausgeführt. Als Halterung dient eine Blechkonstruktion, die ihrerseits über Isolatoren auf der linken Außenseite des Pantographen-Turms befestigt wird.



Innerhalb dieses Arbeitspaketes war in der letzten Phase des Projektes das Zuarbeiten zu anderen Arbeitspaketen auf Basis des Oberleitungs-Lkw Typ II geplant. Konstruktions-Arbeiten wurden jedoch am Typ II LKW nicht durchgeführt, sondern mit dem Typ I abgeschlossen.

2.5 AP 2.2: Forschungsinhalte Fahrzeugkonstruktion – Package Antriebskomponenten

Siehe unter Abschnitt 2.4

2.6 AP 3: Pantograph (Siemens Mobility)

Die Aktivitäten der SMO konzentrierten sich auf die Weiterentwicklungen des Systems selbst sowie im Zusammenwirken des Stromabnehmers mit den Teilsystemen Energieversorgung und Fahrzeugtechnik. Diese Arbeiten wurden ergänzt durch fortgesetzte praktische Tests auf dem Test-Lkw EL Camino. Die integrierten Tests und Erprobungen des Gesamtsystems Oberleitungs-Lkw wurden auf dem Siemens-Versuchsgelände in Groß Dölln, sowie auf der zur Verfügung stehenden Feldversuchsstrecke ELISA durchgeführt. Einen Überblick über die Projektstruktur und eine Zuordnung einzelner Arbeitspakete zu den Handlungsfeldern gibt die folgende Auflistung. Die anschließende Vorstellung der Arbeitsschwerpunkte orientiert sich an dieser Einteilung.

Die Arbeiten in diesem Vorhaben wurden in folgende sieben Teilprojekte (Projektelemente) gegliedert:

PAN.1 - Stromabnehmerintegration in zwei Prototyp-Lkw
PAN.2 - Überprüfung und Inbetriebnahme der Stromabnehmer in zwei Prototyp-Lkw
PAN.3 - Analyse der Daten aus den Fahrprogrammen
PAN.4 - Weiterentwicklung des Stromabnehmersystems
PAN.5 - Technische Optimierungen an den Prototyp-Lkw
PAN.6 - Projektsteuerung, Systemintegration, Testkoordination
PAN.7 – Arbeiten gemäß Aufstockungsantrag (3) "HV ready"

Der Arbeitsumfang im KJ 2021 (Reststrecke Projekt bis 30.09.2021) bestand daraus die letzten offenen Arbeitspakete PAN 6.5 und PAN 2.2/.3 (Aufstockung Simulation/Modellierung und dynamische Tests) des ursprünglichen Antrags, sowie die Arbeitspakete des Aufstockungsantrags (AP PAN.7) durchzuführen und abzuschließen. Die Folgekapitel gehen im Überblick auf den Status der jeweiligen AP ein. Bzgl. der detaillierter Schilderungen erlauben wir uns an dieser Stelle u.a. auf die Ergebnisbeschreibungen in den Zwischenberichten der KJ 2018 – 2020 zu verweisen. Darüber hinaus wurden innerhalb der verschiedenen Arbeitspakete je nach Tätigkeiten Protokolle, Testberichte und technische Unterlagen erstellt und in einer Dokumentenübersicht festgehalten, auf welche bei Nachfrage jederzeit zurückgegriffen werden können[1].

2.6.1 PAN.1

PAN1.1: In der Entwicklungsphase erfolgte eine Abstimmung zwischen den Projektpartnern zu den Anforderungen der Stromabnehmer. Hierzu gehörten auch regelmäßige persönliche Abstimmungen alle zwei Monate. Neben technischen Anforderungen war ein wichtiges Element die zunächst separat erstellte Hazard and Risk Analysis (HARA) durch beide Geschäftspartner, und der anschließende Abgleich der Ergebnisse aus dem die Anforderungen an die funktionale Sicherheit folgten.

Die Fertigungsunterlagen wurden zwischen Ende April und Anfang Juni in einem Technical Data Package zusammengestellt und an die Fertigung übergeben. Hierbei wurden zeitkritische Themen vorrangig behandelt, um den vereinbarten Liefertermin zur Präsentation auf der IAA in Hannover zu ermöglichen.

Änderungen und Korrekturen durch Erkenntnisse in der Montage sind durch regelmäßige Change Control Boards (CCB) in das Technical Data Package eingeflossen und dokumentiert worden.

PAN1.2: Die rechtzeitige Fertigung des ersten Stromabnehmers erwies sich in unterschiedlichen Aspekten als schwierige Herausforderung. Der Stromabnehmer ist erstmalig in seiner Form fertigungstechnisch so dokumentiert, dass dieser in einer Kleinserie gefertigt werden kann. Erfahrungen zu Langläufern in Materialien oder Schwierigkeiten in einzelnen Fertigungsprozessen (z.B. Schweißabläufe) waren noch nicht bekannt. Der initiale Stromabnehmer war direkt zur Montage auf dem 1. Versuchsfahrzeug vorgesehen. Parallel stand der erste Stromabnehmer unter zeitlichen Druck, pünktlich ausgeliefert zu werden, um eine Vorstellung auf der IAA in Hannover2018 zu ermöglichen.

Durch diese Neuartigkeit und zeitliche Rahmenbedingung, wurde der Fertigungshochlauf intensiv durch Tätigkeiten zur Lieferantenqualifikation, Terminmanagement und Terminüberwachung begleitet und kritische Komponenten teilweise durch eine Second Source Strategie abgesichert.

[1] Verwaltung über Reviewplan SMO-Anteil (= auch Liste der Leistungsnachweise, Dokumentenliste), umfasst 33 Nachweisdokumente oder QV auf Dokumentenpakete (technischer Unterlagen)

26. JULI 2022

Im April 2019 wurde der Stromabnehmer für den zweiten Prototypen-LKW wie geplant gefertigt und termintreu an den OEM Scania nach Schweden zur Montage auf Truck II (EL Pancho) ausgeliefert. Die Herstellkosten der Pantographen fielen höher aus als ursprünglich geplant.

Abbildung 25: „El Pancho" mit Stromabnehmer bei der Ankunft in Groß Dölln im August 2019

PAN 1.3: Die mechanische Integration des Stromabnehmers auf dem ersten Versuchsfahrzeug erfolgte im August 2018 in Södertälje, Schweden. Die Arbeiten wurden von Scania unter Begleitung von Siemens durchgeführt. Auffälligkeiten (Verstärkung des Base Frames, Schwierigkeiten beim Kippen der Fahrkabine, Ausrichtung CAN-Repeater, Stecker-Verbindungen, Höhenbeschränkungen des Kranes) wurden dokumentiert und in die Dokumentation überführt. Die mechanische Integration des Stromabnehmers auf dem zweiten Versuchsfahrzeug erfolgte im Sommer 2019 in Södertälje, Schweden. Die Arbeiten wurden von Scania durchgeführt, wobei Siemens vereinzelt Unterstützung bei Rückfragen zur Integration geleistet hat.

PAN 1.4: Die Integration der Steuerungssoftware erfolgte im Wesentlichen in Groß Dölln im November 2018 nachdem in Södertälje nur die Basisfunktionen geprüft wurden. Die Integration beinhaltete Fehlersuche und Korrektur auf Seiten von Scania und von Siemens. Mit dem Update der Software für das Kommunikationsmodul (CMP) wurden die Arbeiten am im November 2018 abgeschlossen, so dass anschließend die Systemtests mit dem El Camino gestartet werden konnten.

PAN 1.5: Die Arbeiten zur elektrischen Integration wurden sowohl in Södertälje Ende August 2018 als auch in Groß Dölln im November 2018 durchgeführt. Neben der Prüfung und Korrektur der elektrischen Komponenten, war vor allem die Suche und Behebung von Isolationsfehlern ein aufwendiges Arbeitspaket. Probleme im Hybridantrieb, der Kühlpumpe und dem DC/DC Wandler bildeten weitere Inhalte der Tätigkeiten, die in Groß Dölln durchgeführt werden mussten.

PAN 1.6: Die Prüfung und Integration der Pneumatik fokussierten sich vor allem auf das Verhalten der Komponenten im Betrieb und durch die Bewegung des Stromabnehmers. So wurden einige Stellen

26. JULI 2022

identifiziert, bei denen es bei längerfristigem Betrieb z.B. durch Reibungsstellen zu Leckagen kommen könnte. Diese wurden durch eine Korrektur der Verlegung / Befestigung entsprechend behoben.

2.6.2 PAN.2

PAN 2.1: Im Rahmen dieses AP wurden die Erstinbetriebnahme des Stromabnehmers an beiden OL-Test-Lkw (EL Camino und El Pancho), sowie die dynamische Inbetriebnahme in Groß Dölln abgeschlossen. Bedingt durch die verspätete Anlieferung und Überarbeitung von EL Pancho durch den OEM Scania konnten nicht alle Integrationstests in einem ersten Schritt abgeschlossen werden. Diese wurden nach erneuter Anlieferung des Test-OL-Lkw EL Pancho in Groß Dölln (Anfang KJ2021) abgeschlossen und die Wieder-Inbetriebnahme durch Scania von SMO begleitet.

Unabhängig vom Stromabnehmer verzögerte sich der Einsatz von EL Pancho im Rahmen von Versuchsfahrten aufgrund der späteren Übergabe des OEM an den Leasingnehmer Volkswagen. Die Auswirkungen wurden durch eine Anpassung der Testplanung kompensiert (Verlagerung der Tests auf EL Camino etc.).

PAN 2.2: Am Truck Typ I/EL Camino wurden bis Anfang 2021 die Systemtests am Pantographen zu Ende geführt. Die Tests erfolgten zeitlich verzahnt mit der teilweisen Felderprobung des Fahrzeugs auf der Feldversuchsstrecke in Hessen. Diese Pilottests (Anwendertests) erfolgten zusätzlich zu den Systemtests des Pantographen sowie den Gesamtsystemtests am Fahrzeug. Hierbei wurden 33 verschiedenen Testszenarien („Use Case Tests") in verschiedenen Testumgebungen (Versuchsanlage Groß-Dölln, Feldversuchsstrecken) zum Systemverhalten mit Pantograph Gen. 3.0.1/3.0.2 und 3.1 durchgeführt. Es konnten ausgenommen einem Testfall (Einfahrt in geerdeten Abschnitt, aktuell wird der Panto seitens des Fahrzeugs nicht gesenkt) alle mit positivem Ergebnis abgeschlossen werden.

PAN 2.3: Um Systemausfälle auf Grund mechanischer Belastungen bewerten und bestenfalls ausschließen zu können, wurden Messfahrten zur Charakterisierung der auftretenden Kräfte und Momente auf dem Scania-Testgelände in Södertälje durchgeführt (Rütteltests). Die neuen Anforderungen von Scania verursachen keine zusätzlichen oder höheren Schädigungen an den PAN-Komponenten bzw. führen zu keiner reduzierten PAN-Lebensdauer im Vergleich mit den Ergebnissen aus bisherigen Anforderungen in Form von Scania PSDs. Entsprechend der Testergebnisse wurde das PAN-Design bestätigt.

2.6.3 PAN.3

Nach Einrichtung der technischen und strukturellen Voraussetzungen für die Analyse der Fahrdaten (SW-Toolinstallationen für Datenübermittlung und Auswertung, Servereinrichtung für Daten, Anwenderzugänge, Datenübertragungs-HW) zu Beginn des Projektes, startete zeitnah die Datenerfassung und Auswertung. Die Datenauswertungen während der Tests erfolgten mit dem SW-Tool Railigent, und bei tiefergehenden Analysen mit dem DAPSV-SW-Werkzeug (Detaillierte Analyse PAN System Verhalten). Verwaltet wurden die Rückmeldungen über das Tool Redmine. Regelmäßige Auswertung der Test- und Felddaten und Pantoperformance mit Hilfe der Tools Railigent und Redmine (ereignisbezogene Analysen) über die gesamte Projektlaufzeit. Hierbei wurde die Auswertung über das Tool Railigent für die Belange von OL-Lkw vielfach angepasst (ca. 100 Anpassungen). Details hierzu sind in den Zwischenberichten der KJ2018-2020 geschildert.

Die Ergebnisse der Rückmeldungen (aus Railigent und Redmine) sind in Form von Änderungen in die Generationen 3.0.2 und 3.1 eingeflossen (37 technische Anpassungen (HW und SW)). Diese Anpassungen wurden teilweise in die Feldversuchsfahrzeuge eingebracht und trugen zu einer Erhöhung des

26. JULI 2022

Nutzungsgrades der Strecken (auf den Feldversuchsstrecken A1/A5), Erhöhung der Verfügbarkeit und Reduktion der Diagnoseereignisse bei.

2.6.4 PAN.4

Das Arbeitspaket PAN4 beinhaltete die Tätigkeiten der Weiterentwicklung, der Tests und Freigabe des Stromabnehmers. Der überarbeitete Pantograph erhielt dabei die Versions-Bezeichnung 3.0.2 für im Feld befindliche hochgerüstete Stromabnehmer bzw. 3.1 für neu gefertigte Exemplare. Die Tätigkeiten wurden im Sommer 2019 gestartet. Im April/Mai 2020 erfolgt die Hochrüstung und Inbetriebnahme des ersten Testfahrzeuges (El Lago) mit einem Stromabnehmer der Version PAN 3.1 mit dem anschließend ausführliche Systemtests auf der Testanlage in Groß Dölln.

Im Sommer 2020 erreichten die Tests einen stabilen Stand, so dass im Juli / August dann auch der erste Erprobungsträger „El Camino" auf den PAN 3.0.2 hochgerüstet und ein finaler Systemtest durchgeführt wurde. Auf Basis des erfolgreichen Testabschlusses konnten die nachfolgenden Tätigkeiten in Testdokumentation, Einbauerklärung und Handbüchern erfolgen und die Tätigkeiten mit der formalen Meilensteinerklärung am 28.9.2020 abgeschlossen werden.

Da bereits einige Optimierungen und Verbesserungen kurzfristig in das Pantographen-Design eingeflossen sind und auch durch Nachrüstungen ins Feld eingebracht wurden, sind die Weiterentwicklungen über drei verschiedene Wege in das Design eingeflossen.

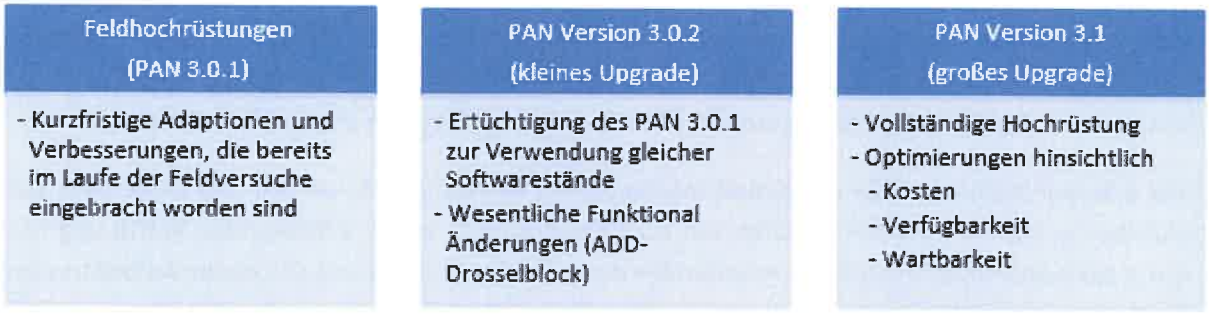


Abbildung 26: Weiterentwicklung des Stromabnehmers und Versionen

AP 4.x allgemein: Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die übergreifenden Tätigkeiten der Entwicklungs- und Freigabetätigkeiten durchgeführt. Neben der Testdokumentation auf SiL, HiL, MiL- und Systemebene im Rahmen „Validation and Verification Reports" wurden vor allem die notwendigen Tätigkeiten des Safety Prozesses fortgeführt. Dies beinhaltet die Bewertung und Abstimmung erkannter „Defects" und deren entsprechender Bewertung (z.B. Minor Defects). Falls notwendig wurden geeignete Kompensationsmaßnahmen für die Verwendung im Feld definiert und dokumentiert.
Darüber hinaus wurden die notwendigen Nachweise und Dokumentationen für die Freigabe und die Einbauerklärung des Stromabnehmers erbracht und erstellt.

PAN.4.1: Im Juli 2020 wurden spezifische Tests hinsichtlich der Kontaktgüte in Abhängigkeit der Kontaktkraft, der Fahrzeugrahmenhöhe und der Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt, um so das neue Design zu erproben. Detaillierte und quantitative Aussagen sind erst durch Langzeitversuche und deutlich höhere Fahrkilometer möglich, doch konnte qualitativ beobachtet werden, dass die Andruckkraft und die Fahrgeschwindigkeit einen höheren Einfluss auf die Kontaktgüte hat, als z.B. die Fahrbahnbeschaffenheit oder Fahrzeugrahmenhöhe. Im Nachgang der Tests wurde auf Basis der Erkenntnisse die Kontaktkraft im oberen Arbeitsbereich noch einmal durch den Einbau eines harten Anschlags etwas verbessert.

PAN.4.2: Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die Schleifleisten im Rahmen der großen und kleinen Wartungen der Versuchsträger und Feldversuchsfahrzeuge Verschleißanalysen unterzogen. Die Schleifleisten wurden hinsichtlich des Abriebs und möglichen Ausbrüchen oder Rissen untersucht. Generell konnte nur ein geringer Abrieb festgestellt werden. Ein Handlungsbedarf konnte eher aufgrund von Rissen an den Schleifleisten und dem beobachteten elektrischen Verschleiß an den Übergangskeilen zwischen Schleifleiste und Ablaufhörnen identifiziert werden. Für beide Themen sind Lösungsoptionen entwickelt worden, die jedoch durch längerfristige Tests erst validiert werden müssen und noch nicht ins Design des PAN 3.1 einfließen konnten.

PAN.4.3: Die Softwareentwicklung für das SW-Release 9 wurde im Frühjahr 2020 abgeschlossen und für die Systemtests freigegeben. Im Rahmen der Testaktivitäten im Sommer 2020 wurden einige Fehlerkorrekturen und Anpassungen (Re-Design) vorgenommen, so dass das Release 9.1 entsprechend für den Einsatz im Feld freigegeben werden konnte.

PAN.4.4: Zur Verbesserung der Wartungseigenschaften wurden Probleme und Verbesserungsvorschläge aus dem Bereich der Inbetriebsetzung und Wartung aufgegriffen und bearbeitet. Diese bezogen sich auf Verbesserungen im Fertigungstest, Verlegung von Kabeln und Schläuchen, Verbesserung spezifischer Komponenten und die Kostenoptimierung in einigen Bereichen. Zusätzlich wurde ab Sommer 2020 noch ein Dauerteststand zur Prüfung von Stromabnehmer-Komponenten auf Dauerbeanspruchung aufgebaut. Nach Konzeptionierung, Gefährdungsanalyse und Sicherheitskonzept wurde der Teststand im Herbst in Betrieb genommen. Der PAN bügelt permanent an und ab, so dass kritische Komponenten ermittelt werden können und Änderungen am An- und Abbügelverhalten analysiert werden können.

Abbildung 27: Dauerteststand des Stromabnehmers in Berlin

PAN.4.5: Um die Andruckkraftänderung des PAN aufgrund seitlichen Windes zu reduzieren, wurden Simulationen durchgeführt, ob durch dies durch separate Spoiler (Flügel) in den Wippen erreicht werden kann. Dazu wurden Simulationen des PAN Gen. 3.1 mit dem Model des El Camino mit Wind Deflector durchgeführt. Die Spoiler wurden in der Simulation modelliert und im Modell implementiert bzw. optimiert.

Ergänzung:

26. JULI 2022

Folgende Themen wurden im Rahmen des AP4 von OL-LKW konzeptionell untersucht und analysiert, deren Ergebnisse aber erst in zukünftigen Entwicklungsstufen in das Stromabnehmerdesign einfließen werden:

- Lösungsansatz zur direkten Erkennung der Oberleitung durch Einspeisung eines LF-Signals in die Oberleitung
- Detaillierte Analyse des Schwingungsverhaltens der Schleifleisten an der Oberleitung aus dem Zusammenspiel des Fahrzeuges und des Stromabnehmers und mögliche Ansätze zur Reduktion der Schwingungen um Verbesserung der Kontaktgüte zu erzielen
- Analyse des Schleifleistenabriebs anhand der befahrenen Schleifleisten und Vorschlag einer verbesserten Schleifleistengeometrie
- Bewertung der notwendigen Anpassungen und Aufwände für die Anpassung des Stromabnehmers auf eine höhere Systemspannung (1200 - 1500 VDC) und eine mögliche Vereinfachung der Hauptisolatoren inklusive der mechanischen Ausrichtung

Verbesserung des System- und Kommunikationskonzeptes in Abstimmung mit dem Fahrzeughersteller und Komponentenherstellern (Start-up Zeit des Kommunikationsmoduls, CAN Laufzeitüberwachung, Fehleranalyse der ECU)

2.6.5 PAN.5

Im Rahmen dieses Projektelementes stehen die Aufwände zur Überführung der Entwicklungsergebnisse aus PAN.4 in die Fertigung / Montage, die Fertigung der benötigten Komponenten, die Hochrüstung der Erprobungsträger und die Begleitung bei der Inbetriebsetzung und die Durchführung der entsprechenden Systemtests.

Im Fokus der Tätigkeiten stand die Planung der Verfügbarkeit der Erprobungsträger. Wie bereits in den Zwischenberichten beschrieben, wurden in der Umsetzung des Arbeitspaketes Anpassungen vorgenommen, um die Erprobungsträger möglichst dauerhaft für den Feldeinsatz bereit zu halten.

In der ursprünglichen Antragstellung des Projektes war vorgesehen, beide Versuchsträger mit den neuen Pantographen-Modifikationen auszustatten und diese zeitgleich zu testen. Dies hätte Synergien und geringere Risiken in der Integration und im Testablauf ergeben, aber beide Versuchsträger wären für eine längere Dauer nur in Groß Dölln einsetzbar gewesen.

Da ein Versuchsträger jedoch nicht rechtzeitig zur Verfügung stand und der zweite Versuchsträger möglichst unterbrechungsfrei auch im öffentlichen Straßenverkehr genutzt und erprobt werden sollte, wurde im Projektverlauf eine andere Herangehensweise umgesetzt. Hier wurde zunächst ein gesondertes Testfahrzeug (El Lago) mit den Modifikationen ausgestattet. Erst nach erfolgreichen Tests und technischer Freigabe wurde der 1. Erprobungsträger „El Camino“ mit den funktionalen Verbesserungen ausgestattet. Die Hochrüstung des 2. Erprobungsträger „El Pancho“ musste verschoben werden und konnte erst einige Monate vor Projektende durchgeführt werden.

PAN.5.1: Nach dem Design-Freeze im Frühjahr 2020 wurden im Rahmen dieses Arbeitspaket das Technical Data Package (TDP) für die Fertigung und Montage der Hochrüstpakete bzw. neuer, überarbeiteter Stromabnehmer erarbeitet. Hierzu wurden zwei verschiedene Hochrüstsätze konzipiert. Der große Hochrüstsatz beinhaltet alle Komponenten und Anweisungen, um einen Stromabnehmer der Gen. 3.01 komplett auf den Stand Gen. 3.1 hochzurüsten. Da diese Hochrüstungen aber auch Kompo-

nenten beinhaltet, die z.B. lediglich zur Kosten- oder Serviceoptimierung vorgesehen sind, wurde zusätzlich ein kleiner Hochrüstsatz definiert, der den Einsatz der überarbeiteten SWR 9.1 (ECU) erlaubt und die wichtigen funktionalen Anpassungen im ADD-Kreis beinhaltet. Neben der Erstellung der Zeichnungen Einkaufs- und Montagedokumentationen wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes auch die Vorgaben für den Werksabnahmetest (FAT) überarbeitet und angepasst.

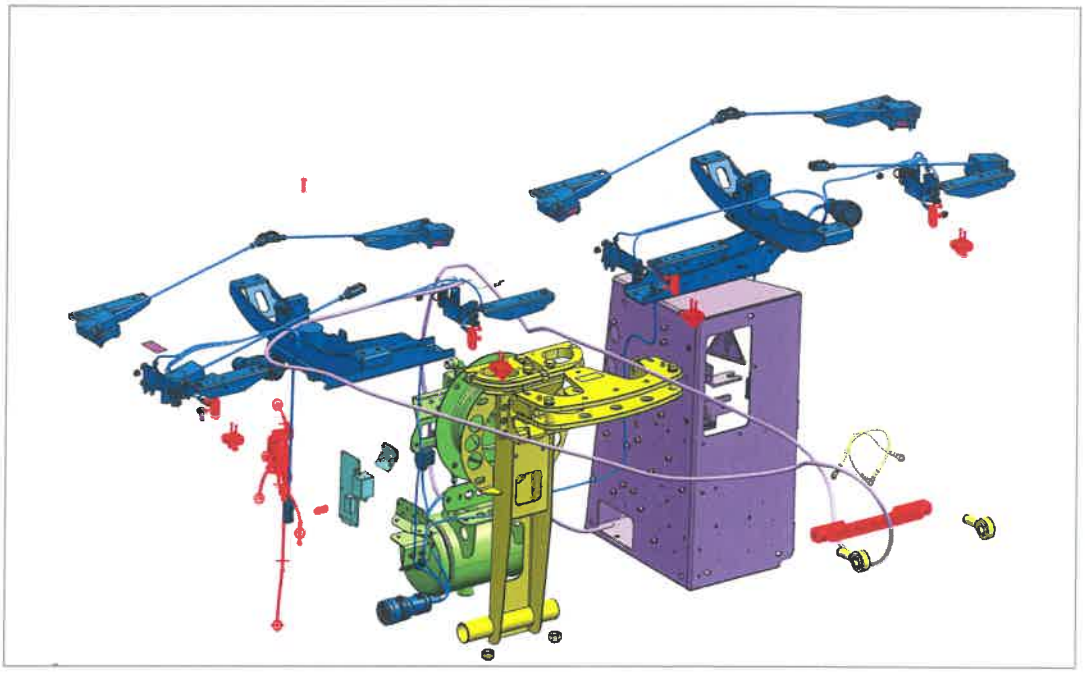


Abbildung 28: Im Rahmen der funktionalen Hochrüstung PAN Gen. 3.02 wurden neben der SW nur einige Komponenten angepasst (rot markiert).

PAN.5.2: Nach den erfolgreichen Laborversuchen im Teststand in Berlin und dem Design Freeze im April 2020 erfolgt anschließend im April / Mai die Hochrüstung des Testfahrzeuges El Lago mit dem großen Hochrüstpaket in Groß Dölln. Hierzu wurde vor dem Umbau eine entsprechende Wartung vorgenommen, die Umrüstung vollzogen und anschließend die entsprechende Neujustierung und Inbetriebsetzung. Anschließend wurden die ausstehenden Systemtests (51 Field test cases) durchgeführt und bei Bedarf bzw. nach Überarbeitung der Software zur SWR9.1 entsprechend wiederholt.

Erst nach erfolgreichem Abschluss der Tätigkeiten am El Lago und in der zeitlichen Abstimmung zum Gesamtprojekt wurde anschließend der Versuchsträger El Camino funktional hochgerüstet. Die Hochrüstung und Test des El Camino wurde mit der ersten Freigabe zur Fahrt auf öffentlicher Straße Ende Juli abgeschlossen. Die Hochrüstung des zweiten Versuchsträger El Pancho erfolgte erst im Herbst 2021.

PAN 5.3: Neben den Systemtests auf der Versuchsanlage (Field tests), die im PAN 5.2 anhand der umgebauten Fahrzeuge durchgeführt wurden, ist die Validierung und Verifikation des Systems auf den verschiedenen Ebenen Inhalt von PAN 5.3. Prinzipiell mussten alle Tests der Generation 3.01, bei denen die ECU SW getestet oder mitgetestet wird, innerhalb der Generation 3.1 wiederholt werden. Dies betrifft alle MIL-, SIL, HIL-Tests und auch fast alle Systemtests im Testlabor. Nur bei reinen HW-Komponententests und einigen Systemtests konnte auf eine Wiederholung verzichtet werden. In Summe entspricht dieses 2116 Testfällen, wobei 1233 davon auf automatisierte MiL-Tests entfällt.

26. JULI 2022

Nach Abschluss der Freigabe Ende September konzentrieren sich die Aufgaben auf den Support der Projektpartner hinsichtlich der Inbetriebsetzung des 2. Versuchträgers „El Pancho".

2.6.6 PAN.6

Das Arbeitspaket PAN.6 umfasste nach einer ersten Aufstockung (PAN 6.5A) sechs Unterarbeitspakete und widmete sich den systemtechnischen und koordinierenden Aufgaben rund um die Weiterentwicklung, Integration und Erprobung der Pantographen auf den Versuchsträgern. Die Unterarbeitspakete sind:

PAN.6.1 - Projektsteuerung und Berichterstattung
PAN.6.2 - Systemintegration, Interfacemanagement
PAN.6.3 - Konfigurations- und Dokumentenmanagement
PAN.6.4 - Testplanung und -koordination
PAN.6.5 - Gesamtsystemkonzeption und -auslegung OL-Lkw (Mitwirkung)
PAN.6.5A – erweiterte Simulationen (Aufstockung)

Im KJ2021 wurden die Aktivitäten zu den jeweiligen AP abgeschlossen, mit einem Schwerpunkt bei der Konsolidierung der Erfindungsmeldungen, sowie beim AP 6.5A.

Seitens SMO wurden 18 gemeinsame Erfindungsmeldungen mit Volkswagen, sowie 7 Siemens-Erfindungsmeldungen erarbeitet. Die Erfindungsmeldungen erstrecken sich über alle im Rahmen der Arbeitspakete behandelten Themen.

Bezgl. AP PAN 6.5A wurden weiterführende Simulationen eines elektrischen Gesamtsystems einschließlich Unterwerken und Mittelspannungseinspeisung durchgeführt.

Im Detail wurde im Arbeitspaket eine weiterführende Matlab-Simulink Simulation mit einer Mittelspannungseinspeisung und mehreren Unterwerken, die alle ein eigenständiges Oberleitungssystem speisten, abgebildet. Innerhalb der Oberleitungssysteme wurde ausgehend von einem Fahrzeug bis hin zur Volllast der Unterwerke unterschiedliche Szenarien untersucht. Aus den Simulationen wird ersichtlich, dass Störungen der Kontaktgüte zwischen Fahrzeug und Oberleitung keine Auswirkung auf das AC-Speisenetz, also Mittelspannung- und Hochspannungsversorgung haben. Die bei der Kontaktstörung auftretenden Stromspitzen stellen sich in der Mittel- und Hochspannungsversorgung lediglich als kurzfristige Lastsprünge dar. Schwingungen auf der Seite der Oberleitung zwischen den Fahrzeugen und den Unterwerken sind in der Mittel- und Hochspannungsversorgung nicht vorhanden.

Die Verkabelung auf Seiten der Mittelspannung zwischen den eHighway-Unterwerken und der Hochspannungsstation weist aufgrund von nennenswerten Induktivitäten in den Hochspannungstransformatoren und Kapazitäten der Mittelspannungsverkabelung eine niederfrequente Resonanzfrequenz von ca. 700 Hz auf, die durch harmonische Spannungsanteile der Brückengleichrichtung zu deutlichen Schwingungen angeregt werden. Für reine eHighway Mittelspannungsversorgungen sind diese auftretenden Schwingungen zwar unschön, aber tolerierbar. Für Mittelspannungsversorgungen, die aus einer öffentlichen Energieversorgung kommen und parallel zu der/den eHighway-Systemen weitere öffentliche Energie verteilen sind diese auftretenden Oberschwingungen allerdings nicht zulässig. Hierfür müssen weitere Maßnahmen wie ein Winkelversatz der Unterwerkstransformatoren von +/- 7,5 Grad elektrisch verwendet, oder der Einsatz von gesteuerten Gleichrichtern vorgenommen werden.

26. JULI 2022

2.6.7 PAN.7 -Aufstockung „HV-ready“

Im Rahmen des AP9 des Projektes OL-LKW wurden u.a. intensive Abstimmungen und Simulationen zur Auslegung des eHighway Systems durchgeführt. Diese Auslegung wurde zunächst losgelöst von den Demonstratoren des OL-LKW-Projektes geplant und durchgeführt.

Als Ergebnis der betrachteten Auslegungsmodelle ergab sich, dass eine Umstellung des eHighway-Systems auf eine höhere Systemspannung von 1,2 kV DC (nominal) nach neuerem Stand der Technik möglich ist und für die Umsetzung nicht nur empfehlenswert, sondern für einen wirtschaftlichen Roll-Out des Systems (Reduktion der Infrastrukturkosten) auch unverzichtbar sei.

Um das eHighway System inklusive Infrastruktur und Fahrzeug auf eine Spannungsebene von 1,2 kV DC anzupassen, waren auch Änderungen am Stromabnehmer unvermeidbar, da elektrische Komponenten, Isolationsabstände und Elektronik auf 600 VDC ausgelegt sind und angepasst werden mussten.

Vor diesem Hintergrund wurde im Arbeitspaket PAN.7 eine weitere Anpassung des Stromabnehmers vorgenommen, in der auch weitere Erkenntnisse der laufenden Tests mit den Erprobungsträgern und aus den Feldversuchen eingeflossen sind.

Im Einzelnen konnten die nachfolgenden Erkenntnisse und Themen in der Weiterentwicklung adressiert werden:

- Die Betrachtung der Fertigungs- und Wartungszeiten zeigte, dass die mechanische Einstellung des Stromabnehmers sehr arbeitsaufwendig ist. Durch Entwicklung einer spezifischen Positioniervorrichtung konnte der Zeitaufwand für diese Aufgaben um ca. 2/3 reduziert werden.
- Die Systemumstellung auf 1,2 kV DC hat Auswirkungen auf verschiedene Komponenten (z.B. Überspannungsableiter, Sicherungen, Isometer) und Auslegungen (z.B. Kriechstrecken, Isolatoren) des Pantographen, welche im PAN3.2 weitestgehend umgesetzt worden sind (Betrieb für 670 VDC und vorbereitet für 1,2 kVDC).
- Die Auswahl geeigneter Komponenten hat gezeigt, dass es am Markt keine für den Automobilbereich geeigneten Isolations-Überwachungsgeräte (Isometer) für den Bereich von 1,2 KV DC gab. Für die Isometer wurde ein Lieferant gefunden, die Anforderungen geklärt und eine Entwicklung gestartet.
- Im Feldbetrieb wurden stärkere Salz- und Schmutzablagerungen an den Isolatoren beobachtet als ursprünglich erwartet. Um den Effekt zu mindern und auch im 1,2 kV System ausreichend Kriechstrecken zu gewährleisten, wurden die Isolatoren an beiden Isolationsebenen mit separaten hydrophoben Beschichtungen versehen.
- Die Isolationsmessung der verschiedenen Isolationsebenen und durch verschiedene Isometer mussten zwischen PAN und Fahrzeug zeitlich koordiniert werden, um gegenseitige Beeinflussungen auszuschließen. Die Lösungsfindung erfolgte dabei im engen Austausch mit dem Fahrzeughersteller Scania.
- Die HV-Box ist deutlich vereinfacht worden, indem die Gridbox-Funktionalität (Polaritätskontrolle, Vorladesteuerung) und die HV-Schütze ins Fahrzeug verlagert wurden. Die Teilezahl ist dadurch signifikant verringert und die Masse um ca. 5kg reduziert worden. Eine standardisierte nachträgliche Integrierbarkeit von Energiezählern ist berücksichtigt worden. Des Weiteren konnte auf die Verwendung eines RFID-Scanners verzichtet werden.

26. JULI 2022

- Um die Systemarchitektur und Sicherheitsbetrachtung des Pantographen zu vereinfachen, ist eine Lösung in Hard- und Software erarbeitet worden, welche selbstständig die sicherheitsrelevante **Detektion der Oberleitung und korrekte Positionierung** übernimmt. Hierzu konnte eine Technologievorauswahl durchgeführt werden und Erprobungen mit Lidar, Radar, ToF und LF-Modulation durchgeführt werden. Für die weitere Entwicklung des Systems bietet sich eine sinnvolle Kombination einer Auswahl dieser Technologien an.

Die Aktivitäten zur Weiterentwicklung des Stromabnehmers wurden bis zur Datenübergabe ans Werk / Fertigung (Technical Data Package bzw. interner Meilenstein M250) durchgeführt. Der erste Aufbau eines Stromabnehmers und der nachfolgende Systemtest zur Pilotfreigabe (M270) sind außerhalb des Projektes „OL-LKW" fortgeführt worden.

Kurzzusammenfassung Ergebnis HV-Simulation nach PAN.7:

Es erfolgte eine HV-Simulation mit mehreren Fahrzeugen an der Oberleitung. Aus der Simulation wird ersichtlich, dass Störungen der Kontaktgüte zwischen Fahrzeug und Oberleitung keine Auswirkung auf das AC-Speisenetz, also Mittelspannung- und Hochspannungsversorgung hat, bis auf die auftretende Stromspitze, die sich wie ein kurzfristiger Lastsprung darstellt. Auffällig bei der Betrachtung zum THD (total harmonic distortion) für die Mittelspannungsversorgung ist, dass bei geringer Last am Unterwerk die Kurvenform der Gleichrichtung auf der Mittelspannungsversorgung gut zu erkennen ist und einen entsprechenden Wert von ca. 13% liefert. Zu den weiteren Ergebnissen verweisen wir auf den hinterlegten technischen Bericht.

2.7 AP 4: Prototypenfahrzeuge

2.7.1 Prototypen-LKW

Der wesentliche Teil dieses Arbeitspaketes ist die Bereitstellung der beiden Scania OL-LKW. Die LKW sind mit unterschiedlich stark elektrifizierten Antriebssträngen ausgestattet. Der erste der beiden LKW ist der Typ-I-LKW. Dieser LKW trägt bei Scania den internen Namen „El Camino".

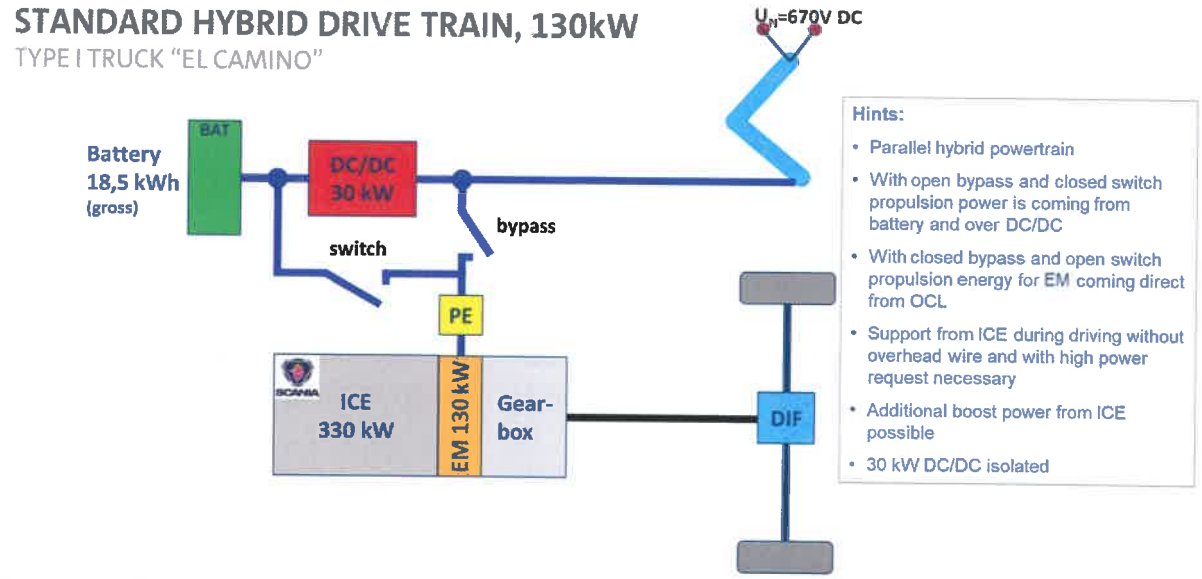


Abbildung 29: Schematischer Aufbau des Antriebsstrang von Typ-I LKW („El Camino")

Dieser Lkw ist mit einem Hybridantriebsstrang mit einer elektrischen Antriebsleistung von 130 kW und einem Batteriemodul mit 18,5 kWh Energieinhalt (brutto) ausgestattet (siehe **Abbildung 29**).

Der zweite LKW (Typ-II, „El Pancho“) ist deutlich stärker elektrifiziert. Seine elektrische Leistung beträgt 260 kW und sein Batteriesystem besteht aus 4 Modulen mit zusammen 74 kWh.

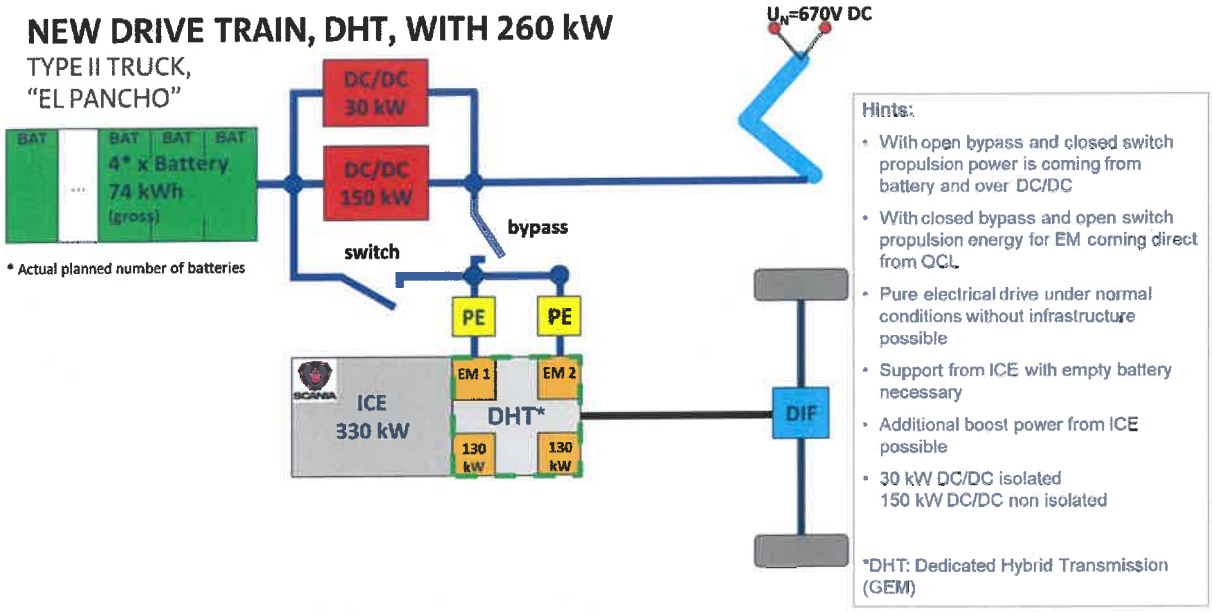


Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Antriebsstrang von Typ-II LKW („El Pancho“)

Beide Parallel-Hybrid-Antriebsstränge sind mit einem schaltbaren Bypass zur direkten Verbindung der E-Maschinen mit der OL und einer schaltbaren Verbindung der E-Maschinen zu den Batterien ausgestattet (switch). Bei wahlweisem Schließen der Verbindungen wird im ersten Fall die elektrische Antriebsenergie direkt aus der OL entnommen und die Batteriemodule können nebenbei über die DC/DC-Wandler (Ladegeräte) geladen werden. Bei guter Netzabdeckung kann ein rein-elektrischer Betrieb erfolgen, ohne dass die Batterien jemals an einer stationären Ladesäule nachgeladen werden müssen. Dies ist im Vergleich zu BEV-LKW ohne Pantograph relevant, sobald LKW voll-automatisch fahren können werden. Da für den Fahrer dann keine besonderen Pausen mehr eingehalten werden müssen, würde jegliche „Ladepause“ einen Zeitverlust bedeuten. Oberleitungs-LKW könnten in diesem Szenario durchgehend im Fahrbetrieb bleiben.

Im zweiten Fall der schaltbaren Verbindung erfolgt die Energieversorgung der E-Maschinen aus der Batterie und ggf. zusätzlich über die Wandler aus der OL. Dieses ist auch der elektrische Fahrmodus ohne OL. In beiden Antriebssträngen ist – wie bei jedem Parallelhybrid - ein zusätzlicher Antrieb über den Verbrennungsmotor möglich.

Der Fahrzeugaufbau ist termingerecht bei Scania in Schweden durchgeführt worden. Bereits im September 2018 war das Fahrzeug in Hardware aufgebaut (siehe **Abbildung 31**) und wurde von Scania auf der IAA in Hannover außerhalb des Forschungsprojektes gezeigt (**Abbildung 32**).

Nach dem Aufbau der Hardware erfolgte die Inbetriebnahme auf dem Siemens Prüfgelände in Groß Dölln. Auch hier konnte schnell ein fahrfähiger Zustand erreicht werden, so dass der LKW bereits bei der Abnahme der Teststrecke Anfang Dezember 2018 in Hessen im Rahmen des ELISA-Projektes eingesetzt wurde. Außerdem beteiligte sich Scania mit dem Fahrzeug an den von Hessen-Mobil in Auftrag gegebenen Filmaufnahmen.

26. JULI 2022

Abbildung 31: Scania Typ-I LKW („El Camino") nach dem Aufbau der Hardware in Schweden

Abbildung 32: Scania Oberleitungs-LKW („El Camino") auf der IAA in Hannover

Aufgrund von Verzögerungen bei der Inbetriebnahme und der Verwendung dieses LKWs für Abnahme- und Präsentationsfahrten im Feldversuch, erfolgte die Übergabe an das Forschungsprojekt „Oberleitungs-LKW" erst Anfang Juni 2019 (**Abbildung 33**).

26. JULI 2022

Abbildung 33: „El Camino“ mit Trailer

Die erste Stufe des mechanische und elektrische Aufbau des 2. LKWs („El Pancho“) ist in 2020 von Scania abgeschlossen worden (**Abbildung 34**). Mit dem LKW wurden zunächst Tests des Antriebs und des Pantographensystems in Schweden und auf dem Siemens Testgelände Groß Dölln durchgeführt. Anfang 2021 wurden noch einige Systemerweiterungen hinsichtlich des größeren DC/DC und der 4 Batteriepacks durchgeführt.

Abbildung 34: Fertig aufgebauter Typ II-OL-LKW „El Pancho“

In **Abbildung 35** sind weitere Ansichten des Typ-II-LKWs dargestellt. In **Abbildung 36** sind die Positionen der 4 Batteriemodule mit je 18,5 kWh Brutto-Energie dargestellt. Eines befindet sich auf der linken Fahrzeugseite, zwei rechts und das vierte im unteren Teil des Pantographen-Towers. Hierdurch verlängert sich die Fahrzeuglänge gegenüber dem Typ-I-LKW um ca. weitere 400 mm. Der Achsabstand der Zugmaschine im Typ-I-LKW ist ca. 200 mm länger als bei einer Standardzugmaschine. Eine Ausnahmegenehmigung für die Überlänge der Fahrzeuge liegt vor.

26. JULI 2022

Abbildung 35: Ansichten Typ-II LKW („El Pancho")

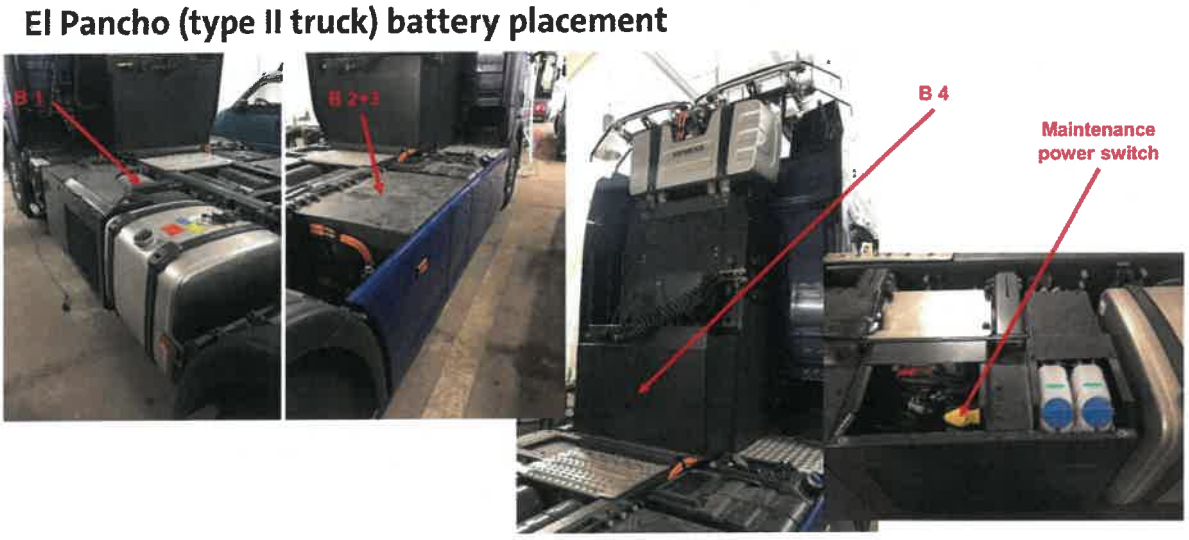


Abbildung 36: Positionen der 4 Batteriemodule im Typ-II LKW („El Pancho")

Mit dem ersten LKW (El Camino) wurden diverse Versuchsfahrten durchgeführt. Ein Schwerpunkt bildeten Fahrten auf der OL-Strecke in Hessen (Projekt ELISA). Schon im Herbst 2019 konnten einige Testfahrten durchgeführt werden (siehe **Abbildung 32**). Zunächst nur mit der Zugmaschine, dann auch mit Trailer (siehe **Abschnitt 2.7.2**).

Neben Fahrten unter Oberleitung in Hessen, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg wurden auch Vergleichsfahrten außerhalb der Oberleitungsstrecken durchgeführt, um Vergleichsdaten vom konventionellen Einsatz des Hybridfahrzeugs für vergleichende Analysen zur Verfügung zu haben.

Hierzu wurden z.B. mehrere Fahrten von Wolfsburg durch den Harz mit unterschiedlichen Beladungszuständen durchgeführt. Diese Strecke beinhaltet unterschiedliche Fahrprofile. Neben Autobahn und Landstraße sind auch diverse Steigungs- und Bergabfahrten im Oberharz enthalten.

26. JULI 2022

Eine weitere Vergleichsfahrt führte von Koblenz nach Trier. Diese Strecke führt ausschließlich über die Autobahn und dient als Vergleichsstrecke für Verbräuche auf anspruchsvollen Autobahnfahrten.

All diese Vergleichsfahrten dienen zum Vergleich der Hybrid-OL-LKW mit konventionellen und Hybrid-LKWs sowie zum Vergleich zwischen den beiden LKW im Projekt. Die Daten dienen auch zur Optimierung der Simulations-Programme. Ziel soll es u.a. sein, Verbrauchseinsparungen für beliebige OL-Strecken und OL-Fahrzeuge berechnen zu können.

Die Übergabe des zweiten LKWs verzögerte sich pandemiebedingt und zusätzlich wegen technischer Probleme bei der Inbetriebnahme des komplizierten technischen Systems. Zum Ende des Projektes konnten aber auch mit diesem LKW Versuche zur Analyse des Getriebesystems durchgeführt werden. Außerdem konnte in einem Stichversuch auch die Funktion der parallelen Entnahme von elektrischer Energie aus der Oberleitung zum Antrieb und gleichzeitigem Laden der Batterie mit voller Leistung gezeigt werden und damit das Konzept bestätigt werden.

Neben Fahrten innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurden auch Kooperationsfahrten mit LKWs aus dem Projekt ELISA und einem Siemens-eigenen OL-LKW durchgeführt (**Abbildung 37**). Hierbei wurden erste hochfrequente Messungen der Ströme und Spannungen im LKW bei Wechselwirkungen zwischen mehreren LKWs und der Infrastruktur durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass dieses Thema dringend betrachtet werden muss und bestätigt die beantragten und bewilligten Änderungen im Projekt.

Abbildung 37: Gemeinsame Testfahrten mit dem ELISA-LKW (links) und einem Siemens-eigenen LKW (Mitte) auf der Teststrecke auf der A5 in Hessen.

Neben der Nutzung für Forschungsfahrten war im Rahmen des Projektes auch geplant, die LKWs für Präsentationen und Kommunikationsarbeit zu verwenden. Der „El Camino" wurde z.B. dazu Ende September 2019 auf der NUFAM (Nutzfahrzeugmesse) in Karlsruhe gezeigt (**Abbildung 38**).

26. JULI 2022

Abbildung 38: „El Camino" auf dem Scania-Gemeinschaftsstand bei der NUFAM in Karlsruhe

Am 22.02.2020 wurde der LKW im Rahmen einer Schulung für Feuerwehren in Schleswig-Holstein gezeigt. Hierbei wurde über die Besonderheiten von Hybrid-LKWs und der Umgang mit Oberleitungs-LKWs bei Unfällen demonstriert.

Abbildung 39: Feuerwehr-Schulung alternative LKW-Antriebe am 22.02.2020

Am 23.09.2020 fand ein Workshop der Projektpartner in Baden-Württemberg statt. Der Aufbau der Strecke hatte begonnen. Leider ist die final aufgebaute Strecke kürzer als ursprünglich geplant. In **Abbildung 40** sind die beiden Streckenabschnitte dargestellt.

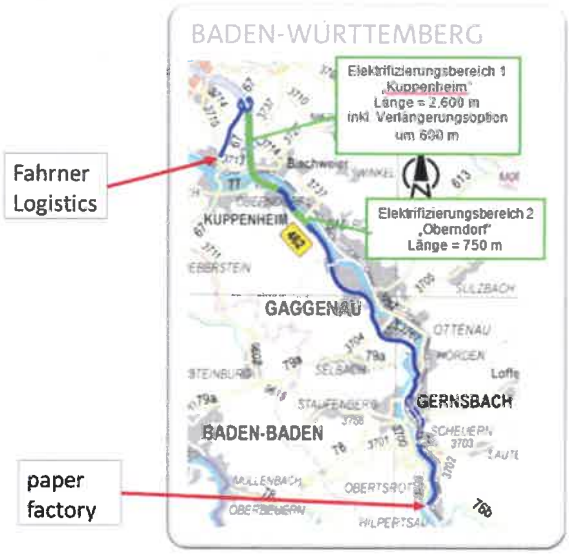


Abbildung 40: Aktuelle Planung der Testrecke in Baden-Württemberg

Im Rahmen des Workshops wurde den Teilnehmern auch der Oberleitungs-LKW „El Camino" gezeigt. Anschließend wurde die Strecke besichtigt. Eindrücke vom damaligen Stand der Bauarbeiten sind in Abbildung 41 zu sehen. Im Anschluss an den Workshop wurde die Strecke mehrmals befahren – natürlich noch ohne Nutzung der Oberleitung - und Daten aufgezeichnet, die dann später dem Vergleich mit Nutzung der OL dienen sollen.

26. JULI 2022

Abbildung 41: Bilder vom Aufbau der Teststrecke (23.09.2020)

Am 28.06.2021 fand dann die offizielle Übergabe und Einweihung der Teststrecke in Baden-Württemberg statt. Das Event wurde mit dem „El Camino" aus dem Projekt sowie mit OL-LKW von Siemens und Scania unterstützt.

Abbildung 42: Einweihung der Teststrecke in auf der B462 am 28.06.2021 (eWayBW)

2.7.2 Trailer

Für den Forschungsbetrieb ist auch ein Trailer notwendig, um den realen Fahrbetrieb zu simulieren. Ein erster Sattelauflieger der Firma Schwarzmüller mit rotem LKW auf der Plane (Designentwurf siehe **Abbildung 43**) wurde Ende 2018 übergeben ein zweiter mit blauem LKW (**Abbildung 44**) dann Ende 2019.

26. JULI 2022

Abbildung 43: Design der Trailerplane (Entwurf)

Beide Trailer sind mit Betongewichten ausgestattet, um den Ladezustand zu simulieren. Um nicht ständig die Betongewichte beladen und entladen zu müssen, wird ein Trailer voll beladen und der zweite Trailer nur zur Hälfte beladen. Ein Änderung des Beladungszustands ist dann schnell durch einen Wechsel des Trailers möglich. Beide Trailer wurden sowohl von Volkswagen als auch von Siemens für Testfahrten genutzt.

Die seitlichen Planenflächen und die Rückseite der Trailer werden als Werbefläche für das Projekt genutzt. Auf der Plane am 1. Trailer wurde der LKW in Rot dargestellt (so wie „El Camino"). Die Farbe des LKWs auf der Plane wurde beim 2. Trailer geändert und ist der Farbe (Blau) des 2. OL-LKWs angepasst worden.

Abbildung 44: Ausgeführtes Design der Plane am 2. Trailer

2.8 AP 5: Innovatives Kühlungssystem und Thermomanagement

2.8.1 Einfluss der elektrischen Einspeisung auf den Wärmehaushalt

Zu Beginn des Projekts wurde davon ausgegangen, dass ein elektrifizierter Oberleitungs-LKW höhere Anforderungen an das Thermomanagement stellt als bekannte hybridische PKWs. Hintergrund ist vor

26. JULI 2022

allem, dass mit dem Pantographen große elektrische Leistungen vom Fahrzeug während der Fahrt aufgenommen werden. In diesem Zusammenhang wurden die damit verbundenen Verluste und die sehr individuellen Betriebszustände als Herausforderungen vermutet.

2.8.2 Analyse der Thermomanagement-Topologie in LKW

Für ein grundsätzliches Verständnis über Anforderungen bei der Auslegung von Kühlkreisläufen in LKW hat Anfang 2018 ein Treffen bei Scania in Södertälje (SWE) stattgefunden. Einerseits wurden dabei etablierte Prüfszenarien von LKW mit denen von PKW abgeglichen. Andererseits wurden auch spezifische Zyklen zur Auslegung von Oberleitungs-LKW diskutiert.

Entsprechend der Vorhabensbeschreibung wurde die Fa. tlk Thermo damit beauftragt ein Modell des thermischen Netzwerks aufzubauen, um darauf basiert spätere Simulationen zur Analyse und eventuelle Optimierungen durchzuführen. Ein weiterer Workshop in Södertälje Mitte 2018 wurde als Auftaktveranstaltung der Modellaufbereitung genutzt, wobei alle relevanten Komponenten des thermischen Netzwerks durchgesprochen wurden. Ergebnis des Treffens war die Zuordnung von Bauteilen zu verantwortlichen Fachabteilungen bei Scania um im Nachgang die erforderlichen Daten zu Parametrierung des Modells einzuholen.

Zunächst wurde hierbei ein rudimentäres Abbild des thermischen Netzwerks eines Basis Hybrid-LKWs inkl. aller medienführenden Kreisläufe erstellt. Im zweiten Schritt wurde begonnen, die Komponenten entsprechend ihrem realen Verhalten zu parametrieren. Ein weiterer Bestandteil des Modells stellt die Umsetzung der aufgeprägten Lastzustände der einzelnen Komponenten dar. Basis hierfür sind Fahrzyklen, die Informationen der zu befahrenden Strecken, wie Geschwindigkeiten, Steigungen, sowie Speiseleistung aus der Oberleitung enthalten. Darauf aufbauend wird ein vereinfachtes Abbild des Antriebsstrangs genutzt, um die gesamte Wirkungsgradkette, ausgehend von der Radleistung bis zu den Energiequellen, zu berechnen.

Das erarbeitete Thermomanagement-Modell bildet das gesamte thermische Netzwerk des Fahrzeugs ab. Wie in Abbildung 45 zu sehen, wurden auf der Basis eines Kreislaufschemas des Basis-Hybrid-LKWs alle medienführenden Komponenten hydraulisch miteinander verknüpft. Zum Einsatz kommt hier die Simulationssoftware Dymola®, die vor allem in der Kombination von Kühlmittel- und Kältemittelkreisläufen etabliert ist.

26. JULI 2022

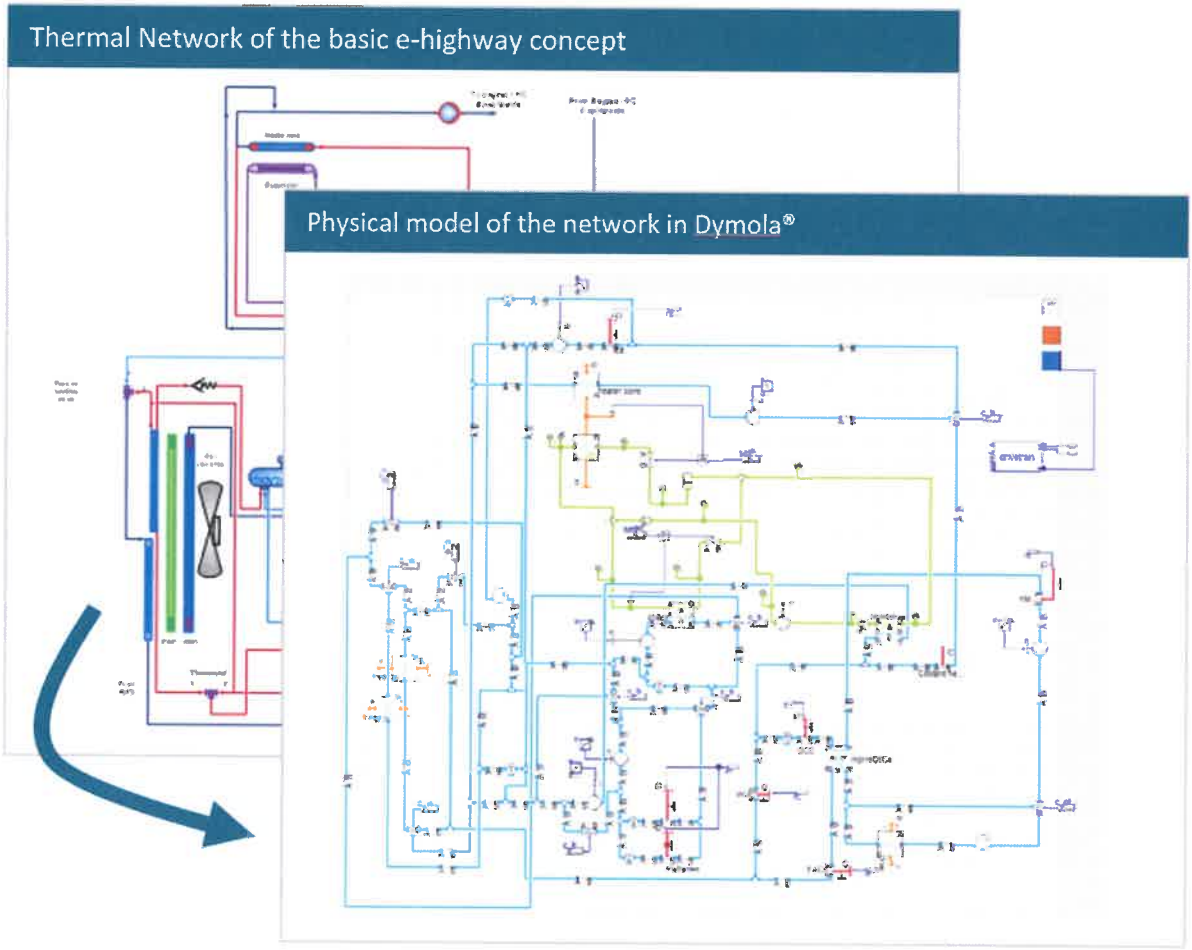


Abbildung 45: Überführung des thermischen Netzwerks in die Modellstruktur in Dymola®

Die Modellerstellung selbst erfolgte in enger Abstimmung mit Entwicklungsabteilungen von Scania. Neben regelmäßigen Telefon-Konferenzen, wurde im Februar 2019 ein Workshop in Södertälje (SWE) durchgeführt, um den damaligen Modellstand zu begutachten und noch ausstehende Modellparameter zu identifizieren. Die Parametrierung spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Hydraulische Druckverluste und Betriebscharakteristika jeder Komponenten müssen der Realität entsprechen, um stationäre Aufteilungen von Massenströmen verlässlich wiederzugeben. Thermische Massen und Wärmeübergangsverhalten sind hingegen entscheidend, um das dynamische Systemverhalten hinreichend exakt zu beschreiben.

Darüber hinaus wurden die Regelverhalten von Stellgliedern im Hydraulikkreis abgestimmt. Beispielsweise kommen im System etliche Ventile mit unterschiedlichen Charakteristika (proportional, oder diskret geschaltet) zum Einsatz. Für die jeweiligen Komponenten wurden grundlegende Strategien festgelegt, die auf die Einhaltung von Grenztemperaturen und Mindestvolumenströme abzielen.

Eine Herausforderung stellte die Einbindung der Längsdynamik, bzw. des damit verbundenen Effizienz-Modells des Antriebsstrangs dar. Zwar wird in anderen Arbeitspaketen mit sehr detaillierten Längsdynamik-Modellen gearbeitet, allerdings lassen sich diese Modelle nach heutigem Kenntnisstand nicht in Dymola® überführen. Daher wurde stattdessen auf Basis der vorhandenen Modellparameter ein vereinfachtes Antriebsstrang-Modell in Dymola® aufgebaut. Mit dieser Lösung ist das hier aufgebaute Simulationsmodell unabhängig lauffähig. Auf Basis eines eingangs definierten Fahrprofils

26. JULI 2022

werden als Ergebnisse alle Zustandsgrößen der Medien und Komponenten, sowie Effizienzen/Energieverbräuche errechnet und ausgegeben. Das Fahrprofil beinhaltet dabei relevante Zeitprofile wie Außentemperatur, Fahrzeugmasse, Fahrgeschwindigkeit, Höhenprofil und Einspeiseleistung über die Oberleitung.

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt mit der Post-Processing-Software DaVe®. Wie in Abbildung 46 dargestellt, gibt das Tool einen strukturierten Überblick über alle relevanten Daten. Für jeden Zeitschritt des Fahrprofils sind folgende Informationen verfügbar:

- LogpH-Zustandsdiagramm der Kältekreisläufe
- Darstellung des Geschwindigkeitsprofils des aktuellen Fahrprofils
- Übersicht zum Setup der Kreislaufsimulation
    - Aktiver Fahrzyklus
    - Aktive Betriebsstrategie
    - Parametrisierte Umgebungsbedingung
- Dynamische Kreislaufdarstellung mit qualitativer Massenstromverteilung, Komponentenbezeichner sowie aller relevanten Größen wie:
    - Kühlwasser- und Lufttemperaturen
    - Kühlwasser- und Luftmassenströme
    - Abwärmeleistungen

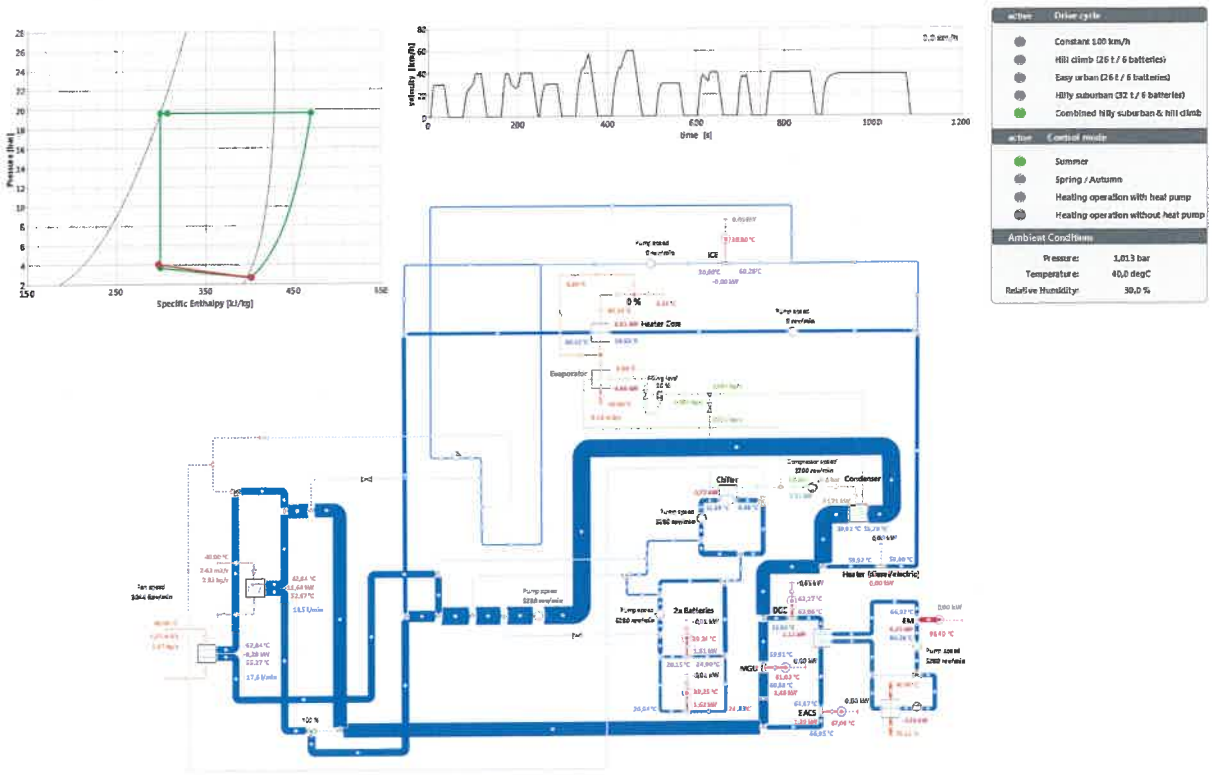


Abbildung 46: Zyklusbasierte Darstellung der Berechnungsergebnisse mit dem Tool DaVe®

Bereits für 2019 war vorgesehen, pantographen-spezifische Umfänge im Modell mit einzubinden. Relevant schien hier vor allem die Gleichspannungswandler, an denen aufgrund des hohen Leistungsumsatzes erhebliche Abwärmen entstehen. In anderen Arbeitspaketen gab es Untersuchungen und Diskussionen über unterschiedliche Detailumsetzungen der Oberleitungseinspeisung. Je nach Bauart der

Spannungswandler (hinsichtlich galvanischer Entkopplung) wird sich das Thermomanagement mit anpassen müssen. Je nach Konzept kann es sinnvoll sein, separate „Insel-Kreisläufe" zu verwenden.

Im Jahr 2020 wurde das in 2019 erstellte thermische Fahrzeug-Modell für simulative Untersuchungen des Systems genutzt. Hierbei zeigten sich im Vergleich zu konventionellen PKW vor allem höhere Klimatisierungsbedarfe für die verhältnismäßig große Fahrerkabine und die Batterie. Dementsprechend ist die Effizienz des elektrischen Klimakompressors (P_{el}=8 kW) auch von hoher Bedeutung für den Gesamt-Energieaufwand des Thermomanagements für den elektrifizierten Antriebsstrang. Als zentrale Herausforderung wurde die Verteilung von Kühlmittel-Strömen und –Kapazitäten festgestellt. Die vorliegenden Systeme (Typ 1 & Typ 2) bieten hierzu keine ausreichende Variations-Möglichkeit und lassen auch nicht die einfache Nachrüstung solcher Möglichkeiten zu.

Die simulativen Arbeiten zeigen, dass ursprünglich vermutete Änderungsbedarfe und Optimierungspotentiale nicht vorliegen. Die Aufstellung und Analyse der thermischen Anforderungen führte zur Erkenntnis, dass die thermisch kritischen Anforderungen des spezifischen Umfangs des OL-LKW durch die Lastenhefte „konventioneller" Hybrid-LKWs bereits abgedeckt werden. Eingriffe in den Aufbau des Kühlkonzepts und die Funktionen des Thermomanagements sind daher zunächst nicht notwendig.

Ursprünglich war geplant, wesentliche messtechnische Erkenntnisse mit dem Typ-2-LKW zu gewinnen. Dessen Verfügbarkeit hat sich jedoch verzögert. Detaillierte Untersuchungen des thermischen Verhaltens konnten daher nicht durchgeführt werden. Während der durchgeführten Versuchsfahrten anderer Arbeitspakete sind jedoch keine thermischen Probleme offenkundig geworden. Es mussten daher auch keine Maßnahmen am Aufbau des Systems oder im Thermomanagement ergriffen werden.

2.8.3 Ableitung von spezifischen thermischen Anforderungen

Für die Oberleitungs-LKW wurde, auch hinsichtlich des Kühl- und Thermomanagementsystems, die Technik eines Plug-In Hybrid LKW als Basis verwendet. Die simulativen und zum Teil auch praktischen Untersuchungen am Betrieb als OL-LKW und den zugehörigen Komponenten ergeben keine thermisch-kritischen Anforderungen, die Änderungen im Grundkonzept erfordern würden.

Im Vergleich zu konventionellen PKW zeigen sich vor allem höhere Bedarfe an Kälteleistung, die durch die verhältnismäßig große Fahrerkabine und die große Batterie verursacht werden.

Dementsprechend ist die Effizienz des elektrischen Klimakompressors (Pel=8 kW) auch von hoher Bedeutung für den Gesamt-Energieaufwand des Thermomanagements für den elektrifizierten Antriebsstrang. Als zentrale Herausforderung wurde die Verteilung von Kühlmittel-Strömen und –Kapazitäten festgestellt. Die vorliegenden Systeme (Typ 1 & Typ 2) bieten hierzu keine ausreichende Variations-Möglichkeit und lassen auch nicht die einfache Nachrüstung solcher Möglichkeiten zu.

2.9 AP 6: Batterie

2.9.1 Grundlagen

Basis der Betrachtungen im AP 6 Batterie ist ein mit PHEV 28 Ah-Zellen aufgebautes Batteriesystem, welches in den beiden Trucks in unterschiedlichen Konfigurationen eingesetzt wird. Truck 1 besteht aus einem Batteriesystem, wohingegen Truck 2 aus vier parallel geschalteten Batteriesystemen besteht. Ein Batteriesystem ist aus 180 in Reihe geschalteten 28 Ah-Zellen aufgebaut, woraus sich ein entsprechender Nennenergieinhalt berechnen lässt. Aus dem nutzbaren SOC-Bereich des jeweiligen

26. JULI 2022

Trucks ergibt sich analog ein nutzbarer Energieinhalt. Die entsprechenden Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht der Batterien

Truck	Name	Nennenergieinhalt	SOC-Fenster	nutzbarer Energieinhalt
Typ 1	El Camino	18,5 kWh	15 % - 80 %	12 kWh
Typ 2	El Pancho	74 kWh	15 % - 80 %	48,1 kWh *

Für die beiden Fahrzeuge ergeben sich aus den Limitierungen der Zellen Kennfelder für die Dauer- und die Spitzenleistung in Lade- und in Entladerichtung. Insbesondere die Limitierung in Laderichtung hat einen großen Einfluss auf das Verhalten von Truck 2 an der Oberleitung.

2.9.2 AP 6.1 Analyse der Profile Laden/Entladen und Ableitung relevanter Belastungen für Oberleitungs-LKW

Als Leistungsprofil für die Zelltests auf Prüfstandebene wurde eine virtuelle Strecke „Koblenz-Trier" generiert und auf dieser mit dem Truck 2 ein Leistungsprofil simuliert. Die Abbildung 47 zeigt die Lade-/Entladeleistung auf Zellebene (P_cell_W) und den Ladezustandsverlauf bei unterschiedlichem Start-SOC. Die gelb gepunktete Kurve (min_Start_SOC(abs)) zeigt den Ladezustand über der Zeit (Streckenverlauf) mit dem minimal möglichem Start-SOC. Bei ca. 420 Sekunden wird der SOC 0% erreicht, deshalb kann zum Zeitpunkt t=0 nicht mit einem geringeren SOC als ca. 15% gestartet werden. Die blau gepunktete Kurve (max_Start_SOC(abs)) zeigt den Ladezustand über der Zeit mit dem maximal möglichem Start-SOC für die simulierte Strecke „Koblenz-Trier". Bei ca. 4.120 Sekunden wird der maximal mögliche SOC 100% erreicht, deshalb kann zum Zeitpunkt t=0 nicht mit einem höheren SOC als ca. 72% gestartet werden. Die Strecke besteht aus insgesamt sechs Oberleitungs-Abschnitten, die durch die entsprechenden Ladephasen (positive Leistung) erkennbar sind.

Aus den Vorgaben des Zellherstellers ergibt sich eine Limitierung der maximal möglichen Ladeleistung bei längerer Fahrt mit Energieeinspeisung durch die Oberleitung, d.h. das Batteriemanagementsystem begrenzt den möglichen Ladestrom und die Batterie geht ins Derating. Mit Derating wird die Reduzierung der Stromgrenzen für das Laden bzw. Entladen von den Werten der Kurzzeitbelastung auf die Werte für die Dauerbelastung beschrieben. Entsprechend der Zelldaten ist anfangs ein Laden mit den vollen 240 W auf Zellebene (180 kW auf Systemebene) möglich, welches nach entsprechender Zeitdauer auf eine Dauerladeleistung begrenzt wird. In Abbildung 47 ist ein Vergleich der simulierten Fahrt auf einer möglichen Strecke von Truck 2 mit Derating (blaue Kurve, P_cell_W) und ohne Derating (grau gepunktete Kurve, P_cell_max_charge_W) dargestellt. Ohne Derating würde sich aus der längeren Ladephase mit maximaler Leistung ein entsprechend höherer Ladezustand (SOC) einstellen. In der 5. Ladephase an der Oberleitung (und in der 4. im geringeren Maße) zeigt sich im Verlauf mit Derating der entsprechende Übergang von der Konstant-Stromphase (CC) bzw. Konstant-Leistungsphase in die Konstant-Spannungsphase (CV). In Abbildung 48 ist der Ausschnitt für die fünfte Ladephase an der Oberleitung dargestellt. Ab ca. 3200 s zeigt sich in dem Leistungsverlauf die Begrenzung des Ladestroms unterhalb der möglichen Ladeleistung (Derating).

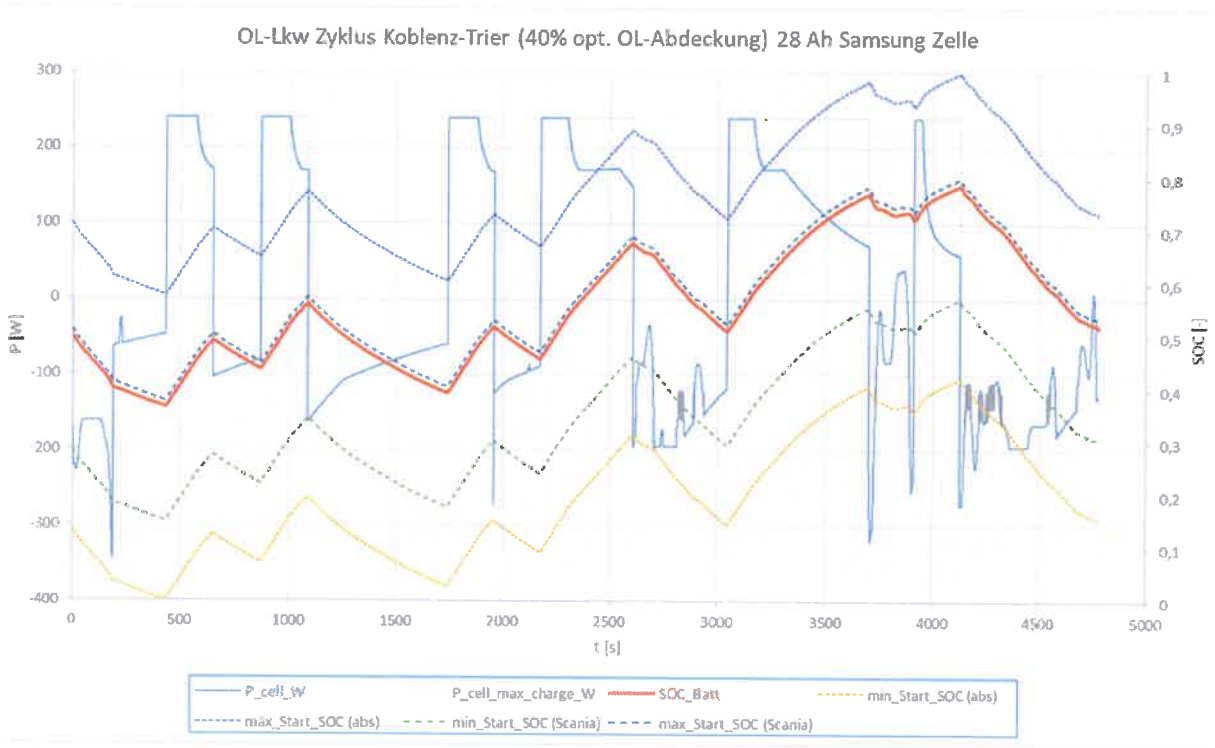


Abbildung 47: Leistungsprofil „Koblenz-Trier" auf Zellebene

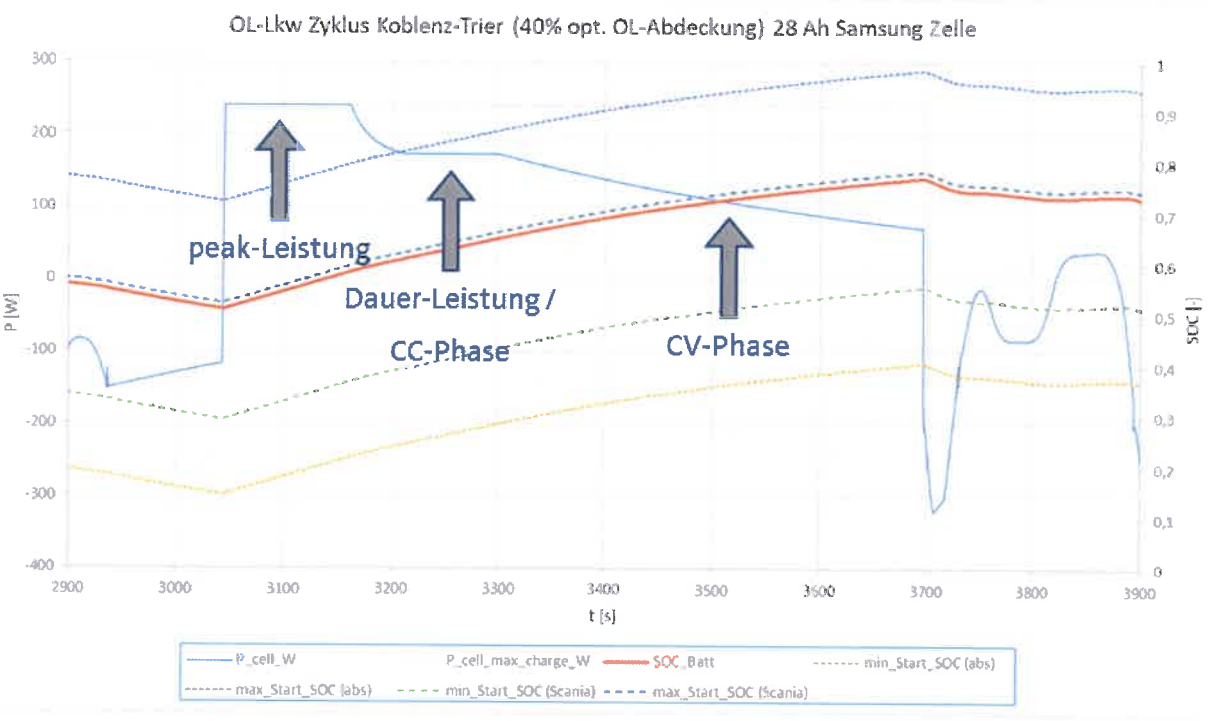


Abbildung 48: Leistungsprofil „Koblenz-Trier" auf Zellebene – Detaildarstellung der fünften Ladephase an der Oberleitung

Aufgrund der limitierten Ladeleistung kann ein Teil der zur Verfügung stehenden Energie nicht in die Zelle geladen werden. In Tabelle 2 sind die maximal möglichen und die durch das Derating begrenzten Energiemengen während der sechs Ladephasen an der Oberleitung für die simulierte Teststrecke „Koblenz-Trier" zusammengefasst.

26. JULI 2022

Tabelle 2: Energiemengen pro Zelle während der Ladephasen an der Oberleitung für die simulierte Teststrecke „Koblenz-Trier“

	Ladephase 1	Ladephase 2	Ladephase 3	Ladephase 4	Ladephase 5	Ladephase 6	Gesamt
Energiemenge bei maximaler Ladeleistung	14,5 Wh	14,5 Wh	14,5 Wh	28,99 Wh	43,64 Wh	14,87 Wh	**131 Wh**
Energiemenge bei begrenzter Ladeleistung	13,35 Wh	13,16 Wh	13,33 Wh	23,26 Wh	27,54 Wh	7,07 Wh	**97,71 Wh**

In den ersten drei Ladephasen ist der Unterschied zwischen den in die Zelle geladenen Energiemengen bei maximaler und begrenzter Ladeleistung gering. Für die verbleibenden Ladephasen 4, 5, 6 ist ein deutlicher Unterschied in den Energiemengen erkennbar. Für die simulierte Teststrecke kann insgesamt aufgrund der begrenzten Ladeleistung durch Vorgaben des Zellherstellers etwa 25% der zur Verfügung stehenden Energie nicht aufgeladen werden. Daher soll ein Ladeverfahren entwickelt werden, das im Vergleich zur begrenzten Ladeleistung eine größere Energieübertragung ermöglicht und gleichzeitig nicht zur beschleunigten Alterung der Zelle führt.

2.9.3 AP 6.3 Entwicklung von alterungsoptimalen Ladeverfahren und Verifikation

AP 6.2 wurde zeitlich hinter AP 6.3 geschoben. Der zugehörige Bericht ist entsprechend im Anschluss an AP 6.3 zu finden.

Bei der eingesetzten Zelltechnologie kann mit den Vorgaben des Zellherstellers für den Ladestrom nicht die maximal mögliche Energie übertragen werden. Die Messungen hierzu wurden beim MEET (Münster Electrochemical Energy Technology) vorgestellt und diskutiert. Daraus ergab sich jedoch kein verwertbarer Ansatz, da das Ergebnis nicht den gewünschten Effekt zeigte. Weiterhin konnte für die darauf aufbauenden Messungen keine Möglichkeit der Umsetzung gefunden werden (notwendiges Verfahren nicht umsetzbar). Darüber hinaus entspricht die eingesetzte Zellchemie mittlerweile nicht mehr dem Stand der Technik und aufwendige Untersuchungen sind daher nicht zielführend. Für die Entwicklung von alterungsoptimalen Ladeverfahren wurde dann auf Erkenntnisse aus einem Vorgängerprojekt zurückgegriffen, in welchem durch „Dreielektroden-Messungen“ der Ladestrom für die eingesetzte Zellchemie optimiert wurde.

Basis für dieses Projekt bildet dabei der ermittelte Stromverlauf über den Ladezustand, welcher im Vergleich zu der aktuellen Ladestromgrenze in Abbildung 49 dargestellt ist.

26. JULI 2022

Abbildung 49: Ladestromprofil für 28 Ah Zelle

Die Kennlinie zeigt den maximal möglichen Ladestrom in Abhängigkeit des Ladezustandes. Im Vergleich ist der Datenblatt-Wert des Zellherstellers (DBL) mit angegeben.

Es ist deutlich erkennbar, dass das optimierte Ladeverfahren bis zu einem Ladezustand von 50% höhere Ladeströme bzw. Ladeleistungen im Vergleich zum Ladeprofil des Herstellers (DBL) ermöglicht. Dadurch soll während der Ladephasen an den Oberleitungen ein höherer Energieeintrag in die Zelle ermöglicht werden. Das Stufenprofil und die Begrenzung des höheren Ladestroms bzw. der höheren Ladeleistung bis 50% SOC sollen wiederum eine verstärkte Alterung verhindern.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass das vorgeschlagene stufenförmige Ladeprofil im Vergleich zum Ladeprofil des Herstellers einen höheren Energieeintrag während der Ladephasen an den Oberleitungen ermöglicht und gleichzeitig einer beschleunigten Alterung der Zelle entgegenwirkt.

2.9.4 AP 6.2 Zelltests auf Prüfstandebene

Mit dem Leistungsprofil „Koblenz-Trier" und den Ansätzen für das Laden bei angeschlossener Oberleitung wurden die folgenden drei Szenarien für die Zelltests aufgestellt:

- **Profil A:** Basis des Ladens an der Oberleitung bildet der Stand der Technik CC-CV-Laden mit Derating von Peak-Leistung auf Konstant-Leistung am Anfang
- **Profil B:** Höhere Energieübertragung als bei Profil A und besseres Alterungsverhalten als bei Profil C
- **Profil C:** max. Energieübertragung, stark erhöhte Zellalterung

Die Leistungsverläufe der Profile A und C sind in Abbildung 50 dargestellt. Wie bereits in Tabelle 2 dargelegt, zeigen die Leistungsverläufe in Abbildung 50 deutlich, dass bei Profil A im Vergleich zum Profil C während der sechs Ladephasen an der Oberleitung eine geringere Energiemenge in die Batterie geladen wird. Die Abbildung 49 zeigt den stufenförmigen Leistungsverlauf während der Ladephasen für Profil B. Diese soll eine höhere Energieübertragung bei den Ladevorgängen ermöglichen als

26. JULI 2022

bei Profil A. Gleichzeitig soll der Alterungseinfluss, der durch Überschreiten der vom Hersteller vorgegebenen Ladeströme hervorgerufen wird, reduziert werden. Analog zur Tabelle 2 zeigt Tabelle 3 die in die Zelle aufgeladenen Energiemengen während der Ladephasen an der Oberleitung für die Leistungsprofile A, B und C. Es ist erkennbar, dass das im Abschnitt 2.9.3 vorgestellte alterungsoptimale Ladeverfahren (Profil B) einen höheren Energieeintrag in die Zelle ermöglicht als das Standard-Ladeverfahren nach den Vorgaben des Zellherstellers (Profil A). Der größte Energieeintrag wird mit Hilfe des Profils C erzielt, da hier unabhängig vom Alterungsverhaltens die Zelle mit maximaler Leistung (außerhalb der Spezifikation des Zellherstellers) geladen wird.

Im Folgenden soll der Einfluss der Ladeprofile A, B und C auf das Alterungsverhalten der Zellen experimentell untersucht werden. Es werden insgesamt zwei Zellen je Profil getestet.

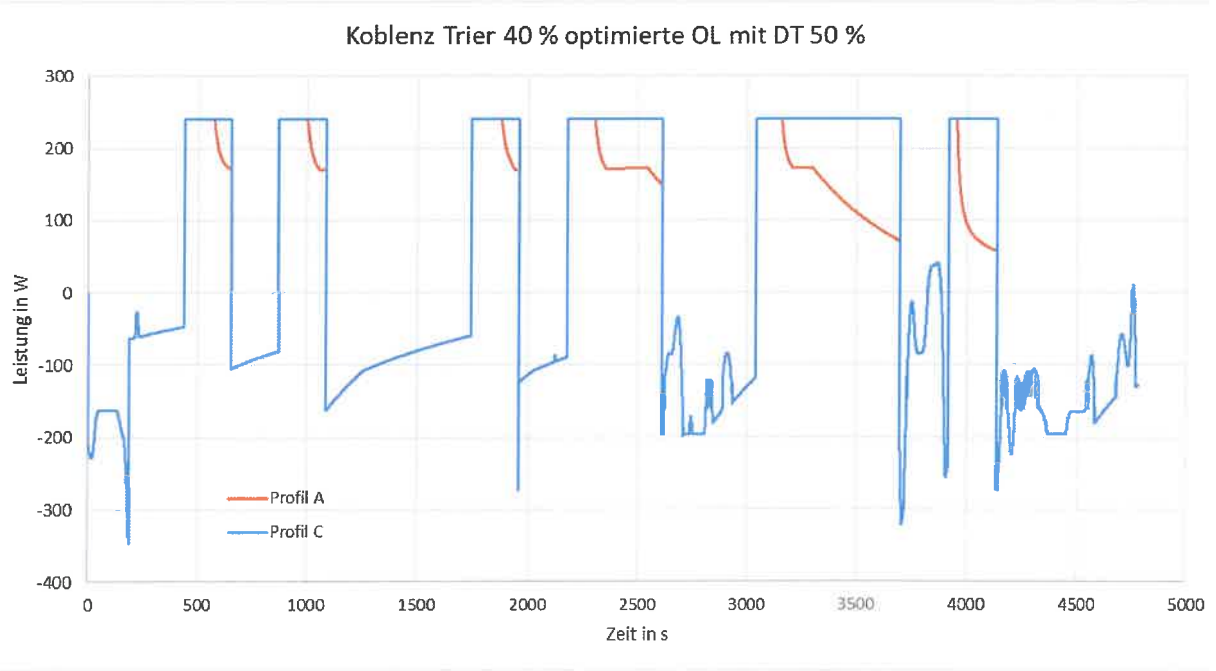


Abbildung 50: Leistungsverlauf für Test mit 28 Ah Zelle, Profil A und Profil C

Tabelle 3: Energiemengen pro Zelle während der Ladephasen an der Oberleitung für Leistungsprofile A, B, C

	Ladephase 1	Ladephase 2	Ladephase 3	Ladephase 4	Ladephase 5	Ladephase 6	Gesamt
Profil A	13,35 Wh	13,16 Wh	13,33 Wh	23,26 Wh	27,54 Wh	7,07 Wh	**97,71 Wh**
Profil B	16,95 Wh	15,07 Wh	15,61 Wh	26,73 Wh	31,8 Wh	6,48 Wh	**112,64 Wh**
Profil C	14,5 Wh	14,5 Wh	14,5 Wh	28,99 Wh	43,64 Wh	14,87 Wh	**131 Wh**

26. JULI 2022

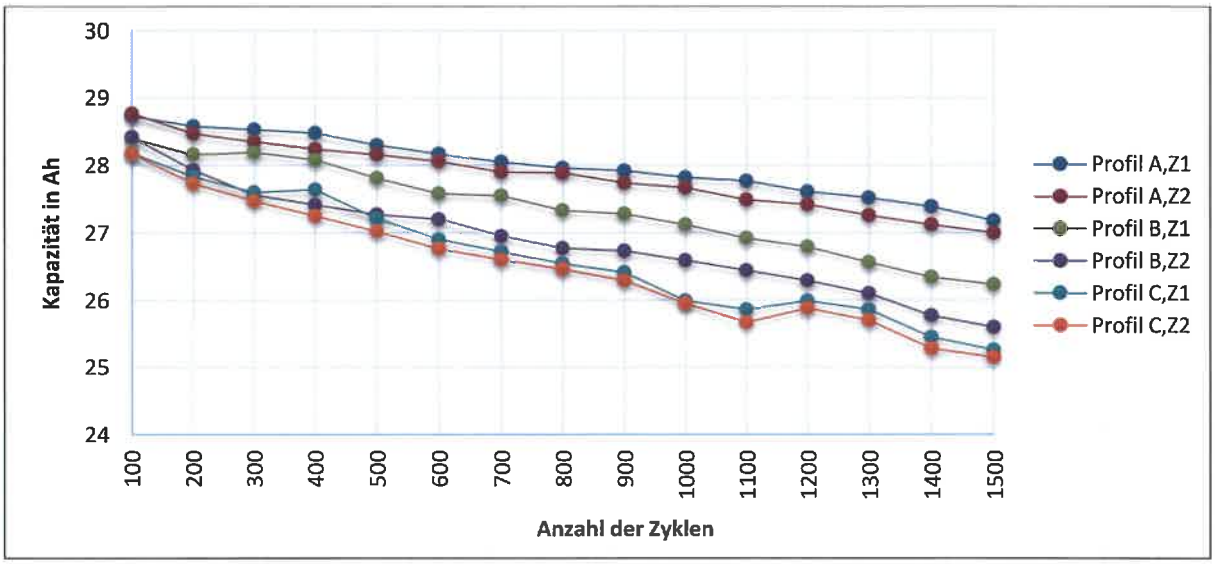


Abbildung 51: Kapazitätsverlauf für Alterungstest mit 28 Ah Zelle, Profil A, Profil B, Profil C

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse der Alterungstests dargestellt. Insgesamt wurden die 6 Zellen mit 1500 Lade- und Entladezyklen belastet. Nach jeweils 100 Zyklen wurde die Kapazität ermittelt. Dabei wurde der Kapazitätstest wie folgt durchgeführt:

- CC-CV-Laden mit einem Ladestrom von C/3
- 30 min. Pause
- CC Entladen mit einem Entladestrom von C/3

Wie bereits erwartet zeigen die Ergebnisse mit dem Ladeprofil A das geringste Alterungsverhalten, da die Ladeströme die vom Hersteller vorgegebenen Grenzwerte nicht überschreiten. Die Ergebnisse mit dem Ladeprofil C hingegen zeigen das stärkste Alterungsverhalten, da die Zelle während der sechs Ladephasen mit dem max. möglichen Ladestrom/-leistung aufgeladen wird. Am Ende der 1500 Zyklen erreichen die mit dem Profil A geladenen Zellen einen mittleren Kapazitätswert von ca. 27,1 Ah, wohingegen die mit dem Profil C geladenen Zellen einen mittleren Wert von ca. 25.2 Ah erreichen. Die Zellen, die mit dem optimierten Ladestrom geladen werden, altern im Vergleich zum Ladeprofil C langsamer, im Vergleich zum Profil A jedoch schneller. Am Ende der 1500 Zyklen ergibt sich hierbei ein mittlerer Kapazitätswert von 25,9 Ah. Dabei zeigt die zweite Zelle (Profil B,Z2) während der ersten 500 Zyklen eine deutliche Alterung im Vergleich zur ersten Zelle (Profil B,Z1). Diese Abweichung kann z.B. auf Ungenauigkeiten bei den Prüfstandsmessungen zurückgeführt werden. Vernachlässigt man die Messungen der zweiten Zelle (Profil B,Z2), ergibt sich für das Ladeprofil B nach 1500 Zyklen eine gealterte Kapazität von ca. 26,2 Ah.

Unter Annahme eines Lebensdauerendes bei 80% Restkapazität lassen sich die Prüfstandsergebnisse auf eine Lebensdauer-Zyklenzahl von ca. 3000 Zyklen extrapolieren. Ein validierter Wert erfordert weiterführende messtechnische Untersuchungen. Dennoch wird anhand dieses Richtwerts eine ergänzende simulations-gestützte Betrachtung zu möglichen Fahrleistungen im Oberleitungs-LKW durchgeführt. Hierzu wird eine gemessene Fahrt von der Spedition Bode aus zum Hafen in Lübeck verwendet

26. JULI 2022

mit einer Streckenlänge von 25.9 km. Simuliert wird ein Typ2 Truck mit einer Variation des Beladungszustands. Zudem wird eine energieoptimale Verteilung der Oberleitung auf dem gewählten Streckenabschnitt ermittelt mit einer Variation der Abdeckung von 10 % bis 90 % der Strecke.

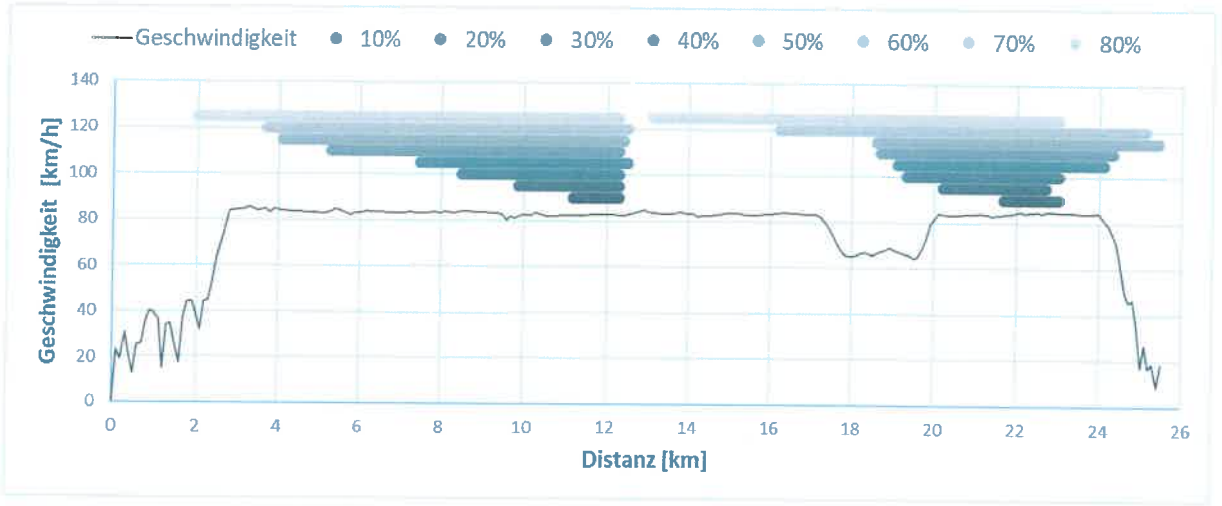


Abbildung 52: Geschwindigkeitsprofil und energieoptimale Positionierung der Oberleitung am Beispiel des „Lübeck-Zyklus"

Abbildung 52 gibt einen Überblick über das Geschwindigkeitsprofil und die energieoptimale Positionierung der Oberleitung für die Variationsbreite von 10 % bis 90 % Abdeckung.

Als Bewertungsgröße für die zyklische Belastung wird jeweils die aus der Batterie entladene Energiemenge bestimmt und in Relation zu 3000 Vollzyklen der nutzbaren Energiemenge der Batterie gebracht. In der Annahme ist es unerheblich, ob und in welcher Intensität die entnommene Energiemenge über die Oberleitung, Laden im Depot oder über den Verbrennungsmotor in die Batterie geladen wird. Neben der Ladeleistung und den Ladehüben wird hierdurch auch eine überlagerte Kalendarische Alterung vernachlässigt.

Mit den hier getroffenen Annahmen ergeben sich die in Abbildung 53 gezeigten Ergebnisse für die entnommene Energiemenge und die resultierende Prognose der Lebensdauer-Laufleistung. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Oberleitungsabdeckung und vom Beladungszustand. Hinsichtlich der Oberleitungsabdeckung ergibt sich ein Maximum der entladenen Energiemenge bei etwa 40-50 %. Bei sehr geringer Abdeckung überwiegt der verbrennungsmotorische Betrieb und die Batterie deckt lediglich die Hybridfunktionen ab. Mit zunehmend mehr Oberleitungsabdeckung wird zusätzlich Energie in die Batterie geladen und im rein elektrischen Fahren wieder entladen. Oberhalb von etwa 50 % wird ein zunehmender Anteil der Fahrenergie direkt von der Oberleitung an die Elektromotoren geleitet und weniger Energiemenge über die Batterie abgedeckt.

Die Laufleistungsprognose ergibt sich reziprok zur entnommenen Energiemenge über eine nutzbare Energiemenge von 48,1 kWh (vgl. Tabelle 1) und 3000 Zyklen. Am Beispiel von 40 % Oberleitungsabdeckung und voll beladenem Truck wird eine Energiemenge von ca. 82 kWh/100 km aus der Batterie entladen. Dies entspricht 1,7 Vollzyklen pro 100 km und einer Laufleistung von ca. 176.500 km für 3000 Zyklen.

Laufleistungen von über 500.000 km sind bei mittlerer Beladung in dieser Konfiguration also nur im Hybridbetrieb ohne Oberleitung und oberhalb einer Oberleitungsabdeckung von 80 % möglich.

26. JULI 2022

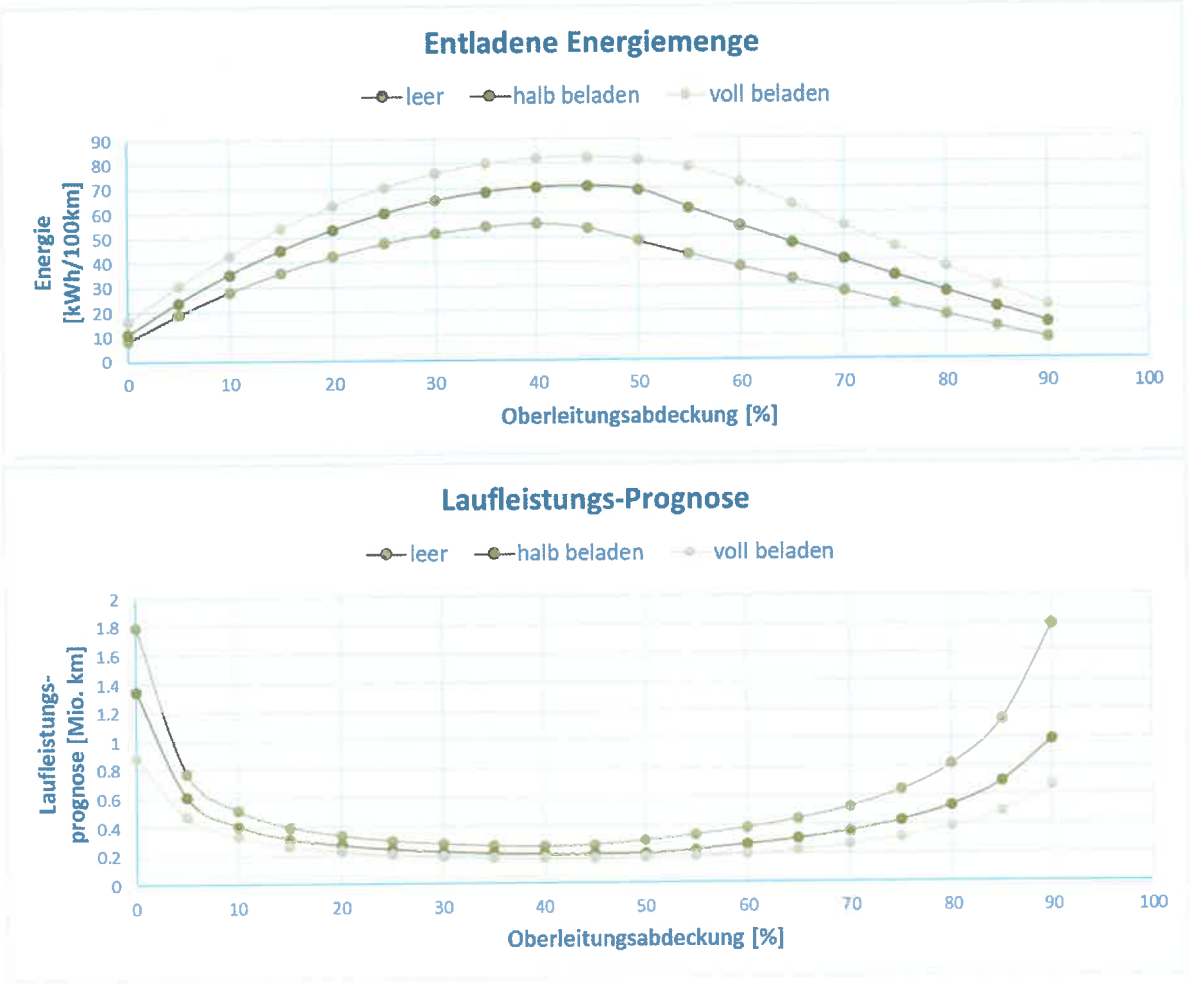


Abbildung 53: Entnommene Energiemenge und Laufleistungsprognose in Abhängigkeit von Oberleitungs-Abdeckung und Beladungszustand

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass mit Hilfe eines alterungsoptimierten Ladeverfahrens kurzzeitig höhere Ladeleistungen möglich sind und damit höhere Energiemengen in die Zellen geladen werden können, ohne dass die Zellen dabei eine erhöhte Alterung erleiden. Nichtsdestotrotz sind die im Rahmen dieses Projekts untersuchten Zellen für Oberleitungsanwendungen nicht zugeschnitten. Hierfür sind Zellen erforderlich, die kurzzeitig hohe Ladeleistungen erlauben und gleichzeitig eine hohe Lebensdauer ermöglichen. Abschnitt 2.9.6 befasst sich mit zukünftigen Zellgenerationen, die für den Einsatz in Oberleitungs-LKWs geeignet wären.

2.9.5 AP 6.4 Adaption der Ladeverfahren für die Anwendung und Erprobung im Prototypen-LKW

Aufgrund von Verzögerungen bei der Bereitstellung des geplanten Prototypen-LKWs Typ 2 sowie zusätzlicher, unerwarteter Verzögerungen im Projekt durch den Corona-Lockdown, entfällt dieses Arbeitspaket. Die wesentlichen experimentellen Ergebnisse hinsichtlich des Alterungsverhaltens bei unterschiedlichen Ladeprofilen wurde bereits im vorherigen Abschnitt vorgestellt. Eine zusätzliche Adaption der Ladeverfahren und die Erprobung im Prototypen-LKW hätte in diesem Zusammenhang keine neuen Erkenntnisse gebracht.

26. JULI 2022

2.9.6 AP 6.5 Vergleich mit zukünftiger Zellgeneration

Für den Vergleich der real vorliegenden Messdaten des OL-LKW Projektes werden an dieser Stelle Messdaten ausgewählter, in Zukunft vielversprechender Technologien als Vergleich heran gezogen. Die Herkunft der Daten wurde an dieser Stelle aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen anonymisiert und somit kann auch der genaue Aufbau der Technologie an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden. Ebenso sei einleitend erwähnt, dass es sich bei den hier gezeigten Messdaten um Labormessungen handelt, die an kleinen Zellen durchgeführt wurden und deren Testprotokolle mitunter stark von realen Bedingungen abweichen können.

Hauptlimitierung der aktuellen Zelltechnologie in Bezug auf das Schnellladen ist zu einem großen Anteil die Art und der Aufbau der verwendeten Anode innerhalb der Zellen. Bei zu hohen Strömen in der Batterie kommt es einerseits zu einem Anstieg der Überspannung und damit verbunden zu einem früheren Erreichen der Zellabbruchspannung, anderseits tritt durch die Potentialverschiebung an der Anode mit erhöhter Wahrscheinlichkeit Lithiumplating auf. In Großzellen und Zellmodulen im Fahrzeug tritt zudem durch den erhöhten Innenwiderstand der Zellen ein erhöhter Leistungseintrag und damit verbunden ein Anstieg der Temperatur auf. Die Laderaten werden daher in der Praxis oft Potential oder SOC abhängig limitiert und Stufenprofile werden entwickelt. Wie in den bisher gezeigten Messdaten zu sehen liegt die Limitierung aktueller Technologien hier in einem Bereich von ca. 2,5 C – 3 C. Bei diesem Strom kann die Batterie für kurze Zeit (oft nur ca. 10 % bis max. 20 % SOC) betrieben werden bevor aus den oben genannten Gründen eine Absenkung des Stromes erfolgen muss.

Diese Absenkung wird sukzessive fortgesetzt bis am Ende der Ladedauer nur noch mit sehr kleinen Strömen geladen werden kann.

Durch neuartige Zelltechnologie mit geringeren Überspannungen und verbesserter Kinetik der Anode ist es möglich den Bereich, in dem mit hohen Strömen geladen werden kann auszuweiten und auch die verwendeten Ströme zu erhöhen.

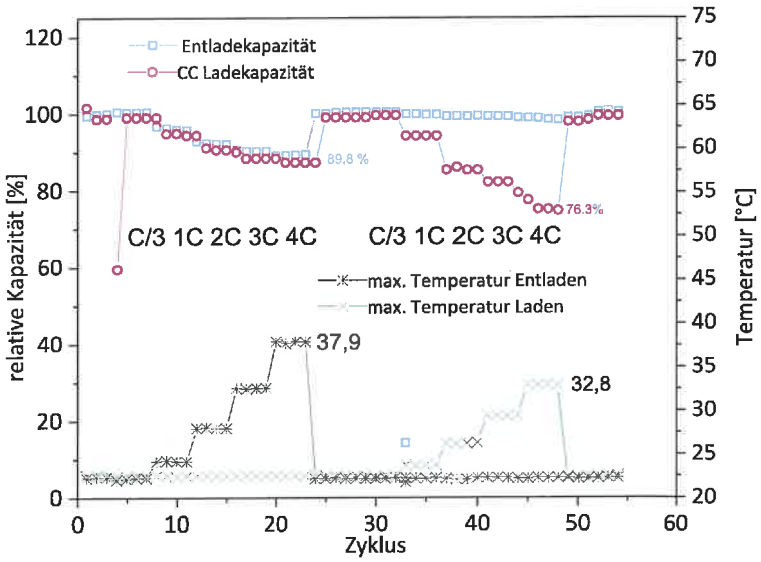


Abbildung 54: Lade und Entladeperformance neuer Zelltechnologien

In Abbildung 54 ist ein Beispiel der sich dadurch ergebenden Möglichkeiten gezeigt. Bei den dort dargestellten Ergebnissen handelt es sich um Versuche an einer ca. 12 Ah großen experimentellen Zelle die einen Energieinhalt von ca. 300 Wh/kg oder ca. 730 Wh/L aufweist. Gezeigt ist jeweils die Lade und Entladekapazität, die die Zellen bei unterschiedlichen C-Raten in einem CC Entladeschritt bzw. CC/CV Ladeschritt aufweist und die sich jeweils dabei ausbildende Temperaturentwicklung in der Zelle. Hierbei ist anzumerken, dass es sich um eine experimentelle Definition des SOC handelt wobei der SOC jeweils relativ zu der Kapazität bei C/3 ausgedrückt wird im Spannungsfenster von 2,5 V – 4,2 V. Dadurch ergibt sich im SOC ein Unterschied zu den für den OL-LKW gezeigten Daten bei dem im Spannungsfenster von 3,0 V bis 4,2 V gearbeitet wird. Der Einfachheit halber kann der SOC 0 % der gezeigten Zellen als ca. SOC – 10 % bis – 15 % der LKW Zellen verstanden werden. Dadurch kommt es zu einer Streckung der SOC Skalierung sodass z.B. 80 % SOC der experimentellen Zellen einer etwas niedrigeren Potentiallage entspricht als bei den LKW Zellen.

In der linken Hälfte der Abbildung 54 ist das Verhalten der Zellen gezeigt bei einer Entladeratenvariation zwischen C/3 und 4 C (C/3, 1 C, 2 C, 3 C, 4 C). Hier ist markiert, dass bei einem CC Entladestrom von 4 C die experimentelle Zelle noch ca. 89 % der Entladekapazität liefert, sprich die Zelle kann von 100 % SOC bis ca. 10 % SOC bei konstanten 4 C Entladen werden ohne dass die untere Abbruchspannung (2,5 V) unterschritten wird. Dieser Entladeschritt ist mit einer vergleichsweise moderaten Temperaturerhöhung angesichts des Stromes von ca. 15 °C verbunden.

In der rechten Hälfte der Graphik ist ein ähnliche Messung gezeigt wobei hier die CC Laderate der Zelle zwischen C/3 und 4 C variiert wurde. Analog zum vorherigen Absatz ist hier markiert, dass bei einem konstanten CC Ladestrom von 4 C die Zelle von 0 % SOC bis ca. 76 % SOC geladen werden kann. Übertragen auf das Ladeprofil des LKWs würde dies bedeuten, dass der erste Schritt des Ladeprofils von einer C-Rate von 2,5 C auf eine Rate von 4 C erhöht werden könnte und dieser Strom statt bis 10 % - 20 % SOC bis zu einem SOC von ca. 70 % angelegt werden könnte ohne in ein Derating der Zelle zu geraten. Die Temperaturentwicklung ist hier für die 12 Ah Zelle im Temperaturschrank noch relativ moderat mit ca. 10 °C. Bei einer größeren Zelle in einem Fahrzeug würde der erhöhte Strom allerdings wahrscheinlich ein deutlich stärkeres Kühlkonzept erfordern.

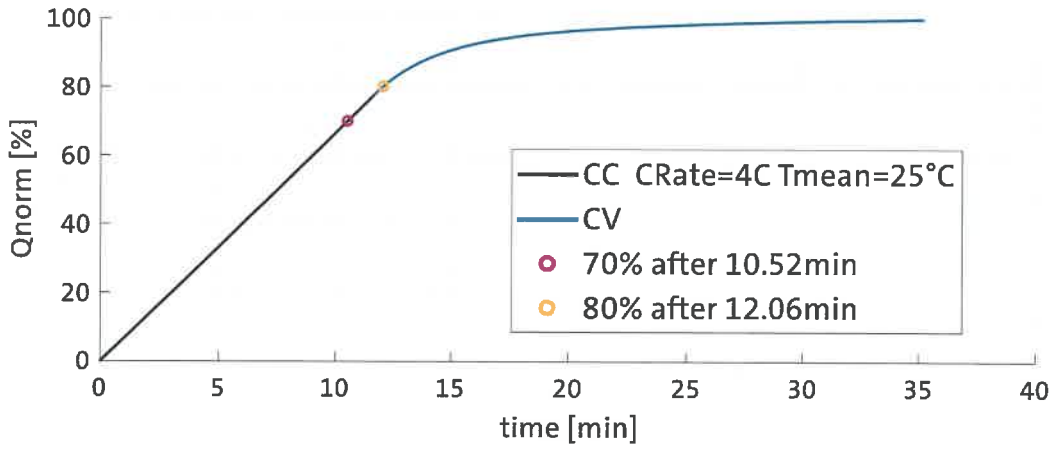


Abbildung 55: Zeitliche SOC Entwicklung

Abbildung 55 zeigt was ein derartiges Stromprofil für die Ladezeit der Zelle bedeuten würde. Hier ist zu erkennen, dass die gezeigte 12 Ah Zelle 70 % SOC nach ca. 11 min und 80 % SOC nach ca. 12 min erreicht. Nach diesem Punkt wechselt die Zelle in eine CV Ladephase und der Strom sinkt nach und nach ab weshalb die übrigen 20 % SOC nur noch relativ langsam geladen werden können. Verglichen

mit aktuellen Zelltechnologien, die mit aggressiven Ladeprofilen ca. 30 min – 35 min bis zu einem SOC von 80 % benötigen und gleichzeitig weniger Energiedichte aufweisen ergibt sich hier jedoch ein deutlicher Gewinn. Die dabei benötigte Energie an der Zelle entspricht ca. 35 Wh im CC Teil und damit für das Schnelladen der Zelle auf 70 % SOC einer Leistung von ca. 190 W. hochgerechnet auf die 28 Ah LKW Zelle ergibt sich damit also eine nötige Leistung von ca. 443 W die pro Zelle in diesem Schritt konstant anliegen muss. Diese Leistungsaufnahme wäre also in etwa doppelt so hoch wie die Peakleistung der LKW Zelle, was hauptsächlich im erhöhten Strom begründet liegt.

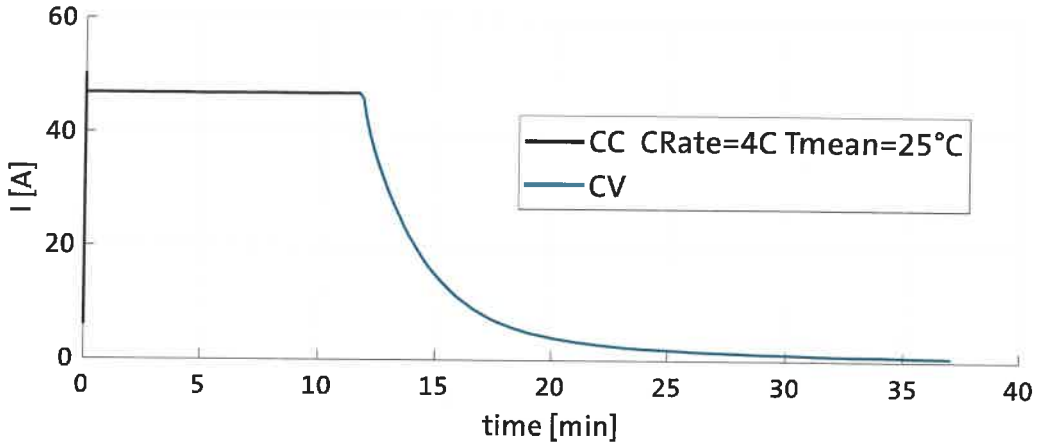


Abbildung 56: Stromprofil der Experimentalzelle bei 4 C Ladevorgang

Das Stromprofil ist noch einmal in Abbildung 56 dargestellt analog zum Profil des LKW in Abbildung 49. Der Kapazität von 12 Ah entsprechend liegt ein fester Strom von ca. 48 A bis zum Erreichen von ca. 76 % SOC an gefolgt von einer CV Phase mit abnehmendem Strom. Übertragen auf die 28 Ah Zelle ergeben sich hier Werte von ca. 112 A.

Wie bereits erwähnt ist ein direkter Vergleich der SOC Werte zwischen den beiden Zellen nicht möglich aufgrund des unterschiedlichen Spannungsfensters. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass die experimentelle Zelltechnologie in der Lage ist deutlich höhere Laderaten bis zu einem deutlich höheren SOC zu verkraften. Langzeittests der Zellen, bei denen diese in jedem Zyklus mit 4 C geladen und jeweils 1 C Entladen werden, haben zudem gezeigt, dass keine massive Schädigung durch Lithiumplating auftritt. Auf diese Weise zyklisierte Zellen haben in ersten Tests Lebensdauern von > 400 Zyklen erreicht.

Aktuell befinden sich die angesprochenen Technologien noch in einer frühen Entwicklungsphase. Es ist einerseits abzuklären, ob die Ziele hinsichtlich Lebensdauer bei gleich guter Ladeperformance erhalten bleiben können. Ebenso muss die Technologie einem Upscalingprozess unterzogen werden bei dem sich weitere Probleme ergeben könnten. Danach muss sich das gesamte System den Herausforderungen erhöhter Laderate und damit erhöhter Ströme und höherer nötiger Kühlleistung stellen.

2.10 AP 7: E-Maschine

Der Abschnitt „E-Maschine“ wurde in 2020 plangemäß abgeschlossen. Die Gliederung besteht aus insgesamt sieben Teilabschnitten, welche in diesem Beitrag abschließend beschrieben werden.

Gliederung

2.10.0 LKW-spezifische Anforderungen und Schnittstelen

26. JULI 2022

2.10.1 Erstellung universeller Lebensdauermodelle der Wicklung in elektrischen Maschinen

2.10.2 Bewertung der Lastkollektive für NFZ

2.10.3 Auslegung einer E-Maschine für NFZ

2.10.4 Konzept und Konstruktion der E-Maschine

2.10.5 Ermittlung der Parameter für das Lebensdauermodell

2.10.6 Optimierung der Komponente

Einleitung

In dem Abschnitt „E-Maschine" werden schwerpunktmäßig Untersuchungen zur Lebensdauer des Isolationssystems und die Berechnung einer E-Maschine mit verbesserten Eigenschaften bearbeitet.

Im Zuge der stetigen Effizienzsteigerung elektrischer Antriebe kommen neue, verbesserte Technologien zum Einsatz. In elektrischen Maschinen werden neue Materialien verwendet, beispielsweise anstatt einer Litzenwicklung eine Hairpinwicklung aus Profildraht. In der Leistungselektronik ist eine Steigerung der Effizienz durch Reduktion der Schaltverluste durch den Einsatz von schnell schaltenden SiC-Halbleitern möglich. Die steilen Schaltflanken der Spannung belasten allerdings das Isolationssystem der elektrischen Maschine und reduzieren die Lebensdauer. Weitere Faktoren, welche die Lebensdauer eines Isolationssystems beeinflussen sind die Temperatur sowie thermische Zyklen, entstanden durch entsprechende Fahrprofile. Die beschriebenen Einflüsse sollen im Rahmen dieses Projektes durch definierte Messverfahren an geeigneten Prüfkörpern untersucht und bewertet werden. Durch die Analyse und Interpretation der Ergebnisse lassen sich Rückschlüsse und Vorschläge für reale Komponenten formulieren.

Die Komponente elektrische Maschine (E-Maschine) im Antriebsstrang eines LKW muss relativ hohe Anforderungen an Drehmoment und Leistung erfüllen. Hinzu kommt, dass der Bauraum in den die E-Maschine in einer Getriebestruktur integriert werden soll, in den meisten Fällen sehr begrenzt ist. Durch eine systematische Auslegung und Optimierung des magnetischen Kreises im Gleichschritt mit der mechanischen Optimierung soll eine verbesserte E-Maschine dargestellt werden. Im Anschluss liegt eine konstruktive Umsetzung der Komponente inklusive der entsprechenden Kühlstruktur vor.

2.10.0 LKW-spezifische Anforderungen und Schnittstellen

Einer der Schwerpunkte in diesem Arbeitspaket ist die Untersuchung und Verbesserung der Komponente E-Maschine für den Einsatz in einem LKW. Im Vergleich zu einer PKW Komponente sind an die E-Maschine in einer LKW Anwendung abweichende Anforderungen sowie spezielle Eigenschaften und Funktionalität gestellt. Um diese Eigenschaften / Funktionen zu erfassen, bewerten und mit den eng verknüpften Arbeitspaketen wie System, Leistungselektronik oder Getriebe abzustimmen wurde eine umfangreiche Eigenschaften-Tabelle erzeugt und systematisch vervollständigt. Die Inhalte dieser Tabelle sollen in diesem Arbeitspaket als Basis für die geplante Auslegung einer neuen E-Maschine dienen. Neben den erforderlichen Eigenschaften, welche die auszulegende E-Maschine erfüllen sollte, sind hier auch die notwendigen Schnittstellen zu der Systemebene und zur Leistungselektronik beschrieben, welche ebenfalls für die Auslegung der Komponente notwendig sind. Ein Beispiel: eine typische Schnittstellen-Größe ist der Phasenstrom, dessen Wert sowohl für die Auslegung der E-Maschine als auch für die Dimensionierung der Leistungselektronik relevant ist.

5	Spezifikation / specification				
6					
7		Benennung	Designation	Beschreibung / Description	Messbarer Wert / Measurable value	Einheit / Unit
8						
9		Systemebene / System level				
10		Fahrzeug und Einsatz	Vehicle and application			
22		Kühlung	cooling			
26		Mechanische Randbedingungen	mechanical boundary conditions			
29		EMV und LV Versorgung	EMI and LV supply			
35		Schnittstellen (elektrisch, mechanisch,	interfacees (electrical, mechanical,			
40						
41		E-Maschine				
42		Grundsätzliche Eigenschaften	General properties			
53		Auslegungsbedingungen	Design requirements			
59		Leistungsdaten	Performance			
69		Thermische Randbedingungen	Thermal conditions			
79		Elektrische Randbedingungen	Electric properties			
90		Mechanische Eigenschaften	mechanical properties			
95		Wicklungseigenschaften	Winding properties			
101		Isolation	Insulation			
108		Werkstoffeigenschaften	Material properties			
115		Abmessungen	Dimensions			
125		Gewichte				
133		Sensorik	Sensors			
136		Zusätzliche Eigenschaften	Additional properties			
137						
138						
139		Leistungselektronik				
140		Elektrische Randbedinungen				
163		Thermische Randbedingungen				
166		Konstruktion (ME)				
172		Sensorik				
179		Zwischenkreiskondensator				
183		Leistungsmodule				
185		Treiber				
187		Ansteuerung				
189		Betriebsfunktionen				
190						
191		Sicherheitsfunktionen				
192						
193		HV Sicherheit				

Abbildung 57: Komprimierte Darstellung der Eigenschaftentabelle (insgesamt ca. 180 Positionen)

Die Übersicht in Abbildung 57 hat folgende übergeordnete Struktur: Systemebene / E-Maschine / Leistungselektronik / Funktionen. Die einzelnen Positionen sollen hier nicht vollumfänglich dargestellt werden, sondern im Weiteren nur die Positionen, welche die Auslegung der E-Maschine betreffen.

Die Zahlenwerte in der Tabelle 4 repräsentieren die Eigenschaften einer Referenz E-Maschine, welche in den LKW Prototypen bereits verbaut ist und stellen gleichzeitig Vorgaben für die Auslegung der verbesserten E-Maschine dar. Die mit (-) gekennzeichneten Positionen ergeben sich aus der späteren Berechnung. Diese Tabelle liefert für einen Ausleger eine komplette Basis für einen Entwurf der E-Maschine (die Werte müssen nicht einzeln kommentiert werden). Aus den geforderten Eigenschaften wird ersichtlich, dass neben den Maximalgrößen auch die Dauergrößen von Drehmoment und Leistung relativ hoch definiert sind (die Dauerwerte liegen relativ nah an den jeweiligen Maximalwerten). Dies ist durch die typischen angenommenen Fahrprofile begründbar, bei denen ein LKW auf der Autobahn an der thermischen Grenze der E-Maschine, also mit Dauerwerten bewegt wird. Da ebenso der Dauerdrehschub mit 67 kN/m2 relativ hoch ist, soll in diesem Fall ein besonderes Augenmerk auf die Maschinenkühlung gelegt werden.

Tabelle 4: Geforderte Eigenschaften der E-Maschine

Benennung	Messbarer Wert	Einheit
E-Maschine		
Grundsätzliche Eigenschaften		
Betriebsdauer	15 / 55 000	Jahre / Betriebsst.
Laufleistung	1000000	km
Schutzklassen	IP6K9K	-
Dielektrische Isolation	3	kV
Maschinentyp (PMSM, FSM, PSM, ASM)	PMSM	
Rotortyp (Innenläufer, Außenläufer)	Innenläufer	
Phasenzahl	3	
Polpaarzahl	-	
Auslegungsbedingungen		
Auslegungsspannung, motorisch	650	V
Auslegungsspannung, generatorisch	650	V
max. Phasenstrom	300	ARMS
max. Dauerstrom	250	ARMS
Kühlmittel Vorlauftemperatur	60 - 70	°C
Leistungsdaten		
Dauerleistung (S1), mech.	100 @ 600VDC	kW
Dauermoment	920	Nm
Kurzzeit-Leistung, mech.	130 @ 600VDC	kW
Kurzzeit-Moment	1050	Nm
max. Rippelmoment	± 30	Nm
Auslegungsdrehzahl (Eckdrehzahl)	1000 - 1500 @ 600VDC	rpm
Starttemperatur der Maschine	70	°C
Thermische Randbedingungen		
Kühlungsart (Wasserkühlung, Ölkühlung, Kühlmantel, Wickelkopfkühlung, Rotorkühlung)	Wickelkopfkühlung mit Getriebeöl	
Elektrische Randbedingungen		
max. Kurzschlussstrom @ 20°C	300	ARMS
Kurzschlussdauer @ 120°C Magnettemp.	-	s
Mechanische Eigenschaften		
Massenträgheitsmoment des Rotors (ohne Rotorträger)	-	kgm^2
max. Betriebsdrehzahl	5000	1/min
Schleuderdrehzahl (1,2* n_max)	7200	1/min
Berstdrehzahl	-	1/min
Wicklungseigenschaften		
Isolation		
Werkstoffeigenschaften		
Abmessungen		
Außendurchmesser Stator inkl. Kühlung	430	mm
Außendurchmesser Statorblechpaket	410	mm
Innendurchmesser Stator	-	mm
Außendurchmesser Rotor	Ca. 350	mm
Innendurchmesser Rotor	300	mm
Luftspalthöhe	-	mm
aktive Länge	Ca. 75	mm
Länge inkl. Verschaltung	140	mm
Länge über Wickelkopf	140	mm
Gewichte		
Sensorik		

Interessant ist hier auch der geforderte Bauraum der E-Maschine: Außendurchmesser beträgt 430 mm und die Gesamtlänge inklusive Wickelköpfe lediglich 140 mm. Gefordert ist demnach eine kurze E-

26. JULI 2022

Maschine mit hohem Durchmesser zwecks einer besseren Integration in das LKW Getriebe. Diese Integration ermöglicht außerdem eine einfache Realisierung einer Wickelkopf-Ölkühlung (Getriebeöl), durch welche im Vergleich zu klassischer Wassermantelkühlung höhere Dauerwerte des Drehmomentes und der Leistung erzielbar sind. Die Wickelkopf-Ölkühlung wird innerhalb dieses Projektes als Kühlungsart für die E-Maschine festgelegt und im Abschnitt 2.10.4 und 2.10.5 ausführlich behandelt.

2.10.1 Erstellung universeller Lebensdauermodelle der Wicklung in el. Maschinen

Literaturrecherche der Ausfallmechanismen der Isolation und Bewertung der Prüfverfahren

In Abbildung 58 sind die Schädigungsmechanismen dargestellt, die das Isolationssystem elektrischer Maschinen am stärksten beschädigen. Ausgehend von den Schädigungsmechanismen entstehen verschiedene Erosionsprozesse, die zu einer Abtragung der Isolation führen.

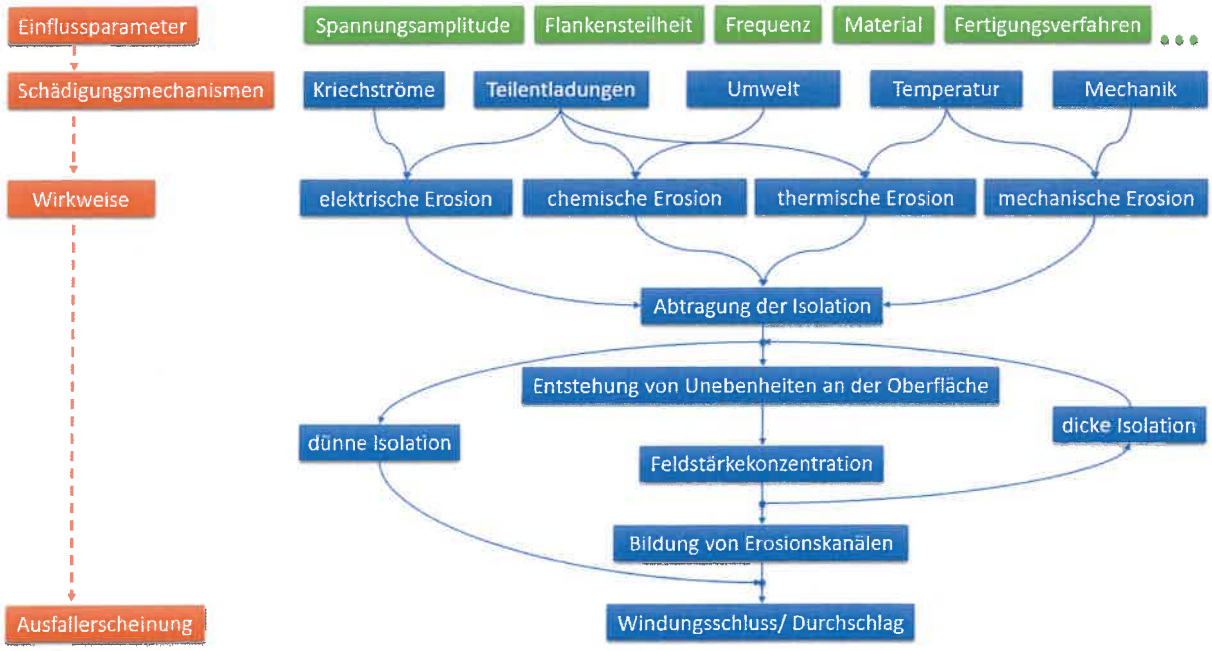


Abbildung 58: Schädigungsmechanismen und ihre Wirkweisen

Bei der thermischen Erosion wird die Isolation durch chemische Zerstörungsprozesse wie Oxydation und dem Aufbrechen und Zerstören von Polymermolekülketten beschädigt. Folglich ändern sich die elektrischen Eigenschaften des Isolationssystems und mindern z.B. die elektrische Durchschlagsfestigkeit.

Die mechanische Erosion ist auf mechanische Spannungen zwischen den Oberflächen der Materialien zurückzuführen. Die inhomogene Temperaturverteilung innerhalb einer elektrischen Maschine und die verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien führen zu unterschiedlichen Ausdehnungsraten der Leiter, der Isolierung oder des Eisenblechs. Ein steiler Temperaturanstieg unterstützt die ungleichmäßige Temperaturverteilung, erhöht die mechanischen Spannungen und beschleunigt die mechanische Erosion.

Bei der elektrischen Erosion lösen sich einzelne Elektronen aus ihren Bindungen und die Isolationsmaterialien verlieren ihre Isolationseigenschaften. Ist die Isolationsschicht zwischen zwei Komponenten unterschiedlichen Potenzials so stark abgetragen, dass die elektrische Feldstärke die Durchschlagsfestigkeit des Isolationssystems übersteigt, führt dies zu einem Spannungsdurchschlag. Die chemische

Erosion entsteht durch Einwirkung verschiedener Stoffe und führt ebenfalls zur Schwächung der Isolierung.

Um den Schädigungsprozess der Isolationssystems zu detektieren, wurde der Fokus auf die Teilentladungen gelegt (Teilentladung / Teilentladungen = TE). TE überbrücken nur einen Teil der Isolationsschicht und führen schlussendlich zu einem Spannungsdurchschlag. Der aus diesen Ladungen resultierende Stromfluss oder das magnetische Feld, welches bei einer Entladung abgestrahlt wird, kann messtechnisch erfasst werden. Um TE zu erzeugen wird der Prüfkörper mit Spannungsimpulsen mit steilen Spannungsflanken belastet. Um das breite Spektrum der Spannungsimpulse erfassen zu können, wird eine berührungslose Detektion mittels einer HF-Antenne angewendet.

Bewertung und Modellierung von Ausfallmechanismen

Nach der Literaturrecherche wurde festgelegt die thermische, elektrische und mechanische Erosion bei den Prüfkörpern hervorzurufen und zu prüfen, wie sich die Erosionsprozesse auf die Lebensdauer der Prüflinge auswirken. Um die Ausfallmechanismen vergleichen zu können wurden zwei Prüfstände konstruiert, in denen die Erosionen simuliert werden können. Während die mechanische Erosion durch steile Temperaturgradienten in einem eigenen Prüfstand simulierbar ist, werden in einem zweiten Prüfstand die Prüfkörper elektrisch und thermisch belastet. Die parallele Belastung mit verschiedenen Effekten führt dazu, dass die Ausfallmechanismen verglichen und beurteilt werden können. In Abbildung 59 sind verschiedene mögliche Messergebnisse, die zu unterschiedlichen Bewertungen führen dargestellt. Werden die Prüflinge bei konstanter Temperatur mit verschiedenen Spannungsflanken belastet, ist ein erstes mögliches Ergebnis, dass die Lebensdauer mit steigender Flankensteilheit sinkt bzw. sich die Alterung beschleunigt. In der Literatur wurde dieser Effekt ohne den Einfluss der Temperatur bereits an einfachen verdrillten Twisten aus Runddraht beobachtet. Dabei wurde ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der Spannungssteilheit festgestellt. Dieses Ergebnis würde bedeuten, dass die Prüflinge hauptsächlich auf Grund der elektrischen Belastung und der elektrischen Erosion altern und schlussendlich ausfallen. Ein zweites mögliches Ergebnis wäre, dass die Prüflinge unabhängig von der elektrischen Erregung zum selben Zeitpunkt ausfallen. Dieses Ergebnis würde bedeuten, dass die thermische Belastung überwiegt. Ein weiteres sehr interessantes Ergebnis wäre eine Kurve, die beiden linearen Verläufen folgt. Diese Kurve könnte so interpretiert werden, dass bei sehr aggressiver elektrischer Belastung die elektrische Erosion überwiegt und bei zunehmender thermischer Belastung die thermische Erosion zum späteren Ausfall der Prüflinge führt. Ein solches Ergebnis wäre für die robuste Auslegung eines Isolationssystems von großer Bedeutung, da abgeschätzt werden kann, welcher Erosionsprozess das System bei bestimmter Erregung schneller altert. Im weiteren Verlauf könnte neben der Spannungssteilheit die elektrische Erosion auch durch weitere Parameter wie der Spannungsamplitude oder der Frequenz variiert werden und so der Einfluss dieser Parameter auf die elektrische Erosion untersucht werden.

26. JULI 2022

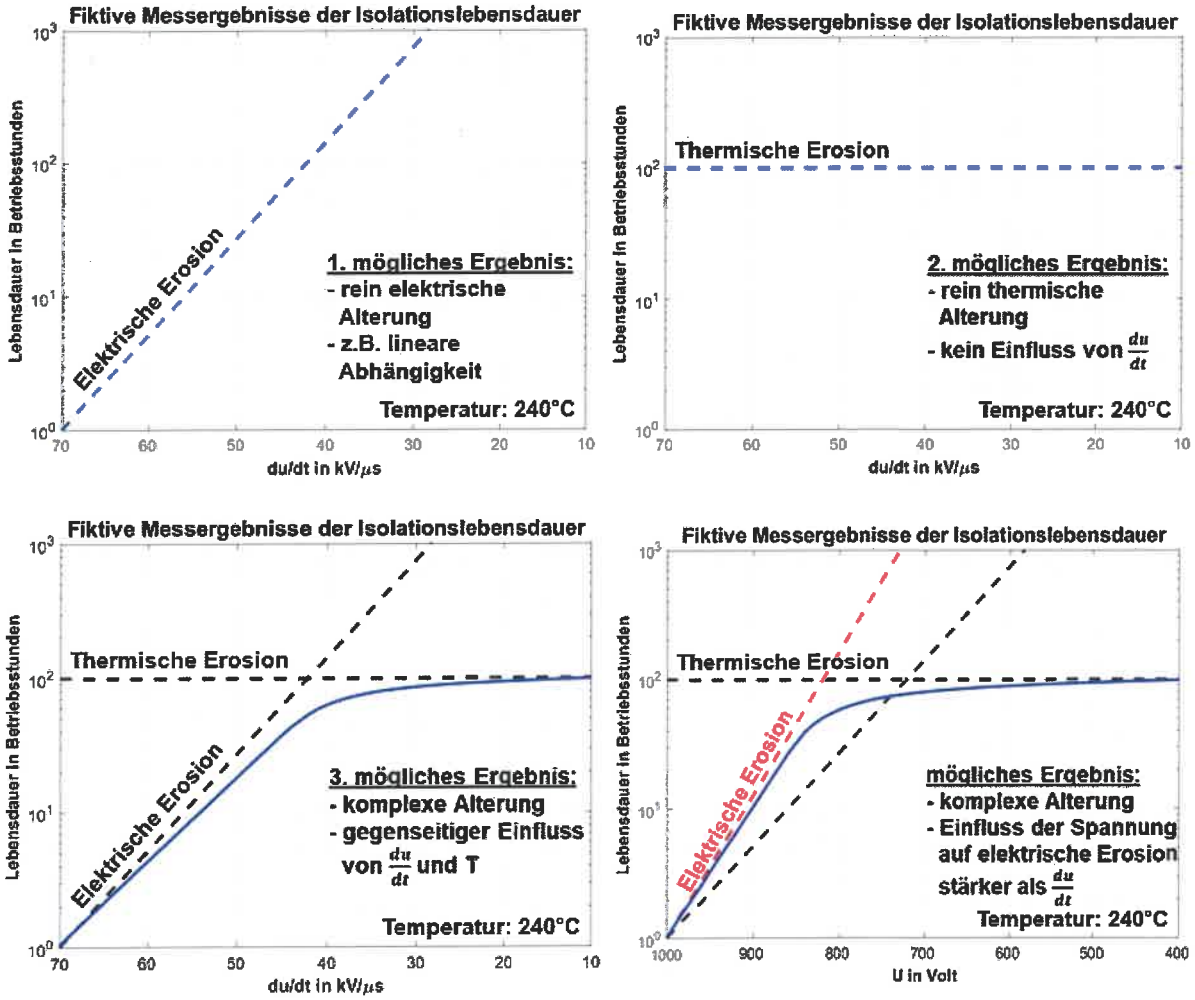


Abbildung 59: Physikalisch zu erwartende mögliche Messergebnisse (Lebensdauerfunktionen)

Das angestrebte Ergebnis der Lebensdauer Untersuchung ist, eine solche Funktion (einfache Lebensdauerbeschreibung) zu ermitteln und zu interpretieren.

Konstruktion, Fertigungsaspekte, Prüfung an geeigneten Musterstücken

Bei der Konstruktion geeigneter Prüfkörper musste ein Kompromiss zwischen Realitätsnähe und zeitlichem Aufwand gefunden werden. Es ist daher nicht sinnvoll, eine Vielzahl gesamter Statoren als Prüfkörper einzusetzen. Vielmehr sollen Prüfkörper verwendet werden, welche einen Teil (Ausschnitt) eines Stators mit seiner Geometrie und Isolierung abbilden. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden der Nutausgang und der Wickelkopf als anfällige Maschinenkomponenten identifiziert. Demnach wurden zwei Arten Prüfkörper aufgebaut, die erstens die reale Statornut und zweitens den realen Wickelkopf einer E-Maschine darstellen.

Abbildung 60 zeigt den Statornut-Prüfkörper (oder 2D Prüfkörper). Der eiserne Basiskörper des Prüflings stellt zwei nebeneinanderliegende Nuten dar, welche geeignete Maße hinsichtlich der verwendeten Hairpindrähte besitzen. Für einen realitätsnahen Aufbau wurden Hairpindrähte und die Isolationsmaterialien einer bekannten Statorkonstruktion in den Prüfkörpern eingesetzt. Die Hairpins sind gebogen und seitlich in die Nuten in insgesamt 8 Lagen eingeführt. Damit alle Hairpins auf einem Potenzial liegen, werden die jeweiligen Enden miteinander per WIG-Schweißen verbunden und gegenüber dem Basiskörper mit einer 200 µm Nutisolierung isoliert. Als Imprägnierverfahren wurde ein

Träufelverfahren gewählt. Um den Prüfkörper in den Prüfstand zur Simulation der thermischen Erosion zu integrieren, waren ein Kühlkonzept und die Entwicklung eines Kühlkreislaufs notwendig. Es wurde eine Wasserkühlung realisiert, mit einer konstanten Vorlauftemperatur und variablen Druck bis 8 bar. Die Anbindung des Prüfkörpers an das Kühlsystem erfolgt über einen Kühlkörper, der durch seine mäanderförmige Struktur eine turbulente Strömung erzeugt und in Abbildung 60 rechts dargestellt ist.

Abbildung 60: 2D-Prüfkörper zur Abbildung der Nutisolation (li.), zugehöriger Kühlkörper (re.)

Die Wickelkopf-Prüfkörper (3D Prüfkörper) in der Abbildung 61 links bestehen aus einem Basiskörper aus Aluminium auf welchem zwei separate Spulen rechtwinklig angebracht sind. Diese Spulen stellen die Kreuzungen der Leiter im Wickelkopf dar und weisen einen realen Abstand von ca. 0,8 mm bis 1 mm zueinander auf. Die geometrischen Maße des Basiskörpers ergaben sich aus der Windungszahl der Spulen und der Geometrie des Leiters. Die Mindestinduktivität der Spule sollte 50 µH betragen, um TE-Messungen zu ermöglichen. Diese Prüfkörper sind für den Einsatz im dU/dt-Prüfstand zur Untersuchung der thermischen und elektrischen Ausfallmechanismen geeignet.

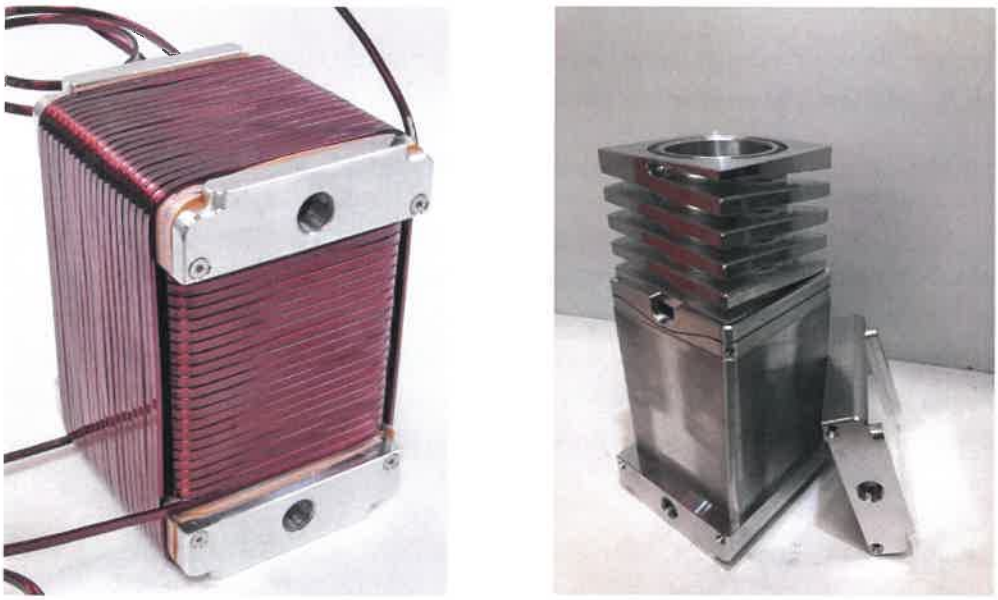


Abbildung 61: 3D-Prüfkörper zur Abbildung der Wickelkopfsituation (li.), Struktur mit Kühlkern (re.)

Für den Einsatz im dT/dt-Prüfstand wurde der vorhandene Basiskörper um einen Kühlkern erweitert. Der Kühlkern führt das Kühlwasser in zwei gegenläufigen Spiralen am Rand des Basiskörpers entlang

26. JULI 2022

wobei eine turbulente Strömung und eine verbesserte Kühlleistung entsteht (Abbildung 61 rechts). Die entsprechenden Konstruktionszeichnungen aller Prüfkörper liegen vor.

Tabelle 5: Materialien für das Isolationssystem der Prüfkörper

Leiterisolation	VonRoll Thermex 220 G3
Nutgrundisolation	VonRollMyoflex 2NK25, 0,21mm
Imprägnierharz	ELANTAS. ELAN-protect UP 343

In der Tabelle 5 sind abschließend noch die Materialien des Isolationssystems aufgeführt. Im Anschluss werden die Prüfkörper in die Prüfumgebung integriert und gemäß Messplan mit dU/dt und dT/dt belastet. Die Prüfungen und deren Auswertung sind Schwerpunkt des Abschnitts 2.10.5.

2.10.2 Bewertung der Lastkollektive für NFZ

Definition von Lastkollektiven

Eins der Ziele dieses Unterpunktes ist es, anhand von Fahrzyklen eventuelle Differenzen zwischen der Belastung einer LKW und einer PKW Maschine hinsichtlich thermischer und elektrischer Belastung zu identifizieren. Als repräsentative Fahrzyklen wurden für den LKW die Strecken Hannover-Magdeburg und Koblenz-Trier in 2018 festgelegt. Für den PKW gilt standardmäßig der WLTP Fahrzyklus (Abbildung 62). Untersucht werden sollen die möglichen Einflüsse hinsichtlich elektrischer (durch dU/dt) und mechanischer (durch dT/dt) Alterung.

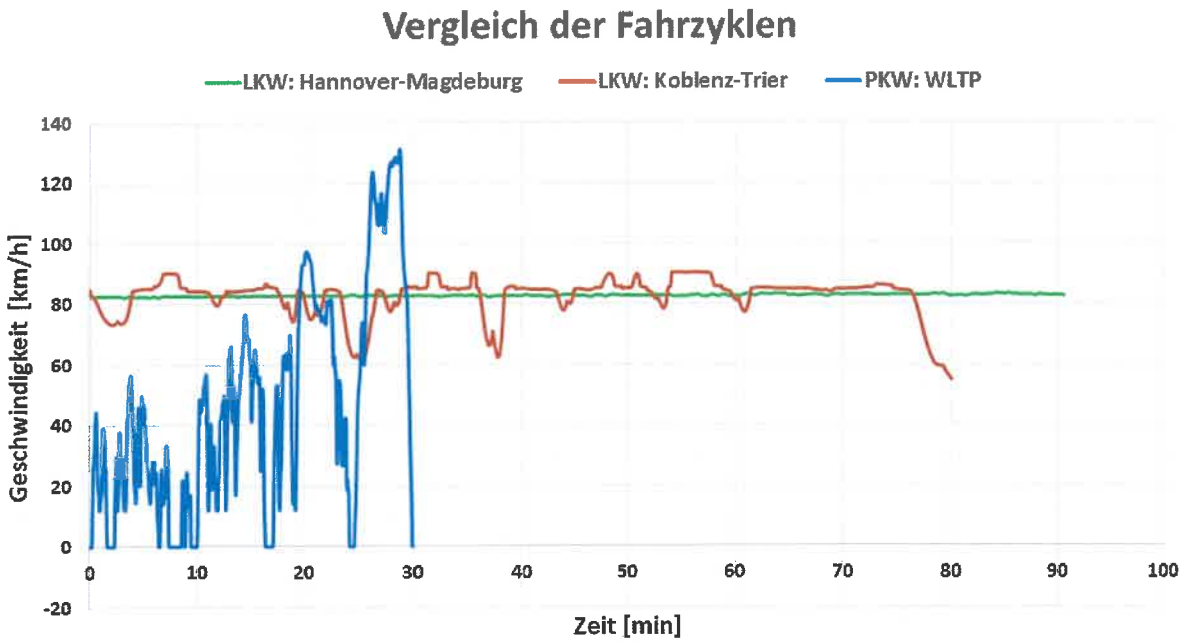


Abbildung 62: Definition und Vergleich der Fahrzyklen

Charakterisierung elektrische Belastung

Um die elektrischen Lasten zu bewerten, wurde auf Basis eines Kettenleitermodells ein Tool zur Spannungssimulation am Umrichter, auf den Leitungen zwischen Umrichter und elektrischer Maschine und

26. JULI 2022

den Klemmen der elektrischen Maschine entwickelt. Im Modell sind verschiedene Parameter wie Flankensteilheit, Zwischenkreisspannung, Frequenz oder Modulationsindex variierbar. Abhängig von den Leitungslängen der Zuleitung und der Abschlussimpedanz der elektrischen Maschine kann die Spannungsverteilung beliebiger Maschinen simuliert werden. Die Kopplung der einzelnen Phasen untereinander wird dabei berücksichtigt. In Abbildung 63 sind die Spannungsverteilungen der drei Phasen dargestellt. Bei der elektrischen Belastung allerdings reicht nicht aus die Komponente einzeln zu betrachten. An dieser Stelle ist ein Vergleich des gesamten Antriebstrangs erforderlich (Gestaltung der Zuleitungen, Wechselrichter), da die transienten Spannungserhöhungen von den Impedanzen auf der Zuleitung und in der Wicklung der elektrischen Maschine abhängen. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Höhe der Leitungsinduktivität (Länge der Leitungen) die Spannungsflanke staucht bzw. streckt. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die höheren Strangspannungen der LKW-Maschinen zu höheren elektrischen Feldstärken zwischen den Leitern untereinander und zwischen den Leitern und dem Blechpaket führen. Bei identischen Isolationssystemen steigt dadurch die Wahrscheinlichkeit des Zündens von TE, die die Isolationsschicht beschädigen und den Alterungsprozess beschleunigen. Für die späteren Messungen des Einflusses von dU/dt in Abschnitt 2.10.5 lässt sich festlegen, dass unabhängig von einem Isolationssystem (PKW oder LKW spezifisch) möglichst hohe Gradienten von dU/dt untersucht werden sollen.

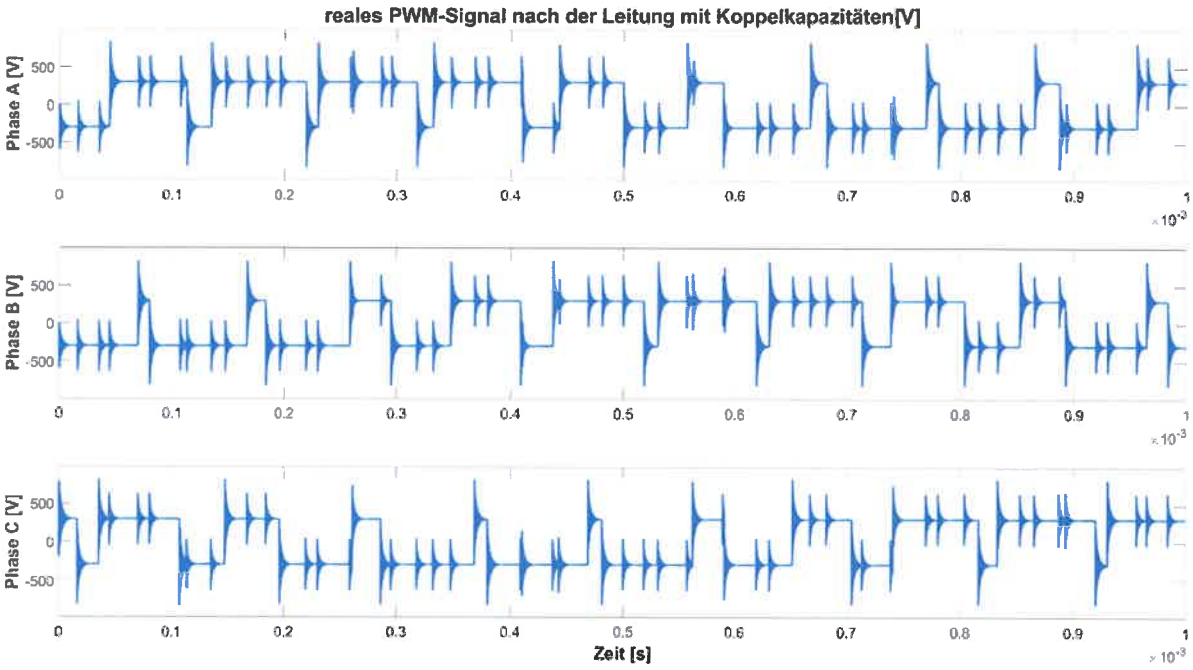


Abbildung 63: Spannungsverteilung an den Motorklemmen mit Phasenkopplung (LKW)

Charakterisierung thermische Belastung

Mit einem EM Temperaturmodell und mit Berechnung der Verlustleistungen der elektrischen Maschinen im Fahrzyklus wurde die Temperaturverteilung innerhalb der elektrischen Maschinen während der Zyklen simuliert. Obwohl die LKW-Zyklen im Vergleich zum WLTP weniger dynamisch sind, konnten, über die gesamten Fahrzyklen verteilt, hohe Verlustleistungsspitzen festgestellt werden. Diese resultieren wiederum in stark schwankenden Temperaturen und hohen Temperaturgradienten in der Statorwicklung in Abbildung 64. Die hohen Gradienten führen zu einer erhöhten mechanischen Erosion und folglich zu einer schnelleren Alterung des Isolationssystems.

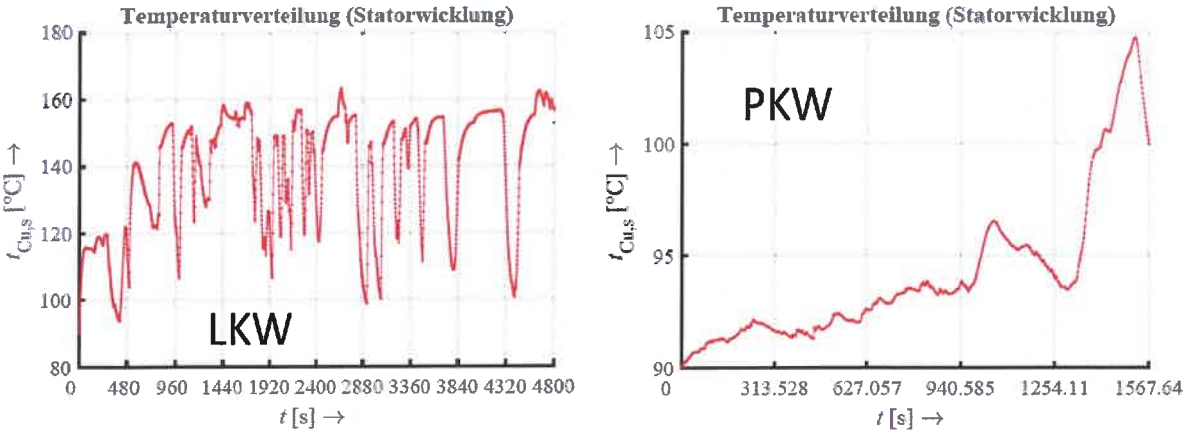


Abbildung 64: Temperaturverlauf in der Statorwicklung. LKW: Koblenz-Trier, PKW: WLTP

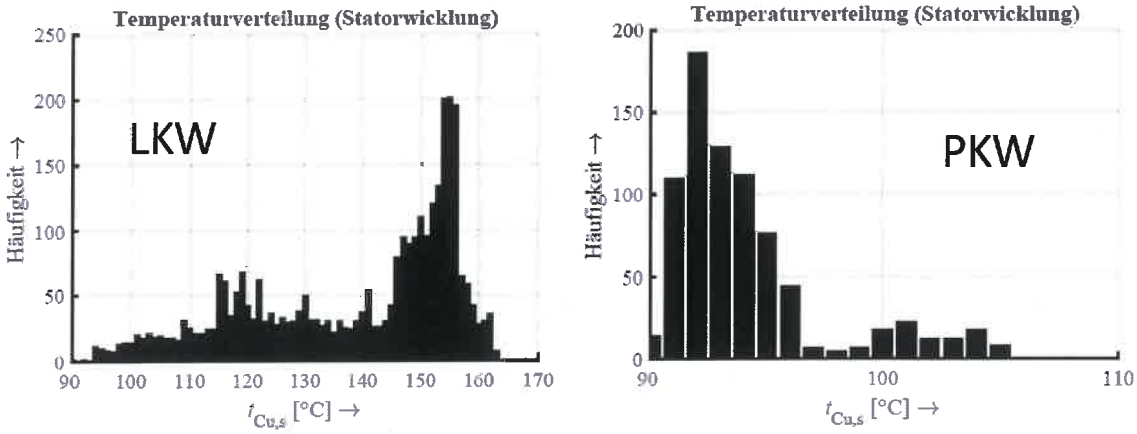


Abbildung 65: Häufigkeit der Temperaturen der Wicklung der E-Maschine im LKW und PKW

Aus der Auswertung der Temperaturhäufigkeit basierend auf den zeitlichen Temperaturverläufen resultiert das Ergebnis, dass unter der Berücksichtigung der jeweiligen Zyklen die häufigste Temperatur in der PKW Komponente bei 92 °C liegt und in der LKW Komponente deutlich höher bei 155 °C. Dieses Ergebnis wird bei den späteren Messungen (Abschnitt 2.10.5) so berücksichtigt, dass für ein LKW Isolationssystem eine maximale Temperatur der Wicklung den Wert 155 °C nicht unterschreiten soll.

Vergleich PKW / LKW

Wie bereits im vorherigen Teilabschnitt erläutert, ist die thermische Belastung der LKW-Maschine im Vergleich zur PKW-Maschine nachweislich höher. Hohe Temperaturgradienten, wie sie bei der LKW E-Maschine vorkommen, rufen eine stärkere inhomogene Temperaturverteilung hervor und die mechanischen Spannungen zwischen den Komponenten werden erhöht. Grund dafür sind neben den Temperaturunterschieden die verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien. Die folglich erhöhte mechanische Erosion kann zum früheren Ausfall des Isolationssystems führen. Die elektrische Belastung ist bei jeder E-Maschine unterschiedlich und hängt hauptsächlich mit den Leitungsimpedanzen und der Abschlussimpedanz zusammen. Auf Grund der höheren Spannungen sollen dann entsprechend robustere Isolationsmaterialien genutzt und aufwändigere Vergussmethoden angewandt werden, was das Isolationssystem wiederrum resistenter gegenüber TE gestaltet.

26. JULI 2022

2.10.3 Auslegung einer E-Maschine für NFZ

Grundauslegung

Ausgehend von den im Abschnitt 2.10.0 dargestellten Anforderungen an die Eigenschaften der auszulegenden E-Maschine wurde mit dem internen Auslegungsprozess eine Grundauslegung einer dreiphasigen permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine durchgeführt. Die Grundauslegung liefert einen möglichen Querschnitt der E-Maschine mit einer verhältnismäßig einfachen Topologie des magnetischen Kreises sowie die dazugehörigen statischen Betriebskennlinien der Maximalgrößen bei der definierten DC Spannung.

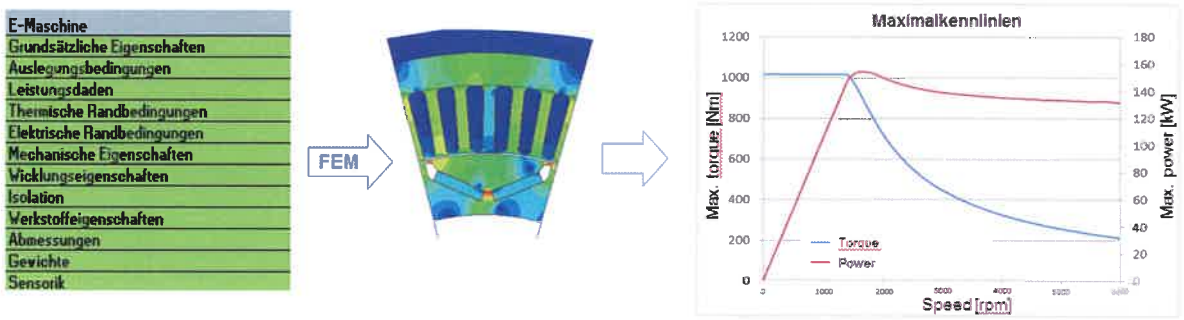


Abbildung 66: Ergebnis der Grundauslegung: Flussdichteverteilung und Maximalkennlinien

Die grundsätzliche Realisierbarkeit der maximale Anforderungen an die E-Maschine in dem vorgegebenen Bauraum Tabelle 4 konnten in diesem Schritt bestätigt werden.

Kühlung

Die Dauergrößen wurden in diesen Auslegungsschritten noch nicht ermittelt, die erforderliche Funktion über die abführbare Verlustleistung wird in späteren umfangreichen Untersuchungen erarbeitet. Aufgrund der Einbausituation der E-Maschine in einer Getriebestruktur wird als Kühlungsart eine Wickelkopf-Ölkühlung mit Getriebeöl vorausgesetzt. Untersuchungen zeigen, dass diese Kühlungsart bei der vorliegenden Maschinengeometrie deutlich geeigneter ist im Vergleich zu einer klassischen Wassermantelkühlung. In axialer Richtung ist die Wickelkopflänge (65 mm) vergleichbar mit der aktiven Länge des Blechpaketes (75 mm). Bei einer klassischen Wassermantelkühlung ist der Wickelkopf die heißeste Stelle der zu kühlenden Wicklung. Eine vergleichbar lange aktive Länge würde in diesem Fall aufgrund einer verhältnismäßig geringen Kühlfläche zu einer relativ kleinen kühlbaren Leistung führen und somit die Dauergrößen des Drehmomentes und der Leistung nennenswert reduzieren. In der Praxis ist für axial relativ kurze E-Maschinen eine direkte Wickelkopfkühlung effizienter und führt zu hö-

heren Dauerwerten. Darüber hinaus ist bei der vorliegenden Antriebstopologie das notwendige Kühlmedium bereits am Anbauort im Getriebe vorhanden wodurch ein separater Kühlkreislauf mit einem anderen Kühlmedium überflüssig ist.

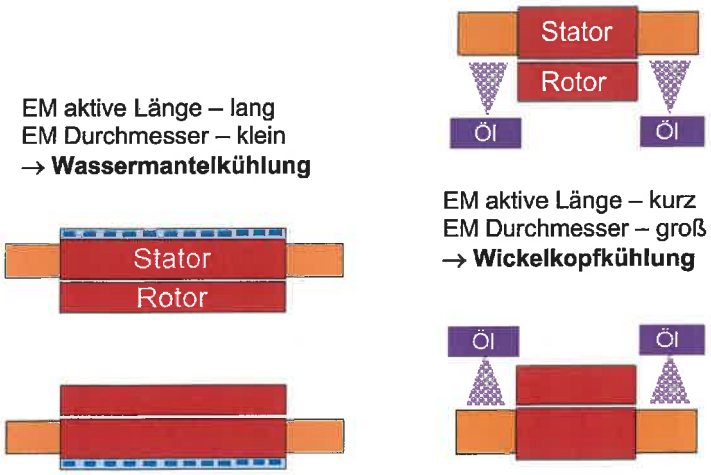


Abbildung 67: Geometrischer Vergleich einer E-Maschine mit Wassermantel und mit Ölkühlung

Werkstoffe

Folgende Werkstoffe und grundsätzliche Werkstoffeigenschaften wurden bei der Berechnung der E-Maschine verwendet:

- Bleche: Surahammars NO20-1200HS mit 0,2 mm Dicke (3,0 % Si und 0,4 % Al)
- Magnete: Vacuumschmelze VACODYM 974 AP (max. 210 °C)
- Wicklung: Kupfer

In der abschließenden Berechnung der finalen optimierten Variante wurden zusätzlich die geometrischen Eigenschaften der Isolation eingesetzt:

- Drahtisolation: 160 µm Dicke (Temperaturklasse H)
- Nutisolation: Dreischicht-Laminat NKN, Dicke 200 µm

Optimierung des magnetischen Kreises

Im nächsten Auslegungsschritt wurde die Optimierung der Grundauslegung mittels Untersuchung verschiedener Magnet- und Rotorgeometrien sowie Wicklungsvarianten für gleich bleibende Dimension der E-Maschine durchgeführt. Das Ziel der Optimierung ist zuerst ein möglichst hohes Drehmoment und Leistung der E-Maschine aufgrund der angenommenen späteren Reduktion dieser Werte zu Gunsten einer erhöhten Lebensdauer. Im ersten Schritt der Optimierung wird die Anordnung, Anzahl und Geometrie der Magnete im Rotor variiert (Abbildung 68).

Aufgrund der höchsten Werte der Drehmomente und Leistungen wird die Variante M2 weiter optimiert. Eines der Hauptziele ist die Reduktion der Auswirkung der Stromverdrängung und dadurch eine verbesserte Dauerleistung. Im Hinblick auf die dreiphasige Hairpin-Wicklung sind für die gegebenen Randbedingungen und zur Darstellung geeigneter spannungshaltender Windungszahlen an erster Stelle Varianten mit vier bzw. acht Leitern je Nut untersucht worden.

26. JULI

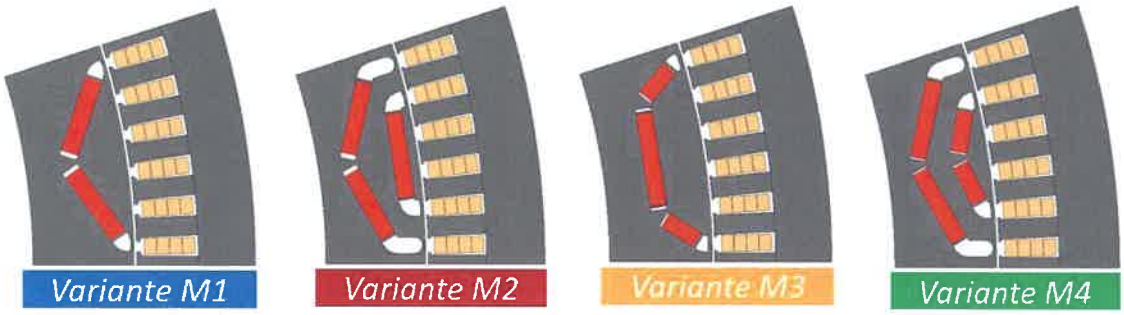


Abbildung 68: Rotorvarianten mit unterschiedlichen Magnettopologien. Stator ist identisch

Die spannungshaltende Windungszahl verbleibt dabei für beide Wicklungsvarianten konstant. In der nächsten Optimierungsstufe des magnetischen Kreises wurden iterativ die Lufttaschen, die Zahn- und Nutgeometrie sowie die exakte Lage der Leiter in der Nut mit Hilfe der FEM Berechnung iterativ optimiert (Abbildung 69).

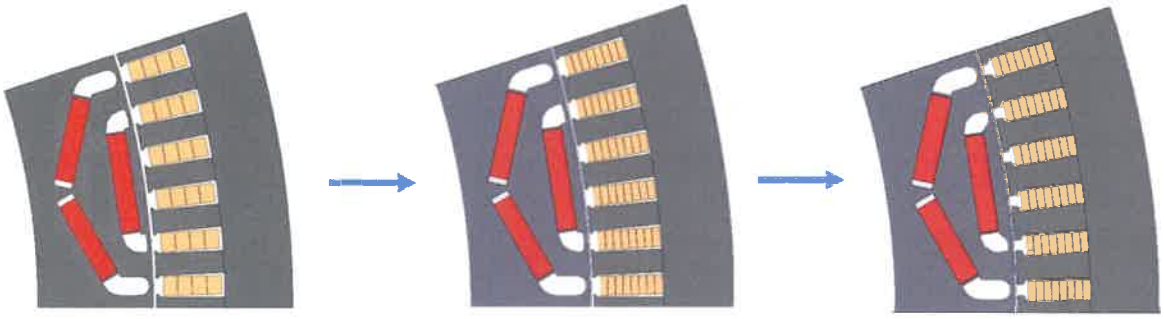


Abbildung 69: Optimierungsschritte mit Wicklungsvarianten, Lufttaschen, Zahn- und Nutgeometrien

Das Ergebnis in Abbildung 70 zeigt eine verbesserte Dauerkennlinie der E-Maschine im Bereich der höheren Drehzahlen.

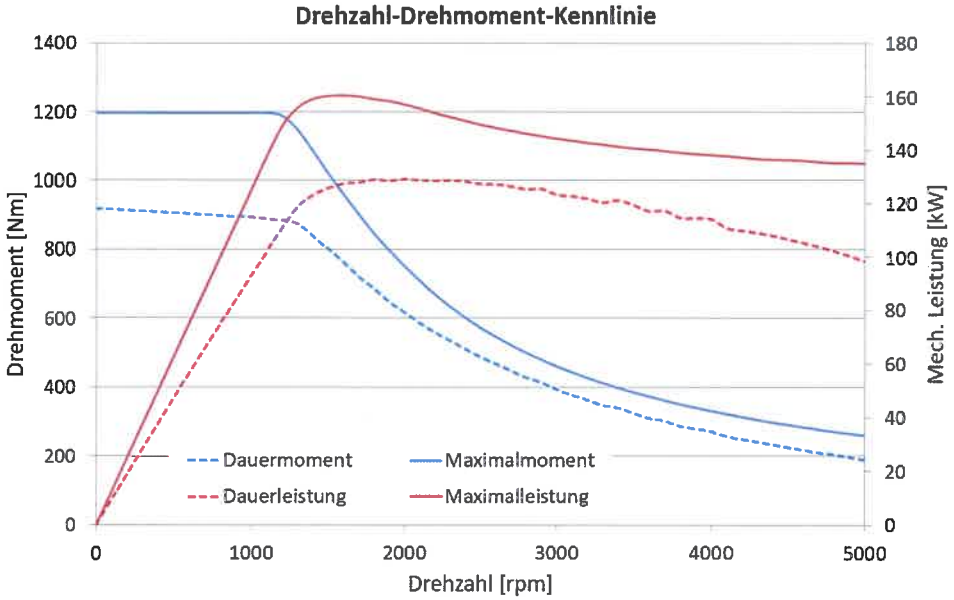
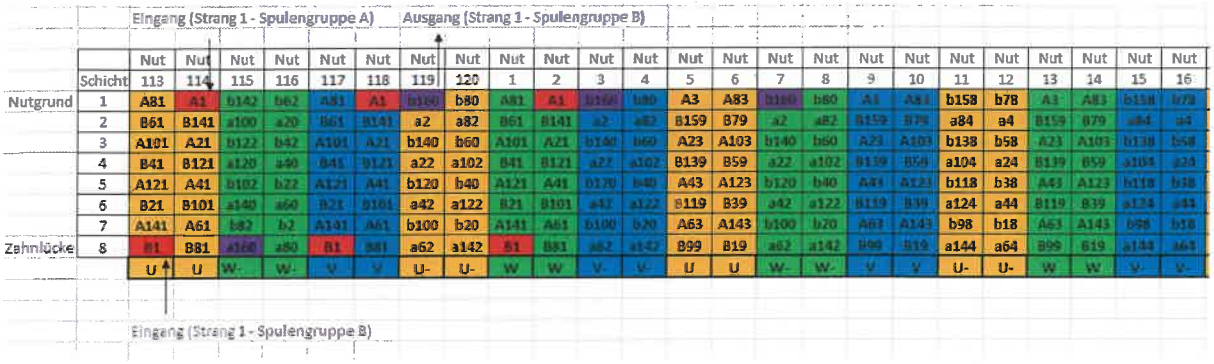


Abbildung 70: Kennlinien der E-Maschine M2 mit optimiertem magnetischen Kreis

26. JULI 2022

Die entworfene Wicklungstopologie ist als ein Statorausschnitt von Nut 113 bis 16 in Abbildung 71 dargestellt. Farblich hervorgehoben sind in roter Kennung jeweils die Spuleneingänge, in lila Farbkennung sind die Spulenausgänge gekennzeichnet. Die übrigen Farben dienen jeweils zur Unterscheidung der einzelnen Stränge.



	Schicht	Nut 113	Nut 114	Nut 115	Nut 116	Nut 117	Nut 118	Nut 119	Nut 120	Nut 1	Nut 2	Nut 3	Nut 4	Nut 5	Nut 6	Nut 7	Nut 8	Nut 9	Nut 10	Nut 11	Nut 12	Nut 13	Nut 14	Nut 15	Nut 16
Nutgrund	1	A81	A1	b142	b62	A81	A1	b160	b80	A81	A1	b160	b80	A3	A83	b160	b80	A1	A81	b158	b78	A1	A83	b138	b78
	2	B61	B141	a100	a20	B61	B141	a2	a82	B61	B141	a2	a82	B159	B79	a2	a82	B159	B79	a84	a4	B159	B79	a84	a4
	3	A101	A21	b122	b42	A101	A21	b140	b60	A101	A21	b140	b60	A23	A103	b140	b60	A23	A103	b138	b58	A23	A103	b138	b58
	4	B41	B121	a120	a40	B41	B121	a22	a102	B41	B121	a22	a102	B139	B59	a22	a102	B139	B59	a104	a24	B139	B59	a104	a24
	5	A121	A41	b102	b22	A121	A41	b120	b40	A121	A41	b120	b40	A43	A123	b120	b40	A43	A123	b118	b38	A43	A123	b118	b38
	6	B21	B101	a140	a60	B21	B101	a42	a122	B21	B101	a42	a122	B119	B39	a42	a122	B119	B39	a124	a44	B119	B39	a124	a44
	7	A141	A61	b82	b2	A141	A61	b100	b20	A141	A61	b100	b20	A63	A143	b100	b20	A63	A143	b98	b18	A63	A143	b98	b18
Zahnlücke	8	B1	B81	a160	a80	B1	B81	a62	a142	B1	B81	a62	a142	B99	B19	a62	a142	B99	B19	a144	a64	B99	B19	a144	a64
		U	U	W-	W-	V	V	U-	U-	W	W	V-	V-	U	U	W-	W-	V	V	U-	U-	W	W	V	V-

Abbildung 71: Auszug aus dem Wickelschema, Nutbelegungen über 2 Polpaare mit Ein- / Ausgängen

Mechanische Rotorfestigkeit

Nach der Optimierung der magnetischen Eigenschaften soll im nächsten Schritt die mechanische Festigkeit überprüft und ggf. verbessert werden. Die Untersuchung erfolgt auf Basis der Auswertung der Von-Mises-Vergleichsspannungen. Für die Optimierung hinsichtlich der Rotormechanik wird als Ziel ausgegeben, dass bei maximaler Betriebsdrehzahl die nach Datenblatt mindestens gewährleistete Streckgrenze von 400 Nm/mm² unterschritten wird und eine entsprechende Reserve bei einer möglichen Überdrehzahl vorgehalten wird. In Abbildung 72 ist die Ausgangssituation bei 5000 min^{-1} gezeigt.

Abbildung 72: Von-Mises-Spannungen @ 5000 min^{-1} Startdesign aus elektromagnetischer Rechnung

Es ist ersichtlich, dass der Bereich um den Mittelsteg zwischen den Magneten der hinteren Magnetlage mechanisch sehr stark belastet ist und Von-Mises-Spannungen bis zu 1100 MPa erreicht werden. Zwecks Reduktion der Spannungen wurden folgende Optimierungsschritte durchgeführt:

- Verdickung des Rotorrückschlusses um etwa 23 %,
- Verbreiterung und Optimierung des Mittelsteg zwischen den Magneten,
- Bessere Positionierung und geometrische Anpassung der vorderen Lufttaschen.

In einem iterativen Prozess muss die aus der mechanischen Optimierung resultierende Geometrie stets durch elektromagnetische Berechnung abgeprüft werden, sodass auch die Rückwirkungen auf die Elektromagnetik in der Optimierung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Optimierung hinsichtlich der Rotormechanik sind in Abbildung 73 dargestellt. Bei einer Überdrehzahl von etwa 10 % und 5500 min^{-1} befinden sich die maximal auftretenden Von-Mises-Spannungen mit 377 MPa noch

26. JULI 2022

unterhalb der gesetzten Grenze von 400 Nm/mm². Somit wurde eine Rotorgeometrie definiert, welche der mechanischen Festigkeit die Werkstoffgrenzen einhält.

Abbildung 73: Von-Mises-Spannungen bei 5500 min^{-1} – Design nach der Rotoroptimierung

Berechnung der finalen elektromagnetischen Eigenschaften

Im nächsten Schritt werden noch abschließende Kennlinien und Kennfelder der jetzt mechanisch optimierten E-Maschine berechnet, da die Änderungen im Bereich des Rotors erwartungsgemäß Auswirkungen auf die elektromagnetischen Eigenschaften haben. Weitere Randbedingungen wurden bei dieser Berechnung ggü. der früheren Berechnungen berücksichtigt:

- Rotorschrägung um eine Nutteilung
- Geometrie der Lackisolierung der Profildrähte der Statorwicklung von 160 µm

Aus der finalen Berechnung ergibt sich maximales Drehmoment von etwa 1143 Nm und maximale Leistung von 152 kW bei 600 V. Die zugehörigen Drehmoment-Drehzahl- sowie die Drehmoment-Leistungs-Kennlinien sind in Abbildung 74 gezeigt. Aus den Berechnungen geht hervor, dass die Anforderungen an die Maximalgrößen aus der Tabelle 4 überschritten werden.

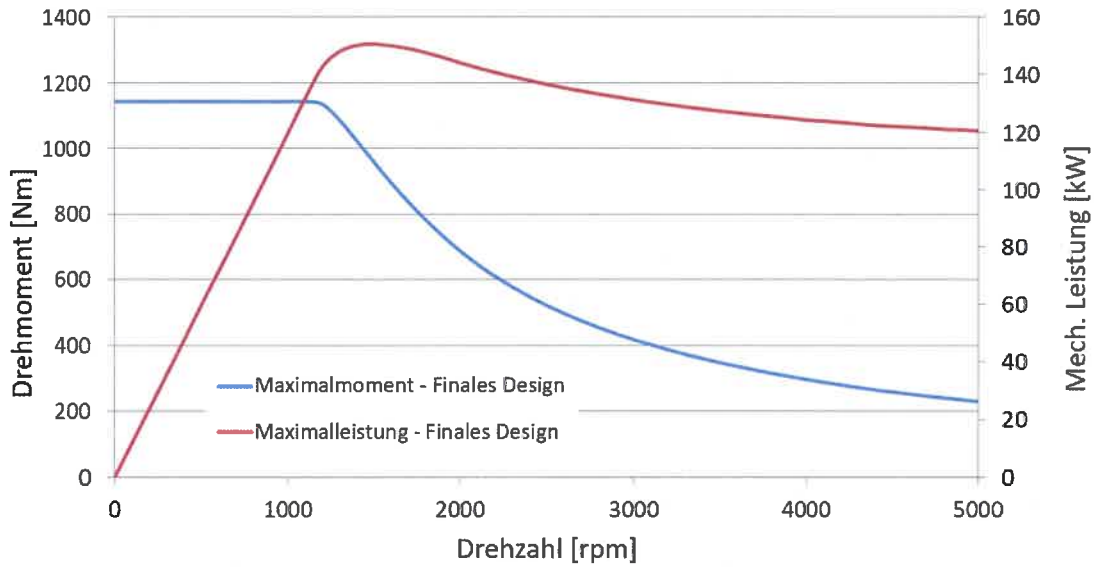


Abbildung 74: Maximale Drehmoment- und Leistungskennlinien der finalen Auslegung

26. JULI 2022

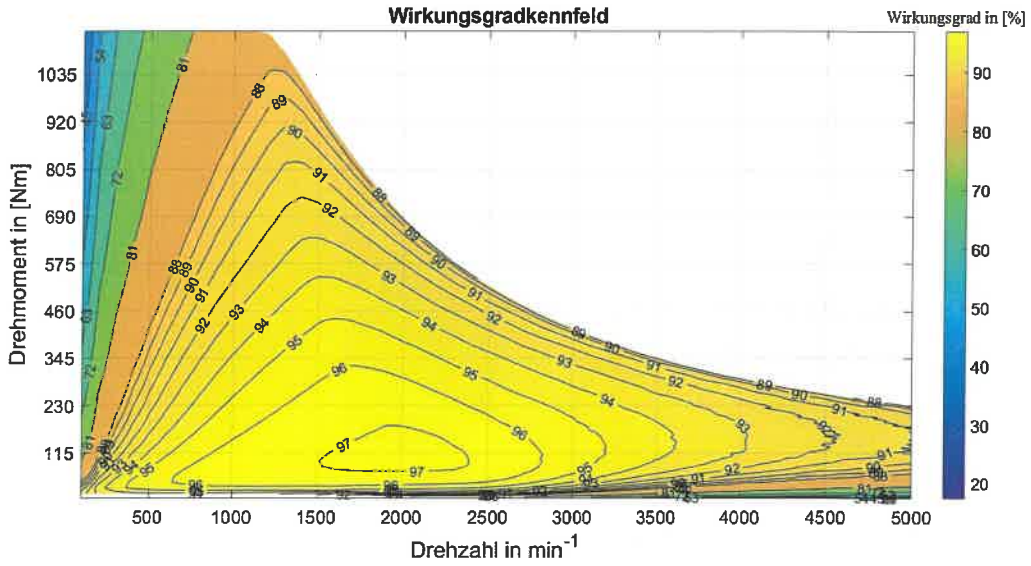


Abbildung 75: Wirkungsgradkennfeld der finalen Auslegung (isolationsdicke 160 µm)

Schließlich kann mit der finalen Auslegung eine Wirkungsgradkennfeld der Komponente berechnet werden, in Abbildung 75 ist das Kennfeld dargestellt. In Zahlenform wird das Kennfeld verwendet um auf der Fahrzeugebene weiterführende Berechnungen hinsichtlich elektrischer Verbrauch und Reichweite zu tätigen.

Zur Berechnung der Dauerkennlinien sind praktische Versuche zur kühlbaren Verlustleistung notwendig. Diese werden in Abschnitt 2.10.5 umfangreich behandelt und mit Hilfe der Ergebnisse in Form einer Kühlfunktion schließlich die Dauerkennlinien der E-Maschine in Abschnitt 2.10.6 präsentiert.

Die Auslegung der E-Maschine ist hiermit abgeschlossen und die finale Auslegungsvariante kann in die CAD-Konstruktion übergeben werden.

2.10.4 Konzept und Konstruktion der E-Maschine

In diesem Abschnitt wird die CAD-Konstruktion der ausgelegten und elektromagnetisch sowie mechanisch optimierten E-Maschine inklusive Kühlstruktur dargestellt. Ebenso beschrieben und erklärt wird die Konstruktion der Prüfumgebung zur Durchführung der geplanten Kühlungsaufgaben.

Konstruktion der E-Maschine

Die optimierte E-Maschine wurde in einer CAD Umgebung komplett konstruiert inkl. Erstellung von Konstruktionszeichnungen (nicht in diesen Bericht integriert). In Abbildung 76 ist die CAD Darstellung der gesamten E-Maschine gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass der Wickelkopf an der gesamten axialen Länge einen nennenswerten Anteil hat. E-Maschinen mit diesem Merkmal, wie bereits diskutiert, eignen sich sehr gut für die Kühlung des Wickelkopfanteils. Das Thema Kühlstruktur der E-Maschine wird in einem späteren Abschnitt behandelt.

26. JULI 2022

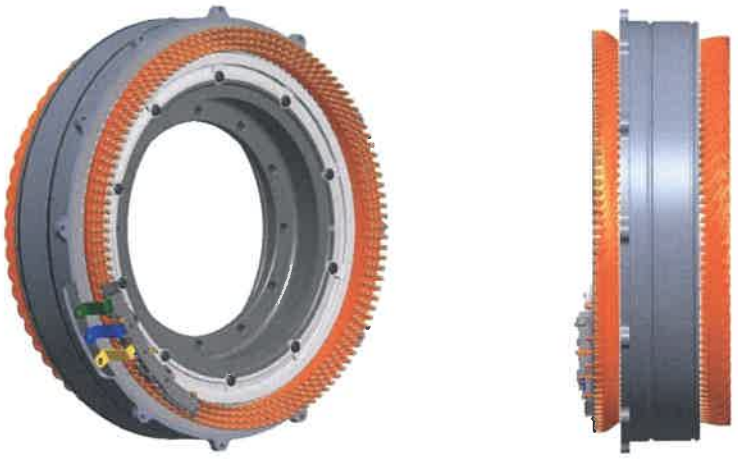


Abbildung 76: CAD Darstellung der gesamten E-Maschine

Im Folgenden werden die einzelnen Baugruppen dargestellt und beschrieben. Abbildung 77 zeigt die CAD-Konstruktion des Rotoraktivteils separat und die des Aktivteils montiert auf einem Rotorträger (dunkelgrau), seitlich fixiert mittels Wuchtscheiben (hellgrau). Wuchtscheiben dienen gleichzeitig zum Auswuchten des gesamten Rotors und mit dem Rotorträger wird die Verbindung zur Getriebestruktur hergestellt. Das Aktivteil ist axial in vier Teilsegmente unterteilt, die jeweils mit Einzelmagneten sowie der entsprechenden Magnetstruktur ausgestattet sind. Mit dieser Unterteilung wird eine Schrägung mit einem Schrägungswinkel von 5,625° realisiert.

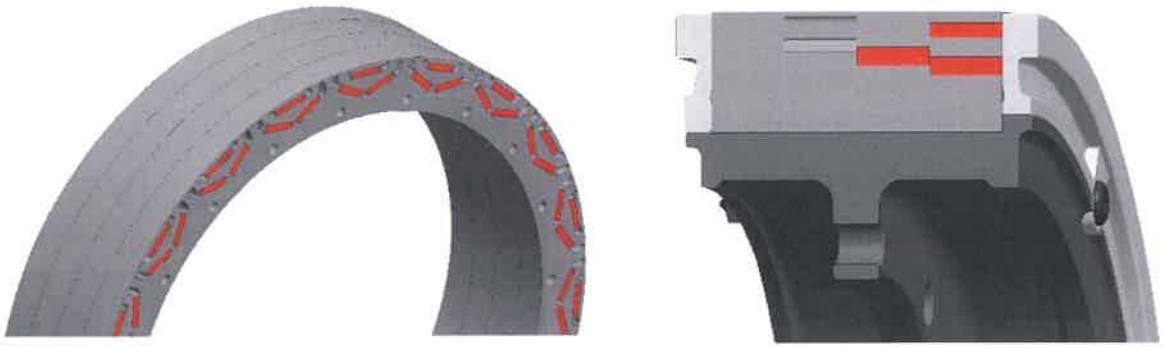


Abbildung 77: Rotor-Aktivteil (li.) und Aktivteil auf Rotorträger mit Wuchtscheiben (re.)

Die Statorkonstruktion ist in Abbildung 78 gezeigt. Das Statoraktivteil ist in einem hülsenförmigen Adapter (blaugrau) mit Befestigungslaschen für den Verbau im Getriebe mit Übermaß eingeschrumpft (li. + mit.). In dem Statoreisen (grau) ist die Hairpin-Statorwicklung platziert (kupferfarben). Pro Nut sind jeweils acht einzelne Hairpin-Leiter untergebracht, die mit Bezug auf die Längsansicht jeweils eine Twist- und eine Biegeseite ausbilden. Die einzelnen Verbindungen zwischen den Hairpin-Leitern sind als goldfarben angedeutete Schweißpunkte kenntlich gemacht. Die Aktivlänge ohne die Wickelköpfe beträgt in diesem Fall 75,4 mm. Des Weiteren sind die Sternschienen sowie in unterschiedlicher Farbkennung die Phasenanschlüsse abgebildet (li.). Die einzelnen Hairpin-Leiter weisen jeweils eine Isolationsschichtdicke von 160 µm auf, und sind in Nuten mit einem 200 µm dicken NKN Laminat gegen den Stator isoliert (re.).

26. JULI 2022

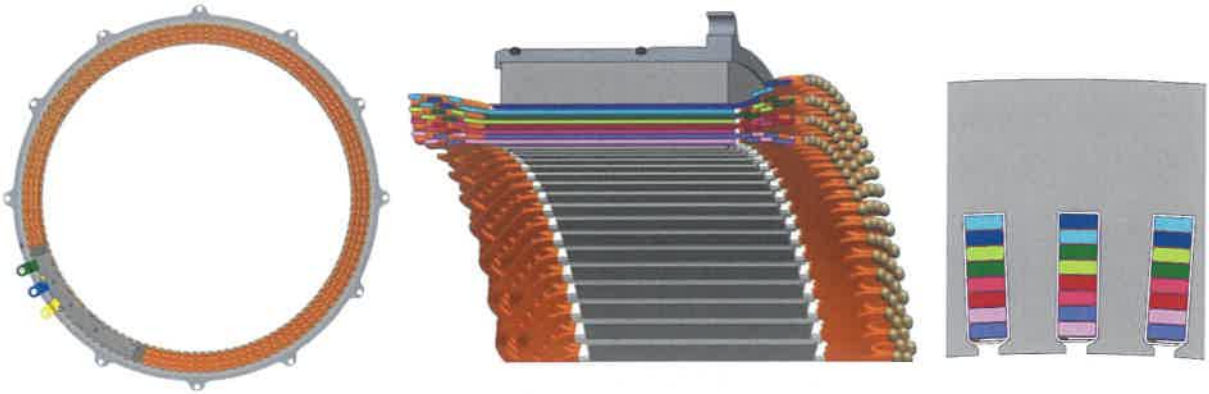


Abbildung 78: Stator mit Phasenanschlüssen (li.) , Schnitt mit dargestellter Statorwicklung (mit.) und Positionierung der Hairpins in der Nut (re.)

Die finale Kontaktierung der einzelnen Spulengruppen, des Sternpunktes sowie der Phasenanschlüsse wird mit Kontaktbrücken durchgeführt. Die Kontaktierung ist in 1,5 mm Kupferblech ausgelegt. Die Einhausung für Isolationszwecke erfolgt in ein aus Einzelteilen bestehenden Kunststoffgehäuse aus PA6-GF40. In Abbildung 79 ist die Einheit zusammengebaut und auch eine Explosions-Anordnung gezeigt. Final werden die Phasenanschlüsse in einen speziellen Anschlusskasten platziert.

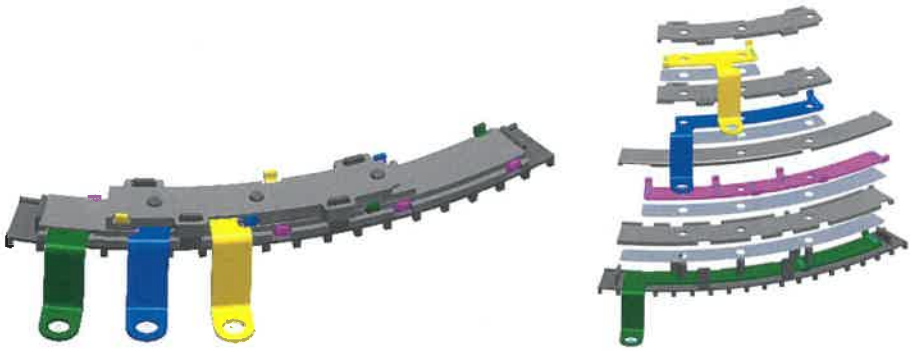


Abbildung 79: Zusammenbau der Kontaktbrücken

Grundkonstruktion der Kühlstruktur der E-Maschine

In dem Abschnitt 2.10.5 werden Aktivitäten zur Untersuchung der Wickelkopfkühlung durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Ausgewählte Ergebnisse fließen in diesem Abschnitt in die Definition einer passenden Wickelkopfkühlung der ausgelegten E-Maschine ein. Dabei soll eine Konstruktion entstehen mit einer Düsenanordnung, durch welche Öl an die Wickelköpfe gesprüht wird und diese kühlt. An dieser Stelle wird die einfachere Variante mit axialer Einspritzung und mit variabler Düsenpositionen als Konstruktion vorgeschlagen. Eine Anordnung mit radialer Einspritzung ist selbstverständlich auch konstruktiv umsetzbar. Abbildung 80 zeigt in der Ansicht der A-Seite (li.) die Bohrungen für die Öldüsen sowie die zwei Nuten für die O-Ringe zur Abdichtung des zentralen Ölkanals. In der Ansicht der B-Seite (mit.) ist im inneren des Gehäuses ein Ölablauf konstruiert. Des Weiteren ist die Scheibe der B-Seite dargestellt (re.), ebenfalls mit Bohrungen für die Düsen und Nuten für O-Ringe. Diese Scheibe wird nach dem Montieren der E-Maschine an den Flansch des A-seitigen Wickelkopfgehäuses geschraubt.
In Abbildung 81 ist der zusammengebaute Zustand inkl. E-Maschine gezeigt. Das Öl wird über einen zentralen Kanal auf der A und B Seite des Wickelkopfgehäuses zugeführt. Die Ölkanäle werden mit O-

Ringen abgedichtet und mit Deckplatten verschlossen. Die Öl Zu- und Rückleitung kann sinngemäß im Zuge der späteren hardwaretechnischen Integration der Komponente in die Getriebestruktur definiert werden. Am Ende dieses Abschnitts liegt ein kompletter Satz Konstruktionszeichnungen der Komponente E-Maschine inklusive der vorgeschlagenen Kühlstruktur für den Einsatz in einem schweren LKW vor.

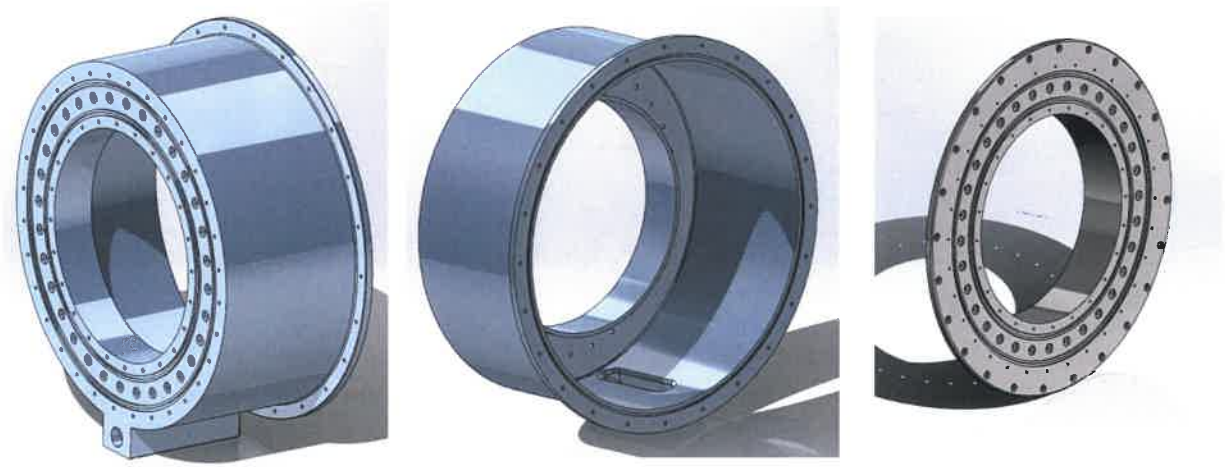


Abbildung 80: Wickelkopfgehäuse mit Düsenaufnahmen: Ansicht A-Seite (li.) und B-Seite (mit.), Wickelkopfgehäuse B-Seite mit Düsenkanal und Flansch (re.)

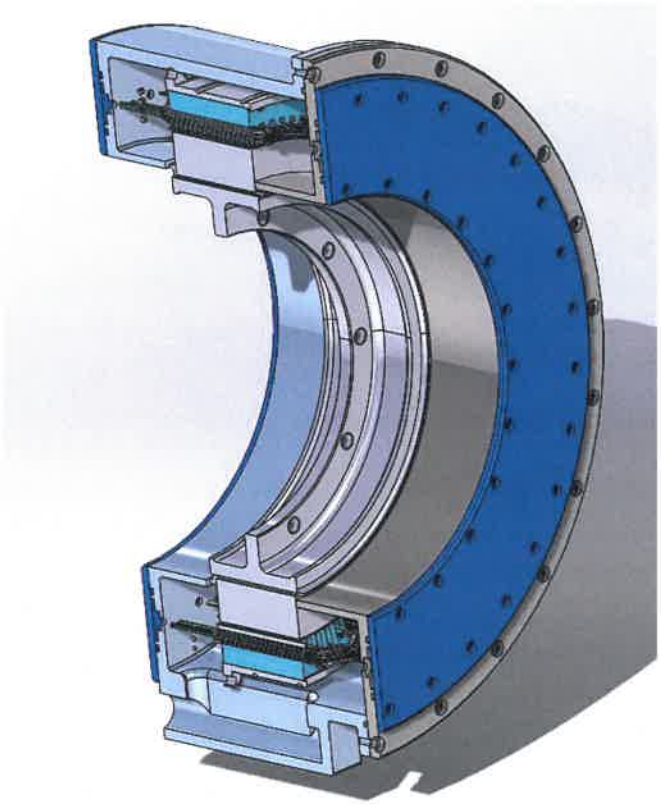


Abbildung 81: Wickelkopfgehäuse mit Maschine

Prüfumgebung zur Kühlung elektrischer Maschinen

Zur Analyse der Wickelkopfkühlung von elektrischen Maschinen wurde ein Kühlungsprüfstand konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen. Die Ergebnisse, gewonnen durch Messungen an einem

26. JULI 2022

realen Prüfling mit Hairpinwicklung fließen in die Bestimmung der realitätsnahen Dauerleistung der ausgelegten E-Maschine sowie in die Definition der Kühlstruktur der E-Maschine. Als Basis der Kühlungsüberlegungen diente der Ansatz der Ölkühlung, hier als Ölspritzkühlung ausgeführt, um die Wickelköpfe der E-Maschine effizient kühlen zu können. Dass durch die Ölspritzkühlung eine effiziente Kühlung gegeben ist, zeigt sich in den späteren Versuchen.

Der zu prüfende Stator (Ersatzstator, keine LKW Komponente) wird ein einem Kessel montiert mit Hilfe eines Adapters. Zudem kann eine E-Maschine ohne eigenen Rotor und Lagerung, nur mit dem Stator verwendet werden. Realistische Verwirbelungseffekte von Öl und Luft werden durch einen extern angetriebenen, nicht ferromagnetischen Ersatzrotor erzeugt. Eine Ölkonditioniereinheit mit Temperaturregelung, die Messdatenerfassung, der Antrieb der Rotorwelle, sowie eine umfangreiche Softwareoberfläche zur Steuerung und Regelung sowie zur Datenerfassung gehören zum Prüfstandumfang dazu. Abbildung 82 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Prüfstands mit Kessel mit Prüfmaschine im Inneren, Ölaufbereitung und Wärmetauscher.

Abbildung 82: Abgeschlossener Prüfstandsaufbau mit Ölkonditioniereinheit links

Die zu prüfende E-Maschine wird zuerst mit der Aufnahme und dem Adapter verbunden. Danach erfolgt die Montage der Temperatursensoren in beiden Wickelköpfen. Des Weiteren wird das Wickelkopfgehäuse mit Ölkanälen und den jeweiligen Öldüsen an die E-Maschine angebracht. Der fertig ausgestattete Prüfling wird schließlich durch die Aufnahme mit dem Kessel verbunden (Abbildung 83).

Ein besonderes Bauteil ist das Wickelkopfgehäuse. Dieses beinhaltet die Bohrungen für die Öldüsen, die definierte Anzahl der Öldüsen, einen Ölkanal, Ölzuführung, Ölablauf und Abdichtung. Jeweils ein Wickelkopfgehäuse wird an die beiden Wickelköpfe axial an die E-Maschine montiert. In Abbildung 84:ist der Aufbau gezeigt. Dargestellt sind die Düsenpositionen für die radiale Einspritzung, welche nun sämtlich durch Düsen und Blindstopfen belegt sind. Im linken Teil des Bildes ist noch die Belegung mit den O-Ringen am Ölkanal zu erkennen. Rechts sind die beim Projektpartner gefertigten Öldüsen gezeigt.

26. JULI 2022

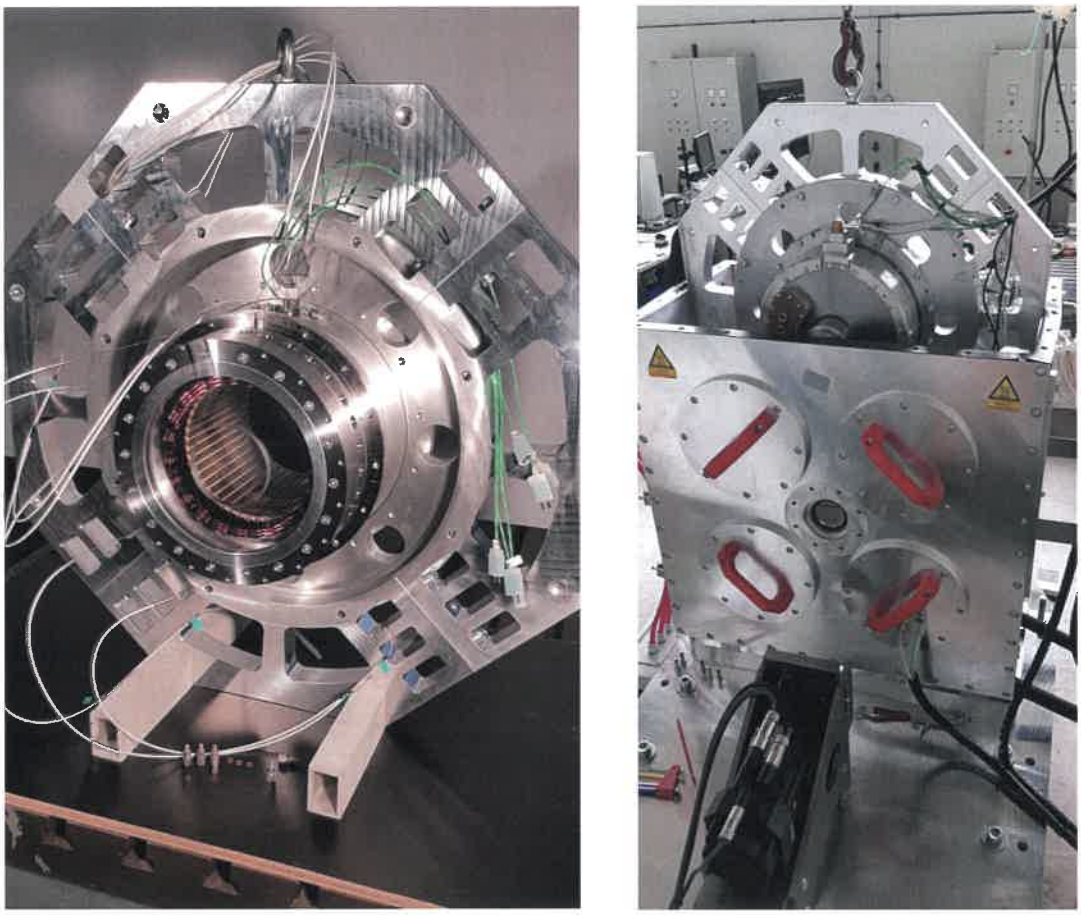


Abbildung 83: Montage eines Prüflings in den Prüfstandskessel

Abbildung 84: Radiale Düsenanordnung im Wickelkopfgehäuse Seite A (li.), Öldüsen (re.)

Eine Weiterentwicklung des Wickelkopfgehäuses zeigt die Abbildung 85. Neben des bereits bekannten radialen Düsenposition können in die entsprechenden axial positionierten Bohrungen auch die axialen Düsen montiert werden. Die Umschaltung zwischen der radialen und axialen Beölung wird manuell über ein Ventil umgestellt.

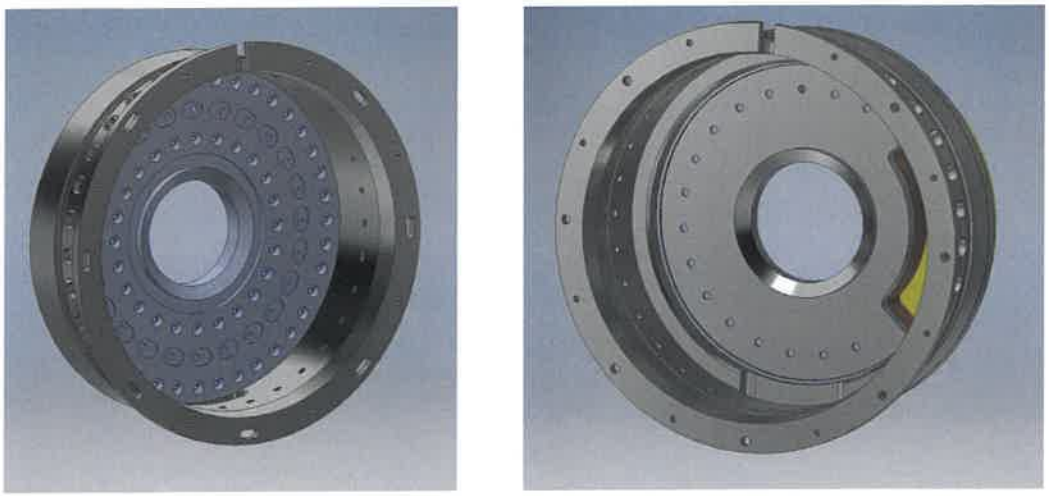


Abbildung 85: Wickelkopfgehäuse Seite A und B mit Düsenaufnahmen radial und axial

Am Ende dieses Abschnitts liegt ein kompletter Satz Konstruktionszeichnungen des Prüfstandes vor. Die Temperaturen der E-Maschine und des Öls werden mit einer max. Frequenz von 5 Hz im Datenfile erfasst. Während der Aufzeichnung können die Werte am Monitor grafisch mitverfolgt werden und so der Effekt bestimmter Variationen sofort sichtbar gemacht werden. Sämtliche Temperaturen, Drücke, Volumenströme, Leistungen, Drehzahlen, Ströme, Spannungen, usw. werden aufgezeichnet. Hierzu wurde eine grafische Umgebung erstellt (Abbildung 86).

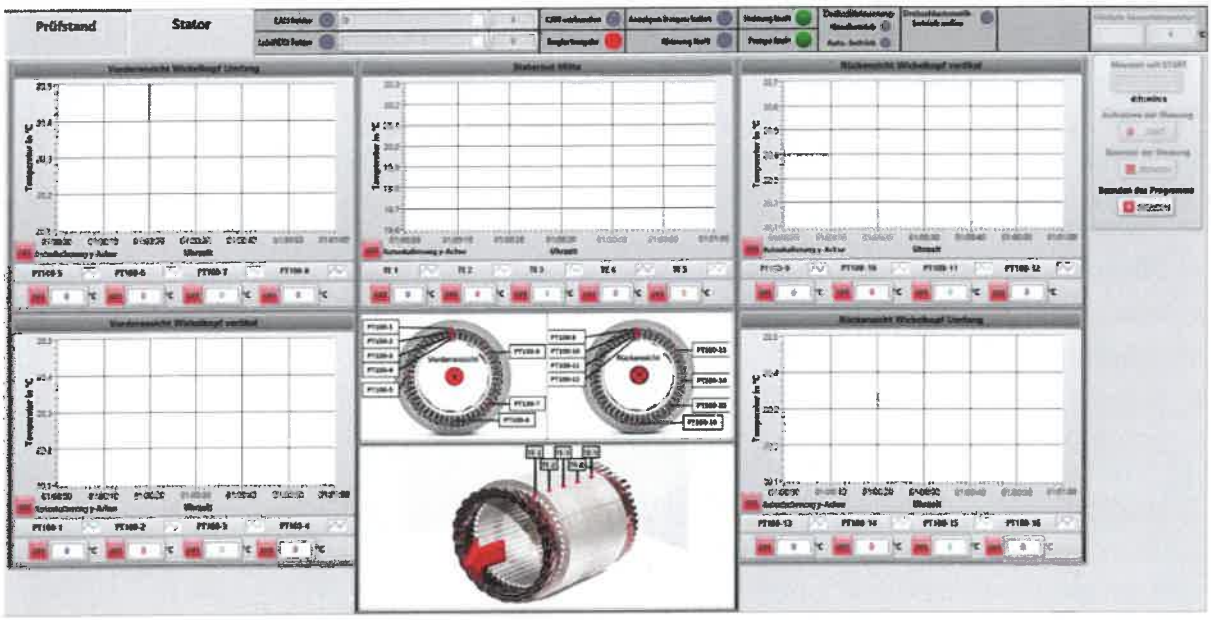


Abbildung 86: Graphische Erfassung der Messgrößen am Prüfstand

2.10.5 Ermittlung der Parameter für das Lebensdauermodell

Definition von spez. Prüfbedingungen und Inhalten in Richtung Lebensdauer der Isolation

Das elektrische Isolationssystem kann durch verschiedene Erosionsprozesse beschädigt werden. Im Fokus dieses Projekts standen die elektrischen, thermischen und mechanischen Erosionsprozesse, die in dem dU/dt- und dT/dt-Prüfstand untersucht werden können. Die Parameter mit denen die elektrische Erosion beeinflusst wird sind die Spannungsamplitude, die Frequenz und die Flankensteilheit. Auf

letzterem sollte der Fokus gelegt werden. Die thermische Erosion wird über die Temperatur und die mechanische Erosion wird über unterschiedliche Temperaturzyklen im dT/dt-Prüfstand eingestellt.

Die Prüfbedingungen in den ersten Messungen wurden höchstmöglich gewählt, um eine beschleunigte Alterung und zeitnahe Ausfälle zu provozieren. In späteren Messungen sollte die Belastung reduziert werden. Im dU/dt-Prüfstand wurden folgende Anfang-Prüfbedingungen gewählt:

- max. Zwischenkreisspannung von 800V / 1600V Überschwinger am Prüfkörper
- max. Frequenz von 30kHz
- max. dU/dt von 40kV/µs
- Temperatur von 260°C

Während die elektrische Belastung maximiert wurde, wurde die Temperatur von 260°C der DIN EN 60172 entnommen. Diese Norm beschreibt Vorschläge zu Warmlagerungsperioden zur Bestimmung der Temperaturindizes von elektrischen Isolationssystemen und ähneln der thermischen Belastung in diesem Projekt. Bei 260°C schreibt die Norm eine mittlere Lebensdauer von 14 Tagen vor. Der in diesem Projekt verwendete Flachdraht besitzt jedoch eine zusätzlich TE-resistente Lackschicht, die laut Herstellerangaben die Lebensdauer erhöhen soll. Auf derartige Lackschichten bezieht sich die Norm nicht, weshalb von einer längeren mittleren Lebensdauer ausgegangen werden kann. Die maximale Betriebstemperatur des Isolationssystems der vorliegenden Prüfkörper liegt bei 220 °C.

Im dT/dt-Prüfstand sollte der gleiche Ansatz verfolgt und die Prüfkörper zunächst höchstmöglich belastet werden. Basierend auf der Berechnungen der auftretenden Temperaturen in der Wicklung der OL LKW E-Maschine in Abschnitt 2.10.2 sollte die obere Grenztemperatur der Wicklung bei der Prüfung den Wert 155 °C auf keinen Fall unterschreiten, damit messbare Veränderungen der Isolation feststellbar sind. Die Abfang-Prüfbedingungen der Alterung waren folgende:

- Stromstärke: 120 A
- Wasserdruck: 2 bar
- Volumenstrom: 25,5 l/min
- Obere Grenztemperatur: 240 °C
- Untere Grenztemperatur: 50 °C
- dT/dt: 12 K/min (am Isolationspapier)

Zu beachten ist, dass der Temperaturgradient der Isolation nicht dem Temperaturgradienten des Kupferleiters entspricht. Daher ist zum Abgleich die Temperatur an mehreren Stellen des Prüfkörpers zu erfassen (insgesamt 5 Stellen).

Es wurden zwei Prüfstände entwickelt mit denen die Prüfkörper unter diesen Prüfbedingungen gealtert werden können. Neben den 6 Prüfkörpern, die elektrisch und thermisch belastet wurden, wurden 4 weitere Prüfkörper rein thermisch im Ofen belastet, um den Effekt der elektrischen Belastung auf die Lebensdauer zu untersuchen. In Abbildung 87 ist der Prüfstand mit 3 Prüfkörpern (2019) und 10 Prüfkörpern (2020) dargestellt.

26. JULI 2022

Abbildung 87: Wachsende Anzahl der parallel belastbaren Prüfkörper bei der dU/dt Messung

Nach Fertigstellung der 3D-Prüfkörper wurden diese zusätzlich zu den 2D-Prüfkörpern in den dT/dt-Prüfstand integriert, sodass 2D- und 3D-Prüfkörper gleichzeitig belastet werden konnten. Die Prüfkörper werden dazu seriell verschaltet und mit einem Strom von bis zu 120A belastet und erhitzt. Bei Erreichen der Grenztemperatur von 240°C schaltet sich der Strom ab und der Kühlkreislauf kühlt die Prüfkörper. Die Prüfkörper sind im Kühlkreislauf parallel geschaltet, sodass sich das Kühlwasser auf die Prüfkörper aufteilt. Da die Kühlspiralen der 3D-Prüfkörper nicht den gleichen Strömungswiderstand wie die Kühlkörper der 2D-Prüfkörper besitzen, wird die Durchflussmenge durch die 3D-Prüfkörper zusätzlich gemessen. Über ein Druckregler kann die Kühlleistung variiert werden. In Abbildung 88 ist der dT/dt-Prüfstand mit integrierten 3D-Prüfkörpern dargestellt.

Abbildung 88: dT/dt-Prüfstand mit 2D (li.) und 2D plus D-Prüfkörpern (re.)

Durchführung relevanter Messreihen für die Untersuchung der Lebensdauer an Messobjekten

Beim Alterungsprüfstand zur Untersuchung des Einflusses elektrischer und thermischer Erosionsprozesse wurden die Prüfkörper unter folgenden Randbedingungen gealtert (Tabelle 6).

26. JULI 2022

Tabelle 6: Belastungssetups bei der dU/dt Prüfung

	Setup A	**Setup B**	**Setup C**
Zwischenkreisspannung	800 V	800V	-
Spannungssteilheit	40 kV/µs	20 kV/µs	-
Taktfrequenz	30 kHz	30 kHz	-
Temperatur	260 °C	260 °C	260 °C

Die Prüfkörper wurden einerseits elektrisch mit zwei verschiedenen Spannungssteilheiten gespeist, andererseits rein thermisch belastet, um den Einfluss der elektrischen Belastung mit der rein thermischen Belastung zu vergleichen. Zusätzlich sollte der Effekt der Spannungssteilheit auf die elektrische Erosion untersucht werden. Die Prüfkörper, die mit den verschiedenen Alterungssetups belastet wurden, sind in Tabelle 7 abgebildet.

Tabelle 7: Zuordnung der Prüfkörper zu den Belastungssetups

Setup A	**Setup B**	**Setup C**
2D-Prüfling Nr.1	2D-Prüfling Nr.3	2D-Prüfling Nr.5
2D-Prüfling Nr.2	2D-Prüfling Nr.4	2D-Prüfling Nr.6
2D-Prüfling Nr.7	3D-Prüfling Nr.11	3D-Prüfling Nr.9
3D-Prüfling Nr.7	3D-Prüfling Nr.12	3D-Prüfling Nr.10
3D-Prüfling Nr.8		
3D-Prüfling Nr.13		

Um den aktuellen Zustand der Isolation zu überprüfen, wurden die Alterungstests in regelmäßigen Zeitabständen unterbrochen und TE-Messungen durchgeführt, anhand derer der Zustand des Isolationssystems der Prüfkörper beurteilt werden kann. Der Prüfkörper wird mit Stoßspannungsimpulsen eines bestimmten Spannungsniveaus belastet. Erzeugen die Stoßspannungsimpulse TE, kann das von Ihnen ausgehende elektromagnetische Störspektrum mit einer Mikrowellenantenne gemessen werden. Übersteigt die Intensität des Störspektrums einen zuvor in Absprache des Herstellers des TE-Messgeräts festgelegten Grenzwert, wird das Signal als TE interpretiert. TE sind Ereignisse in der Isolierung, die besonders im Grenzbereich in dem die TE gerade auftreten ein sehr erratisches Verhalten aufweisen. Um die Messergebnisse zu stabilisieren und einen gewissen Einbrenneffekt der TE abzuwarten, wurden TE angenommen, wenn mindestens 5 von 10 Impulsen zu einer TE führen. Diese 50 %-Regel ist ebenfalls in der der Norm VDE530-18-41 zu finden. In Abbildung 89 und Abbildung 90 sind die TE-Messergebnisse beispielshaft für 2D-Prüfling Nr.1 dargestellt. Nach 259 Betriebsstunden liegt die TE Ansetzspannung noch über 3000 V und nach 367 Stunden unter 2000 V, also haben sich die Isolationseigenschaften des Prüflings im Laufe der Prüfung bedeutend verschlechtert.

26. JULI 2022

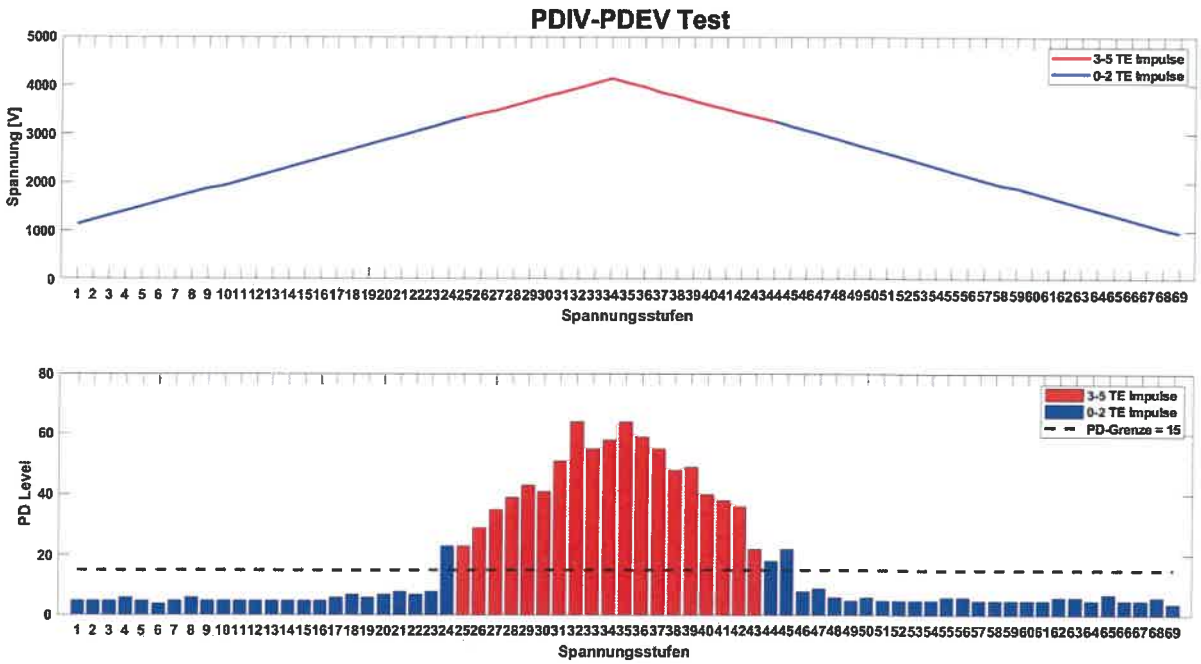


Abbildung 89: TE-Messung 2D-Prüfling Nr.1 nach 259 Std. Alterung – guter Zustand

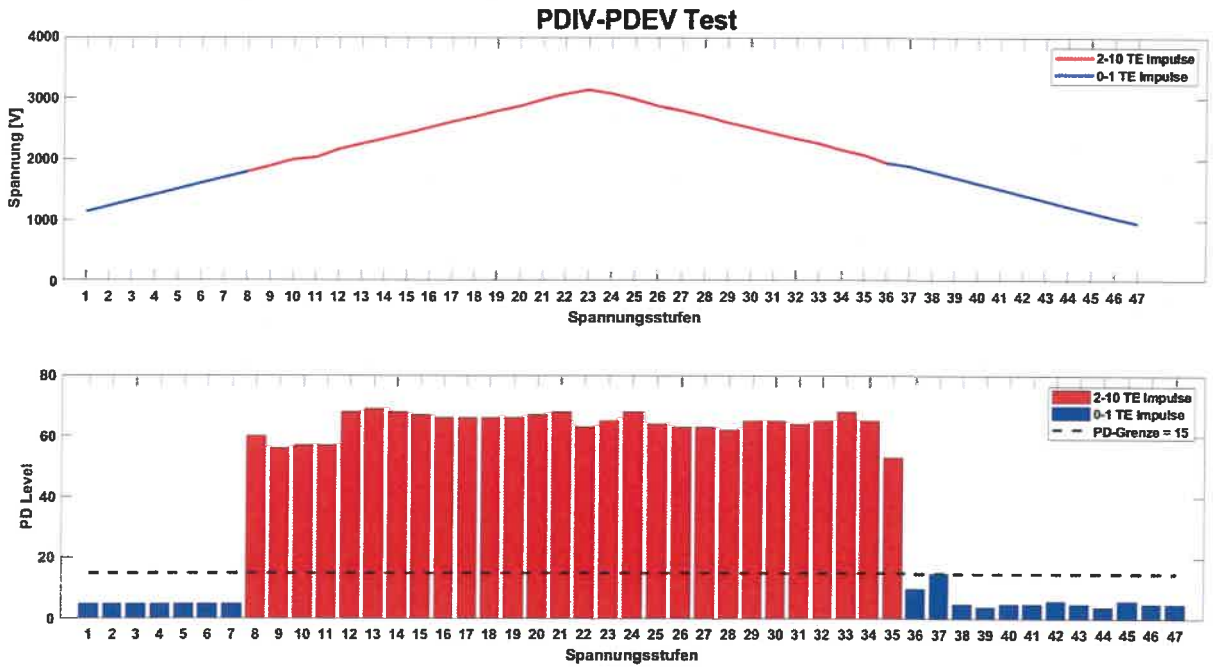


Abbildung 90: TE-Messung 2D-Prüfling Nr.1 nach 367 Std. Alterung – schlechterer Zustand

In Abbildung 91 ist der Alterungsverlauf bis zum Ausfall des ersten Prüfkörpers beispielhaft abgebildet. Der RPDIV-Wert gibt die TE-Einsetzspannung an, ab der mindestens 5 von 10 Impulsen zu einer TE führen. PD-Peak beschreibt die Intensität der TE. Hier wird die Differenz zwischen Nullpegel (-90dBm), welcher durch das Grundrauschen bei der Messung entsteht, und dem Maximalwert gebildet. Da die logarithmische Darstellung des TE-Signals gedanklich schwierig zu erfassen ist und die Ergebnisse in der Darstellungen nicht interpretierbar wären, wird das elektromagnetische Störspektrum, das die TE-Messantenne aufnimmt, in eine Dezimalskalierung umgewandelt. Das Verhältnis des PD-Levels in dBm

zur Dezimalskalierung von 0-100 Einheiten entspricht 1,27. 10 Einheiten entsprechen so -7,9dBm (gerundet). Der Detektor des TE-Messgeräts ist oberhalb von 80 Einheiten (60 dBm) gesättigt.

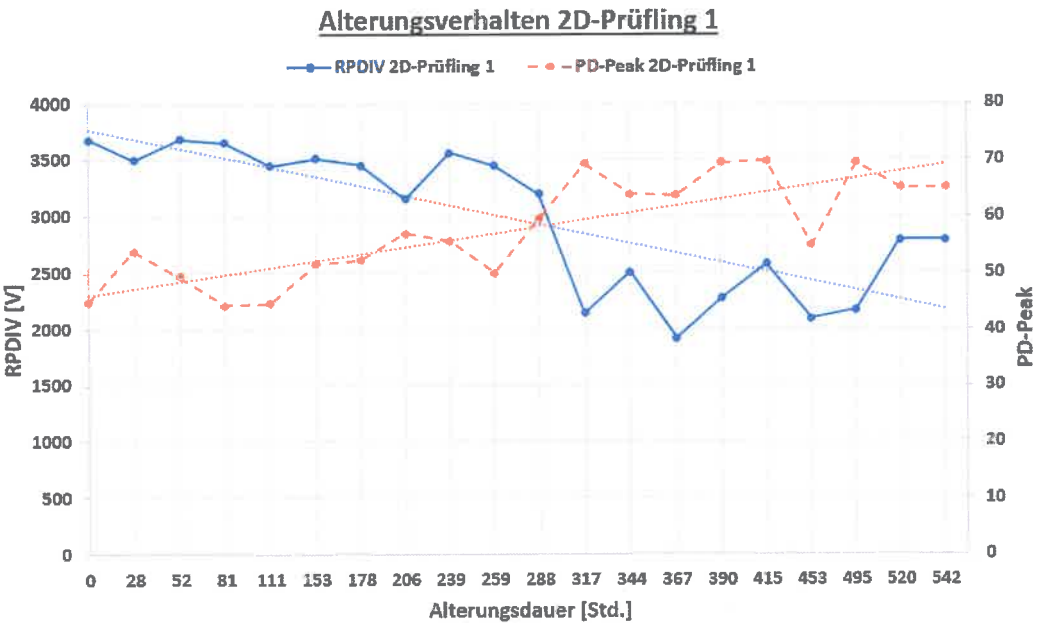


Abbildung 91: Alterungsverhalten des Prüfkörpers: 2D-Prüfling Nr.1

Nach dem Ausfall des Prüfkörpers wurde der Isolationswiederstand zwischen den einzelnen Lagen der Hairpins und dem Eisenkörper mittels eines Megaohmmeters gemessen. Während in den oberen 7 Lagen ein Isolationswiederstand von ca. 212 GΩ gemessen wurde, konnte in der untersten Lage ein Isolationswiderstand von lediglich 4 Ω gemessen werden. Der geringe Widerstand deutet auf eine metallische Verbindung zwischen dem Kupferleiter und dem Eisenkörper hin. In den übrigen 7 Lagen konnte ein DAR-Wert von 1 und ein PI-Wert von 0,99 gemessen werden. Der Polarisationsindex (PI) und das Dielektrische Absorptionsverhältnis (DAR) sind ein Maß für die Güte einer Isolation. Laut Herstellerangaben deuten die Messwerte auf einen ungenügenden bis gefährlichen Zustand der Isolation hin und sind wie in Tabelle 8 zu interpretieren.

Tabelle 8: Belastungssetups der Prüfkörper

PI-Wert; DAR-Wert	Isolationsgüte
< 1,25	Ungenügend oder sogar gefährlich
< 1,6	O.K.
>1,6	Hervorragend

Der PI-Wert gibt das Verhältnis des Isolationswiderstands nach 10 Minuten zum Isolationswiderstand nach 1 Minute und der DAR-Wert das Verhältnis des Isolationswiderstands nach 60 Sekunden zum Isolationswiderstand nach 30 Sekunden an.

Durch eine optische Untersuchung des Prüfkörpers konnte der Ort des Durchschlags lokalisiert werden. In Abbildung 92 ist der ausgefallene Prüfkörper und die Durchschlagsstelle zu sehen. Am Nutausgang in der untersten Lage sind Schmauchspuren des Durchschlags zu erkennen. Zusätzlich ist das Isolationspapier eingerissen. Am restlichen Prüfkörper konnten keine Beschädigungen nachgewiesen werden, die auf einen Durchschlag hindeuten würden.

26. JULI 2022

Abbildung 92: 2D-Prüfling Nr.1 nach Ausfall: Durchschlag in der untersten Lage am Nutausgang

Eine detaillierte Analyse der Ausfallursachen der restlichen Prüfkörper wurde in einem separaten Zwischenbericht 2020 dokumentiert. In der Abbildung 93 befinden sich exemplarisch Darstellungen weiterer Ausfälle.

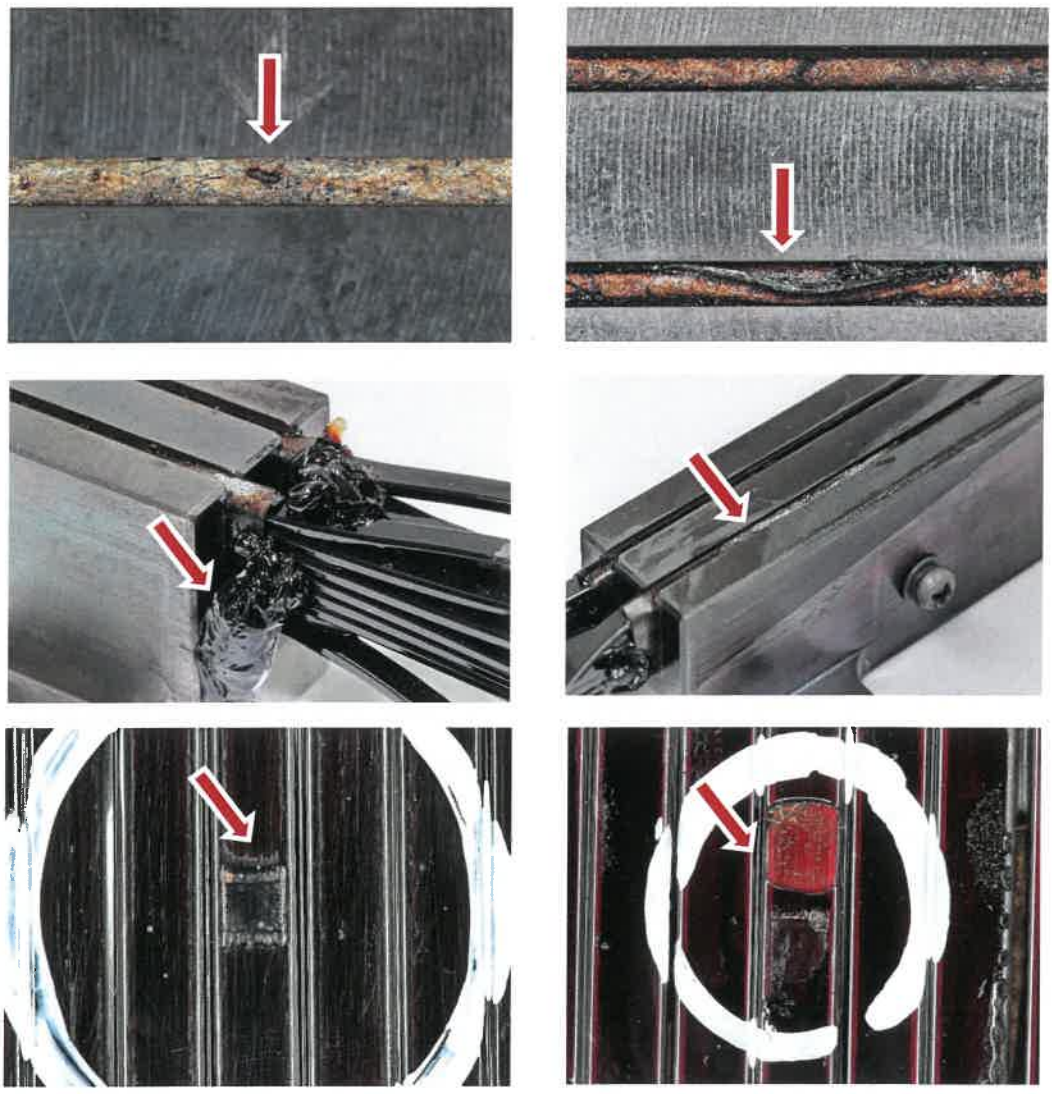


Abbildung 93: Ausgefallene 2D sowie 3D Prüfkörper

26. JULI 2022

Parallel zu den Versuchen zur elektrischen und thermischen Belastung wurden weitere Prüfkörper in einem Alterungsprüfstand zur Simulation der mechanischen Erosionsvorgänge mit thermischen Zyklen belastet. Tabelle 9 zeigt das Setup mit dem diese Prüfkörper belastet wurden.

Tabelle 9: Belastungssetup bei der dT/dt Prüfung

	Setup
Stromstärke	120 A
Wasserdruck	2 bar
Volumenstrom	25,5 l/min
Obere Grenztemperatur	240 °C
Untere Grenztemperatur	50 °C
dT/dt	12 K/min (am Isolationspapier)

In Abbildung 94 ist der Alterungsverlauf der 2D-Prüfkörper dieses Prüfstands dargestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Abbildung ist hier kein sinkender Trend der TE-Einsetzspannungen sichtbar. Die Prüfkörper wurden zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts 513 Stunden in diesem Prüfstand gealtert. Zusätzlich zu den 2D-Prüfkörpern, wurde der Prüfstand um zwei 3D-Prüfkörper ergänzt. Bei diesen Prüfkörpern wurden bisher TE-Messungen an zwei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt und keine signifikante Änderung des RPDIV-Niveaus festgestellt. Bei diesen Prüfungen wurden also bis zur Erstellung dieses Berichts keine Ausfälle festgestellt.

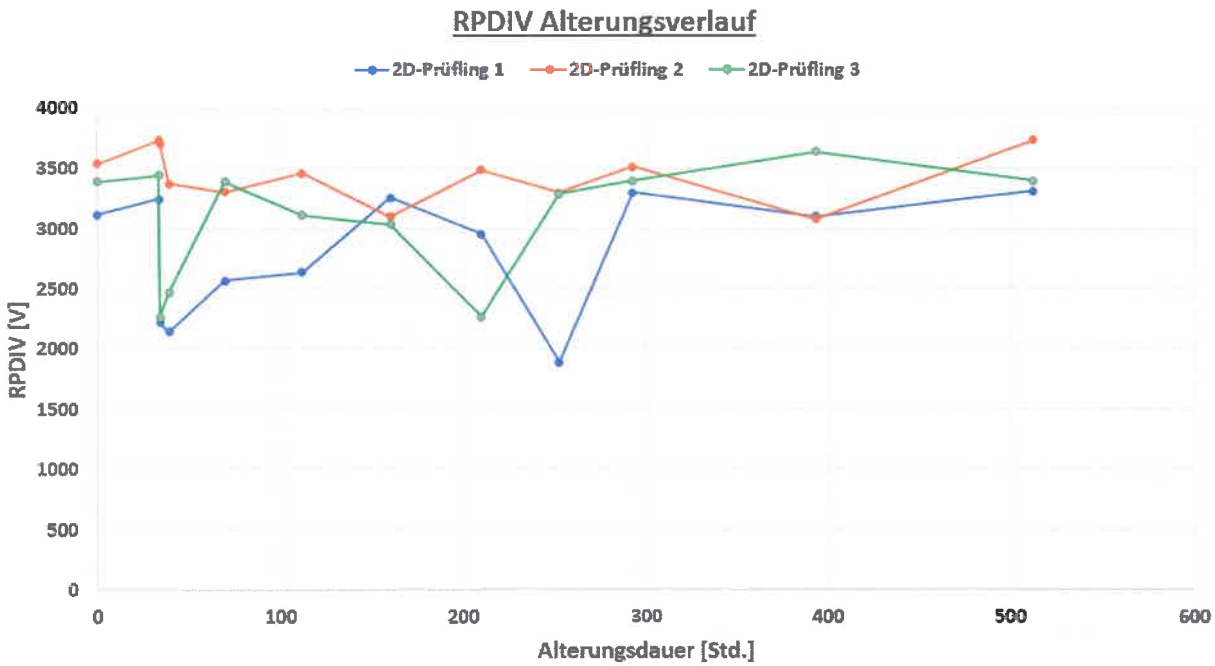


Abbildung 94: Alterungsverhalten der 2D-Prüflinge nach Temperaturzyklen

Definition von spezifischen Prüfbedingungen von Kühlsystemen an experimentellen Aufbauten

Die folgenden Messungen der Kühlverfahren mit Wickelkopf-Ölkühlung werden an dem in Abschnitt 2.10.4 beschriebenen Prüfstand durchgeführt. Geprüft wurde eine alternative E-Maschine, welche ebenfalls eine Hairpin-Wicklung hat, so dass vergleichbare Kühleigenschaften zu erwarten sind. Die Versuchsergebnisse werden im Anschluss durch eine geeignete Skalierung auf die in Abschnitt 2.10.3

26. JULI 2022

dargestellte verbesserte E-Maschine übertragen. Vor der eigentlichen Messung wurde ein umfangreiches und detailliertes Messprogramm definiert. Im Folgenden werden die Hauptpunkte in Kompaktform beschrieben.

Kalibriertest

Zu Beginn einer jeden Test-Session wird ein Kalibriertest durchlaufen, der die Funktionsfähigkeit des Prüfstandes einschließlich aller Sensoren sicherstellen soll. Hierzu wird der Stator mit Hilfe eines mäßig hohen Strangstromes aufgeheizt und das Verhalten aller Temperatursensoren beobachtet. Anschließend wird die Wickelkopfkühlung eingeschaltet.

R_{th}-Messung

Hauptziel der Prüfstandversuche war die Ermittlung des thermischen Widerstands der ölgekühlten Wickelköpfe. Dieser muss bekannt sein, um die maximal abführbare Verlustwärme berechnen zu können, die wiederum die maximale Dauerleistung der Maschine bestimmt:

$$P_{V,max} = \frac{\Delta T_{max}}{R_{th}}.$$

Dieser Versuch ist zeitaufwändig, da nach jeder Änderung von Parametern abgewartet werden muss, bis sich ein thermischer Beharrungszustand eingestellt hat. Folgende Parameter sind variabel:

- Heizleistung Stator (Strangstrom)
- Öl-Vorlauftemperatur
- Öl-Volumenstrom
- Rotordrehzahl
- Öldüsenanordnung (Spritzrichtung radial, axial, radial/axial kombiniert)
- Anzahl der Öldüsen

Dynamische Messung („Sprungantwort")

Mit diesem Versuch soll herausgefunden werden, wie lang eine E-Maschine gebaut werden kann, deren Stator ausschließlich über die Wickelköpfe gekühlt wird. Zu diesem Zweck wird der Prüfling bei ausgeschalteter Kühlung aufgeheizt, bis der gesamte Stator thermisch stationär ist. Dieser Zustand kann mit Hilfe der fünf entlang des Stators dicht unterhalb einer Nut angeordneten Temperatursensoren überprüft werden. Dann wird die Kühlung eines Wickelkopfes schlagartig eingeschaltet und der Abkühlvorgang über die Statorlänge beobachtet. Sobald das System wieder thermisch stationär ist, wird die gegenüberliegende Wickelkopfkühlung zugeschaltet.

R_{th}-Messung und Bestimmung der Dauerleistung am Beispiel eines exemplarischen Versuchs

Die Ermittlung des thermischen Widerstands ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Berechnung der Dauerleistung einer E-Maschine. Im Folgenden soll der Weg vom Ergebnis der Prüfstandmessung bis zur resultierenden maximalen Dauerleistung am Beispiel eines der beiden Wickelköpfe der E-Maschine beschrieben werden. Abbildung 95 zeigt das Ergebnis eines Versuchs mit einer Konfiguration mit jeweils 16 radial angeordneten Düsen pro Wickelkopf. Zum Aufheizen der Wicklung wurde der Phasenstrom der E-Maschine konstant gehalten, Vorlauftemperatur ist konstant auf 90 °C temperiert. Volumenstrom und die Drehzahl des Rotors wurden lt. Messplan in definierten Stufen variiert. Ausgewertet werden die Temperaturen an der Biegeseite des Wickelkopfs.

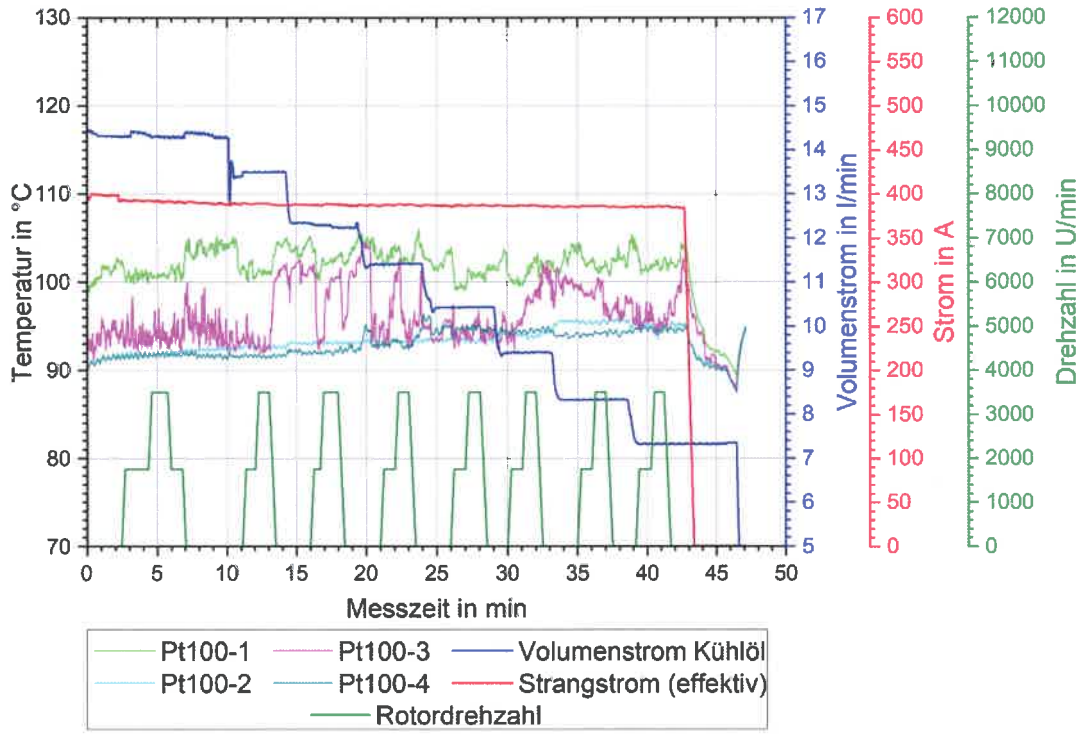


Abbildung 95: Messung bei DZ-Variation und Volumenstromvariation, Temperatur Vorlauf 90°C

In Abbildung 96 ist ein Auszug der beschriebenen Messung bei einer gleich bleibenden Drehzahl dargestellt. Daraus lassen sich Werte ermitteln, aus welchen der thermische Widerstand bestimmt wird. Begonnen wird mit der Berechnung der Verlustleistung P_V, die aus dem betrachteten Wickelkopf abgeführt wird.

$$P_V = \dot{Q} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left(T_{Rücklauf} - T_{Vorlauf}\right)$$

$\dot{Q}$ ist der Ölvolumenstrom, ρ und c_p sind die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des eingesetzten Öls bei der betreffenden Temperatur und $T_{Vorlauf}$ sowie $T_{Rücklauf}$ beschreiben die Öltemperatur beim Zuströmen in bzw. Ausströmen aus dem Wickelkopf. Der Mittelwert aus beiden Temperaturen dient als Basis zur Auswahl der Werte für die Dichte und die Wärmekapazität aus dem Öl-Datenblatt. Für die Berechnung des thermischen Widerstands wird außerdem die Temperaturdifferenz zwischen dem zu kühlenden Wickelkopf und dem Öl benötigt.

$$\Delta T = T_{Wickelkopf} - T_{Vorlauf}$$

Nun kann der thermische Widerstand berechnet werden

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_V}$$

26. JULI 2022

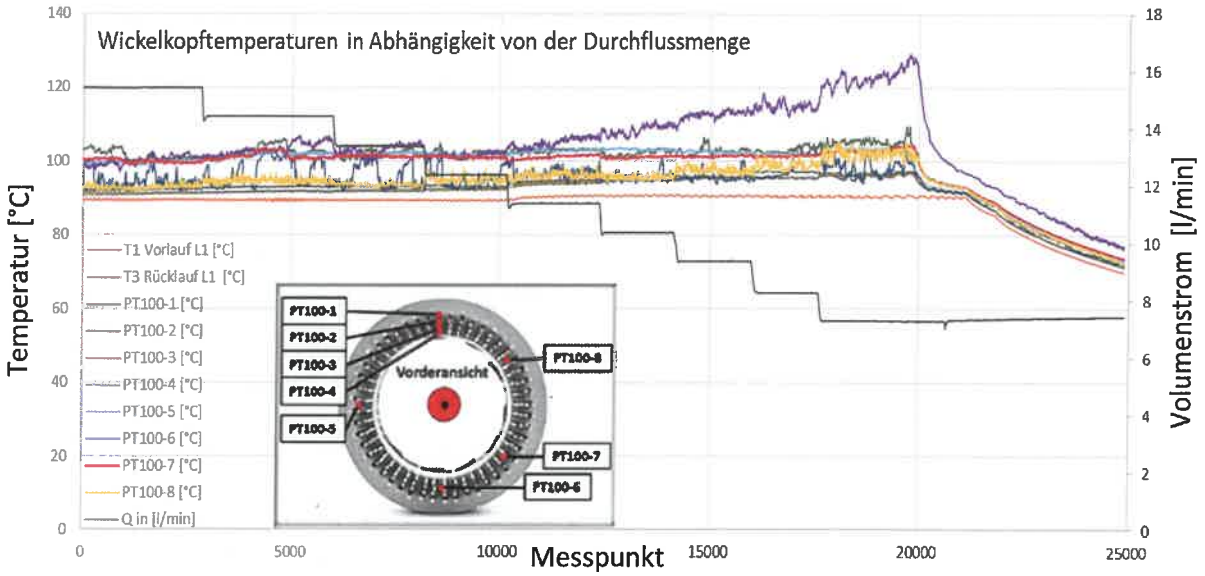


Abbildung 96: Temperaturen in den einzelnen Positionen im Wickelkopf

Für die Berechnung der maximal kühlbaren Verlustleistung ist außerdem die maximal zulässige Temperaturdifferenz $\Delta T_{max} = T_{Wicklung,zul} - T_{Vorlauf}$ zu ermitteln. Die maximal kühlbare Verlustleistung ergibt sich schließlich zu

$$P_{V,max} = \frac{\Delta T_{max}}{R_{th}}$$

für den betrachteten Wickelkopf. Für den zweiten Wickelkopf wird in der gleichen Weise verfahren.

Im vorliegenden Fall muss das Ergebnis noch von der auf dem Prüfstand untersuchten Maschine auf die verbesserte E-Maschine übertragen werden. Hierzu müssen die wärmeübertragenden Oberflächen der Wickelköpfe möglichst genau ermittelt werden. Durch den Vergleich der Wickelkopfflächen der Prüfstandmaschine und der verbesserten LKW E-Maschine wird ein Flächenfaktor ermittelt der in die Berechnung der gewünschten Kühlleistung linear eingeht. Anschließend wird die kühlbare Verlustleistung entsprechend dem Verhältnis der Oberflächen skaliert. Für die verbesserte E-Maschine ergeben sich bei Variation der maximalen Wickelkopftemperatur kühlbare Leistungen in Tabelle 10. Randbedingungen: Radiale Düsenanordnung, 16 Düsen / Wickelkopf, Ölvolumenstrom 8 l/min, Vorlauftemperatur 90°C.

Tabelle 10: Gesamte kühlbare Verlustleistung der verbesserten E-Maschine

Wickelkopftemperatur	180°C	160°C	140°C
max. kühlbare Verlustleistung (W) für Gesamt-EM	20000 W	15560 W	11100 W

Mit diesem wichtigen Ergebnis werden schließlich die endgültigen Dauerkennlinien der verbesserten E-Maschine in Abhängigkeit von der Wicklungstemperatur in Abschnitt 2.10.6 berechnet.

2.10.6 Optimierung der Komponente

Bewertung spezifischer Zusammenhänge zwischen Lastkollektiv und Lebensdauer

Im Abschnitt 2.10.5 wurden bereits das Alterungs- und Ausfallverhalten der untersuchten Prüfkörper beschrieben. In diesem Abschnitt sollen erste Tendenzen zwischen der Lebensdauer der Prüfkörper

26. JULI 2022

und dem Lastkollektiv beschrieben werden. Es muss jedoch festgehalten werden, dass aufgrund der verhältnismäßig geringen Stichprobe an ausgefallenen Prüfkörpern eine eindeutige Bewertung des Zusammenhangs zwischen dem Lastkollektiv und der Lebensdauer relativ schwierig ist. Die vorliegenden Ergebnisse dienen als wichtige Grundlage für logisch folgende weiterführende Versuche durch welche zukünftig die Datenbasis vergrößert und der Informationsgewinn gesteigert werden kann.

In Abbildung 97 wird die Lebensdauer der Prüfkörper in Abhängigkeit des Lastkollektivs dargestellt. Besonders der Vergleich der 2D-Prüfkörper Nr. 1, 2 und 3 ist sinnvoll, da die Alterung zum exakt gleichen Zeitpunkt gestartet wurde. Die Untersuchungen der Prüfkörper Nr. 4, 5, 6 und 7 wurden zu einem späteren Zeitpunkt angefangen. Als erstes kann definitiv ein Frühausfall identifiziert werden: 2D Prüfling Nr. 7, welcher nach 74 Betriebsstunden aufgrund eines geringen Isolationswiderstandes der oberen Lage ausgefallen ist. Für die folgende Bewertung wird dieser Frühausfall nicht betrachtet.

Durch den Vergleich der 2D-Prüfkörper Nr. 1, 2 und 3 kann ein Einfluss der Spannungssteilheit (20 kV/µs und 40 kV/µs) festgestellt werden. Der Einfluss der Spannungssteilheit ist jedoch relativ gering und wird durch den Einfluss der Temperatur, welcher die thermische Erosion zur Folge hat, nennenswert überlagert. Die die primäre Ausfallursache ist demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit die thermischen Erosion. Wenn die Prüfkörper Nr. 4, 5 und 6 verglichen werden, kann eine Aussage getroffen werden, dass die Prüfkörper, die rein thermisch belastet wurden, 118 Stunden und damit rund 44% länger betrieben werden konnten als der Prüfkörper, der mit einer zusätzlichen elektrischen Alterung belastet wurde. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine elektrische Erosion vorhanden ist und die Prüfkörper zusätzlich zu einer thermischen Erosion signifikant beschädigt, die Ausfälle jedoch nicht primär durch die Spannungssteilheit hervorgerufen wurden.

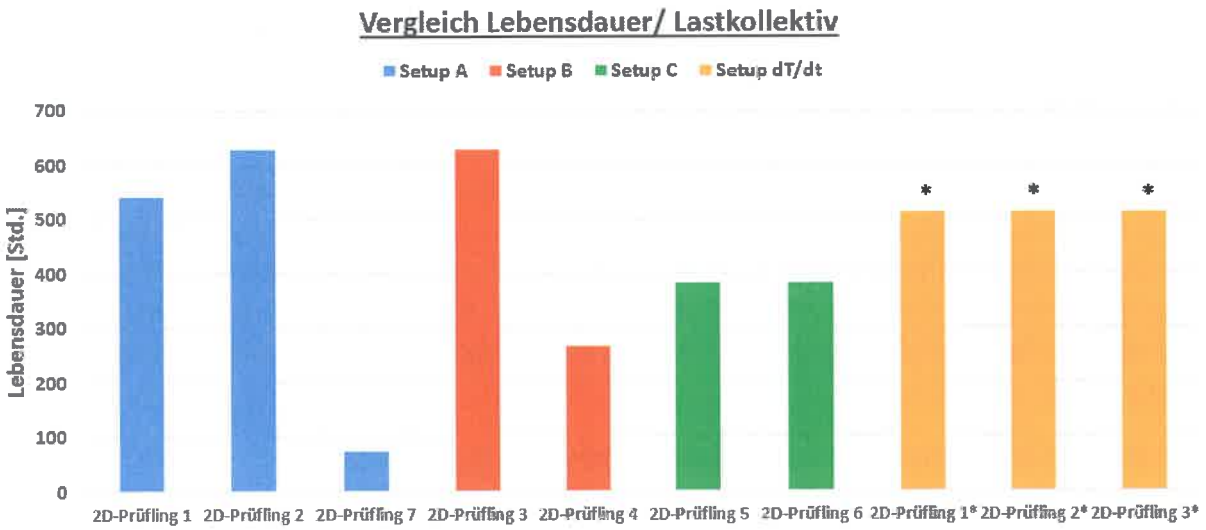


Abbildung 97: Lebensdauervergleich der 2D-Prüfkörper (*kein Ausfall des Prüflings)

Ableiten von Auslegungsprämissen der Komponente mit Berücksichtigung der Lebensdauer

In Abbildung 98 sind die Ausfälle der 2D-Prüfkörper in Abhängigkeit der Flankensteilheit, deren Einfluss in diesem Projekt fokussiert wurde, abgebildet. Wie zuvor erläutert, ist in den aktuellen Messungen die thermische Erosion die signifikante Alterungsursache. Auf Basis dieser Messungen sollte zukünftig die Spannungssteilheit und somit der Einfluss der elektrischen Erosion erhöht werden. So könnte sich eine Lebensdauerfunktion wie in Abbildung 98 links oder rechts (blau) ergeben.

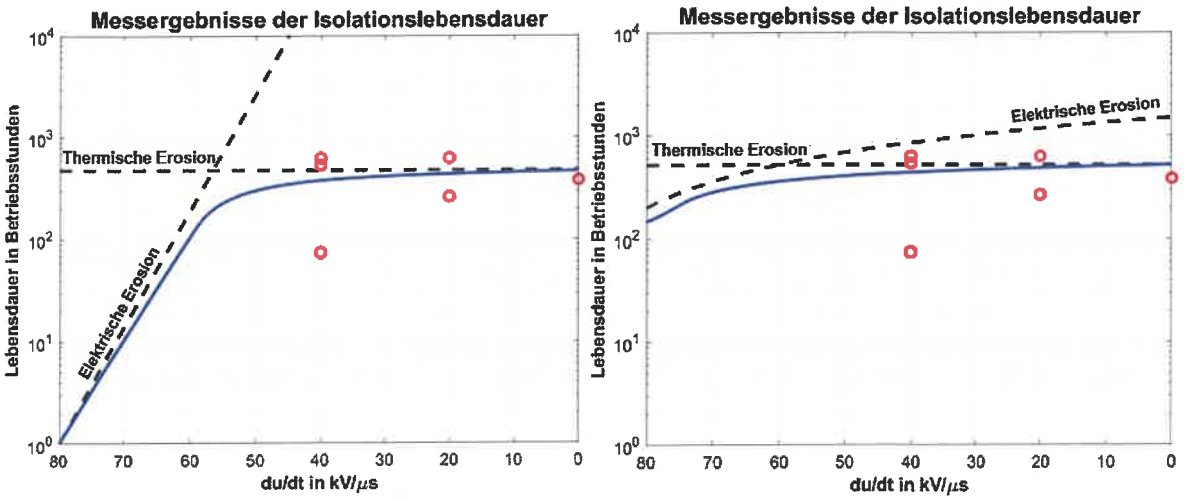


Abbildung 98: Lebensdauer in Abhängigkeit der Spannungssteilheit

Sollte sich die Lebensdauer beispielsweise bei höheren Spannungssteilheiten im Bereich > 60 kV/µs reduzieren, wäre ein Schnittpunkt gefunden, ab dem die elektrische Erosion signifikant für die Alterung wäre. Dies wäre bei der Auslegung der elektrischen Maschine unbedingt zu berücksichtigen. Eine weitere Möglichkeit zur Fortführung der Messergebnisse ist die Reduzierung des Parameters Temperatur. Diese würde dazu führen, dass die Linie, die in Abbildung 98 die thermische Erosion darstellt, sich in Richtung höhere Lebensdauer bewegt (niedrigere Temperaturen führen zu einer längeren Lebensdauer). Wird die Temperatur bei gleichbleibenden elektrischen Randbedingungen kontinuierlich in unabhängigen Alterungsmessungen reduziert, sollte ab einer bestimmten Temperatur die elektrische Erosion die Alterung dominieren. In potenziellen weiteren Messungen kann mit diesem Verfahren so der Alterungsverlauf präzisiert werden.

Es soll berücksichtigt werden, dass die Prüfkörper beschleunigt thermisch und elektrisch gealtert werden mussten um überhaupt Ausfälle zu provozieren. Wenngleich auch die Spannungssteilheiten mit 40 V/µs deutlich höher sind als in gegenwärtigen elektrischen Fahrzeugantrieben (üblich bis 10 kV/µs), so können die Auswirkungen der beschleunigten elektrische Alterung nicht quantitativ mit der beschleunigten thermischen Alterung verglichen werden. Es ist aus physikalischer Sicht zu erwarten, dass der Einfluss der Spannungssteilheit bei geringeren Temperaturen signifikant und messbar wird.

Die Prüfkörper des zweiten Alterungsprüfstands, in dem die mechanische Erosion durch thermische Zyklen analysiert wird (dT/dt), sind zum Zeitpunkt des Projektabschlusses nicht ausgefallen. Die Messungen aus Abbildung 94 deuten auf keinen unmittelbaren Ausfall hin, sodass ein zuerst geringer Alterungseffekt des Temperaturgradienten verglichen mit dem maximalen Temperaturniveau besteht. Dies ist eine der wichtigsten Erkenntnisse insbesondere in Bezug auf die Einsatzszenarien der E-Maschine. Wenn die beschleunigte thermische Zyklisierung in diesem Versuch keinen Ausfall produziert hat, ist das ein Hinweis auf ein hinsichtlich dT/dt robust ausgelegtes Isolationssystem.

Qualitative Bewertung der Einflüsse auf die Komponenteneigenschaften

Im vorigen Teilabschnitt wurde rausgefunden, dass bei den Messergebnissen der Einfluss der Temperatur gegenüber den elektrischen und mechanischen Schädigungsmechanismen dominiert. Die Ausfälle des Isolationssystems durch die thermische Erosion lassen sich in der Praxis vermeiden, wenn die absolute Temperatur des Isolationssystems den Wert der Prüftemperatur (hier 260 °C) deutlich un-

26. JULI 2022

terschreitet, was in einer Komponente unter Realbedingungen im Normalfall auch gegeben ist. Berechnungen der Wicklungstemperatur in Abschnitt 2.10.2 zeigen, dass die mittlere Wicklungstemperatur in dem zugrunde liegenden Fahrprofil bei einem Wert von ca. 140 °C liegt, also deutlich unter der Prüftemperatur von 260 °C. Eine effizientere Kühlung kann erwartungsgemäß dazu beitragen, die mittlere Temperatur weiter abzusenken und somit die Lebensdauer des Isolationssystems zu erhöhen.

Bezüglich der Beständigkeit des Isolationssystems gegenüber elektrischer Erosion können Isolationsmaterialien mit zusätzlichen coronaresistenten Polyimide-Schichten verwendet werden. Diese erhöhen die elektrische Belastbarkeit durch Ihre Robustheit gegenüber TE. Insbesondere in Kombination der E-Maschine mit einem SiC Umrichter und demnach für höhere Flankensteilheiten (dU/dt > 20 V/µs) ist der Einsatz dieser Schichten hinsichtlich der Lebensdauererhöhung sinnvoll.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass sich bei der beschleunigten thermischen Zyklisierung dT/dt bei dem Isolationssystem keine Verschlechterung der Eigenschaften gezeigt hat und im Gegensatz zum Temperatureinfluss auch nicht zu erwarten ist. Der Aufbau des Isolationssystems durch die Kombination der Drahtisolierung 160 - 200 µm, Nutisolierung (NKN Laminat mit 200 µm) und die Imprägnierung mittels Träufeln des Imprägnierharzes kann demnach beibehalten werden.

Finale Berechnung der Dauerleistung der optimierten E-Maschine

Nach dem in Abschnitt 2.10.5 die erforderlichen Messungen und die Aufbereitung der Messergebnisse finalisiert wurde, kann an dieser Stelle die finale Berechnung der Dauerwerte der optimierten E-Maschine erfolgen. In Abbildung 99 ist der Querschnitt der E-Maschine dargestellt.

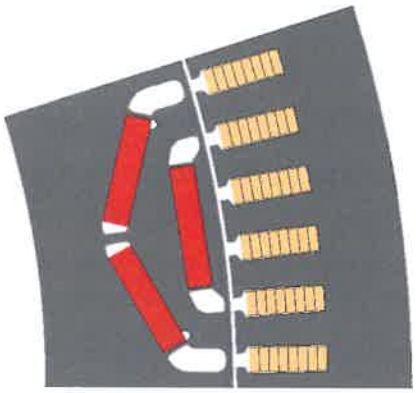


Abbildung 99: Querschnitt der optimierten E-Maschine

Abbildung 100 zeigt schließlich die finalen Dauerkennlinien in Abhängigkeit der Wicklungstemperatur von 140 °C bis 180 °C.

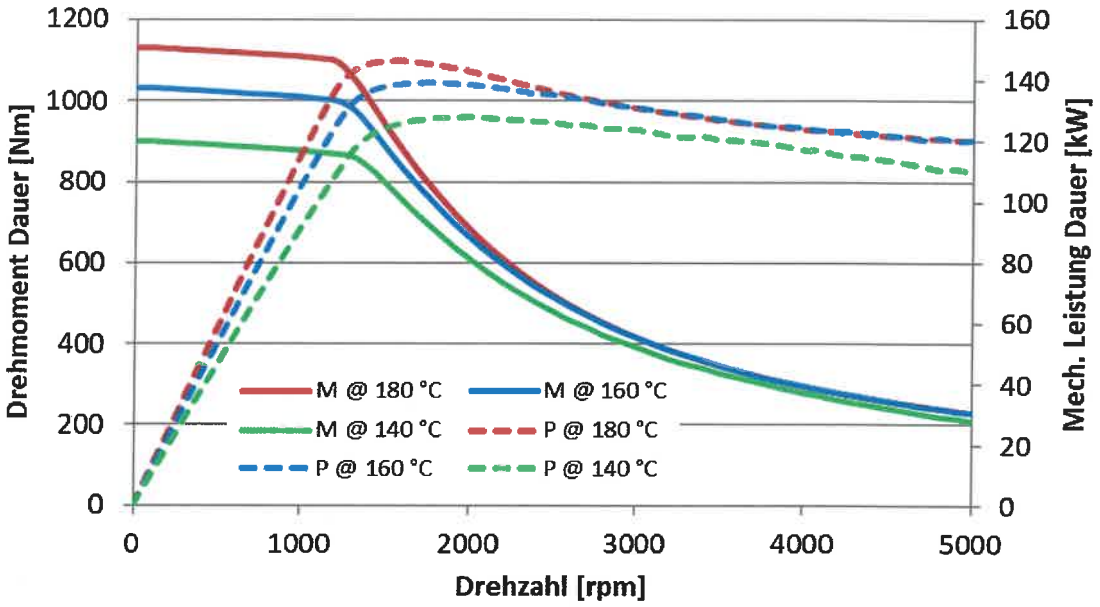


Abbildung 100: Finale Dauerkennlinien der optimierten E-Maschine

Das Ergebnis der Temperaturabhängigkeit der Dauerkennlinien kann wie folgt kommentiert werden:

- mit steigender Wicklungstemperatur steigt bei konstanter Vorlauftemperatur die kühlbare Verlustleistung und somit das Drehmoment und die mech. Leistung,
- Die maximal erreichbare Kühlleistung ist so hoch, dass die Grenze der Dauerleistung nicht durch die Erwärmung der Wicklung bestimmt ist, sondern durch den Phasenstrom,
- Für das geforderte Dauermoment und die Dauerleistung kann die mittlere Wicklungstemperatur bei 140 °C liegen wodurch eine erhöhte Lebensdauer resultiert im Vergleich zu 180 °C, welche üblicherweise als Grenztemperatur für die Dauerleistung herangezogen werden.

Insgesamt können mit dieser E-Maschinen Auslegung und der Berücksichtigung der Kühlung die Anforderungen in Tabelle 4 auch hinsichtlich der Dauerkennlinien nennenswert übertroffen werden.

Zusammenfassung

Die Schwerpunkte in dem Abschnitt „E-Maschine" waren die Untersuchungen der Lebensdauer des Isolationssystems sowie die Definition einer LKW E-Maschine mit verbesserten Eigenschaften.

Zum Thema der Lebensdauer von Isolationssystemen wurden nach einer ausgedehnten Literaturrecherche und Definition von Randbedingungen spezielle Prüfkörper aufgebaut und festgelegter thermischer und elektrischer Belastung ausgesetzt. Anschließend erfolgte eine detaillierte Beschreibung der Alterungsphänomene und Fehlerbilder ausgefallener Prüfkörper. Bei der Bewertung der Messergebnisse wurde die vorliegende Stichprobe analysiert und erste Zusammenhänge zwischen Belastung und Lebensdauer angegeben. Die Ergebnisse dienen als wichtige Grundlage für logisch folgende weiterführende Versuche durch welche zukünftig die Datenbasis vergrößert und der Informationsgewinn gesteigert werden kann. Insbesondere Untersuchungen mit reduzierter Temperatur und/oder erhöhter Flankensteilheit sind wichtig. Damit kann der Einfluss der elektrischen Erosion in der Messung erhöht und folglich entsprechende Isolationsmaßnahmen in der Komponente ergriffen werden. Des Weiteren soll angemerkt werden, dass die beschriebenen Messungen sowie die Diagnose der Prüfkörper sehr zeitaufwendig waren. Mit 6 aktiv betriebenen Prüfkörpern war die Kapazität des vorliegenden

26. JULI 2022

dU/dt Prüfstands ausgeschöpft. Demnach wäre eine Vermessung einer höheren Gesamtzahl von Prüflingen nur in einem deutlich längeren Zeitraum möglich.

Die Untersuchung von repräsentativen Lastzyklen von PKW und LKW führten zu der Erkenntnis, dass das Isolationssystem einer LKW E-Maschine ggü. einer PKW E-Maschine thermisch (durch T), mechanisch (durch dT/dt) und elektrisch (durch U sowie dU/dt) bedeutend stärker belastet ist. Isolationssysteme in den PKW Komponenten würden bei einem LKW zu einer gegenwärtig schwer ermittelbaren Reduzierung der Lebensdauer führen. Für die ausgelegte E-Maschine für der LKW Einsatz wurde ein geprüftes Isolationssystem als Kombination von Drahtisolierung (160 - 200 µm), Nutisolierung (NKN Laminat mit 200 µm) und die Imprägnierung mittels Träufeln des Imprägnierharzes vorgeschlagen.

Die Auslegungsaktivitäten der E-Maschine führten schließlich zu einer Komponente mit teilweise deutlich verbesserten Eigenschaften ggü. der Anforderung. Die Verbesserungen betreffen sowohl die Drehmoment- und Leistungsdaten als auch die Lebensdauer. Die vorgeschlagene E-Maschine verfügt über einen optimierten magnetischen Kreis und mechanisch optimierten Rotor. Aufgrund der hohen Wichtigkeit der Dauerleistung wurden praktische Untersuchungen zur Wickelkopf-Ölkühlung durchgeführt. Hierzu wurden in einer Prüfstandumgebung zahlreiche Kühlungsversuche gefahren aus welchen die gewonnen Erkenntnisse und Ergebnisse in die Auslegung der E-Maschine sowie Konstruktion einer effizienten Wickelkopf-Ölkühlung flossen. Diese ermöglicht sehr hohe Dauerleistung, respektive bei reduzierter Dauerleistung eine Absenkung der mittleren Wicklungstemperatur, was wiederum zu einer Erhöhung der Lebensdauer des Isolationssystems führt.

2.11 AP 8: Leistungselektronik

Eine breite Elektrifizierung des LKW-Verkehrs, wie sie das in diesem Vorhaben untersuchte Oberleitungskonzept ermöglichen könnte, lässt aus Wirtschaftlichkeitsgründen eine Optimierung der Antriebskomponenten notwendig erscheinen. Ähnlich wie für die Antriebsmaschinen wird in diesem Abschnitt daher der leistungselektronische Antriebsumrichter hinsichtlich möglicher Optimierungsansätze näher betrachtet. Eine zielführende Technologie zur effizienten und wirtschaftlichen Gestaltung der Umrichterkomponente im elektrischen Fahrzeugantriebsstrang ist wesentlich durch das Anforderungsspektrum bzgl. der elektrischen Grenzparameter, aber auch durch die Betriebsdauer und die sich dabei summierenden Wechselbelastungen bestimmt. Diese Rahmenbedingungen unterscheiden sich massiv zwischen PKW und LKW und bei letzterem noch zusätzlich im Einsatzszenario und Fahrzeugtyp. Wegen der hohen Kosteneffizienz scheint es dennoch wünschenswert, bei der LKW-Elektrifizierung möglichst weitgehend Technologien aus dem PKW-Bereich übernehmen zu können. Daher zielen die vorgestellten Untersuchungen auf eine Machbarkeitsbewertung hierzu für einen Umrichter der nächsten Generation ab. Hier stellt sich insbesondere auch die Frage nach der sinnhaften Anwendung und Ausgestaltung der neuen Siliziumkarbid- (SiC-) Technologien gegenüber der herkömmliche auf Silizium- (Si-) Halbleiterschaltern basierenden Technologie.

Status-Quo der heutigen Umsetzungslösungen, auch der in den Fahrzeug-Prototypen diese Vorhabens umgesetzten, sind Aufbaukonzepte der leistungselektronischen Komponenten, die sich eher an robusten Schaltschranklösungen, wie Sie in industriellen Anlagen üblich sind, orientieren. Dies ist auch durchaus stimmig, wenn man Modularitätskonzepte, Chassisaufbau und Bauräume im LKW und auch die Belastungsanforderungen betrachtet, so findet man viele Vergleichbarkeiten mit industrieller Antriebsanlagentechnik. Nichtsdestotrotz findet man heute in elektrischen PKW-Antrieben vergleichbare Leistungsdaten von einigen 100 Kilowatt realisiert, wie sie auch für den LKW notwendig sind.

Dabei sind sie dort leichter und im Aufbau extrem kostenoptimiert umgesetzt. Natürlich fallen insbesondere die erforderlichen Dauerleistungen deutlich geringer aus.

Ein besonders beachtenswerter Einfluss im Fall des Oberleitungsbetriebs ist die Versorgung aus dem Fahrdraht und das sich dabei ständig in seinen wirksamen Längen und damit Widerständen Kapazitäten und Induktivitäten verändernde DC-Netz. Dieser Einfluss und notwendige Filtermaßnahmen zum Betrieb eines robusten Hochvolt-Bordnetzes werden im letzten Unterkapitel diese Abschnittes (2.11.4) diskutiert.

2.11.1 LKW-spezifische Anforderungen

Zunächst sind hier die Anforderungen an Leistungselektronik in elektrisch betriebenen LKWs, insbesondere im betrachteten Anwendungsfalles der Oberleitungstopologie, zusammengestellt. Dabei ist festzustellen, dass der für den Antriebsumrichter identifizierte Bauraum der Rahmenmontage grundsätzlich etwas weniger Restriktionen mitbringt als im PKW, allerdings ebenso die Modul-Integration mit weiteren Komponenten beachtenswerte Rückwirkungen hat. Die weiten räumlichen Entfernungen zwischen den Komponenten im DC-Zwischenkreis bedingen aufgrund der Kabellängen eine Anschlusssituation, die eher der bereits erwähnten industriellen Anlagentechnik als einer PKW-Anwendung entspricht. Das elektrische Bezugspotential, das wesentlich das Verhalten hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit beeinflusst, hängt hier letztendlich von der Betriebsart mit Oberleitung oder im autarken E-Fahren ab. Hier lässt sich ein Unterschied zu PKW-Anwendungen festhalten, der jedoch nicht näher betrachtet werden konnte. Weiterhin sind thermische und elektrische Anforderungen identifiziert und mit denen zur E-Maschine (s. Abschnitt 2.10) abgeglichen und zusammengeführt worden.

Ein Überblick der Rahmendaten ist in der nachfolgenden Tabelle gegeben:

Tabelle 11: Spezifikationsrahmen des Antriebsumrichters

Benennung	Messbarer Wert	Einheit
Leistungselektronik (Antrieb)		
Grundsätzliche Eigenschaften		
Betriebsdauer	15 / 55 000	Jahre / Betriebsst.
Laufleistung	1000000	km
Schutzklassen	IP6K9K	-
Dielektrische Isolation	3	kV
Leistung	2x 130	kW
Topologie	2x 3 Phasen jeweils in B6-Topologie	
Elektrische Randbedingungen		
Maximaler Effektivstrom je Phasenabgang	300	A
maximaler Grundwellenfrequenz EM	833	Hz
maximaler Kurzschlussphasenstrom im AKS	300	A
Zwischenkreisspannungsrippel	+/- 50/5	V
Traktionsnetzspannungsbereich uneingeschränkte Funktion	350-850	V
PWM Taktfrequenz PWR	max. 20	kHz
Thermische Randbedingungen		
Kühlmittel	Wasser / Glycol Mischverhältnis 50/50	
Kühlmitteltemperatur (Vorlauf) bei voller Funktion	-40 bis 70	°C
Kühlmittel Volumenstrom	5-25	dm^3/min
Mechanische Eigenschaften		
Länge x Breite x Höhe inkl. Gehäuse	594 x 465 x 117	mm x mm x mm
Volumen inkl. Gehäuse	28,4	dm^3
Sensorik		
Zwischenkreis		
Leistungsmodule		
Treiber		
Ansteuerung		

Mission Profile und Vorgehensweise zur Lebensdauerbetrachtung

Darüber hinaus wurde für die Lebensdauerbetrachtung auch hier die bereits erwähnte Streckensimulation Koblenz-Trier für einen anwendungsrelevanten Betrieb bei flächendeckender Oberleitungsversorgung für einen LKW der zukünftigen Generation herangezogen (s. Abbildung 62). Für die Umrichterkomponente ist hieraus ein Belastungsprofil zunächst in Moment/Drehzahl über Zeit und daraus letztlich in Phasenstrom/Modulationsgrad/Stromwinkel Cos(Phi)/Spannung über eine Längsdynamiksimulation und eine Antriebssimulation berechnet worden. Für die beiden im Antriebssystem eingesetzten E-Maschinen (hier als EM1 und EM2 bezeichnet) ergeben sich dabei unterschiedliche Belastungsprofile (s. Abbildung 101).

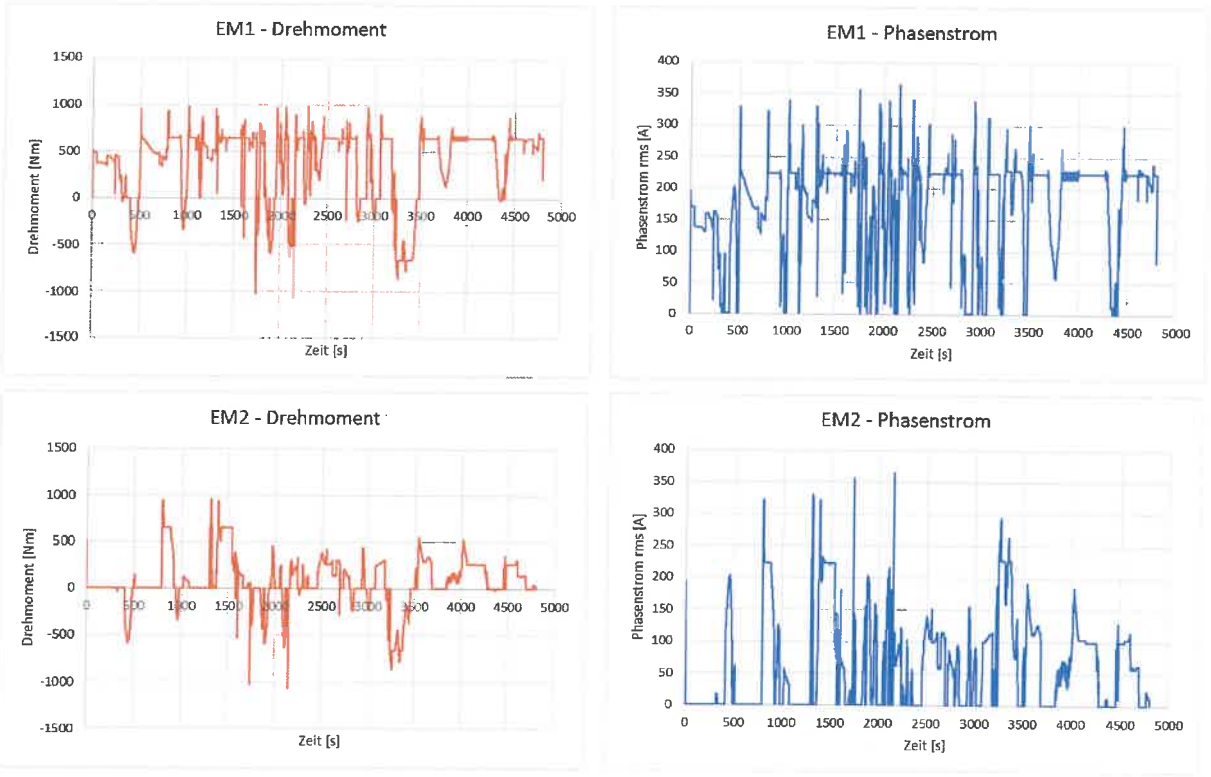


Abbildung 101: Belastungsprofile von EM1 und EM2 aus der Streckensimulation Koblenz-Trier mit den resultierenden Phasenstromverläufen

Zum Vergleich mit einer PKW-Anwendung zeigt Abbildung 102 den Momenten- und Stromverlauf eines WLTC-Fahrzyklus („Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure"). Der WLTC ist kürzer als der betrachtete LKW-Zyklus. Zur besseren Vergleichbarkeit ist er hier über der gleichen Zeitbasis dargestellt. Gut erkennbar sind die deutlich unterschiedliche Wechselfrequenz der Last. Hinzu kommt die geringere Ausnutzung des Maximalmomentes im lebensdauerrelevanten PKW-Betrieb im Vergleich zur hier analysierten LKW-Applikation.

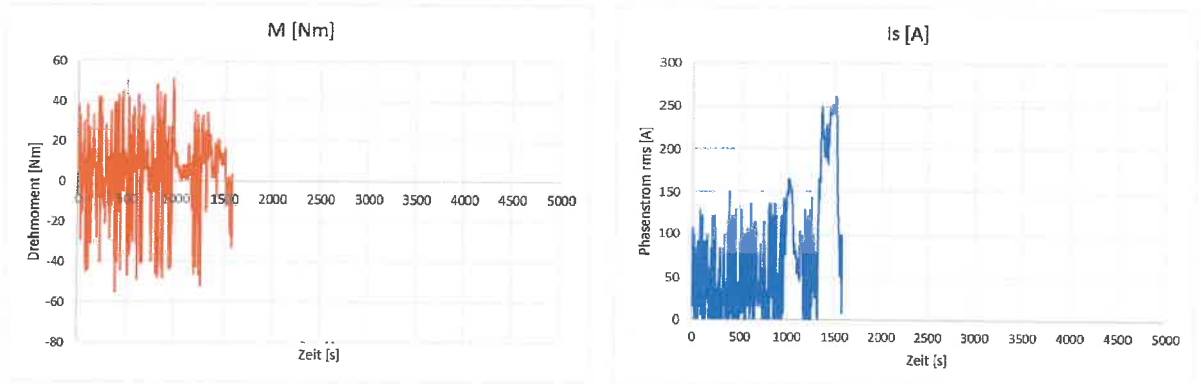


Abbildung 102: Belastungsprofile der E-Maschine aus einer der PKW-Simulation des WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) mit den resultierendem Phasenstromverlauf

Dieses Belastungsprofil stellt nun in x-facher Wiederholung bis zum Erreichen der Laufleistung das sogenannte Missionprofile für die Komponente dar, aus dem die tatsächliche Beanspruchung der Bauteile abgeleitet werden kann, welches dann als Bemessungswert für die Komponentenlebensdauer herangezogen werden wird.

Die Lebensdaueranalyse orientiert sich dabei an einer aus der Literatur bekannten und etablierten Vorgehensweise, die im Ergebnis dann erst mit den jeweils applikationsspezifischen Modellen die wesentlich auslegungs- und kostenrelevante Lebensdauereinschätzung zur angestrebten Technologieeinschätzung ermöglicht. Insbesondere baugruppenspezifische Lebensdauermodelle standen hier letztendlich nicht zur Verfügung, so dass die Ergebnisse hier auf vergleichende Aussagen beschränkt sind.

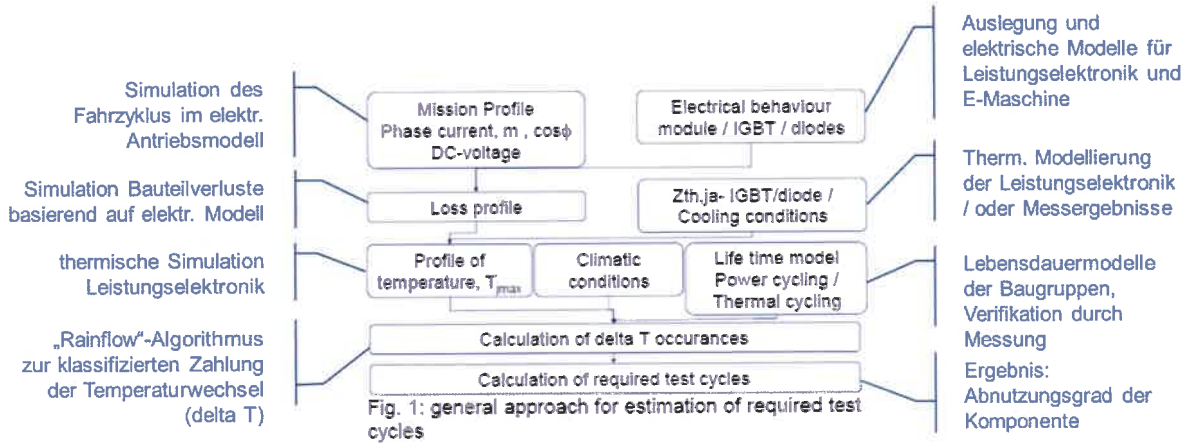


Fig. 1: general approach for estimation of required test cycles

Abbildung 103: Vorgehensweise zur Lebensdauerbetrachtung; orientiert an M.Thoben et.al.[2].

Umrichterentwurf und Konstruktionsmodelle zur vergleichenden Bewertung

- Auslegung (SiC)
- Endstufenauswahl
- Virtueller Prototyp und Labormuster

Die lebensdauerrelevanteste Baugruppe im Umrichter ist die Endstufe bestehend aus Leistungsmodul, Treiber und Zwischenkreiskondensator sowie dem Rückkühler, welcher die lebensdauerbestimmenden Temperaturhübe definiert. Im ersten Schritt wurde als konkrete Basis für die weiteren Betrachtungen eine zielführende zukunftsweisende Endstufentechnologie gesucht. Als sehr gut geeignet wurde die Leistungsmodulplattform DCM™1000 der Firma Danfoss Silicon Power GmbH identifiziert[3]. Diese Technologieplattform ermöglicht die Integration von Leistungselektronischen Schaltern in Form von Silizium-IGBT-Chips wie auch Siliziumkarbid-MOSFET-Chips und unter dem Suffix X (DCM™1000X) auch von der 600V Sperrspannungsklasse erweitert für die 1200V Sperrspannungsklasse. In dieser Plattform sind modernste Technologien realisiert, wie sie vergleichbar in den neuesten PKW-Anwendungen Verwendung finden:

[2] M. Thoben, at al., „From vehicle drive cycle to reliability testing of Power Modules for hybrid vehicle inverter", PCIM Europe 2008.
[3] O. Shajarati, A. Streibel and N. Apfel, "DCM™1000X - Designed to meet the future SiC demand of electric vehicle drive trains", Bodos Power Magazine, 2018

- Hochzuverlässige Sintertechnologie für die Chipmontage
- Robustes Transfermold-Gehäuse
- Danfoss Bondbuffer® (DBB®) für hochzuverlässiges Kupferdraht Chipbonding
- Direkte Bodenplattenkühlung als ShowerPower®3D

In Kombination mit der Möglichkeit der Integration verschiedener Chipbestückungsvarianten und Chiptechnologien (Si und Wide-Band-Gap SiC) ließen diese die Plattform als besonders geeignet für diese Analyse erscheinen.

Auf Grundlage des ebenfalls über die Firma Danfoss Silicon Power GmbH verfügbaren DCM™1000 Applikation Kits[4] wurde eine Endstufe für die oben beschriebenen Anforderungen ausgelegt. Dabei ergaben die Auslegungen (Technologiestand 2018) für eine Bestückung mit Silizium-IGBTs und Freilaufdioden im Vergleich zu einer Bestückung mit SiC-MOSFETs, dass die erforderliche SiC-Halbleiterfläche nur 29% der notwendigen Si-Halbleiterfläche betragen muss. Auch wenn der häufig in den Vordergrund gestellte Effizienzvorteil von SiC gegenüber Si in der hier betrachteten LKW-Anwendung nicht in dem Maße zum Tragen kommt – dies ist durch den hohen Volllastanteil der Anwendung begründet (s. dazu auch die Analyse in Abschnitt 2.13) – lässt sich hier ein Vorteil der SiC-Anwendung finden.

Die als repräsentativ identifizierte Endstufentechnologie in Form des benannten Applikation-Kits wurde nun virtuell in ein Umrichterkonzept integriert, das sich eng an den relevanten PKW-Elektrifizierungsbaukasten der nächsten Generation anlehnt. Dieses Konzept wurde nun weiter ausdetailliert und zu einer für die weitere Betrachtung und detailliertere Modellierung geeigneten Konstruktion geführt, die in der Abbildung 104 dargestellt ist.

Abbildung 104: Detaillierung der Umrichterkomponente für die weitere Modellierung

Diese Komponente entspricht demnach in Ihrer Form und Anwendungsorientierung zunächst dem PKW-Einsatz. Ihre lebensdauerrelevante Belastung wird nun aber für den Oberleitungs-LKW-Einsatz untersucht. Damit lässt sich somit die angestrebte Übertragbarkeit von PKW-Technologien auf die Verwendung im LKW einschätzen. Im abschließenden Unterkapitel zur Optimierung (Abschnitt 2.11.3) wird das Konzept dann auf den benötigten Doppelumrichter übertragen.

[4] F. Carastro, T. Rettman and O. Muehlfeld, "A novel application kit design accelerating the performance of Danfoss' 1.2 kV SiC DCM™1000X for EV drivetrains," PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2019, pp. 1-5.

2.11.2 Lebensdauerbetrachtung und Modellbildung

Zur Untersuchung und Bewertung der Schädigungsmechanismen wurde zunächst als Ergebnis einer Literaturstudie eine Übersicht erarbeitet, welche die wesentlichen Bauteile umfasst und deren Ausfallmechanismen zusammenstellt. Gleichzeitig wurden die bekannten Modellansätze zugeordnet und mathematisch beschrieben (s. Abbildung 105). Als wesentlich relevante Baugruppen wurden innerhalb der Endstufe das Leistungsmodul und der Kondensator identifiziert, da diese besonders von unterschiedlichen Lastzyklen thermisch beeinflusst werden. Einige Modelle sind für bekannte Standardtechnologien auch mit kalibrierten Daten bekannt. Diese konnten für die weiteren Analysen z.T. herangezogen werden.

Auf dieser Basis konnte nun das oben vorgestellte Umrichterkonzept weiter modelliert und analysiert werden. Da zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung die 1200V-Variante des Applikation-Kits nicht verfügbar war, beruhen die betreffenden Betrachtungen auf einer 750V-bestückten Aufbauvariante, da nur hierfür Bauteile und Daten zur Verfügung standen. Dies tut jedoch den generalisierten Aussagen keinen Abbruch, da infolge des Plattformansatzes des Modulaufbaus die Erkenntnisse im Nachhinein direkt auch auf andere Bestückungen umzurechnen und übertragbar sind.

Subcomponent	Failure mode	Lifetime model
Power module	Solder fatigue	Coffin-Manson-Arrhenius
	Bond wire lift-off	Coffin-Manson-Arrhenius
	Crack initiation and propagation in semiconductor chips / substrate / metallization	Coffin-Manson-Arrhenius
	Electrical breakdown of oxide layer or semiconductor edge	Kemeny or Coffin-Manson (As a consequence of fatigue)
	Interrupt of conductor path or short-circuit by whiskers (electromigration)	Black
Capacitor	Decrease of capacitance / short-circuit event	
	- Drying-out of electrolyte	Arrhenius
	- Decrease of active area due to annealed local short-circuit events	(Kemeny)
Driver and control board	Open circuit due to solder fatigue	Coffin-Manson-Arrhenius
	Failure of subdevice	*(dependent on device)*
	Interrupt of conductor path or short-circuit by whiskers (electromigration)	Black
Isolation	Electrical breakdown as a consequence of	
	- Fatigue due to voltage (avalanche effect)	Kemeny
	- humidity	Peck
	- Chemical corrosion / environmental impact	Arrhenius
	- Crack propagation	Coffin-Manson-Arrhenius
	- Mechanical destruction	*(secundary complication)*

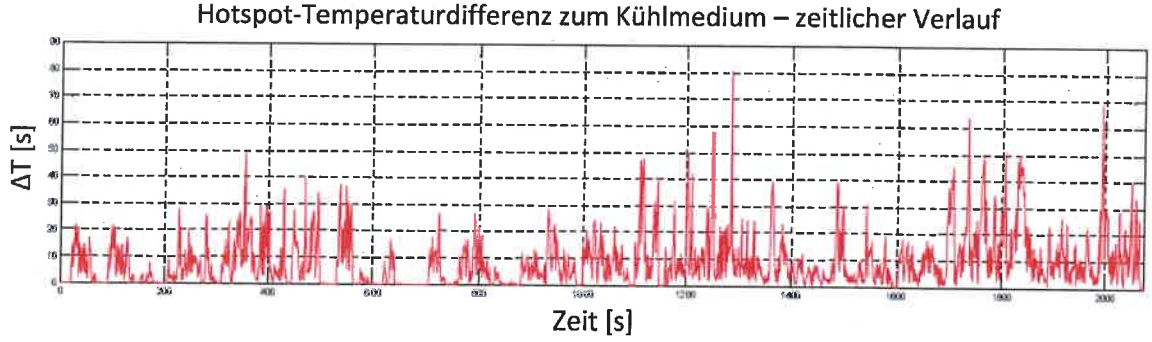
Abbildung 105: Übersicht zu Schädigungsmechanismen und deren Lebensdauermodellierung für Baugruppen der Leistungselektronik

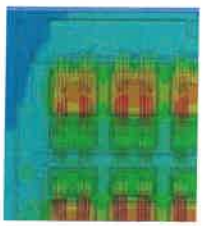
Da innerhalb des Vorhabens keine spezifischen Lebensdauerversuche und Modellierungen der Leistungsmodulaufbauten oder des Kondensators möglich waren, wurden Ergebnisse einige Forschungsaktivitäten und deren Ergebnisse zu hochlebensdauerstabilen Leistungsmodulaufbauten herangezogen, die außerhalb dieses Vorhabens begleitet und gewonnen werden konnten[5] [6].

[5] A. Schiffmacher, A. Qelibari, J. Rudzki, F. Osterwald and J. Wilde, "Deformation Measurements during Active Operation of Power Modules with Novel Assembly and Packaging Technology," CIPS 2020; 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Berlin, Germany, 2020, pp. 1-6.

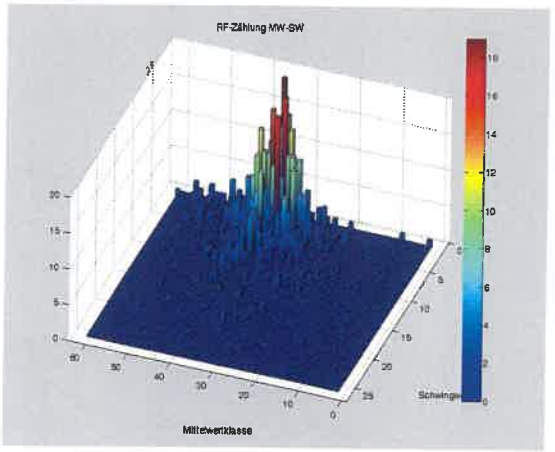
[6] A. Schiffmacher, D. Strahringer, S. Malasani, J. Wilde, C. Kempiak and A. Lindemann, "In Situ Degradation Monitoring Methods during Lifetime Testing of Power Electronic Modules," 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, 2021, pp. 895-903.

So beobachtet man erwartungsgemäß, dass es bei diesen neuen Aufbautechniken, wie Sie auch hier ausgewählt sind, zu neuen Ausfallmechanismen kommt. Es zeigt sich z.B. eine bislang eher ungewöhnliche Schädigung der Chipmetallisierung, allerdings auch erst nach deutlich längerer Belastungszeit, charakterisiert durch veränderte Koeffizienten in der Coffin-Manson-Modellierung[7]. Bzgl. der Lebensdauer bei SiC-Bestückungen findet man ein vergleichsweise schlechteres Verhalten im Standardmodulaufbau. Erst die hochzuverlässigen Aufbautechniken mit Sinterverbindungen und chipoberseitigen Kupferauflagen („Bondbuffer") führen zu guten Lebensdauereigenschaften[8].





Temperaturverteilung im Leistungsmodul



Verteilung der klassifizierten Temperaturhübe

Abbildung 106: Simulation des zeitlicher Verlaufs der Temperaturdifferenz eines Hotspots zum Kühlmedium mit einem Testprofil zur Modellprüfung; Klassifizierung und Zählung der Temperaturhübe nach dem Rainflow-Algorithmus

Zur näheren Analyse wurden entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen Komponentenmodelle zu den Konzeptkonstruktionen erzeugt und ein spezifisches thermisches Endstufenmodell erstellt. Über eine elektrische Simulation lassen sich die zeitlichen Verläufen der Verlustleistungen eines angesetzten Missionprofiles berechnen und über die Modellkopplung wieder der zeitliche Verlauf der lebensdauerrelevanten Temperaturhübe bestimmen. Abbildung 106 zeigt diese Vorgehensweise anhand eines Testprofils.

[7] C. Kempiak et al., "Accelerated Qualification of Highly Reliable Chip Interconnect Technology by Power Cycling Under Thermal Overload," PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Online, 2021, pp. 1-8.

[8] A. Streibel et al., "Reliability of SiC MOSFET with Danfoss Bond Buffer Technology in Automotive Traction Power Modules," PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2019, pp. 1-7.

Das wie oben dargestellt auf Grundlage des Fahrzyklus und der Laufzeit berechnete Missionprofile betrifft in unterschiedlicher Weise die beiden im Antrieb des Oberleitungs-LKWs vorhandenen Elektromaschinen. Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen wurden hier die elektrischen Belastungen errechnet und über die Komponentenmodelle zu den Konzeptkonstruktionen die Temperaturbelastungsprofile erzeugt. Die Temperaturbelastungsprofile der Leistungsmodule finden sich jeweils im oberen Bild von Abbildung 107 und Abbildung 108.

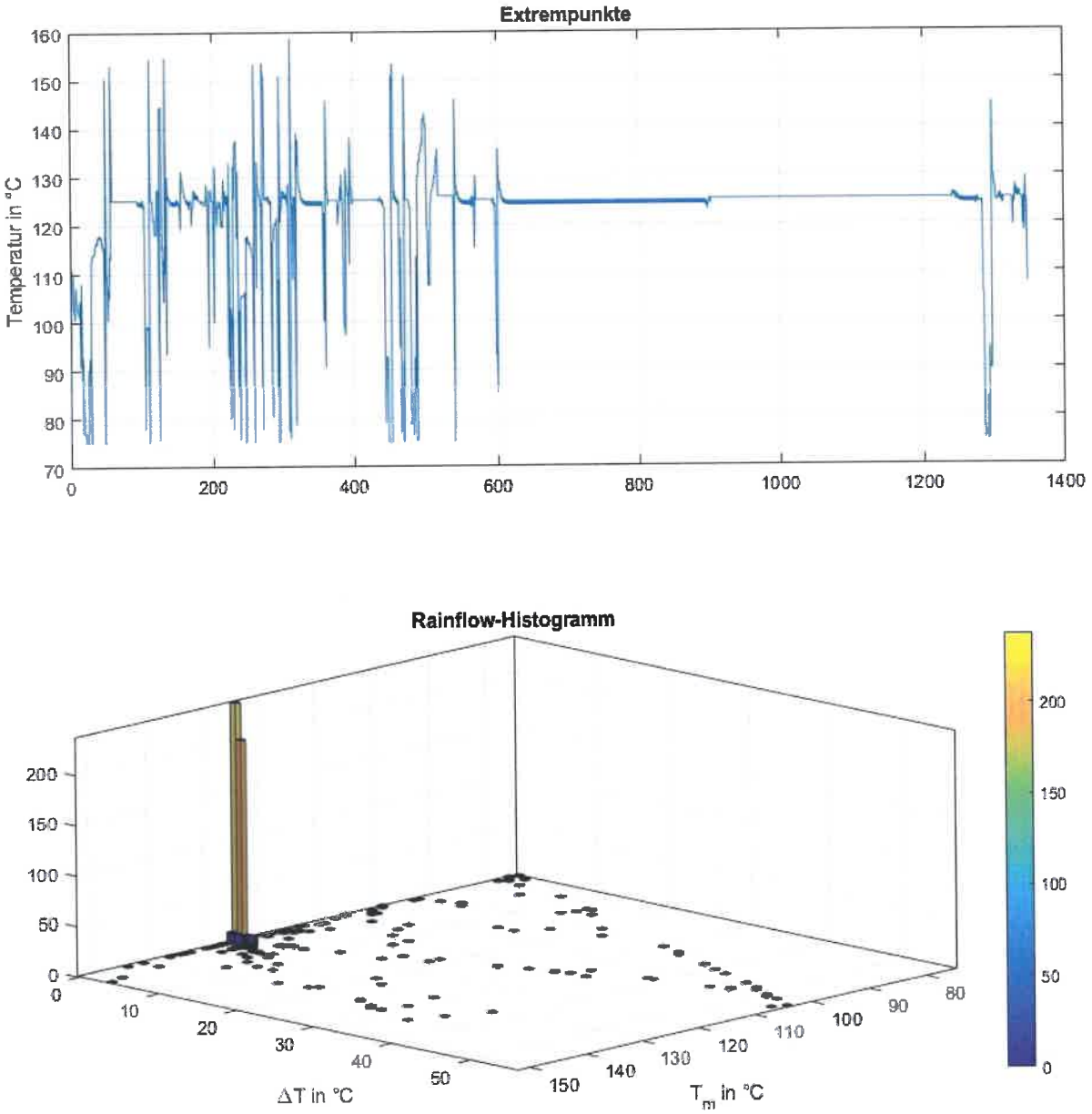


Abbildung 107: Missionprofile-Berechnung für die E-Maschine 1 (oben) und Ableitung der klassifizierten Belastung durch Temperaturhübe der betrachtete Modellkonfiguration der Endstufenmodule nach dem Rainflow-Verfahren (unten) für einen Fahrzyklus

26. JULI 2022

Diese Temperaturbelastungsprofile lassen sich nun nach dem sogenannten Rainflow-Algorithmus nach Temperaturwechselamplituden klassifizieren und zugeordnet zählen. Die jeweils unteren Diagramme in Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen hier die Häufigkeiten über der mittleren Temperatur und der Temperaturwechselamplitude. Diese beiden Parameter sind im Lebensdauermodell entscheidend für den „Lebensdauerverbrauch" in einem Zyklus. Die geforderte Fahrzeuglebensdauer ließ sich damit nun einschätzen und ergab, dass es insgesamt bei der betrachteten Auslegung im Umrichterkonzept nur zu einer relativ geringen Schädigung durch den hier betrachteten aktiven Betrieb kommt. Allerdings fallen die Schädigungen der E-Maschine 1 und der E-Maschine 2 deutlich unterschiedlich aus, so dass hier eine asymmetrische Bestückung der Teilumrichter denkbar erscheint. Zum Vergleich wurde auch der oben referenzierte PKW-Zyklus für ein Lebensdauerscenario betrachtet. Da hier zwar die Wechselhäufigkeit höher ist, aber insgesamt die Niedriglast vorherrscht, ergab sich eine auch eher geringe Schädigung im Resultat, jedoch eine deutlich andere Verteilung der Belastungen.

26. JULI 2022

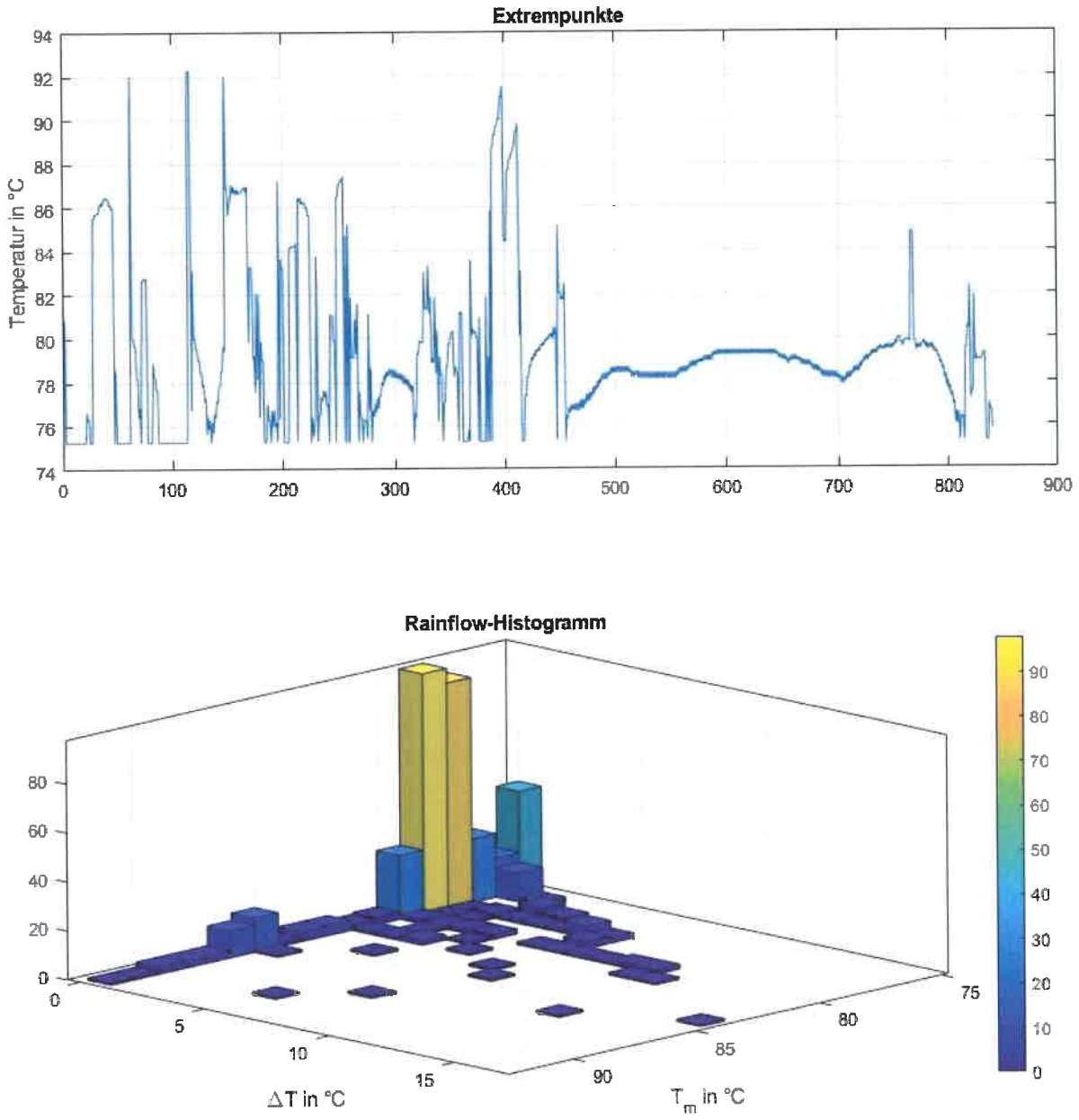


Abbildung 108: Missionprofile-Berechnung für die E-Maschine 2 (oben) und Ableitung der klassifizierten Belastung durch Temperaturhübe der betrachtete Modellkonfiguration der Endstufenmodule nach dem Rainflow-Verfahren (unten) für einen Fahrzyklus

In Abbildung 109 ist die Verteilung der Strombelastungen der beiden LKW-E-Maschinen und die aus der PKW-Simulation im Histogramm im Vergleich dargestellt. Die absolute Zahl der Hube ist hier nicht auszuwerten, da diese sich auf die bzgl. Lebensdauer unterschiedlich zu wertenden Einzelzyklen beziehen. Aber es ist gut zu erkennen, dass die Schwerpunkte der Häufigkeiten beim PKW bei den niedrigen Strömen liegen, während diese sich beim LKW bei zu größeren Strömen verschieben.

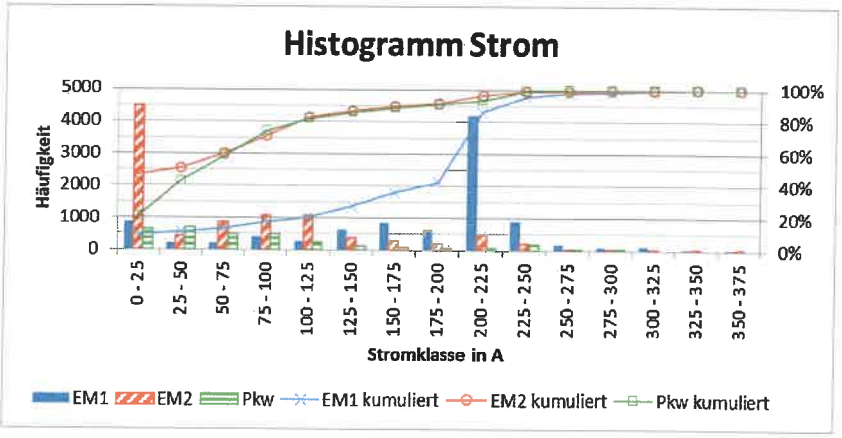


Abbildung 109: Histogramm der Strombelastungen nach Klassifizierung im Rainflow-Algorithmus für LKW-E-Maschinen und PKW-Simulation im Vergleich

Neben den Leistungsmodulen wurde auch die Kondensatorbaugruppe modelliert und deren Belastung betrachtet. Tatsächlich ergab sich bei einfacher Gehäusemontage sogar ein höheres Schädigungspotential als bei den Leistungsmodulen, sogar mit der erhöhten Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Ausfalls. Das Lebensdauerverhalten ist hier nämlich durch die Belastungsdauer mit Absoluttemperatur bestimmt und diese ergibt sich bei der LKW-Anwendung zu deutlich höheren Werten als bei der PKW-Anwendung. Letztere liegt im Vergleich erwartungsgemäß in unkritischer Region. Will man aus Kostengründen die engen Auslegungsprämissen für die Kondensatorkomponenten beibehalten, so muss die Belastungsdauer mit Absoluttemperatur durch den konstruktiven Aufbau und eine direkte Anbindung an eine gute thermische Senke wie gekühlte Gehäuseteile oder den Kühler der Leistungsmodule günstig beeinflusst werden. Dieser Optimierungsansatz ist in Abschnitt 2.11.3 geeignet berücksichtigt.

Verifikation

Zur Verifikation der elektrischen und thermischen Größen wurde eine Laborkomponente aufgebaut, welche die Endstufe in der Anordnung wie im oben dargestellten Umrichterkonzept (s. Abbildung 104) aufnimmt, aber eine deutlich bessere Zugänglichkeit für Messungen ermöglicht. Die verwendete Versuchsanordnung zur Unterstützung der Modellbildung ist in Abbildung 110 dargestellt.

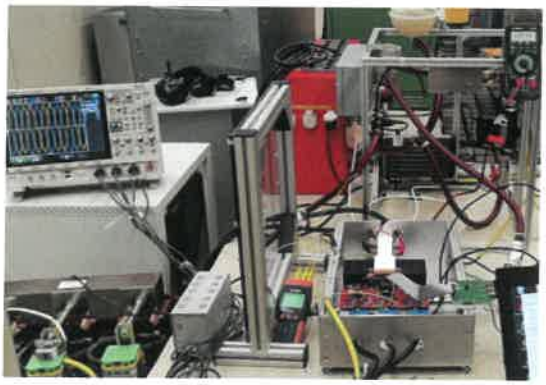
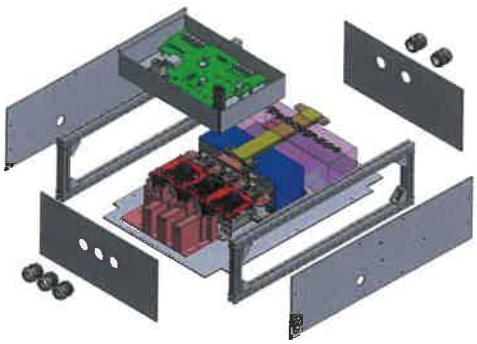
a)  b) 

Abbildung 110: Laborkomponente; a) Laboraufbau mit geöffnetem Gehäuse b) Explosionsdarstellung

Fazit zum Einsatz von PKW-Technologien für die LKW-Anwendung

LKW- und PKW-Anwendung unterscheiden sich sehr deutlich hinsichtlich der Belastungsszenarien des Antriebsumrichters. Die Regelbelastung liegt beim LKW deutlich näher an der Maximalbelastung als beim PKW. Die Schwerpunkte der Belastung in den lebensdauerrelevanten Missionprofiles liegen beim LKW bei höheren Stromklassen im Spektrum als beim PKW. Trotzdem erscheinen die neuen hochzuverlässigen Aufbautechnologiekonzepte aus der PKW-Anwendung auch für den LKW-Einsatz auch in ihrer heute typischen Anwendungsdimensionierung geeignet.

Die ursprüngliche Erwartung, dass der Einsatz der in der PKW-Anwendung neuen Siliziumkarbid-Halbleiterschalter (SiC) grundsätzlich auch für die Leistungselektronik in der Oberleitungs-LKW-Anwendung prinzipielle Vorteile bringt, war aufgrund der Analysen im Arbeitspaket 10 (s. Abschnitt **2.13**) widerlegt worden. Daher wäre die Bestückung in SiC, wie sie sich teilweise für die PKW-Anwendung entwickelt, für die LKW-Anwendung derzeit zunächst keine sinnvolle Verbesserung. Trotzdem könnten in Zukunft SiC-Halbleiter, dann als etablierte PKW-Anwendung, ihren Weg in den elektrifizierten LKW finden. Der geringere Halbleiterflächenbedarf entschärft die bestehende Kostendifferenz.

Die für Si- wie SiC-Technologie geeigneten hochzuverlässige Aufbautechniken, wie sie sich auch gerade für die regelmäßig in Dauerbelastung betriebenen leistungselektronischen Schalter im LKW erforderlich zeigen, sind jedenfalls aus der PKW-Anwendung verfügbar und übertragbar. Dabei stellt neben dem Leistungsmodul der Zwischenkreiskondensator ein Schlüsselglied bei der Technologieübertragung dar.

2.11.3 Aufbaukonzept und Optimierungsansätze

Auf Basis der Erkenntnisse des an der PKW-Verbausituation orientierten Umrichterkonzepts wurde nun eine optimierte Anordnung für eine zukünftige LKW-Komponente entworfen. Bei der Optimierung wurde nach dem Prinzip eines morphologischen Kastens vorgegangen, wie es in Abbildung 111 dargestellt ist. Dabei sollten wesentliche Bauteile und Anordnungen der PKW-orientierten Endstufe erhalten bleiben, zusätzlich aber eine Optimierung gefunden werden, einerseits durch die Applikation als Doppelumrichter, andererseits aber durch eine Verbesserung der Kondensatoreinbindung, um die bereits genannte Problematik der thermischen Belastung zu verbessern.

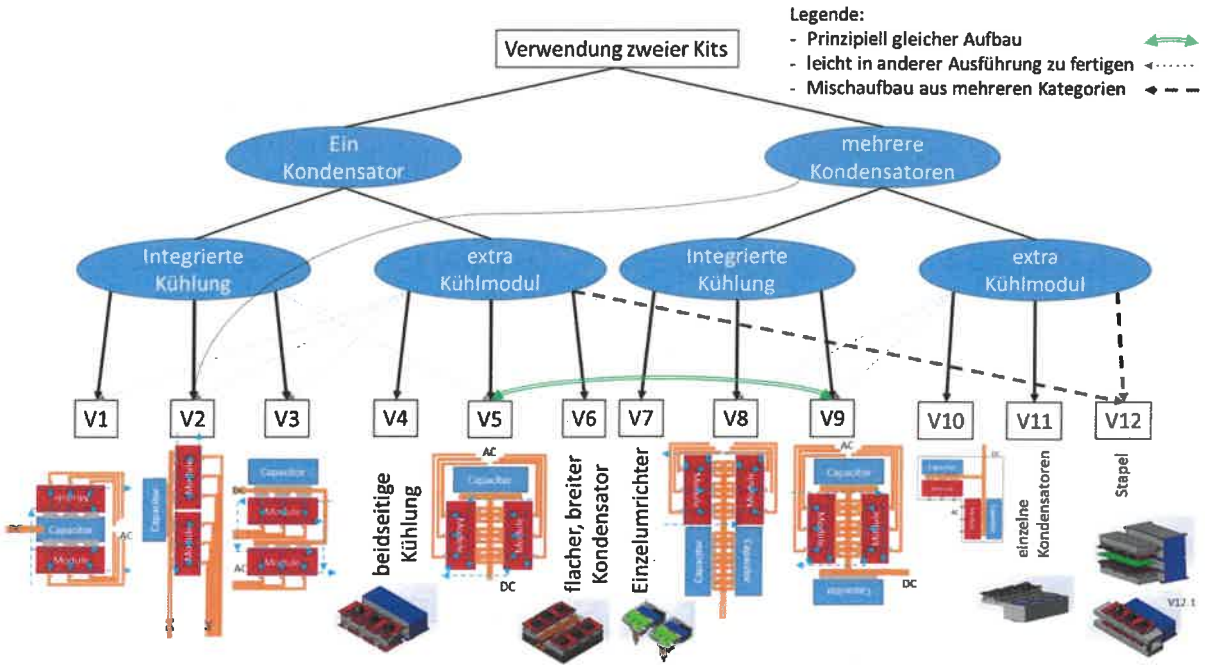
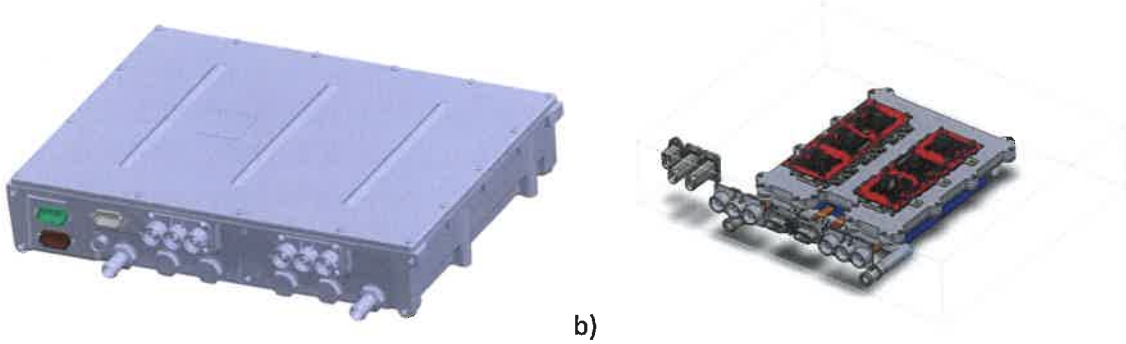


Abbildung 111: Ansatz zur Optimierung der LKW-LE-Komponente als morphologischer Kasten

Im Ergebnis der Bewertung der denkbaren Lösungen wurde die Anordnung nach Abbildung 112 als Optimum gefunden. Die Gehäusegestaltung ist hier an die heutige Einbausituation im Oberleitungs-LKW angelehnt. Eine Umgestaltung des Kondensators ermöglicht eine kompakte und thermisch sehr günstige Anordnung mit einer zentralen Kühlplatte. Der Bauraumvergleich mit dem heute im Prototypen verfügbaren Montageplatz zeigt das diesbezügliche Potential der Verwendung der PKW-Technologie.

Für die gefundene neue Anordnung wurde erneut ein Kondensatormodell aufgestellt und durch Simulation kalibriert. Die am Ende berechnete Schadensakkumulation des Kondensators ergab eine deutliche Verbesserung und lässt die Darstellung der Lebensdauerfestigkeit der Komponente in dieser Anordnung erwarten.



a) b)

Abbildung 112: Konzept einer optimierte LKW-LE-Komponente a) Gehäuse mit Anschlussblende; b) Anordnung der Endstufe

2.11.4 Hochvoltsystembetrachtung

Problemstellung:

Im Gegensatz zum isolierten PKW Traktionsnetz kann das Traktionsnetz eines Oberleitungs-LKW während der Fahrt mit einem Oberleitungsnetz verbunden werden, sodass die relevanten elektrischen

26. JULI 2022

Parameter vom Ort des Anbügelns abhängig sind und sich über den Fahrtverlauf ändern. Weiterhin kann sich eine variierende Anzahl von weiteren LKW Traktionsnetzen hinzuschalten oder in beliebiger Weise wieder trennen. Die jeweiligen Traktionsnetze können sich in unterschiedlichen Betriebs- bzw. Lastzuständen befinden und bilden so insgesamt über das Oberleitungsnetz ein dynamisches Verbundsystem. Dadurch ergibt sich eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden, die eine starke Variabilität der wirksamen Parameter für die in Wechselwirkung stehenden Komponenten des gesamten Verbundsystems bedeuten. Aufgrund der zwingend vorhandenen elektrischen Energiespeicher ergibt sich ein schwingungsfähiges System, das auch durch die Einspeisung des Unterwerks einer Anregung unterliegt. Die sich so ergebende große Variation an möglichen Betriebsszenarien erfordert eine umfangreiche Betrachtung der verschiedenen möglichen Situationen um unvorhergesehene Zustände möglichst auszuschließen. Darüber hinaus müssen die jeweiligen Komponenten des Verbundsystems ertüchtigt sein um bei entsprechend hoher Parametervariation zuverlässig zu operieren. Auch um die Systemgrenzen der Komponenten bestimmen zu können ist eine Betrachtung des gesamten Verbundsystems mit den entsprechenden Szenarien erforderlich.

Lösungsansatz:

Die hohe Anzahl an möglichen Betriebsszenarien lässt sich durch eine rein praktische Erprobung unter vertretbarem Aufwand nicht vollständig in dem Projektrahmen abdecken. Deshalb wird eine simulative Betrachtung des Verbundsystems mit validierten Modellen der jeweiligen Komponenten bevorzugt. Dabei werden die Betriebsszenarien im projektrelevanten LKW-Einsatzszenario untersucht. Das zu erstellende Modell des Verbundsystems soll die notwendige Aussagekraft generieren, um repräsentativ die auftretenden Systemzustände abzubilden und eine Bewertung der erforderlichen Grenzen auf System- und Komponentenebene zu ermöglichen. Im ersten Schritt können Transiente bzw. hochdynamische Betrachtungen wie z.B. Kontaktabrisse im Projektrahmen nicht abgedeckt werden. Dennoch soll es möglich sein, die Grundstruktur des Simulationsmodells mit weiteren Forschungs- und Validierungsarbeiten dahingehend zu ertüchtigen. Um die Bandbreite der notwendigen Betriebsgrenzen der Komponenten nicht unnötig ausweiten zu müssen, können Maßnahmen zur Entkoppelung von Wechselgrößen zwischen dem Traktionsnetz und dem Oberleitungsnetz zielführend sein. Mögliche Lösungen zur Entkoppelung sollen Teil der Betrachtungen sein.

Systemmodellierung

Eine alleingültige Modellierung lasst sich für einen Unterwerksabschnitt nicht abschließend erstellen. Dies liegt daran, dass sich sowohl eine beliebige Varianz in der Anzahl der LKW als auch in den Distanzen zwischen den LKW und zum Einspeisepunkt ergeben kann. Entsprechend muss eine repräsentative Anzahl diskreter Systemzustände modelliert werden, aus denen sich Erkenntnisse über das System ableiten lassen.

26. JULI 2022

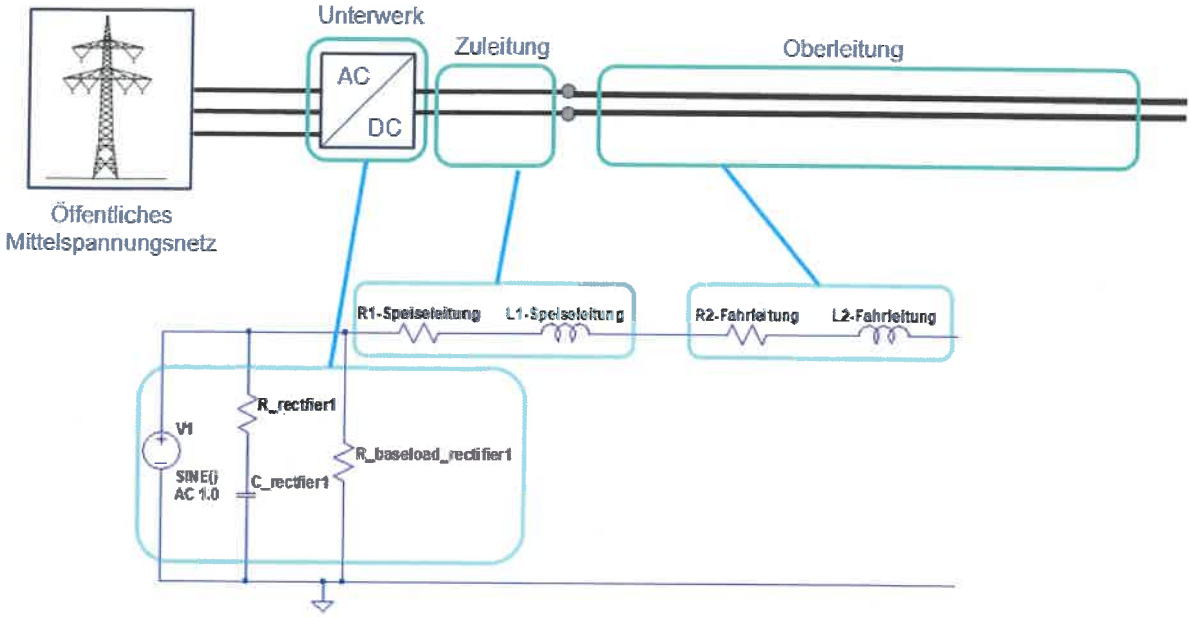


Abbildung 113: Modell des Oberleitungssystems

Abhängig vom verwendeten Typ des Gleichrichters im Unterwerk und der Wechselspannungsfrequenz des öffentlichen Mittelspannungsnetzes f_N ergibt sich auf der Oberleitung eine Gleichspannung mit überlagertem Wechselspannungsanteil einer bestimmten Frequenz. Bei einem B6 Dreiphasengleichrichter und einer Frequenz f_N im Versorgungsnetz ergibt sich eine Oberwellenfrequenz f_{OL} von

$$f_{OL} = 6\, f_N$$

Die Frequenz f_{OL} in der Modellbetrachtung durch die Spannungsquelle V1 (vgl. Abbildung 113 unten) mit eingespeist.

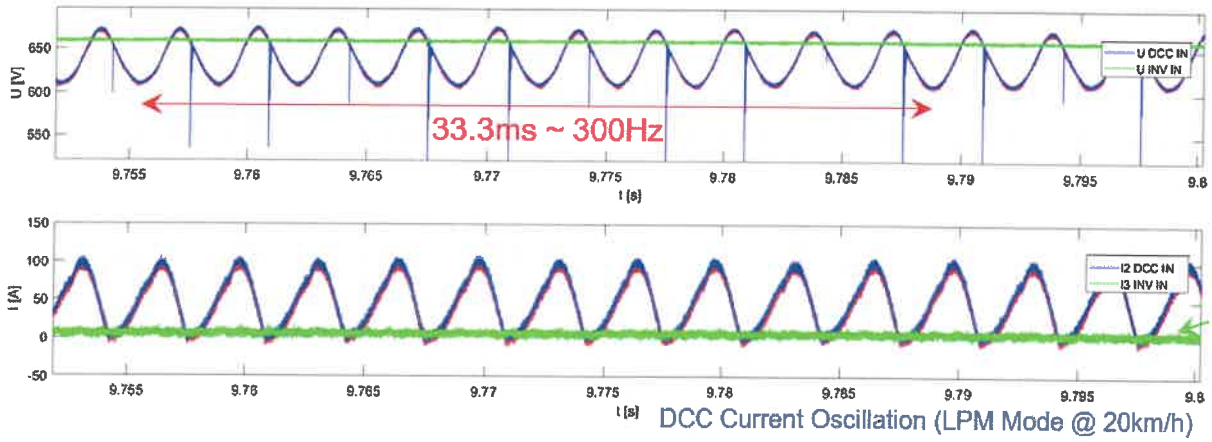
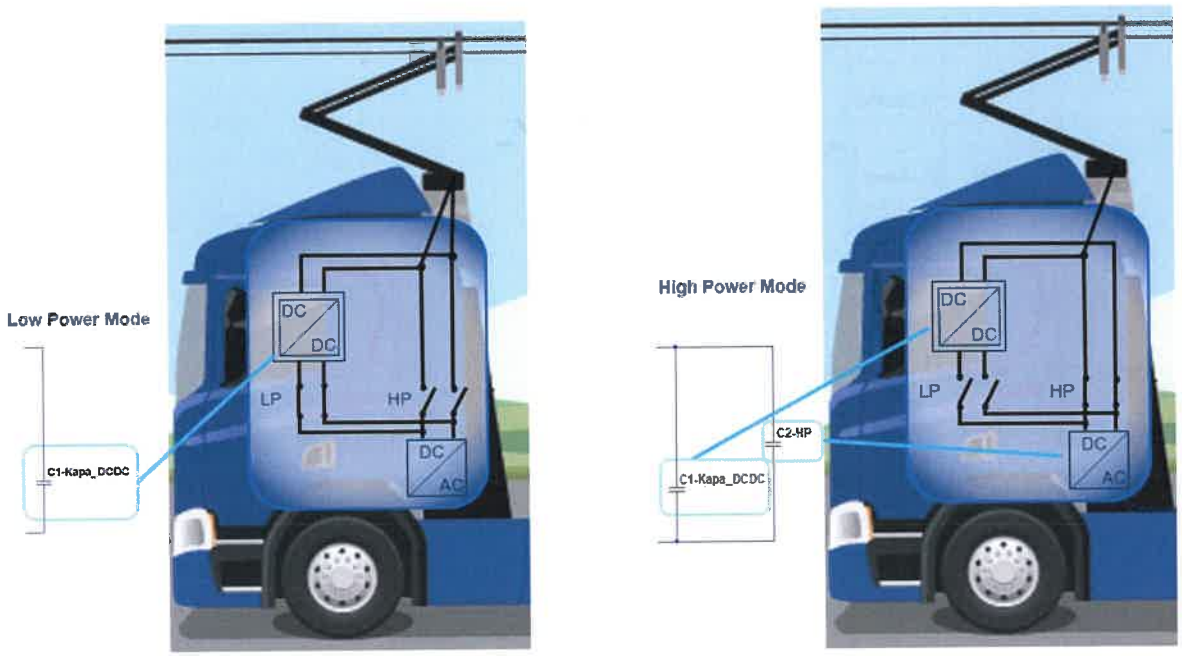


Abbildung 114: Messung der Oberwellenfrequenz an der Oberleitung (gemessen am Pantografen)

In Abbildung 114 lässt sich eine Oberwellenfrequenz von 300 Hz ermitteln. Im Arbeitspaket 13a ist eine Untersuchung zur Auswirkung von Kontaktabrissen des Pantografen vorgestellt. Der Verlauf von Spannung und Strom während dieser Vorgänge ist sehr dynamisch und enthält damit auch andere, insbesondere höhere Frequenzanteile. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen werden jedoch auf die von der Gleichrichtung verursachte kritische Frequenz f_{OL} eingegrenzt.

Auf der Seite der Verbraucher können die LKW nicht nur in ihrer Anzahl oder ihrem Abstand zum Unterwerk das Systemverhalten beeinfluss, sondern sie können auch jeweils unterschiedliche Parameter bzw. Verschaltungen ihrer wirksamen passiven Komponenten haben. So ergeben sich im Rahmen des Förderprojekt zwei unterschiedliche Antriebsstrang-Topologien mit denen sich ein LKW auf eine Oberleitung aufschalten kann. Dies ist zum einen der sog. Low-Power Mode wie in Abbildung 115a) dargestellt und der High-Power Mode in Abbildung 115b).



a) b)

Abbildung 115: Model des LKW a) im Low-Power Mode; b) im High-Power Mode

Validierung der Modellparameter

Insbesondere für das Simulationsmodell zur Oberleitung stehen über die Länge skalierte Literaturwerte zur Verfügung. Da sich durch Kontaktierung, Anordnung/Leitungsführung oder Witterungseinfluss Abweichungen in dem realisierten System ergeben können, besteht eine Maßnahme zur Validierung des Simulationsmodells darin, die Belagswerte messtechnisch zu überprüfen. Zur Ermittlung des Widerstands- und Induktivitätsbelags sollten mittels eines Impedanzanalysators (*Precision Impedance Analyzer; 65008 Series; Wayne Kerr Electronics Inc.*) die Werte für die Zuleitung als auch der Oberleitung im Erprobungsgelände bei Groß Dölln erfasst werden. Dazu wurde die Zuleitung vom Unterwerk frei geschaltet und die Oberleitung in aufsteigender Entfernung nacheinander vom Einspeisepunkt mittels einer Kurzschlussleitung (diese wurde bei der Berechnung mit berücksichtigt) kurzgeschlossen.

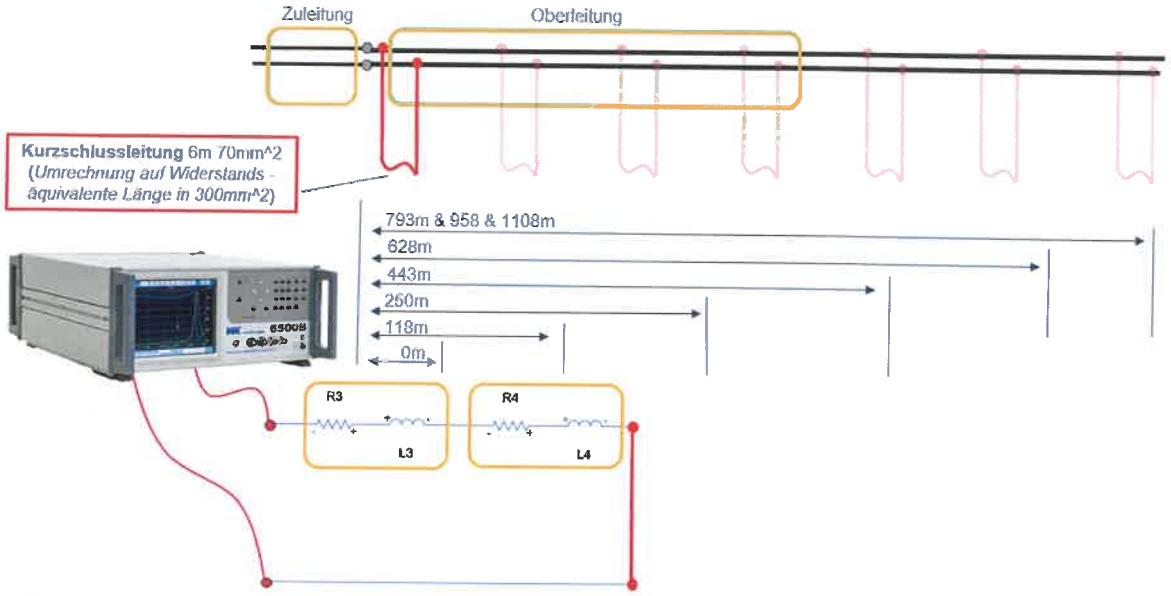


Abbildung 116: Versuchsanordnung zur Validierung der Belagswerte

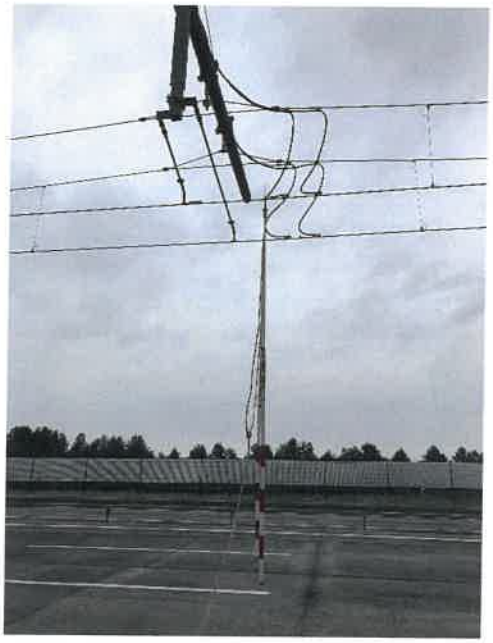


Abbildung 117: Foto der Kurzschlussleitung

Wie in Abbildung 118 zu erkennen ist, ergibt sich für die Induktivitätsmessung ein mit der Leitungslänge proportional steigender Induktivitätswert und keine Abhängigkeit von der Messfrequenz. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, so dass eine nähere Interpretation der Messung zulässig ist.

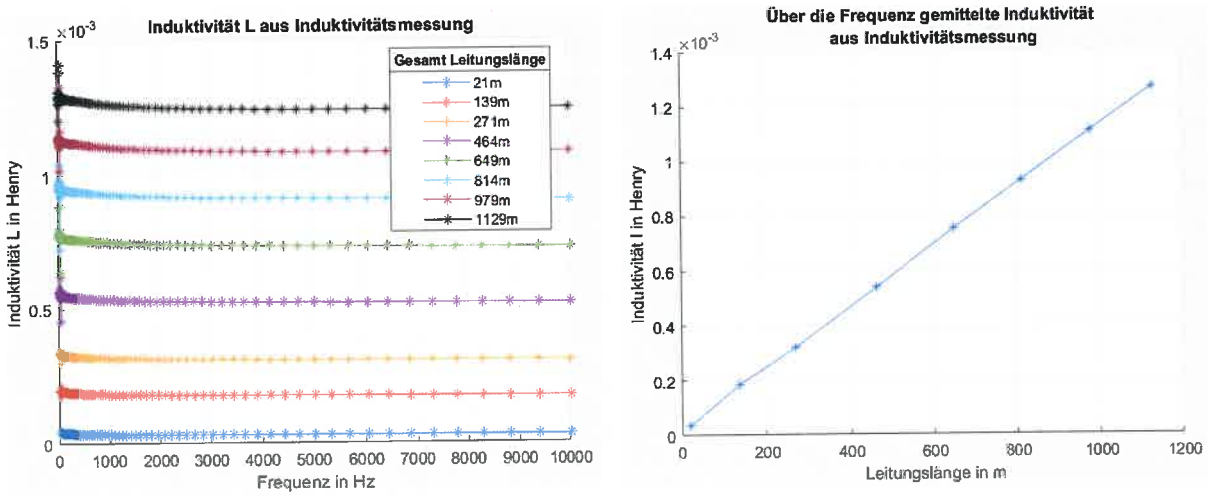


Abbildung 118: Induktivitätsmessung der Oberleitung (inkl. Speiseleitung)

Aus der Abbildung 118 (rechts) lässt sich ein Induktivitätsbelag ableiten. Der erste Messpunkt nahe des Koordinatenursprungs ist durch einen Kurzschluss unmittelbar am Einspeisepunkt ermittelt worden. Dieser entspricht somit der über den Querschnitt widerstandsgerecht umgerechneten Länge der Zuleitung bzw. Speiseleitung.

Tabelle 12: Gemessener Induktivitätsbelag der Oberleitung

Induktivität pro km	Gemessen	Erwartungswerte
Oberleitung (inkl. Speiseleitung + äquivalente Kurzschlussleitung)	**1,2318** $\frac{mH}{km}$	**1** $\frac{mH}{km}$

Es zeigt sich eine Abweichung von etwa +23 % vom Erwartungswert. Dies lässt sich möglicherweise durch die Leitungsführung der Zuleitung erklären oder durch Kontaktwiderstände, die beim Einhängen des Kurzschlussbügels entstehen. Dennoch ist die Abweichung nicht derart hoch, dass die Messung grundsätzlich anzuzweifeln ist. Weiterhin sollte mit dem Messgerät und Verfahren auch der Widerstandsbelag ermittelt werden. Da diese Messung aber keine Widerstandswerte streng proportional zur Leitungslänge ergab, konnte diese nicht interpretiert werden. Die Ursache wird ebenfalls in den Kontaktwiderständen vermutet, die bei dieser Messgröße stärkeren Einfluss haben dürften. Weiterhin ist die geringe Messspannung von 1V des Messgeräts für den Messaufbau als kritisch zu betrachten. Eine Messung der Kapazitätswerte des LKW Modells ergab mit dem Labormessgerät ebenfalls keine auswertbaren Ergebnisse. Auch hier wird die geringe Messspannung als Ursache vermutet. Eine erneute Messung mit einem Impedanzanalysator, der eine Messspannung von mindestens 50V – 100V ermöglicht, sollte hier bessere Resultate ermöglichen.

Analyse des Frequenzgangs im Verbundsystem und möglicher Entkoppelungsmaßnahmen

Das oben eingeführte Modell kann hinsichtlich seines Resonanzverhaltens kompakt durch eine Darstellung des Frequenzgangs analysiert werden. Verstärkungen der anregenden Frequenz von den oben beschrieben 300 Hz werden dabei sichtbar.

26. JULI 2022

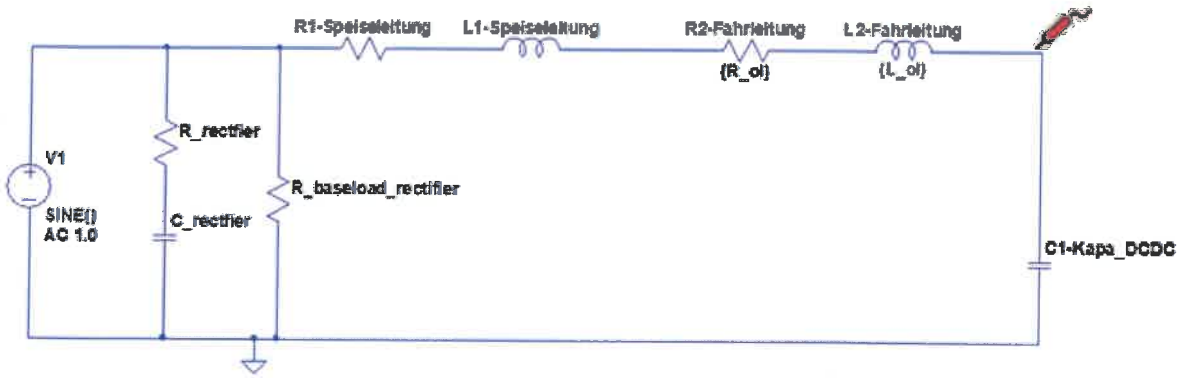


Abbildung 119: Modell des Oberleitungssystems mit einem LKW im Low-Power Mode

Da die wirkende Induktivität des System abhängig vom jeweiligen Abstand des LKW zum Unterwerk, werden die in einem Diagramm mehrere Frequenzgänge in Abhängig der Oberleitungslänge dargestellt.

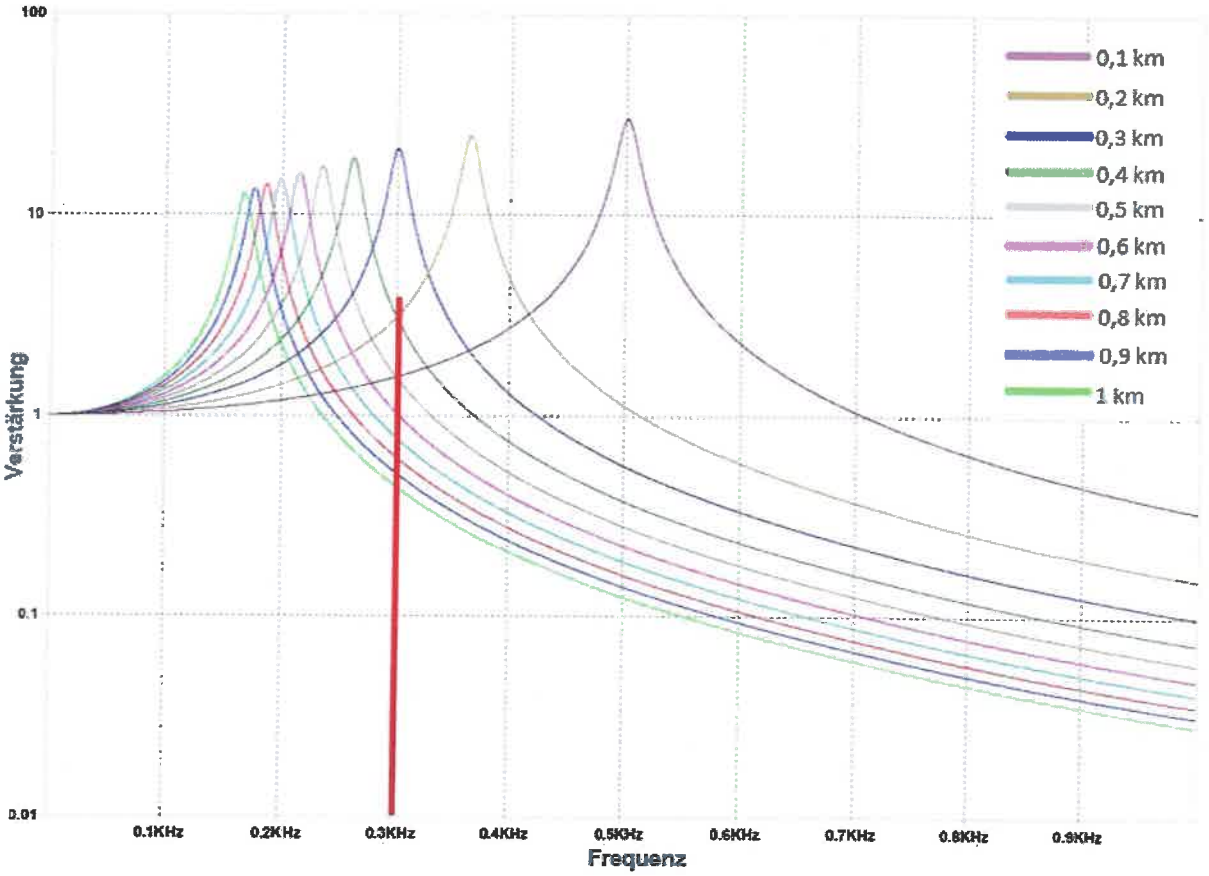


Abbildung 120: Frequenzgang des Modells im Low-Power Mode aus Abbildung 119

In Abbildung 120 lässt sich erkennen, dass bei einem LKW im Low-Power Mode im Abstand von 300m zum Unterwerk sich ein Resonanzhöhepunkt bei den anregenden 300 Hz ergibt. Aber auch bei weiteren Abständen in der Nähe des Unterwerks ergeben sich Überhöhungen.

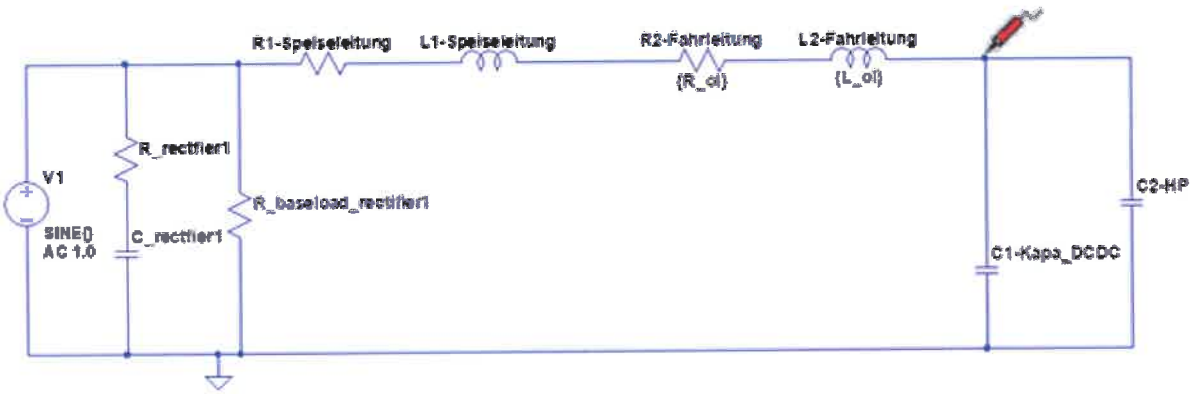


Abbildung 121: Modell des Oberleitungssystems mit einem LKW im High-Power Mode

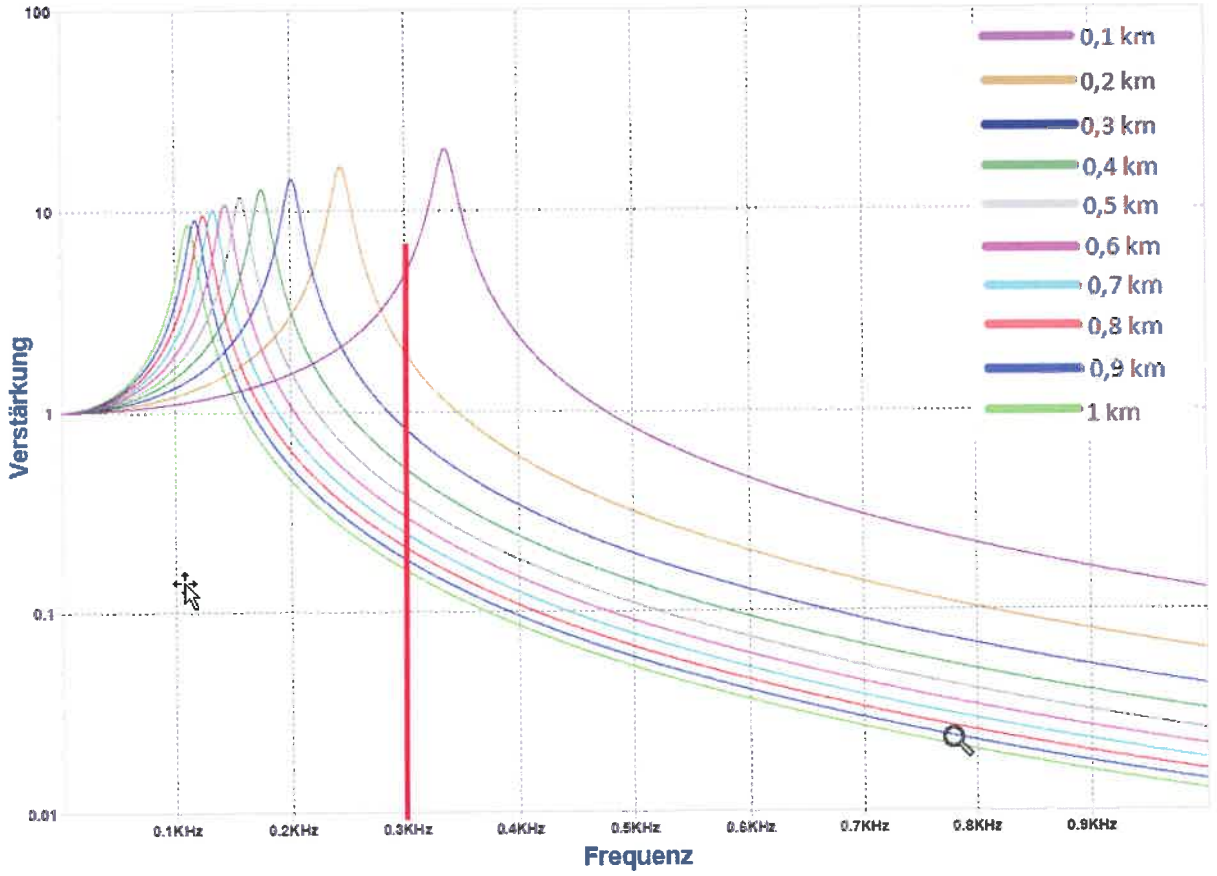


Abbildung 122: Frequenzgang des High-Power Mode Modells aus Abbildung 121

Nach Abbildung 122 ergibt sich auch im High-Power Modus insbesondere in der Nähe des Unterwerks (<300m) eine Überhöhung bei der anregenden Frequenz aus dem Unterwerk. Die Simulationsergebnisse müssen noch nicht bedeuten, dass sich auch im realen System Spannungsüberhöhungen ergeben, die zu einer Überschreitung der Systemgrenzen führen. Dies kann z.B. daran liegen, das der berechnete Resonanzpunkt zeitlich nicht lange genug vorherrscht, damit sich die Spannung aufbauen kann. Weiterhin können auch nicht in der Simulation berücksichtigte Systemeigenschaften stärker dämpfend wirken als es in der Simulation berechnet wird. Andererseits kann aber mit den theoretisch bekannten Systemeigenschaften nicht ausgeschlossen werden, dass es zu Spannungsüberhöhungen kommen wird. Aus diesem Grund sollten Gegenmaßnahmen untersucht werden, mit denen auf Simulationsebene sichergestellt ist, dass eine Überhöhung bei der anregenden Frequenz vermieden werden kann. Um einer Spannungsüberhöhung entgegen zu wirken, eignet sich das Einbringen einer Spule

im LKW in den Zuleitungspfad zum Pantografen, die mit ihrer Induktivität (Abbildung 123: L3-Filter) den Resonanzpunkt sich bei entsprechender Auslegung dem Resonanzpunkt verhindert.

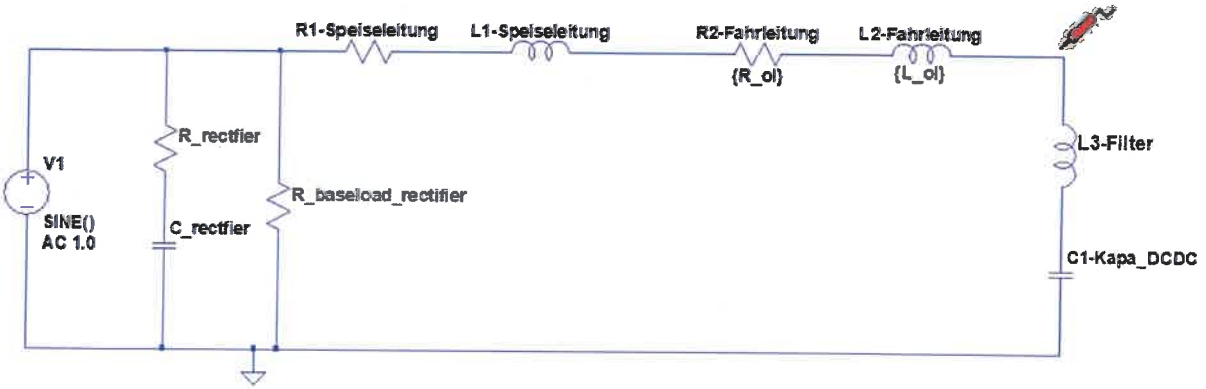


Abbildung 123: Low-Power Modell mit Filterdrossel L3

Die Auslegung der Spule richtet sich nach der Anregungsfrequenz aus dem Unterwerk und den weiteren passiven Komponente. Im Rahmen des Förderprojekts wurde eine solche Spule im LKW für Erprobungszwecke verbaut. Um prinzipiell einen Abgleich zwischen Simulation und Erprobung zu ermöglichen, wurde für diese Simulation die Spule nachgebildet, die in dem LKW physisch verbaut wurde. Wie in Abbildung 124 zu erkennen ist, liegt der Punkt der stärksten Dämpfung nicht genau bei den 300 Hz, was dem Induktivitätswert der verbauten Spule geschuldet ist.

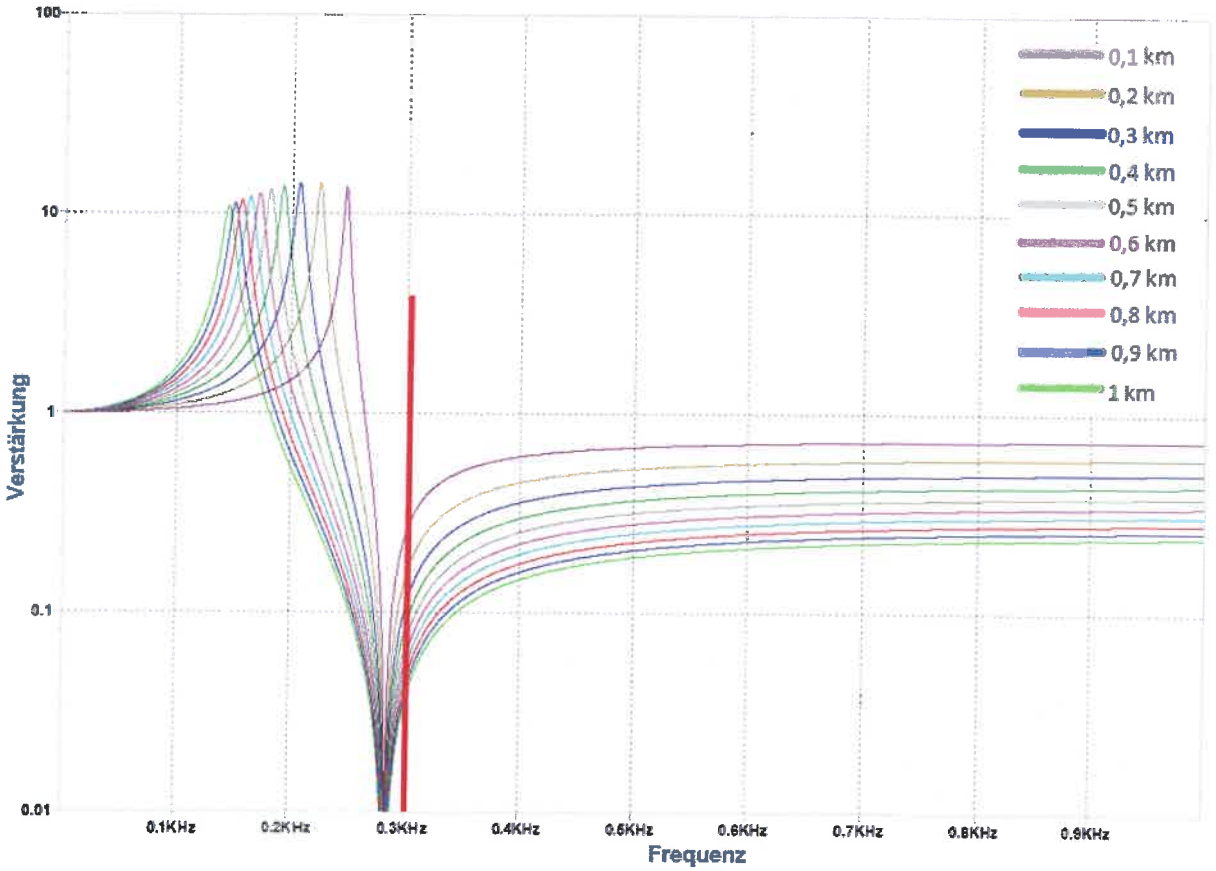


Abbildung 124: Frequenzgang des Low-Power Modells aus Abbildung 123 mit Filterdrossel

26. JULI 2022

Im Vergleich zu Abbildung 122 lässt sich in Abbildung 124 erkennen, dass sich mit der Filterspule nicht nur eine deutliche Reduzierung der Verstärkung erzielen sondern auch eine Dämpfung der Anregenden Frequenz. Die Dämpfungsspitze stellt sich zwar in unterschiedlicher Stärke aber unabhängig von der Entfernung zum Unterwerk ein. Ein vergleichbares Bild zeigt sich mit der Filterdrossel L3 im High-Powermodus (vgl. Abbildung 126).

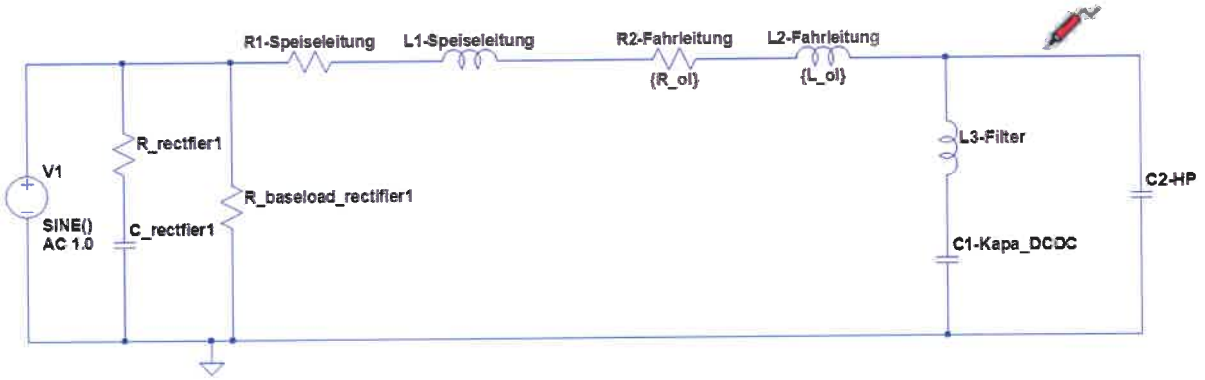


Abbildung 125: High-Power Modell mit Filterdrossel L3

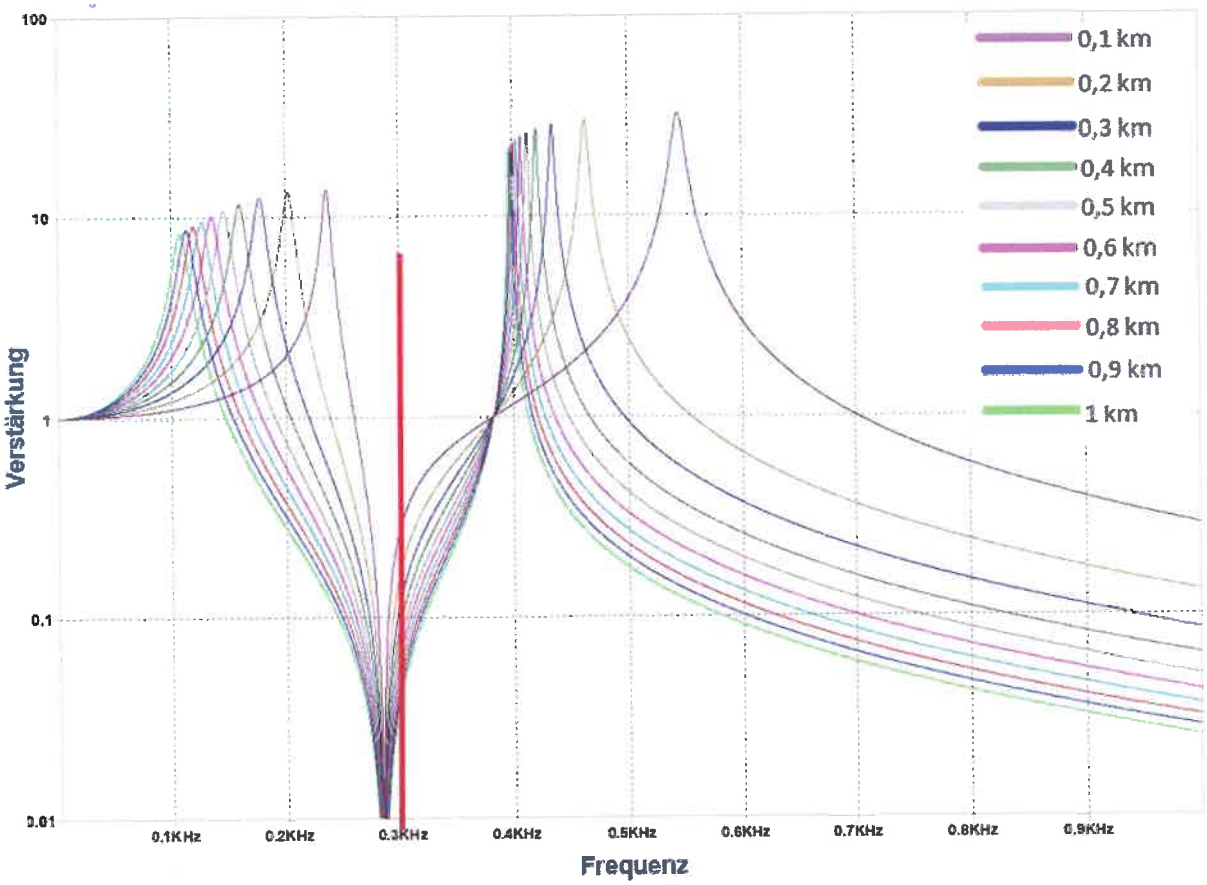


Abbildung 126: Frequenzgang des High-Power Modells aus Abbildung 125 mit Filterdrossel

Aus Abbildung 126 lässt sich entnehmen, dass durch die Filterdrossel eine Dämpfung bei einer bestimmten Frequenz erzielt werden kann und dass die Frequenz der maximalen Dämpfung nicht von der Entfernung zum Unterwerk abhängig ist. Abbildung 126 zeigt aber auch, dass durch die Filterdrossel in anderen Frequenzbereichen zusätzliche Verstärkungen erzeugt werden können. Solange keine

kontinuierlichen Anregungen in diesen Frequenzbereichen eingeprägt werden, ist das nicht unmittelbar kritisch im Sinne einer Beschädigung. Wünschenswert wäre jedoch eine dämpfende Wirkung in allen Frequenzbereichen zu erzielen, wie nachfolgend erläutert.

Durch eine Spannungsverstärkung in anderen Frequenzbereichen, ohne nennenswert hinterlegte Leistung, bricht diese bei einem Stromfluss zwar schnell zusammen ohne eine Beschädigung verursachen zu müssen, dennoch kann die höhere Spannung vom System (z.B. vom DCDC Wandler) als Überschreiten von Systemgrenzen erkannt werden und so zu einer Abschaltung führen.

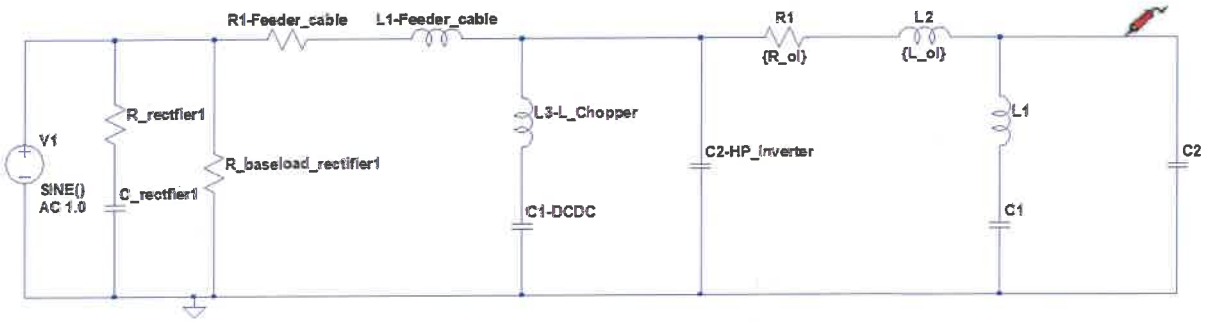


Abbildung 127: High-Power (am Unterwerk) und High-Power Modell jeweils mit Filterdrossel L3

Die Abbildung 127 zeigt eine Simulation einer geringfügig komplizierteren Situation. Dabei wird abgebildet, dass sich ein LKW im High-Power Mode unmittelbar am Einspeisepunkt befindet und ein weiterer LKW im High-Power Mode sich in einer variablen Distanz dazu befindet.

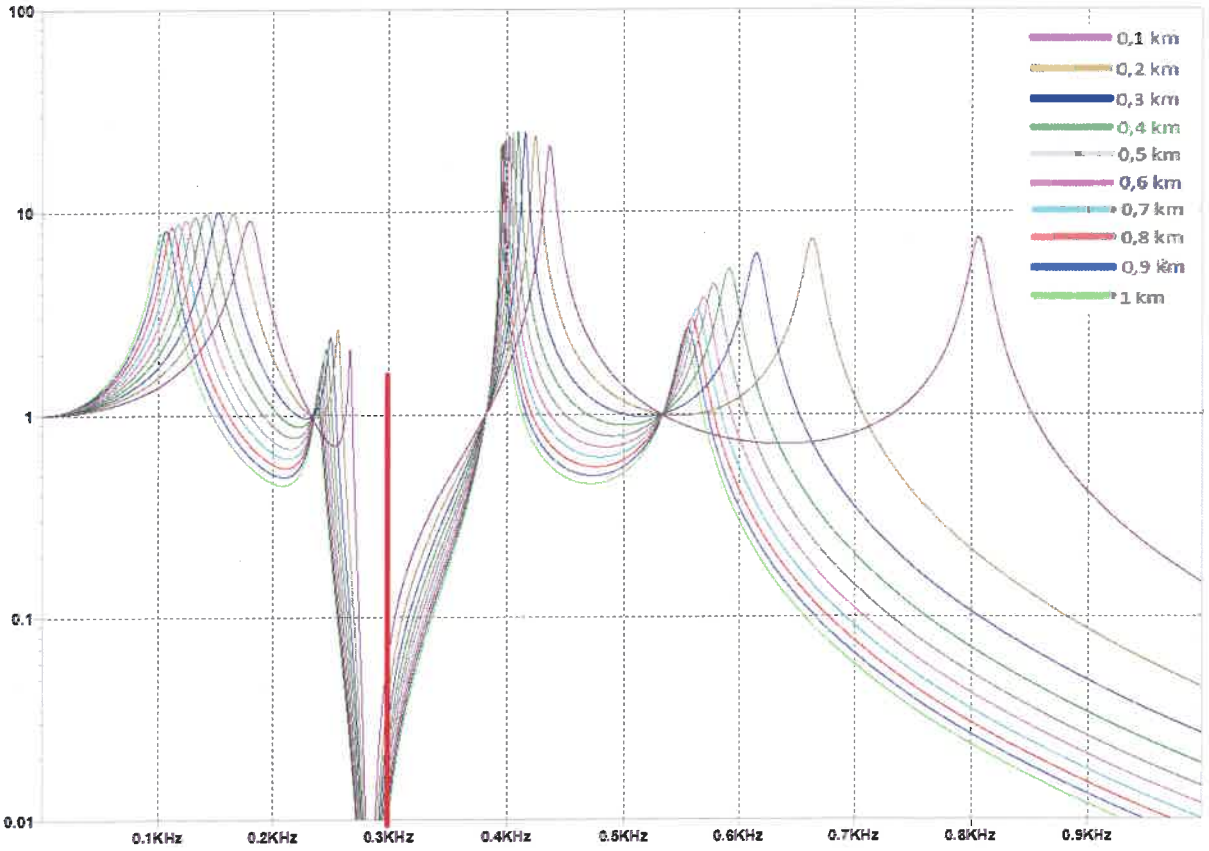


Abbildung 128: Frequenzgang des Modells aus Abbildung 127 mit Filterdrossel

26. JULI 2022

Abbildung 128 verdeutlicht, dass sich auch bei einer höheren Anzahl von LKW im Unterwerksabschnitt durch die Filterdrossel bei einer gewünschten Frequenz eine Dämpfung erzeugen lässt. Sie zeigt jedoch auch, dass schnell weitere Frequenzbereiche hinzukommen können, in denen das System verstärkend auf Spannungsanregungen wirkt. Dies kann die Anfälligkeit des Systems für Abschaltungen aufgrund von Überspannungen erhöhen. Hier sind entweder Filtermaßnahmen zu finden, die in einem breiterem Spektrum dämpfend wirken oder die Systemüberwachung muss auf solche Überspannung entsprechend robust reagieren können.

Messtechnische Analyse von Entkopplungsmaßnahmen

Eingangs dieses Berichts wurden die Entkopplungsmaßnahmen sowie die simulativen Untersuchungen anhand einer Messung motiviert (siehe Abbildung 114), in der sich bei einer Fahrt im Low-Power Modus ohne Fahrzeugentkopplung eine Oberschwingung bei 300Hz einstellt. Im Rahmen dieses Projekts wurde als Entkopplungsmaßnahme eine Filterdrossel simulativ betrachtet und auch in der Fahrzeugerprobung validiert. Die Abbildung 129 zeigt dazu die entsprechende Messung.

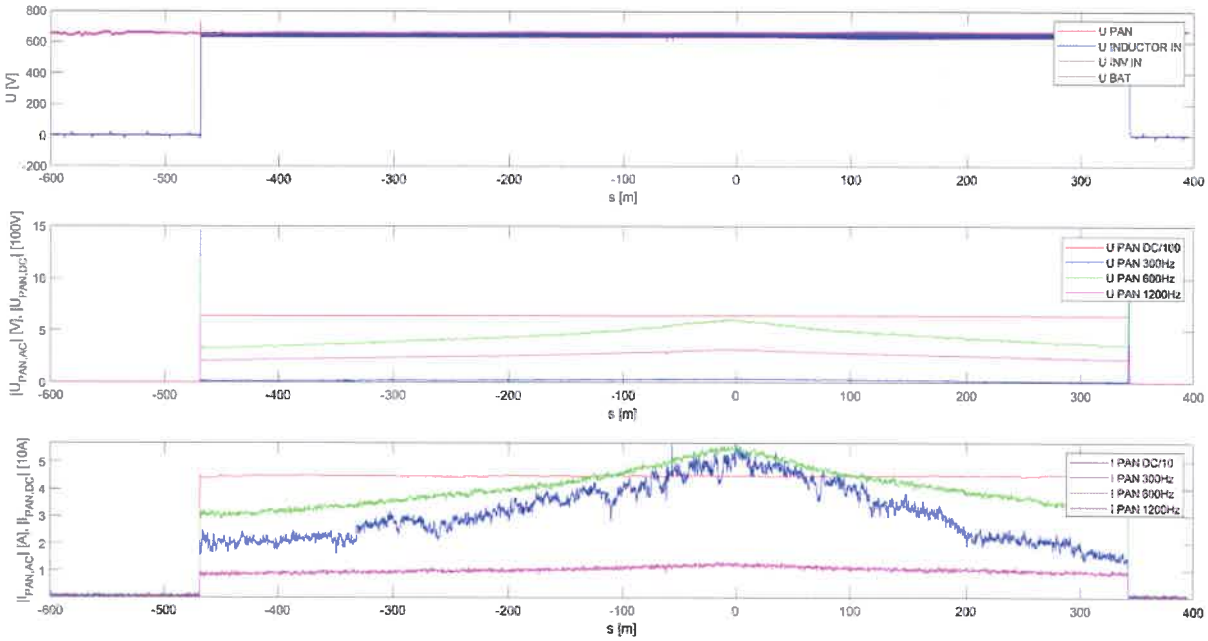


Abbildung 129: Validierung der Filterdrossel – Verlauf ausgewählter Frequenzanteile von Strom und Spannung über dem Weg (Versuchsstrecke Groß Dölln, LPM, 20km/h)

In der Abbildung 129 sind jeweils die Amplituden von Pantographenstrom und –spannung über dem Fahrweg aufgetragen, aufgeteilt in die Frequenzanteile 300Hz, 600Hz und 1200Hz. Man kann erkennen, dass sich in der Nähe der Speisestelle (s = 0m) die größten Amplitudenwerte für die betrachteten Anteile einstellen. Dies entspricht auch der Vorhersage aus der Simulation, siehe Abbildung 124. Betrachtet man die Maximalwerte der Amplituden, erkennt man für alle Oberschwingungsanteile unkritische Werte: Die Harmonische bei 600Hz dominiert sowohl beim Strom mit Werten kleiner als 6A als auch bei der Spannung mit Werten kleiner als ca. 7V.

2.12 AP 9: Future High Voltage System Design

Aufgabenstellung

26. JULI 2022

In der Planungsphase des Förderprojekts wurden die nachfolgend genannten 5 Teilaufgaben für das Arbeitspaket 9 „Future High Voltage System Design" identifiziert. Diese Schwerpunkte wurden jedoch in Absprache mit dem Fördergeber zu Gunsten der Bearbeitung anderer Problemstellungen verschoben, welche sich erst im Rahmen der Projektlaufzeit darstellten.

9.1 Leitungsrouting
9.2 Bewertung der Leitungsquerschnitte
9.3 Analyse der Steckverbinder und Verschraubungen
9.4 Betrachtungen zur HV-Sicherheit bei nicht-isolierendem DC-Wandler
9.5 Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf zukünftige Verwendung

Den Punkten 9.1 sowie 9.3 (Leitungsrouting und Analyse der Steckverbinder und Verschraubungen) wurden im Projektverlauf eine geringere Bedeutung im Vergleich zu anderen Problemstellungen beigemessen, weshalb sie nicht weiter betrachtet wurden. Die Untergliederung des Arbeitspakets erfolgt daher in dieser Darstellung an Hand der tatsächlich bearbeiteten Themen.

2.12.1 Systemspannung zukünftiger Oberleitungs-LKW sowie -infrastruktur

Prämisse der ursprünglichen Auswahl der Systemspannung war eine Fahrzeugstruktur mit der Möglichkeit der direkten (konduktiven) Kopplung von Fahrzeug und Infrastruktur ohne Anpassung der Spannung. Dies bot sich wegen der seinerzeit üblichen Nennspannungslage von ca. 650VDC im Fahrzeug an, die offensichtlich mit der bekannten und industriell verfügbaren Infrastruktur aus dem Bereich der DC-Bahnen im Einklang steht. Dort steht ebenfalls ein System mit einer Nennspannung von 650VDC zur Verfügung, vgl. EN 50163. Allerdings zeigten Simulationen (vgl. Kap. 2.19.5), dass mit dieser Nennspannungslage die Anforderungen an die Bereitstellung einer bestimmten Systemleistung pro Speiseabschnitt beim e-Highway nur durch eine hohe Dichte von Unterwerken realisiert werden kann. Dies ist in der Grenze der Strombelastbarkeit der Fahrleitung begründet, welche auch bei Einsatz von Verstärkungsleitungen eine Art „natürliche Grenze" für die übertragbare Leistung in einem Speiseabschnitt darstellt.

Die Überlegung einer Erhöhung der Nennspannung ist damit ein naheliegender Schritt. Die Bahnstandards (insbes. EN 50163) bieten für eine Realisierung dieser Maßnahme ausreichend Potenzial, dies gilt auch aus Sicht aktuell verfügbarer Komponenten. Anders verhält es sich aus Sicht der Straßenfahrzeuge. Hier befinden sich zum aktuellen Projektzeitpunkt Systeme mit einer Nennspannung um 800VDC in Entwicklung.

Im Rahmen der Diskussion wurden insbesondere die für die Fahrzeughersteller relevanten Standards gesichtet und den allgemein bzw. für die Oberleitungssysteme gültigen Standards gegenübergestellt sowie Anpassungsbedarf identifiziert. Neben den Ausführungen der ISO 6469-3 zur Nennspannung in Fahrzeugen ist hier insbesondere die ISO 21498 zu erwähnen, die Spannungsklassen für Anwendungen im Bereich der Straßenfahrzeuge definiert.

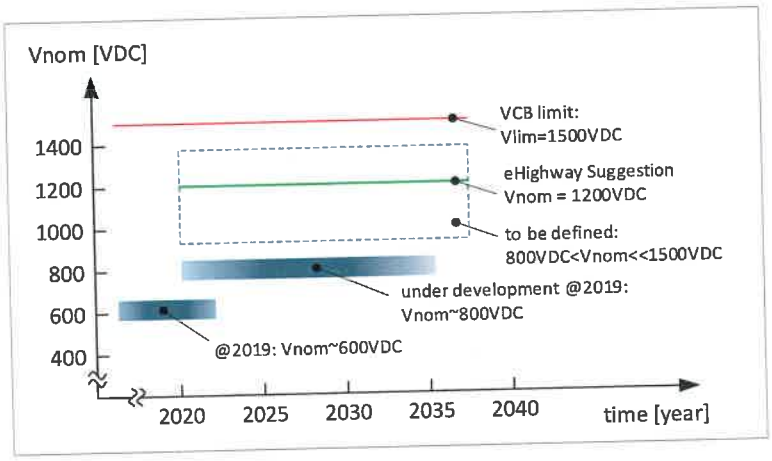


Abbildung 130: Nennspannung von Straßenfahrzeugen und Diskussion des eHighway Systems

Insgesamt wird eine Erhöhung der Systemspannung mit der Begründung der Reduzierung der Leitungsverluste sowie der Aufwände (Gewicht, Kosten) für die stromführenden Elemente empfohlen, wobei die Niederspannungsgrenze bzw. die Spannungsgrenze für die HV-Fahrzeugsysteme lt. ISO 6469-3 als obere Grenze zu beachten ist. Daher wurde der Vorschlag für eine zukünftige Systemspannung von Vnom=1200VDC erarbeitet. Betrachtet man heutige Standards aus dem Bereich der Straßenfahrzeuge, ist eine Nennspannung dieser Höhe noch nicht abgebildet. Betrachtet man alternative Technologien, wie z.B. das Megawatt-Charging, vollziehen sich dort ähnliche Tendenzen hinsichtlich einer Erhöhung der Spannungslage. Da sich dort durchaus Synergien zeigen, wird empfohlen, den Standardisierungsprozess mindestens auf europäischer Ebene voranzutreiben und dabei auch andere Fahrzeughersteller außerhalb der Volkswagen Gruppe einzubeziehen.

2.12.2 Bewertung der Leitungsquerschnitte

Im Rahmen der Bewertung des HV-Systems der aktuellen Versuchsträger wurde eine alternative Methode zur Auslegung der Leiterquerschnitte für den Oberleitungs-LKW betrachtet. Zusätzlich zum üblichen Auslegungsverfahren, das auf Basis einer stationären Maximalbelastung zu einer konservativen Auslegung führt, wurde eine optimierte Auslegung mit Hilfe einer thermischen Leitungssimulation durchgeführt. In diesem Kontext wurde die Umgebungstemperatur des Leitungsstrangs im Versuchsträger messtechnisch untersucht. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Anordnung der Temperatursensoren im Leitungsstrang als Überblick sowie als ein Ausführungsbeispiel.

26. JULI 2022

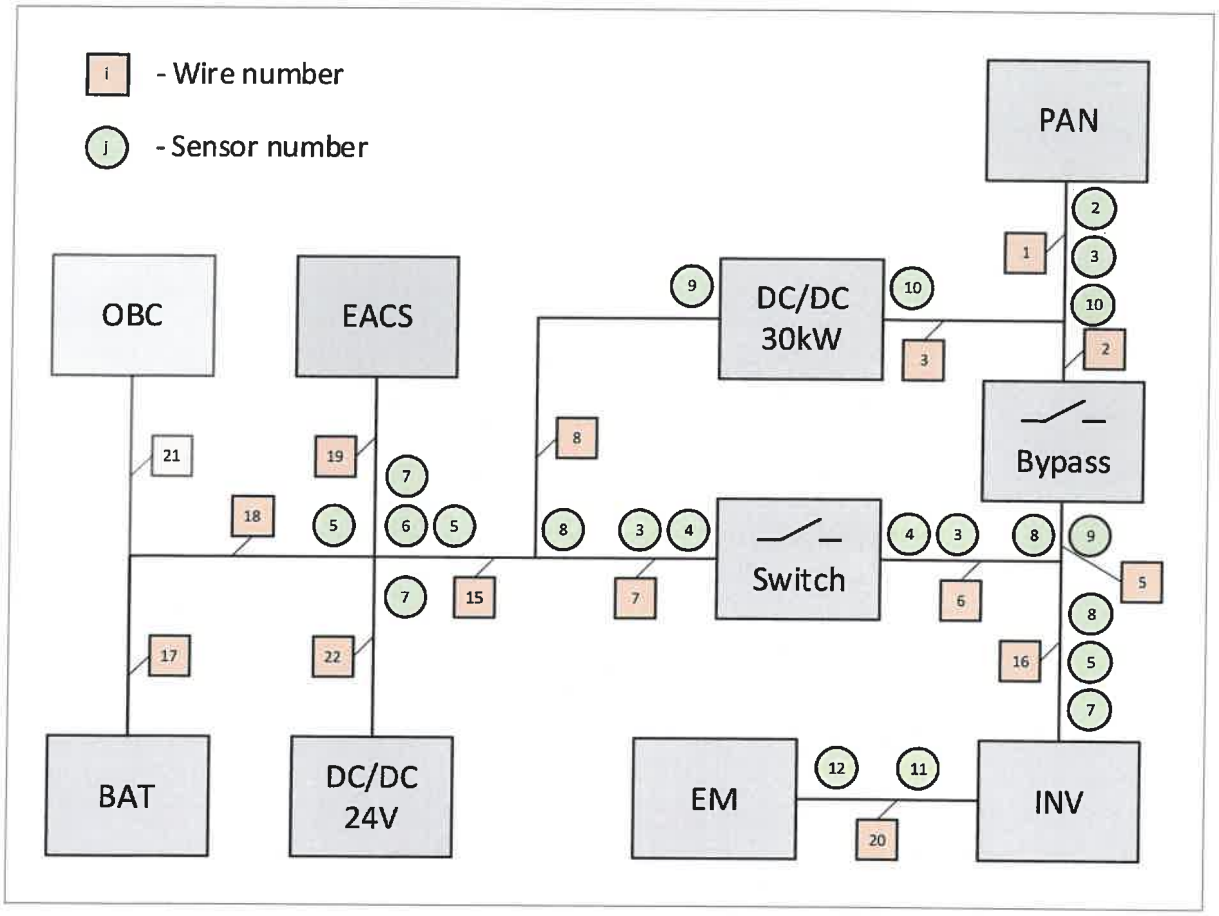


Abbildung 131: Anordnung der Temperaturmessstellen im Leitungsstrang des Typ I LKW

Abbildung 132: Ausführungsbeispiel einer Temperaturmessstelle

Des Weiteren wurden Fahrzyklussimulationen durchgeführt, um die für die Belastung des Leitungsstrangs herausforderndsten Szenarien zu ermitteln. Mit Hilfe eines für diesen Anwendungsfall spezifischen Simulationswerkzeugs (HV-Tool der Fa. PPS aus München) wurden auf Basis der Fahrzeugsimulation ermittelte Stromprofile hinsichtlich der thermischen Belastung des Leitungsstrangs (Leitertemperatur) untersucht. Auf dessen Basis wurde eine Bewertung der Leitungsauslegung vorgenommen. Basis der thermischen Simulation sind die thermisch relevanten Leitungsparameter insbesondere von radial mehrschichtigen HV-Leitungen, welche vom Leitungshersteller im Rahmen spezifischer Versuche durch Identifikation ermittelt werden. Im Wesentlichen sind dies für jede Schicht die Wärmekapazitäten und die Wärmedurchgangskoeffizienten. Für die leitenden Schichten kommt dazu noch die elektrische Leitfähigkeit, durch die die Stromverluste bestimmt werden. Die Auflösung der Leitertemperatur in der Simulation erfolgt entsprechend radial sowie axial, im Modell durch die Temperatur angrenzender Komponenten nachgebildet.

26. JULI 2022

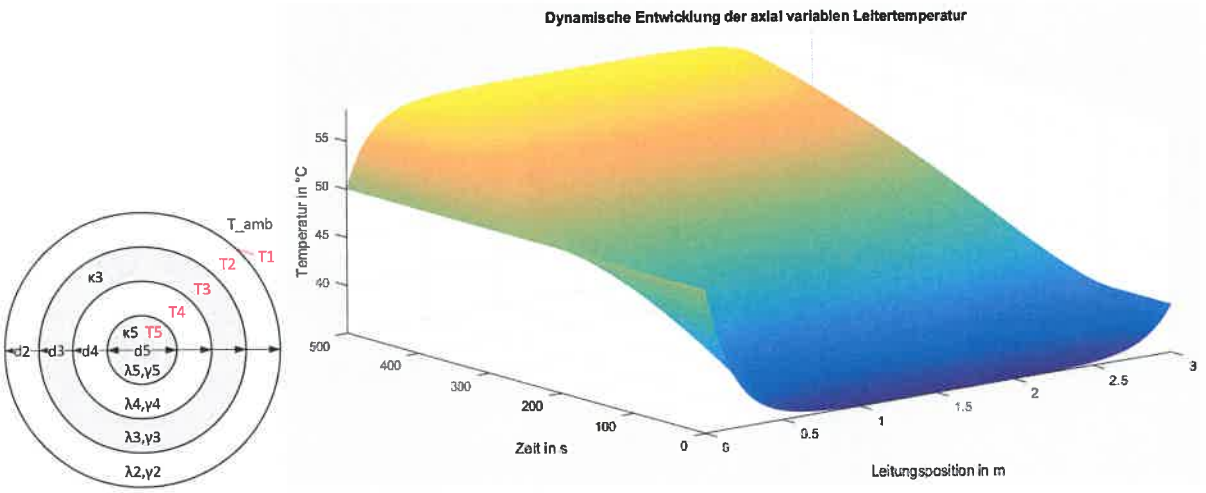


Abbildung 133: Simulationsparameter und Ergebnis einer thermischen Leitungssimulation

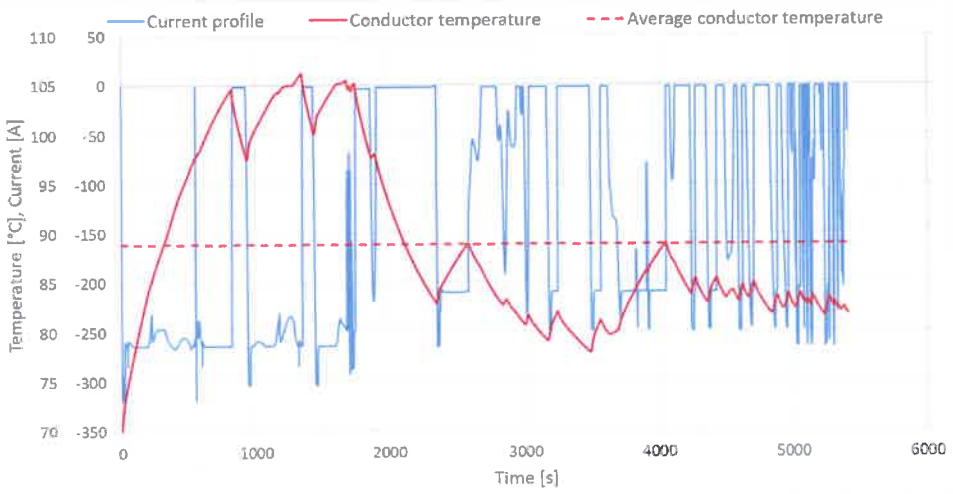


Abbildung 134: Simulation von Pantographenstrom und Leitertemperatur

Weiterhin wurden Auslegungsvorschläge für verschiedene Lebensdauererwartungen (3.000h und 30.000h) erarbeitet. Als Herausforderung erwiesen sich dabei die Lebensdauerangaben, die sich für Fahrzeugleitungen aus der ISO 6722 ergeben und ausschließlich Alterung bis 3.000 Betriebsstunden abdecken. Für Lebensdaueranforderungen von Nutzfahrzeugen, die sich auf mindestens 30.000h erstrecken, wurde eine Extrapolation der thermischen Alterungsregel angewendet, die sich allein auf die Reaktionskinetik zurückführen lässt und damit bezüglich anderer Einflüsse (Medieneinfluss, UV-Einfluss, Anzahl der Temperaturhübe) keine Aussage zulässt. Nach dem Stand der Technik sind für HV-Leitungen offenbar keine Lebensdauermodelle verfügbar, woraus sich unmittelbar Forschungsbedarf ableiten lässt.

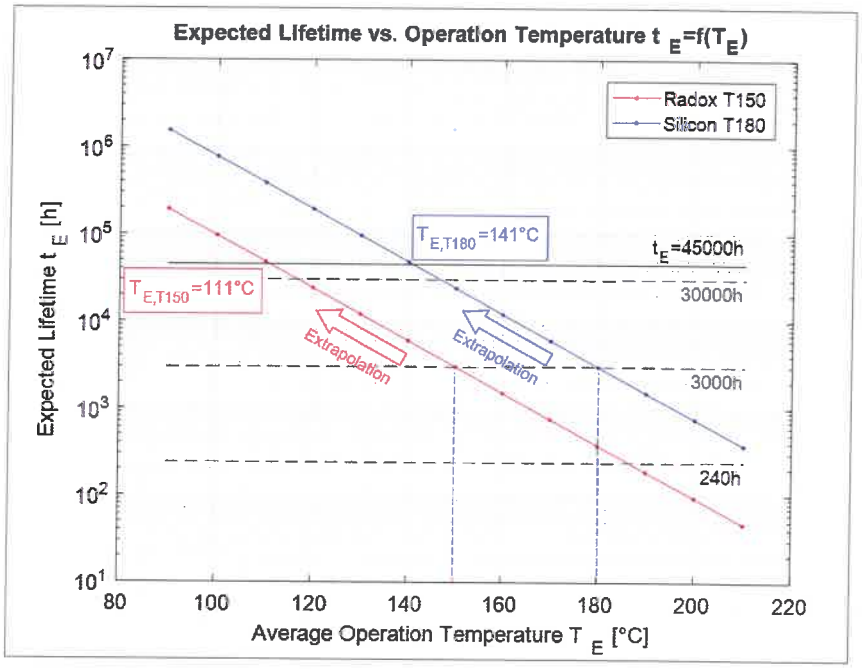


Abbildung 135: Lebensdauerbetrachtung bei Leitungen verschiedener Temperaturklassen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden neben der Auslegung für verschiedene Lebensdaueranforderungen weiterhin Dimensionierungsvorschläge für den Typ I und den Typ II Truck sowie für die Leitermaterialien Kupfer und Aluminium erarbeitet. Beispielhaft sind in Tabelle 13 die Potentiale der Verringerung des Kupfer-Querschnitts gemäß einer Simulationsrechnung für den Typ1-LKW aufgeführt.

Tabelle 13: Potentiale für die Verringerung des Kupfer-Querschnitts am Beispiel Typ1-LKW für ein beispielhaftes Fahrprofil ermittelt

Leiter Nr.	1	2	3	5	6	7	8	15	16	17	18	19	20
Potenzial	-63%	-64%	0%	-64%	-50%	-50%	0%	-64%	-64%	-68%	-68%	0%	-50%

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit Hilfe der thermischen Leitungssimulation eine bedarfsgerechte Leitungsstrangauslegung erfolgt und für die Nutzfahrzeugentwicklung hohes Potenzial für eine Optimierung der Fahrzeuggewichte und –kosten aufgezeigt werden kann. Im obigen Beispiel können für einzelne Leiter nahezu 70% Verkleinerungs-Potential ermittelt werden. Dieses wäre für eine Serien-Anwendung durch die Simulation weiterer relevanter Fahrszenarien zu validieren.

2.12.3 Betrachtungen zur HV-Sicherheit von Oberleitungs-LKW bei nicht-isolierendem DC-Wandler

Die galvanische Kopplung zweier hinsichtlich der elektrischen Sicherheitsmaßnahmen unterschiedlicher Systeme (geerdete Infrastruktur und Chassis-isoliertes Fahrzeugsystem) würde hinsichtlich der elektrischen Sicherheit des Gesamtsystems neben der Überlappung verschiedener Domänen elektrischer Standards den Verlust der elektrischen Sicherheit im Fahrzeug verursachen (im herkömmlichen Sinne einer Systeminhärenz).

Durch die Überlegung, zukünftige Fahrzeuge mittels eines galvanisch nicht isolierenden Wandlers an das Oberleitungssystem zu koppeln, wurde die Betrachtung einer generellen galvanischen Kopplung

zwischen Fahrzeug und Infrastruktur in den Fokus gerückt. Ziel der Untersuchung ist es, ein elektrisches Sicherheitskonzept für das galvanisch gekoppelte System Fahrzeug/Oberleitung zu entwickeln und zu bewerten.

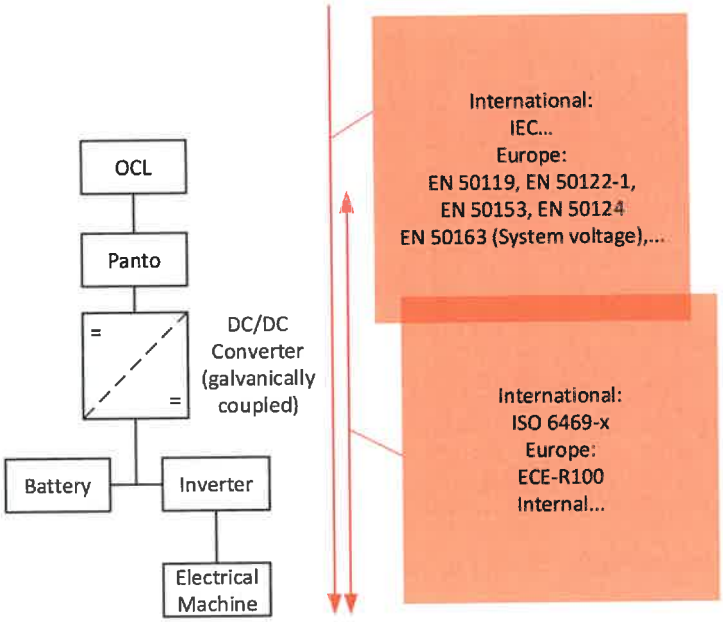


Abbildung 136: Galvanische Kopplung von Fahrzeug und Infrastruktur: Überlappung verschiedener Standardisierungsdomänen (unvollständige Aufzählung)

Die im Rahmen des Unterpakets 9.4 zu bewältigende Aufgabe lässt sich damit wie folgt umreißen: Gesucht ist ein Konzept zur Vermeidung des elektrischen Stromschlags, das bei galvanischer Kopplung von Oberleitungs-LKW und geerdeter Infrastruktur vergleichbare Sicherheit bietet wie die technische Referenz O-Bus, welche in der EN50502 beschrieben ist. Ein System auf der Basis einer Schutzleiterverbindung zwischen Versorgung (Oberleitungssystem) und Verbraucher (Oberleitungs-LKW) ist dabei ebenfalls nicht als Lösung angestrebt, da es einen dritten Stromabnehmerkontakt benötigen würde.

Zur Lösung der Aufgabe wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Messungen durchgeführt, mit dem Ziel die Randbedingungen des Systems zu analysieren. Wesentlich war dabei die Ermittlung des Fahrzeug-Erdungs- oder Ableitwiderstands, bestehend aus Fahrzeug-Reifenwiderstand sowie dem Standortwiderstand der Strecke.

26. JULI 2022

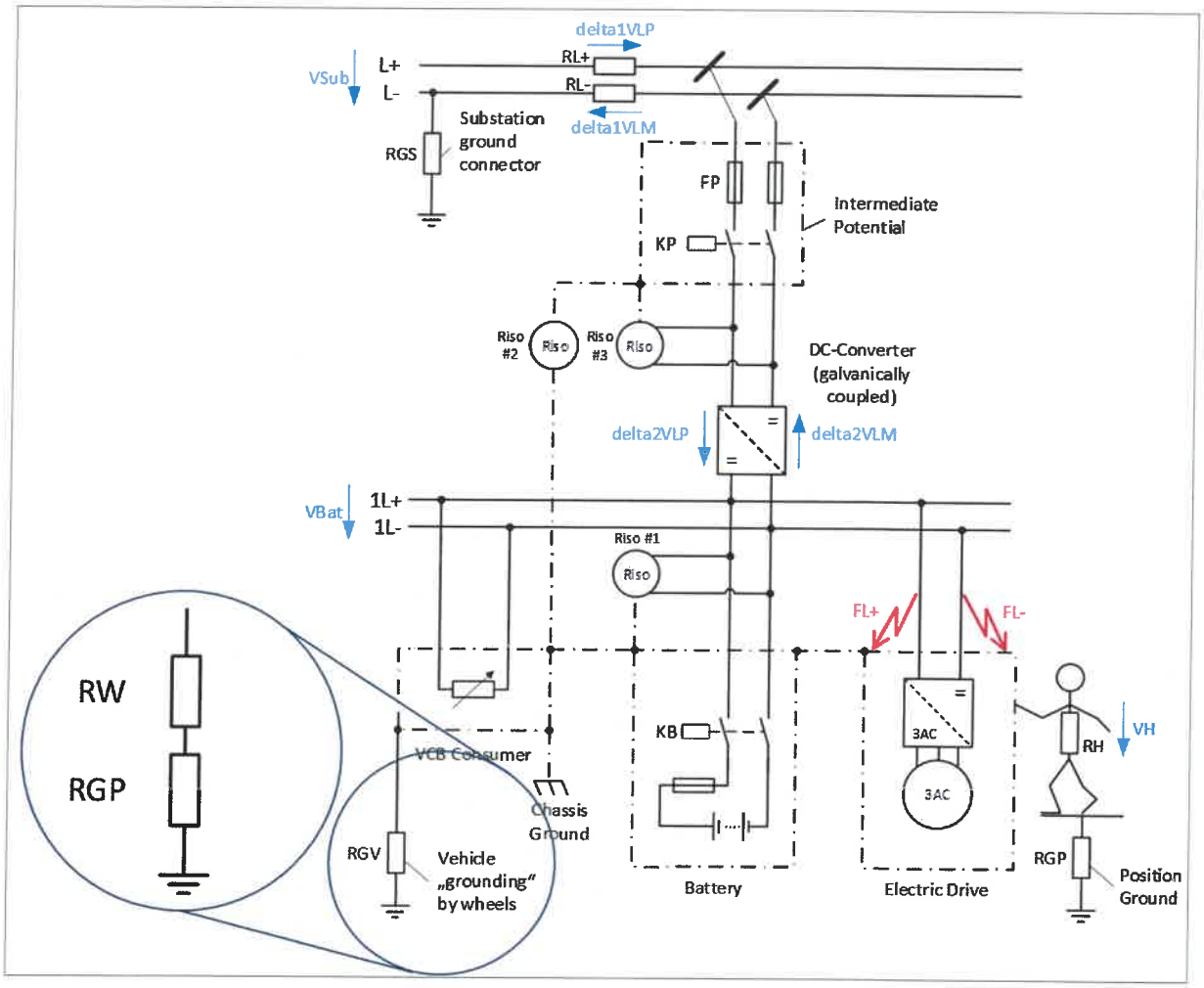


Abbildung 137: Galvanische Kopplung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur: Entstehung einer gefährlichen Berührspannung bei fehlerhaftem Fahrzeug

Zunächst wurden mehrere Messreihen auf der Versuchsanlage in Groß Dölln durchgeführt, bei denen die Teilwiderstände unter verschiedenen Wetter-, Standort- sowie Lastbedingungen bei stehendem Fahrzeug ermittelt wurden. Wesentlich war dabei die Erkenntnis, dass sich hinsichtlich des Fahrzeug-Erdungswiderstands eine große Varianz ggü. den Wetter- und Lastbedingungen zeigte.

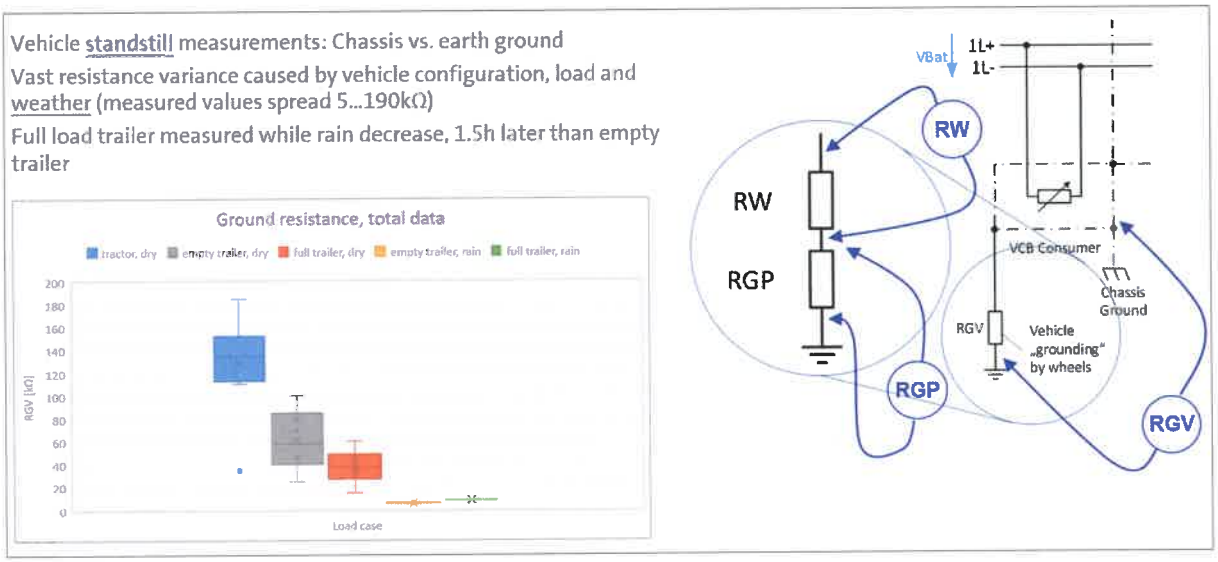


Abbildung 138: Ermittlung des Fahrzeugableitwiderstands, Variation der Bedingungen

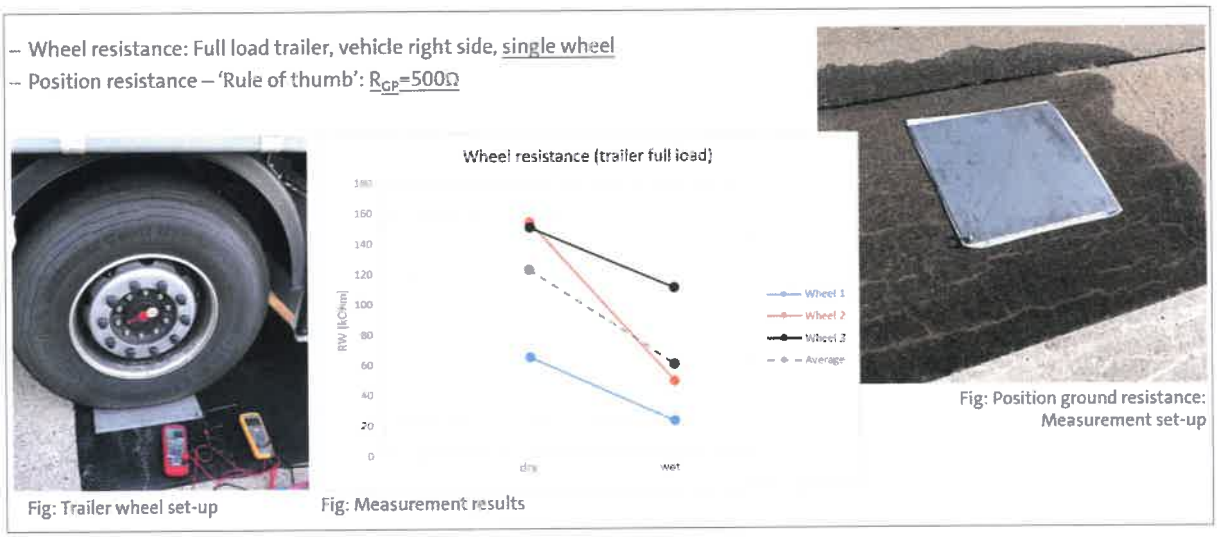


Abbildung 139: Ermittlung des Reifenwiderstands und des Standortwiderstands

Als möglicher Ansatz für die Realisierung eines HV-Sicherheitskonzepts wurde unter anderem die Nutzung eines Differenzstromsensors und eine auf dieser Messung basierten automatischen Abschaltung in Betracht gezogen. Für eine Bewertung dieser Option ist ebenfalls Kenntnis der o.g. Größen notwendig.

Zur Bewertung des Ansatzes der Differenzstrommessung wurde ein Differenzstromsensor sowie eine Fehleraufschaltung auf dem Versuchsfahrzeug installiert und umfangreiche Messfahrten auf der Versuchsanlage Groß Dölln sowie auf der ELISA Teststrecke in Hessen durchgeführt.

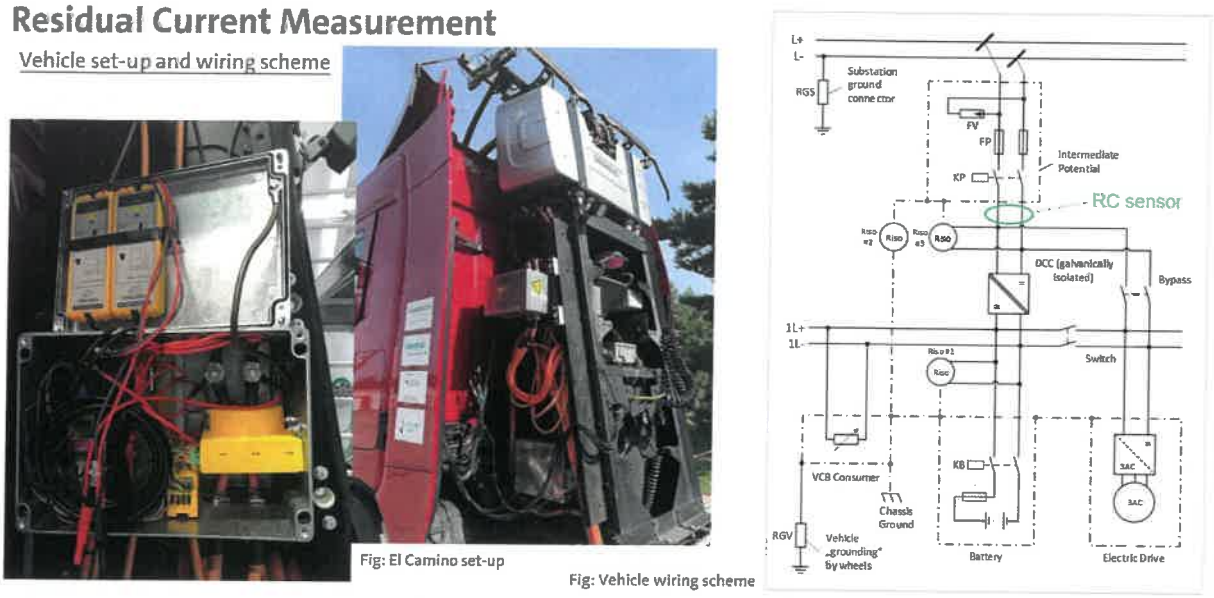


Abbildung 140: Differenzstrommessung am Versuchsfahrzeug

In Groß Dölln wurden neben der Inbetriebnahme des Versuchssystems unterschiedliche Lastzustände (Zugmaschine solo, volle Beladung des Aufliegers) sowie unterschiedliche Fahrbahnzustände (trocken, künstlich befeuchtet) untersucht. Durch Referenzmessungen (Spannungsmessungen über dem bekannten Fehlerwiderstand) wurde die Qualität der Differenzstrommessung bewertet und ein Schätzwert für die Ableitwiderstände des bewegten Fahrzeugs ermittelt. Insgesamt zeigte sich auch bei diesen Untersuchungen erwartungsgemäß eine Abhängigkeit des Ableitwiderstands von der Lastsituation, vom Fahrbahnzustand sowie von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Abhängigkeit des Differenzstroms vom Fahrzeugableitwiderstand ist in dem oben gezeigten Schaltbild (vgl. Abbildung 140) unmittelbar zu erkennen. Eine weitere Variation des Differenzstroms ist durch Variation des aufgeschalteten Fehlerwiderstands erreicht worden.

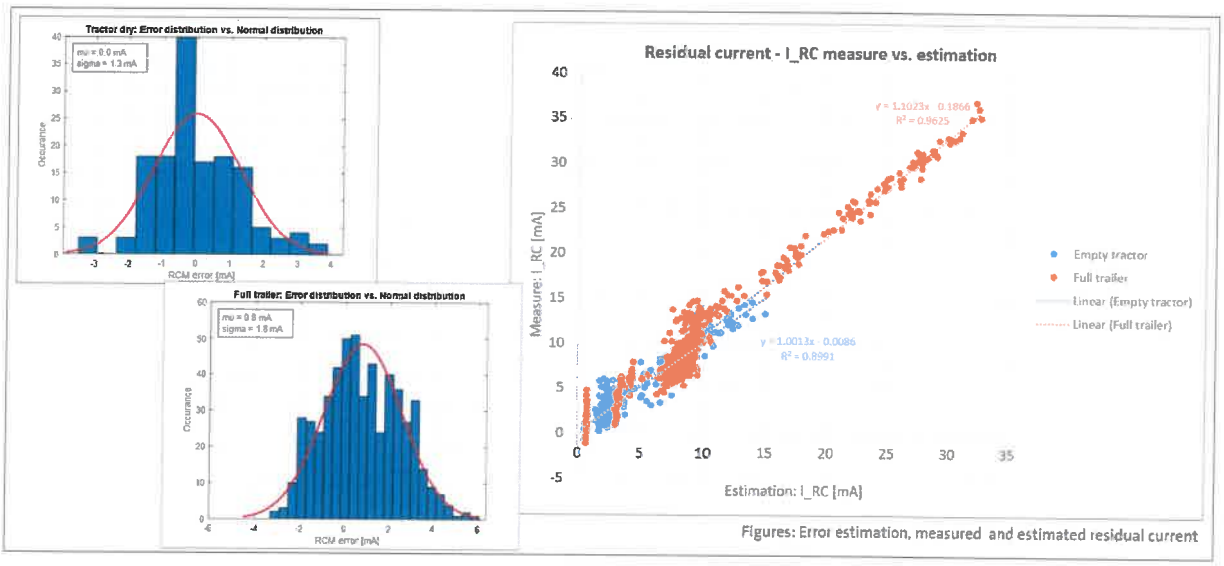


Abbildung 141: Messwerte des Differenzstroms bei Aufschaltung von Isolationsfehlern (Groß Dölln)

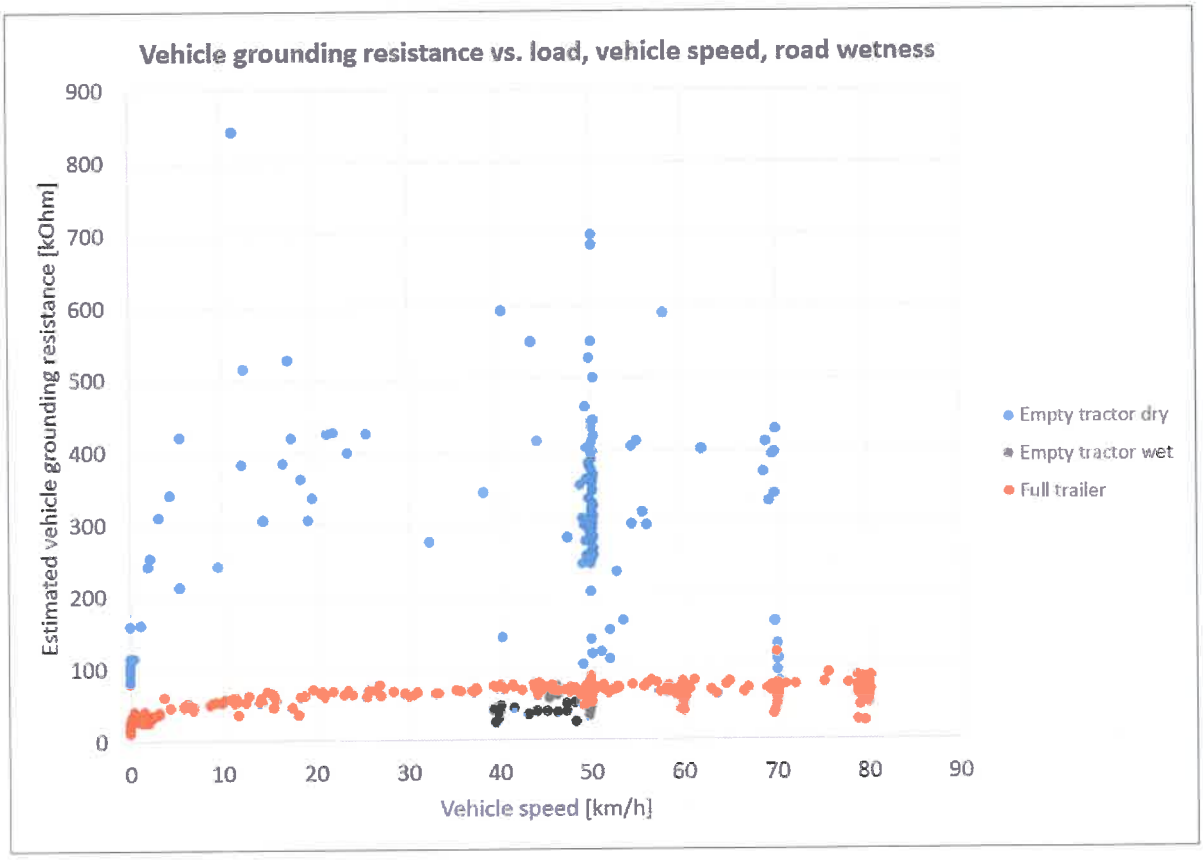


Abbildung 142: Schätzwerte des Fahrzeugableitwiderstands in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (Groß Dölln)

Weitere Versuche mit der Differenzstrommesseinrichtung wurde auf der ELISA Teststrecke in Hessen durchgeführt, insbesondere mit dem Ziel, eine andere Fahrbahn- sowie Infrastrukturumgebung zu betrachten. Auf dem betreffenden Teilabschnitt der A5 ist ein bituminöser Fahrbahnbelag vorhanden, der im Unterschied zur Versuchsanlage in Groß Dölln – dort handelt es sich um die Betonfahrbahn eines früheren Militärflugplatzes – deutlich erhöhte Standortwiderstände erwarten lässt. Durch die Messungen mit dem Versuchsfahrzeug konnte diese Erwartung bestätigt werden.

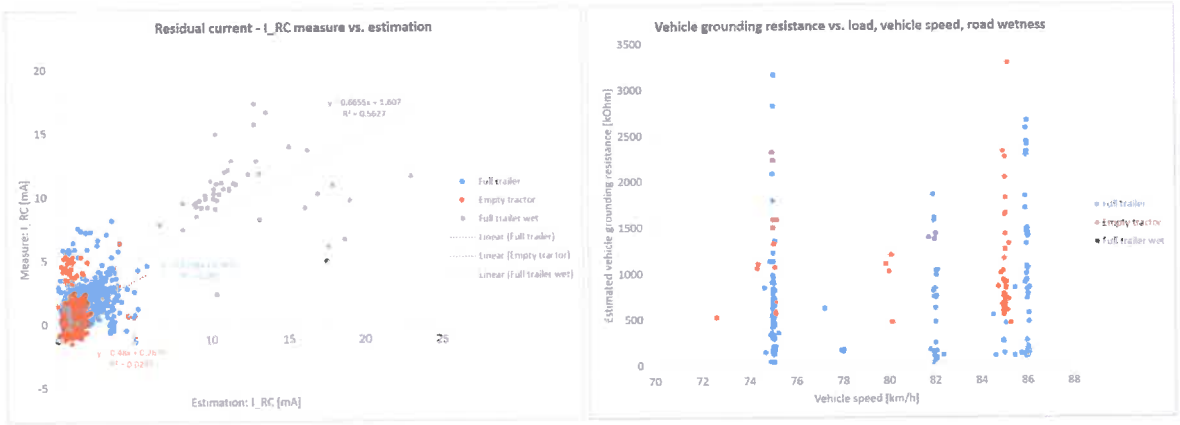


Abbildung 143: Aufschaltung von Isolationsfehlern – Differenzstrommessung und Schätzung des Fahrzeugableitwiderstands (ELISA Teststrecke A5 Mörfelden)

Im Ergebnis führt der hohe Standortwiderstand eines bituminösen Fahrbahnbelags zu einer Situation, in der sich trotz vergleichsweise kleiner Fehlerwiderstände (einstellige kOhm, die Fehlerschwelle für

den Isolationswiderstand des Fahrzeugs im isolierten Betrieb liegt bei 375kOhm) Differenzströme einstellen, die im Bereich der Messgenauigkeit des Differenzstromsensors liegen. Für einen Fahrbahnbelag wie auf der ELISA Teststrecke in Hessen ist die Differenzstrommessung damit als ungeeignet zu bewerten. Entsprechend verhält es sich auch mit den Schätzwerten des Fahrzeugableitwiderstands: Hier zeigt sich eine Spreizung, die sich über zwei bis drei Zehnerpotenzen erstreckt. Da der Differenzstrom die Basis für diese Schätzung ist, ist damit auch der Schätzwert für den Ableitwiderstand als wenig vertrauenswürdig einzustufen.

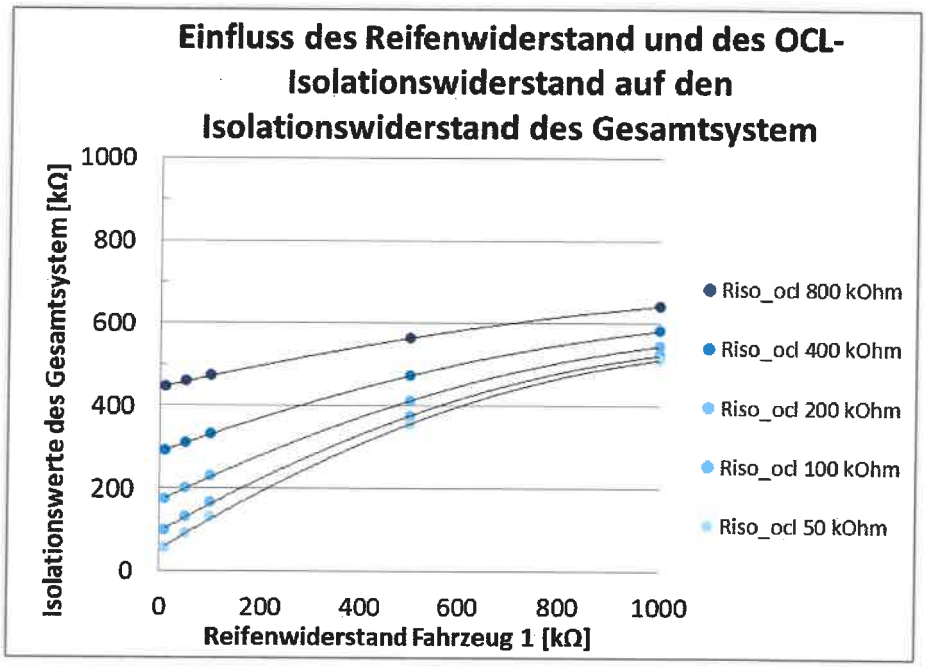


Abbildung 144: Beispiel für die Simulation des System-Isolationswiderstands unter Variation des Reifenwiderstands sowie des Isolationswiderstands der Infrastruktur

Die Messergebnisse bzw. Erkenntnisse aus den Messfahrten wurden weiterhin genutzt, um verschiedene Simulationen zu parametrieren. An Hand der Simulationen wurden verschiedene Ansätze untersucht mit dem Ziel der Entwicklung eines alternativen Elektrosicherheitskonzepts. Zum Beispiel wurde die Variabilität des Fahrzeugableitwiderstands bzw. des Reifenwiderstands benutzt, um ein auf einem isolierten System (IT-System) basierten Konzept zu bewerten und mögliche andere Lösungsansätze zu untersuchen (vgl. Abbildung 144).

Zwischenfazit

Die anfängliche Erwartung, dass sich die galvanische Kopplung eines als IT-System ausgeprägten Fahrzeugs mit einer (herkömmlich) niederohmig geerdeten Infrastruktur als einfach isoliertes System unter der Prämisse des Fehlerschutzes nicht darstellen lässt, hat sich durch die Untersuchungen bestätigt. Das Fehlen einer definierten Schutzleiterverbindung kann durch den in weiten Grenzen streuenden Ableitwiderstand des Fahrzeugs nicht kompensiert werden, sodass der Ansatz eines TT-Netzes mit der Schutzmaßnahme „Abschaltung" als Fehlerschutz (Abschaltung initiiert durch Schwellwertüberschreitung einer Differenzstrommessung) aufgrund des dafür notwendigen niederohmigen Ableitwiderstands nicht realistisch erscheint. Auch Ansätze eines isolierten Fahrzeugs, welches einen

26. JULI 2022

hochohmigen Ableitwiderstand und die Koordination der Messung des Isolationswiderstands zwischen den Fahrzeugen notwendig macht, haben sich wegen der großen Varianz der Randbedingungen als nicht umsetzbar erwiesen.

Als Alternative zur niederohmig geerdeten Versorgung wurde u.a. auch ein hochohmiges Erdungskonzept (HRG – High Resistance Grounding) in Betracht gezogen. Für die Auslösung der Schutzmaßnahmen benötigt jedoch auch eine solche Anordnung eine definierte Schutzleiterverbindung, die beim eHighway nicht vorgesehen ist.

Neuartige Netzstruktur und Schutzkonzept

Die Aufgabe der (fehlenden) Schutzleiterverbindung, nämlich das Herstellen eines Potenzialausgleichs, kann jedoch auch auf andere Weise gelöst werden: Definiert man das Erdpotenzial beim Spannungserzeuger mittig zwischen die Außenleiter der Versorgung und am Fahrzeug ebenfalls mittig zwischen die Außenleiter des Fahrzeugversorgung, erhält man unter der Annahme gleichen Spannungsfalls in der Fahrleitung einen Potenzialausgleich zwischen dem Fahrzeugchassis und dem Erdreich. Das Potenzial des Erdreiches und des Chassis entspricht somit der Hälfte des Betrags der Außenleiterspannung und ist im Idealfall identisch bzw. in der praktischen Anwendung auf einem Niveau, das keine gefährliche Berührspannung zwischen Chassis und Erdreich zulässt.

Das symmetrisch aufgeteilte Potenzial kann auf der Versorgerseite durch eine symmetrische Spannungsquelle bzw. einen Mittenabgriff (Center Tap) oder durch eine Erdung mit beidseitig gleich großen (hochohmigen) Widerständen hergestellt werden. Auf der Seite des Fahrzeugs ist die symmetrische Aufteilung bei gleichen Isolationswiderständen zwischen Chassis und den Außenleitern inhärent, sodass symmetrische Isolationsfehler sich nicht in einer Verschiebung des Chassispotenzials auswirken. Einseitige Änderungen des Isolationswiderstands können entweder durch Messung der beiden Teilspannungen nachgewiesen werden und je nach Betrag der Abweichung zu einer Abschalt- oder Meldereaktion führen oder durch eine aktive Steuerung korrigiert werden. Die Messung der Spannungsverschiebung kann alternativ auch durch eine Brückenschaltung realisiert werden, die einen künstlichen Mittenabgriff aus identischen Widerständen auf dem Fahrzeug als zweiten Brückenzweig gegen das Fahrzeugchassis verwendet.

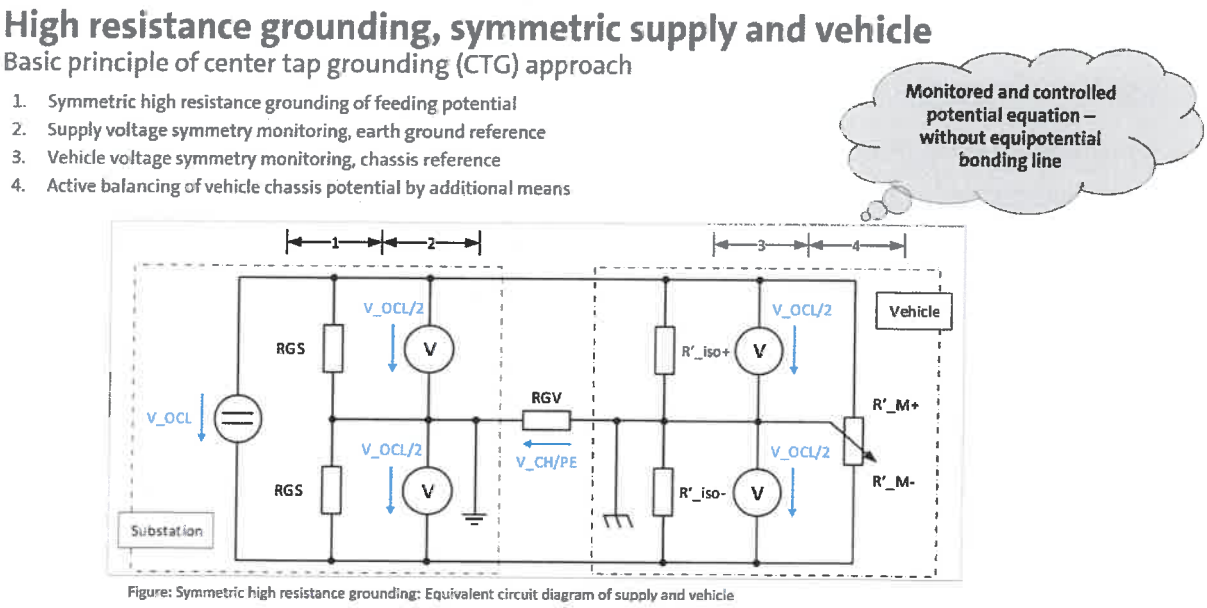


Abbildung 145: Symmetrische Netzstruktur als Basis des Schutzkonzepts

Das Schutzkonzept gegen gefährliche Körperdurchströmung („elektrischer Schlag") basiert bei der dargestellten Netzstruktur hinsichtlich des Basisschutzes auf der wie üblich anzuwendenden Basisisolation und hinsichtlich des Fehlerschutzes auf Schutzmaßnahmen, die auf Versorgung („Unterwerk") und Fahrzeug verteilt werden:

Versorgung

1. Überstromschutz (Kurzschluss-, Erdschluss-, Überlast-, Gradientenüberwachung) mit entsprechenden Abschaltmaßnahmen. Eine Erdschlussüberwachung lässt sich vorteilhaft durch Messung des Stroms in den Erdungswiderständen realisieren, die darüber hinaus den Strom bei Vorliegen eines Erdschlusses begrenzen.
2. Herstellung der Spannungssymmetrie (Mittenabgriff am Erzeuger oder Erdung mittels (hochohmiger) Erdungswiderstände gleichen Betrags)
3. Überwachung der Spannungssymmetrie durch Messung der Teilspannungen, allpolige Abschaltung der Versorgung bei Grenzwertüberschreitung

Fahrzeug

1. Überstromschutz in der Fahrzeugeinspeisung (Kurzschluss-, Überlastschutz)
2. Optional: Herstellung der Spannungssymmetrie mittels eines dedizierten Stellglieds
3. Überwachung der Spannungssymmetrie, allpolige Abschaltung der Versorgung bei Grenzwertüberschreitung, z.B. Trennung des Pantographen von der Fahrleitungsversorgung. Die Grenzwertüberschreitung kann entweder bei der Spannungssymmetrie selbst (Teilspannungen oder Brückenquerspannung) detektiert werden oder in der Höhe des Stelleingriffs, der für die Herstellung der Symmetrie notwendig ist.

Die beschriebene symmetrische Netzarchitektur lässt sich nicht ohne Weiteres in die bekannten Netzformen (IT, TT, TN) einordnen, da die Eigenschaften dieser Netzformen nicht oder nur bedingt erfüllt werden. Basierend auf der bekannten Nomenklatur kann eine neuartige Netzform definiert werden, die sich als HI-Netz beschreiben lässt:

H – **H**igh resistance supply ground

I – Body **I**nsulation or high impedance ground connection

Die Symmetrieeigenschaft der Netzstruktur findet in dieser Bezeichnung keine Rücksicht, ist jedoch eine Untermenge der hochohmigen Erdung.

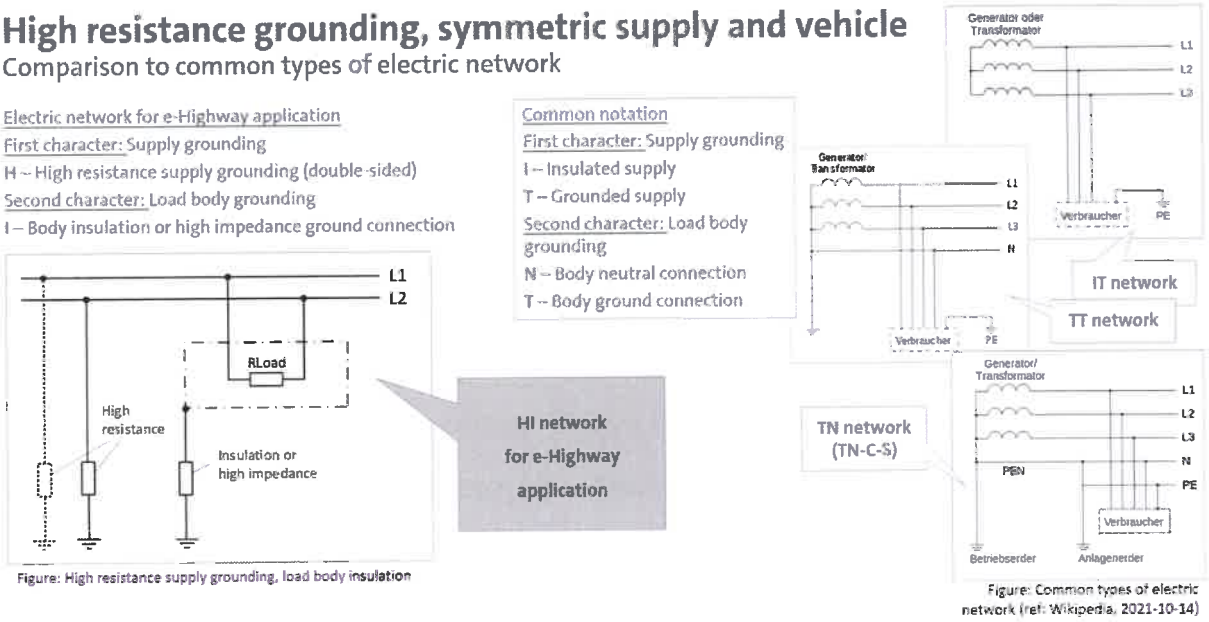


Abbildung 146: Klassifizierung der Netzstruktur

Für eine erste Bewertung der oben skizzierten Überlegungen wurde ein Versuchsfahrzeug mit Messtechnik ausgerüstet und verschiedene Messungen an der Infrastruktur und am Fahrzeug durchgeführt. Im Fahrzeug wurde dazu eine Testbox installiert, die neben der Spannungsmesstechnik mit einem künstlichen Mittelabgriff, einem Potentiometer zur Verstellung des Chassispotenzials sowie der Möglichkeit der Aufschaltung von Fehlerwiderständen ausgerüstet ist.

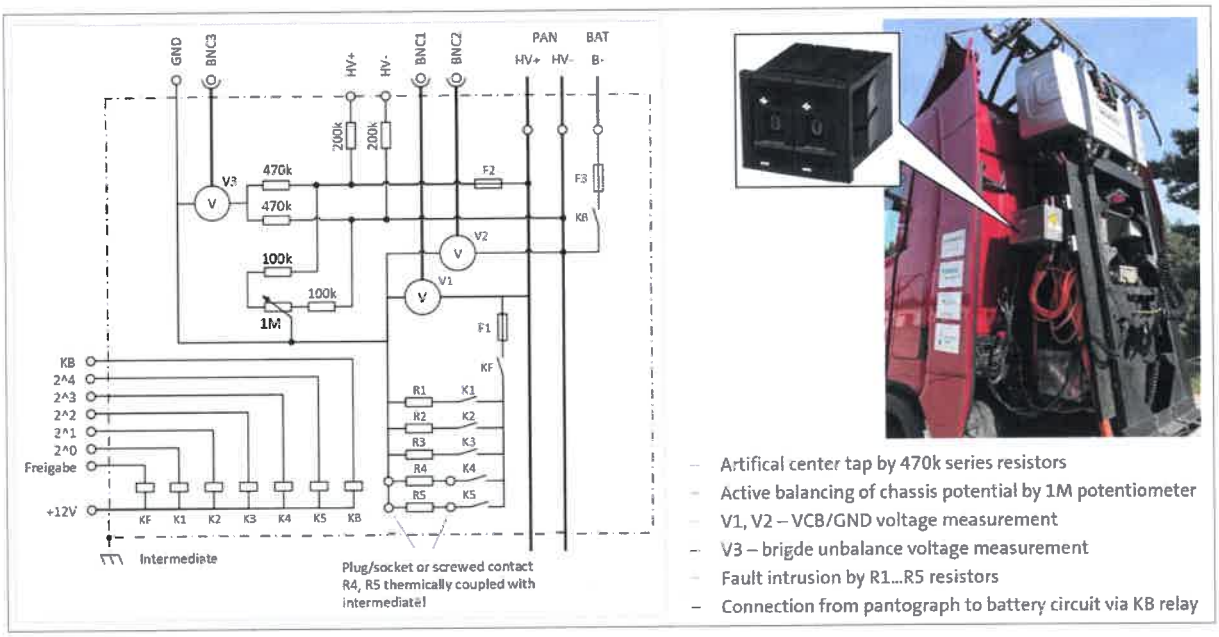


Abbildung 147: Fahrzeugmessungen zur Bewertung des CTG Schutzkonzepts

Zunächst wurde mit Hilfe des Potentiometers die stationäre Verschiebung der Spannungssymmetrie am Fahrzeug geprüft. Die Situation insgesamt kann beschrieben werden als Spannungsteiler bestehend aus R'_M+ und R'_M-, die Ersatzwiderstände bestehend aus Potentiometer in Parallelschaltung mit den Innenwiderständen der Spannungsmesser charakterisierend, sowie den Ersatz-Isolationswiderständen R'_iso+ und R'_iso-, welche die Parallelschaltung aus den Isolationswiderständen des Fahrzeugs in Verbindung mit der Brückenschaltung aus dem Fahrzeug-Ableitwiderstand R_GV (Querwiderstand) und dem Innenwiderstand der Spannungsquelle (Längszweig) darstellen. Durch Verstellen des Potentiometers kann nun die Brückenschaltung verstimmt werden mit dem Ergebnis einer Spannungsverschiebung in Abhängigkeit von der Potentiometereinstellung. Die Messung der Unsymmetrie erfolgte dabei sowohl am Fahrzeug durch Messung der Teilspannungen als auch zwischen Fahrzeugchassis und Leitplanke (Erdpotential) um die Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen.

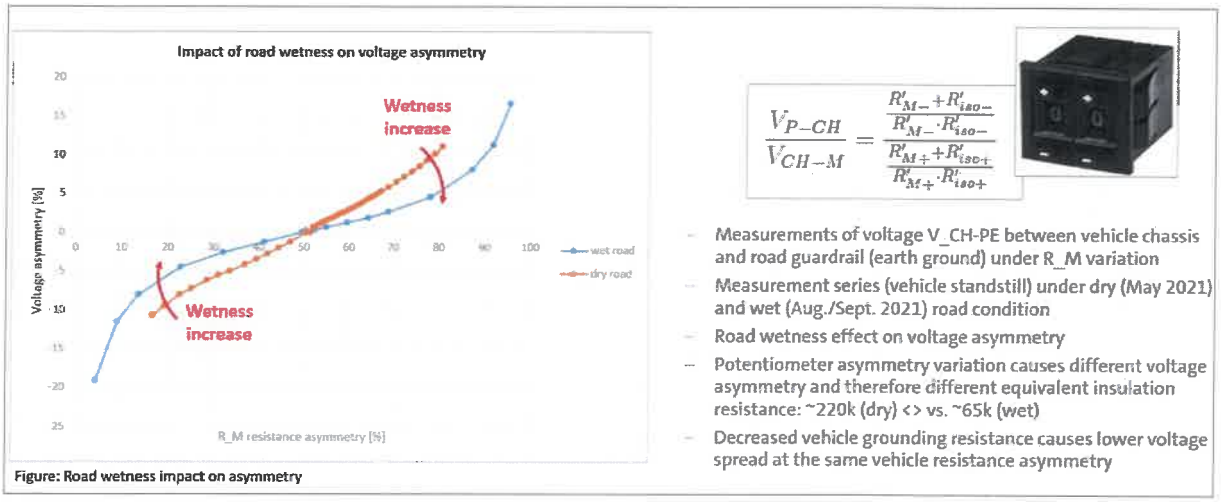


Abbildung 148: Basismessungen – Verschiebung der Spannungssymmetrie am Fahrzeug

Die Basismessungen wurden im Rahmen zweier Messreihen durchgeführt und führten qualitativ zu vergleichbaren Ergebnissen. Wegen der unterschiedlichen Witterungsbedingungen und des daraus resultierend geänderten Ableitwiderstands war die Sensitivität der Brückenschaltung geändert, was sich in unterschiedlicher Kennliniensteilheit äußert. Insgesamt kann dieses Systemverhalten stationär als Ersatzsystem in Form einer Brückenschaltung verstanden werden und mit Hilfe bekannter Rechenregeln unter Variation der verschiedenen Parameter berechnet werden.

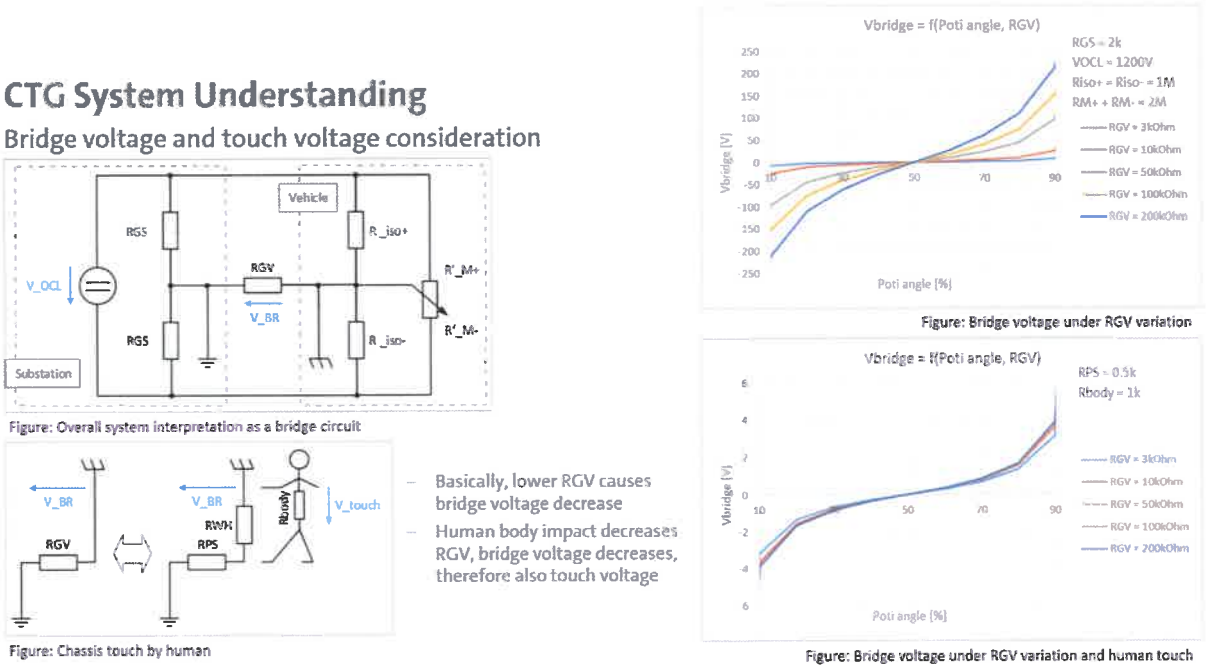


Abbildung 149: Interpretation des symmetrischen Speisekonzepts hinsichtlich der Berührspannung

In einem nächsten Schritt wurde die Auswirkung der Fehleraufschaltung auf das ursprünglich balancierte System geprüft. Dazu wurden in einem automatisierten Messablauf bei stehendem und bewegtem Fahrzeug Fehlerwiderstände in das System geschaltet und die sich einstellende Spannung zwischen Chassis und Leitplanke (Erdpotenzial) gemessen. Die Messungen wurden dabei auch unter Einbeziehung eines menschlichen Körperwiderstands (simuliert) in Höhe von 1kOhm durchgeführt, wie die folgende Abbildung zeigt.

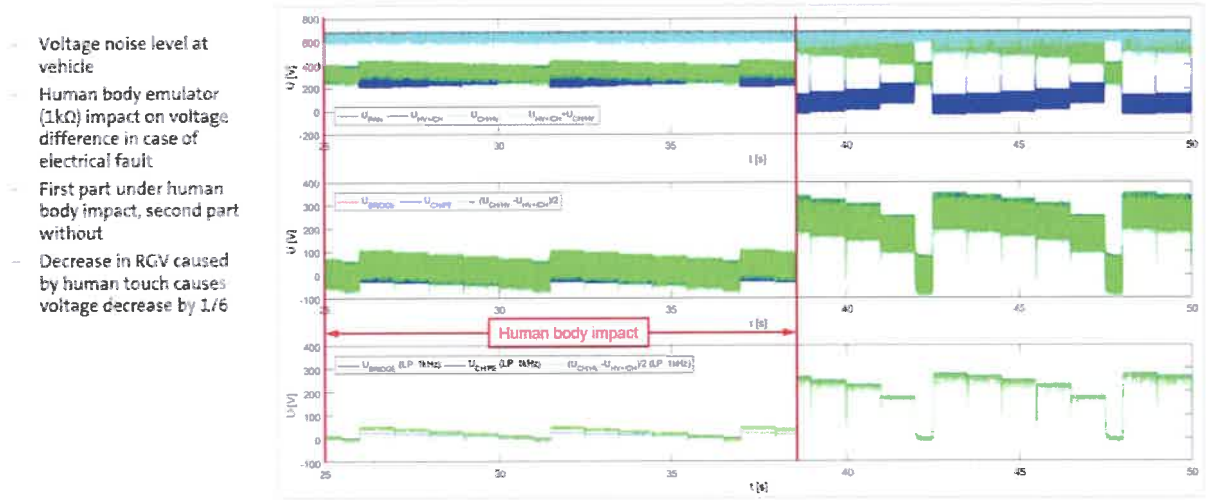


Abbildung 150: Messung der Berührspannung bei Fehleraufschaltung

Die Plausibilität der Messwerte kann durch Vergleich der Messwerte mit Schätzwerten geprüft werden. Dazu wurde aus den Ergebnissen der Basismessung (vgl. Abbildung 148) ein Wert für den Ersatzisolationswiderstand identifiziert und mit Hilfe einer Modellrechnung Schätzwerte für die bei Fehleraufschaltung zu erwartende Spannung zwischen Chassis und Erdpotenzial ermittelt. Diese Schätzwerte wurden mit den Messwerten verglichen, wie die nachfolgende Abbildung zeigt. Die Abweichungen von der Ideallinie lassen sich einerseits durch Streuung der Messwerte begründen. Die deutlich

erkennbare systematische Abweichung (Verdrehung) lässt sich dadurch erklären, dass zur Identifikation des Ersatzwiderstands R'_iso nur Messungen am stehenden Fahrzeug benutzt wurden, was im Vergleich zum fahrenden Fahrzeug einen zu geringen Wert des Ersatzwiderstands verursacht. Die Modellrechnung ergibt damit einen zu kleinen Schätzwert für die Messspannung, was in der Abbildung deutlich zu erkennen ist.

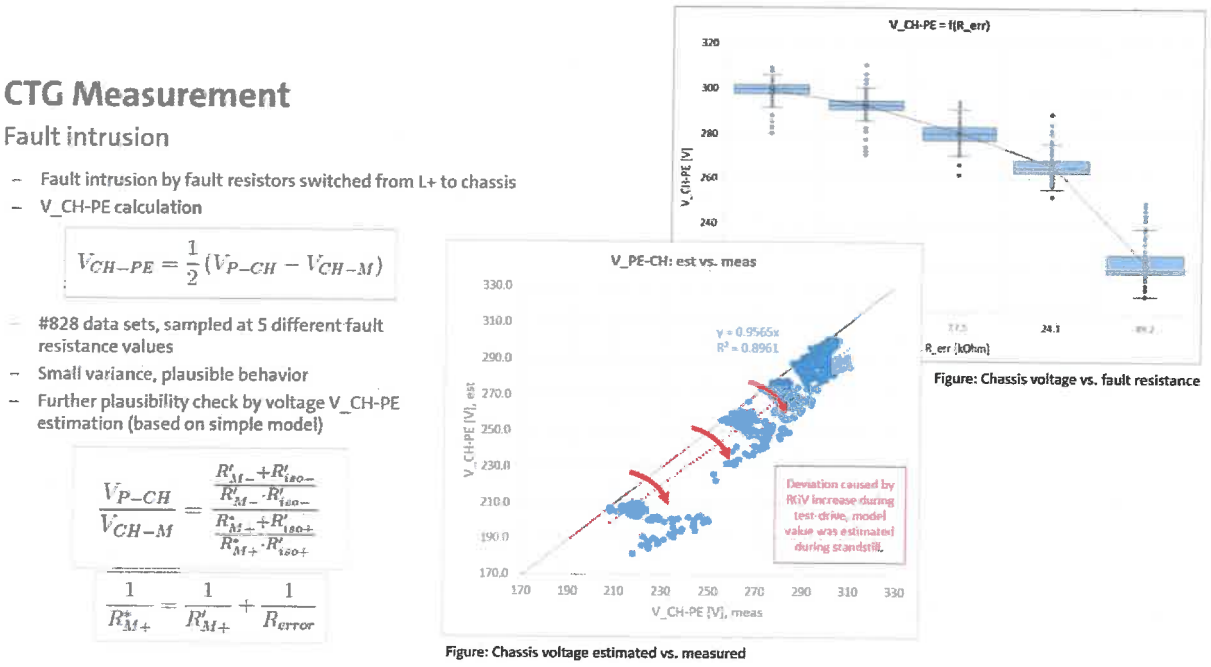


Figure: Chassis voltage vs. fault resistance

Figure: Chassis voltage estimated vs. measured

Abbildung 151: Plausibilisierung der Messwerte bei Fehleraufschaltung im Fahrzeug

Nach der grundsätzlichen Prüfung der Plausibilität der Überlegungen wurden weitere Untersuchungen mit der Zielstellung durchgeführt, das funktionale Verhalten des Systems weiter zu untersuchen. Beispielhaft ist hier eine Messung der Spannung am Fahrzeug gezeigt, die bei Aufschaltung eines Isolationsfehlers in der Anlage mit Verschiebung der Anlagensymmetrie um etwa 75V entsteht.

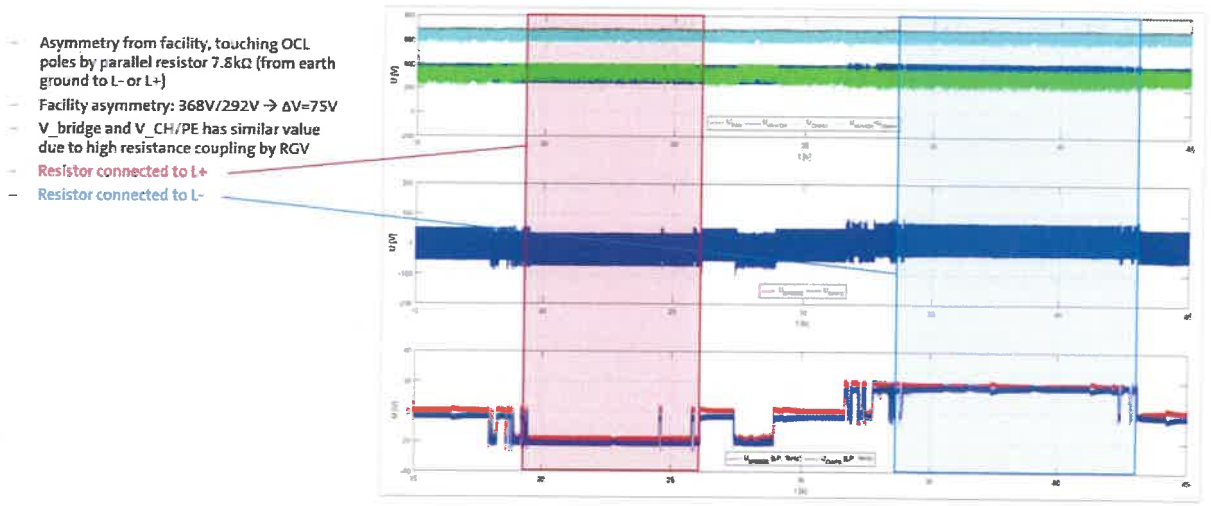


Abbildung 152: Spannungsmessung am Fahrzeug bei Aufschaltung eines Fehlers in der Anlage

26. JULI 2022

Im Ergebnis konnten alle Einzelmessungen den Ansatz bestätigen, der hier vorgestellt wurde. Aus funktionaler Sicht stellten sich neben der Sicherstellung der Symmetrieeigenschaft insbesondere die folgenden Anforderungen als bedeutsam heraus:

- Allpolige Abschaltung der Versorgung im Fehlerfall
- Allpolige Abschaltung der Fahrzeugeinspeisung im Fehlerfall
- Sicherstellung der Verbindung beider Pole des Stromabnehmers bzw. Erkennung von (einpoligem) Kontaktverlust und allpolige Abschaltung als Fehlerreaktion

Das beschriebene Schutzkonzept weist eine Reihe von Vorteilen auf, weshalb eine weitere Verfolgung angeraten ist. Wesentlich ist hier allgemein die Erkenntnis, dass in räumlich weit verteilten Speisesystemen (mehrere Unterwerke speisen einen größeren Streckenabschnitt) das High Resistance Grounding als vorteilhaft einzuschätzen ist, da eine verteilte Erdungsanlage zu ausgeglichenen Verhältnissen in der Gesamtanlage führt. Des Weiteren führt die symmetrische Speisespannung automatisch dazu, dass die Spannung zwischen den Außenleitern und Erde halbiert wird, was hinsichtlich des Überspannungsschutzes Vorteile bietet sowie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher Berührspannungen reduziert. Außerdem ist die Erkennung asymmetrischer Isolationsfehler im Vergleich zum einseitig geerdeten Netz sehr einfach möglich, nämlich durch Messung und Vergleich der Teilspannungen. Für eine praktische Anwendung des beschriebenen Schutzkonzepts sind jedoch noch eine Reihe von Punkten zu bearbeiten.

- Wesentlich ist die Definition einer zulässigen Spannungsschwelle in der Versorgung sowie am Fahrzeug verbunden mit den zu erreichenden Abschaltzeiten. Hier ist es von Belang, die in den Standards der Elektrosicherheit allgemein festgelegten Anforderungen zu sichten und konsistent auf dieses System zu übertragen.
- Weiterhin von Relevanz ist die Definition von Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen. Die Überlegung, Schutzvorrichtungen auf dem Fahrzeug mit Hilfe von elektronischen Schaltungen zu realisieren, die zwischen den Außenleitern und Chassis geschaltet werden, führt automatisch auf diese Anforderung. Insbesondere die Wirkung von Blitzeinschlag im Fahrleitungssystem bzw. dessen Koordination stellt hier eine deutliche Herausforderung dar.
- Die Einbettung des beschriebenen Schutzkonzepts in bestehende Standards bzw. die Ergänzung der Standards sollte parallel zur Entwicklung des Konzepts erfolgen.

2.12.4 Messtechnische Analyse und Bearbeitung von Auffälligkeiten im HV-System, Datenakquise zur Unterstützung der HV-Systemsimulation

Im Rahmen der operativen Fahrzeugerprobung zeigten sich verschiedene Phänomene im HV-System des Fahrzeugs bzw. in der Fahrleitung, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen:

a) Dauerhafte Netzschwingungen, die aus dem Unterwerk kontinuierlich angeregt werden und durch unzureichende Entkopplung von Fahrzeug und Infrastruktur verstärkt werden.

b) Überspannungs- und Schwingungsphänomene, die durch zufällige transiente Ereignisse wie An- und Abbügeln oder kurzzeitigen Kontaktverlust des Stromabnehmers sowie durch (fehlerhaftes) Fahrzeugverhalten angeregt werden.

26. JULI 2022

Im Rahmen des Arbeitspakets HV-System wurden diese Phänomene messtechnisch untersucht und gemeinsam mit den Projektpartnern an der Lösungsfindung gearbeitet. Für die messtechnische Untersuchung wurde das HV-System mit hochabtastender Strom- und Spannungsmesstechnik ausgerüstet und umfangreiche Messfahrten auf den Versuchsstrecken in Groß Dölln und Hessen durchgeführt.

Im Typ I Truck wurde auf eine Entkopplungsmaßnahme von Fahrzeug und Infrastruktur verzichtet, da unvollständige Annahmen vorlagen. Durch eine ursprünglich nicht bekannte Anregung bei f_{H1}=300Hz entstanden im Low Power Mode Netzschwingungen, da die Systemverstärkung (System bestehend aus Fahrzeug und Fahrleitung) bei dieser Frequenz signifikant größer als 1 war. Diese Schwingungen wurden messtechnisch nachgewiesen.

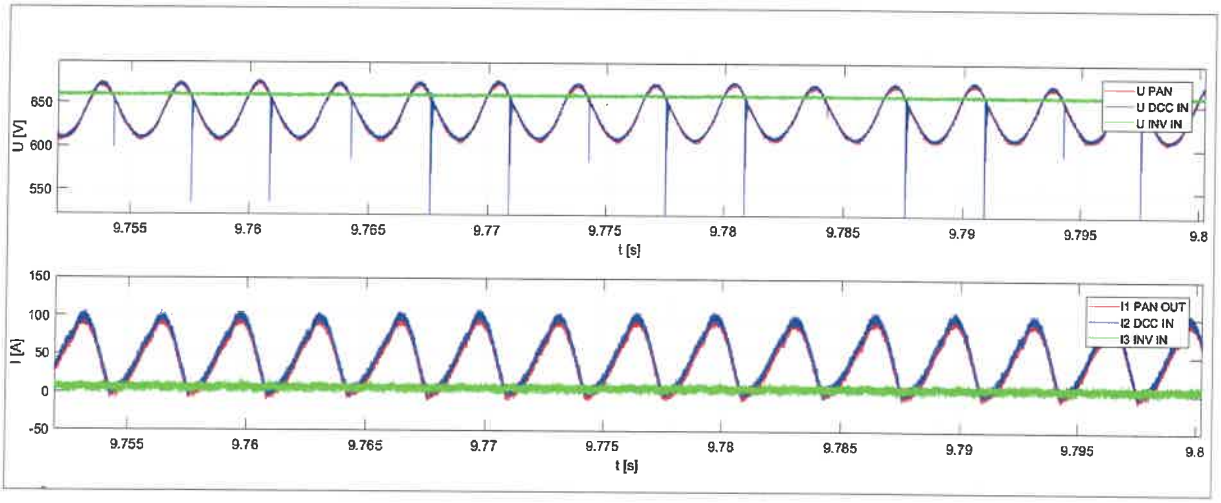


Abbildung 153: Oszillation von Strom und Spannung im Low Power Mode ohne Fahrzeugentkopplung

Nachdem die Ursache (Harmonische bei f_{H1}=300Hz) bekannt war, wurde als Entkopplungsmaßnahme eine Drossel eingesetzt, deren schwingungsdämpfende Wirkung in weiteren Messungen nachgewiesen wurde. Des Weiteren konnte messtechnisch nachgewiesen werden, dass durch die Drosselimplementierung keine wesentlichen Nachteile im High Power Mode in Kauf zu nehmen sind, weshalb die Maßnahme insgesamt als erfolgreich eingestuft werden kann.

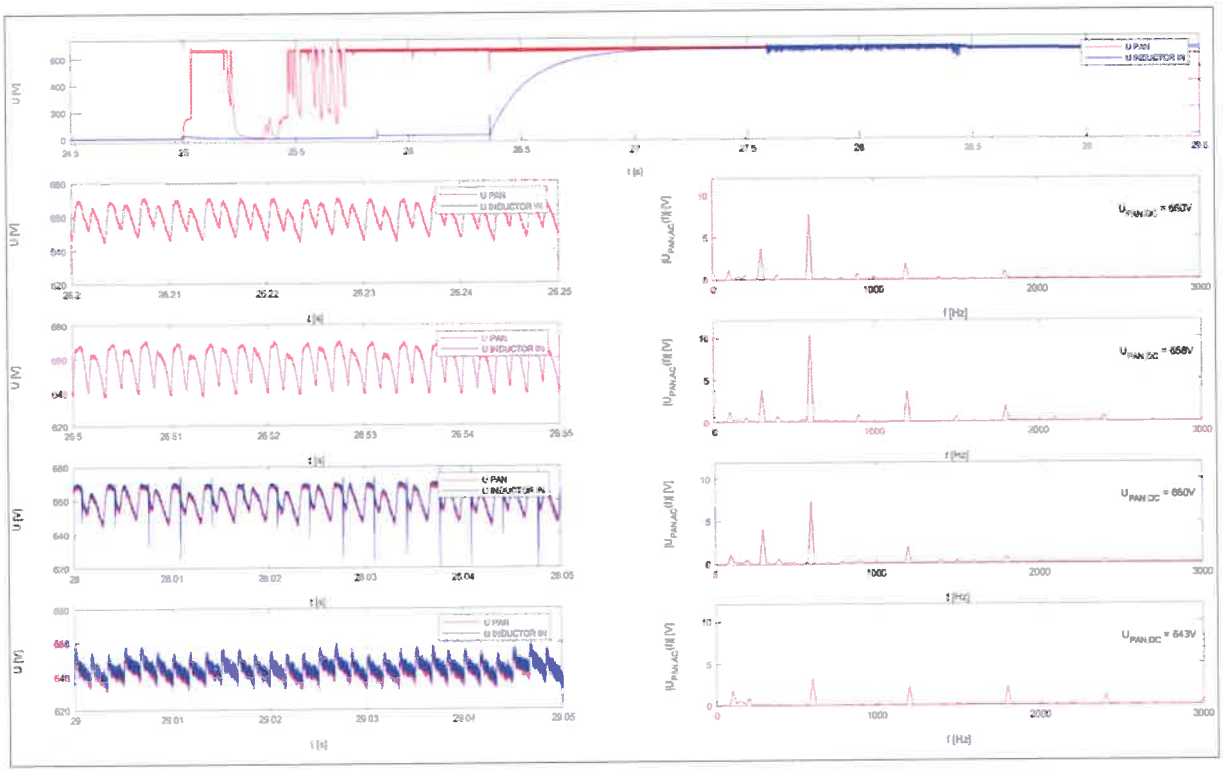


Abbildung 154: Validierung der Entkopplungsdrossel

Des Weiteren wurden mit Hilfe von Strom- und Spannungsmessungen im HV-System Überspannungs- und Schwingungsphänomene untersucht, die durch zufällige transiente Ereignisse wie An- und Abbügeln oder kurzzeitigen Kontaktverlust des Stromabnehmers sowie durch (fehlerhaftes) Fahrzeugverhalten angeregt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Entstehen eines Überspannungsevents nach Wiederkontaktierung.

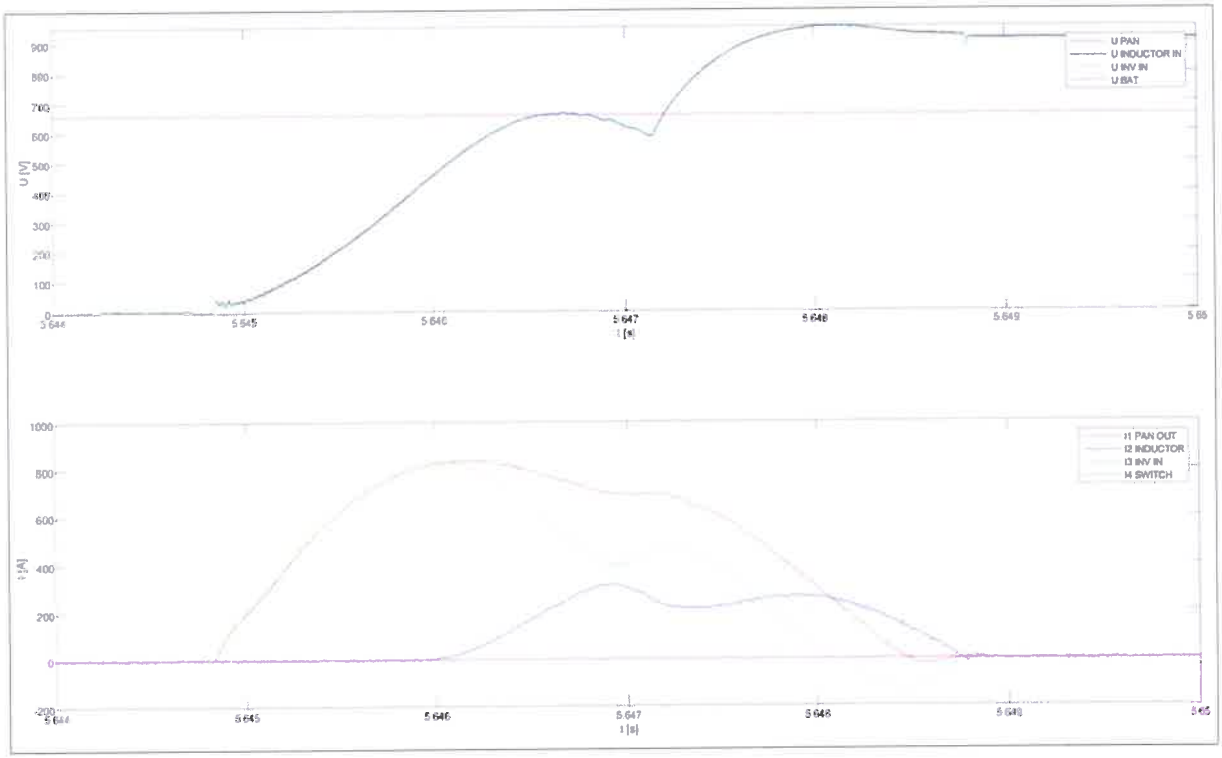


Abbildung 155: Auftreten von Überspannung nach kurzzeitigem Kontaktverlust des Stromabnehmers (Wiederkontaktierung)

Die Erkenntnisse aus den messtechnischen Untersuchungen fließen im weiteren Projektverlauf in die HV-Systemsimulation ein (vgl. AP 8: Leistungselektronik). Zum Einen dienen die gewonnenen Daten zur Validierung der zu entwickelnden Modelle, zum Anderen dienen sie als Basis für die Identifikation verschiedener Parameter. Beispielhaft sei hier eine einfache Simulation des Wiederankoppelns dargestellt (Parameter entsprechen nicht denen aus der Messung oben), die ebenfalls den Einschwingvorgang mit der Spannungsüberhöhung zeigt.

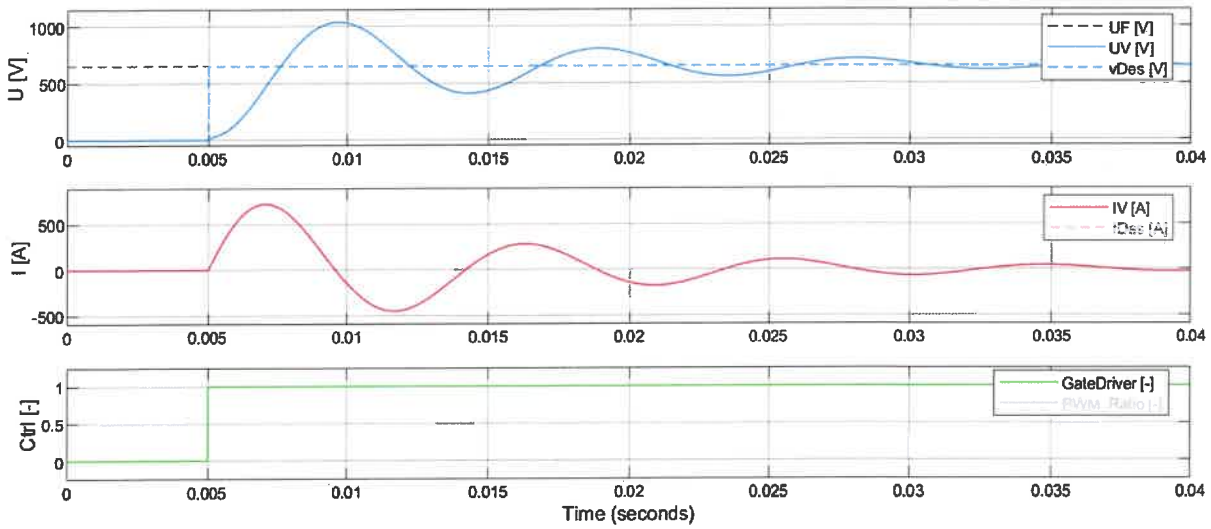


Abbildung 156: Simulation der Spannungsüberhöhung beim Wiederankoppeln (ohne Gegenmaßnahme)

2.13 AP 10: HV Systemsimulation

Das AP wurde bereits in 2018 abgeschlossen. Die im Rahmen der Projektänderung beschriebenen Restarbeiten werden im AP 8 (Abschnitt 2.11) weitergeführt.

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene HV-Topologien im Zusammenhang mit einem Oberleitungs-LKW mittels Simulation untersucht.

Ergebnisse

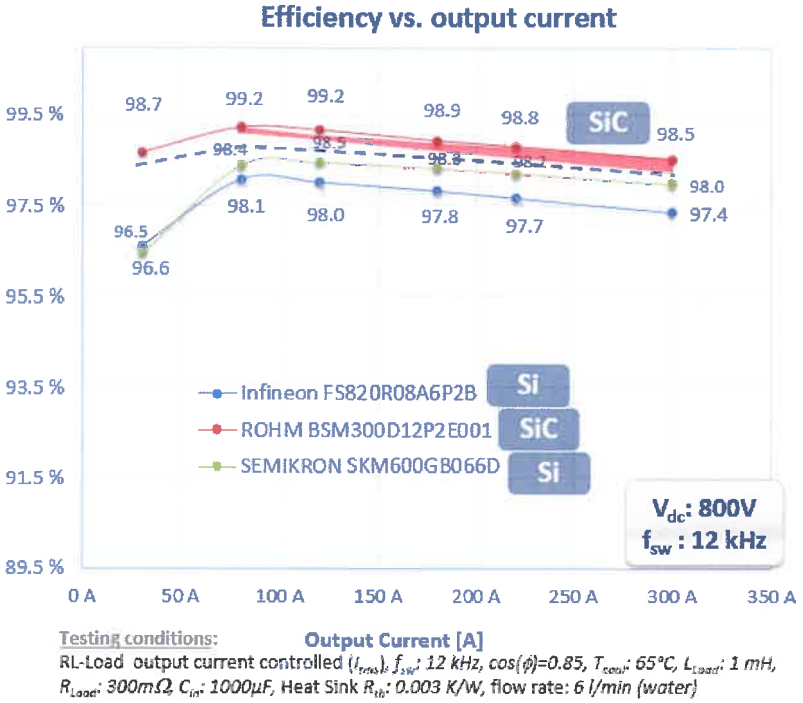
Die Ausführung der Arbeitspakete in diesem Teilabschnitt hat einen Abschluss gefunden. Es sind Simulationsmodelle für den DCDC-Wandler entstanden, die eine generische Form haben und mit diesen div. Topologien von DCDC-Wandlern nachgestellt werden können. Eine erste nicht im Vorhaben geplante Untersuchung – der Technologievergleich von Si und SiC – konnte ebenfalls erfolgreich gezeigt werden.

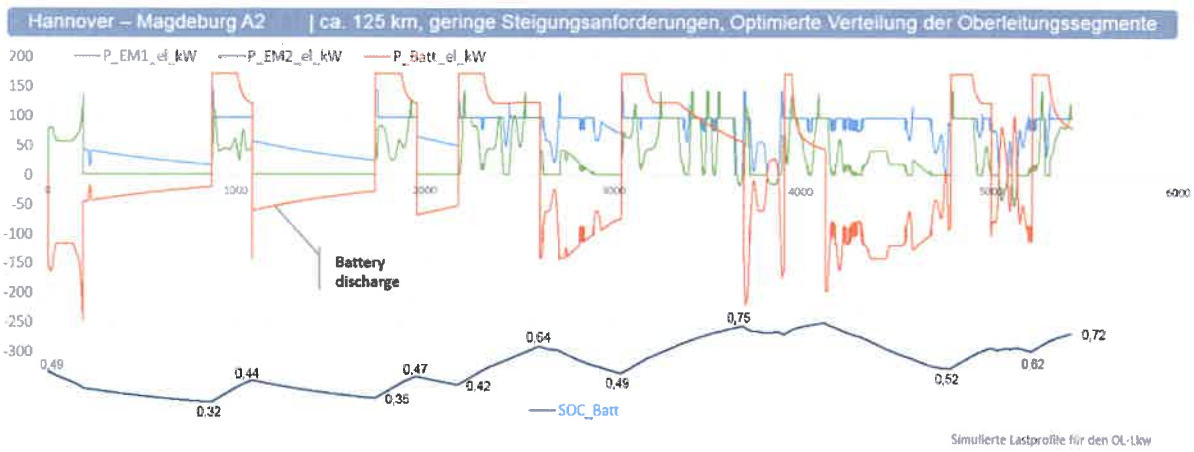
26. JULI 2022

Prämissen für die Untersuchungen waren:

- Modellbildung der Komponenten für die Auslegung eines serientauglichen Fahrzeug Hochvolt-Systems
- Verallgemeinerte Konzepte und Topologieuntersuchungen
- Scania bestätigt die zu untersuchende Topologie und teilt Komponentendetails mit, Modelle und Belastungsprofile
- Keine Schwingungsanalyse
- Forschungsaspekt: eine oder mehrere NextGen-Topologien zu erarbeiten, ohne den Feldbetrieb nachzubilden

Die Simulationen haben hier erbracht, dass für ein LKW-typisches Fahrprofil der Einsatz von SiC gegenüber von Si keinen Vorteil erbringen würde. Bei den typischerweise niedriger liegenden Schaltfrequenzen einer Schwerlastanwendung, würde der Vorteil von SiC auch sich nicht ausspielen lassen, da man eher mit max. 12kHz Schaltfrequenz operieren würde. In den folgenden Abbildungen sind dazu die Kennlinien gezeigt.





26. JULI 2022

Die Bewertung erfolgte hinsichtlich der folgenden Kriterien:

Mission Profile: Typischerweise führen $P_{peak} \approx P_{cont}$ zu einer kleinen Effizienzsteigerung <0,5% im Durchschnitt unter Berücksichtigung des Profils

Schaltfrequenz: Große Antriebe arbeiten mit eher kleiner Schaltfrequenz (5...12kHz)

Lagerströme: Hochleistungs-Elektromotoren neigen dazu, größere Wicklungskapazitäten (C_{WG}, C_{WR}, C_{RG}) und hf-Trafo-Effekt zu haben, Lagerstrom (EDM, kreisförmig) Problem ist damit gravierender

Reactive Power: Der Stromrichter muss deutlich mehr Blindleistung bereitstellen $\sim C_{par} \cdot \frac{dV}{dt}$

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen der fahrzeugseitigen HV-Topologien mit einer Anbindung an einen Oberleitungsfahrdraht verschiedener Spannungslagen ist in zwei Patentanmeldungen eingegangen, die im Folgenden beschrieben werden.

Im Segment der schweren Nutzfahrzeuge wurden in der Vergangenheit keine, bis minimale Konzepte beim elektrifizierten Antriebsstrang erfolgreich umgesetzt. Das wesentliche Problem ist die Energiedichte heutiger Speichertechnologien für elektrische Energie. In den Fokus für die schweren Nutzfahrzeuge ist daher das Thema Energietransfer oder Laden während der Fahrt gerückt. Dies kann ein induktives System oder ein Oberleitungsfahrdraht-System sein. Die vorliegende Erfindungsmeldung zeigt ein System und Technologien, die höhere Pantograph-Spannungen anzubinden erlaubt. Bisher üblich und aus der Bahntechnik entlehnte Spannungslage ist die 600-650V Klasse. Das Fahrzeug HV-System oder DC-Zwischenkreissystem liegt dabei auf bis zu 850V, was mit der 1200V IGBT/MOSFET Technologie abgedeckt wird. Seitens der Versorgung sind nach Stand der Technik Bahnsysteme hergenommen worden ohne dabei auf die für Oberleitungs-LKWs typischen starke Belastung in einem Segment zu berücksichtigen. Dies ist jedoch Stand der Technik.

Bei der Umsetzung in Fahrzeugantrieben gilt, die zusätzliche Komplexität bei den leistungselektronischen Komponenten einzugrenzen, eine möglichst hohe Leistungsdichte bei geringen Kosten und für diese Anwendung ebenfalls einen hohen Betriebszyklus. Durch die hohe Betriebsstundenzahl ist insbesondere das Thema Ausfallwahrscheinlichkeit und Lebensdauer von Bedeutung. Ein vereinfachtes System mit Vermeidung von Doppelungen bei passiven Komponenten, Kühlanbindung, Isolation und Verkabelung ist ebenfalls in dieser Erfindungsmeldung behandelt.

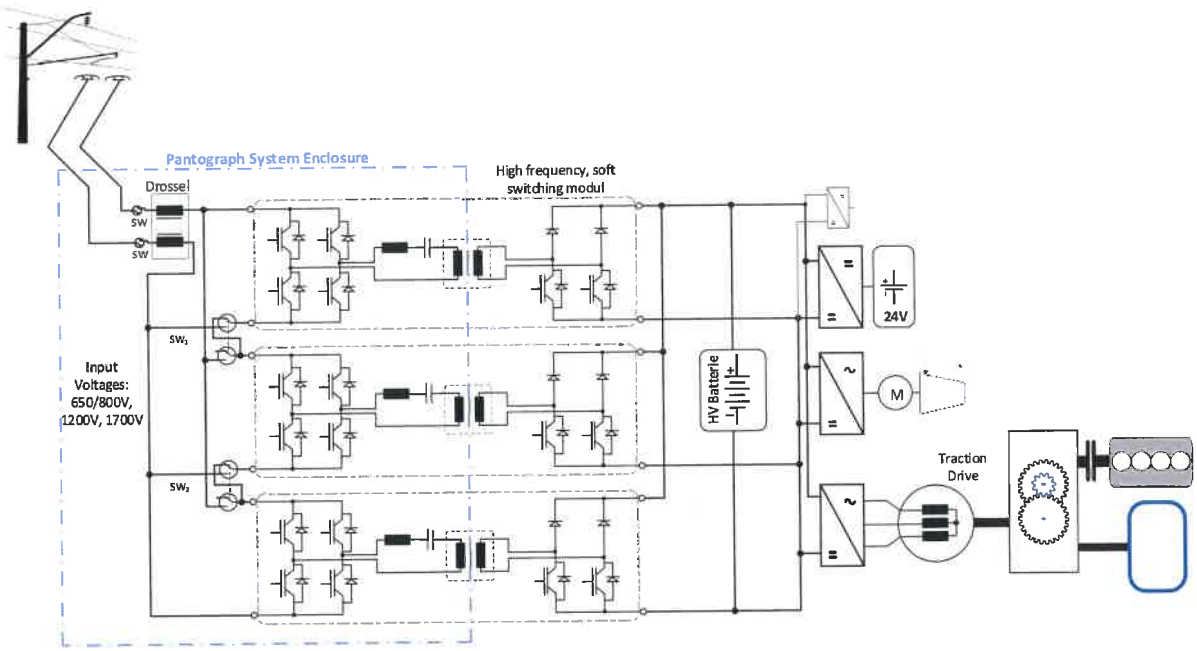
Gegenstand dieser Erfindungsmeldung ist eine modulare und ebenfalls konfigurierbare Stromrichtertopologie, die die Anbindung heutiger und zukünftiger Fahrzeugspannungssysteme von 400V und 800V an deutlich höher gelagerte Fahrdrahtspannungen von 600V, 800V, 1200V oder 1700V ermöglicht.

Variables, modulares und steuerbares Eingangsspannungssystem für ein 800V/1200V/1700V Oberleitungs-Fahrdraht-System eines schweren Nutzfahrzeugs

Hauptbestandteil der Erfindungsmeldung ist dabei das in der folgenden Abbildung gezeigte „High frequency soft switching modul".

26. JULI 2022

- Kaskadierte HF SSM Module in der gezeigten 3er Stack Konfiguration, erlaubt bei heutigen im Automotive-Bereich üblichen Spannungsklassen (650V) die Anbindung an höhere netzseitige Spannungen, wie z.B. 800V, 1200V oder 1700V.
- Gleichzeitige galvanische Trennung für jede Ausbaustufe mittels HF-Trafo. Die HF und soft-switching Struktur ermöglicht kleine Ausführungen der HF-Trafos
- Eine Variante der Ausführung wäre über Schütze (nicht gezeigt in Abb. 1) einzelne HFSSM zu- oder wegzuschalten, sodass eventuell andere DC-Netzspannungssysteme abgedeckt werden. Dies ist analog zum multi-Spannungssystem im europäischen Bahnnetz zu sehen.
- Vorteilhaft dieser Struktur gegenüber dem Stand der Technik ist die gesteuerte bzw. geregelte Anbindung des Fahrzeug HV-Netzes an das Versorgungsnetz über isolierende Trafos. Die Ausführung mit HF-Trafos kann Einfluss auf die üblicherweise erforderlichen Netzdrosseln haben. Das Einsparen der Netzdrosseln wäre denkbar.
- Die Schaltfrequenzen können variabel und arbeitspunktabhängig eingestellt werden, somit können Verluste minimiert und passive Bauelemente klein gehalten werden.
- Ansteuerung und Regelung aller elektrischen Energieflüsse kann von einer Steuereinheit übernommen werden.



Stromrichter-System mit multiphasiger Steller- und Wechselrichtereinheit für ein 1200V Oberleitungs-Fahrdraht-System eines schweren Nutzfahrzeugs

Substantieller Bestandteil der Erfindungsmeldung ist ein mehrphasiges 3L-Modul, welches eine T-NPC Topologie und für den Antrieb und eine klassische NPC Topologie für den Leistungssteller darstellt.

- Die gezeigten zugänglichen Abgriffe an dem neuen Modul machen es möglich, dass abhängig von der Betriebsstrategie über die vorhandenen Halbleiter (der anti-parallel geschaltete Halbleiter) dieser umgeschaltet werden kann, um eine zusätzliche Boost-funktion zu ermöglichen. Bei einem Oberleitungs-Fahrdraht-System kann dies insbesondere von Vorteil sein, wenn auf einem Zwi-

schenabschnitt erst zugeschaltet werden kann und aufgrund der geringeren Abdeckung die Ladeleistung erhöht werden muss. Es ist damit möglich relativ wenig Leistungselektronik für die Grundlastabdeckung zu installieren und die erforderliche oder ökonomische Peak-Leistungsbereitstellung durch vorhandene – für den regulären Fahrbetrieb genutzte – Halbleiter abzudecken.

- In dem Betriebsfall der Peak-Leistungsbereitstellung werden die Schütze SW1, SW2 und SW3 umgeschaltet und der rausgelöste anti-parallel verschaltete Leistungshalbleiter über die Induktivitäten LA, LB und LC für das Boosten verwendet. Eine galvanische Trennung ist nicht berücksichtigt.
- Die neue Topologie besteht hierbei aus einem multi-Level Umrichter für den elektrischen Antrieb und einem multi-Level DCDC-Wandler für den low- oder high-side DC-Energiespeicher mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen. Somit können Verluste minimiert und passive Bauelemente klein gehalten werden.

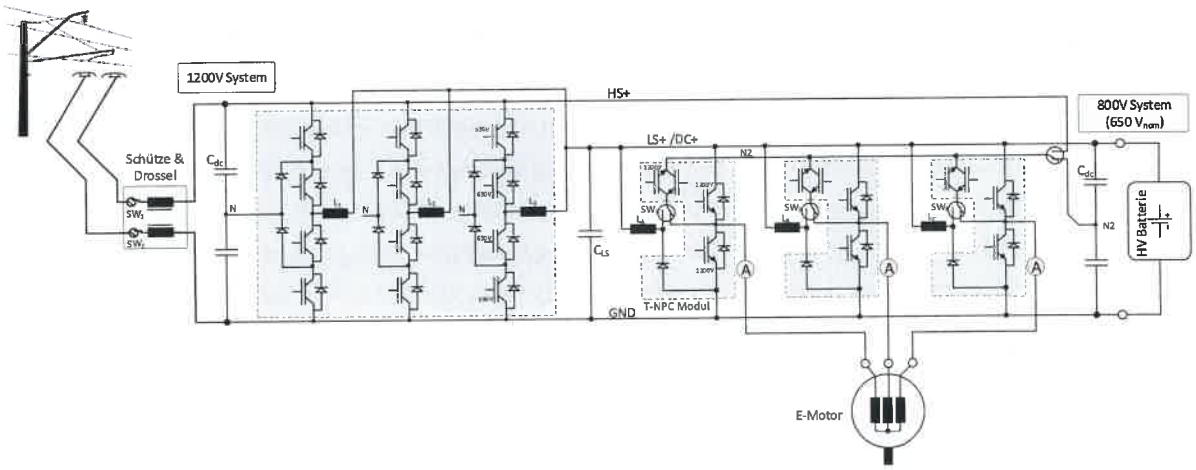
Ansteuerung und Regelung aller elektrischen Energieflüsse kann von einer Steuereinheit übernommen werden.

Mit diesem System und Topologie ist es möglich, verschiedenste Konzepte eines Oberleitungsfahrdraht-LKWs abzudecken. Da derzeit die Normgebung im Verlauf ist, verschiedene Randbedingungen bzgl. Spannungsklassen und Isolationsanforderungen im Entstehen sind, lassen sich mit dieser vorgeschlagenen Topologie bereits alle Szenarien abdecken. Dies ist gegeben bei einem gleichzeitig hohen Integrationsgrad.

Weitere in der Architektur der Erfindungsmeldung gezeigte Neuerungen in Stichpunkten:

- Anordnung von min 3 Phasen in einer Stack-Konfiguration, evtl. mit beidseitiger Kühlung
- Zwei unabhängige Pfade des Energieflusses, sodass diese auch gezielt unterschiedlich dimensioniert werden können. Dimensionierung ist abhängig vom Fahrzeugkonzept, was entweder ein eher BEV-Fahrzeug ist (Batterie mit großem Energieinhalt), oder eher ein Oberleitungs-Fahrdraht Fahrzeug (Batterie als Kurzzeitenergiequelle), oder einem konventionellen Hybrid-Fahrzeug (kleiner Batterie) und Verbrennungsmotor.
- Mischung von Technologien der Halbleiter mit konventioneller Si-IGBT Technik, die durchaus noch Entwicklungspotential hat und Wide-Bandgap SiC MOSFET Technik mit ihren Vorteilen bei Verlusten und Schaltfrequenzen.
- Die Verbindung in dieser neuartigen Topologie, wobei die Zweige unterschiedliche Stromtragfähigkeiten aufweisen können und unterschiedlich angesteuert werden, erlaubt eine Optimierung bzgl. thermischen Verhaltens.
- Einerseits lassen sich durch die Verkettung der leistungselektronischen Schalter die Verluste und damit die Wärmeeinträge streuen und es entstehen weniger die Lebensdauer einschränkende „hotspots“. Andererseits lässt sich durch Verwendung von ggf. Wide-bandgap Technologien und die Verwendung höherer Schaltfrequenzen auch hier eine gute thermische Verteilung erzielen, sodass bei einem kompakt gekühltem Aufbau und dadurch guter thermischer Anbindung ein wesentlicher Beitrag zur Lebensdauersteigerung zu erwarten ist.

26. JULI 2022

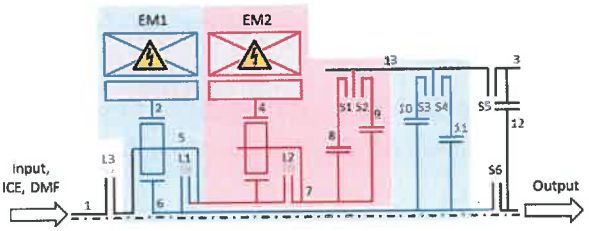


2.14 AP 11: DHT

2.14.1 AP 11.1 Getriebestruktur

AP 11.1.3 Bewertung Getriebevarianten / Struktur

Abbildung 157 zeigt den schematischen Aufbau des neuartigen DHT-Getriebes. Die Eingangswelle (1) ist mit dem Verbrennungsmotor verbunden und kann über die Kupplung L3 zum Zwecke des elektrischen Fahrens vom Antrieb abgekoppelt werden. Der weitere Aufbau umfasst zwei Teilgetriebe, die in Abbildung 157 farblich jeweils rot (Gänge 1+3, Schaltelement S1/S2) und blau (Gänge 2+4, Schaltelement S3/S4) hinterlegt sind. Der 5. Gang (Schaltelement S6) stellt einen effizienten Direktgang und der 6. Gang einen Windungsgang als Overdrive dar. Beide Teilgetriebe sind mittels Planetenradstufe und E-Maschine mit der Sekundärseite der L3-Kupplung verbunden. Diese Art der Aufteilung in zwei Teilgetriebe zeigt Ähnlichkeiten zu einem Doppelkupplungsgetriebe, wobei die Kupplungen jeweils durch eine Kombination von Planetengetriebe und E-Maschine ersetzt worden sind. Dadurch lassen sich neben den festen Übersetzungen in den 6 Gängen auch stufenlose Fahrbereiche realisieren.



	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L3	L1	L2
Hybrid 1st gear (G1)	x				x		x		x
Hybrid 2nd gear (G2)				x	x		x	x	
Hybrid 3rd gear (G3)		x			x		x		x
Hybrid 4th gear (G4)			x		x		x	x	
Hybrid 5th gear (G5)						x	x	x	
Hybrid 6th gear (G6)		x		x		x	x		x
Electric 1st gear (E1)	x				x		-		x
Electric 2nd gear (E2)				x	x		-	x	x
Electric 3rd gear (E3)		x			x		-		x
Electric 4th gear (E4)			x		x		-	x	x
Electric 5th gear (E5)						x	-	x	x

Abbildung 157: Getriebestruktur und Schalttabelle des Scania-DHT-Getriebes

Der Schaltvorgang zwischen den Gängen erfolgt zugkraftunterbrechungsfrei indem immer von einem festen Gang in den benachbarten stufenlosen Fahrbereich gewechselt wird und dort die Drehzahlanpassung in den Zielgang erfolgt bevor das dafür vorgesehene Schaltelement geschlossen wird. Im stufenlosen Fahren sind Schaltkombinationen möglich, in denen beide E-Maschinen in den Leistungsfluss eingebunden werden können. Diese besondere Getriebestruktur ermöglicht den wechselseitigen E-Maschinen-Betrieb von motorisch und generatorisch, wodurch die benötigte elektrische Leistung der

einen E-Maschine durch den generatorischen Betrieb der anderen weitestgehend zur Verfügung gestellt wird und so die Batterie entlastet, was für den Betrieb als HEV sinnvoll ist (leistungsverzweigter Betrieb). Das Getriebe ermöglicht daher sowohl ein rein elektrisches Fahren als auch ein parallelhybridisches Fahren mit den Sonderfällen rein verbrennungsmotorisches Fahren, Boosten und Rekuperieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zunächst ein digitales Modell des DHT-Getriebes erstellt und anhand von Simulationen hinsichtlich Drehzahlen, Drehmomente und Schaltübergänge analysiert. Dabei zeigte sich eine ausgewogene Abstimmung der Komponenten Verbrennungsmotor, E-Maschine 1, E-Maschine 2 und der Planetengetriebeübersetzungen. Die Schaltübergänge lassen sich sowohl für Hoch- als auch für Rückschaltungen zugkraftneutral durchführen, was insbesondere bei den Gängen mit einer hohen Übersetzung für eine Anwendung in schweren Nutzfahrzeugen von großer Bedeutung ist, damit das Fahrzeug an einer Steigung während des Schaltvorgangs nicht an Geschwindigkeit verliert. Dieses DHT-Getriebe weist daher gegenüber einem hybridisierten Doppelkupplungsgetriebe sowohl aus Sicht der Schaltqualität (Zugkraftverlauf) als auch hinsichtlich Effizienz während des Schaltvorganges wesentliche konzeptionelle Vorteile auf.

AP 11.1.4 Bewertung Getriebevarianten / konstruktive Umsetzung

Getriebe – Bauteilanalyse und Designoptimierung durch ein neues Lagerungskonzept

Während der Projektlaufzeit wurden die DHT-Getriebe der Baustufen C2, F1/F2 und seit Juni 2020 die Baustufe V5 von Scania entwickelt und in Fahrzeugen erprobt.

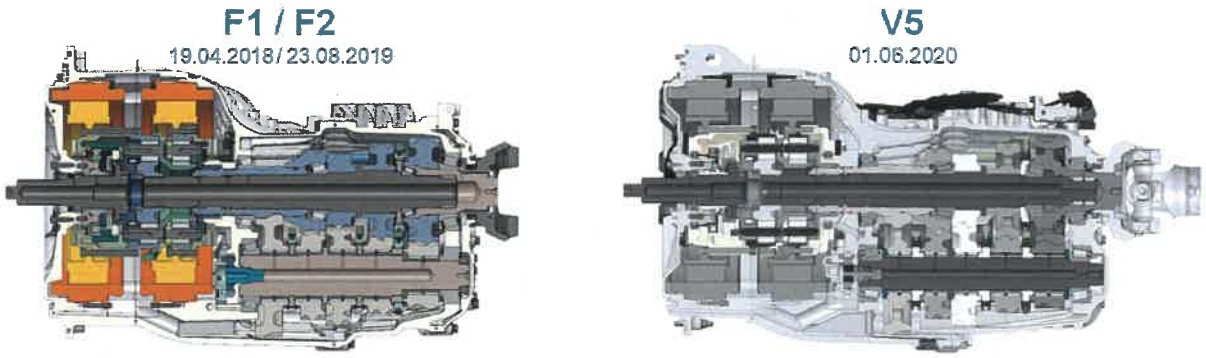


Abbildung 158: Baustufen des Scania-DHT-Getriebes

Die Änderungen zwischen den Baustufen sind marginal und betreffen insbesondere Detailverbesserungen zur Optimierung der Beölung. Bei der Erprobung hat sich gezeigt, dass im Hybridteil des Getriebes Schwingungen auftreten in deren Folge es zu Beschädigungen an der Schiebehülse der Kupplung L1 kommen kann.

26. JULI 2022

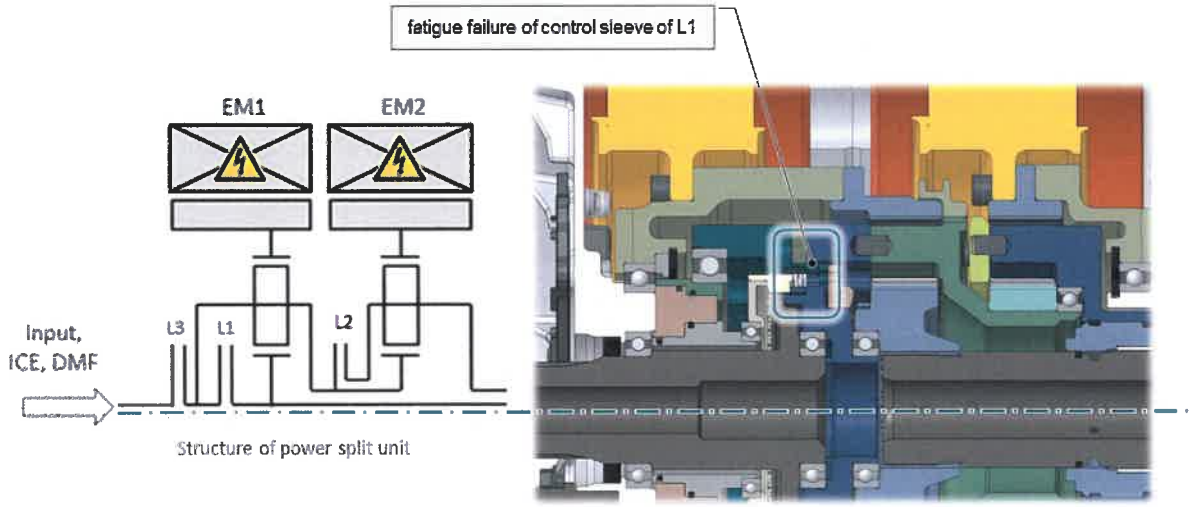


Abbildung 159: Beschädigung der Schiebehülse der Kupplung L1

Eine Designanalyse erbrachte die Erkenntnis, dass durch die Optimierung des Lagerungskonzeptes im Hybridteil des Getriebes diese Beschädigungen wirksam verhindert werden können. Für die nötigen Änderungen wurde im Berichtszeitraum ein Vorschlag in Form eines CAD-Entwurfs erarbeitet. Um den Änderungsaufwand zu begrenzen, war es Ziel des Entwurfs möglichst wenig Bauteile zu modifizieren.

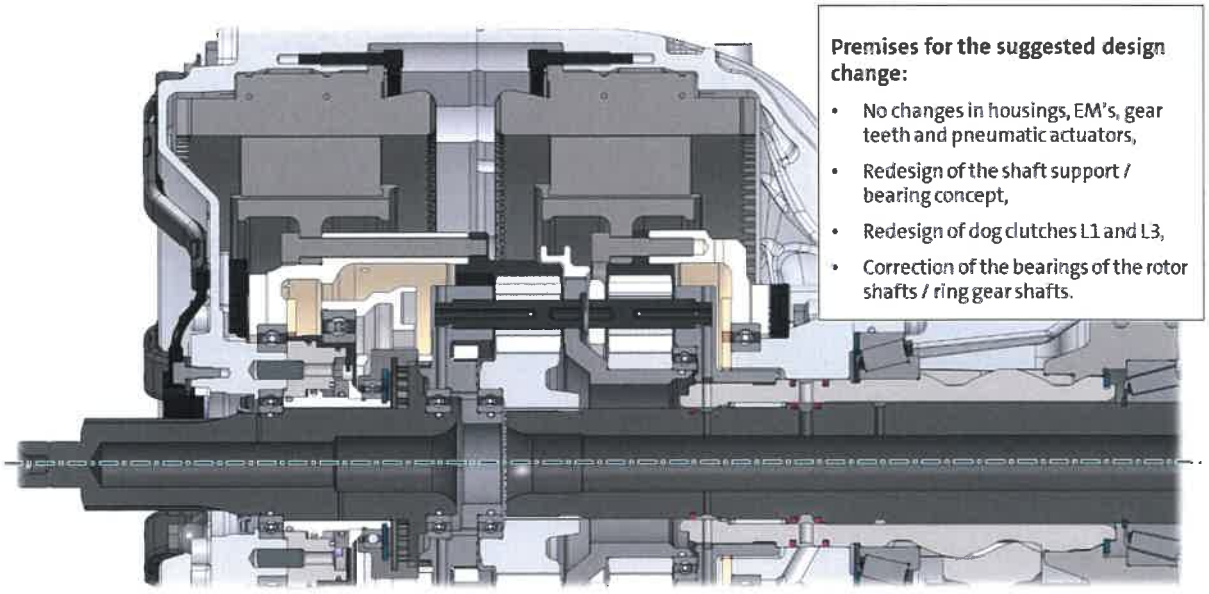


Abbildung 160: Prämissen für Designvorschlag

Die Basis für das optimierte Lagerungskonzept stellt die statisch bestimmte Lagerung der Eingangswelle durch Fest- und Loslager in beiden Gehäuseteilen mit möglichst großem Lagerabstand dar. Die so geschaffene steife Lagerbasis der Eingangswelle, dient nun als Trägerwelle für den Planetensteg der ersten Planetenstufe. Alle Schwingungen, die durch ungleichmäßige Lastverteilung im Planeten-

getriebe erzeugt werden, können damit auf direktem Weg zu den Gehäuseabstützungen geleitet werden.

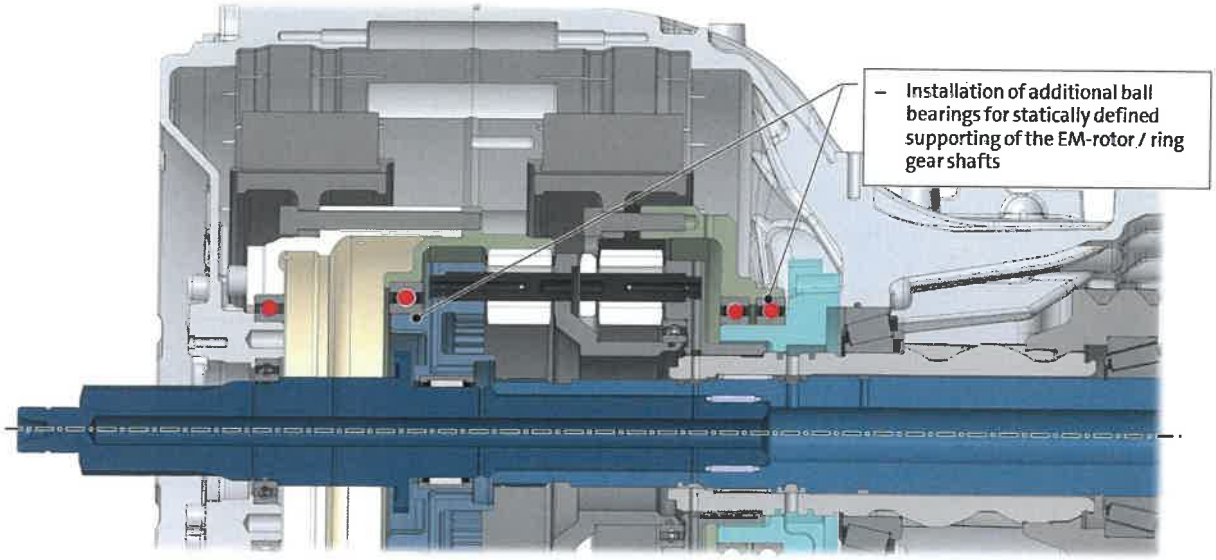


Abbildung 161: Lagerung von Planetenträger und Rotorwellwellen

Der Planetensteg der ersten Planetenstufe dient nun wiederum als Träger eines zusätzlichen Rillenkugellagers für die statisch bestimmte Lagerung der Hohlrad- bzw. Rotorwelle der ersten E-Maschine. So können auch hier die radialen Schwingungen der E-Maschine, die durch elektro-magnetische Kräfte hervorgerufen werden, direkt zu den Gehäuselagerungen geleitet werden, ohne weitere Bauteile zu belasten. Die Lagerung der zweiten Hohlrad- bzw. Rotorwelle wird ebenfalls auf eine statisch bestimmte Lagerbasis aus zwei verspannten Rillenkugellager umgearbeitet.

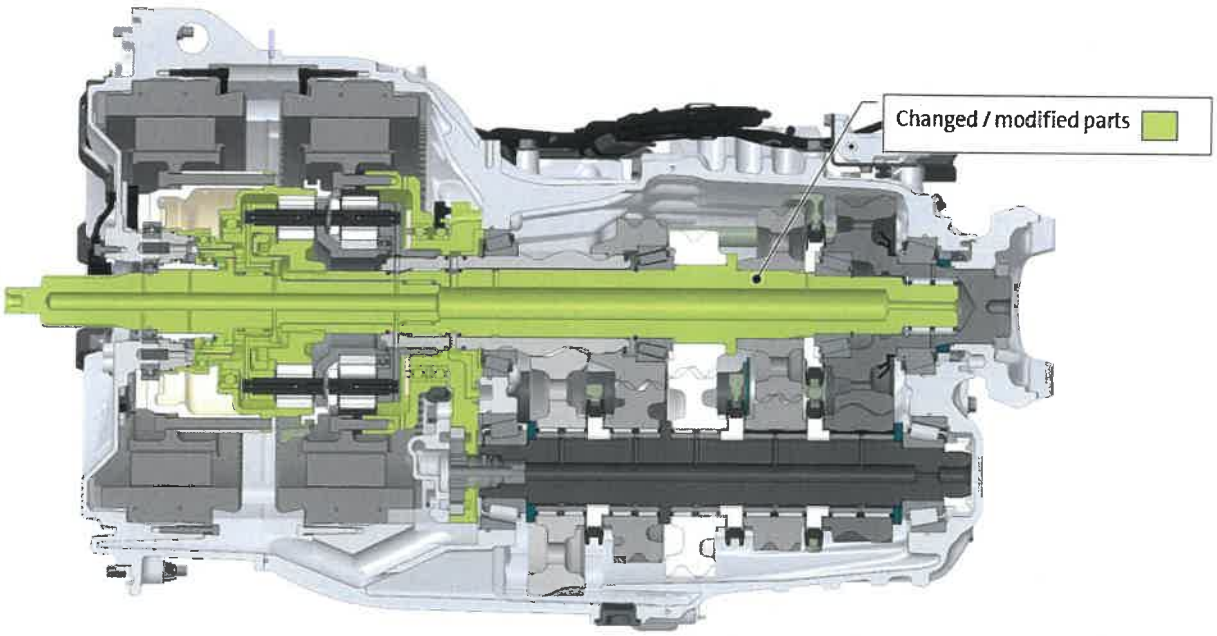


Abbildung 162: Änderungsumfang für neues Lagerungskonzept

Wie Abbildung 162 zeigt, beschränkt sich der Änderungsumfang zur Realisierung des optimierten Lagerungskonzeptes auf wenige Getriebebauteile. Kostenintensive und aufwendig herzustellende Bauteile, wie Gehäuse und E-Maschinen bleiben im Neuentwurf unverändert. Auch die Verzahnungsaus-

26. JULI 2022

legung und die komplette zweite Planetenstufe können unverändert weiter genutzt werden. Um einen problemlosen Betrieb der DHT-Getriebe auch über Lebensdauer zu gewährleisten, wurde Scania der Entwurf zum optimierten Lagerungskonzept vorgestellt und dessen Umsetzung empfohlen.

2.14.2 AP 11.2 Schmierung, Kühlung

AP 11.2.1 Beölungskonzept

Im ersten Schritt wurde das Beölungskonzept (siehe Abbildung 163) des Hybridgetriebes analysiert und dessen Verhalten hinsichtlich Verfügbarkeit und Effektivität bei verschiedenen Betriebszuständen näher betrachtet.

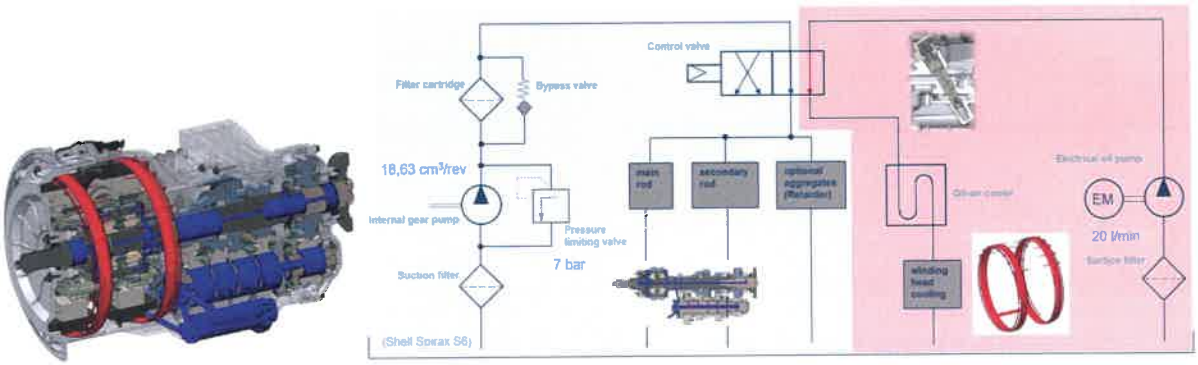


Abbildung 163: Analyse des Schmier- und Kühlsystems

Auffällig waren die erhöhten Strömungsverluste innerhalb der im Getriebegehäuse eingebrachten Ölgalerie. Unter Zuhilfenahme der neuartigen Partikelsimulation (siehe Abbildung 164 links) können Ölströmungsdruckverluste innerhalb einzelner Ölbohrungen, Winkel und Ventilkanten genau analysiert werden. Durch den Abgleich mit Messergebnissen auf einem Hydraulikprüfstand wurden die Simulationsergebnisse zunächst validiert, danach konkrete Geometrie- und Strukturoptimierungsvorschläge untersucht und Strömungsoptimierungspotentiale quantitativ aufgezeigt.

Das Ergebnis war ein Gehäusestopfen, der eine strömungsoptimierte Kontur entsprechend den geometrischen Gegebenheiten der Ölgalerie in sich aufnimmt (siehe Abbildung 164 rechts). Je nach Stärke des Konturübergangs (Richtungswechsel der Ölströmung) können durch diese Maßnahme an einem einzigen Stopfen die Strömungsverluste um bis zu 45% reduziert werden.

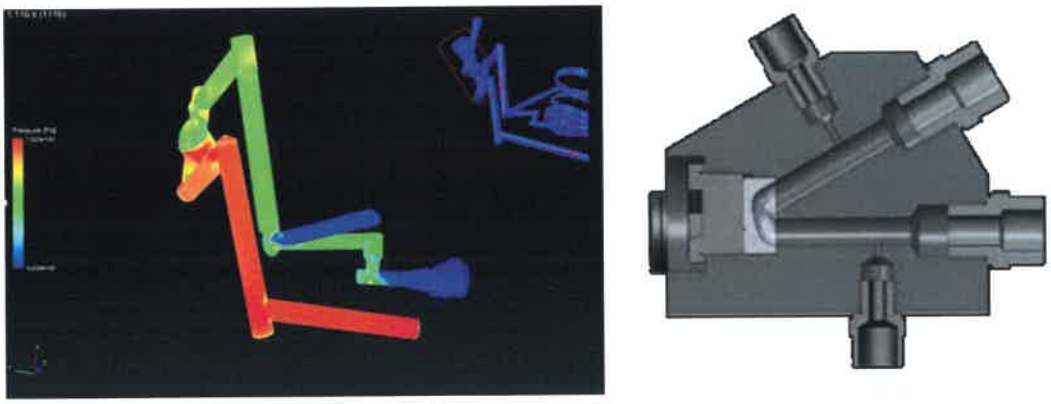


Abbildung 164: Partikelströmungssimulation der Getriebeölgalerie und Reduzierung der Strömungsverluste mittels strömungsoptimierten Konturstopfen

AP 11.2.2 Kühlungsanalyse von Getriebe und EM

26. JULI 2022

Die Kühlung der zwei Elektromaschinen EM1 und EM2 wird im Getriebe durch eine Ölkühlung hergestellt, die je nach Betriebszustand entweder über eine mechanische, oder elektrische Ölpumpe realisiert wird (vgl. Abbildung 163). Das Öl wird dabei vorweg über einen externen Luft/Öl-Wärmetauscher geleitet, um die Wärme aus dem DHT-Getriebe effizient abzuleiten. Im Mittelpunkt der Optimierungen standen hier die Ölverteilung zwischen den beiden Elektromaschinen und die gleichmäßige Ölverteilung über den Wickelköpfen. In mehreren Optimierungsschleifen wurden die Querschnitte für den Öleintritt in die Ringspalte mit Hilfe der Partikelsimulation (siehe Abbildung 165) so lange variiert, bis eine gleichmäßige Verteilung zwischen EM1 und EM2 erreicht wurde. Nähere Untersuchungen zur Entwärmung der Elektromaschinen wurden mit Hilfe eines Prüfaufbaus im AP7.4 bearbeitet.

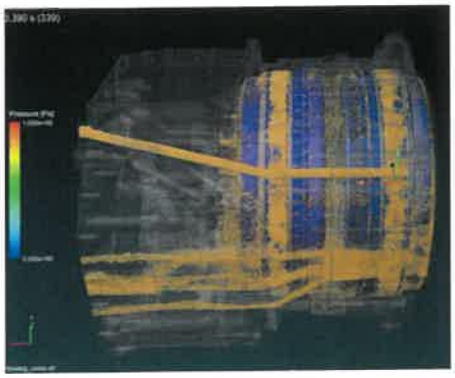


Abbildung 165: Optimierung der Kühlölaufteilung zwischen den Wickelkopfkühlungen von EM1 und EM2

AP 11.2.3 Partikelsimulation (Berg- und Talfahrt, Temperatureinfluss, Ölmanagement)

Für die Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Kühl- und Schmiermittelversorgung bei den Betriebszuständen der Berg- und Talfahrt werden die Ölstände bei einem geneigten Getriebe entsprechend einer Steigung bzw. eines Gefälles von 25% analysiert und die Mindestfüllmenge des Getriebes festgestellt (Abbildung 166). Das Ergebnis ergab einen ausreichenden Ölstand über den Ansaugsieben der Ölpumpen für alle Betriebszustände. Ferner ist festzustellen, dass insbesondere bei Bergabfahrt mit großem Gefälle die Ölfüllmenge, der in der Ölwanne befindlichen Schmierflüssigkeit, maximal 3,4 L nicht übersteigen sollte, da es hier sonst zu Rückstauungen im Bereich der vorderen Elektromaschine führen und durch die dadurch hervorgerufenen Ölflüssigkeitsverwirbelungen zur ungewollten Erwärmung führen kann. Aus diesem Grund wurde der Ölrücklaufkanal im Getriebeölsumpf mit einem großen Querschnitt ausgeführt, um größeren Ölstauungen im Bereich der EM entgegen zu wirken.

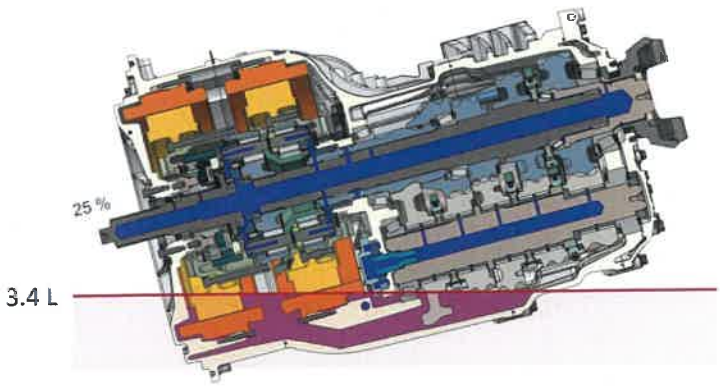


Abbildung 166: Analyse des Getriebeölstands bei Talfahrt zur Absicherung einer unterbrechungsfreien Schmier- und Kühlölversorgung

26. JULI 2022

2.14.3 AP 11.3 Bauteilanalyse

Durch den Umstieg von pneumatischen auf elektromechanische Schaltaktoren mussten die Hybridgetriebestufe neu ausgelegt und die Schaltgetriebeeinheit überarbeitet werden. Dadurch wurde es erforderlich die Bauteile, wie Wellen, Lagerungen und Führungen sowie die mit den Elektromaschinen direkt in Verbindung stehenden Planetensätze hinsichtlich Festigkeit und zulässiger Verformung zu dimensionieren. Beispielhaft zeigt die Abbildung 167 links die Antriebsspindel des Schraubengetriebes für die Umschalteinheit der Hybridgetriebestufe. Die unter Biegebelastung stehende Spindel darf nicht zu große Verformungen aufweisen, damit die gefrästen Verzahnungen keinen vorzeitigen Verschleiß erfahren. Das rechte Bild zeigt die Verformungen der Schaltgabel inklusive der Schubstange und dem Kontaktgebiet der Schaltwalze. Der Bauteilverbund darf unter maximalem Aktuatordrehmoment keine bleibende Verformung erfahren oder zu Oberflächenbeschädigungen im Nutkurvenkontakt führen.

Abbildung 167: links – FEM-Analyse Schraubverzahnung Aktuator-Antriebsspindel; rechts – FEM-Verformungsanalyse der Einheit Schalttrommel, Schubstange und Schaltgabel

2.14.4 AP 11.4 Aktuatorik

AP 11.4.2 Entwurf einer optimalen Aktuatrorik

Mit der Einführung einer elektromechanischen Aktuatorik werden die bisherigen pneumatischen Schaltelemente ersetzt. Durch eine Strukturoptimierung der Mechanik ergibt sich wie in Abbildung 168 dargestellt die Möglichkeit, beide Kupplungen am Außenumfang der Planetenstufen und mittig zwischen den E-Maschinen platziert anzuordnen. Die gemeinsame Steg-Sonnenwelle, welche beide Planetenstufen verbindet, kann jetzt als Kupplungsträger dienen. Die formschlüssige Kopplung zwischen dem Kupplungsträger und den beiden Hohlradwellen erfolgt durch zwei unabhängige Schiebemuffen die über zwei starr gekoppelte Zylindernutkurven, getrieben von einem gemeinsamen elektromechanischen Aktuator, via einem Schneckengetriebe, verschoben werden. Das einschieben der Schiebemuffen auf die Schaltverzahnungen führt folglich zum Verblocken der jeweiligen Planetenstufe. Durch die Kopplung der Zylindernutkurve werden die benötigten Kombinationen der Schaltzustände hardwareseitig ausfallsicher abgebildet und die Schneckenwelle kann platzsparend zwischen den Wickelköpfen der beiden E-Maschinen nach außen geführt werden.

26. JULI 2022

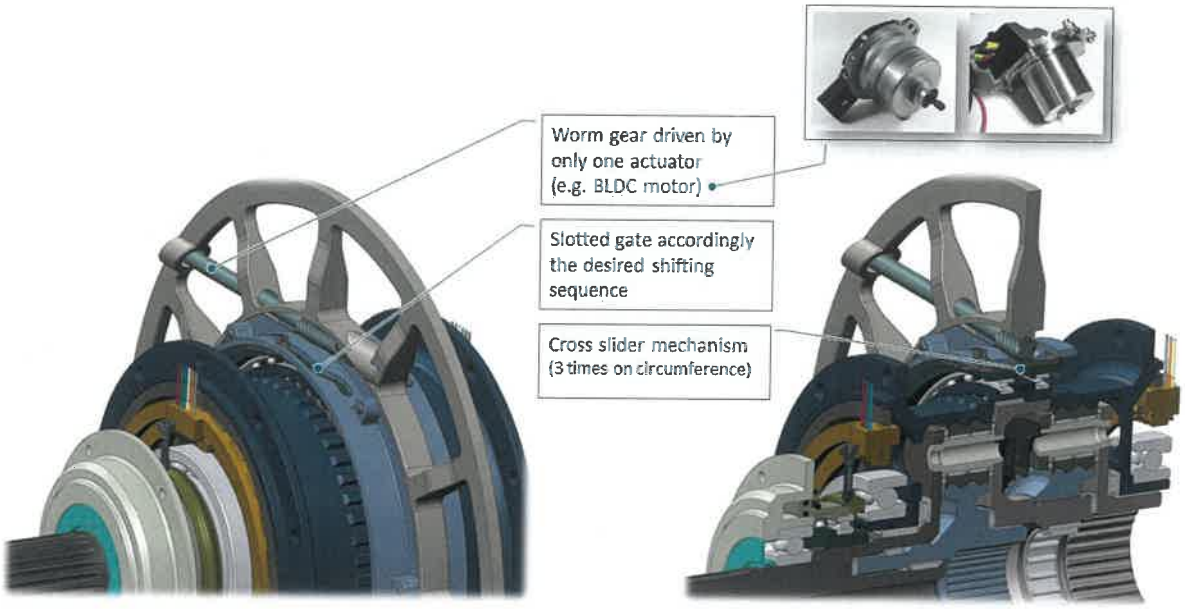


Abbildung 168: Elektromechanische Aktuierung für den Hybridteil des DHT-Getriebes

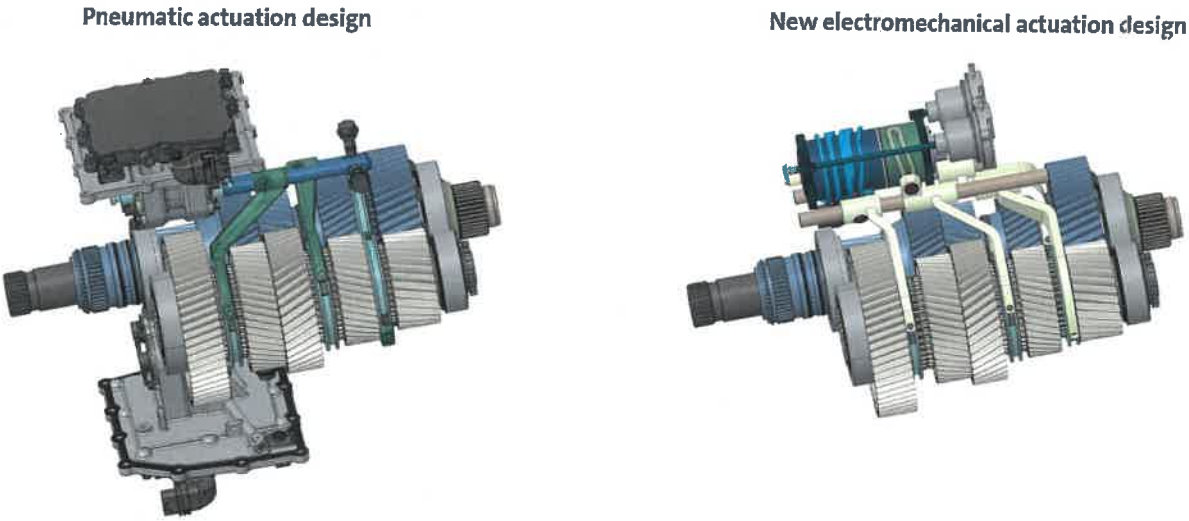


Abbildung 169: Designvergleich zwischen herkömmlicher pneumatischer und neuer elektromechanischer Aktuierung

Für den klassischen Schaltgetriebeteil des DHT-Getriebes gemäß Abbildung 169 ist das herkömmliche pneumatische Schaltsystem dem neuen elektromechanischen Schaltsystem gegenübergestellt. Durch den Entfall der raumfüllenden pneumatischen Aktoren ergeben sich Bauraumvorteile, die durch eine Reduzierung der Aktoranzahl von vier pneumatischen Zylindern (2 Zylinder pro Schaltmodul) auf nur zwei elektrische Aktuatoren ergeben. Diese beiden Aktuatoren wirken auf zwei Schaltwalzen, die wiederum vier Schaltgabeln zum Schieben der Gangschaltmuffen bedienen. Dabei treibt einer der Aktuatoren zugleich drei Schaltgabeln über parallel bewegte Kurvennuten an. Das Ergebnis ist eine sehr kompakte elektromechanische Schalteinheit, die zu einem kompakteren und leichteren Getriebeaggregat führt.

Für diesen Entwurf wurden vorab die Schaltkräfte und Stellzeiten des vorher pneumatischen Schaltsystems mit einem Prüfaufbau gemessen und zur simulativen Auslegung der neuen elektrischen Aktuatoren und den zugeordneten Schaltwalzen herangezogen.

26. JULI 2022

AP 11.4.3 Serienperspektive und Energiebilanz

In konventionellen automatisierten LKW- und Busschaltgetrieben werden die Gangwechsel über pneumatisch betätigte Schaltelemente vollzogen. Diese einfache Lösung ist naheliegend, da schwere LKW mit einer Druckluftanlage für Bremsen und Luftfederung ausgestattet sind. Die Förderleistung der verwendeten Kompressoren liegt abhängig von der Kompressordrehzahl zwischen 200 bis 900 l/min, die bei etwa 12 bar einer Wellenleistung von 0,15 bis 2,5 kW entspricht. Allein die Erhaltungsleistung im Nichtförderbetrieb liegt in einer Betriebsstunde zwischen 20 und 100 Wh. Für einen vollständigen Beschleunigungsvorgang bis zur Maximalgeschwindigkeit werden die Schaltelemente bis zu 19-mal im Hybridgetriebe betätigt. Das entspricht einem Energieverbrauch für die pneumatischen Schaltelemente von 0,59 Wh. Je nach Fahrprofil werden bei hoher Beanspruchung, beispielsweise im Stadtverkehr bis zu 380/h Einzelschaltbetätigungen der Elemente vollzogen. Das entspricht einem Energieaufwand von 11,8 Wh. Damit wird klar, dass der Energieverlust durch das Schaltsystem im LKW kaum ins Gewicht fällt. Vielmehr wird der Energieverlust wesentlich durch die Druckluftbremse und die Luftfederung bestimmt und auch der reine Energieverlust im Leerlauf eines geregelten Kompressors liegt über der durch die Schaltungen abgeforderten Energiemenge.

Eine nachhaltige Verbesserung stellen elektrisch angetriebene Kompressoren dar. Ihr Wirkungsgrad ist in der Fachliteratur mit 32 % angegeben (elektrischer Energieeinsatz zu nutzbare pneumatische Energie nach dem Druckkessel). Damit beträgt der Energiebedarf für eine vollständige Beschleunigung bis zur Maximalgeschwindigkeit 1,84 Wh (ohne Aufladung des Druckspeichers).

Dem gegenüber steht der in diesem Bericht vorgestellte elektromechanische Schaltaktuator. Mit einem Energiebedarf von 29 Ws (112 Ws bei Pneumatik) pro Schaltvorgang benötigt das System für eine komplette Beschleunigung bis zur Maximalgeschwindigkeit 0,15 Wh, für 380 Einzelschaltungen 3,1 Wh. Diese Energie wird dem elektrischen Bordnetz abgefordert, wobei der Grundlastanteil für die elektronische Aktuatoransteuerung auf weniger als 2 W pro Aktuator einzuschätzen ist.

In Bezug auf den Serieneinsatz einer elektromechanischen Schaltaktuierung sind die Aufwendungen und Risiken als überschaubar einzustufen. Eine Notwendigkeit für den Einsatz der elektromechanischen Aktuierung besteht natürlich nur, wenn die Druckluftanlage für Bremsen und Federung zukünftig entfällt.

Abschließend ist festzustellen, dass die Schaltbetätigung insgesamt nur einen sehr geringen Anteil am Gesamtenergiebedarf des LKW verlangt. Durch den Entfall der wenig effizienten Druckluftanlage in Verbindung mit dem Ersatz der pneumatischen Fahrzeugbremsen durch elektrische Bremsen, wird nicht nur der Energiebedarf reduziert, sondern auch der Wartungsaufwand. Zudem entfallen die für Pneumatik typischen Geräuschemissionen, welche durch den betriebenen Kompressor und das Abblasen der Druckluft durch die Steuerventile entstehen. Damit ergibt sich letztendlich ein merklich gesteigertes Komfortverhalten beim Einsatz in Bussen.

2.14.5 AP 11.5 DHT-Ansteuerung

Das GEM Getriebe der Oberleitungs-LKW Typ2 entspricht vom Aufbau einem Doppelkupplungsgetriebe, bei dem die Doppelkupplung durch die Kombination zweier Elektromaschinen mit zwei Planetensätzen ersetzt wurde.

Es ist sowohl ein rein elektrischer Fahrbetrieb sowie rein verbrennungsmotorischer Betrieb möglich.

Zum Anfahren und für Gangwechsel werden die Elektromotoren motorisch/generatorisch betrieben. Damit ist ein gegenüber Reibkupplungen verlustarmer Anfahr- bzw. Schaltvorgang möglich.

Bei geeigneter Dimensionierung der Elektromaschinen sind zugkraftunterbrechungsfreie Schaltungen zwischen Gängen unterschiedlicher als auch gleicher Eingangswellen möglich. Das Abtriebsmoment während der Schaltung ist über die Wahl der Einzelmomente (Verbrennungsmotor, EM1, EM2) frei wählbar.

Bei nicht ausreichender Dimensionierung der Elektromaschinen kann das Zugkraftniveau während einer Schaltung nicht konstant gehalten werden. Der Abfall des Abtriebsmoments liegt bei der augenblicklichen Auslegung bei bis zu 60%.

Boosten, Laden und Rekuperation sind vor allem beim Fahren in einem Gang möglich. Die Grenzen werden durch die Dimensionierung der Komponenten gesetzt.

Während eines Gangwechsels kann geboostet und rekuperiert werden. Die Grenzen dafür liegen niedriger als beim Fahren in einem Gang.

2.14.6 AP 11.6 Wissenschaftliche Erkenntnisse

In konventionellen LKW-Antrieben werden Getriebe mit 8 bis 18 Gängen verwendet. Diese Antriebe lassen sich durch Integration einer E-Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe hybridisieren, wobei der Bauraum wächst. Das GEM-Konzept von Scania ist eine neuartige Getriebegeneration, genannt DHT-Getriebe, bei dem der mechanische Aufwand reduziert wurde um Platz zu schaffen für zwei leistungsstarke E-Maschinen. Diese werden zur Zugkraftunterstützung und Synchronisierung im hybridischen Fahren genutzt. Hierfür ist eine HV-Batterie mit wenig Energieinhalt ausreichend, da eine E-Maschine motorisch und die zweite E-Maschine generatorisch betrieben wird. Darüber hinaus bietet das Konzept die Möglichkeit in fünf Gängen batterieelektrisch zu fahren. Die Umsetzung der Getriebestruktur wurde im Bauraum des konventionellen Getriebes realisiert.

Um bei Verwendung einer kleinen Batterie hybridisch sowie elektrisch zu fahren und ohne Zugkraftunterbrechung zu schalten, ist die gewählte Struktur mit zwei E-Maschinen und zwei Planetengetrieben gut geeignet.

2.15 AP 12: Datenlogging und –analyse

2.15.1 Inbetriebnahme und Betrieb der Datenlogger

Für das Datenlogging wurden auf Grund der Anforderungen zwei verschiedene Datenlogger parallel verbaut. Es ist notwendig im Bedarfsfall alle von den verfügbaren CAN-Bussen übertragenen Daten zur Verfügung zu haben. Dies ist der Fall bei Inbetriebnahmen, Fahrzeug- und Komponenten-Tests sowie wenn das System Fehlersituationen feststellt. Dabei entstehen sehr große Datenmengen.

Dem gegenüber steht der Anspruch schnell verfügbare Informationen zum Status des Fahrzeuges zu haben. Diese sollen möglichst zeitnah nach der Erfassung dem Projektteam zur Verfügung stehen. Da das Fahrzeug an unterschiedlichen Orten unterwegs ist, soll der Datentransfer mittels Mobilfunk geschehen.

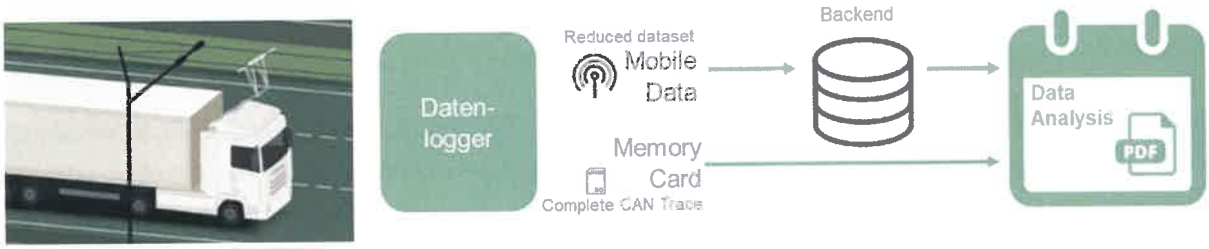


Abbildung 170: Datenaufnahme und -transfer

Im Oktober 2021 wurde auch der zweite Oberleitungs-LKW „ElPancho" während Inbetriebnahme-Tests von Scania in Groß-Dölln mit diesen Datenloggern ausgestattet.

Abbildung 171: Datenlogger Einbau im ElPancho

26. JULI 2022

2.15.2 Datenmenge

	LKW 1 - ElCamino	LKW 2 - ElPancho
Zeitbereich der Aufzeichnungen	23.06.2019 - 01.12.2021	01.09.2021 - 15.12.2021
Kilometerstand bei Messungsbeginn	3187 km	2600 km
Kilometerstand bei Messungsende	42251 km	4027 km
Aufgezeichnete Datenmenge Online-Logging	109 GB	3 GB
Bandbreite der Aufzeichnung pro Stunde Online Logging	~25 MB / h	
Aufgezeichnete Datenmenge Offline-Logging	180 GB	8GB
Bandbreite der Aufzeichnung pro Stunde Offline Logging	~100 MB / h	

Abbildung 172: Übersicht der erhobenen Datenmenge

2.15.3 Begleitende Diagnose

Die Nutzung von aufgezeichneten CAN-Daten, stellt für die begleitende Diagnose eine wichtige Grundlage dar. Die Fahrzeugdaten müssen dafür aufbereitet werden, damit die Daten später ganzheitlich betrachtet werden können.

Hierzu werden die Daten hinsichtlich Werte- und Zeitbereich plausibilisiert und mit Metadaten angereichert. Die Rohdaten werden dazu in ein Datenformat konvertiert, das sich, in diesem Fall mit der Software Matlab, effektiv weiter verarbeiten lässt.

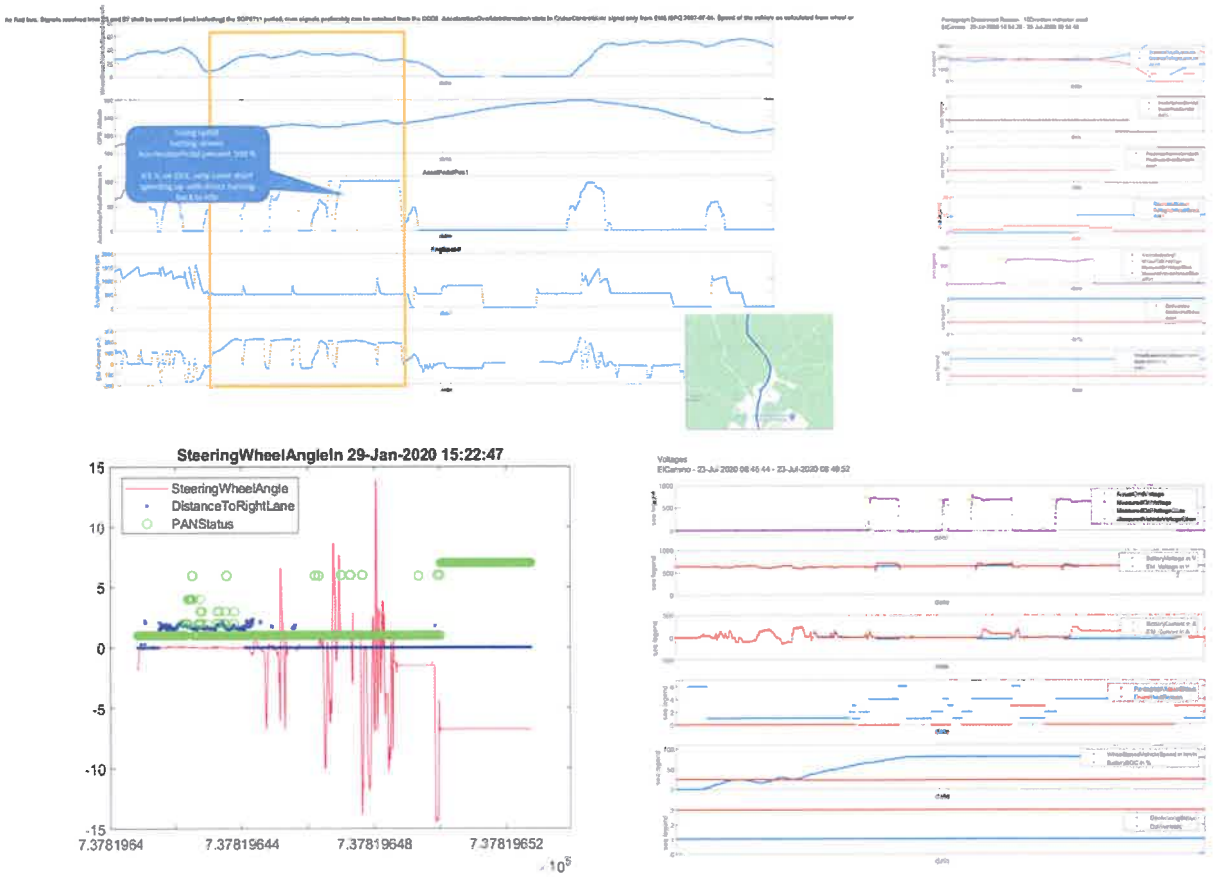


Abbildung 173: Analysebeispiele

Für einzelne Situationen sind zu dem jeweils angepasste Analysen notwendig. In Abstimmung mit jeweiligen Arbeitspunkten bestanden diese aus detaillierten Analysen der Daten hinsichtlich :

- Analyse der Spannungslagen im LKW in unterschiedlichen Situationen
- Wirkungsgradanalyse des Antriebstrangs um Vergleiche zwischen den beiden unterschiedlichen Architekturen der LKW durchzuführen
- Analyse der Abkoppelsituationen und deren Ursachen,
- Analyse des Verhaltens des Lane bzw. Catenary Keep-Assist, da hier ungewöhnlich viele Abkoppelvorgänge verursacht wurden,
- Elektrisches Fahrverhalten beim Bergauffahren,
- Analyse zu den benötigten Zeiten / Strecken, bis der LKW an der Oberleitung angekoppelt hat,
- Analyse der Daten bei den, mit den LKWs aus dem begleitenden Flottenprojekt, durchgeführten Forschungsfahrten
- Fahrprofilanalyse zur Unterstützung der Untersuchung zur akustischen Emission der beiden unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen

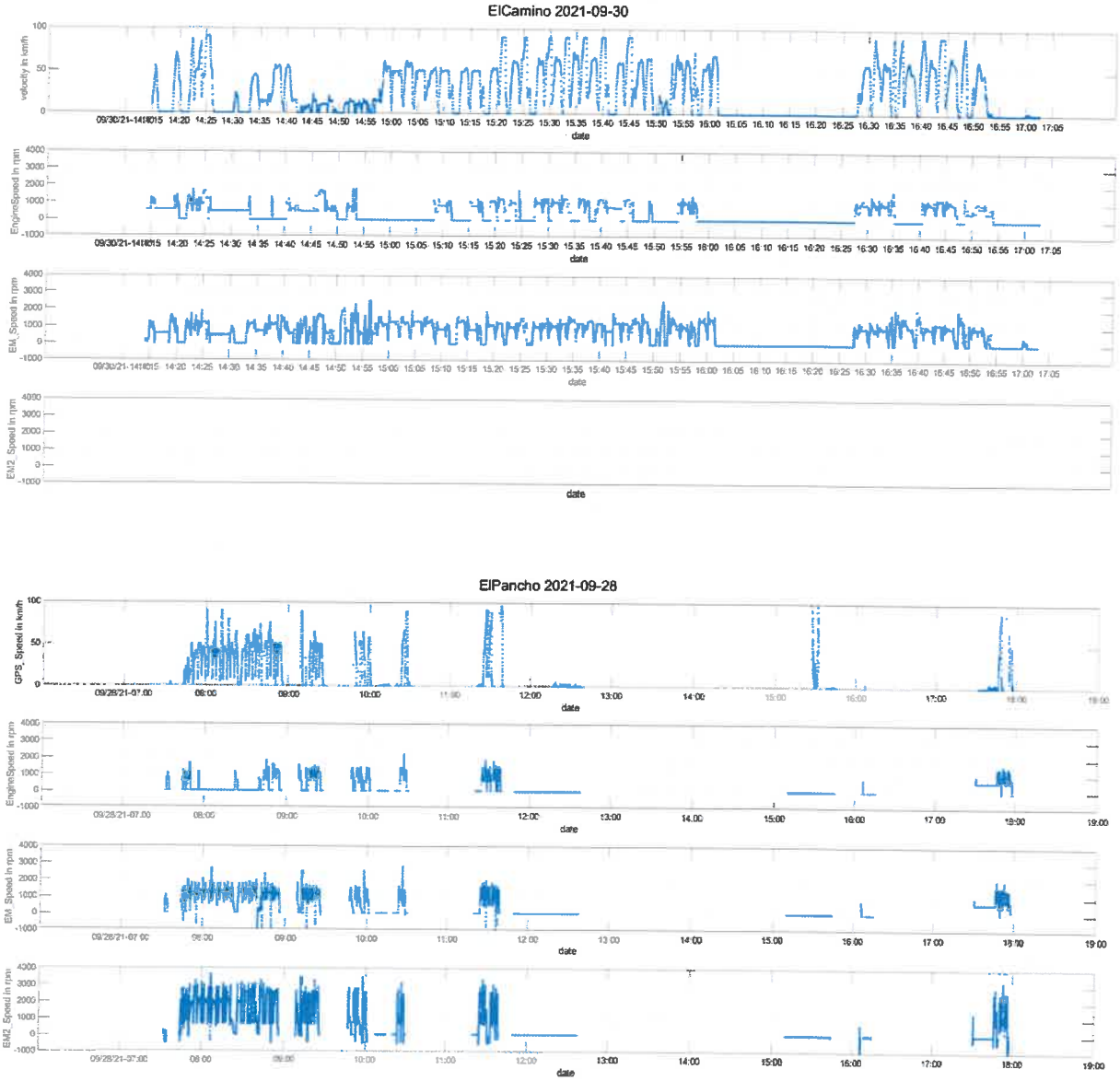


Abbildung 174: Vergleich der Fahrprofile ElPancho und ElCamino zur Akustikbewertung

Neben den Einzelanalysen werden regelmäßig Reports zum allgemeine Verhalten des Fahrzeuges erstellt. Diese Berichte erfolgen zum großen Teil automatisiert und in zyklischen Abständen. Hier geht es vor allem um Daten wie Fahrleistungen und umgesetzte Energien.

2.15.3.1 Digitales Fahrtenbuch zur Dokumentation der Streckennutzung

Für die Nutzung der öffentlichen eHighway Projektzonen in Hessen und Schleswig-Holstein wurde eine Dokumentation in Form eines digitalen Fahrtenbuches angelegt. Aus den im Fahrzeug erhobenen Daten konnte damit detailliert dargestellt werden in welchem Zeitraum und in welcher Fahrtrichtung der entsprechende Versuchsträger der Volkswagen AG auf der Oberleitungsstrecke unterwegs war.

Fahrtenbuch für eHighway Nutzung

Datum : 24.07.2020
Fahrzeug : Oberleitungs – LKW
OF - CA 3000 (El Camino)
Fahrer : Mitarbeiter der Volkswagen-AG

Einfahrt eHighway	Ausfahrt eHighway	Richtung	Kommentar
08:04	08:40	S	
08:47	08:51	N	
08:54	08:59	S	
09:06	09:10	N	
09:13	09:17	S	
09:24	09:28	N	
09:30	09:34	S	
09:42	09:46	N	
09:48	10:24	S	
10:31	10:35	N	
10:38	10:46	S	
11:15	11:19	N	
11:21	11:44	S	
11:51	11:58	N	
12:01	12:47	S	
12:54	12:57	N	letzte Fahrt

Die Zeiten wurden durch den im Fahrzeug verbauten Datenlogger erfasst und das Fahrtenbuch elektronisch erstellt.

Wolfsburg, 24.07.2020

Abbildung 175: elektronisches Fahrtenbuch zur eHighway-Nutzung

2.15.4 Unterstützung bei der Auslegung von Infrastruktur und Fahrzeug

Die Daten aus dem Fahrzeug dienen als Quelle für Analysen hinsichtlich der Effizienz des Antriebstranges. Zu diesem Zwecke wurden bereits das Wirken der Antriebskomponenten Batterie, E-Maschine, DCDC in den unterschiedlichen Fahr-Modi ausgewertet.

26. JULI 2022

Im Verlaufe des Projektes gab es mehrere Möglichkeiten den LKW im Verbund mit weiteren Oberleitungs-LKWs aus dem parallel laufenden Flottentest zeitgleich in den eHighway – Projektzonen einzusetzen. Die dabei entstandenen Wechselwirkungen wurden analysiert und mit den Projektpartnern diskutiert.

2.15.5 Datenschutz

Große Aufmerksamkeit erfährt der Datenschutz in diesem Projekt. Unter den vielen Daten des Fahrzeuges, die aufgenommen werden, befinden sich einige, die als personalisierte Daten klassifiziert werden. Dazu zählen z.B. Fahrprofil-relevante Daten (Geschwindigkeit, GPS und andere), die in Verbindung mit dem Fahrtenbuch eine Personenbezug zulassen. Dieses Thema wird ausführlich durch die bei Volkswagen DSGVO-relevanten Prozesse begleitet und bearbeitet.

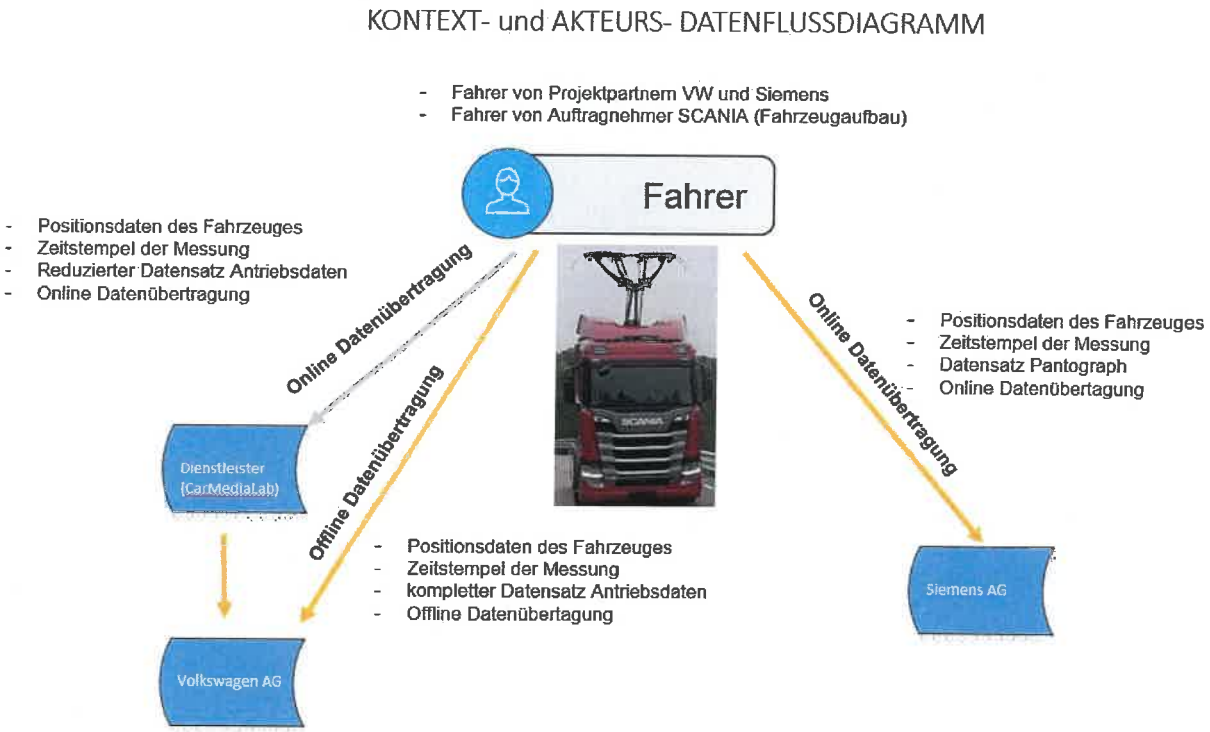


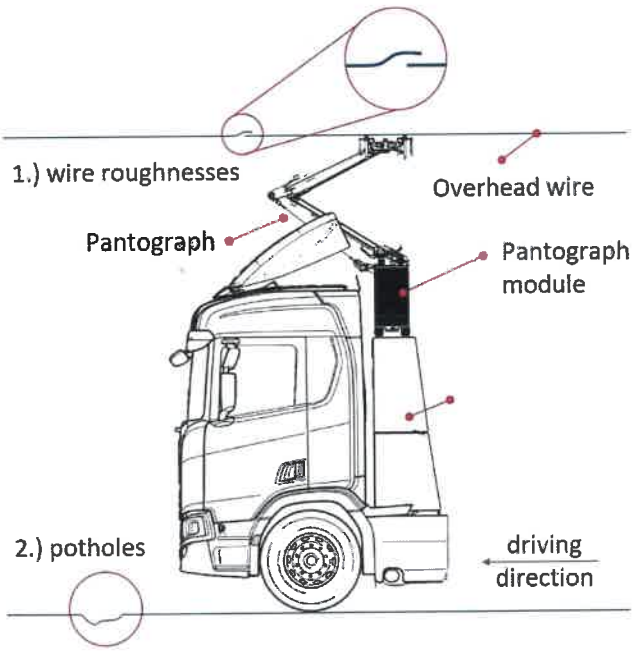
Abbildung 176: Auszug aus Datenflussdiagramm hinsichtlich Datenschutz

2.16 AP 13a: Fahrzeuginbetriebnahme, Test und Applikation

Das Arbeitspaket 13a behandelt unterschiedliche fachspezifische Umfänge. Mit dem Fokus auf Fahrzeugerprobungen waren Anteile bei den Inbetriebnahmen der Fahrzeugs auf dem Prüfgelände in Groß Dölln vorgesehen, sowie die Koordination und Durchführung späterer Untersuchungskampagnen am Fahrzeug. Der Schwerpunkt des Arbeitspakets liegt allerdings nicht im ersten Projektjahr.

Während der Erstinbetriebnahme des Typ 1 LKW in Groß Dölln im Oktober 2018 wurden gemeinsam mit Kollegen von Scania Erfahrungen zum Ablauf und Umfang des Inbetriebnahme-Prozesses ausgetauscht. Entgegen den vorherigen Annahmen ließen sich allerdings nur wenige PKW-typische Prozessschritte für die LKW nutzen.

Des Weiteren sind im Herbst Planungen für Messungen am HV-System angelaufen. Wie sich bei ersten Inbetriebnahme-Fahrten heraus stellte, benötigt die Einkopplung der elektrischen Energie des Pantografen in das bestehende HV-Netz des Hybrid-LKWs besondere Aufmerksamkeit. In diesem Zusammenhang wurde aus elektrotechnischer Sicht als potenziell kritisch die Situation eingeschätzt, wenn der Kontakt zum Fahrdraht spontan und schlagartig abbricht. Dies kann bspw. beim Durchfahren von Schlaglöchern der Fall sein, oder bei Unebenheiten in der Oberfläche des Fahrdrahts.



Hierbei wird vermutet, dass es durch Schwankungen in der Speisespannung zu Abschaltungen von Komponenten im HV-Netz kommen könnte. Messungen, die als Grundlage zur Beurteilung des Systemverhaltens dienen, wurden 2019 durchgeführt.

Zu den vorbereitenden Maßnahmen für das Arbeitspaket 13a gehörte im Jahr 2019 unter anderem die Ausbildung und Einweisung der Versuchsfahrer. LKW-Fahrerlaubnisse waren teils vorhanden oder wurden erworben. Spezifische Einweisungen umfassten den Umgang mit dem Trailer (Aufsatteln, Absatteln) sowie den Umgang mit dem Pantograph (Fahren unter der Oberleitung, Bedienung und Wartung). Während allgemeine Einweisungen und Fahrten auf dem Volkswagen Testgelände in Ehra-Lessien durchgeführt werden konnten, wurde für Oberleitungs-spezifische Umfänge das Siemens-Testgelände in Groß Dölln genutzt. Für die Entwicklung des Systems Oberleitungs-LKW ist dieser Aspekt nicht zu vernachlässigen. Obwohl einzelne öffentliche Pilot-Strecken (Hessen, Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg) inzwischen realisiert sind, beschränkt sich die Verfügbarkeit eines Testgeländes, in dem aktiver Oberleitungs-Betrieb erprobt werden kann, auf einen einzigen Standort.

Im Projektverlauf waren daher teils Transfer-Fahrten erforderlich um beispielsweise LKW zum Prüfgelände Groß Dölln zu überführen oder von dort zu Präsentationen oder Versuchen an anderen Orten. Auch diese Transfer-Fahrten wurden teils zur Durchführung von Messungen genutzt. Explizite Versuchsfahrten erfolgten auf der Oberleitungs-Pilot-Strecke in Hessen, aber auch auf dem Volkswagen Prüfgelände Ehra-Lessien sowie zur Untersuchung des Topographie-Einflusses im Harz beziehungsweise Elm.

Anfängliche Fahrten dienten teils der Fehlersuche von unerwartetem Abbügeln (Verlust des Kontakts zur Oberleitung). Letztlich konnten hier Mängel in der CAN-Signalqualität aufgedeckt und kurzfristig

behoben werden. Eine grundlegende Optimierung der CAN-Verkabelung in der Kabine inklusive der Installation einer neuen Box zum CAN-Abgriff wurde 2020 ausgeführt.

Ein anderer Umfang anfänglicher Arbeiten betraf das sogenannte Geo Fencing. Für die Oberleitungs-Pilot-Strecke in Hessen mussten am Versuchs-LKW Einstellungen vorgenommen werden, damit dieser das Ankoppeln an eine Oberleitung freigibt. Dies geschieht durch eine GPS-Lokalisierung des LKW und Abgleich mit Daten über Oberleitungs-Strecken, die entsprechend dem Ausbauzustand aktualisiert werden müssen. Ein Umstand, der auch in einer potentiellen Serien-Anwendung von Oberleitungs-LKW bei gleichzeitig wachsender Infrastruktur zu beachten wäre.

Zur Unterstützung des Arbeitspakets 9 erfolgte eine Mess-Kampagne zur Ermittlung von Leiter-Temperaturen. Hierfür wurden Hochlast-Fahrten bei hohen Außentemperaturen durchgeführt. Ferner erfolgte eine hochfrequente Messung von Strömen und Spannungen im Hochvolt-Bordnetz. Die zugehörigen Fahrsituationen betrafen das An- und Abbügeln, eine Variation von Geschwindigkeit und Betriebsarten (High Power Mode / Low Power Mode) sowie der Last (mit/ohne Trailer). In Bezug auf die Infrastruktur wurde der Abstand zum Unterwerk variiert und dessen Auswirkung beurteilt sowie ein Betrieb mit mehreren LKW im selben Speise-Abschnitt durchgeführt.

Im Arbeitspaket 13a – Fahrzeuginbetriebnahme, Test und Applikation wurden im Jahr 2020 eine Reihe von Fahrversuchen mit verschiedenen Zielstellungen geplant und durchgeführt. Als Versuchsfahrzeug wurde dabei der Typ I OL-LKW „El Camino“ eingesetzt. Die folgende Aufzählung zeigt die verschiedenen Versuchsaktivitäten mit und ohne Fahrzeug mit dem Bezug zu den entsprechenden Arbeitspaketen:

26. JULI 2022

- Untersuchungen zur Kontaktunterbrechung am Pantographen (AP13a)
- Messungen zum Erdungs- bzw. Ableitwiderstand des Fahrzeugs sowie Untersuchungen zum Einsatz einer Messeinrichtung für Differenzströme bei Aufschaltung von Isolationsfehlern (AP9)
- Messungen zur Identifikation der elektrischen Parameter von Fahrzeug und Versuchsanlage Groß Dölln (AP8)
- Ausrollversuche zur Identifikation von Fahrzeugparametern (AP1b)
- Fahrten im Harz zur Aufnahme von Messdaten bei Steigungen und Gefälle (AP14)
- Teilnahme an der Forschungsfahrt auf dem ELISA eHighway in Hessen im Juli 2020 zur Analyse des Verhaltens der Testanlage bei Vorhandensein mehrerer Fahrzeuge bzw. Durchführung von Kolonnenfahrten
- Allgemeine Inbetriebnahme- und Testaktivitäten hinsichtlich des Betriebsverhaltens (An- und Abbügeln, Bewertung von Spurhalteassistent und Fahrverhalten)
- Fehlersuche am ausgefallenen Luftkompressor (EACS)
- Auffinden und Beseitigen einer Leckage im Kühlmittelkreislauf. Ein Blindstopfen ist porös geworden.

Als Beispiel für die durchgeführten Versuche sind im Folgenden Untersuchungen vorgestellt, die das Verhindern von Überspannungen nach Kontaktunterbrechung des Pantographen zum Ziel haben. Generell äußert sich die Unterbrechung des Schleifleistenkontakts im Zusammenbrechen der Spannung am Pantographen. Bei der Wiederkontaktierung ergibt sich durch den entladenen Fahrzeug-Zwischenkreis das Problem eines nahezu unbegrenzten Inrush-Current bzw. im Zusammenhang mit dem Induktivitätsbelag der Fahrleitung, der in Abhängigkeit von der Distanz des Fahrzeugs zur Speisestelle zu einer hohen Leitungsinduktivität führt, zur Ausbildung eines Schwingkreises. Durch das Wiederkontaktieren des Pantographen ergibt sich ein Einschwingvorgang, der zu einer Spannungsüberhöhung führen kann. Dies kann messtechnisch und durch Simulation gezeigt werden.

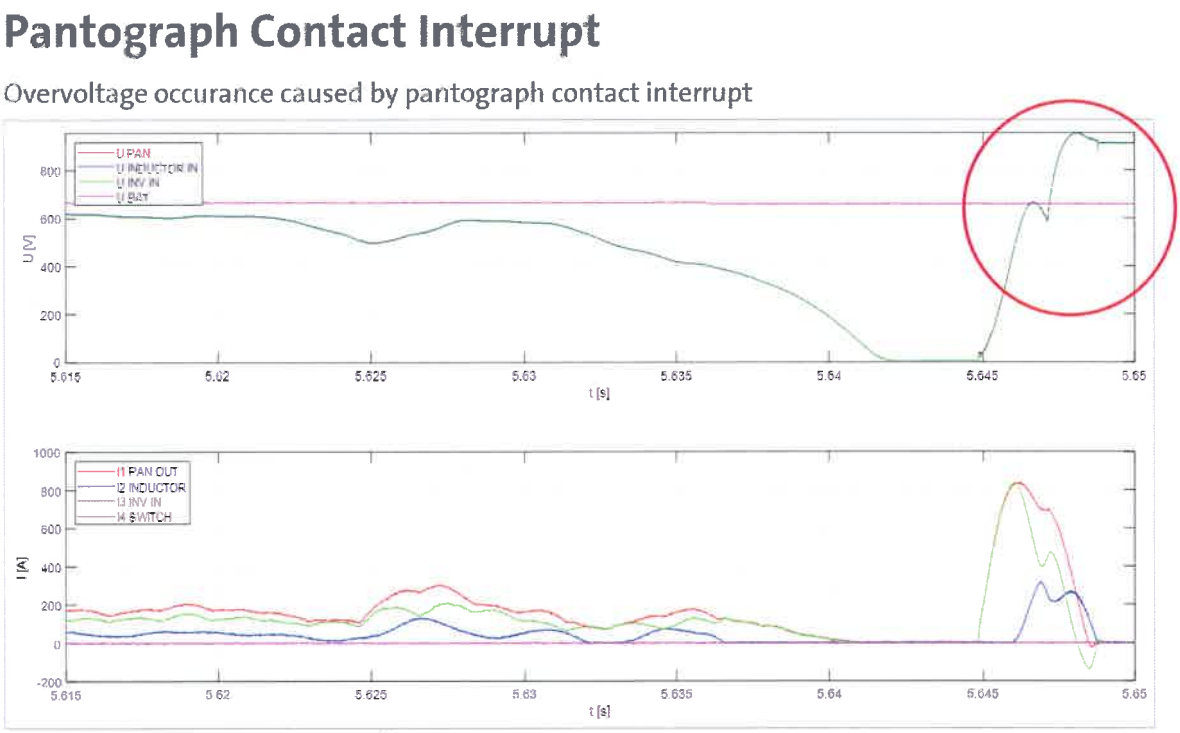


Fig. 1: El Camino measurement, Gross Dölln 2019-07 #0012

26. JULI 2022

Pantograph Contact Interrupt

Overvoltage occurance caused by pantograph contact interrupt

Transient overvoltage can be explained by oscillator circuit simulation

Decreasing the inrush current can help reducing the overvoltage issue

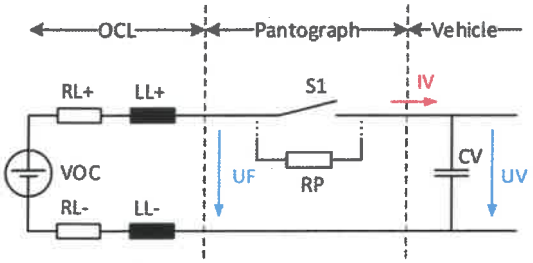


Fig. 2a: Oscillator circuit established by OCL and vehicle

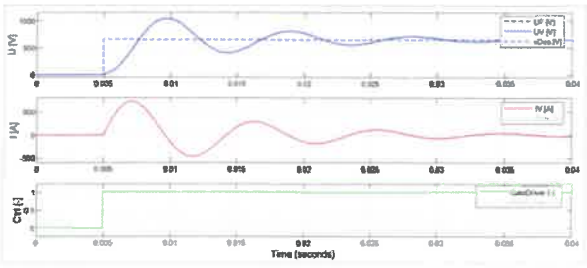


Fig. 2b: Oscillator circuit simulation – switching process

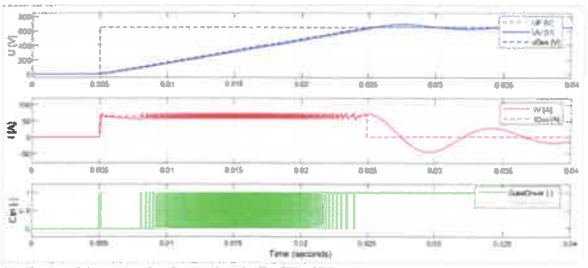


Fig. 2c: Simulation – two level current controller (RP = 10Ω)

Ein möglicher Lösungsansatz zur Vermeidung des Überspannungsproblems ist die Reduzierung des Einschaltstroms. Hierzu wurden verschiedene Verfahren entwickelt und erprobt. Zum Beispiel wurde ein Verfahren mit einem getaktet angesteuerten Schaltelement untersucht. Bei der Wiederkontaktierung wird ein Stromregler aktiviert, der die Ansteuerung des Schaltelements in der Weise kontrolliert, dass sich ein reduzierter Strom einstellt, womit sich die Amplitude des Einschwingens der Spannung reduzieren lässt.

Vehicle Setup and Measurements

Objective: Reducing overvoltage by controlling vehicle precharge current

El Camino setup cw09/2020 Gross Dölln

S1: IGBT switch 1200V/400A; Configurable snubber/precharge resistor RP

Transient overvoltage reduced

Permanent overvoltage issue exists

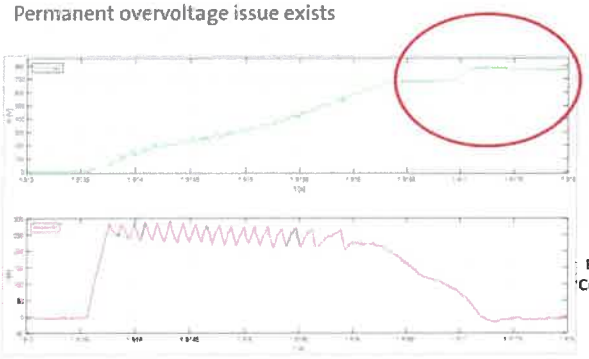
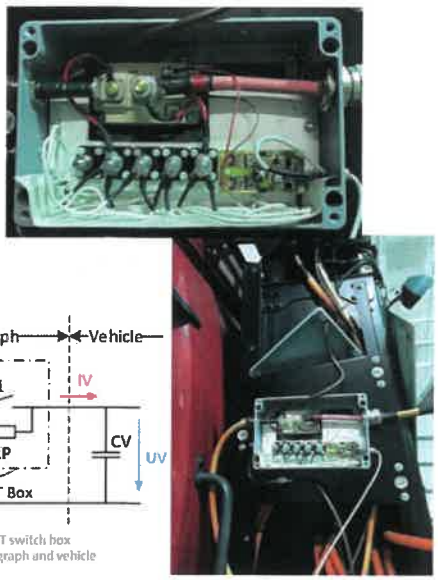


Fig. 3a: Vehicle measurement - Desired current IV(Des) = 250A, RP = 2.5Ω



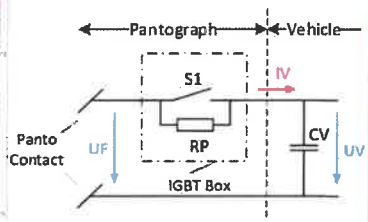
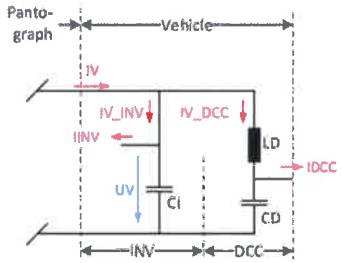


Fig. 3b-d: Vehicle setup: IGBT switch box installation between pantograph and vehicle

26. JULI 2022

Inverter Drain Current, Conclusion and Next Steps



$$IINV = IV_{INV} - \frac{dUV}{dt} CI$$

$$CI = 1.08mF$$

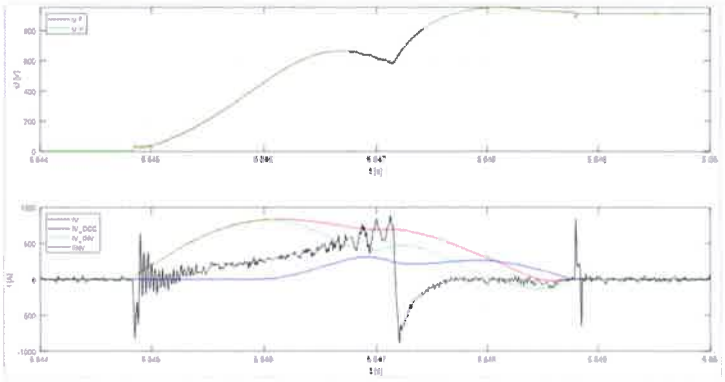


Fig. 4a,b: Inverter drain current calculation

Transient overvoltage can be reduced by precharge current control
Permanent overvoltage assumed to be caused by inverter issue
Inverter behavior to be investigated → Scania (purchase part)

Das Verfahren wurde simulativ und im Fahrzeugversuch untersucht. Grundsätzlich ließ sich am Fahrzeug die Funktion der Stromregelung und der darauf basierten Spannungsführung nachweisen. Allerdings gelangte man zu der Erkenntnis, dass das Überspannungsproblem nicht auf diese Weise behoben werden kann. Daraufhin durchgeführte Berechnungen ergaben, dass das Verhalten der im Fahrzeug verbauten Komponenten ebenfalls zum Auftreten der Überspannungen beitragen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen wurden dem Fahrzeughersteller kommuniziert und werden dort weiterverfolgt.

Eine Versuchstätigkeit zur Validierung von simulativen Arbeiten betraf die maximale Pantographenleistung. Diese wurde für die Simulationen mit 440kW angenommen, nämlich der Summe aus 260kW E-Maschinen-Leistung und 180kW DC-Wandler-Leistung. Es wurde also die Möglichkeit unterstellt, gleichzeitig mit voller elektrischer Leistung zu beschleunigen und parallel dazu die Batterie zu laden. Aufgrund der späten und nicht vollständigen Verfügbarkeit des Typ-2-LKW (El Pancho) im Projekt, konnte diese Annahme nicht ausführlich untersucht werden. Im Rahmen von Stichversuchen konnte jedoch eine Pantographenleistung von 360 kW realisiert werden.

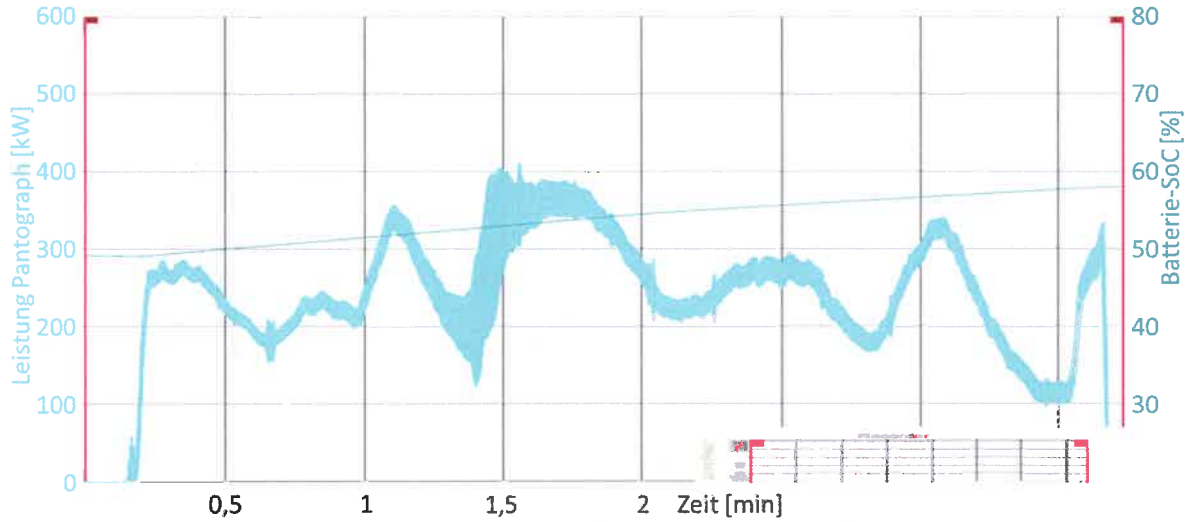


Abbildung 177: Über den Pantographen fließende Leistung und Batterie-SoC in einer Versuchsfahrt

26. JULI 2022

Ein Beispiel hierfür ist in **Abbildung 177** gezeigt. Hier wird über einen Zeitraum von mehreren Minuten hinweg die Batterie mit hoher Leistung geladen, wie am steigenden State of Charge der Batterie erkennbar ist. Gleichzeitig bewegt sich das Fahrzeug auf der Autobahn im fließenden Verkehr. Dabei wird über den Pantographen kurzzeitig eine Leistung von über 400kW ins Fahrzeug übertragen. Mehrere Sekunden lang wird eine mittlere Leistung von etwa 360kW übertragen.

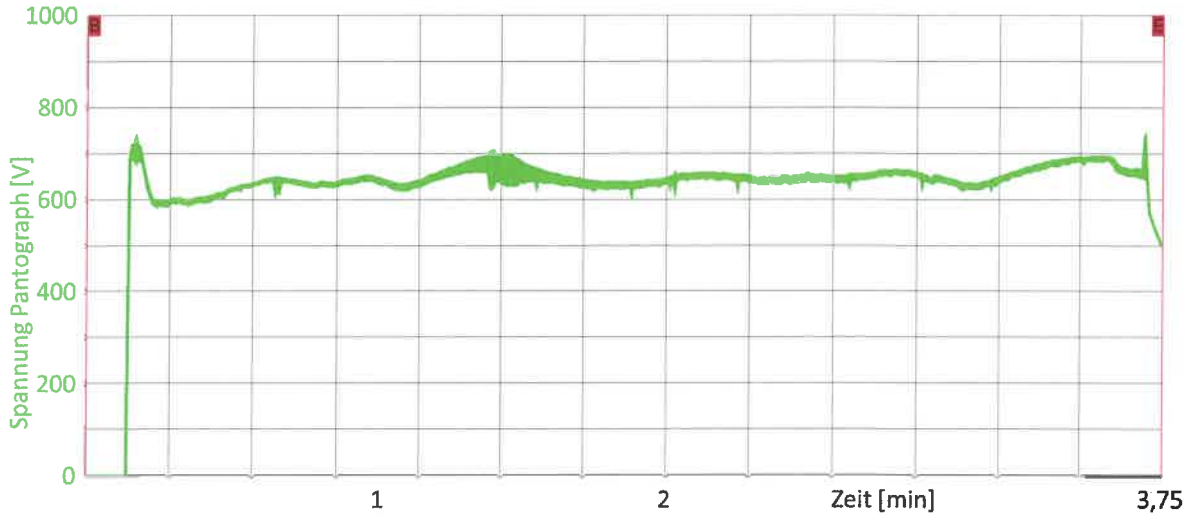


Abbildung 178: Am Pantographen anliegende Spannung während einer Versuchsfahrt mit hoher Leistungsentnahme aus dem Oberleitungs-Netz

In **Abbildung 178** kann der Verlauf der Versuchsfahrt anhang der am Pantographen anliegenden Spannung nachvollzogen werden. Beim Anbügeln steigt die Spannung zunächst auf den Leerlauf-Wert, hier etwa 700V. Anschließend ist erkennbar, dass bei großer Leistungsentnahme (vgl. **Abbildung 177**) die Spannung tendenziell absinkt, phasenweise bis auf etwa 600V. Dieser Zusammenhang ist im Verlauf der Messung nicht überall gleich. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der (in der Messung nicht dargestellte) Spannungsabfall auf der Leitung zwischen Unterwerk und LKW von deren Entfernung zueinander abhängt, die sich während der Messung fortwährend ändert. Kurz vor Ende der Messung wird der Pantograph von der Oberleitung abgebügelt, so dass die Spannung steil abfällt.

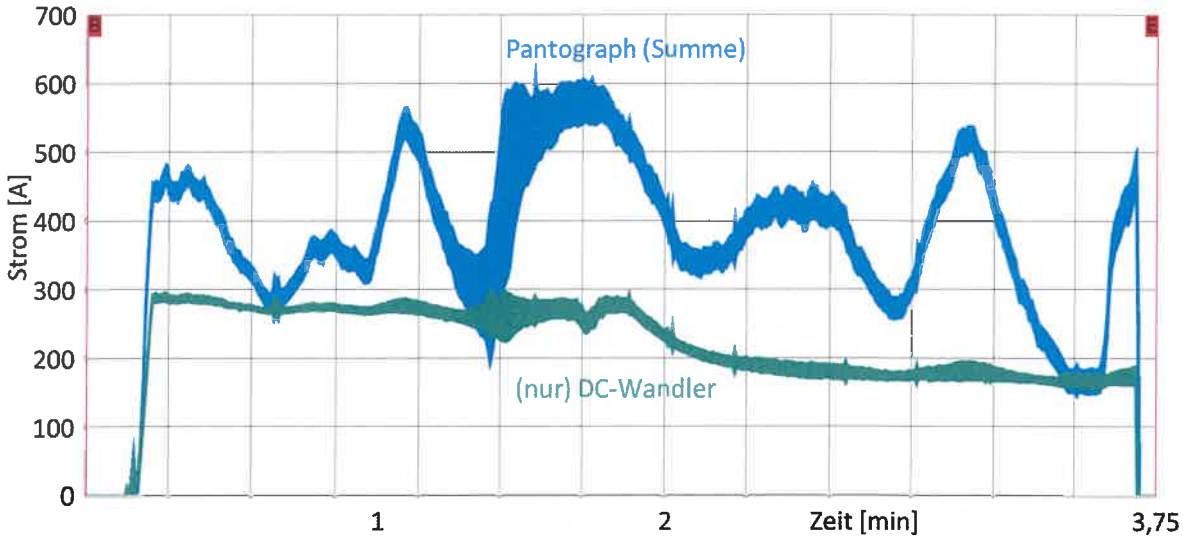


Abbildung 179: Darstellung des Pantographen-Stroms, zusammen mit dem Anteil, der für die Batterie-Ladung verwendet wird, in einer Versuchsfahrt mit hoher Leistungsentnahme.

26. JULI 2022

Ein weiterer Erkenntnisgewinn lässt sich aus **Abbildung 179** erzielen. Für die exemplarische Versuchsfahrt ist hier in blau der insgesamt über den Pantographen fließende Strom dargestellt. Der für die Batterie-Ladung verwendete Strom (DC-Wandler) ist in grün dargestellt. Dieser entspricht zunächst dem statisch applizierten Maximalwert. In der zweiten Hälfte greift hingegen eine Degrading-Funktion, so dass die Batterie etwas langsamer geladen wird.

Aufgrund des frühen Entwicklungsstands war hier softwareseitig der Summen-Strom auf 550A begrenzt, was relativ gut gelungen ist. Die systemseitige Stromgrenze von 600A wird nur kurzzeitig überschritten, wobei diese sogar als Dauerfestigkeit definiert ist. In zukünftigen Anwendungen könnte die fahrzeugseitige Strombegrenzung, zum Beispiel beim Beschleunigen oder Bergauf-Fahren, aufgeweitet werden. Die in der Simulation angenommene maximale Summen-Leistung von 440kW scheint insofern erreichbar. Insbesondere, falls Infrastruktur-seitig kürzere Abstände zwischen den Unterwerken oder eine höhere Leerlaufspannung (vgl. Abschnitt 2.12.1) realisiert werden.

2.17 AP 13b: Untersuchungen zur Akustik

2.17.1 Einleitung

Ziel des Arbeitspaketes 13b ist es, die Akustik der Scania Oberleitungs-LKWs zu dokumentieren, zu analysieren, Auffälligkeiten zu erkennen und ggf. akustische Optimierungsmaßnahmen vorzuschlagen. Das weitere Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung der akustischen Vorteile des rein elektrischen Fahrens mittels Hochvolt-Oberleitung oder Batterie gegenüber dem Fahren mit Verbrennungsmotor.

2.17.2 Vorgehen und Messdurchführungen

Die Vorbeifahrtmessungen der beiden Scania Oberleitungs-LKWs „El Camino“ und „El Pancho“ (siehe Abbildung 180) wurden auf dem Siemens-Testgelände in Groß Dölln mit einem PAK Messsystem MKII der Firma MüllerBBM durchgeführt. Die Akustikmessungen beinhalten einen direkten Vergleich (A – B Vergleich) der beiden Oberleitungs-LKWs. Dabei wurde der jeweilige Oberleitungs-LKW mit der zu dem Zeitpunkt aktuellen Bereifung, Software, Innenausstattungen und den gegebenen Vor-Ort-Randbedingungen auf dem Testgelände in Groß Dölln (Straßenasphalt, Umgebungsgeräusche einer nahegelegenen Großphotovoltaikanlage, Wind- und Wetterlage) untersucht.

Die untersuchten Fahrzeuge „El Camino“ und „El Pancho“ unterscheiden sich unter anderem in den verwendeten Elektromaschinen („El Camino“ 1x130kW, „El Pancho“ 2x130kW). Der Einfluss dieses Unterschieds auf die Akustik wurde in den Vorbeifahrtmessung bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich (siehe Kapitel 2.17.3 und 2.17.4).

Abbildung 180: links El Pancho, rechts El Camino auf dem Testgelände in Groß Dölln

Die Bestimmung der Schalldruckpegel für eine Vorbeifahrt erfolgte angelehnt an die DIN ISO 362-1 *„Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch"* und an die bereits in Vorgängerprojekten (ENUBA 2) durchgeführten Akustikmessungen. Nach der Norm DIN ISO 362-1 wird die beschleunigte Vorbeifahrt eines Fahrzeuges unter definierten Kriterien über einen vorgegebenen Messraum gemessen und ausgewertet. Der Einfachheit sowie besseren Vergleichbarkeit halber wurde statt der beschleunigten Vorbeifahrt die Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit untersucht. Analog zu DIN ISO 362-1 wurden die eingesetzten 1/2" Freifeld-Mikrofone vom Typ 4966-H-041 der Firma BRÜEL & KJÆR in einem Abstand von 7,5m zur Fahrbahnmitte und 1,2m über der Fahrbahnoberfläche aufgestellt (siehe Abbildung 181). Neben den beschriebenen Vorbeifahrtmessungen wurden zusätzlich Messungen im Stand mit eingeschalteter Antriebsmaschine durchgeführt. In den Standmessungen wurde der gleiche Aufbau wie für die Vorbeifahrtmessungen genutzt. Dazu wurde das Fahrzeug auf Höhe der Mikrofone zum Stillstand gebracht und die Messungen dort durchgeführt.

Bei den Vorbeifahrtmessungen wurden folgende Antriebsarten untersucht:

- „Diesel" - Fahren mit Verbrennungskraftmaschine (Diesel)
- „Diesel+OL" - Fahren mit Verbrennungskraftmaschine und Pantograph (Hybridmodus)
- „OL" - Fahren mit Bereitstellung der Energie über Pantograph (elektrischer Antrieb)
- „Batterie" - Fahren mit Bereitstellung der Energie über Batterie (elektrischer Antrieb).

Die gewählten Vorbeifahrtgeschwindigkeiten wurden angelehnt an die Vorgängerprojekte (ENUBA und ENUBA 2) mit 15, 50 und 90km/h festgelegt.

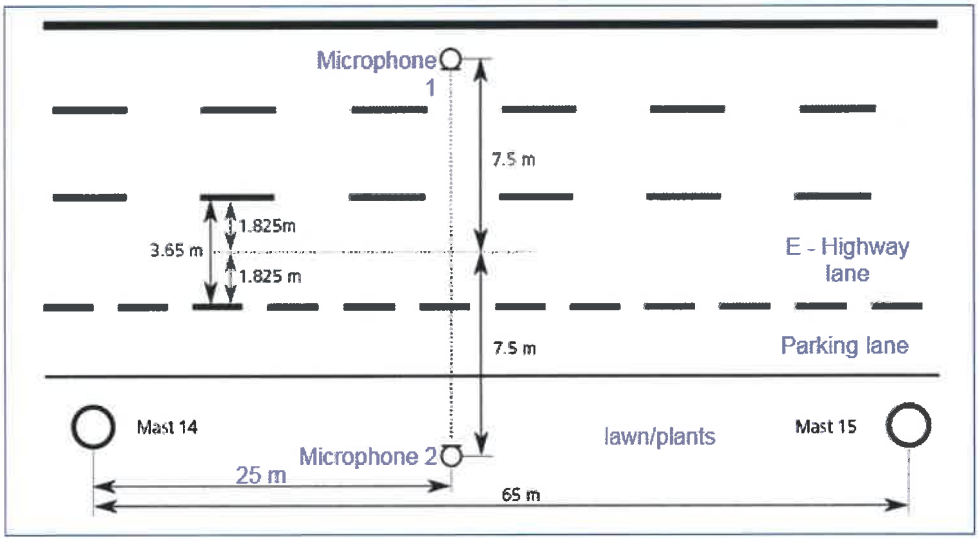


Abbildung 181: Position der Messmikrofone auf dem Testgelände in Groß Dölln

Ergänzend wurden Innenraummessungen durchgeführt. Dabei wurden zwei Mikrofone im Fahrerhaus verbaut, die einen Abstand von 1,1m zur Frontscheibe und 0,8m zum Kabinenboden haben und jeweils von der Mitte der Kabine 0,2m zu Fahrer und Beifahrer positioniert sind.
Für die Bewertung des Schalldrucks wurde sowohl bei den Innenraum- als auch bei den Vorbeifahrtmessungen der energieäquivalente Schalldruckpegel mit linearer Mittelung ausgewertet. Die Zeitkonstante wurde dabei bei allen Messungen mit 1s gewählt, da keine beschleunigte Vorbeifahrt gemessen wurde und somit der A-B Vergleich deutlicher ausgewertet werden kann. Die Auswertung der Messungen erfolgte mit der Auswertsoftware PAK von Müller BBM in der Version 5.9.

2.17.3 Vorbeifahrtmessungen „El Camino"

Im Herbst 2019 sind die ersten Vorbeifahrtmessungen mit dem Scania LKW „El Camino" in Groß Dölln durchgeführt worden. Dabei wurden überwiegend Vorbeifahrtmessungen, wie in Kapitel 2.17.2 beschrieben, mit und ohne Trailer an der Sattelzugmaschine durchgeführt. Der Einfluss des Sattelaufliegers bei den Vorbeifahrten mit konstanten Geschwindigkeiten erwies sich als gering.

Insgesamt wurden mindestens 3 Messungen zur Validierung durchgeführt. Da es sich bei den Messungen um Untersuchungen hinsichtlich Auffälligkeiten handelt, wurde auf eine größere Messmatrix verzichtet.

In den durchgeführten Vorbeifahrtmessungen beim „El Camino" ohne Trailer zeigte sich, dass in den Szenarien im Stand und mit sehr geringer Geschwindigkeit (15km/h) ein deutlicher akustischer Vorteil des Fahrens über die Oberleitung bzw. des Fahrens über die Batterie gegenüber dem Fahren mit angeschaltetem Verbrennungsmotor erzielt werden kann (siehe Abbildung 182 und Abbildung 183). In Abbildung 182 ist dabei der Schalldruckpegel in dB(A) im Stand auf der Fahrerseite (s. Abbildung 181 Mikrofon 2) dargestellt. Die rote Linie bei ca. 71dB(A) stellt den Schalldruckpegel im Stand bei laufendem Dieselmotor dar. In grün ist der Schalldruckpegel im Stand bei „Batteriebetrieb" dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass in diesem Zustand kein Elektromotor läuft, sondern es sich um die Umgebungs- und Nebenaggregatgeräusche, wie bspw. Lüfter handelt. Das erklärt auch den gravierenden Unterschied von 20dB(A) im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Betrieb. Das Vorgehen wurde dabei so gewählt, dass der LKW nach einer mehrere km langen Fahrt bis auf Höhe der Mikrofone mit dem jeweiligen Antrieb gefahren ist, dort gehalten hat und die Messungen durchgeführt wurden.

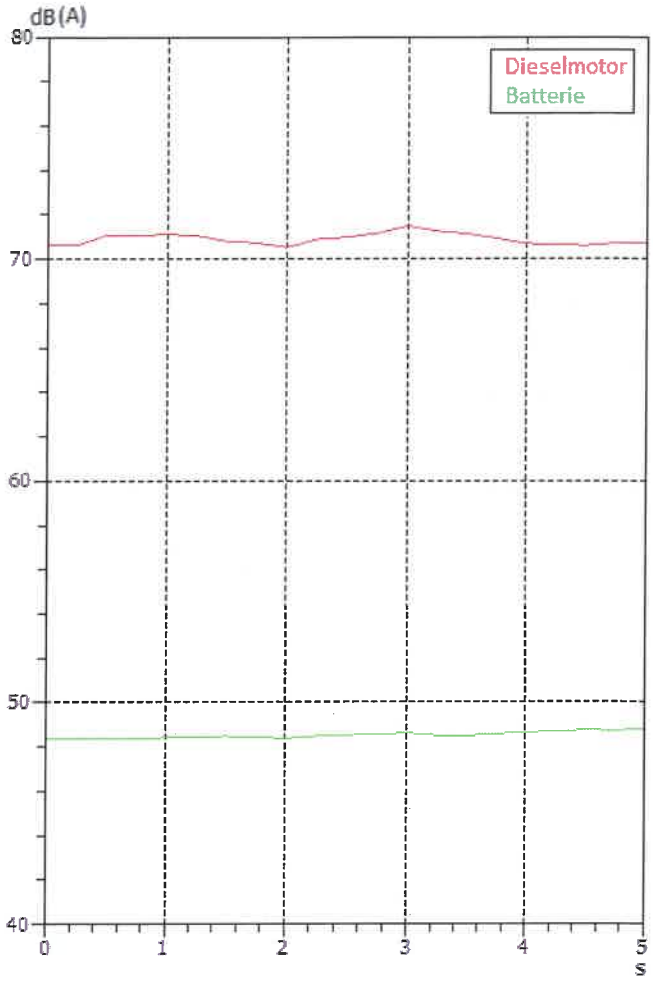


Abbildung 182: El Camino Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario Stand Fahrerseite

26. JULI 2022

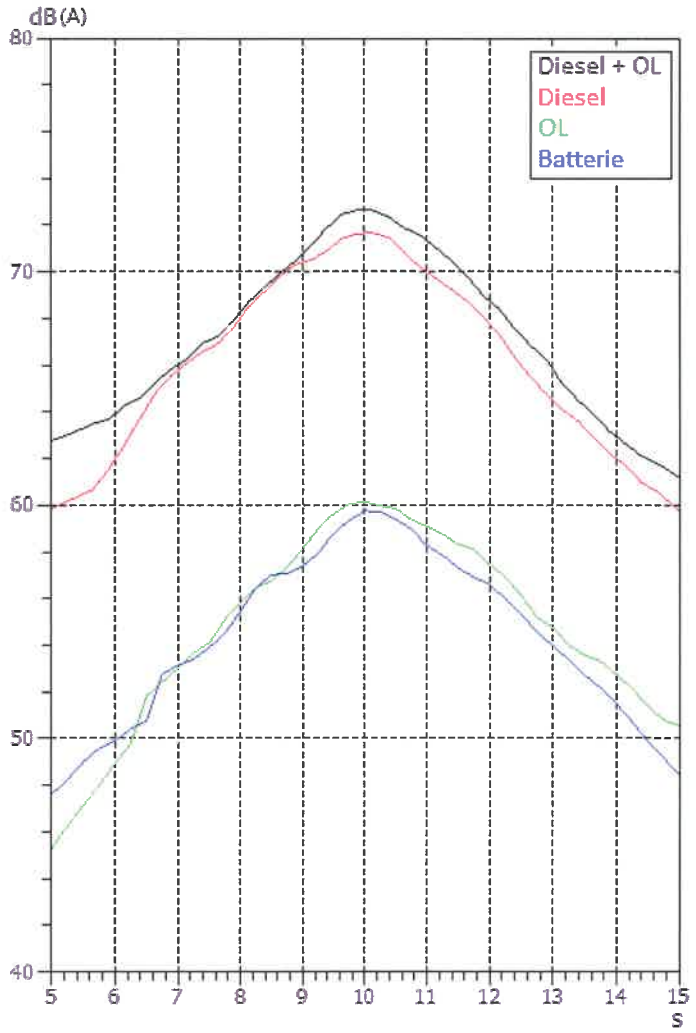


Abbildung 183: El Camino Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 15km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

Abbildung 183 zeigt den Schalldruckpegel in dB(A) in dem Szenario der Vorbeifahrt mit 15km/h. Am akustisch auffälligsten ist dabei die Kombination aus Fahren mit Dieselmotor und ausgefahrenem Pantographen. Die Differenz (ca. 1dB(A)) zum maximal auftretenden Schalldruckpegel im Betrieb mit Dieselmotor ohne ausgefahrenem Pantographen ist möglicherweise auf die Windgeräusche des ausgefahrenen Pantographen und auf die Messtoleranz zurückzuführen. Ein deutlicher akustischer Vorteil ist jedoch bei dem Betrieb über die Batterie (blaue Kurve) bzw. die Oberleitung (grüne Kurve) erkennbar. Der Betrag der Schalldruckpegeldifferenz im Vergleich zum Fahren mit Dieselmotor liegt bei >10dB(A). Somit ist festzuhalten, dass die Nutzung des elektrischen Antriebs deutliche akustische Vorteile bei niedrigen Geschwindigkeiten hat.

Zur Veranschaulichung ist ergänzend in Abbildung 184 ein Spektrogramm für das Szenario 15km/h der einzelnen genutzten Antriebsarten dargestellt. Dabei wird der zeitliche Verlauf des Frequenzspektrums dargestellt, wobei auf der Abszisse die Zeit und auf der Ordinate die Frequenz aufgetragen ist. Die dritte Dimension ist der Schalldruckpegel in dB, der die Intensität über die Farbe darstellt. Beispielsweise wird deutlich, dass beim Fahren unter der Oberleitung bei 15km/h (Spektrogramm unten links in Abbildung 184) ein schwaches akustisches Signal bei 6300 bis 6500Hz vorliegt. Dieses Signal fällt über die Zeit leicht ab (von 6500 auf 6400Hz) und es ist zu vermuten, dass es sich um ein Signal der Elektromaschine handelt. Diese Frequenz ist ebenfalls beim elektrischen Fahren mit Nutzung der Batterie (Spektrogramm unten rechts in Abbildung 184) erkennbar.

26. JULI 2022

Auch in diesen Spektrogrammen wird deutlich, dass bei niedrigen Geschwindigkeit das elektrische Fahren deutliche akustische Vorteile bietet, da die Werte des Schalldrucks bei Nutzung des Dieselantriebs (Spektrogramm oben links und rechts in Abbildung 184) über alle Frequenzen deutlich höher sind, als die Spektrogramme der Messungen mit Nutzung des elektrischen Antriebs (unten links und unten rechts in Abbildung 184).

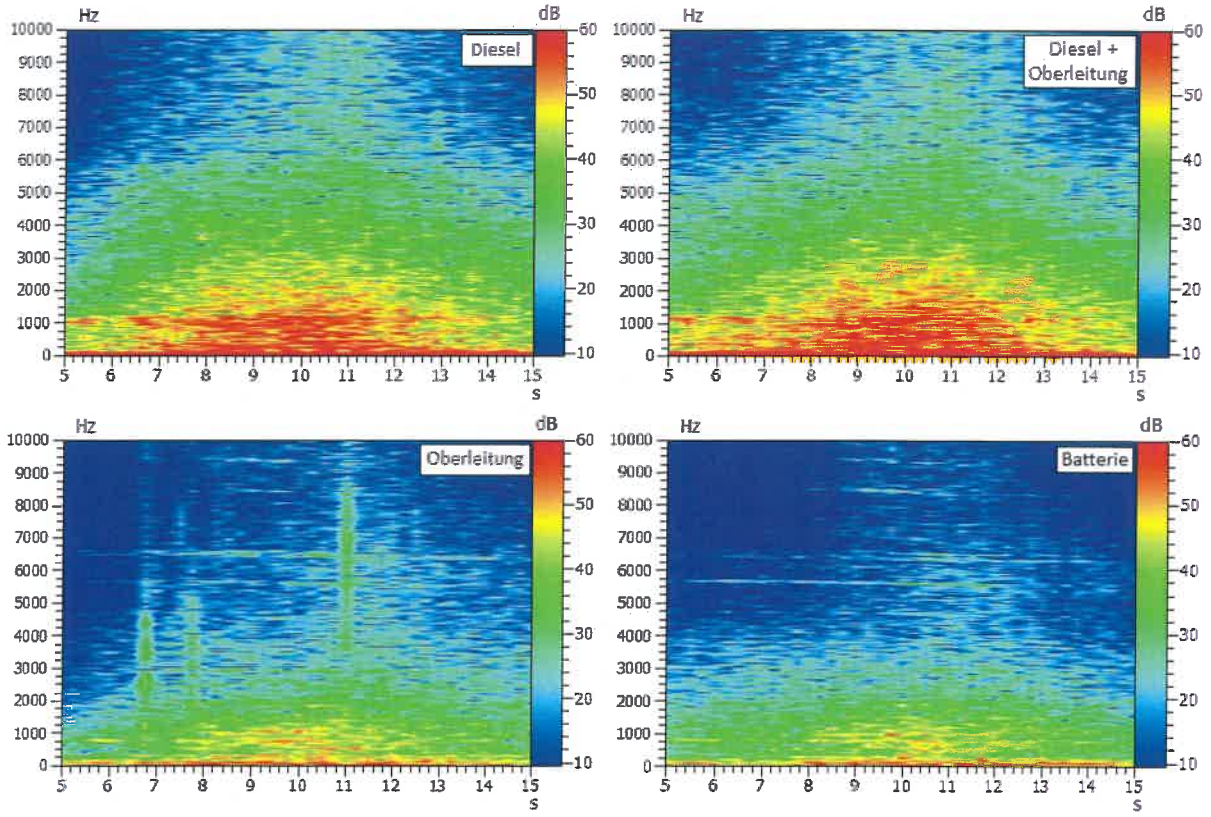


Abbildung 184: El Camino Spektrogramm für die Vorbeifahrt 15km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

In Abbildung 185 ist der zeitliche Verlauf des Schalldruckpegels in dB(A) bei einer Vorbeifahrt mit einer Geschwindigkeit von 50km/h dargestellt. Beim Auswerten der Messungen wird deutlich, dass sich bei steigender Geschwindigkeit die Differenz der Kurven und damit der akustische Vorteil deutlich reduziert. Das ist damit zu begründen, dass die Windgeräusche sowie die Abrollgeräusche der Reifen zunehmen.

26. JULI 2022

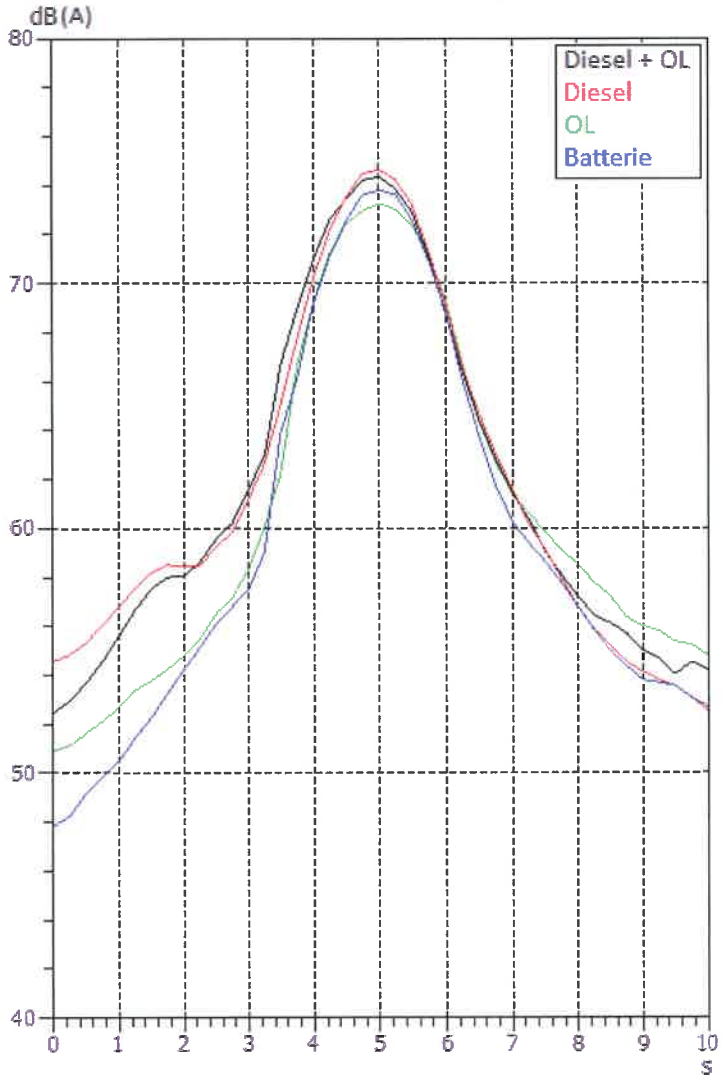


Abbildung 185: El Camino Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 50km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

26. JULI 2022

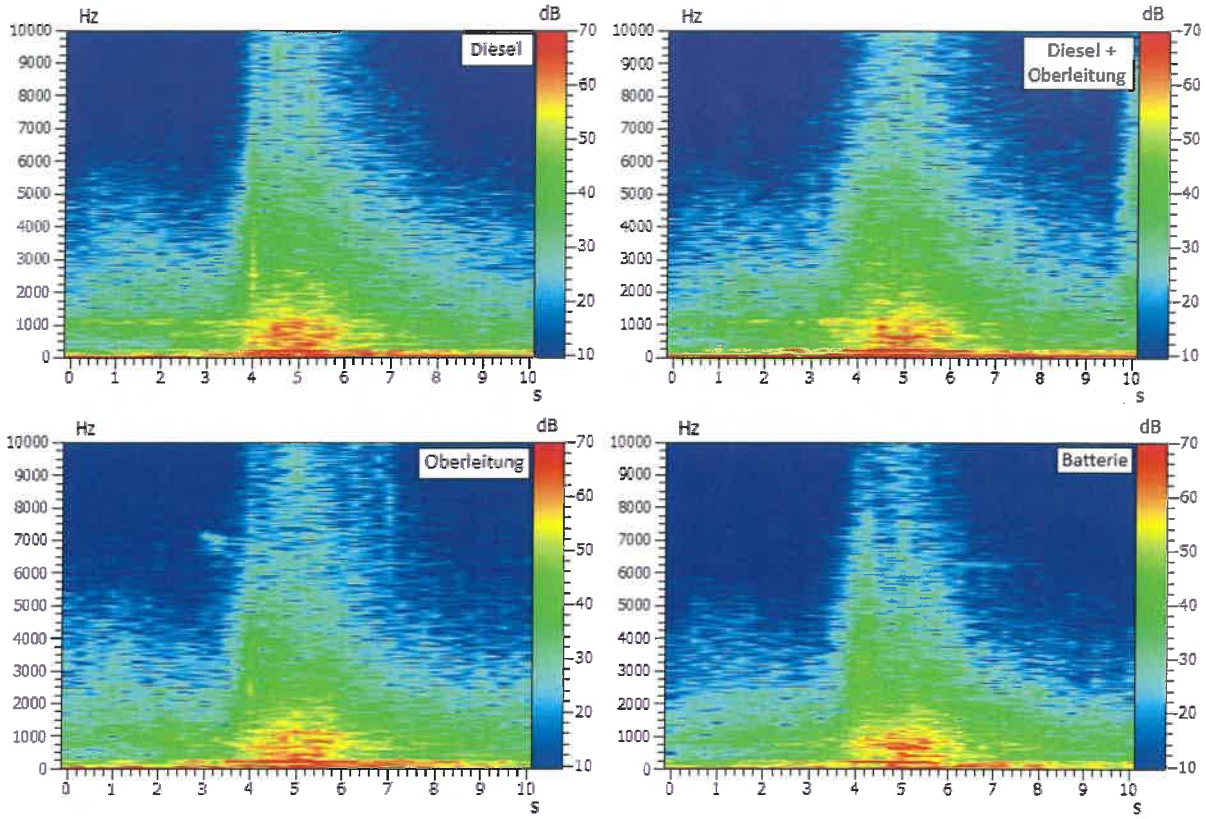


Abbildung 186: El Camino Spektrogramm für die Vorbeifahrt 50km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

In Abbildung 186 sind die Spektrogramme für die verschiedenen Antriebsarten bei einer Vorbeifahrtgeschwindigkeit von 50km/h dargestellt. Auch hier sieht man sehr gut, dass sowohl die frequenzabhängige Zusammensetzung des aufgenommenen Geräuschs, als auch die Intensität (hier in dB) des Geräuschs bei einer Geschwindigkeit von 50km/h in allen Antriebsarten vergleichsweise ähnlich ist.

26. JULI 2022

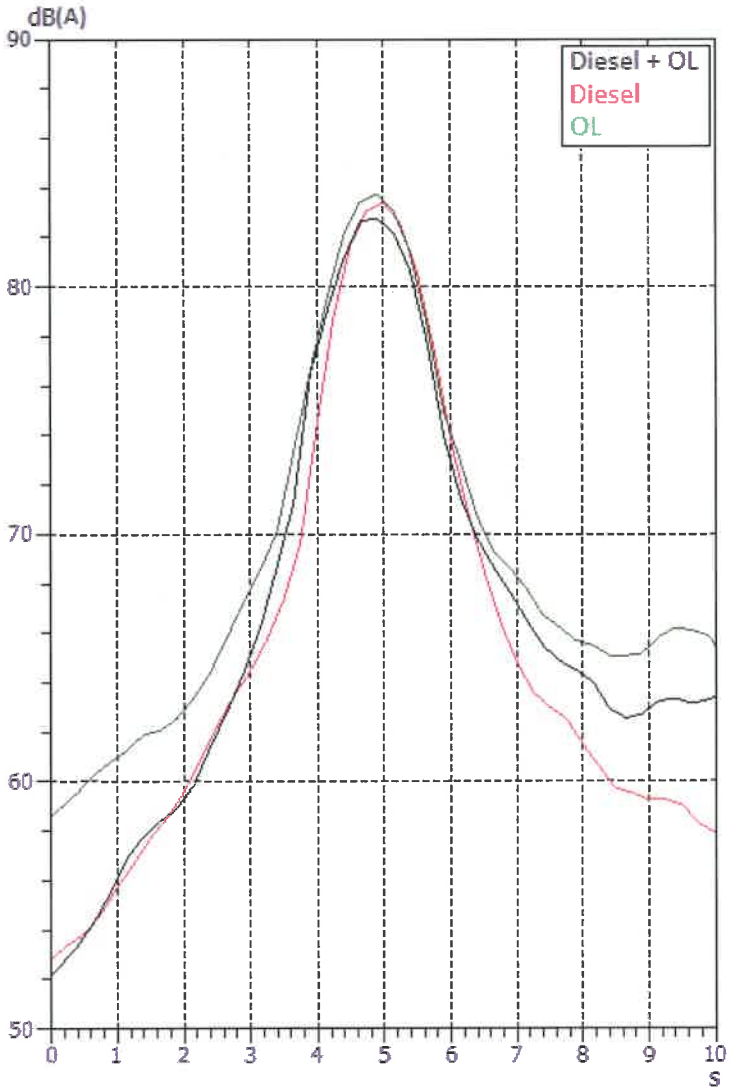


Abbildung 187: El Camino Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 90km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

Abbildung 187 zeigt den Schalldruckpegel der Messungen bei 90km/h. Man sieht sehr gut, dass die Unterschiede der einzelnen Messungen sehr gering sind und im Bereich der Messabweichungen liegen. Insbesondere der Aspekt, dass bei der Messung mit Fahren unter der Oberleitung ein etwas höherer Schalldruckpegel ermittelt wurde, als bei der Messung mit Diesel und Oberleitung, ist nicht erklärbar und deutet auf Messtoleranzen bzw. Änderungen der äußeren Einflüsse (bspw. Änderung der Windrichtung oder -geschwindigkeit) hin. Eine Messung mit batterieelektrischem Antrieb ohne Oberleitung konnte nicht reproduzierbar durchgeführt werden.

26. JULI 2022

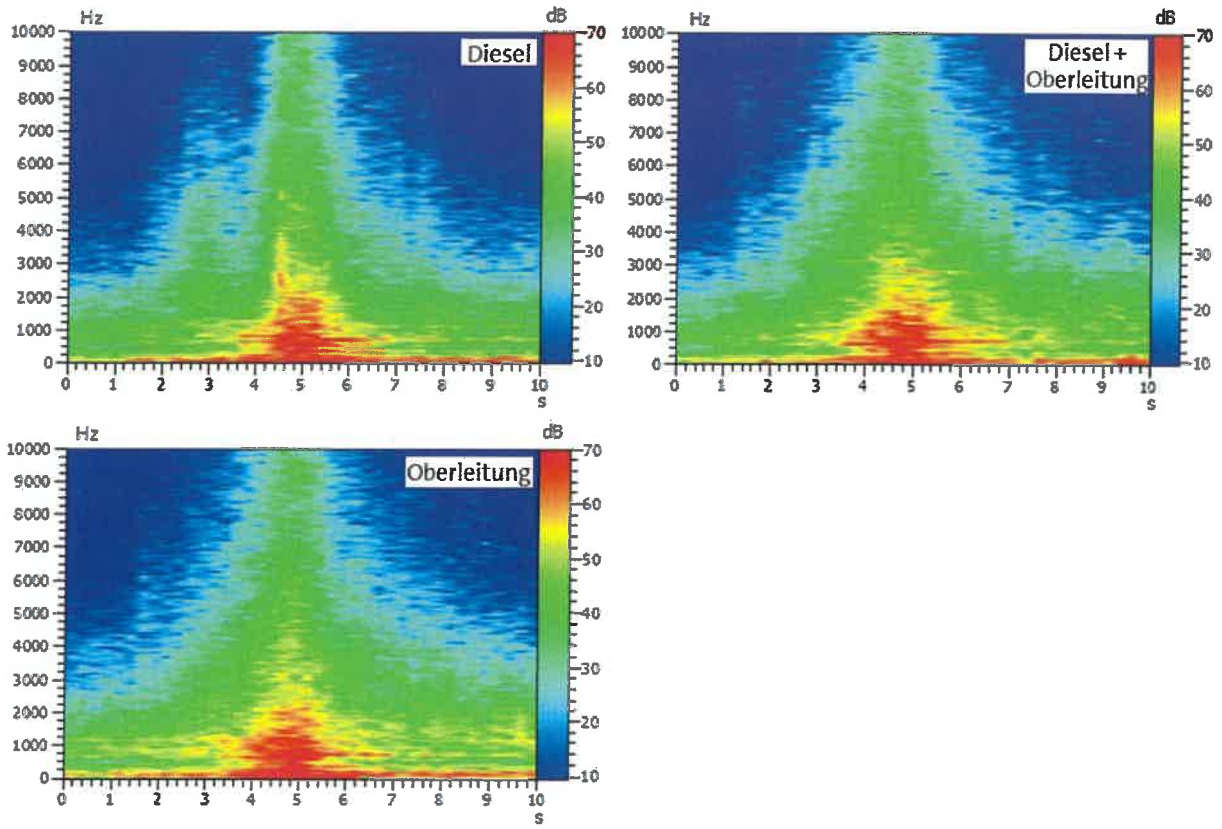


Abbildung 188: El Camino Spektrogramm für die Vorbeifahrt 90km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

In der Abbildung 188 sind wiederum die Spektrogramme der Vorbeifahrtmessungen bei 90km/h dargestellt. Diese zeigen alle eine ähnliche Charakteristik und bestätigen die bisherigen Erkenntnisse, dass die Art des Antriebs bei hohen Geschwindigkeiten keinen signifikanten akustischen Einfluss hat.

2.17.4 Vorbeifahrtmessungen „El Pancho"

Trotz des technisch begründeten Zeitverzugs der Bereitstellung des Fahrzeuges und den Einschränkungen der Corona Pandemie konnten in 2021 die Vorbeifahrtmessungen bei den gewählten Geschwindigkeiten 15, 50 und 90km/h für den „El Pancho" (ohne Trailer) ebenfalls durchgeführt werden. Zusätzlich wurden sowohl beim „El Camino", als auch beim „El Pancho" Innenraummessungen durchgeführt (siehe Kapitel 2.17.5).

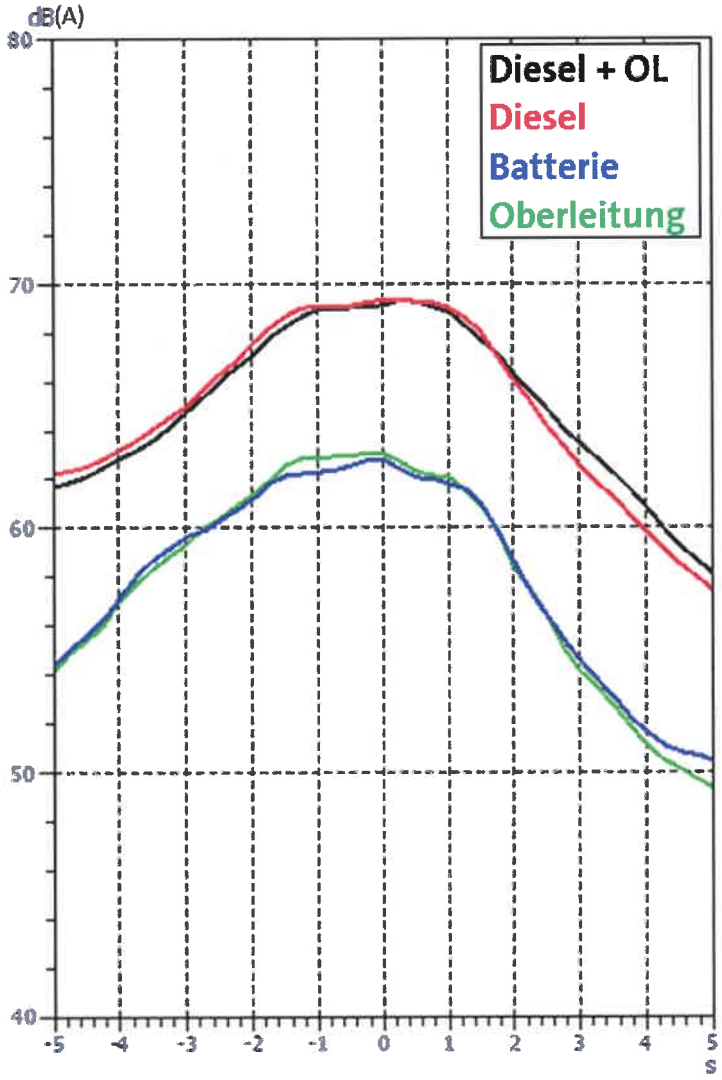


Abbildung 189: El Pancho Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 15km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

Beim „El Pancho" ist der Schalldruckpegel [dB(A)] beim elektrischen Fahren mit 15km/h unter der Oberleitung bzw. der Batterie 7dB(A) niedriger als beim Fahren mit der Verbrennungskraftmaschine (Abbildung 189). Somit ist beim Fahren mit elektrischem Antrieb trotz der Nutzung zweier Elektromaschinen beim „El Pancho" ebenso ein deutlicher Vorteil gegenüber dem Fahren mit Verbrennungskraftmaschine festzustellen.

Im Spektrogramm (Abbildung 190) für die 15km/h Messung wird deutlich, dass beim verbrennungsmotorischen Antrieb die Anteile bis 1000Hz deutlich höhere Pegel aufweisen, als beim elektrischen Antrieb.

Erhöht man in der Auswertung die FFT-Blockgröße, wodurch die Frequenzauflösung feiner, allerdings die zeitliche Auflösung schlechter wird, sieht man im Spektrogramm (Abbildung 191) im unteren Frequenzbereich der Messungen mit verbrennungsmotorischem Antrieb sehr gut eine Motorordnung bei ca. 40Hz. Bei einer Drehzahl von ca. 820rpm ergibt sich bei dem verwendeten 6 Zylinder Reihenmotor (R450 Baureihe) die 2. Motorordnung als dominante Ordnung. Diese Drehzahl konnte im Nachgang aus den Daten des Datenloggers ausgelesen werden und der Messung zugeordnet werden (siehe Kapitel 2.15).

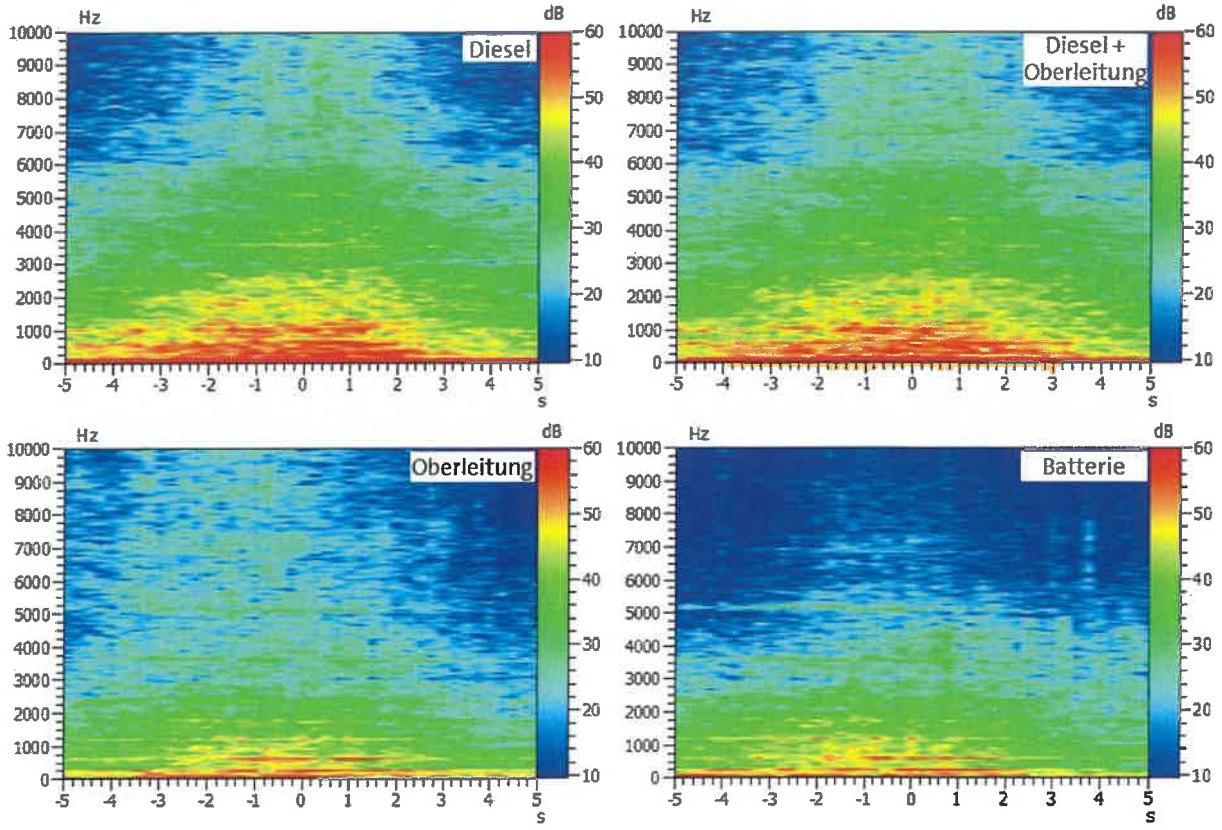


Abbildung 190: El Pancho Spektrogramm für die Vorbeifahrt 15km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

26. JULI 2022

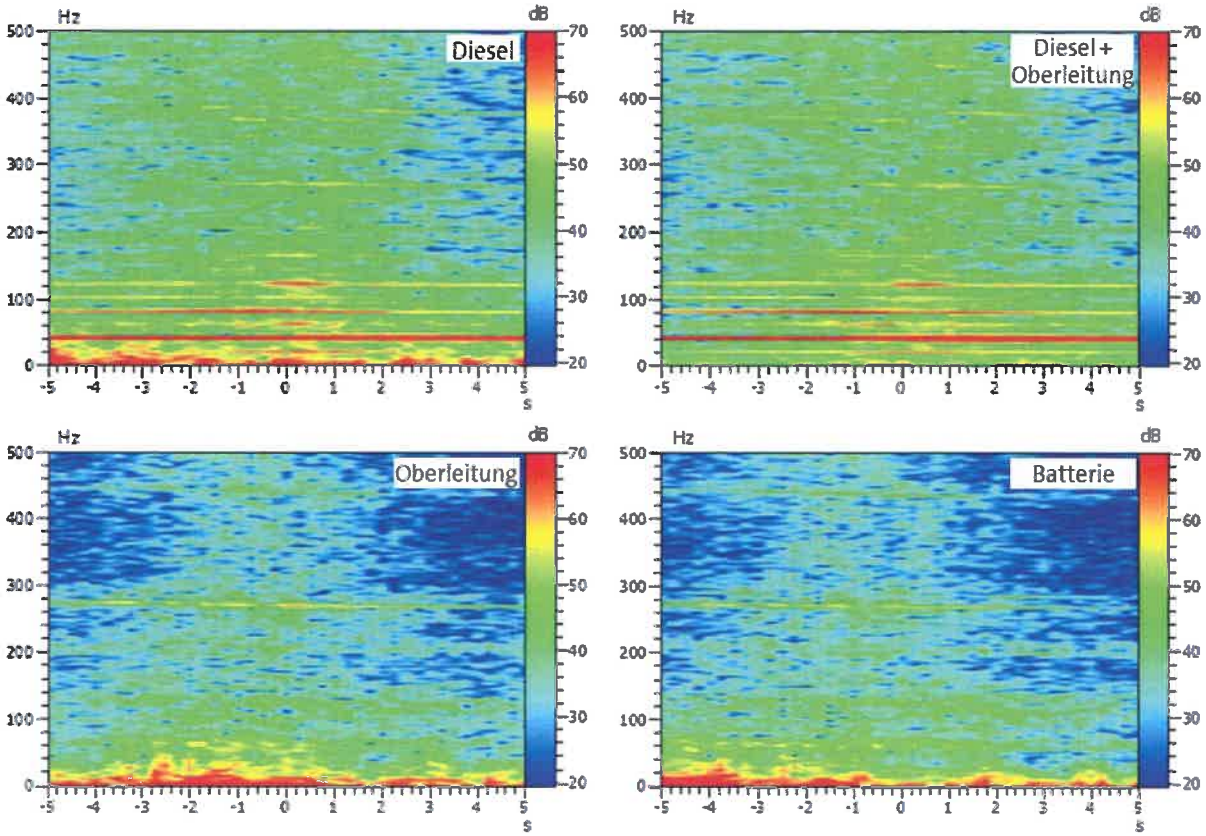


Abbildung 191: El Pancho Spektrogramm für die Vorbeifahrt 15km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien im Frequenzbereich bis 500Hz

Da, wie bereits mehrfach erwähnt, mit steigenden Geschwindigkeiten die Akustik des Antriebes einen geringeren Einfluss bekommt, ist der akustische Vorteil des elektrischen Antriebs schon bei der Geschwindigkeit von 50km/h auch beim „El Pancho" sehr gering (Abbildung 192). In Zahlen ausgedrückt bedeutet das, dass die Messungen bei Nutzung des elektrischen Antriebs einen energieäquivalenten Schalldruckpegel von ca. 75-76dB(A) ergaben. Bei Nutzung der Verbrennungskraftmaschine war der Schalldruckpegel im Bereich 77-78dB(A). Somit ergibt sich ein Vorteil des elektrischen Antriebs von 1-2dB(A), der allerdings ebenfalls im Bereich der Messtoleranz einzuordnen ist.

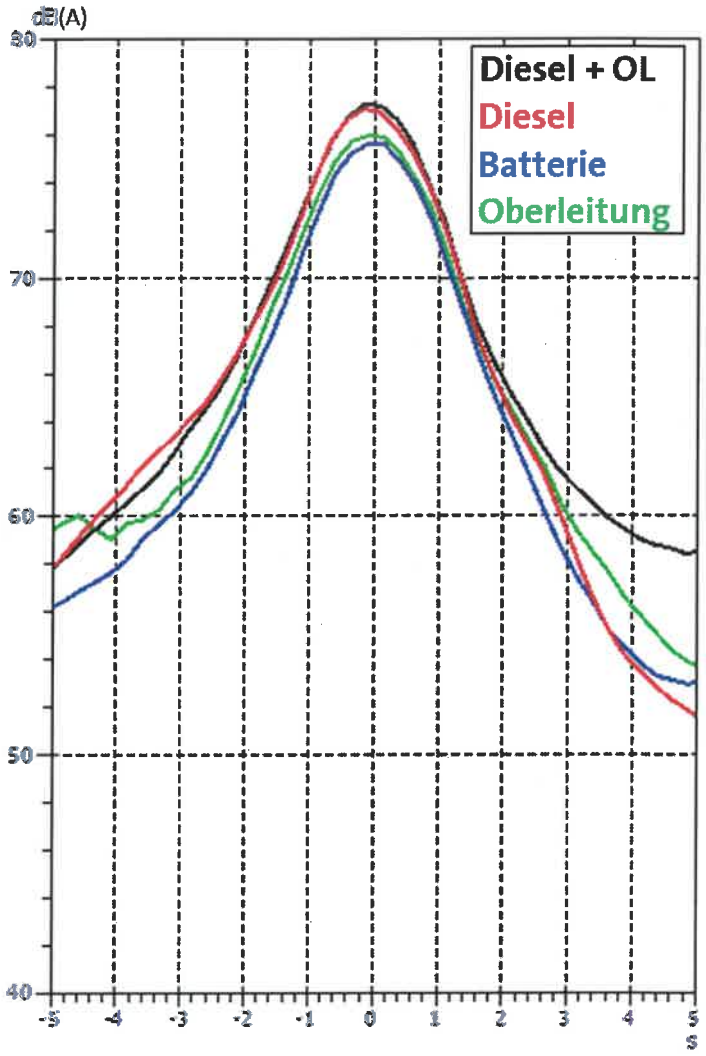


Abbildung 192: El Pancho Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 50km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

26. JULI 2022

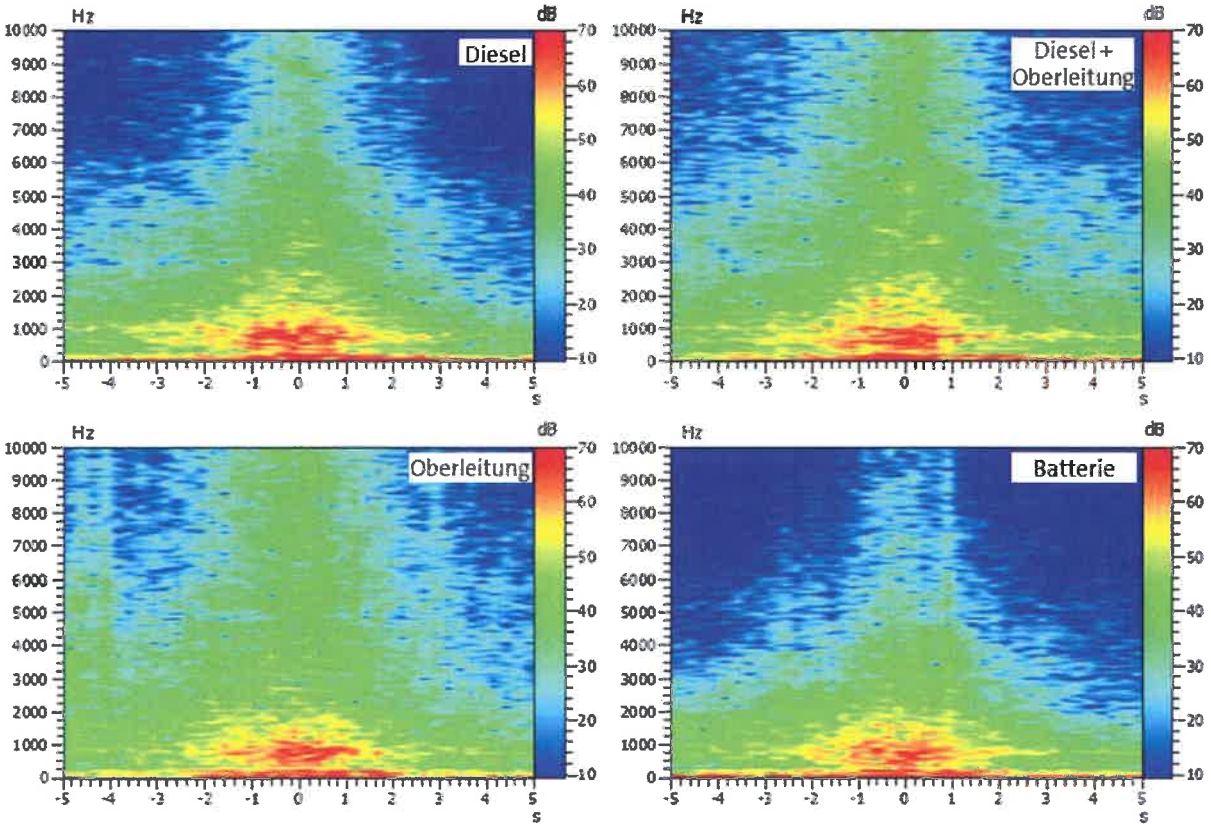


Abbildung 193: El Pancho Spektrogramm für die Vorbeifahrt 50km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

Im Spektrogramm (Abbildung 193) sind die Frequenzanteile des Schalldrucks der unterschiedlichen Antriebe dargestellt. Hierbei sind keine gravierenden Unterschiede zwischen den Antriebsarten zu erkennen.

Auch bei 90km/h ist ein akustischer Vorteil nicht mehr messbar und die Kurven der einzelnen Antriebe nähern sich sehr stark an. Diese Kurven sind in Abbildung 194 zu sehen. Die Unterschiede der ermittelten energieäquivalenten Schalldruckpegel weisen einen Vorteil von ca. 1dB(A) auf, was im Bereich der Messungenauigkeit liegt. Ebenso sind die Spektrogramme in Abbildung 195 zu bewerten. Die vier unterschiedlichen Antriebsarten haben alle eine ähnliche Charakteristik in der Zusammensetzung des Gesamtsignals.

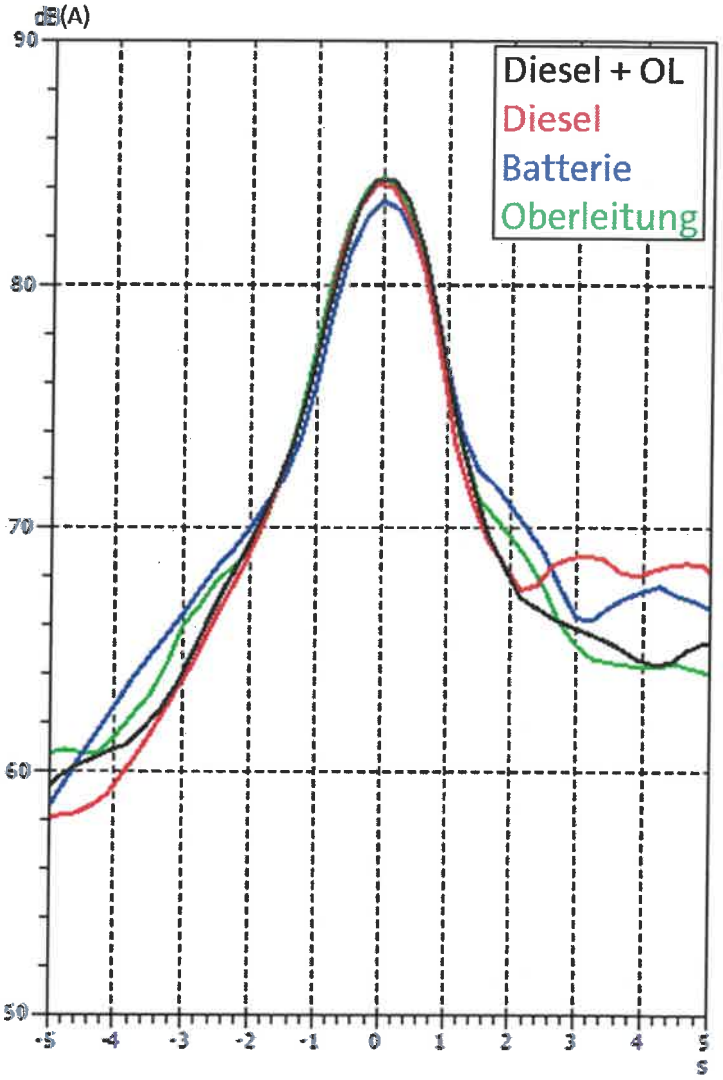


Abbildung 194: El Pancho Schalldruckpegel [dB(A)] im Szenario 90km/h Vorbeifahrt Fahrerseite

26. JULI 2022

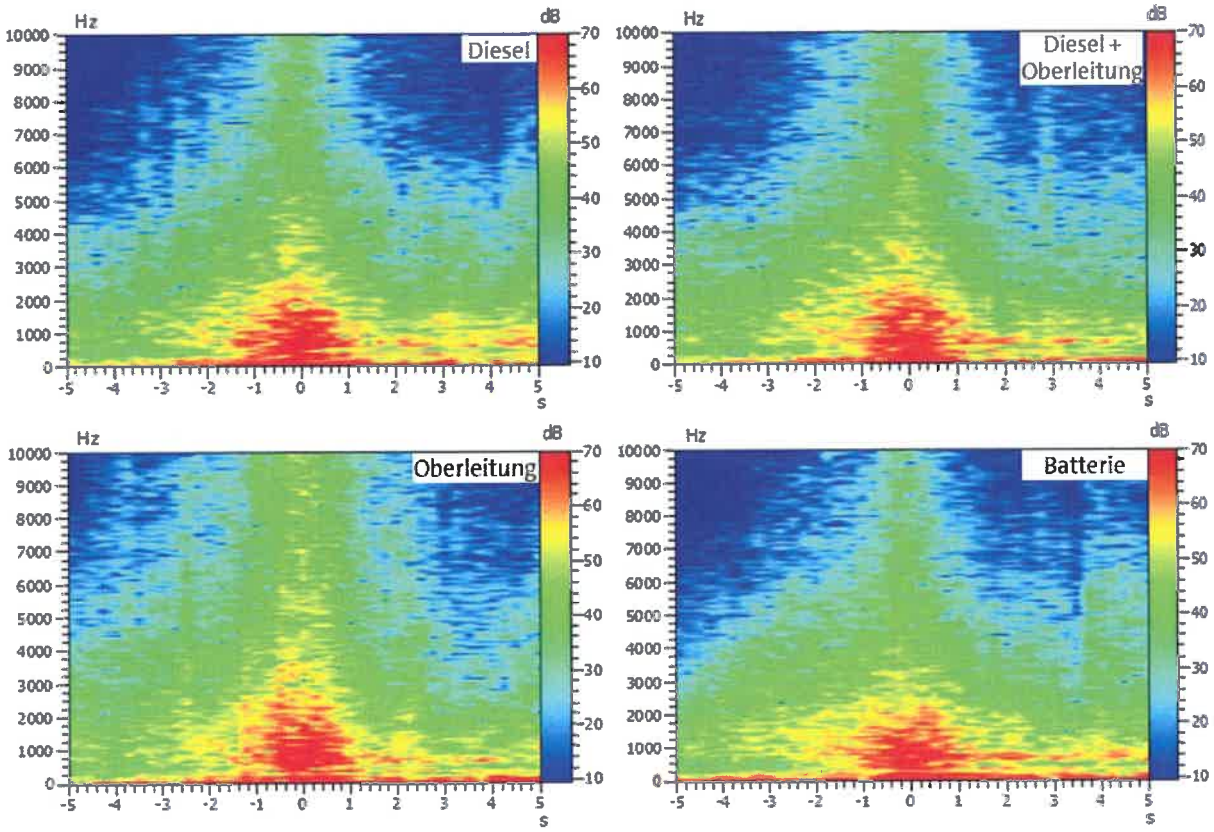


Abbildung 195: El Pancho Spektrogramm für die Vorbeifahrt 90km/h mit den unterschiedlichen Antriebsnutzszenarien

Zusammenfassend wurden die Maximalwerte der gemessenen energieäquivalente Schalldruckpegel mit einer Zeitkonstante von einer Sekunde in Abbildung 196 dargestellt. Bei der Geschwindigkeit von 15km/h hat dabei der „El Camino" beim elektrischen Fahren einen akustischen Vorteil gegenüber dem „El Pancho" von ca. 3dB(A). Das lässt sich möglicherweise mit den 2 Elektromaschinen erklären. Bei einer Geschwindigkeit von 50km/h wurde beim „El Camino" ebenfalls ein niedrigerer Schalldruckpegel im Vergleich zum „El Pancho" gemessen. Da dies jedoch bei allen Antriebsarten der Fall ist, ist davon auszugehen, dass andere Parameter wie bspw. die Reifen einen Einfluss haben. Bei 90km/h liegen die Messungen alle in einem geringen Korridor. Dieses lässt sich darauf zurückführen, dass bei 90km/h das Windgeräusch eine dominierende Rolle spielt.

v	Antriebe	El Camino	El Pancho
km/h	--	L_{AEQ} [dB(A)]	L_{AEQ} [dB(A)]
15	Diesel	72	70
	Diesel + OL	73	70
	Panto	60	63
	Batterie	60	63
50	Diesel	75	77
	Diesel + OL	74	77
	Panto	74	76
	Batterie	73	76
90	Diesel	83	84
	Diesel + OL	83	84
	Panto	84	84
	Batterie	--	83

Abbildung 196: energieäquivalente Schalldruckpegel der einzelnen Antriebsarten für die beiden untersuchten Fahrzeuge

2.17.5 Innenraummessungen „El Camino" und „El Pancho"

Die Schalldruckpegel der Innenraummessungen sind in Abbildung 197 dargestellt. Auch in diesen Messungen wird deutlich, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten auch im Innenraum deutliche akustische Vorteile beim elektrischen Fahren liegen. Insbesondere in der Abbildung oben links bei 15km/h sieht man, dass sowohl beim „El Camino" als auch beim „El Pancho" das Fahren mit Verbrennungskraftmaschine deutlich lauter für die Insassen wahrnehmbar ist. Auch in dem Diagramm bei 50km/h (oben rechts) sieht man, dass das Fahren mit elektrischem Antrieb im Innenraum noch Vorteile bietet (ca. 3dB(A)). Bei den Messungen bei 90km/h (unten rechts) sind die Kurven für die verschiedenen Antriebsarten nahezu identisch, so dass man nicht mehr von einem akustischen Vorteil des elektrischen Antriebs sprechen kann. Wie in der Literatur für PKWs häufig zu finden, nimmt mit steigender Geschwindigkeit erst der Einfluss der Rollgeräusche gegenüber dem Antrieb zu, mit weiter steigender Geschwindigkeit nimmt jedoch das Windgeräusch eine dominante Rolle ein. Dieser Aspekt könnte zusätzlich die abgestufte Reihenfolge der Annäherung der Kurven erklären.

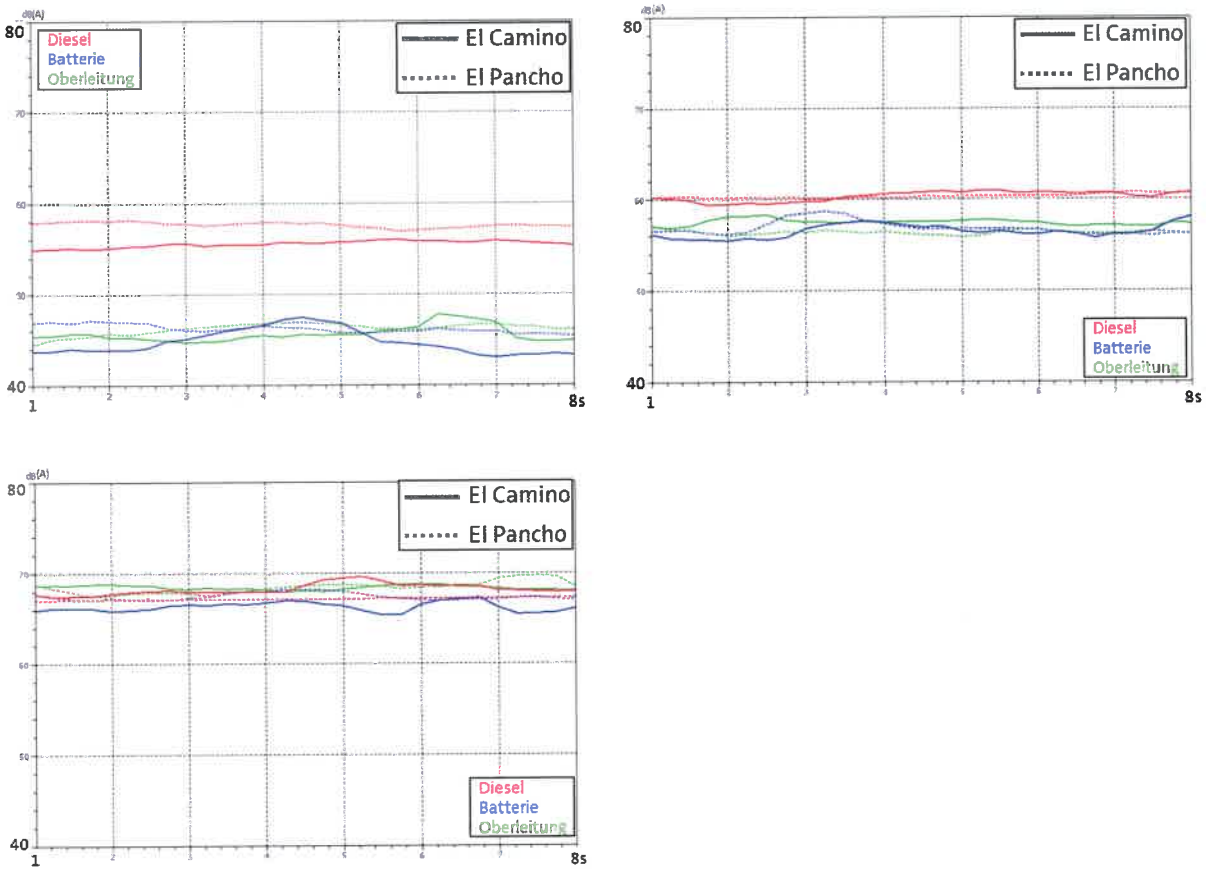


Abbildung 197: Schalldruckpegel [dB(A)] im Innenraum bei 15km/h (oben links), 50km/h (oben rechts) und 90km/h (unten links)

Neben den Innenraummessungen bei konstanten Geschwindigkeiten wurden Innenraummessungen durchgeführt, bei denen der LKW maximal beschleunigt wird. Diese Messungen sind in Abbildung 198 zu sehen. Dabei ist in der linken Abbildung die beschleunigte Fahrt mit dem Antrieb über die Elektromaschine und Energiebereitstellung über die Batterie zu sehen. Die grünen Kurven zeigen drei Fahrten des „El Camino". Man sieht deutlich, dass die drei Fahrten sehr gut reproduzierbar waren. Diese Aussage trifft auch für die beiden Fahrten im „El Pancho" im linken Diagramm zu. Deutlich wird zudem, dass der „El Pancho" zeitlich sehr viel früher höhere Schalldruckpegel aufweist. Dies liegt jedoch daran, dass der „El Pancho" durch die beiden Elektromaschinen deutlich leistungsfähiger ist, als der „El Camino" und somit viel schneller auf höhere Geschwindigkeiten kommt. Somit ist der zeitlich frühere Maximalpunkt des Schalldruckpegels erklärbar.

In der rechten Darstellung in Abbildung 198 sind die Ergebnisse der gleichen Versuche im Dieselmotorbetrieb zu sehen. Dabei ist festzustellen, dass beim „El Pancho" keine Reproduzierbarkeit erreicht werden konnte. Insbesondere die automatischen Schaltvorgänge der beiden Messungen waren auch für den Fahrer und Beifahrer spürbar deutlich unterschiedlich. Die beiden Messungen des „El Camino" zeigen dagegen eine vergleichbare Charakteristik auf.

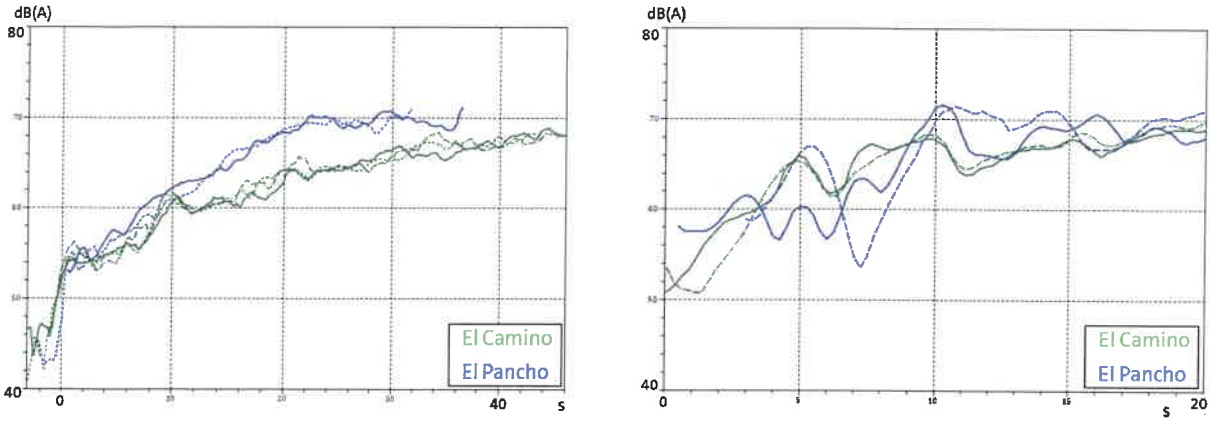


Abbildung 198 Innenraummessung bei maximaler Beschleunigung, linke Grafik: elektrisch angetrieben (Batterie), rechte Grafik: Dieselbetrieb

2.17.6 Zusammenfassung

Durch die Verwendung des elektrischen Antriebs kann ein großer akustischer Vorteil bei niedrigen Geschwindigkeiten erzielt werden. Dieser Vorteil betrifft sowohl das Fahren durch Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie über die Oberleitung, als auch über die Batterie. Insbesondere bei stockendem Verkehr oder zum Stillstand gekommenem Verkehrsfluss kann somit neben der Reduzierung schädlicher Abgase auch ein akustischer Vorteil für Fahrer und Umwelt aufgezeigt werden. Ein mögliches Szenario könnte so aussehen, dass in Wohngebieten, die aktuell durch behördlich angeordnete Nachtruhen für Nutzfahrzeuge gesperrt sind, durch niedrigere Schall-Emissionen des OL-LKW (für geringere Geschwindigkeiten) freigegeben werden. Dadurch könnte der Gütertransport optimiert und der Verkehr in Stoßzeiten entlastet werden.

Im Vergleich zwischen den beiden bereitgestellten LKWs sind bei den Messungen mit dem „El Pancho" mit elektrischem Antrieb die ermittelten Schalldruckpegel bei der niedrigsten Geschwindigkeitsstufe von 15km/h höher als beim leistungsschwächeren „El Camino" (130kW beim „El Camino" und 260kW beim „El Pancho"). Dieses ist damit zu erklären, dass beide Elektromaschinen beim „El Pancho" gleichzeitig arbeiten und somit Schall abstrahlen.

Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Einfluss der Antriebe auf den ermittelten Schalldruckpegel ab. Es treten die Einflüsse aus Rollgeräusch und Windgeschwindigkeit in den Vordergrund. Insbesondere bei der höchsten untersuchten Geschwindigkeit von 90km/h ist kein akustischer Vorteil mehr messbar.

2.18 AP 14a: Strategie, Funktionsentwicklung

Die Aufgabe der Betriebsstrategie ist es, den komplexen Systemverbund aus einer Vielzahl an Antriebsstrangkomponenten und Nebenaggregaten als übergeordnete Struktur zu koordinieren und zu steuern sowie die Einhaltung von Grenzwerten sicherzustellen.

Abbildung 199 zeigt eine Messung am Oberleitungs-LKW mit dem in AP 11 beschriebenen DHT-Getriebe. Darin sind wesentliche Aspekte der Betriebsstrategie erkennbar, z.B. das elektrische Fahren bis zu einem minimalen Energieinhalt der Batterie ①, das Nachladen der Batterie durch eine Betriebspunktverschiebung im Verbrennungsmotorkennfeld ②, die Sicherstellung der Klimatisierungs- und Bordnetzanforderungen im Stand ③ und die Emissionsreduzierung durch automatisches Start-Stopp des Verbrennungsmotors ④.

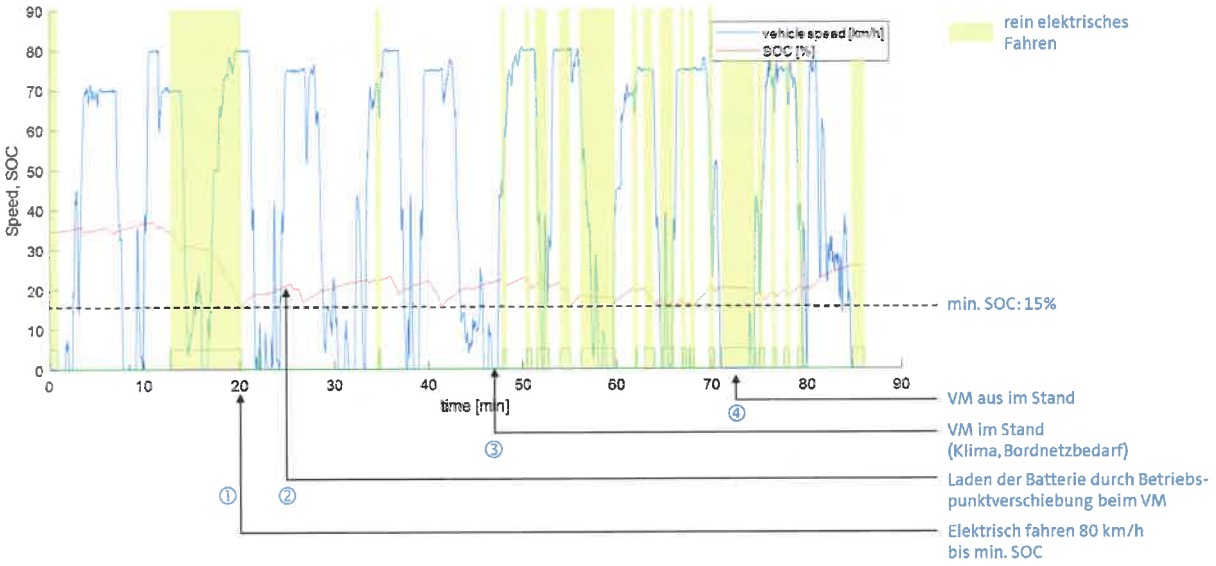


Abbildung 199: Messung am Oberleitungs-LKW mit DHT-Getriebe

Beim Energiemanagement als Teilkomponente der Betriebsstrategie wird der zusätzliche Freiheitsgrad resultierend aus der Entkopplung von Fahrerwunsch und Komponentenbetrieb beim Hybrid-LKW genutzt, um die Antriebsaggregate in effizienten Betriebsbereichen zu betreiben und so den Verbrauch und die CO_2-Emissionen zu senken. Die wesentliche Zustandsgröße ist dabei der Ladezustand der Traktionsbatterie, der je nach Betriebszustand steigen (Laden unter der Oberleitung oder durch Rekuperation) oder sinken (Entladen durch elektrisches Fahren oder andere elektrische Verbraucher) kann. Die Anforderungen an das Energiemanagement für den Oberleitungs-LKW unterscheiden sich im Wesentlichen in der Hinsicht von anderen Hybrid-LKWs, als dass externes Laden der Traktionsbatterie während des Fahrbetriebs berücksichtigt werden muss. Mit dem Ziel möglichst hoher CO_2-Einsparungen wurde ein Energiemanagement mit den folgenden Schwerpunkten und Maßnahmen im Rahmen der Simulation (vgl. Kap. 2.2) umgesetzt:

- Prädiktive Entladung der Traktionsbatterie vor Erreichen eines Oberleitungsabschnitts zur Nutzung des gesamten Ladungspotenzials.
- Priorisierte rein elektrische Fahrt bei Oberleitungsanbindung bei gleichzeitiger Ladung der Traktionsbatterie.
- Lastpunktverschiebung zur Optimierung des Verbrennungsmotorwirkungsgrads.

Die Schaltstrategie und das Funktionsmanagement wurden als Teil der Betriebsstrategie ebenfalls umgesetzt. Weil der Fokus der Simulationsumgebung auf der Ermittlung von CO_2-Reduktionspotenzialen liegt, wurde das Getriebemodell auf die (bzgl. des Wirkungsgrads vorteilhaften) festen Gänge reduziert. Aus diesen wird innerhalb der Schaltstrategie der Gang ausgewählt, der in einem geeigneten Drehzahlbereich für die Antriebskomponente(n) liegt und die Gesamtverluste minimiert. Das Funktionsmanagement definiert den Zustand der Antriebskomponenten und schaltet beispielsweise den Verbrennungsmotor ab.

Die Entwicklung sowie die Erprobung erfolgte virtuell mit Hilfe der in AP1a entwickelten Simulationsumgebung für schwere LKW mit Oberleitungstechnologie. Dabei konnten diverse Szenarien und Lastfälle simuliert und der Nutzen der Betriebsstrategie aufgezeigt werden.

26. JULI 2022

2.19 AP 14b: Funktionsentwicklung und Betriebsstrategie Antriebsstrangsteuerung

2.19.1 Kick-Off Workshop mit Scania in Södertälje

Die Planung des Arbeitspaketes 14b beinhaltet eine Analyse und Optimierung der Betriebsstrategie im vorhandenen Fahrzeug. Ziel war es, mit Hilfe der Simulation erste Erkenntnisse zu sammeln, diese zu vertiefen und wenn möglich im späteren Fahrzeug zu verifizieren. Im Juni 2018 fand ein Workshop bei Scania in Söldertälje (Schweden) statt. Hierbei wurden intensiv offene Fragestellungen besprochen.

Aufgabe dieses Workshops war es zunächst eine grundsätzliche Analyse der schon bestehenden Betriebsstrategie durch eine Simulationsumgebung durchzuführen und das Verständnis für die vorhandenen Funktionen zu intensivieren. Ergebnis war, dass sich der Fokus in diesem Arbeitspaket mehr in Richtung einer prädiktiven Betriebsstrategie entwickeln soll. Hier befinden sich die Ziele momentan in der Ausarbeitung und müssen intern noch abgestimmt werden.

Zusätzlich zu einer Erweiterung der Betriebsstrategie ist die Analyse am Fahrzeug auch weiterhin ein Schwerpunkt in diesem Arbeitspaket. Nur durch ein grundlegendes Verständnis der bereits vorhandenen Betriebsstrategie ist überhaupt eine Erweiterung möglich. Daher konnten ab Oktober 2018 erste Erfahrungen durch Messungen am Oberleitungs-LKW auf dem Prüfgelände in Groß Dölln gesammelt werden. Hier konnte eigenständig am Fahrzeug gemessen und die Daten analysiert werden.

Im darauffolgenden Jahr wurden in diesem Arbeitspaket Verbesserungspotentiale für den Betrieb von Oberleitungs-LKW nicht nur im Rahmen von Simulationen, sondern auch durch Versuchsfahrten, analysiert. Die Auswertung erfolgt hier mit dem Ziel Erkenntnisse für eine optimale Betriebsstrategie des LKW zu gewinnen.

2.19.2 Untersuchung Rekuperationspotentiale

Im Rahmen der Simulation von hügeligem beziehungsweise bergigem Gelände wurde hierbei untersucht, mit welchen maximalen Rekuperations-Energien zu rechnen ist. Zwar muss die Betriebsstrategie nicht jeden möglichen Worst Case optimal bewältigen, typische Situationen sollten jedoch abgedeckt sein. Als Beispiel wurde hierzu eine lange Gefällstrecke gesucht und hierfür die Fahrt von Innsbruck nach Bozen als typisches Szenario untersucht (siehe AP1). Als maximale Rekuperationsenergie wurden hier 25 kWh ermittelt (von der Passhöhe abwärts in Richtung Bozen). Eine optimale Betriebsstrategie sollte also dafür Sorge tragen, dass in diesem Beispiel an der Brenner-Passhöhe ein Rekuperations-Potential von 25kWh aufgenommen werden könnte. Dafür darf der Ladestand (SoC) der Batterie nicht zu hoch sein.

Ähnliches gilt für die Nutzung der elektrifizierten Abschnitte. In Versuchsfahrten auf der A5 (Pilotstrecke Hessen) fiel auf, dass die Batterie beim Anbügeln teils bereits so gut geladen war, dass Leistungspotential der Oberleitung nicht ausgenutzt wurde. In Summe steht dahinter die Überlegung, wie die Batterie optimal vorkonditioniert sein sollte, um das Potential der Oberleitung bestmöglich zu nutzen. Hierfür sind zusätzliche Verknüpfungen mit dem AP5 und AP6 erforderlich.

Im Rahmen der Analyse des eWayBW erfolgte eine Variation möglicher elektrifizierter Streckenabschnitte, die unten stehender Abbildung zu entnehmen sind. In Absprache mit dem Ministerium für Verkehr des Landes Baden-Württemberg erfolgte hier eine Auslegung der Infrastruktur im Hinblick auf

CO2-Reduzierung und elektrischen Fahr-Anteil. Die aktuell in der Simulation hinterlegte Betriebsstrategie ist auf diese Aspekte hin ausgelegt. Bisher nicht Teil der Betriebsstrategie ist der gezielte Anwohnerschutz, der jedoch hier infolge der Verkehrsführung durch bewohntes Gebiet von Interesse ist. Insofern wurde zunächst nur durch Variation der elektrifizierten Streckenabschnitte der Einfluss auf die Anwohner untersucht.

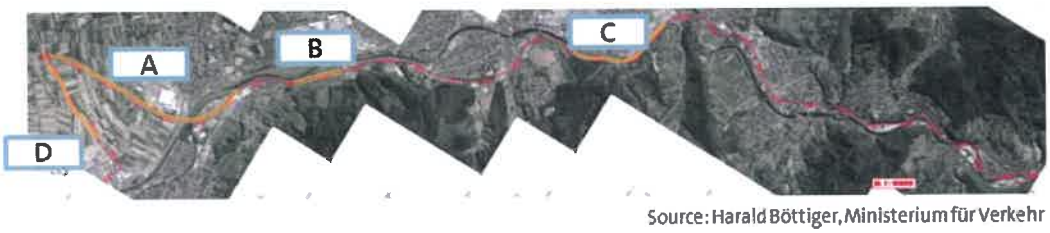


Abbildung 200: Teststrecke im Murgtal mit potentiellen Abschnitten zum Bau einer Oberleitung

In unterschiedlichen Szenarien (1 bis 6), die unterschiedliche Abschnitte (A bis D) enthalten, wurde beispielsweise die Anzahl möglicher, rein-elektrischer Umläufe eines typischen Transport-Szenarios (Pendelverkehr zwischen zwei Endpunkten) im Murgtal untersucht. Bemerkenswert hierbei ist, dass im Szenario 5 (Abschnitte A, B, C, D elektrifiziert) eine besonders hohe Anzahl erreicht werden kann. Die aus Anwohnersicht vielleicht nicht unbedingt erstrebenswert erscheinende höchste Elektrifizierungs-Variante bietet das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis (Potential für eine deutliche Reduzierung von Lärm und Abgasen in Anwohner-Nähe).

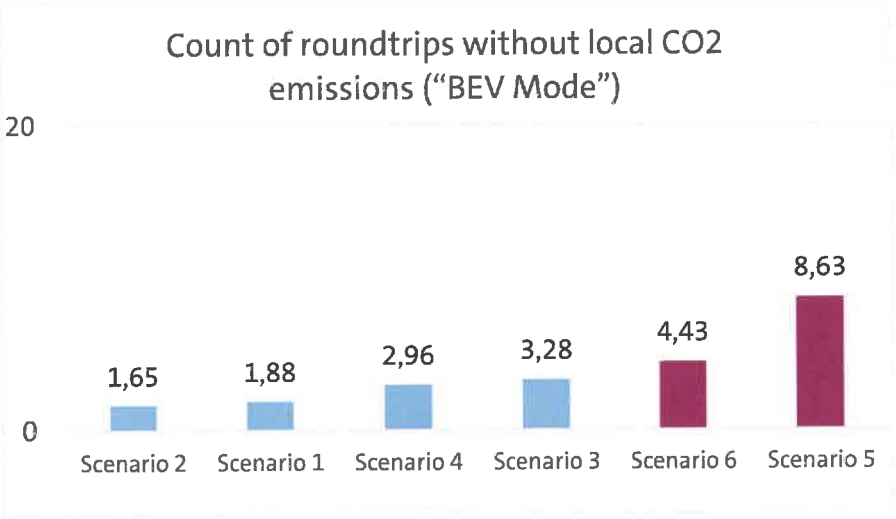


Abbildung 201: Unterschiedliche Fahrszenarien für das Fahren im Murgtal

Die angesprochenen Situationen (bergiges Gelände, optimale Nutzung der Speise-Leistung, bevorzugter Anwohnerschutz) ließen sich jeweils noch besser bewältigen, wenn die Betriebsstrategie prädiktiv arbeiten würde. Hierzu muss die Kenntnis über den Streckenverlauf, das Höhenprofil, die elektrifizierten Abschnitte und bewohnte Abschnitte in der Betriebsstrategie zu Fahrtbeginn vorliegen, so dass ein optimierter Betrieb für die gesamte Strecke geplant werden kann. Die angesprochene Optimierung des Batterie-SoC kann dann durch gezieltes Zu- und Abschalten des Verbrennungsmotors sowie die Leistungsaufteilung im Hybridbetrieb erfolgen. Ferner auch durch ein optimiertes Lademanagement an eventuellen Ladegeräten an den Endpunkten (oder Zwischenhalten) der Route. Beispielsweise kann die Batterie vor einer Gefälle-Strecke bewusst geleert werden (rein-elektrischer Betrieb am Anstieg) oder bei Lade-Stopps auf relativ hoch liegenden Parkplätzen nicht vollgeladen werden. Unmittelbar

26. JULI 2022

vor der Energie-Aufnahme (Gefälle-Strecke oder Oberleitung) sollte die Batterie „konditioniert" werden, zum Beispiel thermisch und hinsichtlich der Ladungsträger-Aufnahme-Fähigkeit. Der Anwohnerschutz bedarf dem Gegenteil: Die Batterie wird außerhalb von Ortschaften gezielt vollgeladen, um rein-elektrischen Betrieb innerhalb zu ermöglichen.

2.19.3 Untersuchungen des Spannungsverhaltens an der Oberleitungsstrecke mit mehreren LKWs

Im weiteren Verlauf lag der Fokus für die Funktionsentwicklung und Betriebsstrategie Antriebssteuerung bei verschiedenen Messfahrten, die vorgenommen wurden. Zum einen wurde bei Erprobungsfahrten im Harz das aktuelle Verhalten des Fahrzeugs untersucht. Hier lag der Fokus auf den vorhandenen Funktionen innerhalb des Energiemanagements. Insbesondere das Ent- und Aufladeverhalten der HV-Batterie stand hier im Fokus. Wie wird bei Fahrten im gebirgigen Gelände die HV-Batterie belastet? Welches Zusammenspiel findet zwischen Verbrennungsmotor und Elektroantrieb statt? In wie fern werden die Daten aus der Topologieerkennung genutzt?

Des Weiteren wurden auf der Oberleitungsstrecke in Hessen weitere wertvolle Ergebnisse zum Betrieb mit mehreren Oberleitungs-LKWs auf einer Strecke gewonnen. Das Verhalten des An- und Abbügelns und der verschiedenen Fahrzeuge brachte relevante Ergebnisse für eine weiterführende Betriebsstrategie. Insbesondere das Spannungsverhalten auf der Oberleitung zeigt doch, dass eine Vernetzung untereinander und auch zu den Unterwerken eine bessere Verfügbarkeit und Effizienz bei der Nutzung der Oberleitung ausmachen würde. Auch Hin- und Rückfahrt von Wolfsburg zur Versuchsstrecke wurde aufgezeichnet und bildet aufgrund der verhältnismäßig langen Strecke mit seinem bisweilen anspruchsvollen Höhenprofil eine wertvolle Datenbasis zum Abgleich der Simulation.

Abbildung 202: Teststrecke in Hessen auf der A5

Für die simulativen Arbeiten wurde bereits in AP1b berichtet. Hier wurden Ausrollversuche unternommen, um einen Abgleich der Simulationsumgebung mit dem realen Fahrzeug durchzuführen und eine Vorhersage zu bisher durchgeführten Realfahrten zu treffen.

26. JULI 2022

Im Jahr 2021 wurden Themen zur Prädiktion der Gesamtfahrstrecke in Aussicht gestellt und bearbeitet. Hier soll insbesondere das Zusammenspiel zwischen dem hybridischen Antrieb und der weiteren Energiequelle durch die Oberleitung analysiert werden. Eine höhere Effizienz des Gesamtantriebsstrangs kann durch zusätzliche Informationen, wie z.B. Kartendaten, Ziel der Fahrt, Länge der Oberleitungsstrecke ermittelt werden und in einer Betriebsstrategie hinterlegt werden. Hierzu sollen auch Aspekte, wie das Fahrzeuggewicht, Wetterdaten und die Verkehrsdichte bewertet werden. Ziel war es, dieses simulativ zu bewerten. Eine Bewertung im Fahrzeug wäre grundsätzlich auch möglich gewesen, konnte aber auch verschiedenen Gründen nicht durchgeführt werden.

2.19.4 Untersuchungen "Anwohnerschutz"

Ein Schwerpunkt dieser Analyse war die Untersuchung eines möglichen Anwohnerschutzes entlang einer Strecke. Ziel war es durch Prädiktion die Lärmemissionen des Schwerlastverkehrs zu minimieren, indem in Anwohnerbereichen rein elektrisch gefahren werden soll und in anderen Bereichen dann wieder hybridisch. Als Teststrecke hat sich die Oberleitungs-Versuchsstrecke in Baden-Württemberg angeboten, da dort die Versuchsstrecke, welche im Rahmen des Oberleitungs-Projektes eWayBW genutzt wird, auf einer Bundes- und Landstraße befindet. Zudem befindet sich diese Versuchsstrecke unmittelbar an bewohnten Gebieten – wohingegen die beiden anderen Versuchsstrecken (FESH, ELISA) auf Bundesautobahnen verortet sind.

Derzeit liegt der Fokus des Anwohnerschutzes bei der Vermeidung des Verbrennungsmotorbetriebes – dies kann u.a. aus Emissionsschutzgründen erfolgen, aber auch als Lärmschutzmaßnahme genutzt werden. Hierzu ist insbesondere der Oberleitungs-LKW besonders geeignet, da hier beispielsweise die Batterie während der Fahrt durch die Energiezufuhr über die Oberleitung aufgeladen werden kann, damit in nachfolgenden Fahrszenarien der Betrieb des Verbrennungsmotors unterbunden werden kann.

Unabhängig vom Oberleitungs-Betrieb kann der LKW zudem unter Verwendung des Verbrennungsmotors während der Fahrt die Batterie aufladen, um auch hier ausreichend Energie in der Batterie vorhalten zu können, um Betriebssituationen ohne Verbrennungsmotorbetrieb gewährleisten zu können. Für die weiteren Analysen zum Anwohnerschutz wurde daher der „Type 2" LKW genutzt, da dieser neben dem Oberleitungs- und Verbrennungsmotor-Betrieb auch eine größer dimensionierte Batterie aufweist.

Für die Betrachtung des Anwohnerschutzes wurde dazu im ersten Schritt die Versuchstrecke in unterschiedliche Segmente unterteilt. In der nachfolgenden Abbildung ist dazu die verwendete Strecke abgebildet. Auf der linken Seite ist das Lager der ansässigen Spedition und auf der rechten Seite sind die zugehörigen Papierfabriken. Die LKWs fahren in diesem Szenario nahezu in einem 24/7 Betrieb und transportieren das Rohmaterial zu den Papierfabriken und die fertiggestellten Waren zurück in das Lager.

26. JULI 2022

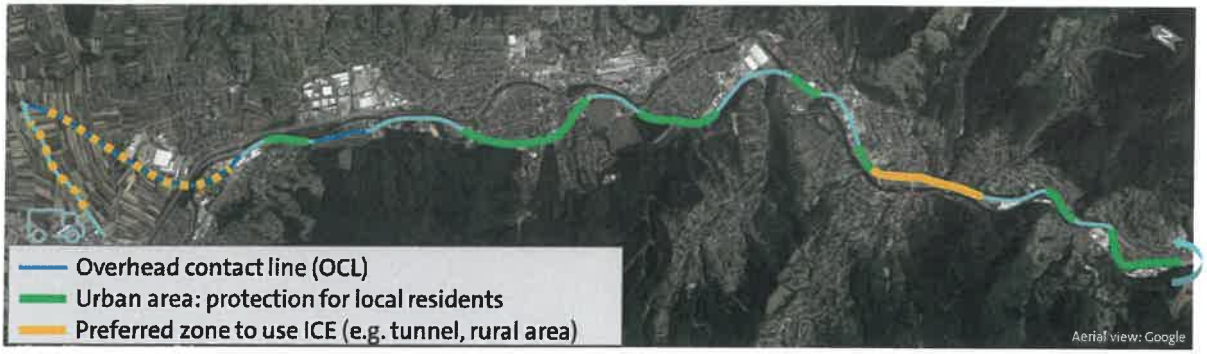


Abbildung 203: Einteilung von Zonen für reinen BEV-Betrieb 6für einen Anwohnerschutz

Die Lage der Oberleitungs-Segmente ist in blau dargestellt (wobei der erste Teil von der gelb gestrichelten Linie überlagert wird). Zusätzlich sind Bereiche markiert, welche in unmittelbarer Nähe zu bewohnen Gebieten liegen. Diese Bereiche wurden als „Schutzzonen" definiert, in denen der Verbrennungsmotorbetrieb untersagt ist (grün). Als Kompensationsmaßnahme für den Bereich der Schutzzonen können weiterhin Bereiche definiert werden, in denen die Nutzung des Verbrennungsmotors bevorzugt durchzuführen ist. Diese Bereiche können beispielsweise in ländlichen Gebieten bzw. Industriegebieten angeordnet (gelb gestrichelt) oder - als Besonderheit bei dieser Versuchstrecke - im Bereich der des vorhandenen Tunnels gelegt werden (gelb), z.B. weil in diesen Bereichen auch innerhalb eines Bewohnten Gebietes Lärmschutz durch die baulichen Maßnahmen realisiert wird. Die Sinnhaftigkeit und Lage der unterschiedlichen Gebiete kann natürlich nur unmittelbar vor Ort, z.B. durch die ansässigen Behörden oder Gremien festgelegt werden. Die hier exemplarisch festgelegten Bereiche dienen in diesem Zusammenhang ausschließlich der Machbarkeitsanalyse und geben keinen Rückschluss auf eine endgültige Lage der entsprechenden Zonen wieder.

Zur Bewertung wurde eine Simulation eines kompletten Zyklus eines exemplarischen LKW (36 t) verwendet. Als Fahrprofil wurden die Daten genutzt, welche bereits zur Auslegung der Oberleitungsstrecken verwendet wurde. Ausgangsbasis war ein Diesel-LKW ohne jegliche Funktonen zur Oberleitung und zum Anwohnerschutz („Diesel-Szenario"). Hier zeigte sich ein exemplarischer Dieselverbrauch von 38,8 l/100 km. Davon ausgehend wurde anschließend die Oberleitungsfunktionalität in der Simulation aktiviert („Oberleitungs-Szenario"), wodurch sich der Dieselverbrauch des Fahrzeuges bei gleichen Bedingungen auf 28.1 l/100 km reduzieren lässt, was einer Reduktion bzw. einem CO2-Einsparpotential von ca. 28 % entspricht. Diese Einsparung resultiert im Wesentlichen durch die Energiezufuhr aus der Oberleitung, wodurch der entsprechende Energiebedarf gedeckt wurde. Die Batterie dient in diesem Szenario nur als temporärer Energiespeicher, denn der Ladezustand (State of Charge, SOC) zu Beginn und zum Ende der Simulation ist auf einem identischen Level.

Im weiteren Verlauf der Analysen wurden nur die Verbots- und Gebotszonen für den Verbrennungsmotorbetrieb berücksichtigt („Anwohnerschutz-Szenario"). D.h. in den Verbotszonen wurde der Verbrennungsmotor zwangsweise abgeschaltet und in den Gebotszonen zwangsweise eingeschaltet. In den übrigen Bereichen war der Verbrennungsmotor im „freien" Betrieb und wurde lastabhängig automatisch aktiviert.

Eine Übersicht über das simulierte Verhalten ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt: Hier sind deutlich die unterschiedlichen Verbots- und Gebotszonen und zusätzlich der freie Betrieb des Verbrennungsmotors zu erkennen. Weiterhin lässt sich am Ladezustand der Batterie (SOC) deutlich die Lage bzw. Nutzung der Oberleitung ableiten. Im oberen Diagramm ist dazu der passende Geschwindigkeitsverlauf und das Höhenprofil der Strecke abgebildet.

26. JULI 2022

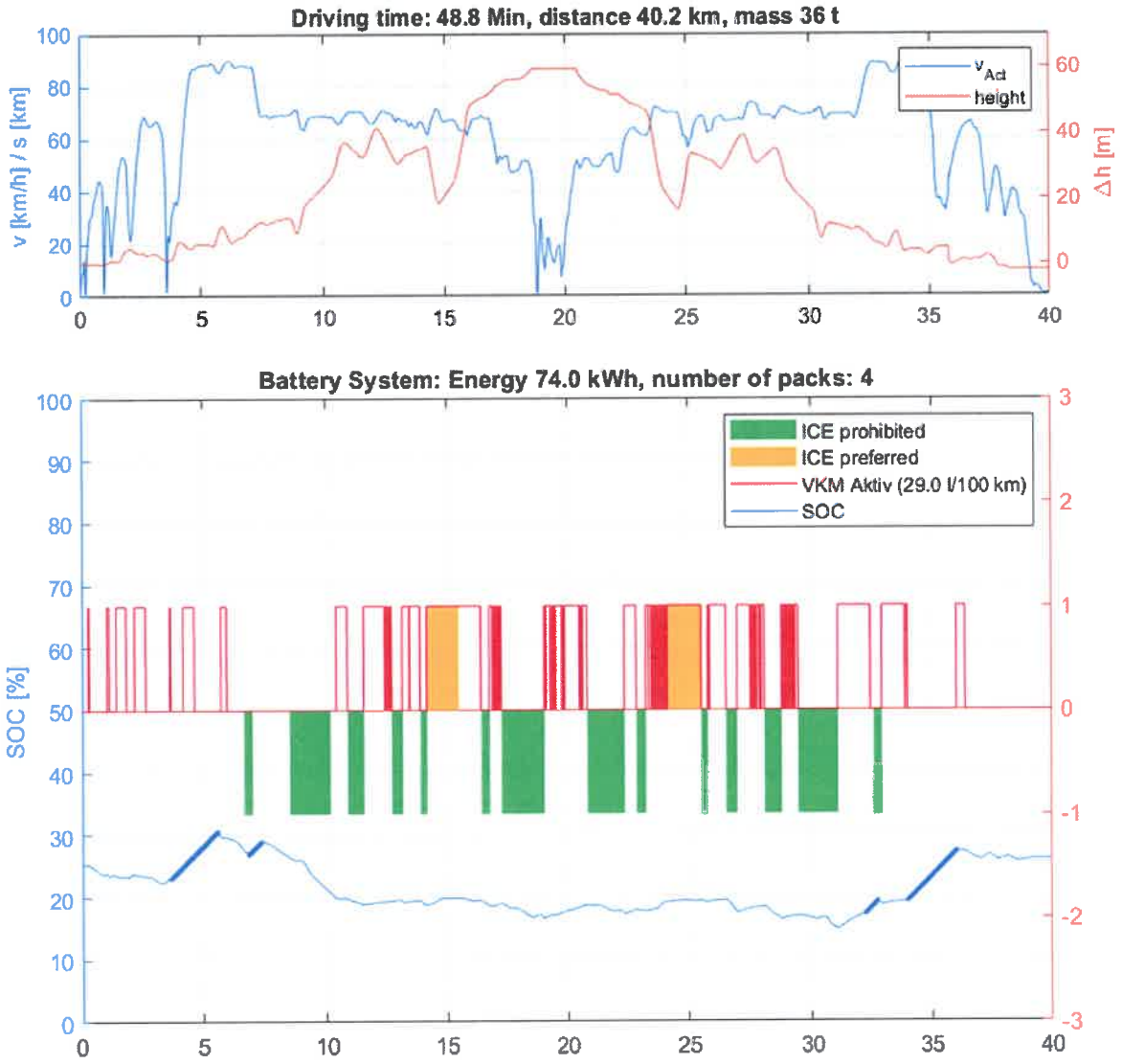


Abbildung 204: Fahrt durch das Murgtal mit reinen BEV-Zonen für den Anwohnerschutz

Das Resultat dieser Simulation („Anwohnerschutz-Szenario“) lasst sich mit einem Dieselverbrauch von ca. 29 l/100 km beziffern. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 25 % in Bezug auf die erste Betrachtung („Diesel-Szenario“) und einer Steigerung von ca. 3 % in Bezug auf das „Oberleitungs-Szenario“. Zusammenfassen lässt sich schreiben, dass die Vorteile durch die Schutzmaßnahmen (Lärmschutz, Emissionsschutz für Anwohner) durch einen geringen Mehrverbrauch „bezahlt“ werden. Dennoch fällt dieser Mehrverbraucht deutlich geringer aus, als das Einsparpotential, was sich ohnehin durch die Elektrifizierung eines LKWs ergeben hat. D.h. der Mehrverbrauch von ca. 3 % liegt deutlich unter der erzielten Einsparung durch die Elektrifizierung von ca. 28 %.

26. JULI 2022

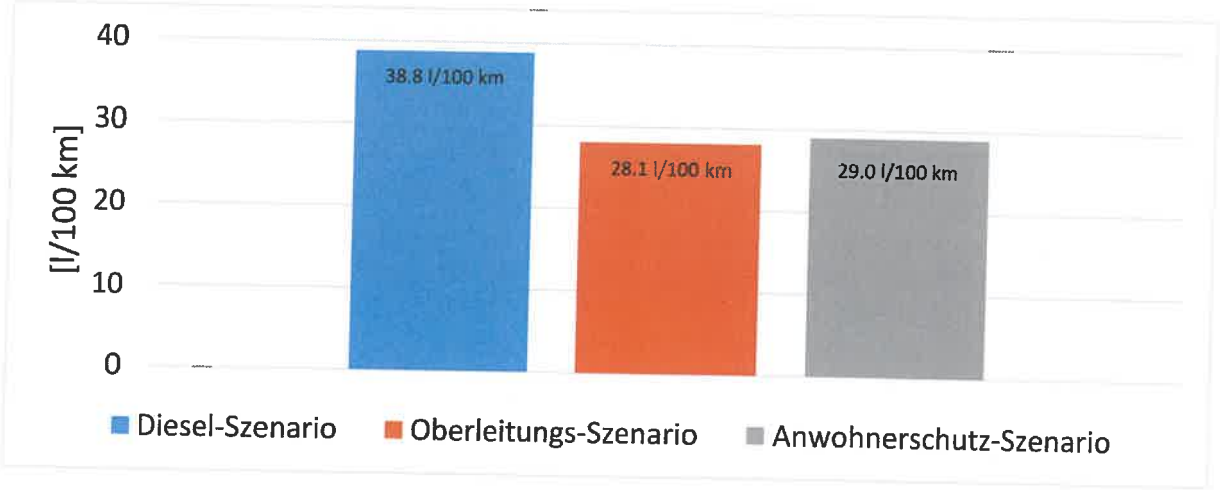


Abbildung 205: Verbrauchsvergleich unterschiedliche Betriebsstrategien (reiner Diesel, Oberleitung und Anwohnerschutz)

Im weiteren Verlauf des Projektes war ursprünglich geplant, die Erkenntnisse aus der Simulation mit einem realen Fahrzeug nachzuweisen. Allerdings war die Verfügbarkeit des Fahrzeuges und der entsprechenden Teststrecke nicht rechtzeitig gegeben, so dass an dieser Stelle ein Abgleich der realen Fahrdaten mit den Ergebnissen aus der Simulation nicht möglich.

Durch den Nachweis der Simulationsergebnisse mit den realen Messfahrten sollte im nächsten Schritt untersucht werden, mit welchen Maßnahmen der Mehrverbrauch durch die Schutzmaßnahmen reduziert werden kann. Hier sind beispielsweise prädiktive Funktionen denkbar, indem der Energiebedarf der zukünftigen Fahrsituationen prognostiziert werden kann und dadurch der Verbrennungsmotor (nur) in genau den Betriebssituationen genutzt wird, wo beispielsweise eine temporäre Lastpunktanhebung, zu einer Wirkungsgradoptimierung führt. Allerdings konnte dies wie bereits geschrieben nicht durchgeführt werden, da der LKW nicht verfügbar war.

2.19.5 "Multi-Truck"-Analyse

Ein weiterer Schwerpunkt war die Untersuchung einer Multi-Truck-Analyse unter der Oberleitung zur Bewertung der Spannungslage. Typischerweise wird in der Bahntechnik die Oberleitung mit 15 kV einphasiger Wechselspannung gespeist. Im PKW-Bereich werden Elektromotoren typischerweise mit 400 V Gleichspannung betrieben, wohin gehend bei höher motorisierten PKW und auch in der LKW-Branche die Antriebstechnik bereits auf 800 V betrieben wird. Daher stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob die aktuell gewählte Nennspannung der Oberleitung von 650 V richtig dimensioniert ist.

Im ersten Schritt wurde hierzu beispielhaft für die Versuchsstrecke in Lübeck (FESH) verschiedene Szenarien definiert, in welcher Form typischerweise LKW unter einer Oberleitung betrieben werden können. Um eine realitätsnähere Analyse durchzuführen, wurde die Analyse nicht ausschließlich mit voll beladenem LKW durchgeführt, sondern verschiedene Nutzungsszenarien bewertet. Dazu wurden folgende beispielhafte Nutzungsszenarien für LKW definiert, welche in der anschließenden Analyse verwendet werden:

- Solo-Zugmaschine ohne Trailer (9 t)
- Zugmaschine mit leerem Trailer (17,7 t)
- Zugmaschine mit Trailer und 6,3 t Nutzlast (24 t)
- Zugmaschine mit Trailer 12,3 t Nutzlast (30 t)
- Zugmaschine mit voll beladenem Trailer (40 t)

26. JULI 2022

Mit diesen LKW-Ausführungen wurden verschiedenen Simulationen für synthetisch erzeugte Fahrprofile, welche in Anlehnung an die tatsächliche Nutzung der ansässigen Spedition erstellt wurden, durchgeführt. Dabei wurden die LKW in zufälliger aber wiederkehrender Reihenfolge in der Simulationsumgebung durch das Testszenario (Fahrt von der Spedition in Reinfeld zum Hafen nach Lübeck und zurück) gefahren und die Auswirkung auf die Spannung bzw. Strom der Oberleitung betrachtet. Ziel der Untersuchung war es, zu bewerten, welche Anzahl an LKW unter einer Oberleitung betrieben werden können. Eine Übersicht über die Simulationsergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

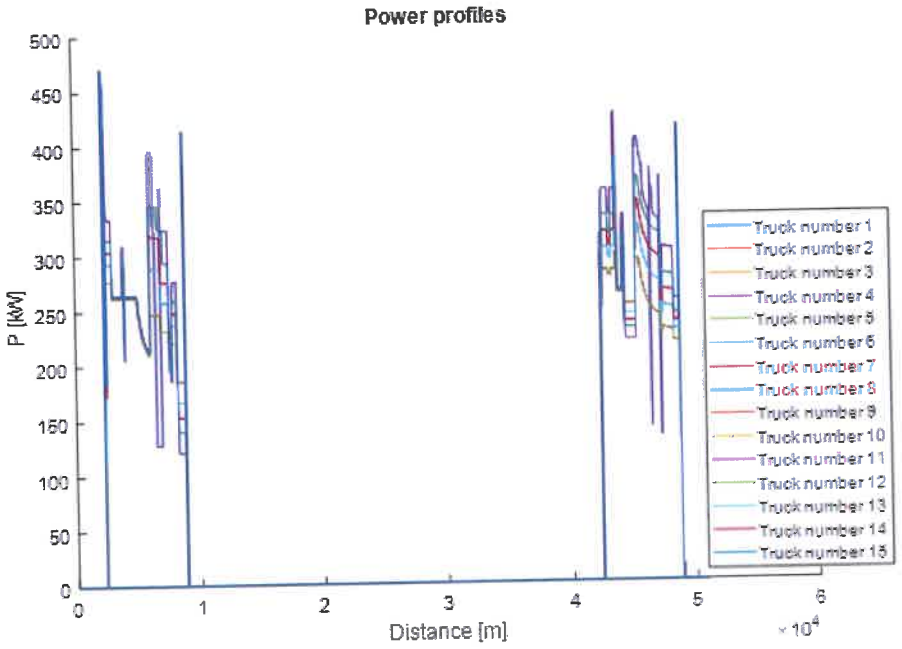


Abbildung 206: Leistungsaufnahme an der Oberleitung mit mehreren Fahrzeugen

In der Abbildung ist die Leistungsaufnahme von 15 LKW auf der genannten Versuchstrecke dargestellt. Auf der Abszissenachse ist dabei die absolute Fahrtstrecke des LKW aufgezeigt und die Werte der Ordinatenachse beziehen sich auf das Verhalten jeden einzelnen LKWs. Im Gegensatz dazu ist in der nachfolgenden Abbildung (exemplarisch für 5 LKW) die Spannung der Oberleitung in Abhängigkeit der Position eines LKWs unter der Oberleitung aufgeführt (hier nur der Auszug eines Oberleitungssegmentes):

26. JULI 2022

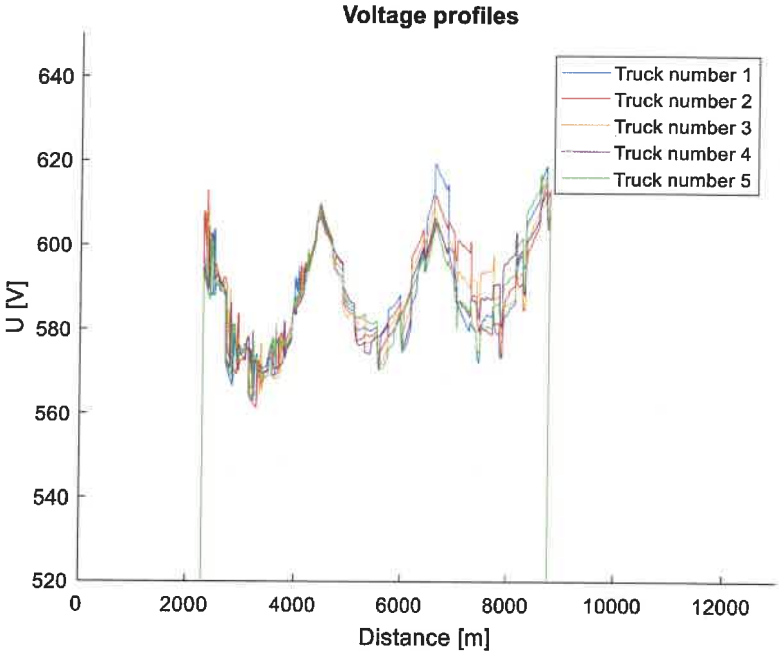


Abbildung 207: Spannungsverlauf an der Oberleitung mit mehreren Fahrzeugen

Die lokal am jeweiligen LKW vorliegende Spannung ist dabei abhängig von der eigenen Leistungsaufnahme und der Leistungsaufnahme der benachbarten LKW im selben Speiseabschnitt. Die unterschiedlichen Speiseabschnitte sind in der Abbildung durch die lokalen „Peaks" deutlich zu erkennen.

In diesem Szenario wird die Oberleitung an 4 Punkten durch je ein Unterwerk gespeist. D.h. ein Oberleitungssegment wird vereinfacht dargestellt einmal von „links" und einmal von „rechts" mit der Energie durch ein Unterwerk versorgt. Parallel zu dem ersten Unterwerk wird die Oberleitung durch einen zweites Unterwerk gespeist. Hierdurch wird jeder LKW, welcher sich zwischen zwei Einspeisepunkten befindet parallel von zwei Unterwerken mit Energie versorgt.

In der nachfolgenden Abbildung ist dies schematisch für einen Leitungsabschnitt dargestellt:

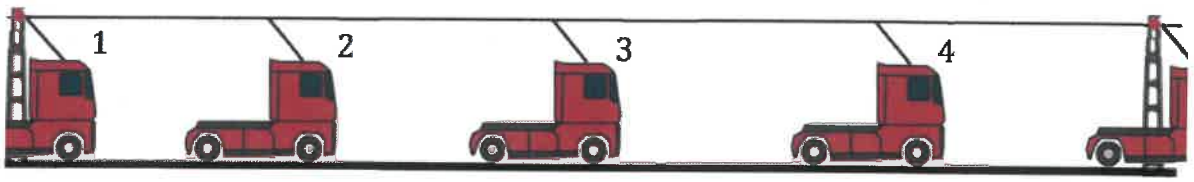


Abbildung 208: Schematische Darstellung mehrerer LKWs unterhalb einer Oberleitung

Unmittelbar an diesen Einspeisepunkten beträgt die Spannung der Oberleitung am LKW (1) die „Nennspannung" des Unterwerkes. Je weiter ein LKW von diesem Einspeisepunkt entfernt ist, desto länger ist Strecke der Oberleitung und der daraus resultieren Leitungswiderstand. Hierdurch entsteht ein zusätzlicher Spannungsfall. Je weiter der LKW (2) vom ersten Einspeisepunkt entfernt ist, desto niedriger sinkt die lokal anliegende Spannung, bis der LKW (3) das Minimum erreicht hat und weiter bzw. näher zum zweiten Einspeisepunkt gelangt, wo die Spannung wieder ansteigt (4), bis Sie am Ende wieder ihr Maximum erreicht.

Zur Analyse der Belastung der Oberleitung gibt es nun zwei mögliche Betrachtungen:

26. JULI 2022

1. Spannung: Die Spannung der Oberleitung darf ein Minimum nicht unterschreiten. Das Minimum ist abhängig von der Position des LKW innerhalb eines Speiseabschnittes und der Leistungsaufnahme aller im Speiseabschnitt fahrender LKW. Der Spannungsabfall darf üblicherweise nicht mehr als 15 % der Nennspannung betragen (DIN 50163).
2. Maximalstrom: Die Stromtragfähigkeit der gesamten Oberleitung und des Pantografen darf ein Maximum nicht überschreiten. Die Maximale Stromtragfähigkeit der Oberleitung beträgt im aktuellen System/Szenario 1800 A.

Im Fokus der Analyse lagen verschiedene Spannungslagen innerhalb der Spannungsklasse B (U < 1500 V DC), da oberhalb dieser Klasse weitergehende Maßnahmen notwendig wären. Die Spannungslagen wurden u.a. in Anlehnung an die DIN 50163 gewählt. Für die Betrachtung wurde daher die Oberleitung mit verschiedenen Nennspannung mit Energie versorgt und die im vorherigen beschrieben LKW in unterschiedlichen Anzahlen auf der Oberleitungsstrecke simuliert und die Spannung- bzw. Strom der Oberleitung betrachtet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse dazu aufgeführt. Die jeweilige Restriktion ist dabei in rot markiert und gibt an, welches Kriterium die maximale Anzahl der LKW pro Speiseabschnitt beschränkt hat.

Supply	Num. Trucks	Min. Voltage	Max. Current	Restriction by
650 V	2	606.41 V	1184.6 A	-
	3	589.11 V	1667.2 A	-
	4	570.59 V	2284.5 A	Current
900 V	3	857.95 V	1161.4 A	-
	4	846.03 V	1569.9 A	-
	5	834.90 V	1897.2 A	Current
1200 V	5	1152.7 V	1381.5 A	-
	6	1141.4 V	1690.3 A	-
	7	1133.2 V	1961.6 A	Current
1500 V	7	1447.5 V	1541.3 A	-
	8	1441.6 V	1714.2 A	-
	9	1434.3 V	1930.0 A	Current

Abbildung 209: Stromgrenzen in Abhängigkeit der Betriebsspannung und der maximalen Anzahl an OL-LKWs

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wie zu erwarten die maximale Anzahl der LKW pro Speiseabschnitt mit zunehmender Spannungslage ansteigt. Bei 650 V (dem aktuellen Ausbauszenario) ist der Betrieb von 3 LKW im angenommenen Belastungszustand möglich. Bei 1500 V wären dagegen bis zu 8 LKW möglich. In allen Fällen war hier der maximale Strom das jeweils restriktive Kriterium. Diese Grenze kann ggf. durch entsprechende Konstruktive Maßnahmen an der Infrastruktur vergrößert werden (größere Querschnitt der Oberleitung oder „Parallele-Leitungen").

Als weitere Maßnahme kann in diesem Fall die Anzahl der Unterwerke bzw. Einspeisungen entsprechend erhöht werden, womit erreicht wird, dass die maximale Anzahl an LKW pro Speiseabschnitt fahren können (unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben z.B. Mindestabstand). Alternativ kann mit organisatorischen Maßnahmen die Leistungsgrenze geregelt werden. Zum Beispiel wäre hier

26. JULI 2022

ein definierter Mindestabstand zwischen O-LKW oder die Beschränkung des maximalen Stroms pro LKW denkbar.

Anzumerken sei weiterhin, dass in den Auswertungen zwar die Spannungslage von 1500 V betrachtet wurde, diese Spannung allerdings nicht mehr innerhalb der Spannungsklasse B liegt. Denn ausschlaggebend für die Spannungsklasse ist nicht die Nennspannung, sondern die im System zulässige Maximalspannung.

Im weiteren Verlauf der Analysen wurden noch einzelne Spezialfälle, wie beispielsweise ein Stau betrachtet. Speziell in diesem Zusammenhang besteht bei einem Stau die Besonderheit, dass die LKW in einem sehr kurzem Abstand zu einander fahren können bzw. stehen. Hierdurch können sich pro Oberleitungssegment eine hohe Anzahl an Oberleitungs-LKW befinden. Zusätzlich kann der Leistungsbedarf ein atypisches Verhalten aufweisen. Im Stau kann beispielsweise jeder LKW seine eigene Batterie aufladen, was je nach LKW- bzw. Batterietyp einer hohe Leistung bzw. Energie entsprechen kann.

Zusätzlich kann im Stau eine „Stop&Go" Phase entstehen, wobei die LKW mit geringem Abstand an der Oberleitung entsprechend beschleunigen, zu kurzen und sehr hohen Leistungsspitzen führen kann. Als Weiterer Punkt war das „Stauende" in der Betrachtung, d.h. der Zeitpunkt in dem der Stau sich auflöst und (nahezu) zeitgleich alle LKW anfahren.

In der nachfolgenden Tabelle sind zusammenfassend die Ergebnisse für das „Stauende". Hier sind die jeweiligen Spannungslagen dargestellt und die dazugehörigen maximalen Anzahl an LKW bzw. der notwendige Abstand zwischen den LKWs, damit die entsprechenden Restriktionen eingehalten werden.

Supply	Separation		Num. Trucks	Min. Voltage	Max. Current
650 V	300 m		6	611.40 V	1574.9 A
900 V	250 m		7	858.99 V	1727.1 A
1200 V	150m		11	1152.8 V	1783.3 A
1500 V	110 m		15	1452.4 V	1767.1 A

Abbildung 210: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Betriebsspannung, Anzahl der Fahrzeuge und der daraus resultierenden Stroms

In der nachfolgenden Tabelle ist dagegen das „Stop&Go" Szenario aufgeführt. Hier wird angenommen, dass die LKW in einem sehr kurzen Abstand zueinander fahren und dabei regelmäßig bzw. zyklisch stark beschleunigen und wieder abbremsen. Im Gegensatz zum Stauende, zeigt sich, dass bei einem derartigen Szenario die Anzahl der LKW reduziert werden muss (bzw. der Abstand zueinander vergrößert werden muss), damit die Restriktionen eingehalten werden können.

Supply	Separation	Num. Trucks	Min. Voltage	Max. Current
650 V	400 m	4	584.27 V	1792.9 A
900 V	270 m	6	838.29 V	1767.1 A

26. JULI 2022

1200 V	200 m	9	1133.7 V	1753.1 A
1500 V	120 m	14	1439.3 V	1759.8 A

Abbildung 211: Belastung Oberleitung in einem möglichen Start/Stopp-Betrieb

2.20 AP 15: Bewertung und Strategischer Ausblick: Elektrifizierter Schwerlastverkehr 2050

2.20.1 Einleitung

Ziel des Projekts ist es, Mobilitätsszenarien für den Straßengüterverkehr im Jahr 2050 zu entwerfen um die langfristige Perspektive von Oberleitungs-Lkws (O-Lkw oder OC-GIV) im Kontext einer energiesystematischen Betrachtung zu bewerten. Dabei sollen insbesondere die Ziele der Energiewende und die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors berücksichtigt werden. Mithilfe des Renewable Energy Models (REMoD) des Fraunhofer ISE lassen sich die energiewirtschaftlichen Auswirkungen der Nutzung von O-Lkw simulieren und zwischen den einzelnen Szenarien vergleichen.

2.20.2 Einführung in die Software REMod

Um die Wechselwirkungen und Limitierungen der Energiebereitstellung und möglichst effiziente Pfade der Energiesystemtransformation zu ermitteln, wird häufig auf Energiesystemmodelle zurückgegriffen, welche eine ganzheitliche Analyse des Energiesystems und seiner Sektoren ermöglichen. Eines dieser Modelle ist das Renewable Energy Model (REMod, in älteren Versionen auch als REMod-D bezeichnet) des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), das im Jahr 2012 erstmals vorgestellt wurde und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt wird. Auf Basis dieses Modells sollen im Folgenden Untersuchungen zur Integrationsfähigkeit der zukünftigen Mobilität mit Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) ins deutsche Energiesystem erfolgen. Zu diesem Zweck werden die Funktionsweise und die Besonderheiten von REMod in der verwendeten Version (Version 3.1) zunächst kurz dargestellt und anschließend entsprechende Rechnungen für die in den folgenden Abschnitten eingeführten Szenarien durchgeführt.

Das Simulationsmodell REMod ermöglicht es, unter gegebenen Rahmenbedingungen ein kostenminimales Energiesystem für das ausgewählte Zieljahr zu ermitteln. Dabei werden erneuerbare und fossile Energiequellen, Energiewandler und -speicher sowie die Nachfrage aus den Bereichen Wärme, Strom, Industrie und Mobilität berücksichtigt.

Zu den exogen vorzugebenden Parametern zählen das einzuhaltende CO_2-Emissionsziel, Mengenpotenziale von Energieträgern, Zubaugrenzen erneuerbarer Energien, Kostendaten, Wirkungsgrade von Energiespeichern- und Wandlern, Nachfragezeitreihen für die Energieformen Strom und Wärme und weitere Rahmenbedingungen. Der modellendogene Perfect-Foresight-Optimierungsalgorithmus ermittelt auf dieser Basis eine volkswirtschaftlich kostenoptimale Energiesystemkonfiguration, die durch iterative Anpassung der Komponentendimensionierung für alle Sektoren erreicht wird. Das Modell verfügt über eine stundenscharfe Auflösung, sodass die Schwankungen der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energien ebenso berücksichtigt werden wie die Lastgänge der Energienachfrage der einzelnen Sektoren, die zu jeder Stunde der Simulation gedeckt werden müssen.

Nach erfolgter Optimierung werden Analysen des Energiesystems durchgeführt, die den Zubau und die Volllaststunden bestimmter Komponenten, stundenscharfe Zeitverläufe der Energieflüsse oder Gesamtsystemkosten umfassen können. Es kann festgestellt werden, ob unter den getroffenen Annahmen Power-to-X im Energiesystem zur Energiespeicherung verwendet wird, oder welche Technologien zur Nutzbarmachung von regenerativen Erzeugungsspitzen optimaler Weise verwendet werden sollten.

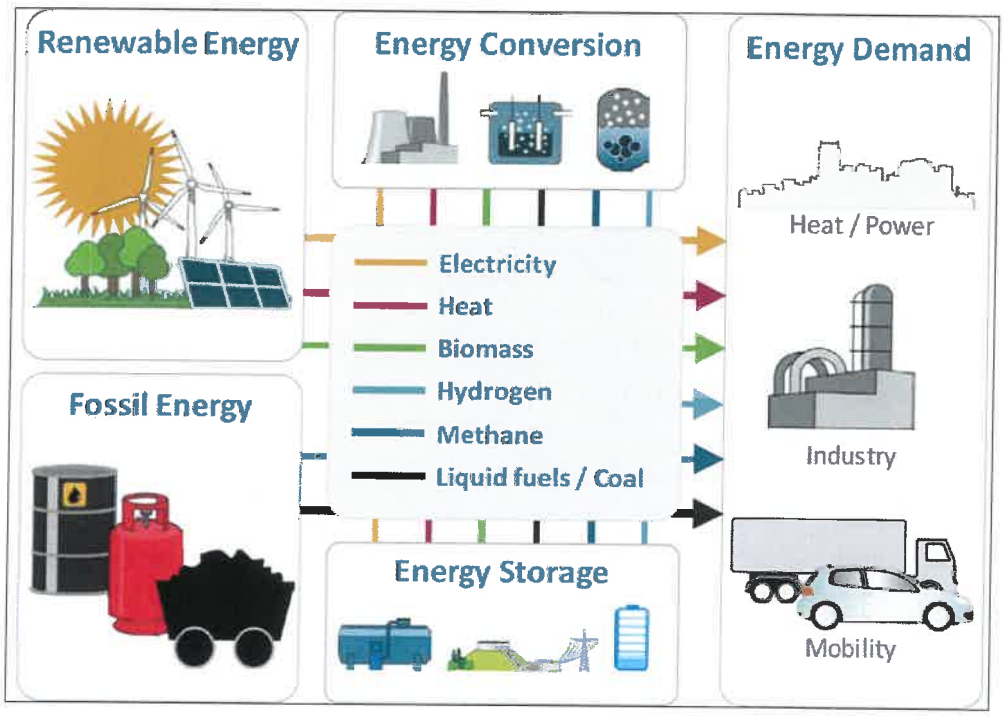


Abbildung 212: Schematischer Überblick über das Energiemodell REMod.

2.20.3 Szenarienentwicklung

2.20.3.1 Überblick

Das Erstellen von Zukunftsszenarien (Tabelle 14) für den Straßengüterverkehr mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen als Grundlage für die Simulation mit REMod ermöglicht es, unterschiedliche Optionen für den bedarfsgerechten Ausbau des Energiesystems miteinander zu vergleichen. Im Speziellen soll untersucht werden, wie sich O-Lkw in unterschiedlichen Szenarien auf das Energiesystem auswirken. Treiber für die Ausgestaltung des Betriebs von O-Lkw sind der Ausbaugrad des dafür notwendigen Oberleitungsnetzes der Autobahnen und der Einfluss der Marktdominanz autonom fahrender Fahrzeuge auf die zukünftige Entwicklung des gesamten Mobilitätssektors. Daher wird für jeden der beiden Parameter eine Maximal- und eine Minimalannahme getroffen und zu vier unterschiedlichen Szenarien kombiniert. Anhand eines Literaturvergleiches wird die (Straßen-) Güterverkehrsleistung[9], kurz GVL, für 2050 prognostiziert und damit die Inlandsfahrleistung[10] im Straßengüterverkehr, differenziert nach Größe und Antriebsart der Fahrzeuge, abgeschätzt. Durch Multiplikation mit den mittleren, fahrzeugspezifischen Verbräuchen erhält man den jeweiligen Jahresenergiebedarf, welche dann als Rahmenbedingungen für die Simulation fungieren.

[9] Güterverkehrsleistung: Produkt aus der innerhalb eines Jahres im gesamten inländischen Gütertransportsektor zurückgelegten Strecke und der Gesamtmasse der beförderten Güter [Einheit: 1 Tonnenkilometer = 1 tkm].
[10] Inlandsfahrleistung: Gesamtstrecke, die im inländischen Straßengüterverkehr innerhalb eines Jahres zurückgelegt wurde [Einheit: 1 Kilometer = 1km].

26. JULI 2022

O-Lkw beziehen einen Großteil der benötigten Antriebsenergie zum Zeitpunkt des Verbrauches aus dem Stromnetz, was die Flexibilität in ihrer Verbrauchscharakteristik einschränkt. Dieser Umstand bedarf insbesondere zu Spitzenlastzeiten genauerer Untersuchungen, weshalb hier die Verwendung einer Energiebedarfszeitreihe in stündlicher Auflösung anstatt eines einfachen Jahresbedarfs betrachtet wird. Der stündliche Energiebedarf ist proportional zur Verkehrsleistung, deren Jahreszeitreihe insbesondere im Hinblick auf Veränderungen durch autonome Fahrzeuge Szenarien abhängig ist.

Tabelle 14: Die vier Zukunftsszenarien des Straßengüterverkehrs für 2050 im Überblick

	Oberleitungsnetz: 4.000 km	**Oberleitungsnetz: 11.700 km**
Business As Usual (BAU)	BAU4000	BAU11700
Autonomous Driving (AD)	AD4000	AD11700

2.20.3.2 Szenarien Eckpunkte

2.20.3.2.1 Ausbau des Oberleitungsnetzes

Bei der Einführung von O-Lkw ist die großflächige Elektrifizierung des Autobahnnetzes durch Oberleitungen erforderlich. Der angenommene Ausbau des Oberleitungsnetzes bis 2050 orientiert sich an der MKS-Machbarkeitsstudie (1) und dem Endbericht des StratON-Forschungsprojektes (2). Beide Studien kommen zu der Schlussfolgerung, dass der kostenoptimale Zuwachs an O-Lkw durch eine Elektrifizierung von rund 3.000 km Autobahn bis 2030 erzielt werden kann. Als Minimalszenario für den Oberleitungsausbau wird ein Wert von 4.000 km für 2050angenommen, da sich die herangezogenen Berichte auf das Jahr 2030 beziehen. Alternativ wäre auch eine kostenintensivere, nahezu komplette Elektrifizierung des Autobahnnetzes denkbar. Aufgrund dessen wird eine Strecke von 11.700 km, also ca. 90% des Autobahnnetzes, als maximaler Ausbau festgelegt.

2.20.3.2.2 Antriebsszenarien Güterverkehr 2050

Für jede der beiden Ausbaustufen des Oberleitungsnetzes werden für mehrere Antriebsarten die Anteile an der Inlandsfahrleistung 2050 abgeschätzt (Abbildung 213). Betrachtet werden batterieelektrische Fahrzeuge (engl. BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) und O-Lkw (OC-GIV). Die MKS- und StratON-Studien (1, 2) verorten die größten Potentiale von O-Lkw vor allem im Schwerlastverkehr. Daher ist es notwendig, die Verteilung der Antriebsarten nach Lkw-Größenklassen differenziert zu betrachten (N. B.: Der Begriff *Lkw* umfasst in diesem Bericht auch Sattelzüge, selbst wenn das technisch nicht korrekt formuliert ist.). Die Einteilung wird nach dem zulässigem Gesamtgewicht vorgenommen und gliedert sich in:

- Lkw < 3,5 t
- Lkw 3,5 t – 7,5 t
- Lkw 7,5 t – 12 t
- Lkw 12 t – 20 t
- Lkw > 20 t
- Sattelzüge

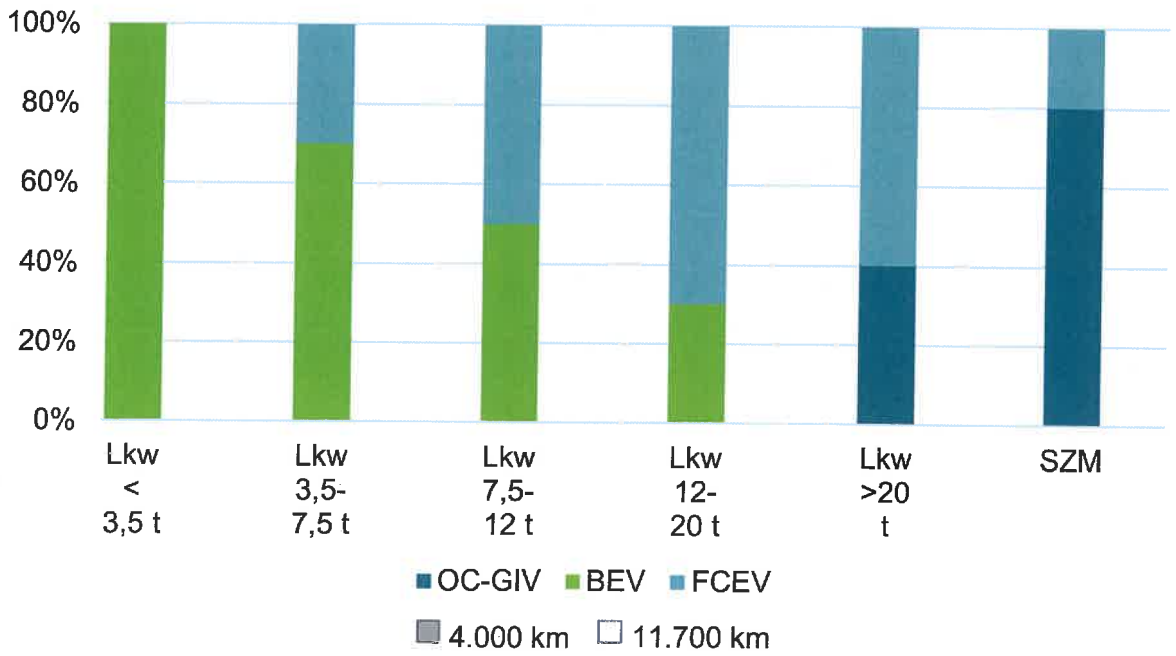


Abbildung 213: Verteilung der Antriebsarten auf die Größenklassen in den betrachteten Ausbauszenarien der Oberleitungen. Die 4.000 km-Ausbaustufe ist ohne Hintergrundmuster dargestellt, die Säulen für das 11.700 km-Szenario sind weiß gepunktet.

Die Prognose der Antriebsverteilungen sieht wie folgt aus: Generell wird für leichte Lkw unter 3,5 t der batterieelektrische Antrieb perspektivisch als dominant eingeschätzt (1). Für das 4.000 km-Ausbauszenario nimmt dann mit zunehmenden Gewicht auch der Anteil an FCEV zu, weil BEV im Anwendungsbereich schwererer Lkw aufgrund des Gewichts der benötigten Batterie ineffizienter sind (1). Erst im Schwerlastverkehr (Lkw > 20 t und Sattelzüge) ist die Antriebsart OC-GIV mit 40% bzw. 80% bei den Sattelzügen vertreten. Im 11.700 km-Szenario wird davon ausgegangen, dass nahezu der gesamte Schwerlastverkehr (95%) durch O-Lkw betrieben wird. Ausnahmen bildet nur ein geringer Anteil an Fahrzeugen, die primär Strecken fern der (elektrifizierten) Autobahnen zurücklegen und brennstoffzellenbetrieben fahren. Wegen des geringeren Marktanteils der FCEV im Schwerlastverkehr, verfügen diese generell über eine geringere Wettbewerbsfähigkeit. Daher steigt auch in den mittleren Größenklassen der Anteil an FCEV nicht so stark an.

2.20.3.2.3 Autonomes Fahren

Hier besteht das Minimalszenario aus einer „Business-As-Usual"-Weiterentwicklung, also dem Ausbleiben der großflächigen Einführung autonomer Lkw. Konträr dazu steht der Fall „Autonomous Driving" als Maximalszenario, in dem nahezu der gesamte Straßengüterverkehr über autonome Fahrzeuge abgewickelt wird. Dies hat einen Einfluss auf den Energiebedarf der Fahrzeuge. Weiterhin wird von einer Senkung der Transportkosten für das autonome Szenario ausgegangen, was sich steigernd auf die GVL auswirkt.

26. JULI 2022

2.20.3.3 Berechnen der Inlandsfahrleistung

Die Abschätzung der Inlandsfahrleistung im Straßengüterverkehr 2050 erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden die Güterverkehrsleistung und die Inlandsfahrleistung für das Jahr 2014 bestimmt. Aus der Entwicklung der GVL und weitern Parametern lässt sich die Entwicklung der Inlandsfahrleistung für 2050 jeweils für die BAU- und AD-Szenarien prognostizieren.

2.20.3.3.1 Inlandsfahrleistung 2014

Das Kraftfahrt-Bundesamt Daten zur beladenen und unbeladenen Inländerfahrleistung[11] im Inland 2014 zur Verfügung. Aus der Summe errechnet sich die im Inland erbrachte Inländerfahrleistung, als die Summe aller Strecken, die in Deutschland gemeldete Fahrzeuge hierzulande zurückgelegt haben; mit Ladung und ohne. Bei Addition mit der Ausländerfahrleistung[12] ergibt sich die gesuchte Inlandsfahrleistung 2014 (Tabelle 15).

Tabelle 15: Berechnung der Inlandsfahrleistung 2014 nach Größenklasse

Größenklasse	Inlandsfahrleistung / Mio. km
< 3,5 t	51.777
3,5 t – 7,5 t	6.170
7,5 t – 12 t	3.637
12 t – 20 t	3.342
> 20 t	10.139
Sattelzüge	23.598

2.20.3.3.2 Güterverkehrsleistung 2014 und 2050

Daten aus dem Jahr 2014 liefert das Kraftfahrt-Bundesamt (3). Die zukünftige Entwicklung der Fahrleistung ist an die Veränderung der GVL gekoppelt (4). Für deren Abschätzung wird ein Literaturvergleich durchgeführt. In diesem Rahmen werden verschiedene Verkehrsstudien betrachtet (5–9), die die GVL für das Jahr 2050 prognostizieren (Abbildung 214). Es soll möglichst ein Wert verwendet werden, der im Mittelfeld der einbezogenen Studienergebnisse liegt, daher wird die Studie des Bundesverbands der deutschen Industrie (BDI)f als Referenzszenario herangezogen. Diese trifft keine Prognosen über Attraktivitätszuwächse und -verluste unterschiedlicher Verkehrsmoden (Schiene, Schiff, Straße, ...) und orientiert sich bei der Szenarienbildung rein am Zuwachs durch Wirtschaftswachstum. Weitere Einflüsse auf die Entwicklung der Fahrleistung werden im Folgenden nach der Methodik von Kersten abgeschätzt (4).

[11] Inländerfahrleistung: Durch in Deutschland gemeldete Fahrzeuge weltweit erbrachte Fahrleistung.
[12] Ausländerfahrleistung: Fahrleistung, die in Deutschland durch im Ausland gemeldete Fahrzeuge erbracht wurde.

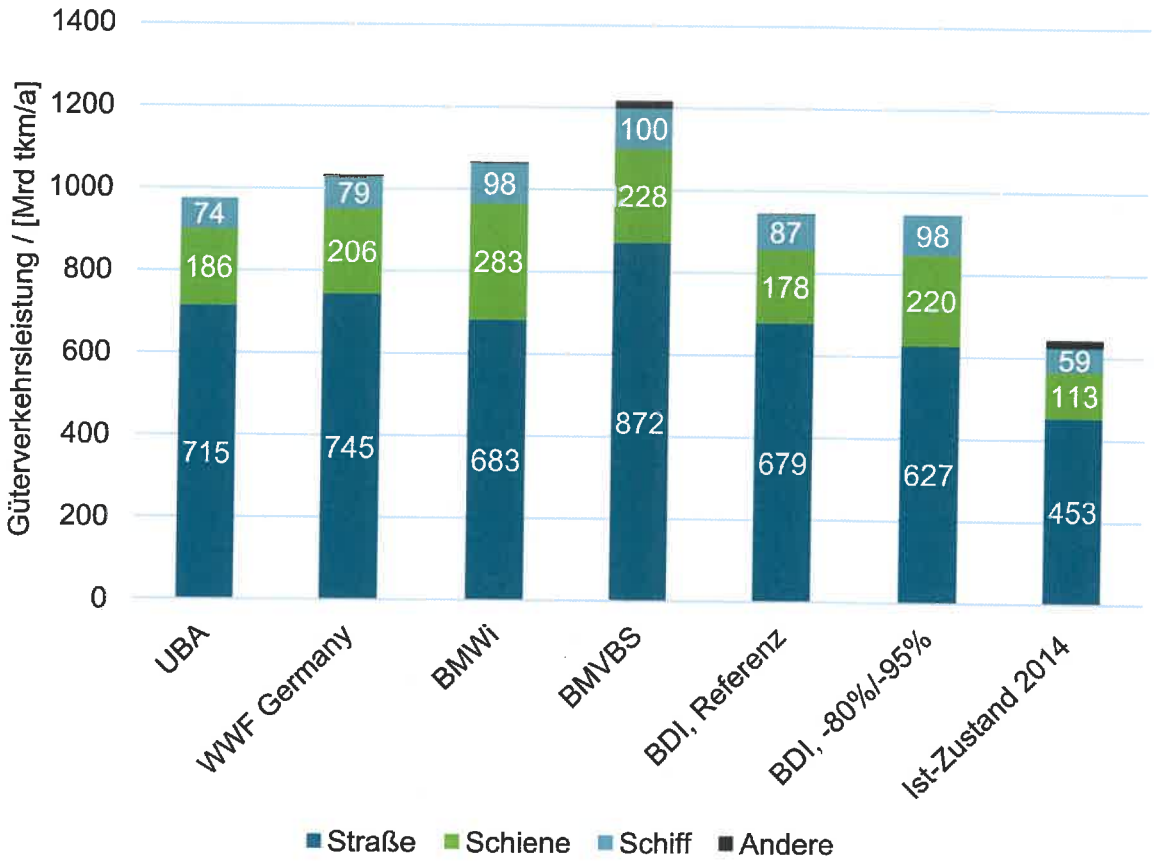


Abbildung 214: Übersicht verschiedener Studien, die eine Prognostizierung der Güterverkehrsleistung im Jahr 2050 vornehmen. Zum Vergleich ist ganz rechts die Inlandsfahrleistung 2014 dargestellt. Zur BDI-Studie existieren zwei Szenarien

2.20.3.3.3 Inlandsfahrleistung 2050

2.20.3.3.3.1 Nichtautonome Szenarien (BAU)

Die Entwicklung der Inlandsfahrleistung bis 2050 ergibt sich aus Berücksichtigung der Veränderung von GVL, Auslastungsgrad und Leerkilometeranteil (Abbildung 215, Tabelle 16). Im ersten Schritt wird das Verhältnis aus prognostizierter GVL 2050 und dem Ist-Wert 2014 berechnet und der erhaltene Faktor mit der Inlandsfahrleistung 2014 multipliziert (Formel (1)).

$$F_1 = F_0 \frac{GVL_{2050}}{GVL_{2014}} \qquad (1)$$

- F_1: In erster Näherung durch Veränderung der GVL abgeschätzte Inlandsfahrleistung 2050 (Straßengüterverkehr)
- F_0: Inlandsfahrleistung 2014 (Straßengüterverkehr)
- GVL_{2050}: Prognostizierte GVL 2050
- GVL_{2014}: Ist-Wert der GVL 2014

Im nächsten Schritt wird die Veränderung des gravimetrischen Auslastungsgrades berücksichtigt. Dieser gibt an, welchen Anteil des maximalen Ladungsgewichtes eines Lkw die Ladung im Mittel einnimmt. Welche Masse an Ladung ein Lkw transportieren kann ist häufig weniger durch das maximale Ladungsgewicht als durch das Volumen des Laderaums limitiert. Sinkt der Auslastungsgrad, sind mehr

Fahrten notwendig um die gleiche Ladungsmasse zu transportieren, was zu einem Anstieg der Fahrleistung führt. Im Jahr 2014 liegt der gravimetrische Auslastungsgrad bei durchschnittlich 57,8 % in allen Größenklassen. In den letzten Jahren ist zu beobachten, dass immer mehr leichte Güter transportiert werden, daher wird bis 2050 eine Abnahme des Auslastungsgrades auf 56% angenommen (4). Die Inlandsfahrleistung ändert sich dann nach folgender Formel:

$$F_2 = F_1 \frac{a_{2014}}{a_{2050}} \qquad (2)$$

- F_2: Prognostizierte Inlandsfahrleistung 2050 nach Berücksichtigung der Auslastungsgradänderung
- a_{2014}: Auslastungsgrad 2014
- a_{2050}: Prognostizierter Auslastungsgrad 2050

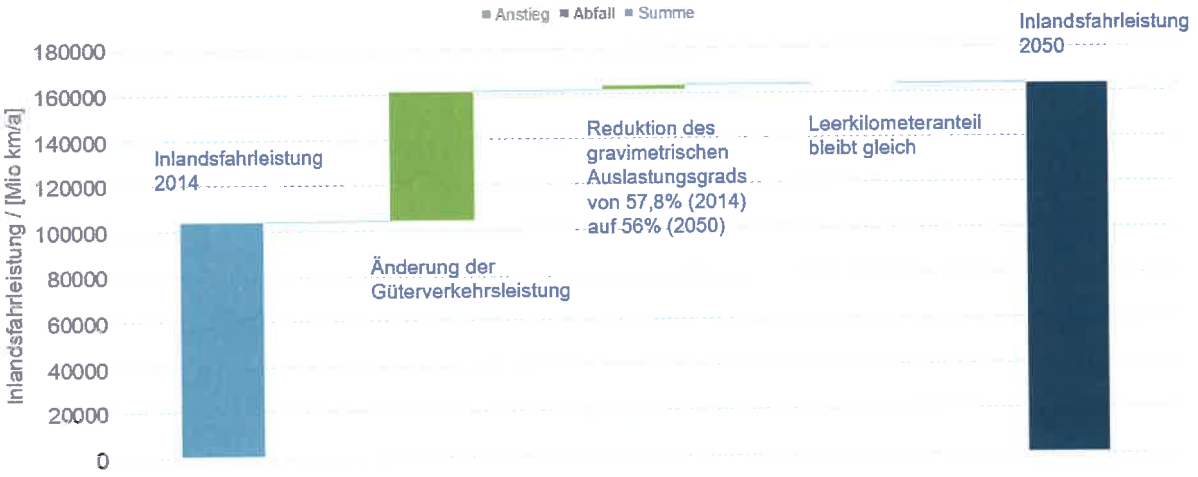


Abbildung 215: Entwicklung der Inlandsfahrleistung (Summe über alle Größenklassen > 3,5 t) von 2014 bis 2050 in den BAU-Szenarien

Der Leerkilometeranteil gibt an, welcher Teil der Fahrleistung unbeladen zurückgelegt wird. Da dieser seit einigen Jahren keine signifikante Veränderung aufweist, wird davon ausgegangen, dass dies auch 2050 zutrifft (4). Somit entsteht hier keine zusätzliche Fahrleistung.

Die BDI-Studie berücksichtigt in der Prognose der GVL keine Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht unter 3,5 t, weshalb hierfür ein anderer Ansatz gewählt werden muss. Für diese Größenklasse wird ein pauschales Wachstum der Inlandsfahrleistung von 1,4% p. a. (2014 bis 2050) angenommen (4).

Tabelle 16: Inlandsfahrleistung 2050 in den BAU-Szenarien, abgeschätzt durch Betrachtung der Veränderung von GVL, Auslastungsgrad und Leerkilometeranteil

Größenklasse	Inlandsfahrleistung / Mio. km
< 3,5 t	85.282
3,5 t – 7,5 t	9.548
7,5 t – 12 t	5.627
12 t – 20 t	5.127
> 20 t	15.689
Sattelzüge	36.515

2.20.3.3.3.2 Autonom (AD)

Das Vorgehen ist hier ähnlich wie oben beschrieben, allerdings mit einigen Änderungen und weiteren Effekten (Abbildung 216, Tabelle 17). Der Auslastungsgrad für 2050 wird auf 45% prognostiziert (4). Hintergrund ist die Annahme, dass durch die Einführung autonomer Fahrtechnologien der Straßengütertransport so viel kostengünstiger wird, dass der gravimetrische Auslastungsgrad an wirtschaftlicher Bedeutung für die Logistik verliert. Dadurch lässt sich die Annahme begründen, dass der Leerkilometeranteil auf 25% zunimmt. Durch beide Effekte wird zusätzliches Verkehrsaufkommen generiert (Formel (3)).

$$F_3 = F_2 + F_2(l_{2050} - l_{2014}) \quad (3)$$

- F_3: Inlandsfahrleistung nach Berücksichtigung der Leerkilometer-Änderung
- l_{2050}: Prognostizierter Leerkilometeranteil 2050
- l_{2014}: Leerkilometeranteil 2014

Für die autonomen Szenarien ergeben sich weitere die Fahrleistung beeinflussende Faktoren. So sorgt die autonome Fahrtechnologie für eine Reduktion der Transportkosten, da z. B. weniger Fahrer benötigt werden und Lenkzeitbeschränkungen entfallen, was für einen insgesamt kosteneffizienter Straßengüterverkehr sorgt. Deshalb wird eine Abnahme des Tonnenkilometerpreises um 30% angenommen (10). Die Transportkostenreduktion aufgrund autonomer Technologien sorgt nach dem Preiselastizitätsmodell für eine Erhöhung der Fahrleistung durch den Mode-Change-Effekt und ein zusätzliches Transportaufkommen (4, 11). Da das autonome Fahren Straßentransporte günstiger macht, gewinnt dieses gegenüber den anderen Moden an Attraktivität (GVL +18,6%). Durch die Transportpreissenkung entsteht der Anreiz, Güter zu befördern, bei denen dies aus Kostengründen sonst nicht geschehen wäre. Dies resultiert in weiterem Transportaufkommen(GVL +3,9%). Für eine detaillierte Beschreibung des allgemeinen Preiselastizitätsmodells sei hier auf Kersten 2018 (4) verwiesen. Die dort verwendeten Elastizitätsfaktoren (Ɛ) für den Mode Change und das zusätzliche Transportaufkommen sind

in Abbildung 216 dargestellt[13]. Auch in den AD-Szenarien gelten die beschrieben Effekte nicht für Lkw mit unter 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht. Stattdessen wird die für die BAU-Szenarien errechnete Inlandsfahrleistung mit einem *General Factor* von 1,1 multipliziert um die durch den autonomen Güterverkehr induzierten Änderungen zu berücksichtigen (4, 11).

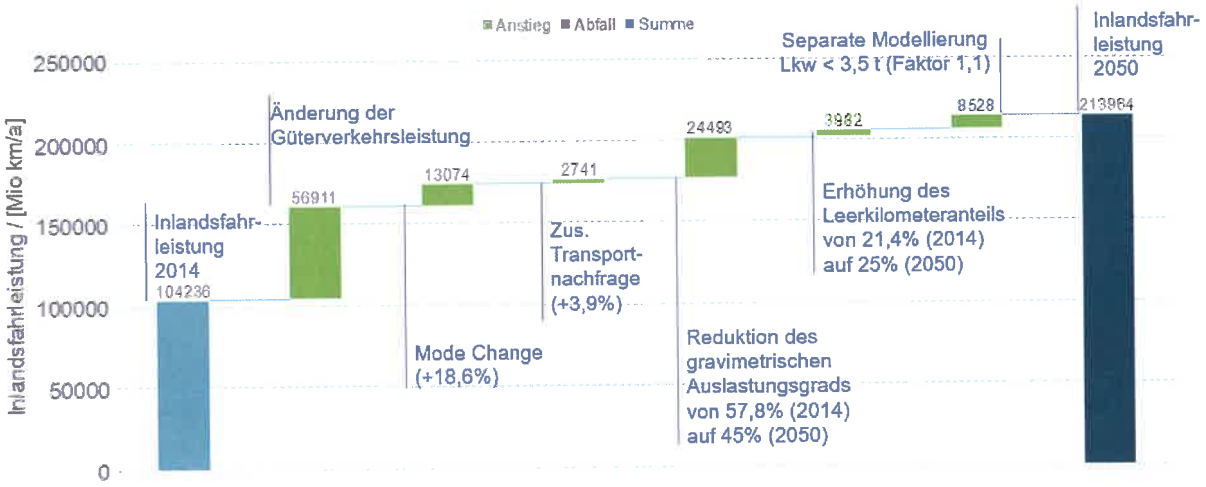


Abbildung 217: Entwicklung der Inlandsfahrleistung in den AD-Szenarien von 2014 bis 2050.

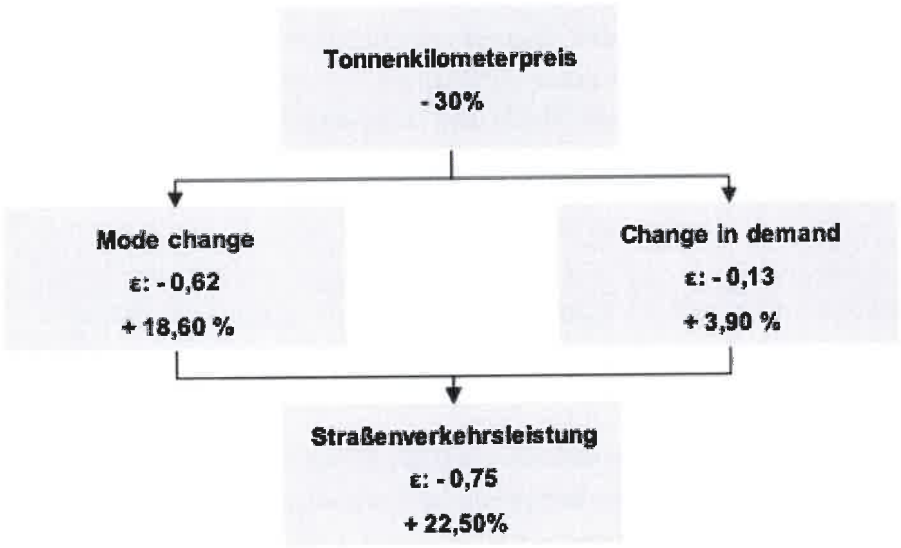


Abbildung 216: Preiselastizitätsmodell für den autonomen Güterverkehr. Die Prozentzahlen geben die Veränderung der Fahrleistung an, Ɛ bezeichnet den Preiselastizitätskoeffizienten.

[13] Graphik aus King 2018 (11); dort modifiziert übernommen aus Jong et al. 2011 (12).

Tabelle 17: Inlandsfahrleistung 2050 in den AD-Szenarien, abgeschätzt durch Betrachtung der Veränderung von GVL, Auslastungsgrad und Leerkilometeranteil, sowie Preiselastizitätseffekte durch Kostensenkungen aufgrund des Autonomen Fahrens.

Größenklasse	Inlandsfahrleistung / Mio. km
< 3,5 t	93.810
3,5 t – 7,5 t	15.079
7,5 t – 12 t	8.887
12 t – 20 t	8.168
> 20 t	24.778
Sattelzüge	57.670

2.20.3.4 Energieverbräuche

Für die Simulation müssen die Jahresenergieverbräuche der BEV, OC-GIV und FCEV ermittelt werden. Dazu werden die spezifischen Energieverbräuche (Einheit: J/km) je Antrieb und Größenklasse für 2050 ermittelt und dann mit der jeweiligen Inlandsfahrleistung multipliziert.

Ausgangspunkt sind zwei zusammenhängende Studien des Öko-Instituts (13, 14), die den zukünftigen spezifischen Energieverbrauch verschiedener Antriebsarten modellieren. Beide Studien nutzen häufig die gleichen Verbrauchswerte, betrachten aber unterschiedliche Größenklassen und Antriebe. Aus diesen wurden für das Jahr 2040 prognostizierte Verbrauchswerte entnommen, unter der Annahme, dass die in 2040 neu zugelassenen Lkw den durchschnittlichen Bestand im Jahr 2050 abbilden. Allerdings stimmt die in den Studien vorgenommene Einteilung der Güterfahrzeuge nach Größenklasse nicht immer mit unserer überein oder bestimmte Kombinationen von Antrieb und Größenklasse werden nicht betrachtet. Die fehlenden Werte werden aus der jeweils anderen Studie ergänzt oder müssen auf anderem Wege abgeschätzt werden. Diese Abschätzung erfolgt unter der Annahme, dass der relative Mehrverbrauch einer schwereren Größenklasse gegenüber einer leichteren bei allen Antrieben ungefähr gleich ist. Ein Beispiel: Der Verbrauchswert für FCEV 7,5 t – 12 t wird in keiner der beiden Studien betrachtet. Bekannt sind aber die Verbrauchswerte für BEV 3,5 t – 7,5 t und BEV 7,5 t – 12 t. Von der leichteren zur schwereren Größenklasse stiegt der BEV-Verbrauch um 41%. Die gleiche Änderung wird auch für FCEV angenommen. Da der Verbrauchswert für FCEV 3,5 t – 7,5 t bekannt ist (0,83 kWh/km), lässt sich nun der Verbrauch für FCEV 7,5 t – 12 t berechnen ($0{,}83\ \mathrm{kWh/km} \times 1{,}41 = 1{,}18\ \mathrm{kWh/km}$).

Der Verbrauchswert für O-Lkw (> 20 t und Sattelzugmaschinen) ist zwar bekannt, allerdings ist es fraglich, ob sich der Wert nur auf den Verbrauch des Lkw beschränkt, oder auch Übertragungsverluste in der Oberleitung und Verluste durch den Luftwiderstand des ausgefahrenen Pantographen berücksichtigt, was für die Energiesystemsimulation mit REMod berücksichtigt werden muss. Aufgrund dieser Unklarheiten wurde im Rahmen des Projektes durch Computersimulation der spezifische Energieverbrauch (ohne Pantographen- und Oberleitungsverluste) eines auf der Autobahn fahrenden Modell-O-Lkws von 25 t Gesamtgewicht berechnet. Das Gewicht von 25 t entspricht dem ungefähren Durchschnittsgewicht von Schwerlast-Lkw. Das verwendete Computermodell ist allerdings nur in der Lage,

Berechnungen für das Jahr 2020 vorzunehmen. Hierfür liefert es ein Ergebnis von 1,46 kWh/km. Bis 2050 werden Effizienzsteigerungen von 0,5 % p. a. angenommen, so dass der spezifische Verbrauch auf 1,32 kWh/km sinkt. Berücksichtigt werden müssen auch der zusätzliche Fahrwiderstand durch den ausgefahrenen Pantographen (5% Mehrverbrauch) und Übertragungsverluste in der Oberleitung (8% Mehrverbrauch). Damit beträgt der spezifische Verbrauch ab dem Stromnetz 1,49 kWh/km in 2050 (Abbildung 218).

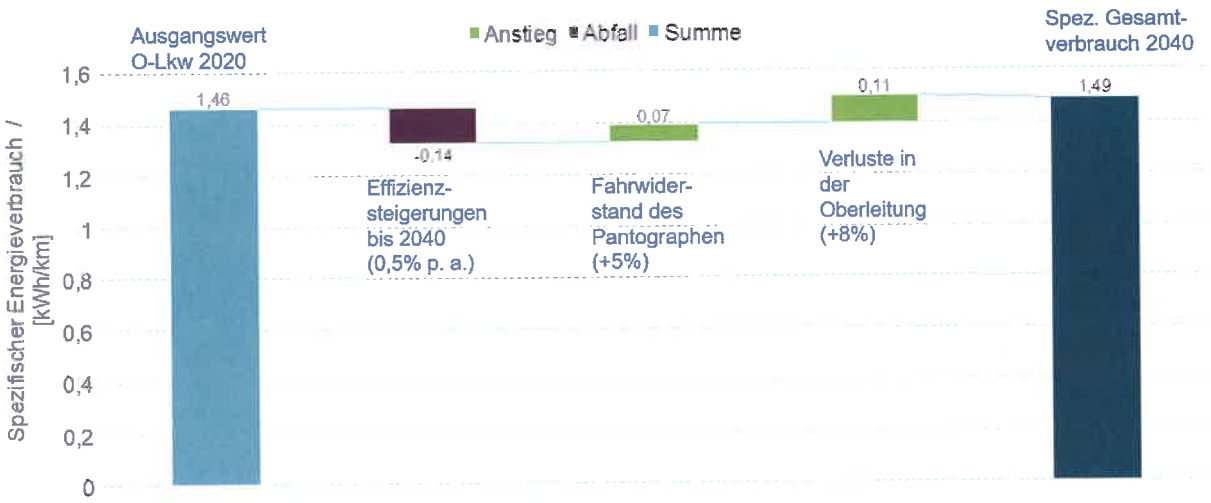


Abbildung 218: Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs des durchschnittlichen O-Lkw von 2020 bis 2050. Ausgangspunkt ist das Ergebnis einer internen Computersimulation.

Der berechnete Wert entspricht nicht den Ergebnissen der beiden Studien. Um die relativen Proportionen der Verbrauchswerte für unterschiedliche Antriebe und Größenklassen auch bei Verwendung des neuen O-Lkw-Verbrauchs zu erhalten wurden alle Verbräuche auf den Wert aus den Studien normiert (Tabelle 18) und mit dem neuen Wert multipliziert (Tabelle 19).

Tabelle 18: Auf den OC-GIV-Literaturwert normierte Anteile der Verbräuche.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	0.21	0.32
3,5 t – 7,5 t	0.00	0.45	0.69
7,5 t – 12 t	0.00	0.63	0.97
12 t – 20 t	0.00	0.84	1.25
> 20 t	1.00	1.03	1.51
Sattelzüge	1.00	1.03	1.51

Alle Kombinationen aus Antrieb und Größenklasse für die spezifischen Energiebräuche für 2050 sind bekannt. Das Produkt aus diesen und der Inlandsfahrleistung der jeweiligen Größenklasse (Tabelle 16, Tabelle 17) und der Antriebsverteilungen innerhalb dieser (Abbildung 213), ergibt jedes Szenario die entsprechenden Jahresenergieverbräuche (

Tabelle 20, Tabelle 21, Tabelle 22, Tabelle 23).

Tabelle 19: Absolute spezifische Verbräuche mit OC-GIV-Wert aus dem Computersimulation. Alle Angaben in kWh/km.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	0.31	0.48
3,5 t – 7,5 t	0.00	0.67	1.03
7,5 t – 12 t	0.00	0.94	1.45
12 t – 20 t	0.00	1.26	1.87
> 20 t	1.49	1.54	2.26
Sattelzüge	1.49	1.54	2.26

Tabelle 20: Jahresenergieverbräuche für das Szenario BAU4000. Alle Angaben in TWh/a.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	26.13	0.00
3,5 t – 7,5 t	0.00	5.74	0.98
7,5 t – 12 t	0.00	3.71	2.44
12 t – 20 t	0.00	3.25	4.83
> 20 t	9.37	0.00	21.23
Sattelzüge	43.60	0.00	16.47

Tabelle 21: Jahresenergieverbräuche für das Szenario BAU11700. Alle Angaben in TWh/a.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	26.13	0.00
3,5 t – 7,5 t	0.00	4.46	2.94
7,5 t – 12 t	0.00	2.65	4.07
12 t – 20 t	0.00	1.95	6.77
> 20 t	22.24	1.21	0.00
Sattelzüge	51.77	2.81	0.00

Tabelle 22: Jahresenergieverbräuche für das Szenario AD4000. Alle Angaben in TWh/a.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	22.74	0.00
3,5 t – 7,5 t	0.00	7.03	1.20
7,5 t – 12 t	0.00	4.45	2.92
12 t – 20 t	0.00	3.74	5.57
> 20 t	10.33	0.00	23.41
Sattelzüge	48.20	0.00	18.21

Tabelle 23: Jahresenergieverbräuche für das Szenario AD11700. Alle Angaben in TWh/a.

Größenklasse	OC-GIV	BEV	FCEV
< 3,5 t	0.00	22.74	0.00
3,5 t – 7,5 t	0.00	5.47	3.60
7,5 t – 12 t	0.00	3.18	4.87
12 t – 20 t	0.00	2.25	7.79
> 20 t	24.53	1.33	0.00
Sattelzüge	57.24	3.11	0.00

2.20.3.5 Oberleitungszeitreihen

2.20.3.5.1 Fahrprofile

Für die Inklusion der O-Lkw in REMod ist es notwendig, stündlich aufgelöste Verbrauchszeitreihen zu erstellen. Basis hierfür sind szenarienspezifische Fahrprofile, welche die durchschnittliche relative Verkehrsstärke eine Fahrzeugtyps in stündlicher Auflösung angeben. Weiterhin sind die absolute und relative Verkehrsstärke zu unterscheiden. Mit letzterem ist der Quotient der zu einer bestimmten Stunde aktuellen Verkehrsstärke und dem Jahresmittel gemeint. Die BAU-Profile können aus vorhanden Verkehrsdaten generiert werden, bei den AD-Profilen werden weitreichende Änderungen der allgemeinen Verkehrscharakteristik durch autonome Fahrtechnologien erwartet, weshalb diese aus eigenen Überlegungen konstruiert werden.

2.20.3.5.2 BAU-Fahrprofile

Die Fahrprofile können, wie oben erläutert, aus aktuellen Messungen der Verkehrsstärke gewonnen werden. Die hier verwendeten Daten wurden von automatischen Zählstellen der Bundesanstalt für

Straßenwesen 2011 an deutschen Autobahnen erhoben (15). Die Zählstellen messen für jede Fahrtrichtung die Verkehrsstärke, d. h. die Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Stunde in dieser Richtung an ihnen vorbeigefahren sind und nehmen eine Klassifizierung der Fahrzeuge vor (z. B. Pkw, Motorrad, Bus), wobei die Art und Genauigkeit der Einordnung vom Bautyp der Zählstelle abhängt. Wie in Abschnitt 2.20.3 erläutert, findet der O-Lkw in unseren Szenarien nur im Schwerlastverkehr (Lkw > 20 t und Sattelzüge) Anwendung. Kein Zählstellentyp kann jedoch Lkw > 20 t als eigene Fahrzeugklasse erkennen, daher werden nur die Messwerte von Sattelzügen als Repräsentanten für den gesamten Schwerlastverkehr herangezogen. Aus den Messwerten wird für jede Stunde des Jahres pro Richtung ein Mittelwert der Verkehrsstärke über alle Zählstellen gebildet. Aus dem Jahresmittelwert der stündlichen Verkehrsstärke und der Messwerte wird ein Fahrprofil mit relativen Verkehrsstärken erstellt (eine relative Verkehrsstärke von 1 entspricht also dem Jahresmittel). Die Zeitreihe für eine exemplarische Woche ist in Abbildung 219 dargestellt, in Abbildung 220 findet sich eine Zeitreihe für das gesamte Jahr 2011.

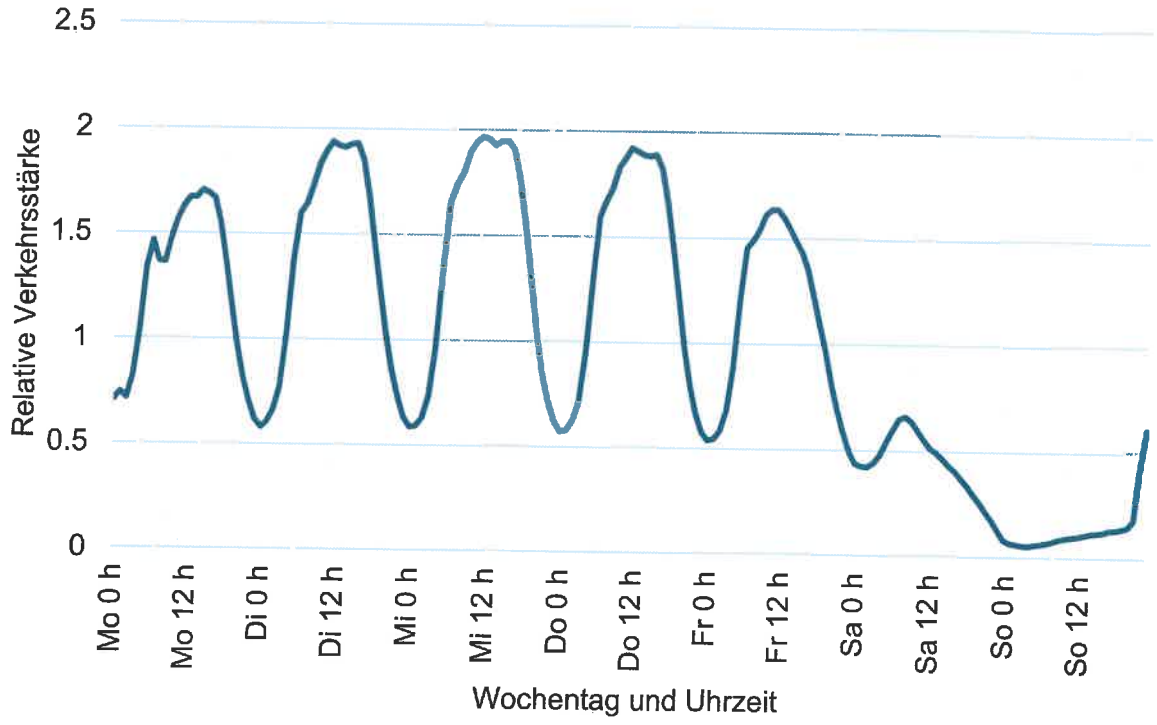


Abbildung 219: Exemplarisches BAU-Fahrprofil (relative Verkehrsstärke) der 4. Kalenderwoche 2011

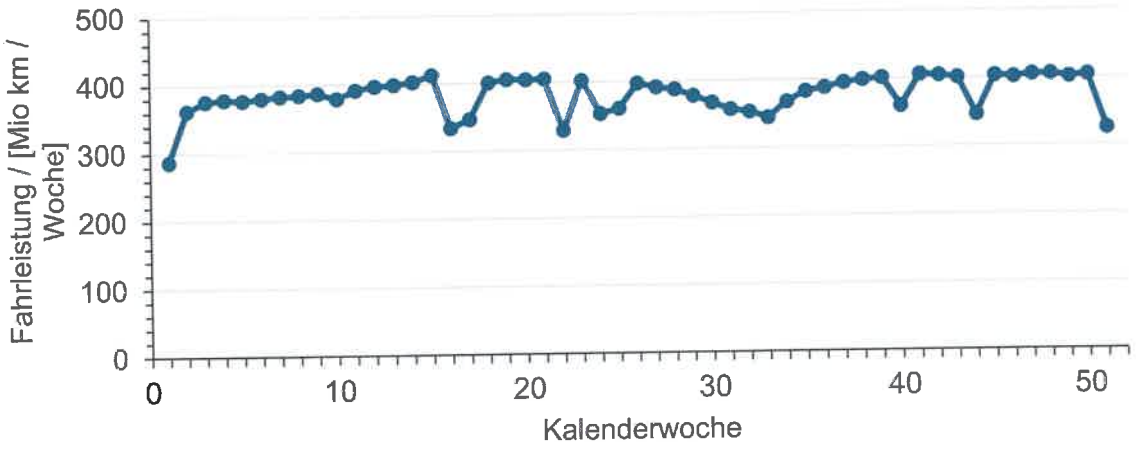


Abbildung 220: Zeitreihe der aus den BaSt-Zählstellen abgeschätzten Sattelzugfahrleistung in absoluten Zahlen für das Jahr 2011. Die blauen Punkte markieren die summierte wöchentlich Fahrleistung aller Regionen. Als Abszissenbeschriftung sind die Kalenderwochen des Jahres gewählt worden, wobei die ersten Tage des Jahres, die noch in die Kalenderwoche des Vorjahres fallen, und die letzten Tage, die in die 52. Woche fallen, nicht abgebildet sind. Diese bilden keine vollständigen 7-Tage-Wochen mehr.

2.20.3.5.3 AD-Fahrprofile

Die AD-Fahrprofile werden aus eigenen Überlegungen hergeleitet. Dabei bilden die folgenden Überlegungen den Leitfaden:

1. Es werden keine Fahrer benötigt, somit entfallen auch die Lenkzeitbeschränkungen und der Verkehr verteilt sich homogener über den gesamten Tag. Es wird auch vermehrt nachts gefahren.
2. Wesentliche Teile der Güterlieferungen müssen an ihrem Zielort i. d. R. von Personen entgegengenommen werden. Daher kann es keinen über den Tag vollständig gleichverteilten, konstanten Verkehr geben. Die Lieferungen richten sich nach den Arbeitszeiten im Zielbetrieb, weshalb nach wie vor das Verkehrsaufkommen am Tag höher ist als nachts und werktags höher als am Wochenende.
3. Insbesondere morgens ist, im leichten, vor allem städtischen Lieferverkehr (z. B. Lebensmittellieferungen an Supermärkte) ein lokales Maximum zu verzeichnen (16, 17).
4. Charakteristische Tage und Wochen, wie z. B. Feiertage und Ferienzeiten haben weiterhin einen Einfluss auf das Verkehrsaufkommen.

26. JULI 2022

Ausgehend von den ersten drei Überlegungen wird ein Basisfahrprofil für eine typische Woche konstruiert (Abbildung 221).

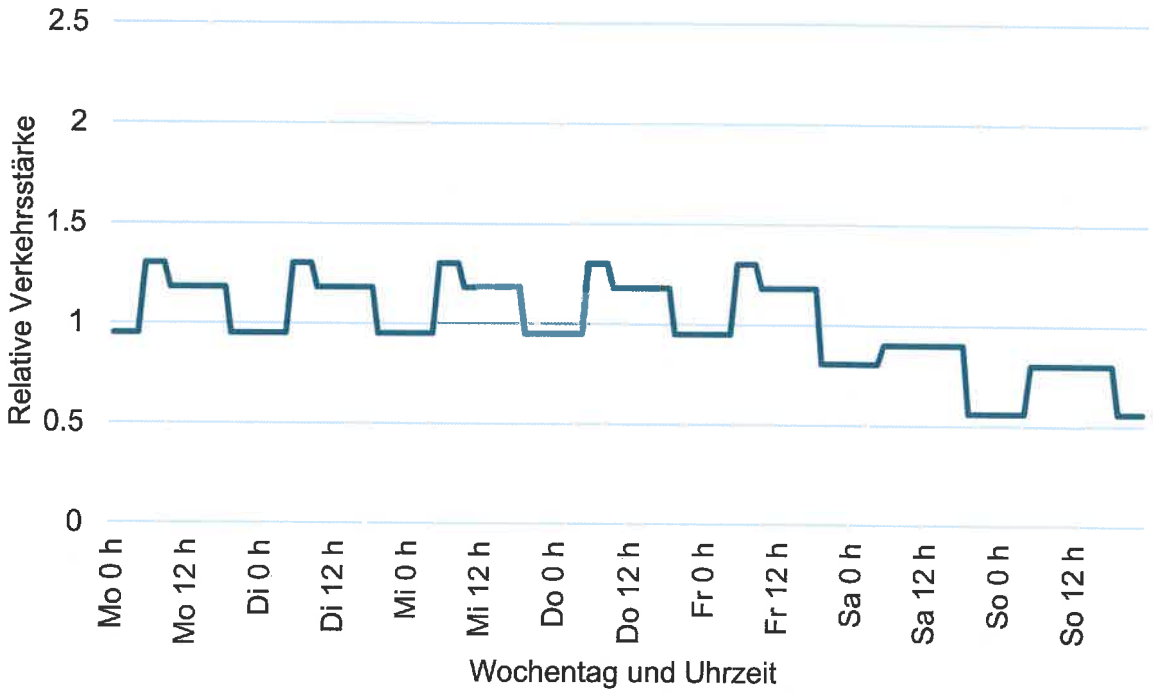


Abbildung 221: Konstruiertes Basiswochenprofil für die AD-Szenarien.

Aus diesem Wochenprofil wird nun eine Zeitreihe für das Jahr 2011 gebildet, bei der abschließend noch Feiertage und Ferienzeiten hinzugefügt werden. Dazu wird für jeden Tag des Jahres die Abweichung zwischen dem aktuellen Tagesmittelwert des BAU-Profils und dem Jahresmittelwert des entsprechenden Wochentages berechnet. Liegt diese bei mehr als 30 %, werden alle Stundenwerte des Tages im AD-Profil mit dem Quotienten aus BAU-Tagesmittelwert und dem Jahresmittel des Wochentags multipliziert.

Anschließend wird im BAU-Profil für jede Kalenderwoche die durchschnittliche Verkehrsstärke berechnet und die AD-Werte entsprechend angepasst, sodass auch hier das Wochenmittel dem des BAU-Profils entspricht Zuletzt wird das AD-Profil mit den relativen Verkehrsstärken wieder auf 1 als Mittelwert normiert.

Aus dem Jahresverbrauch wird der durchschnittliche Verbrauch je Stunde berechnet und mit den Fahrprofilen multipliziert, wodurch sich die benötigte Energiezeitreihe für die Energiesystemsimulation errechnet.

2.20.4 Parametrierung des Modells REMod

Im Folgenden soll dargelegt werden, wie die bisher gewonnenen Ergebnisse für die Simulation mit REMod genutzt werden. Zunächst müssen die Energieverbräuche für BEV und FCEV parametriert werden, sowie die Oberleitungszeitreihen in das Modell integriert werden. In den AD-Szenarien verlieren Schienengüterverkehr und Binnenschifffahrt einen Teil ihrer Verkehrsleistung an den Straßengüterverkehr. Dementsprechend werden bei der Parametrierung dieser Szenarien die Standardwerte des Modells für den Energieverbrauch von Zügen und Binnenschiffen angepasst.

26. JULI 2022

2.20.4.1 Straßengüterverkehr

2.20.4.1.1 Anwenden der Oberleitungszeitreihen

REMod besitzt keine native Unterstützung für die Modellierung von O-Lkw als Teil des Verkehrssektors. Aufgrund dessen werden die vorab erzeugten Zeitreihen mit den Verbrauchswerten P_O zum Basisstromverbrauch P_B addiert. Dieser gibt den stündlichen Verlauf der nicht-industriellen und- mobilitätsbezogenen Stromnachfrage für 2011 an. Es existieren zwei modellendogene Basisverbrauchszeitreihen: Eine für Nord- und eine für Süddeutschland. Standardmäßig enthalten beide Zeitreihen dieselben stündlichen Verbrauchswerte $P_B/2$, also die Hälfte des gesamtdeutschen Verbrauchs zur jeweiligen Stunde. Um in den Basisstromzeitreihen die Effizienzsteigerung bis 2050 zu berücksichtigen, multipliziert REMod sie in der Standard-Parametrierung mit einem Faktor von 0,75, einer Reduktion des Strombedarfes um 25%. Eine Zeitreihe mit Werten $P_G/2$, also für Nord- oder Süddeutschland, die sowohl den Basisstromverbrauch als auch den Bedarf durch O-Lkw enthält, kann nach Formel (4) berechnet werden.

$$\frac{P_G}{2} = \frac{P_O}{0{,}75} * 0{,}5 + \frac{P_B}{2} \tag{4}$$

2.20.4.1.2 Parametrieren des nicht-oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs

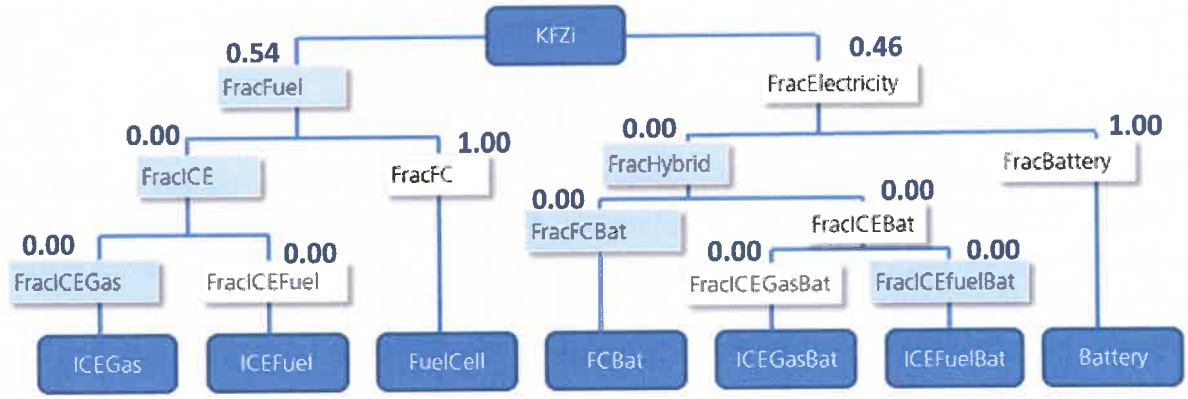


Abbildung 222: Schema der Antriebsverteilung für das BAU4000-Szenario. Anteile der hellblauen Felder müssen vom Nutzenden eingegeben werden, weiße Felder sind durch „1 – blaues Feld" gegeben. Nur FCEV (FracFC) und BEV (FracBattery) sind erlaubt

REMod muss mit den Energieverbräuchen der vom Modell unterstützten Antriebsarten (Abbildung 222) parametriert werden. Zuerst wird für jedes Szenario der Jahresenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs ohne O-Lkw (dazu siehe Abschnitt 2.20.4.1.1) berechnet; die Summe der Verbräuche für FCEV und BEV über alle Größenklassen. REMod arbeitet mit einem festgelegten Gesamtverbrauchswert von 71,1 TWh für den Straßengüterverkehr. Über einen *Traction Factor* t kann der Standardenergieverbrauch E_S an die Bedürfnisse (Verbrauch E_B) angepasst werden.

$$t = \frac{E_B}{E_S} \tag{5}$$

Der Gesamtenergiebedarf der BEV und FCEV in den jeweiligen Szenarien sowie der zugehörige Traction Factor sind in Tabelle 24 zu finden.

26. JULI 2022

Tabelle 24: Jahresenergiebedarf von BEV und FCEV im Straßengüterverkehr sowie der zugehörige Traction Factor.

Szenario	Jahresenergiebedarf ohne O-Lkw [TWh]	Traction Factor
BAU4000	84,78	1,19
BAU11700	52,99	0,75
AD4000	89,27	1,26
AD11700	54,34	0,76

Anschließend wird die relative Verteilung des Jahresenergiebedarfs im Straßengüterverkehr (ohne O-Lkw) auf die Antriebsarten parametriert.

2.20.4.2 Sonstiger Verkehr

2.20.4.2.1 Effekte des autonomen Fahrens auf den Schienenverkehr und die Binnenschifffahrt

In Abschnitt 2.20.3.3.3 wurde darauf eingegangen, dass ein Großteil der gesteigerten GVL in den autonomen Szenarien durch Mode-Change-Effekte zustande kommt, also die GVL in anderen Moden des Güterverkehrs (vornehmlich Schiene und Binnenschifffahrt) sinkt. Dadurch verringert sich deren Energiebedarf, was bei der Parametrierung berücksichtigt werden muss.

In Tabelle 25 sind die 2050 durch Binnenschiffe und Dieselzüge erbrachten Güterverkehrsleistungen (Elektrische Züge sind im Basisstromverbrauch enthalten) aufgeführt. Der Mode-Change-Effekt führt zu einer Erhöhung der GVL von O-Lkw um 18,6%, also 126 tkm. Derselbe Betrag muss in den anderen Moden wegfallen, wobei angenommen wird, dass die Reduktion gleichmäßig, also nach Anteil der jeweiligen Mode an der gesamten GVL, stattfindet (Tabelle 25).

Tabelle 25: Überblick über die GVL der verschiedenen Moden, ihren Anteil an der gesamten GVL in den BAU-Szenarien und die jeweilige Änderung durch den Mode Change der autonomen Szenarien.

Verkehrsmode	GVL 2050 (BAU) [Mrd tkm]	GVL 2050 (AD)	Änderung durch Mode Change [Mrd tkm]
Gesamt	945,00	...	+14
Straße	679,00		+126
Binnenschiff	87,00		-41.37
Schiene Diesel	12,45		-5,92
Schiene elektrisch	166,55		-78,72[14]

26. JULI 2022

Durch Multiplikation der Moden-GVL abzüglich der Reduktion durch Mode Change mit den mittleren spezifischen Energieverbräuchen für dieselbetrieben Güterzüge (18) und Binnenschiffe, so erhält man den Energieverbrauch für die AD-Szenarien. Dieser kann nun die Standardwerte in REMod ersetzen.

Verkehrsmode	GVL abzüglich Mode Change (AD) [Mrd tkm]	Spez. Verbrauch [kWh/km]	Jahresverbrauch [TWh]
Schiene Diesel	6	116,7	3,34
Binnenschiff	46	51,0	2,33

2.20.4.3 Andere Relevante Parameter

Wichtig für die Gestaltung des Energiesystems durch REMod sind noch weitere Parameter, wie z. B. Ausbauobergrenzen, Technologiekosten, spezifische CO_2-Emissionen etc. Wenn nicht anders angegeben, wurden sie der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem" des Fraunhofer ISE entnommen (19). Bei unserer Modellierung ist die parametrierte Zielvorgabe der CO_2-Emissionen eine Reduktion bis 2050 um 100% gegenüber 1990. Um dem Modell unter Einhaltung realistischer, aber zukunftsorientierter Randbedingungen ein wenig mehr Spielraum beim Erreichen dieses Ziels zu geben, wird außerdem der Import CO_2-neutral erzeugter e-Fuels als Energiequelle berücksichtigt. Standardmäßig sind diese nicht in REMod vorgesehen und werden über die Modifikation der spezifischen CO_2-Emissionen von Öl und Gasimporten erreicht. Ein Ausstoß von 0 t/MWh würde aufgrund der modellendogenen Emissionsoptimierung zu fehlerhaften Ergebnissen führen, daher wird für den Import von gasförmigen und flüssigen eFuels ein Wert von 0,001 t/MWh parametriert.

2.20.5 Auswertung der Ergebnisse

2.20.5.1 Allgemeine Charakteristika der Energiesysteme in den Szenarien

In Tabelle 26 ist eine Auswahl an allgemeinen, systemcharakterisierenden Größen, wie der Ausbau bestimmter Technologien oder der auf bestimmte Träger entfallenden Energiemengen aufgeführt. In allen vier Szenarien hat das Modell den Ausbau Dargebots abhängiger erneuerbarer Energien, also Windkraft (On- und Offshore), Wasserkraft und Photovoltaik, an die vorab parametrierten Ausbaugrenzen getrieben. Trotzdem ist auch der Import von CO_2-neutral erzeugten e-Fuels notwendig, um den gesamten Energiebedarf zu decken zu. Erwartungsgemäß können in allen Szenarien die CO_2-Emissionen gegenüber 1990 um 100% reduziert werden. Die Stromnachfrage im Verkehrssektor und der Bedarf an Wasserstoff differieren entsprechend der verkehrsbedingten Unterschiede. Auffällig ist jedoch, dass Batteriespeicher im Szenario AD11700 überhaupt nicht ausgebaut werden. In den beiden 4000-km-Oberleitungsszenarien werden sie hingegen an die parametrierte Ausbaugrenze von 150 GWh gebracht und im Szenario BAU11700 werden immerhin 137 GWh verwendet.

Tabelle 26: Übersicht verschiedener, systemcharakteristischer Parameter.

Kategorie	Einheit	BAU4000	BAU11700	AD4000	AD11700	Ausbaugrenze
Installierte Leistung Photovoltaik	GW	530	530	530	530	**530**
Installierte Leistung Wasserkraft	GW	14	5	5	5	-
Installierte Leistung Wind Onshore	GW	230	230	230	230	**230**
Installierte Leistung Wind Offshore	GW	80	80	80	80	**80**
Stromangebot Photovoltaik	TWh	556	556	556	556	-
Stromangebot Wasserkraft	TWh	14	14	14	14	-
Stromangebot Wind Onshore	TWh	516	516	516	516	-
Stromangebot Wind Offshore	TWh	312	312	312	312	-
Installierte Speicherkapazität Batterie	GWh	150	137	150	0	**150**
Installierte Speicherkapazität Autobatterie	GWh	318	346	314	342	-
Abregelung	TWh	39	45	38	49	-
Import Strom	TWh	0	0	0	1	-
Import Gasförmiger eFuel	TWh	15	5	22	26	-
Import flüssiger eFuel	TWh	108	108	105	108	-
Installierte Leistung Methanisierung	GWel	150	150	150	150	**150**
Output Methanisierung (eFuel)	TWh	236	246	232	247	-
Installierte Leistung Elektrolyse	GW	26	15	28	16	**150**
Erzeugte Energiemenge in Form von Wasserstoff	TWh	86	50	79	54	**0**
Verwendete Energiemenge in Form von Biomasse	TWh	335	335	335	335	-
Stromangebot Fernwärme	TWh	40	40	41	51	-
eFuel-Nachfrage für Fernwärme	TWh	83	85	86	106	-
Stromnachfrage Verkehr: Gesamt	TWh	186	207	190	214	-
Wasserstoffbedarf Verkehr: Gesamt	TWh	71	39	77	42	-
Stromnachfrage Verkehr: O-Lkw	TWh	53	74	59	82	-
CO2-Einsparung ggü. 1990	%	100	100	100	100	-

26 JULI 2022

2.20.5.1.1 Extremwerte

In Tabelle 27 sind die Maximal- und Minimalwerte relevanter, zeitlich veränderlicher Größen im Jahresverlauf aufgeführt. Diese Auflistung zeigt, wo ein O-Lkw Szenario das Energiesystem in einen Extrembereich bringen könnte. Allerdings ist hier vor allem eine große Übereinstimmung aller vier Szenarien zu erkennen: In vielen Punkten unterscheiden sich die Systeme nur geringfügig. Die maximalen Stromnachfragen liegen äußerst nah zusammen, gleiches gilt für die minimalen Residuallasten. Minimales und maximales Stromangebot erneuerbarer Energien unterscheiden sich gar nicht, da in allen Szenarien die gleichen Wetterdaten verwendet werden. In verkehrsbezogenen Extrema existieren gewisse Unterschiede, die sich aus den verschiedenen O-Lkw-Szenarien ergeben. Der maximale Anteil der O-Lkw am Gesamtstrombedarf liegt in allen Szenarien zwischen 44 und 49%, macht also zumindest während einer Stunde des Jahres fast die Hälfte des gesamten Verbrauches aus. Die maximalen Deckung durch Erneuerbare weist in den einzelnen Szenarien Unterschiede auf. In den Szenarien BAU4000 und BAU11700 liegen die Werte mit 910 und 906% noch nah beieinander. Eine deutlich geringere maximale Deckung ist in den AD-Szenarien vorhanden mit 842% in AD4000 und 811% in AD11700, insbesondere vor dem Hintergrund einer gleichmäßigeren Verteilung des Strombedarfs. Die minimale Deckung durch Erneuerbare ist hingegen in allen Szenarien gleich. Mit einem Wert von 3% ist sie äußerst niedrig und erfordert hohe Speicherkapazitäten und flexible Stromquellen.

Um eine kausale Begründung für die wenigen, oben erwähnten, auffälligen Differenzen in den Extremwerten zu finden, reicht diese Betrachtung nicht aus. Die sich durch die Sektorkopplung ergebenden Zusammenhänge sind dafür zu komplex. Es ist notwendig, stündlich aufgelöste Zeitreihen zu betrachten und festzustellen auf welche Technologien sich Stromangebot und -nachfrage zu einem gegebenen Zeitpunkt verteilen.

Tabelle 27: Auflistung der Extremwerte verschiedener zeitabhängiger Größen, die das Energiesystem charakterisieren.

Kategorie	Einheit	BAU400	BAU11700	AD4000	AD11700
Maximale Stromnachfrage gesamt	GW	230.73	239.83	228.72	239.68
Maximale Stromnachfrage O-Lkw	GW	12.93	18.06	9.55	13.35
Maximaler Anteil der Stromnachfrage für O-Lkw an der Gesamtnachfrage	%	17	23	14	20
Maximale Residuallast	GW	98.36	99.37	99.23	100.77
Minimale Residuallast	GW	-502.98	-497.57	-507.04	-503.69
Maximales Stromangebot durch Erneuerbare	GW	588.67	588.67	588.67	588.67
Minimales Stromangebot durch Erneuerbare	GW	1.59	1.59	1.59	1.59
Maximale Deckung der Nachfrage durch Erneuerbare	%	910	906	841	811
Minimale Deckung der Nachfrage durch Erneuerbare	%	3	3	3	3
Maximale Stromnachfrage Straßenverkehr	GW	28.07	33.25	24.60	28.41
Maximaler Anteil der Stromnachfrage im Straßenverkehr an der Gesamtnachfrage	%	44	49	45	48

2.20.5.2 Residuallast

Als Residuallast P wird die Differenz aus Stromnachfrage (Last L) und Dargebots abhängiger Stromerzeugung (Produktion P) zum Zeitpunkt T bezeichnet:

$$R(T) = L(T) - P(T) \tag{6}$$

Zu den Dargebots abhängigen Stromerzeugern zählen wir Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik, die Nachfrage setzt sich zusammen aus dem Basisstrombedarf, BEV, O-Lkw und Wärmeerzeugung (mit Wärmepumpen). Alle anderen Technologien stellen vorrangig Stromspeicher oder Umwandler dar. Bei einer positiven Residuallast wird mehr Strom benötigt als erzeugt wird, es liegt also eine Produktionsdefizit vor, dass z.B. durch Energiespeicher ausgeglichen werden muss. Bei einer negativen Residuallast wird mehr Strom produziert als benötigt, es liegt ein Produktionsüberschuss vor.

26. JULI 2022

In Abbildung 223 ist pro Szenario jeweils eine nach absteigender Größe sortierte Residuallastkurve für das ganze Jahr zu sehen. Zu jedem Punkt R(T) auf der Kurve gibt der zugehörige x-Achsenabschnitt die Anzahl an Stunden an, zu denen eine größere Residuallast vorlag. Es fällt eine extrem starke Übereinstimmung aller vier Szenarien auf. Nur im Bereich zwischen $R = -180$ GW und $R = -260$ GW sind kleinere Unterschiede erkennbar. In diesem Bereich weist das Szenario AD4000 die geringsten Residuallasten auf, BAU11700 die höchsten. Eine Beeinflussung der Residuallast durch zusätzlichen O-Lkw-

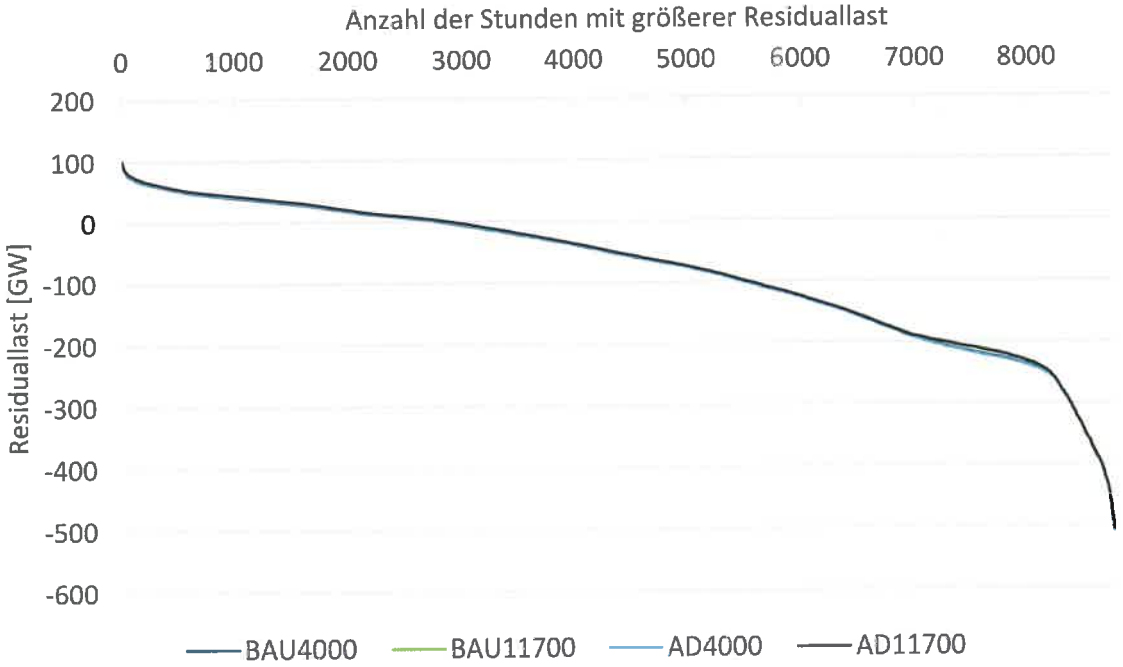


Abbildung 223: Residuallastkurven aller vier Szenarien, nach absteigender Größe der stündlichen Residuallast geordnet

Verkehr beschränkt sich also nur auf einen kleinen Korridor, der nicht nah an der maximalen oder minimalen Residuallast liegt.

2.20.5.2.1 Einfluss der O-Lkw auf die Residuallast

Zur genaueren Quantifizierung der Beeinflussung der Residuallast durch den O-Lkw-Verkehr wird diese nun exklusiv des O-Lkw-Verkehrs berechnet. Dadurch können die zeitlichen Anteile positiver und negativer Residuallast einmal mit und einmal ohne O-Lkw als Verbraucher vergleichen werden (Abbildung 224). Generell ist zu bemerken, dass die Residuallast ca. zwei Drittel der Zeit negativ ist, also eine Überproduktion vorliegt. Die Alternativszenarien ohne O-Lkw als Verbraucher weichen davon nur geringfügig um ca. 3% ab. Sie weisen einen leicht höheren Zeitanteil mit negativer Residuallast auf.

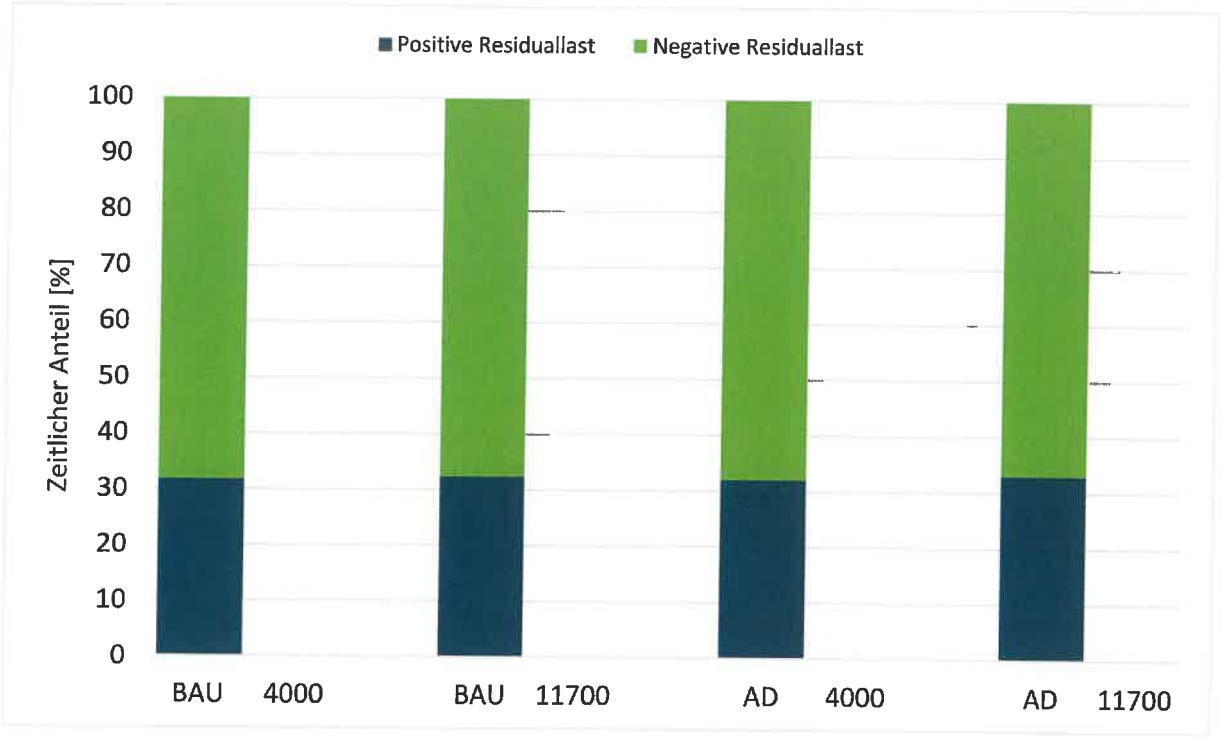


Abbildung 224: Vergleich der zeitlichen Verteilung positiver und negativer Residuallast einmal unter Berücksichtigung des O-Lkw-Verkehrs als Verbraucher und einmal ohne (gepunktete Säulen).

2.20.5.3 Zeitreihen

Um zu untersuchen, welche Auswirkungen Oberleitungs-Lkw auf einer zeitlich kleinteiligeren Skala haben, ist es notwendig stündlich aufgelöste Zeitreihen des *Stromangebots* und der *Stromverwendung* zu betrachten. Diese beiden Größen beinhalten nun nicht mehr nur unflexible Stromerzeuger und –verbraucher sondern auch Speicher- und Umwandlungstechnologien, die Stromüberschüsse oder –defizite im Netz decken können.

Das *Stromangebot* beinhaltet den zu einem Zeitpunkt durch Erzeugung, Import oder Ausspeicherung zur Verfügung stehenden Strom und betrachtet folgende Technologien:

- Wasserkraft
- Photovoltaik
- Windkraft Onshore
- Windkraft Offshore
- Batteriespeicher
- Fahrzeugbatteriespeicher
- Pumpspeicherwerke (PSW)
- Blockheizkraftwerke (Fernwärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung)
- Stromimporte

Die *Stromverwendung* bezeichnet Verbrauch und Einspeicherung, sowie die Abregelung von Stromerzeugern und den Export in andere Länder:

- Basisstrombedarf
- Verkehr BEV
- Verkehr O-Lkw
- Batteriespeicher

26. JULI 2022

- Fahrzeugbatteriespeicher
- Pumpspeicherwerke (PSW)
- Fernwärme (durch Wärmepumpen)
- Wärmeerzeugung (nicht Fernwärme)
- Power to Gas (Elektrolye, PtG)
- Stromexporte
- Abregelung

Es sollen im folgenden mehrere Wochen mit charakteristischen Gegebenheiten analysiert werden:

- Maximale Stromerzeugung[15] durch Photovoltaik: 2. – 8. Mai, KW 18
- Maximale Stromerzeugung[7] durch Wind: 12. – 18. Dezember, KW 50
- Minimale Stromerzeugung[7] durch alle erneuerbare Energien: 14. – 20. November, KW 46

2.20.5.3.1 Maximum Photovoltaik

In dieser Woche dominiert die Stromerzeugung durch Photovoltaik mit den damit verbundenen starken Tag-Nacht-Schwankungen in der Stromproduktion und sehr hohen Spitzen von teilweise über 500 GW. Die höchsten Photovoltaikspitzen werden Montag, Samstag und Sonntag erreicht. Über 60% der erneuerbaren Stromproduktion entfallen auf Photovoltaik. Dementsprechend stark verlässt sich REMod auf den Einsatz flexibler Speichertechnologien. Hierzu dienen insbesondere Batterien und Fahrzeugbatterien als Speicher. Die hohen Photovoltaikspitzen werden eingespeichert und nachts der Strom wieder zur Verfügung gestellt. Allerdings geschieht dies nur Mittwoch, Donnerstag, Freitag und Samstag. Dies lässt sich durch die begrenzte Speicherkapazität erklären. Eine Ausspeicherung erfolgt nicht jede Nacht. Somit ist die Speicherkapazität irgendwann erschöpft und das Modell greift an den verbleibenden Tagen auf Power to Gas zur Energiespeicherung zurück.

Die einzelnen Systeme weise hohe Ähnlichkeiten auf, weshalb hier nur Graphiken der Szenarien AD4000 und AD11700 abgebildet sind. Auch für die weiteren Analysen gilt: Sind BAU4000 und BAU11700 nicht abgebildet, unterscheiden sie sich von AD4000 prinzipiell nur durch die Verbrauchszeitreihe des O-Lkw-Verkehrs und sich direkt daraus ergebenden Änderungen des Gesamtenergiebedarfs. Die unterschiedlichen O-Lkw-Szenarien werden von der viel stärkeren Gesamtvolatilität des Systems überlagert und führen deshalb nicht zu gänzlich anderen Strukturen. Die größte Herausforderung für das Modell ist es, die stark schwankende Photovoltaik-Stromerzeugung zu inkorporieren und auch nachts die Deckung des Strombedarfs sicherzustellen. Schwankungen des O-Lkw-Verbrauchs fallen hier eher wenig ins Gewicht, woraus sich die Ähnlichkeit der Szenarien ableitet. Einzig das Nichtvorhandensein von Batteriespeichern in AD11700 fällt auf. Wenn in AD4000 in Batterien ein- oder ausgespeichert wird, greift REMod zu diesen Zeitpunkten in AD11700 auf die Fahrzeugspeicher zurück. Dieses Verhalten wird auch noch in den anderen Betrachtungen zu sehen sein. Die Ursachen dafür liegen in der modellendogenen Kostenoptimierung.

[15] Bezieht sich auf die wöchentliche Summe

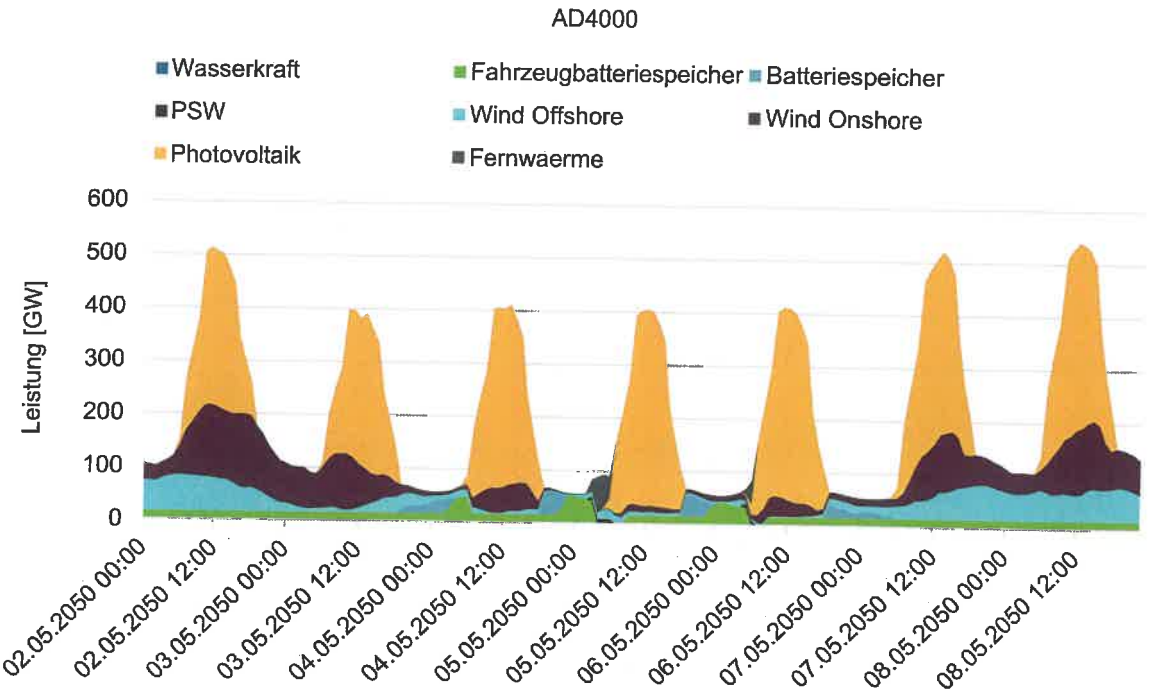


Abbildung 225: Stromangebot des Szenarios AD4000 vom 2. Bis zum 8. Mai, der Woche mit der höchsten Stromerzeugung durch Photovoltaik.

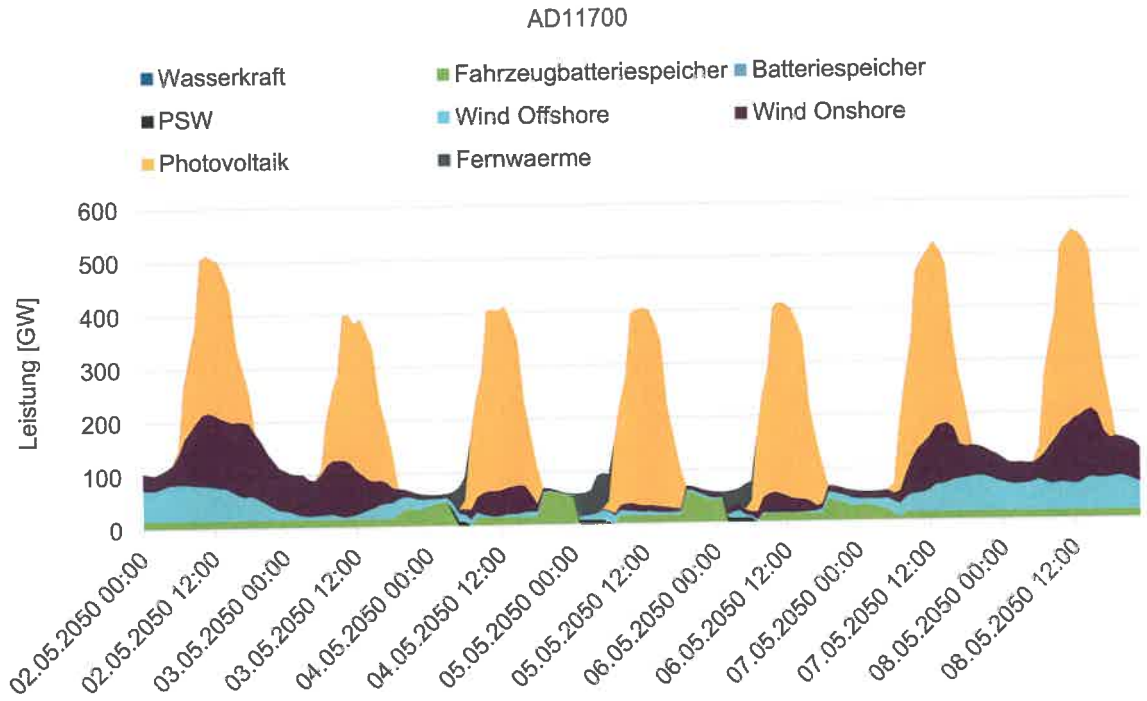


Abbildung 227: Stromangebot des Szenarios AD11700 vom 2. Bis zum 8. Mai, der Woche mit der höchsten Stromerzeugung durch Photovoltaik.

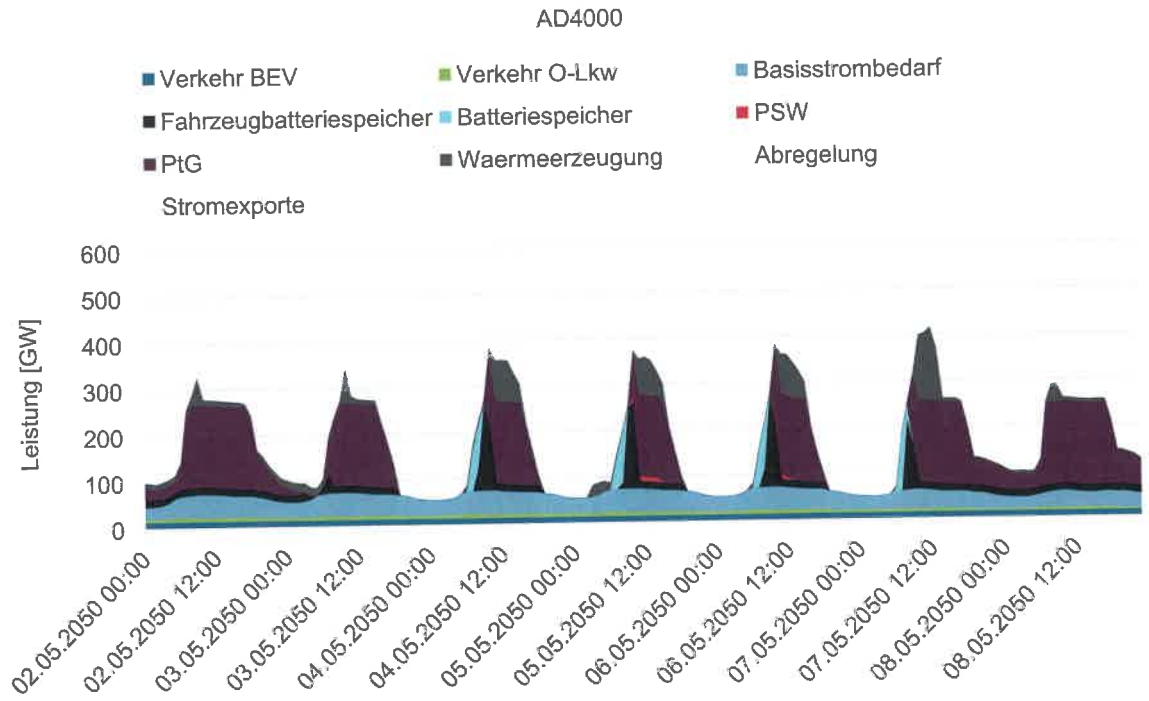


Abbildung 226: Stromverwendung des Szenarios AD4000 vom 2. Bis zum 8. Mai, der Woche mit der höchsten Stromerzeugung durch Photovoltaik.

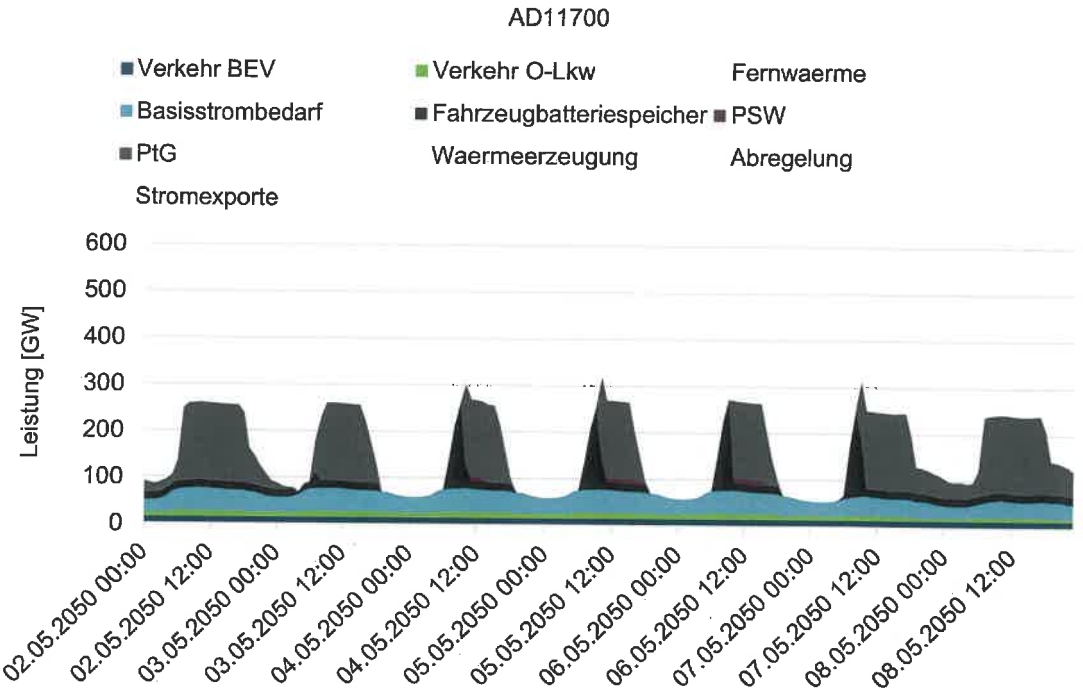


Abbildung 228: Stromverwendung des Szenarios AD11700 vom 2. Bis zum 8. Mai, der Woche mit der höchsten Stromerzeugung durch Photovoltaik.

2.20.5.3.2 Maximum Windkraft

Hier ist eine noch große Ähnlichkeit der Szenarien erkennbar, sie erscheinen sogar fast identisch (abgesehen von den O-Lkw-Zeitreihen und dem dadurch veränderten Gesamtstrombedarf), weswegen diesmal nur Angebot und Verwendung des Szenarios AD4000 abgebildet sind. Es kommen auch in keinem Szenario Batteriespeicher zum Einsatz. Durch die Dominanz der Windkraft entsteht ein gänzlich anderer Tagesgang des Stromangebots als in der Photovoltaik-Woche und ein großer Teil des überschüssigen Stroms wird durch Power to Gas in Wasserstoff umgewandelt. Die Einspeicherung in Fahrzeugbatterien erfolgt zeitlich konstant mit 16,72 GW, ebenso die Ausspeicherung mit 15,04 GW. Die Differenz ergibt sich aus den Speicherverlusten. Der Grund dafür ist modellendogen, da REMod zu allen Zeiten zumindest die BEV-Last plus Speicherverluste ein- und ausspeichert. Da darüber hinaus Batterien und Fahrzeugbatterien nicht in Anspruch genommen werden, sind diese über den gesamten Zeitraum gefüllt und nicht zum Abfedern von Überschüssen verfügbar. Ferner wird mehr Strom für die

26. JULI 2022

Wärmeproduktion aufgewendet, sowie durch Kraftwärmekopplung in Blockheizkraftwerken produziert, was die Jahreszeit bedingt.

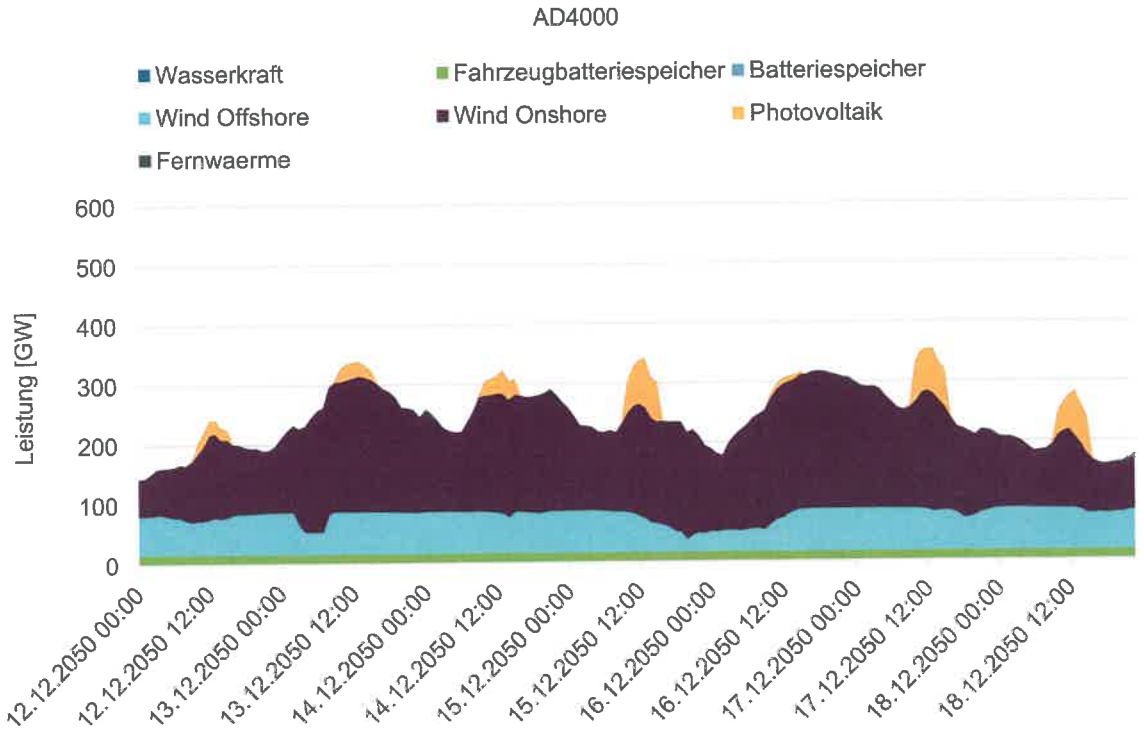


Abbildung 229: Stromangebot des Szenarios AD4000 in der Woche mit der höchsten Windkraft-Erzeugung

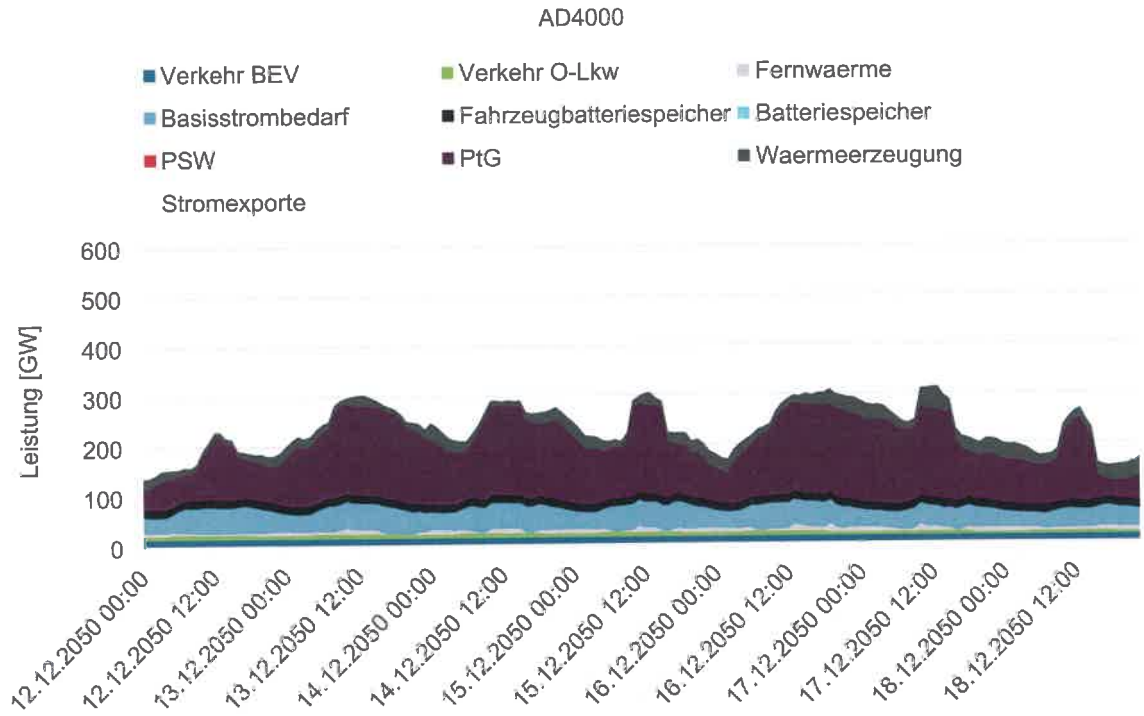


Abbildung 230: Stromverwendung des Szenarios AD4000 in der Woche mit der höchsten Windkraft-Erzeugung

26. JULI 2022

2.20.5.3.3 Minimum Erneuerbare

In Abbildung 232bis Abbildung 234 ist das Stromangebot der Woche mit der niedrigsten Erzeugung durch die erneuerbaren Energien Windkraft, Wasserkraft und Photovoltaik dargestellt. Trotz des Erzeugungsminimums werden Angebotsspitzen von über 200 GW vor allem durch Photovoltaik erreicht, was den großen Ausbau an Stromproduktionskapazitäten dieser Technologie wiederspiegelt. Die Summe der Stromerzeugung durch Windkraft liegt bei 5,56 TWh und damit bei gerade einmal 15% des Wertes in der Woche mit maximaler Windkraft-Stromerzeugung. Daher wird flächendeckend der aus flexibel steuerbaren Blockheizkraftwerken (Fernwärme) produzierte Strom zur Deckung der Nachfrage eingesetzt. Im Szenario AD4000 kommen häufig Fahrzeugbatterie- und Batteriespeicher zum Einsatz. Während Fahrzeugbatteriespeicher auch über längere Perioden Strom liefern (z. B. nahezu durchgängig vom 15.11. bis zum 18.11) werden Batteriespeicher nur zur Deckung kurzfristiger Fluktuationen außerhalb der Zeitfenster mit Photovoltaik-Stromerzeugung eingesetzt. Dabei kommen sie auf teilweise hohe Entladespitzen von über 30 GW. Im Szenario AD11700 kommen keine Batteriespeicher zum Einsatz. Im Gegensatz zu den vorherigen Betrachtungen werden Batterieausspeicherungen in AD4000 nicht mehr eins zu eins durch Fahrzeugbatterieausspeicherungen in AD11700 ersetzt. Die Zeitreihen unterscheiden sich. Da sich die Zeitreihe des Strombedarfs aber nicht ändert, muss das Angebot angepasst werden, was über den zeitlich veränderten Einsatz von Fernwärmekraftwerken geschieht.

Bei der Stromverwendung existiert kein so starker Unterschied wie beim Stromangebot. Die Zeitreihe der Einspeicherung in Batterien im Szenario AD4000 wird in AD11700 eins zu eins in die Zeitreihe für Fahrzeugbatterien übernommen, im Gegensatz zur Ausspeicherung. Beide Formen der Stromspeicherung werden nur zur Aufnahme der Photovoltaikspitzen verwendet, zu geringen Teilen werden die Spitzenleistungen auch über Power to Gas zur Wasserstoffproduktion genutzt. Ansonsten wird die Stromverwendung größtenteils durch die inflexiblen Verbrauchszeitreihen für den Basisbedarf, BEV- und O-Lkw-Verkehr und Wärmeerzeugung dominiert. Nur zu einzelnen Zeitpunkten werden Überschüsse zur Fernwärmeerzeugung verwendet.

In der betrachteten Woche weist das System eine hohe Volatilität des Stromangebots auf. Die Schwankungen überlagern die zeitliche Veränderung des Strombedarfs für O-Lkw um ein Vielfaches, sodass letztere nicht entscheidend zur Stromverwendung beitragen. Dennoch ergibt sich zwischen den Szenarien AD4000 und AD11700 unterschiedliche Entladezeitreihen bei Stromspeichern. Dieser Sachverhalt hängt von den unterschiedlichen Speicherkapazitäten von Batterie- und Fahrzeugbatteriespeichern ab, die bei intensivem Einsatz entsprechend unterschiedliche Entladezeitreihen nach sich ziehen.

Insgesamt kann das Energiesystem die starken Schwankungen in der Stromerzeugung gut verarbeiten. Es muss kein Strom abgeregelt werden und nur über einen kurzen Zeitraum am Nachmittag des 20.11. wir Strom importiert.

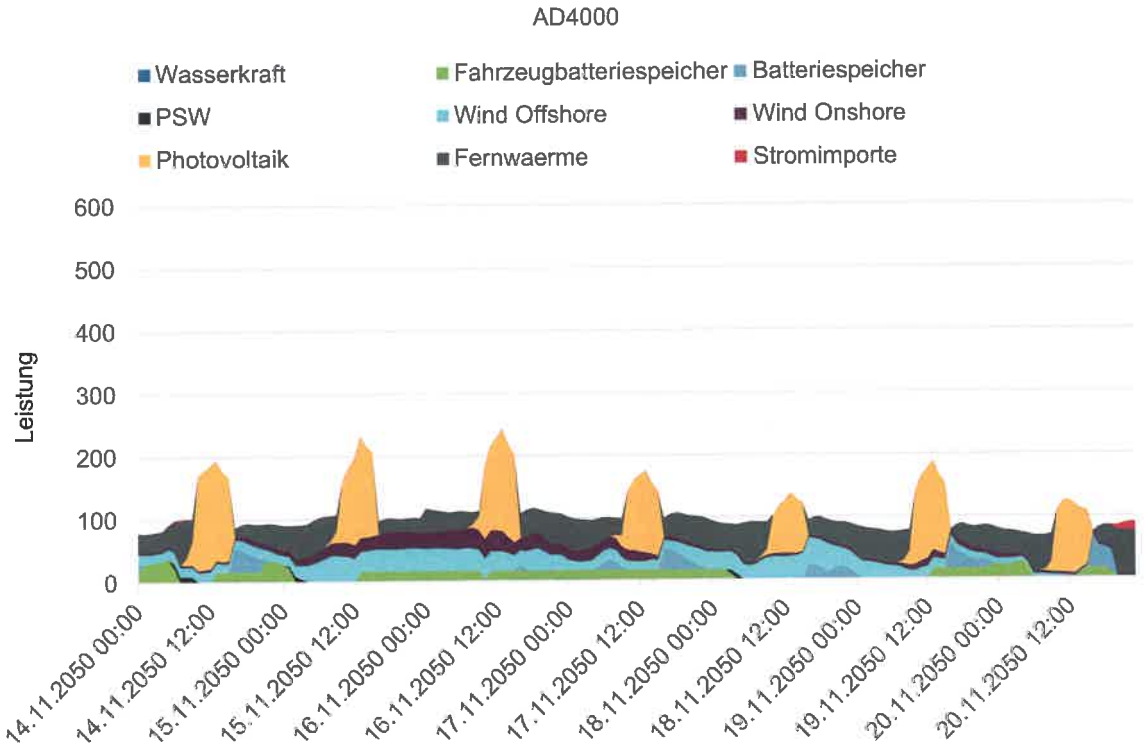


Abbildung 232: Stromangebot in der Woche minimaler EE-Erzeugung im Szenario AD4000.

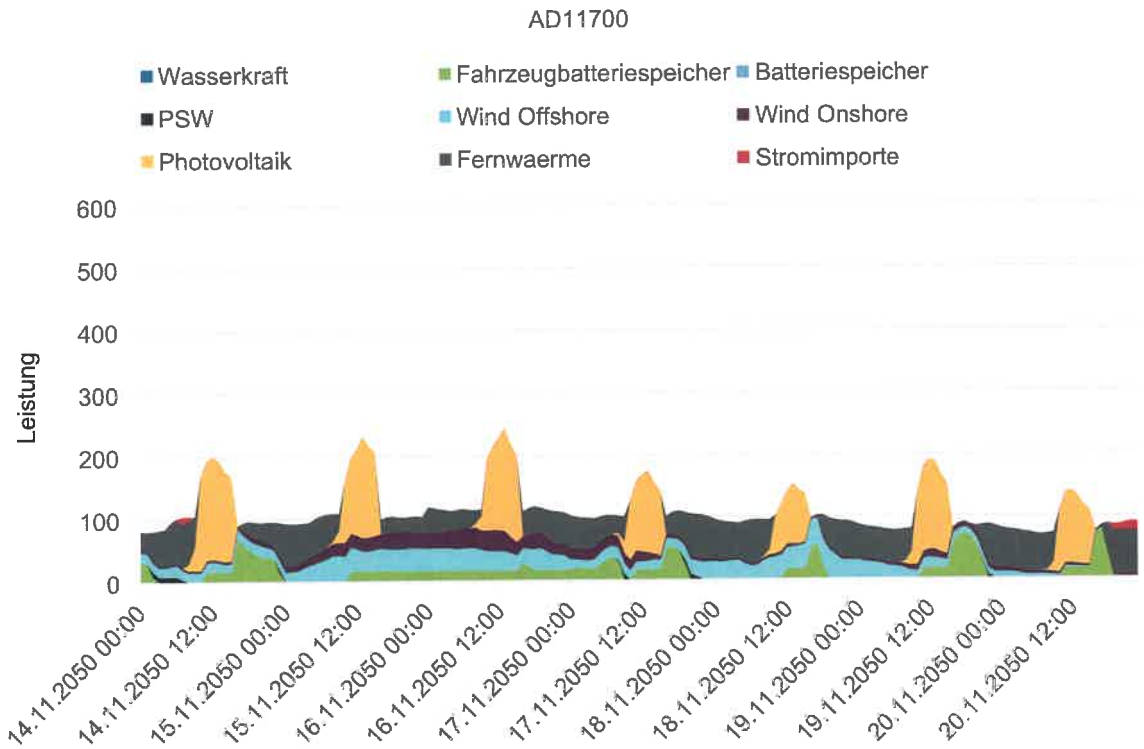


Abbildung 231: Stromangebot in der Woche minimaler EE-Erzeugung im Szenario AD11700.

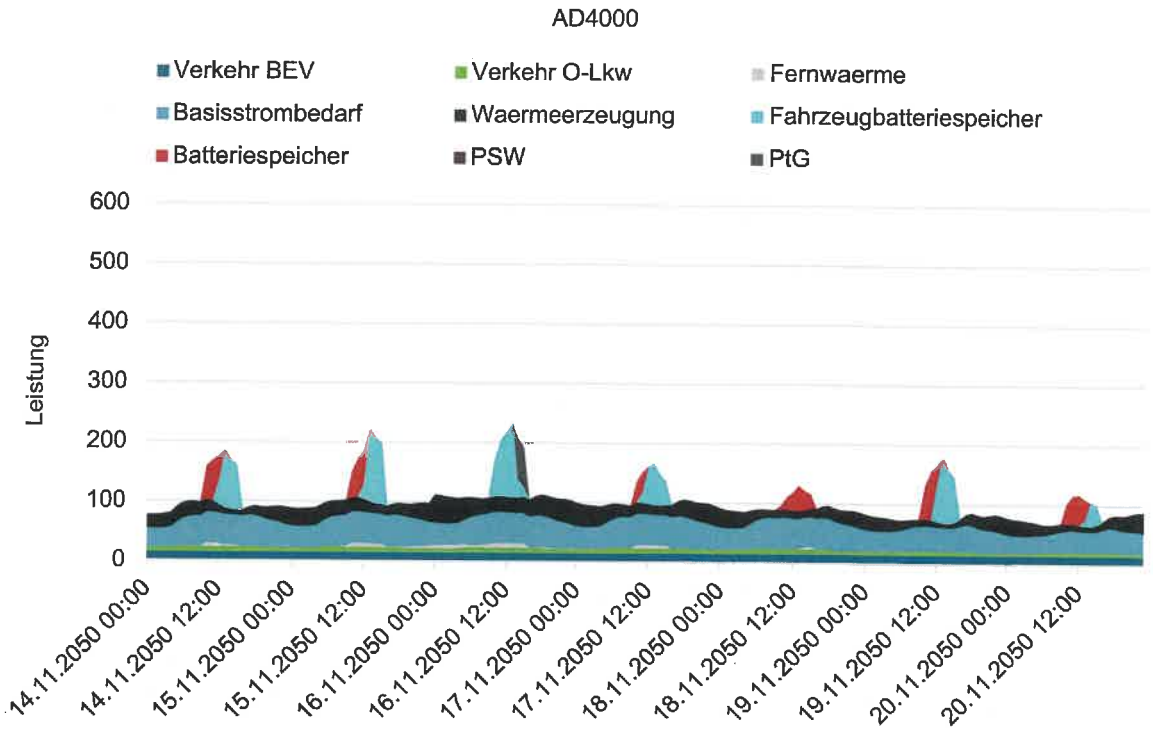


Abbildung 234: Stromverwendung in der Woche minimaler EE-Erzeugung im Szenario AD4000.

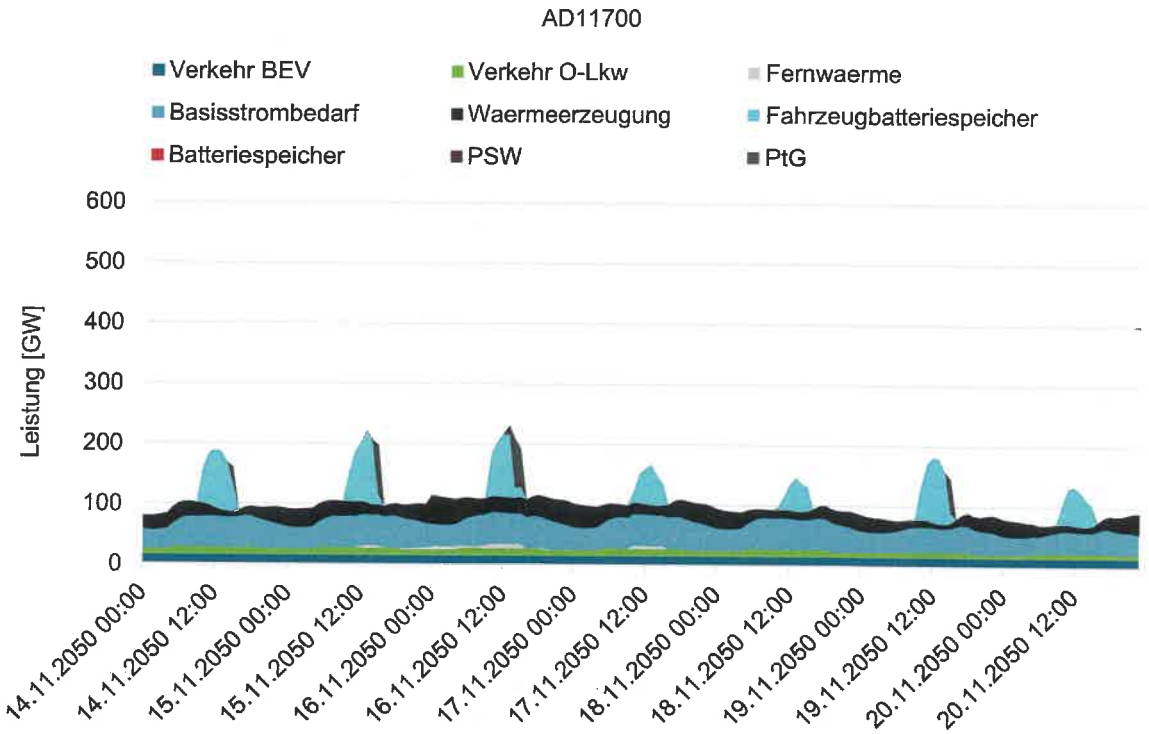


Abbildung 233: Stromverwendung in der Woche minimaler EE-Erzeugung im Szenario AD11700.

26. JULI 2022

2.20.5.4 Zusammenfassung

Die vorangehenden Analysen zeigen, dass alle Szenarien in der Zusammensetzung ihres Energiesystems ähnlich sind. Trotz der Tatsache, dass O-Lkw oft auch einen nicht zu vernachlässigen Anteil des Energiebedarfs darstellen, liegt ihre Volatilität weit unter der, der erneuerbaren Erzeugung im Allgemeinen. REMod hat alle erneuerbaren Energien an die Ausbaugrenzen getrieben und damit insbesondere eine große Erzeugungskapazität im Photovoltaikbereich geschaffen, wodurch sich Produktionsschwankungen von bis zu 400 GW ergeben können. Daher setzt das Modell auch auf Batterien und Fahrzeugbatterien als kurzfristige Stromspeicher. Sind diese gefüllt, wird auf Power-to-Gas zurückgegriffen. Hervorzuheben ist, dass im Szenario AD11700 keinerlei Batteriespeicher vorhanden sind und ausschließlich auf Fahrzeugbatteriespeicher zurückgegriffen wird. Teilweise führt dies zu anderen Ein- und Ausspeicherungszeitreihen als in den anderen Szenarien. Der Grund für dieses Verhalten ist aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Modell nicht gänzlich klar. Dennoch haben weder der Oberleitungsausbau, noch das Autonome Fahren viel Einfluss auf Extremausprägungen im System. Die Residuallastkurven verändern sich von Szenario zu Szenario nahezu gar nicht. Prinzipiell ist das Modell trotz hoher Schwankungen in der Lage, den Strombedarf zu jedem Zeitpunkt CO_2-neutral zu decken, wenn der Import von Strom und e-Fuels erlaubt wird.

2.20.6 Literatur

1. Wietschel M, Gnann T, Kühn A, Plötz P, Moll C, Speth C et al. Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Auftraggeber); Februar 2017.
2. Hacker F, Blanck R, Görz W, Bernecker T, Speiser J, Röckle F et al. StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge: Endbericht. Berlin: Öko-Institut e. V.; Hochschule Heilbronn; Fraunhofer IAO; Intraplan Consult GmbH; Februar 2020.
3. Radke S. Verkehr in Zahlen 2016/2017: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; September 2016.
4. Kersten K. Der Einfluss des vollautomatisierten Fahrens auf den Mobilitäts- und Energiebedarf in Deutschland [Dissertation]; 2018.
5. Bergk F, Biemann K, Heidt C, Knörr W, Lambrecht U, Ickert L et al. Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Auftraggeber); ifeu; INFRAS AG; LBST; Juni 2016.
6. Kirchner A, Schlesinger M, Weinmann B, Hofer P, Rits V, Wünsch M et al. Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Basel/Berlin: WWF Deutschland (AUftraggeber); Öko-Institut e. V.; Prognos AG; 2009.
7. Schlesinger M, Hofer P, Kemmler A, Kirchner A, Straßburg S, Lindenberger D et al. Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung: Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für WIrtschaft und Technologie, Berlin. Basel/Köln/Osnabrück: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Auftraggeber); Prognos AG; EWI; GWS; August 2012.
8. Ickert L, Matthes U, Rommerskirchen S, Weyand E, Schlesinger M, Limbers J. Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Basel/Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Auftraggeber); Mai 2007.
9. Gerbert P, Herhold P, Burchardt J, Schönberger S, Rechenmacher F, Kirchner A et al. Klimapfade für Deutschland: BDI (Auftraggeber); Boston Consulting Group; Prognos AG; 18.1.2018 [Stand: 17.06.2020]. Verfügbar unter: https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/.

10. Fraedrich E, Kröger L, Bahamonde-Birke F, Frenzel I. Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr: Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen: e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württem-berg; 2017.
11. King B. Ermittlung einer zeitlich aufgelösten Energieträgernachfrage für den Nutzfahrzeugverkehr für das Jahr 2050 in Deutschland [Masterarbeit]. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig; 2018.
12. Jong G de, Schroten A, Essen H van, Otten M, Bucci P. Price sensitivity of European road freight transport – towards a better under-standing of existing results: A report for Transport & Environment; Juli 2010 [Stand: 10.07.2020]. Verfügbar unter: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2010_07_price_sensitivity_road_freight_significance_ce.pdf.
13. Hülsmann F, Mottschall M, Hacker F, Karsten P. Working Paper: Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050: Öko-Institut e. V.; August 2014. Öko-Institut Working Paper 3/2014.
14. Hacker F, Blanck R, Hülsmann F, Karsten P, Loreck C, Ludig S et al. eMobil 2050: Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz; Gemeinsamer Endbericht zu den Vorhaben „Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: UM 11 96 106) und „Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: 16 EM 1001). Berlin: Öko-Institut e. V.; September 2014 [Stand: 14.07.2020]. Verfügbar unter: https://www.oeko.de/oekodoc/2114/2014-670-de.pdf.
15. Bundesanstalt für Straßenwesen. Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen [Stand: 17.06.2020]. Verfügbar unter: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946.
16. Mommens K, Lebeau P, Verlinde S, van Lier T, Macharis C. Evaulating the impact of off-hour deliveries: An application of the TRansport Agent-BAsed model. Transportation Research Part D – Transport and Environment 2018; (62):102–11. Verfügbar unter: 10.1016/j.trd.2018.02.003.
17. Allen J, Browne M, Cherret T, McLeod F. Review of UK urban freight studies: University of Westminster; University of Southampton.
18. Forschungsinformationssystem. Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs; 2011 [Stand: 22.06.2020]. Verfügbar unter: https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/.
19. Sterchele P, Brandes J, Heilig J, Wrede D, Kost C, Schlegl, Thomas, Bett, Andreas et al. Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer ISE; 13.2.2020 [Stand: 17.06.2020]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html.

2.21 AP 16: Umweltverträglichkeit

Im Rahmen einer externen Beauftragung führte die Volkswagen AG eine Ökobilanzstudie zu verschiedenen Antriebskonzepten von Langstrecken LKWs durch und stellte diese gegenüber. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Studie gegenübergestellt.

2.21.1 Ziel und Umfang

In Abbildung 235 sind die wesentlichen technischen Daten der untersuchten LKW dargestellt. Untersucht wurden die folgenden Antriebskonfigurationen:

26. JULI 2022

- ICE CI: konventioneller Diesel LKW
- ICE CI HEV: hybridisierter Diesel LKW
- ICE SI: konventionelle Otto-Variante angetrieben mit flüssigem Erdgas
- ICE SI HEV: hybridisierte Otto-Variante angetrieben mit flüssigem Erdgas
- BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug
- CEV: Oberleitungs-Fahrzeug (wie BEV, jedoch mit Pantograph und kleinerer Batterie)
- FCEV: Brennstoffzellenfahrzeug

Wie der Abbildung entnommen werden kann ist die technische Performance der Fahrzeuge weitgehend vergleichbar. Einzig beim batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) muss beachtet werden, dass aufgrund der deutlich höheren Leermasse des Zugfahrzeugs dessen Zuladung eingeschränkt ist.

Die in der Abbildung dargestellten Verbrauchsdaten entstammen dabei der JEC Tank-to-Wheels Studie. Die für die Ökobilanz der Herstellung der Fahrzeuge besonders einflussreiche Werkstoffzusammensetzung wurde durch eigene Untersuchungen ermittelt und wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

Component	ICE CI	ICE CI HEV	ICE SI	ICE SI HEV	BEV	CEV	FCEV
Engine	13l, 330kW	13l, 330kW	13l, 330kW	13l, 330kW	-	-	-
EAT	SCR	SCR	TWC	TWC	-	-	-
Urea Tank	87l	82l	-	-	-	-	-
Transmission	12 AMT	12 AMT	12 AMT	12 AMT	2 ATM	2 ATM	2 ATM
E-Motor	-	PSM 140kW	-	PSM 140kW	PSM 325kW	PSM 325kW	PSM 325kW
Pantograph	-	-	-	-	-	yes	-
Power Electronics	-	Inverter, DC/DC	-	Inverter, DC/DC	Inverter, DC/DC	Inverter, DC/DC	Inverter, DC/DC
Fuel Cell System	-	-	-	-	-	-	PEM 325kW
Fuel Tank	Diesel 1000l	Diesel 500l	LNG 1000l	LNG 1000l	-	-	H2 1800l
Traction Battery	-	10kWh gross	-	10kWh gross	840kWh gross	150kWh gross	20kWh gross
Fuel/Energy consumption (JEC study)	29,2 l/100km	27,5 l/100km	26,5 kg/100km	25,4 kg/100km	5,53 MJ/km	4,92 MJ/km	6,94 kg/100km
Total weight Tractor	7,7425t (JEC: 7,55t)	7,6557t (JEC: 7,413t)	7,678t (JEC: 7,492t)	8,0337t (JEC: 7,700t)	13,119t (JEC: 12,761t)	7,4276t (JEC: 7,069t)	7,2164t (JEC: 6,867t)
Curb weight trailer	7,5t	7,5t	7,5t	7,5t	7,5t	7,5t	7,5t

Abbildung 235: Technische Daten der untersuchten LKW

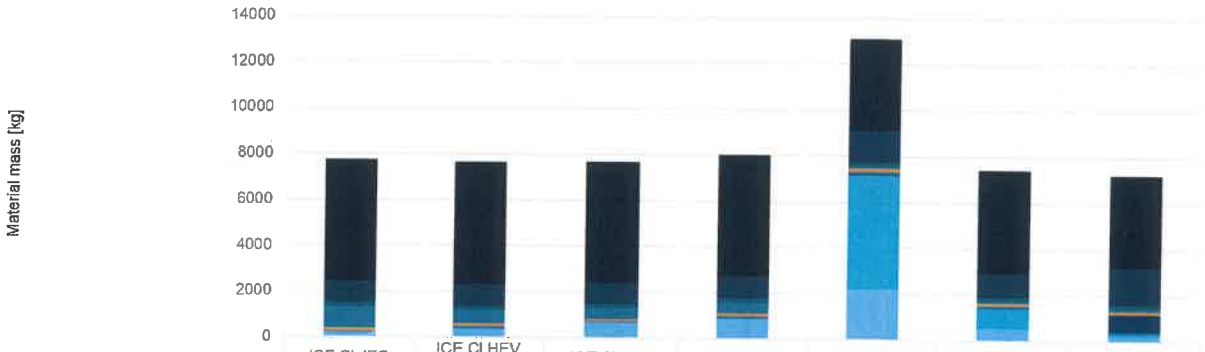
2.21.2 Materialzusammensetzung der Fahrzeuge

Abbildung 236 zeigt die für die Berechnung der LCA zugrunde gelegte Werkstoffzusammensetzung der Fahrzeuge. Betrachtet man die verbrennungsmotorischen Antriebsstränge wird deutlich, dass die Gesamtmasse der Zugfahrzeuge vor allem durch Stahl und Eisenwerkstoffe (Steel), ca. 5,3 t bestimmt wird. Nächstgrößte Fraktion (Plastics) bilden die Kunststoffe bzw. je nach Fahrzeug die Betriebsstoffe (Operation Material Materials).

Vergleicht man die Fahrzeuge untereinander fällt auf den ersten Blick auf, dass die Masse des hybridisierten Fahrzeugs geringer ist als die des konventionellen Diesels. Dies liegt darin begründet, dass der hybridisierte Diesel-LKW im Gegensatz zum konventionellen nur mit einem 500l Diesel-Tank ausgestattet ist. Das durch die Batterie bedingte Mehrgewicht des Hybrids wird so kompensiert.

Bei den mit flüssigem Erdgas (LNG) betriebenen Varianten (ICE SI, ICE SI HEV) sind bei der Gesamtmasse vergleichbar zum konventionellen Diesel. Betrachtet man die Werkstofffraktionen genauer wird deutlich, dass die Fraktion der Betriebsstoffe beim ICE SI deutlich geringer ist als beim ICE CI. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur eine geringere Menge LNG mitgeführt wird. Gleichzeitig muss statt des konventionellen Kraftstoff- und Urea-Tanks ein Flüssiggastank im Fahrzeug verbaut werden. Dies erklärt den Anstieg bei der Fraktion Aluminium. Im Gegensatz zur Dieselvariante verfügen hybridisierte und konventionelle Variante im Erdgasfahrzeug über das gleiche Tankvolumen, so dass die Masse des Hybridfahrzeugs erwartungsgemäß höher ist als die des Konventionellen.

Betrachtet man das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) sticht zunächst die deutlich höhere Gesamtmasse des Fahrzeugs ins Auge. Diese auf die Traktionsbatterie und vor allem auf die Zellen zurückzuführen. Betrachtet man die Werkstofffraktionen im Detail ist auffällig, das die Fraktion der Stahl und Eisenwerksstoffe des BEV deutlich geringer ist als beim Verbrenner. Dies liegt im Entfall vor allem im Entfall des Verbrennungsmotors und des 12-Gang-Getriebes begründet. Gleiches gilt für die Fraktion der Betriebsstoffe durch den Entfall des Kraftstoffs ist diese Fraktion deutlich kleiner als bei den konventionellen Varianten. Im Gegenzug ist vor allem die Aluminiumfraktion deutlich größer. Dies ist vor allem auf Gehäuseteile der Batterie zurückzuführen.



	ICE CI JEC	ICE CI HEV JEC	ICE SI JEC	ICE SI HEV JEC	BEV JEC	CEV JEC	FCEV JEC
Steel	5307	5326	5269	5319	3997	4501	4013
Plastics	946	979	935	969	1406	1035	1628
Other	169	169	169	169	170	173	170
Operating materials	960	584	486	486	73	73	115
MOM	9	9	9	9	8	8	8
Heavy Metals	101	114	101	114	146	130	118
Fuel Cell							756
Electronics / Electronic Components	40	74	40	74	163	95	80
Battery Cells		59		59	4951	884	119
Aluminium	214	341	679	835	2206	519	229

Abbildung 236: Materialzusammensetzung der untersuchten LKW

Das Oberleitungsfahrzeug (CEV) ist etwa so schwer wie die konventionell angetriebenen Fahrzeuge. Dies liegt an der kleineren Batterie des Oberleitungsfahrzeugs, welches eine deutlich geringere Reichweite als die konventionell angetriebenen Fahrzeuge aufweist. Durch den Pantographen ist die Fraktion der Stahl- und Eisenwerkstoffe beim CEV etwas größer als beim BEV.

Das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) ist etwa so schwer wie das konventionelle Diesel-Fahrzeug. Allerdings ist im Vergleich die Fraktion der Stahl- und Eisenwerkstoffe kleiner als beim Diesel-Fahrzeug und die Fraktion der Kunststoffe größer. Dies ist vor allem auf die Wasserstofftanks zurückzuführen, die aus kohlefaserverstärktem Kunststoff gefertigt sind.

26. JULI 2022

2.21.3 Nutzungsphase

Aufgrund der hohen Laufleistung ist die Nutzungsphase beim schweren Nutzfahrzeug besonders dominant. Im Rahmen der Studie wurde von europäischen Randbedingungen ausgegangen, d.h. es wurden europäische Durchschnittskraftstoffe sowie durchschnittlicher europäischer Strom-Mix für die Betrachtung herangezogen. Für das Brennstoffzellenfahrzeug wurde von Wasserstoff aus Dampfreformierung ausgegangen.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden für BEV, CEV und FCEV Szenarien auf Basis erneuerbaren Stroms berechnet.

In allen Szenarien wurde von einer Laufleistung von 1.500.000 km ausgegangen.

2.21.4 Wartung

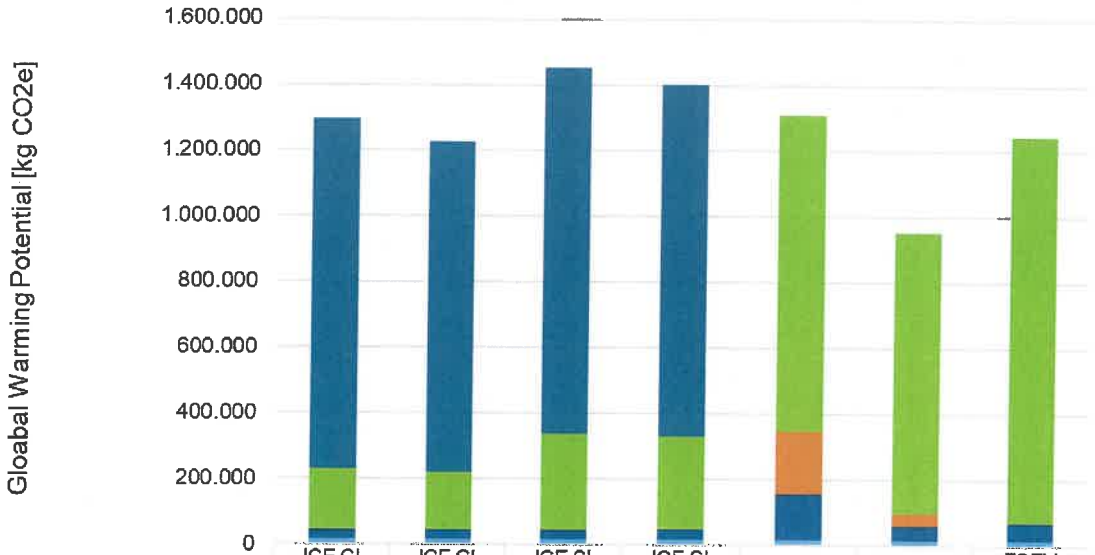
Die Wartung der Fahrzeuge spielt typischerweise eine untergeordnete Rolle in der LCA und wurde in der Betrachtung vernachlässigt. Einzig bei den elektrischen Antrieben wurden zwei Täusche der Traktionsbatterien im Laufe des Fahrzeuglebens berücksichtigt. Diese sind in den Ergebnissen separat dargestellt, so dass ihr Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse deutlich wird.

2.21.5 Ergebnisse zur Umweltverträglichkeit

Abbildung 237 zeigt das Treibhauspotential der untersuchten Fahrzeuge im Basisszenario für europäische Randbedingungen.

Insgesamt liegen abgesehen vom CEV alle Fahrzeuge auf einem ähnlichen Niveau. Vor allem für die fossilen Antriebe ist auffällig, dass das Treibhauspotential kaum von den Ergebnissen der Herstellungsphase abhängt.

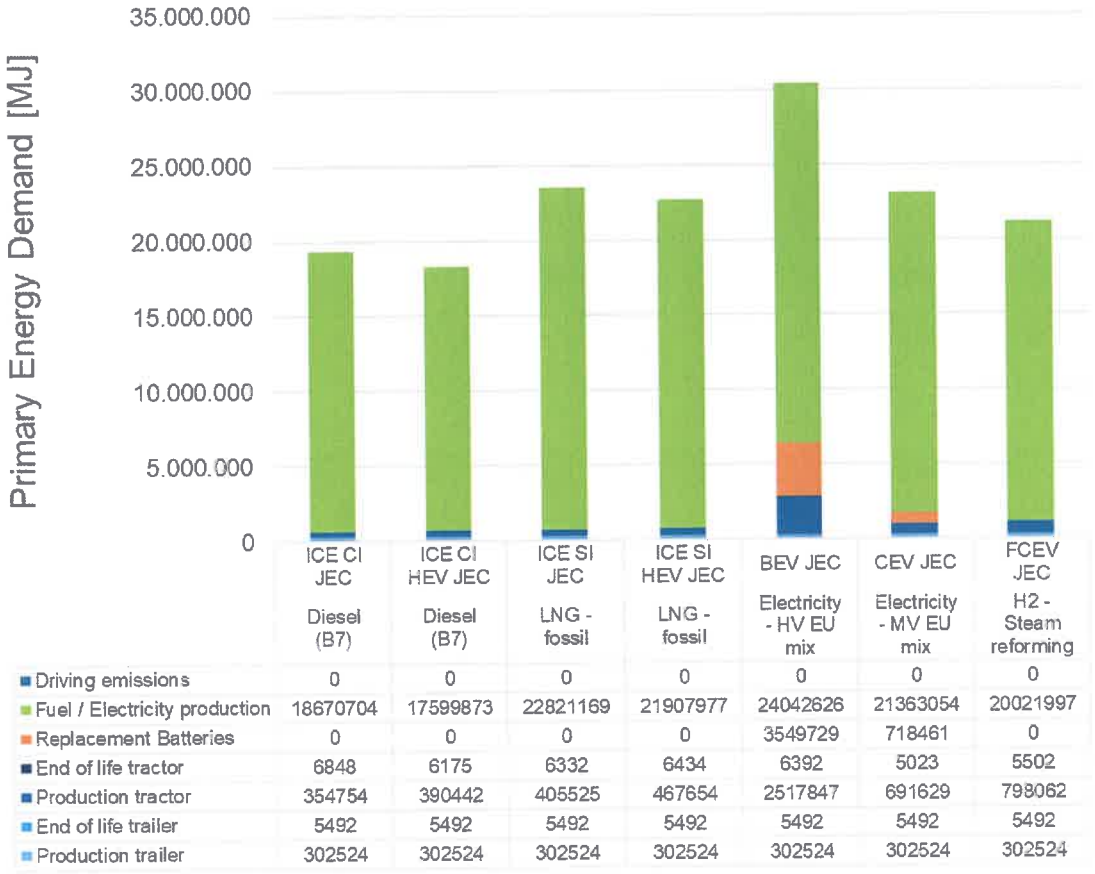
Bei den alternativen Antrieben (v.a. BEV, aber auch CEV und FCEV) ergibt sich eine Verschiebung hin zur Produktionsphase. Beim BEV ist diese Verschiebung aufgrund der im Basisszenario enthaltenen Batteriewechsel über die Lebensdauer der Fahrzeuge besonders deutlich.



	ICE CI JEC Diesel (B7)	ICE CI HEV JEC Diesel (B7)	ICE SI JEC LNG - fossil	ICE SI HEV JEC LNG - fossil	BEV JEC Electricity - HV EU mix	CEV JEC Electricity - MV EU mix	FCEV JEC H2 - Steam reforming
Driving emissions	1066952	1005851	1115843	1070993	0	0	0
Fuel / Electricity production	186020	175351	292999	281275	961860	854660	1177491
Replacement Batteries	0	0	0	0	189873	38639	0
End of life tractor	4606	3710	3600	3669	3534	2687	3444
Production tractor	21063	23150	23811	27373	135178	39496	48505
End of life trailer	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393
Production trailer	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317

Abbildung 237: Treibhauspotential

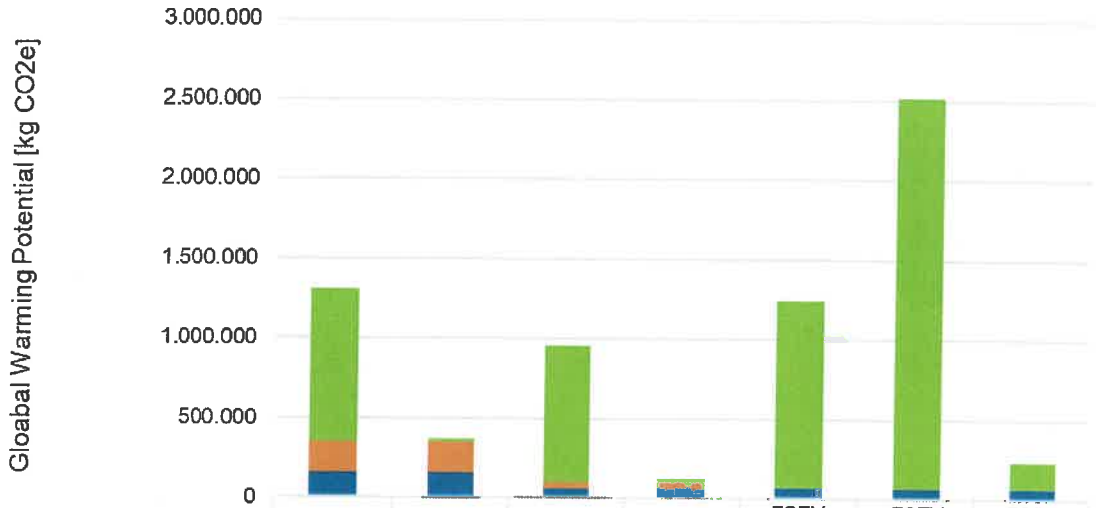
Das CEV liegt bei dieser Betrachtung etwas unterhalb des BEV, da Traktionsbatterie deutlich kleiner ausgelegt werden kann. Insgesamt zeigt der CEV so das niedrigste Treibhauspotential.



	ICE CI JEC Diesel (B7)	ICE CI HEV JEC Diesel (B7)	ICE SI JEC LNG - fossil	ICE SI HEV JEC LNG - fossil	BEV JEC Electricity - HV EU mix	CEV JEC Electricity - MV EU mix	FCEV JEC H2 - Steam reforming
Driving emissions	0	0	0	0	0	0	0
Fuel / Electricity production	18670704	17599873	22821169	21907977	24042626	21363054	20021997
Replacement Batteries	0	0	0	0	3549729	718461	0
End of life tractor	6848	6175	6332	6434	6392	5023	5502
Production tractor	354754	390442	405525	467654	2517847	691629	798062
End of life trailer	5492	5492	5492	5492	5492	5492	5492
Production trailer	302524	302524	302524	302524	302524	302524	302524

Abbildung 238: Primärenergiebedarf

In Abbildung 238 ist analog zu Abbildung 237 der Primärenergiebedarf der Fahrzeuge dargestellt. Im Gegensatz zu den konventionellen Varianten liegen hier die alternativen Antriebe vor allem der BEV etwas höher als die konventionellen Varianten. Zu beachten ist allerdings, dass durch die Nutzung des europäischen Strom-Mix ein großer Anteil dieser Energieträger bereits heute erneuerbar ist.

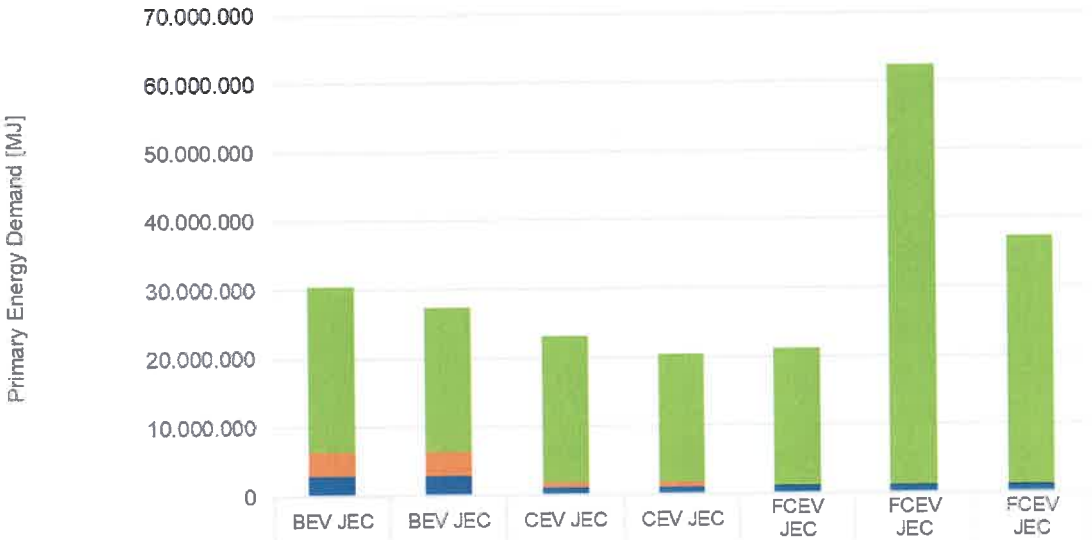


	BEV JEC Electricity - HV EU mix	BEV JEC Electricity - HV wind power	CEV JEC Electricity - MV EU mix	CEV JEC Electricity - MV wind power	FCEV JEC H2 - Steam reforming	FCEV JEC H2 - Electrolysis EU mix	FCEV JEC H2 - Electroiysis offshore wind power
Driving emissions	0	0	0	0	0	0	0
Fuel / Electricity production	961860	19535	854660	17358	1177491	2447640	169002
Replacement Batteries	189873	189873	38639	38639	0	0	0
End of life tractor	3534	3534	2687	2687	3444	3444	3444
Production tractor	135178	135178	39496	39496	48505	48505	48505
End of life trailer	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393
Production trailer	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317

Abbildung 239: Szenarien Energieerzeugung Treibhauspotential

In Abbildung 239 und Abbildung 240 sind unterschiedlich Energiebereitstellungspfade für die alternativen Antriebe darstellt. Betrachtet man BEV CEV und FCEV so wird deutlich, dass ein Wechsel hin zu alternativen Energieträgern eine deutliche Reduktion des Treibhauspotentials über den Lebenszyklus ermöglicht. Auch ausgehend von erneuerbaren Energieträgern zeigt das CEV über den Lebenszyklus das geringste Treibhauspotential aller betrachteten Varianten.

Erwartungsgemäß ergeben sich bei der Betrachtung dieser Szenarien nur geringe Unterschiede im Primärenergiebedarf.

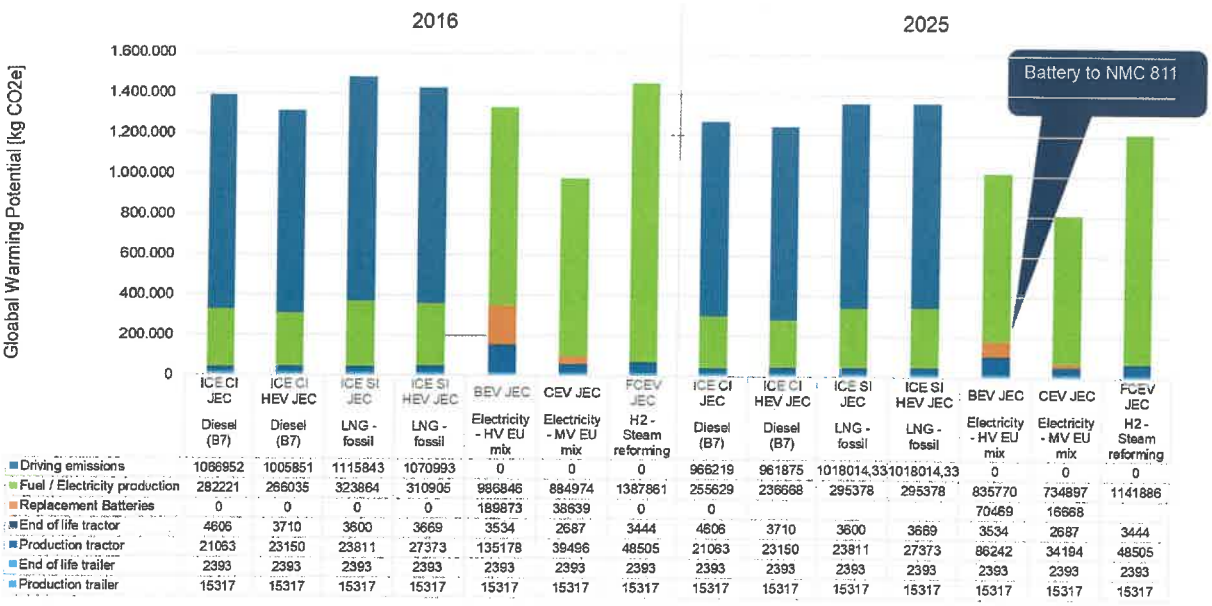


	BEV JEC Electricity - HV EU mix	BEV JEC Electricity - HV wind power	CEV JEC Electricity - MV EU mix	CEV JEC Electricity - MV wind power	FCEV JEC H2 - Steam reforming	FCEV JEC H2 - Electrolysis EU mix	FCEV JEC H2 - Electrolysis offshore wind power
Driving emissions	0	0	0	0	0	0	0
Fuel / Electricity production	24042626	21047418	21363054	18701665	20021997	61131529	36142596
Replacement Batteries	3549729	3549729	718461	718461	0	0	0
End of life tractor	6392	6392	5023	5023	5502	5502	5502
Production tractor	2517847	2517847	691629	691629	798062	798062	798062
End of life trailer	5492	5492	5492	5492	5492	5492	5492
Production trailer	302524	302524	302524	302524	302524	302524	302524

Abbildung 240: Szenarien Energieerzeugung Primärenergiebedarf

Abschließend wurde in Abbildung 241 die Auswirkung eines Voranschreitens der Batterietechnologie des Strom-Mixes auf die Fahrzeuge untersucht. Grundlage für dieses Szenario ist zum einen die Fortschreibung des europäischen Strom Mix, sowie die Weiterentwicklung der Batterietechnologie hin zu NMC811 im schweren Nutzfahrzeug, die Batterie wird im 2025 Szenario nur noch einmal gewechselt. Außerdem wurde von einer Verbesserung der Fahrzeugverbräuche in allen Varianten ausgegangen.

Unter diesen Bedingungen wird deutlich, sowohl BEV als auch CEV deutlich vom besseren Strom-Mix profitieren. Das BEV zeigt deutliches Potential durch voranschreiten der Batterietechnologie, bleibt aber ausgehend vom Treibhauspotential hinter LKW mit Oberleitung zurück.



	ICE CI JEC Diesel (B7)	ICE CI HEV JEC Diesel (B7)	ICE SI JEC LNG - fossil	ICE SI HEV JEC LNG - fossil	BEV JEC Electricity - HV EU mix	CEV JEC Electricity - MV EU mix	FCEV JEC H2 - Steam reforming	ICE CI JEC Diesel (B7)	ICE CI HEV JEC Diesel (B7)	ICE SI JEC LNG - fossil	ICE SI HEV JEC LNG - fossil	BEV JEC Electricity - HV EU mix	CEV JEC Electricity - MV EU mix	FCEV JEC H2 - Steam reforming
Driving emissions	1066952	1005851	1115843	1070993	0	0	0	966219	961875	1018014,33	1018014,33	0	0	0
Fuel / Electricity production	282221	266035	323864	310905	986846	884974	1387861	255629	236668	295378	295378	835770	734897	1141886
Replacement Batteries	0	0	0	0	189873	38639	0	0				70469	16668	
End of life tractor	4606	3710	3600	3669	3534	2687	3444	4606	3710	3600	3669	3534	2687	3444
Production tractor	21063	23150	23811	27373	135178	39496	48505	21063	23150	23811	27373	86242	34194	48505
End of life trailer	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393	2393
Production trailer	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317	15317

Abbildung 241: Projektion 2025 Treibhauspotential

2.21.6 Fazit zur Umweltverträglichkeit

Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen können die folgenden Aussagen im Fazit gezogen werden:

- Das Oberleitungsfahrzeug zeigt im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten das geringste Treibhauspotential
- Das BEV und das CEV profitieren besonders stark von einer zukünftigen Verbesserung des Strom-Mix hin zu erneuerbaren Energieträgern
- Vergleicht man BEV und CEV so wird deutlich, dass das BEV besonders von Verbesserungen der Batterietechnologie profitiert.
- Aus Sicht des Treibhauspotentials muss beim FCEV sichergestellt sein, dass der Wasserstoff aus rein regenerativen Quellen erzeugt wird.