Förderprojekt InnoEKom

Innovatives Gesamtenergiesystem für ein elektrisches Kommunalfahrzeug am Beispiel einer Kompaktkehrmaschine

Abschlussbericht

Projektzeitraum
1. Januar 2019 bis 30. Juni 2020

Konsortialführer
FKFS

Abgabe
30.09.2020

Projektpartner

FKFS | aebi schmidt group | GREENING THE EFFICIENT WAY OF ENGINEERING | UNITEK Industrie Elektronik GmbH

Förderung und Koordination

Gefördert durch:

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

koordiniert durch:

mom Mittelstandsoffensive Mobilität

e-mobil BW
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Konsortium (Unterschriftenblatt)

Die Unterzeichner legen hiermit den Schlussbericht zum Förderprojekt InnoEKom – Innovatives Gesamtenergiesystem für ein elektrisches Kommunalfahrzeug am Beispiel einer Kompaktkehrmaschine vor.

Konsortialführer

FORSCHUNGSINSTITUT FÜR
KRAFTFAHRWESEN UND FAHRZEUGMOTOREN
STUTTGART -FKFS-
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart

Dr.-Ing. Thomas Riemer
FKFS

Partner

ppa. T. Weiß

ppa. Tobias Weissenrieder
Aebi Schmidt Deutschland GmbH

Aebi Schmidt Deutschland GmbH
DE-79837 St. Blasien · Albtalstraße 36
Tel. +49 76 72/412-0 · Fax 412-230

GREENING
Greening GmbH & Co. KG
Bahnhofstraße 109
71397 Leutenbach
Tel. +49 7195 / 90 433 0
Fax +49 7195 / 90 433 19

Dr.-Ing. Uwe Kehn
Greening GmbH & Co. KG

UniTek Industrie Elektronik GmbH
Hans-Paul-Kaysser-Str. 1
71397 Leutenbach
Tel.: 07195/92830
Fax: 07195/9283-129
e-mail: info@unitek-online.de

Thomas Labod
UniTek Industrie Elektronik GmbH

Projektsteckbrief

Projektinhalt	Entwicklung eines innovativen Gesamtenergiesystems für ein Kommunalfahrzeug, am Beispiel einer Kompaktkehrmaschine der Firma Aebi Schmidt
Fördermittelgeber	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg
Projektkoordinator	e-mobil BW
Fördervolumen	227.713 €
Zeitraum	01.01.2019 – 30.06.2020 Verlängerung um 6 Monate
Fahrzeug im Projekt	Kompaktkehrmaschine
Methoden im Projekt	Simulation, CAD (Computer-Aided Design), TCO (Total Cost of Ownership)

Tabelle 1: Datenblatt des Projekts InnoEKom

Inhaltsverzeichnis

Konsortium (Unterschriftenblatt) ... II

Projektsteckbrief ... III

Inhaltsverzeichnis ... IV

Abbildungsverzeichnis ... VI

Tabellenverzeichnis ... VII

1. Das Projekt InnoEKom ... 1

1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung ... 1

1.2. Lösungsansätze ... 1

1.3. Projektstruktur ... 2

1.3.1. Übersicht der Arbeitspakete ... 2

1.3.2. Zeitplan und Meilensteine ... 4

1.4. Projektpartner und Themenschwerpunkte ... 6

2. AP1 – Bedarfsgerechtes Energiesystem ... 8

2.1. AP 1.1: Analyse Arbeitszyklus und Ausarbeitung der relevanten Lastpunkte ... 8

2.1.1. Ziel des Arbeitspakets ... 8

2.1.2. Verlauf und Umsetzung ... 8

2.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 10

2.2. AP 1.2: Ermittlung Energiebedarfe im Fahr- und Arbeitsbetrieb ... 11

2.2.1. Ziel des Arbeitspakets ... 11

2.2.2. Verlauf und Umsetzungen ... 11

2.2.3. Aufbau der Simulationsumgebung ... 11

2.2.4. Validierung der Simulationsumgebung ... 13

2.2.5. Ableitung der Energiebedarfe der Kompaktkehrmaschine ... 15

2.2.6. Zusammenfassung und Ergebnis ... 18

2.3. AP 1.3: Konzept einer funktionalen Fahrzeugarchitektur ... 18

2.3.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 18

2.3.2. Verlauf und Umsetzung ... 18

2.4. AP 1.4: Management Energieaustausch zwischen den Spannungsebenen zur optimalen Nutzung der Energiespeicher ... 19

2.4.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 19

2.4.2. Verlauf und Umsetzung ... 19

2.5. AP 1.5: Grobkonzept Thermomanagement (Antrieb, Speicher, Kabine) ... 22

2.5.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 22

2.5.2. Verlauf und Umsetzung ... 22

2.5.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 25

3. AP 2: Elektrifizierung Kommunalfahrzeug ... 25

3.1. AP 2.1: Erarbeitung des Anforderungskatalogs ... 25

3.1.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 25

3.1.2. Verlauf und Umsetzung ... 25

3.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 25

3.2. AP 2.2: Auslegung des Elektrischen Antriebs und Speicher ... 25
3.2.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 25
3.2.2. Verlauf und Umsetzung ... 25
3.2.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 27

3.3. AP 2.3: Bauraumuntersuchung ... 27
3.3.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 27
3.3.2. Verlauf und Umsetzung ... 28
3.3.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 28

3.4. AP 2.3: Packagingkonzept ... 28
3.4.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 28
3.4.2. Verlauf und Umsetzung ... 28
3.4.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 29

4. AP 3: Lifetimebetrachtung Diesel vs. Elektro ... 30

4.1. AP 3.1: Emissionen ... 30
4.1.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 30
4.1.2. Verlauf und Umsetzung ... 30
4.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 31

4.2. AP 3.2: TCO-Vergleich beider Antriebskonzepte ... 31
4.2.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 31
4.2.2. Verlauf und Umsetzung ... 31
4.2.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 36

4.3. AP 3.3: Batteriealterungsuntersuchung ... 36
4.3.1. Ziel des Arbeitspaketes ... 36
4.3.2. Verlauf und Umsetzung ... 36
4.3.3. Zusammenfassung und Ergebnis ... 38

5. Zusammenfassung ... 39

5.1. Gesamtbewertung zur wissenschaftlichen und industriellen Nutzbarkeit ... 39

5.2. Erreichte Technologietransfer / Wissenstransfer ... 40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete 2
Abbildung 2: Zeitplan InnoEKom von 01.01.2019-30.06.2020..... 5
Abbildung 3: DIN EN 15429-2 Zyklus..... 9
Abbildung 4: Eingabefenster zur Definition vom Fahr- und Arbeitszyklus 10
Abbildung 5: Grundprinzip des Simulationsmodells 11
Abbildung 6: Grundprinzip der Simulation der hydraulischen Komponenten..... 12
Abbildung 7: Aufbau der Simulationsumgebung 13
Abbildung 8: Validierung des Fahrantriebs durch Abgleich von Simulation und Messung 14
Abbildung 9: Validierung der Arbeitshydraulik durch Abgleich von Simulation und Messung 14
Abbildung 10: Geschwindigkeits-Zeit-Profil des repräsentativen Fahrzyklus 15
Abbildung 11: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Fahrantriebs 16
Abbildung 12: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Hydraulikantriebs 16
Abbildung 13: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Sauggebläseantriebs 17
Abbildung 14: Simulationsergebnisse der Leistung an der Batterie 17
Abbildung 15: Schaubild der elektrischen Fahrzeugarchitektur 19
Abbildung 16: Matlab-Simulink-Model UniTek Umrichter BAMOCAR..... 21
Abbildung 17: Matlab-Simulink- und -SimScape-Model UniTek Umrichter BAMOCAR..... 21
Abbildung 18: Konzept des Thermomanagements..... 23
Abbildung 19: Vereinfachtes Konzept des Thermomanagements..... 24
Abbildung 20: Kühlung des Sauggebläses 24
Abbildung 21: Position des Fahrantriebs 26
Abbildung 22: Realisierung des Hydraulikantriebs..... 27
Abbildung 23: DMU Modell mit 160 kWh elektrischen Speicher..... 29
Abbildung 24: Angewendeter Stressfaktor über Batterietemperatur und Entladungsgrad..... 37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenblatt des Projekts InnoEKom III
Tabelle 2: beispielhaftes Lastkollektiv der dieselmotorischen Kompaktkehrmaschine 8
Tabelle 3: Ergebnisse der Best und Worst Case Simulation 18
Tabelle 4: CO2 Emissionen bei der Stromerzeugung in Deutschland [Quelle: www.umweltbundesamt.de] 30
Tabelle 5: Vergleich der CO2 Emissionen Diesel vs. Elektro 31
Tabelle 6: Kostenaufstellung der diesel- und elektromotorischen Varianten 32
Tabelle 7: Berechnung der Wirtschaftlichkeit ohne staatliche Förderung 33
Tabelle 8: Berechnung der Wirtschaftlichkeit ohne staatliche Förderung und mit Batteriewechsel ... 34
Tabelle 9: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes 34
Tabelle 10: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes und Batteriewechsel 35
Tabelle 11: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 100.000 Euro 35
Tabelle 12: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 100.000 Euro und mit Batteriewechsel 35
Tabelle 13: Vergleich verschiedener Batteriealterungsmodelle 37
Tabelle 14: Ergebnisse der Batteriealterungsuntersuchung 38

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current – Wechselstrom
CAD	Computer-Aided Design - rechnerunterstütztes Konstruieren
DC	Direct Current – Gleichstrom
DOD	Depth of Discharge – Entladungsgrad der Batterie
HV	Hochvolt
InnoEKom	Innovatives Gesamtenergiesystem für ein elektrisches Kommunalfahrzeug
LFP	Lithiumeisenphosphat
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
NV	Niedervolt
PDU	Power-Distribution-Units
PID	Proportional-Integral-Derivativ
PKW	Personenkraftwagen
SOC	State of Charge – Ladezustand der Batterie
SOH	State of Health – Gesundheitszustand der Batterie
TCO	Total Cost of Ownership – ganzheitliche Kostenbetrachtung
Weighted-Ah	gewichtetes Amperestundenmodell

Kurze Darstellung

1. Das Projekt InnoEKom

1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Ziel des Förderprojektes InnoEKom ist die Entwicklung eines innovativen Gesamtenergiesystems für ein Kommunalfahrzeug. Dieses Fahrzeug zählt zu der Sparte „nicht vermeidbarer Verkehr“, wodurch der gesetzlich regulierte Höchstwert für NOX und das damit verbundene Fahrverbot für dieselbetriebene Kommunalfahrzeuge ein Hindernis für deren zukünftige Arbeitseinsätze im innerstädtischen Bereich darstellen wird. Die Städte fordern lokal emissionsfreie Fahrzeuge. Der dadurch getriebene Transformationsprozess bedingt einen Wandel der Antriebstechnik, weg vom Diesel- hin zum Elektroantrieb. Die Herausforderung bei der Elektrifizierung dieser Fahrzeuge besteht in der Komplexität der Antriebsarchitektur und den damit verbundenen Energieflüssen.

Stellvertretend für die Kommunalfahrzeuge wird ein komplexes Antriebssystem einer Kompaktkehrmaschine der Fa. Aebi Schmidt untersucht. Die Elektrifizierung dieser Fahrzeugklasse stellt für die Fa. Aebi Schmidt ein neues Themenfeld dar. Dieses schwere Fahrzeug weist entsprechend hohe Energieverbräuche auf, wodurch die Optimierung des Gesamtenergiesystems ein wichtiger Bestandteil ist, um dieses Fahrzeug für einen rein elektrischen Arbeitseinsatz zu ertüchtigen.

Aufgrund der steigenden Nachfrage an lokal emissionsfreien Kommunalfahrzeugen soll das geplante Projekt schnellst möglich umgesetzt werden, weshalb wir eine Projektlaufzeit von 12 Monaten planen.

1.2. Lösungsansätze

Nach Stand der Technik treibt der Dieselmotor einen Hydrostaten an, welcher die Fahr- und Arbeitsantriebe mit Energie versorgt. Die damit verbundene Wirkungsgradkette ist im Vergleich zu einer vollelektrifizierten Kehrmaschine äußerst schlecht.

Mit der Vollelektrifizierung kann der Wirkungsgrad von Fahrantrieb, Sauggebläse und Besenantriebe sowie Hydraulik, signifikant verbessert werden und zudem erfüllt das Fahrzeug die geforderte lokale Emissionsfreiheit.

Darüber hinaus wird eine wirkungsgradoptimierte Systemarchitektur untersucht, um die wesentlichen Betriebszustände, schnelles Fahren zum Einsatzort und langsames Fahren während des Kehrbetriebs, energieeffizient abdecken zu können. Dabei liegt der Fokus auf der innovativen Energieübertragung zwischen unterschiedlichen Spannungsebenen und den Teilsystemen Fahr- und Arbeitsantriebe. Damit verbunden sind hohe Anforderungen an die Halbleiterelektronik für den optimalen Energieaustausch.

Zudem müssen für eine gesamtheitliche Betrachtung des Energieverbrauchs alle Energieflüsse berücksichtigt werden. Dazu wird untersucht, wie ein entsprechendes Gesamtenergiesystem aus elektrischem und thermischem Energiemanagement zu konzeptionieren ist.

1.3. Projektstruktur

1.3.1. Übersicht der Arbeitspakete

Im Projekt InnoEKom wurden drei Arbeitspakete bearbeitet, in Abbildung 1 dargestellt. Das Arbeitspaket 1 dient der Analyse der .Auslegungskriterien. und der Konzeptionierung des Energiesystems, bestehend aus der Fahrzeugarchitektur und dem Thermomanagement. Im Arbeitspaket 2 werden die Überlegungen aus Arbeitspaket 1 auf das beispielhafte Kommunalfahrzeug Kompaktkehrmaschine übertragen. Es werden die Komponenten ausgelegt und beipielhaft konstruktiv umgesetzt

Im Arbeitspaket 3 wird abschließend eine vergleichende Analyse zwischen einer dieselmotorischen Kehrmaschine, als Stand der Technik, und der im Projekt entworfenen, elektrischen Kehrmaschine durchgeführt. Dabei werden über die Lebensdauer der Maschine die Kriterien Emissionen, Kosten und Alterung betrachtet.

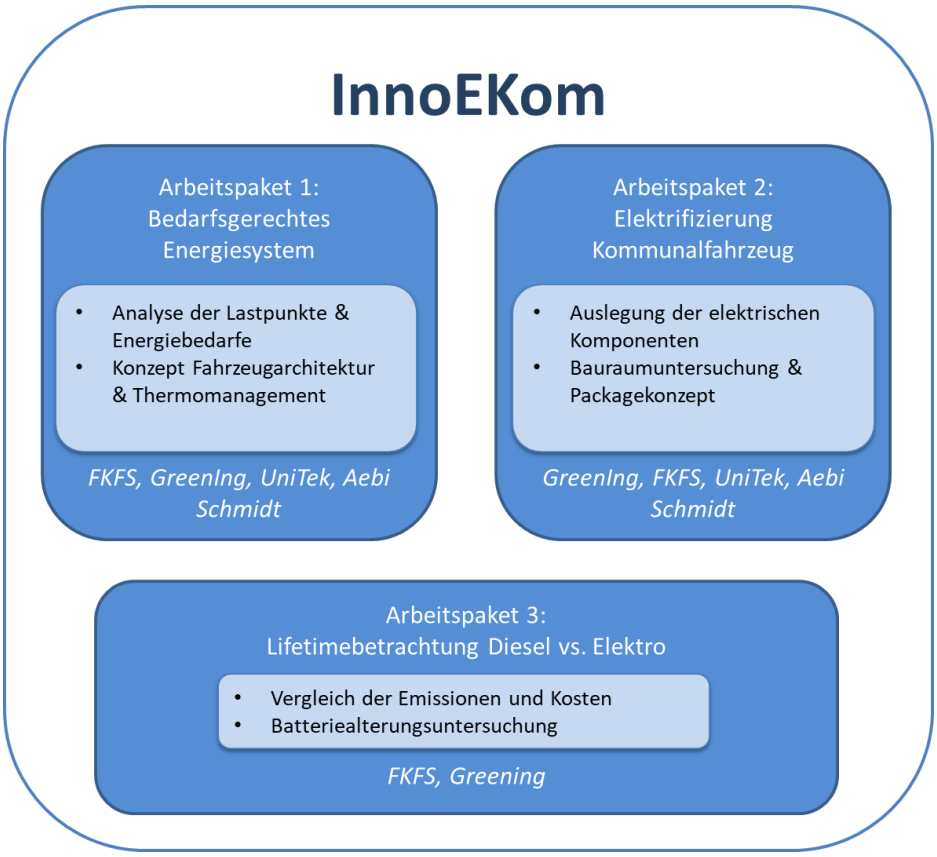

Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete

Nachfolgend wird jeweils ein kurzer Einblick in die jeweiligen Teilarbeitspakete gegeben:

AP1.1 Analyse Arbeitszyklus und Ausarbeitung der relevanten Lastpunkte (Aebi Schmidt, FKFS, GreenIng, UniTek)

Im ersten Schritt werden die, von der Fa. Aebi Schmidt bereitgestellten, Fahrzeugdaten bezüglich Arbeitszyklen und Lastpunkten analysiert und ausgewertet. Die daraus gewonnen Informationen fließen in AP1.2 ein. Eventuell ausstehende Informationen werden ermittelt oder realitätsnahe Näherungswerte angenommen.

AP1.2 Ermittlung Energiebedarfe im Fahr- und Arbeitsbetrieb (FKFS, GreenIng)

Auf Grundlage der in AP1.1 ermittelten Fahrzeugdaten werden die Energiebedarfe der Antriebe und die entstehenden Emissionen des Dieselmotors je nach Arbeitszyklus bzw. Einsatzbereich ermittelt. Dazu wird auch der zur Zertifizierung der Fahrzeuge herangezogene Zyklus betrachtet, um im AP 2 die Antriebskomponenten des Fahrzeugs zu definieren und die Grundlage für das AP3 zu schaffen.

AP1.3 Konzept einer funktionalen Fahrzeugarchitektur(FKFS, GreenIng, UniTek)

In diesem Arbeitspaket werden die Fahrzeugarchitektur und entsprechende Systemschaubilder erarbeitet. Dabei müssen zusätzlich zu den Antrieben die elektrischen Schnittstellenkomponenten wie DC/DC-Wandler und Power-Distribution-Units (PDU) mitberücksichtigt werden.

AP1.4 Management Energieaustausch zwischen den Spannungsebenen zur optimalen Nutzung der Energiespeicher(FKFS, GreenIng)

Das Ziel ist die Konzeption eines energieoptimierten Energiemanagements zwischen den unterschiedlichen Spanungsebenen (NV und HV). Dadurch wird es ermöglicht, Energieströme effizient zwischen den Teilsystemen, welche auf unterschiedlichen Spannungsebenen betrieben werden, zu verteilen.

AP1.5 Grobkonzept Thermomanagement (Antrieb, Speicher, Kabine)(GreenIng, Aebi Schmidt)

Um ein energieeffizientes Gesamtsystem abbilden zu können, ist es unverzichtbar alle Energieströme im Fahrzeug zu nutzen. Die Kühlung der elektrischen Komponenten bietet die Möglichkeit den Energiebedarf zur Konditionierung der Kabine unter Nutzung der Abwärme darzustellen. Um das Gesamtfahrzeugkonzept in AP 2.4 darstellen zu können, ist es wichtig die Komponenten des Thermomanagement mit zu berücksichtigen.

AP2.1 Erarbeitung des Anforderungskatalogs(GreenIng, FKFS, UniTek, Aebi Schmidt)

Grundlage für die Definition der Komponentenspezifikationen stellen die Ergebnisse aus AP1.1 – AP1.2 dar. Daraus werden die Anforderungen an E-Maschine, Leistungselektronik, Batterie, DC/DC-Wandler und PDU abgeleitet.

AP2.2 Auslegung des elektrischen Antriebs und Speicher(GreenIng, FKFS, UniTek, Aebi Schmidt

Anhand der Anforderungen aus AP2.1 können nun geeignete Komponenten für die, in der Fahrzeugarchitektur definierten, Spannungsebenen ausgelegt und innovative Komponentenkonzepte entwickelt werden.

AP2.3 Bauraumuntersuchung(GreenIng, Aebi Schmidt)

Die Untersuchung der im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Bauräume bildet die Voraussetzung für die geometrische Definition der Gesamtenergiesystemkomponenten. Dabei werden durch den Entfall des Dieselantriebs Bauräume im Bereich Verbrennungsmotor und Kraftstofftank frei.

AP2.4 Packagingkonzept(GreenIng, Aebi Schmidt)

Die Positionierung der Einzelkomponenten stellt eine Aufgabe des Packagekonzepts dar. Herausfordernd in diesem Zusammenhang ist das Routing der HV-Leitungen eines komplexen Gesamtenergiesystems. Dabei müssen schon von vorne herein die Biegeradien für die HV-Leitungen berücksichtigt werden.

AP3.1 Emissionen (NO_x, CO_2, Partikel)

Mittels Simulationsmodellen des in den vorangegangenen Arbeitsschritten ermittelten Antriebskonzepts wird der zu erwartende Primärenergiebedarf der einzelnen Antriebe für die in AP1 aufgenommenen Lastfälle ermittelt. Somit lässt sich ein Vorher/Nachher Vergleich für die betrachteten Emissionen anstellen.

AP3.2 TCO-Vergleich beider Antriebskonzepte

Mit Kenntnis der Energieverbräuche der Antriebssysteme und der ermittelten zugehörigen netzseitigen Energiebedarfs können die Energiekosten ermittelt werden. Die Veränderung bei den Wartungskosten und beim Verschleiß ergeben neue, noch zu bewertende Betriebskosten, die in diesem Arbeitspaket ermittelt werden sollen.

AP3.3 Batteriealterungsuntersuchung

Als kostenintensivster Bestandteil Batterieelektrischer Fahrzeuge stellt der betriebsbedingte Verschleiß der Hochvoltbatterie einen Haupteinflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit solcher Fahrzeuge dar. Daher soll die Alterung aus den ermittelten Lastfällen simulativ bestimmt werden.

1.3.2. Zeitplan und Meilensteine

Als die Hälfte der ursprünglichen Projektlaufzeit im Jahr 2019 vorbei war, stellte das Konsortium fest, dass eine kostenneutrale Projektverlängerung für die Erreichung aller anvisierten Ziele vonnöten sein würde. Gründe dafür waren die Verzögerungen zu Beginn des Projekts, die aus dem späten Eingang des Zuwendungsbescheides resultierte. Da die Partner das Projekt erst dann mit vollem Ressourceneinsatz starten können, wenn der jeweilige Bescheid vorliegt, verzögerten sich der Beginn der Arbeiten, da seitens des FKFS noch ein projektspezifischer Sachbearbeiter eingestellt werden musste. Weiterhin war seitens des FKFS geplant, dass das Projekt InnoEKom teilweise von zwei Mitarbeitern gleichzeitig bearbeitet werden soll. So sind im ursprünglichen Zeitplan, laut Projektantrag, die Arbeitspakete 1, 2 und 3 parallel angeordnet. Aufgrund begrenzter Ressourcen war dies jedoch nicht möglich, wodurch die Bearbeitung des Arbeitspakets 3 erst im Anschluss zu den Arbeitspaketen 1 und 2 erfolgen konnte. Dadurch kam es zu einem weiteren Verzug bei der Bearbeitung des Projektes.

Dementsprechend reichten die Partner im Herbst 2019 den Antrag zur Verlängerung des Projekts um 6 Monate ein. Nach Genehmigung der Verlängerung war der Endzeitpunkt des Projekts nunmehr der 30.06.2020 (vormals 31.12.2019). Der aktualisierte Zeitplan des Projektes ist in Abbildung 2 aufgeführt.

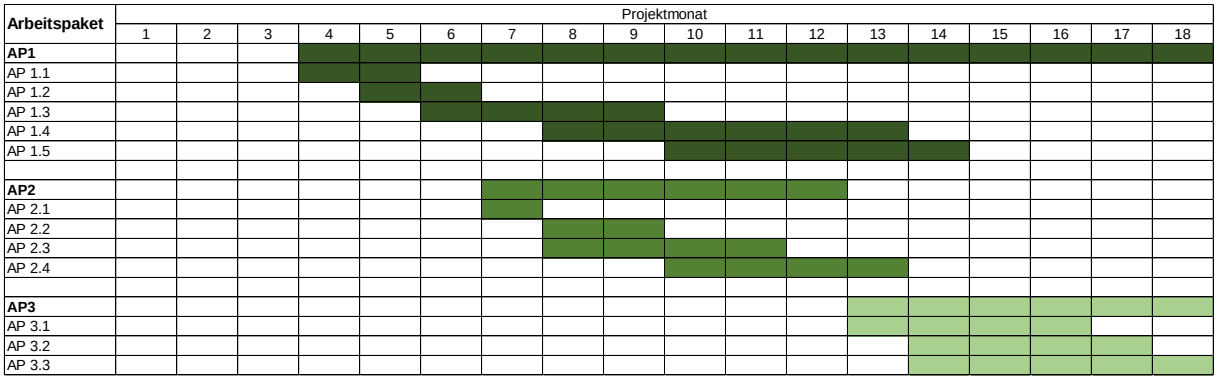

Abbildung 2: Zeitplan InnoEKom von 01.01.2019-30.06.2020

Durch die kostenneutrale Verängerung konnte das Projekt bis ins zweite Quartal 2020 fortgeführt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Verzögerungen zu Beginn des Projekts durch die Verlängerung aufgefangen werden konnte und so keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

1.4. Projektpartner und Themenschwerpunkte

Das Projektkonsortium setzt sich aus einem Forschungsinstitut (FKFS), welches auch die Konsortialführung übernimmt, und drei Industrieunternehmen zusammen. Die Firma Aebi Schmidt begleitet das Projekt, ohne Anspruch auf Förderung, mit Eigenleistungen in Form von Personalkosten und einem Entwicklungsauftrag an die Fa. GreenIng.

GreenIng ist einer der zwei am Projekt beteiligten KMUs und ist aufgrund der vorangegangenen Aktivitäten im Spitzencluster Elektromobilität nicht förderfähig. GreenIng bringt einen Eigenanteil ein und arbeitet zudem im Unterauftrag des FKFS. Ziel ist die Einbringung der Erfahrung aus vorangegangen Projekten zur Elektrifizierung von Off-Highway Fahrzeugen.

UniTek arbeitet als weiterer KMU auf dem Gebiet der Halbleiterelektronik und Energieübertragung und stellt damit als Komponentenhersteller das Bindeglied zwischen Fahrzeughersteller und Entwicklung- und Forschungspartner dar.

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Exzellentes Know-how, 85 Jahre Erfahrung und ein einzigartiges Spektrum an hoch spezialisierten Prüfständen sowie selbst entwickelte Mess-, Prüf- und Simulationsverfahren machen das unabhängige Forschungsinstitut FKFS zu einem gesuchten Entwicklungspartner der internationalen Automobilindustrie. Über 150 Mitarbeitern führen Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Auftrag der Industrie und im Rahmen öffentlich finanzierter Vorhaben durch. Das FKFS kooperiert eng mit der Universität Stuttgart.

Aebi Schmidt Deutschland GmbH

Die Aebi Schmidt Gruppe ist weltweit führender Anbieter von intelligenten Produktsystemen und Dienstleistungen zur Reinigung und Räumung von Verkehrsflächen sowie zur Pflege von Grünflächen in anspruchsvollem Gelände. Das Angebot umfasst Fahrzeuge, An- und Aufbaugeräte und die dazugehörigen Dienstleistungen. Im Projekt InnoEKom stellt die Fa. Aebi Schmidt eine Kompaktkehrmaschine als Entwicklungsgrundlage bereit.

GreenIng

Die GreenIng GmbH & Co. KG ist langjähriger Entwicklungspartner für Fahrzeugtechnik. Unter der Gesamtüberschrift der Effizienztechnologien vereint GreenIng die Themenfelder Alternative Antriebe, Leichtbau und Autonomes Fahren. Das Leistungsspektrum umfasst die Konzeption / Konstruktion, den Prototypen- / Fahrzeugbau und das Testing der Systeme. GreenIng verfügt über ein umfangreiches Netzwerk zu Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten. Durch die Zusammenarbeit mit For-

schungs- bzw. Hochschulinstituten wird zudem eine einzigartige Synergie aus Grundlagenentwicklung und praxisnaher Serienentwicklung erzeugt.

UniTek

UniTek Industrie Elektronik GmbH entwickelt und produziert Leistungselektronik für elektromotorische Antriebe in unterschiedlichen Techniken von 200W bis 800kW. Mehr als 300 Geräte pro Monat werden nach hausinternen Richtlinien der Qualitätssicherung hergestellt. Ihre Entwicklung arbeitet eng zusammen mit LABOD electronic CNC Steuerungen. Optimale Maschinen- und Fahrzeugantriebe mit durchgängiger Software sind Ergebnisse dieser Kooperation.

Eingehende Darstellung

2. AP1 – Bedarfsgerechtes Energiesystem

2.1. AP 1.1: Analyse Arbeitszyklus und Ausarbeitung der relevanten Lastpunkte

2.1.1. Ziel des Arbeitspakets

Im Rahmen des AP1.1 wird die Nutzung bestehender dieselmotorischer Kompaktkehrmaschinen untersucht. Das Ziel bei der Elektrifizierung der Kompaktkehrmaschine ist es, den größtmöglichen Anwendungsbereich der bestehenden dieselmotorischen Maschinen abdecken zu können.

2.1.2. Verlauf und Umsetzung

Im ersten Schritt wurde die Nutzung einer Kompaktkehrmaschine in drei Szenarien unterteilt. Diese sind das Fahren, Kehren und Stehen. Das Fahren beinhaltet dabei die Fahrt vom Betriebshof zum Ort, an dem die Kehraufgabe zu erledigen ist. Dabei werden Geschwindigkeiten von bis zu 60km/h erreicht. Im Szenario Kehren werden dagegen nur Geschwindigkeiten von maximal 12 km/h erreicht. In diesem Szenario ist zusätzlich die Arbeitshydraulik aktiviert, die die Kehrbesen antreibt, sowie das Gebläse zum Aufsaugen des Schmutzes. Das dritte Szenario Stehen beschreibt den Leerlauf der Kompaktkehrmaschine, in dem hauptsächlich die Nebenaggregate und die Klimatisierung die relevanten Lasten sind.

Zur Analyse der Szenarien wurden die realen Lastkollektive von dieselmotorischen Kehrmaschinen der Fa. Aebi Schmidt für die drei europäischen Städte Rotterdam, Köln und Offenbach untersucht. In Tabelle 2 ist ein beispielhaftes Lastkollektiv aufgeführt. Erkennbar sind die mit rot hervorgehobenen zwei Lastpunkte, die zusammen 50% der Nutzung ausmachen. Solche Hauptlastpunkte sind für alle drei Städte erkennbar, unterscheiden sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Nutzung.

Tabelle 2: beispielhaftes Lastkollektiv der dieselmotorischen Kompaktkehrmaschine

Drehzahl	Motorlast			
	0-25 %	25-50%	50-75%	75-100%
0-15 %	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
15-30 %	0,20%	25,42%	0,44%	0,00%
30-45 %	1,04%	3,13%	7,55%	4,91%
45-60 %	1,77%	4,38%	25,86%	14,91%
60-75 %	0,19%	0,63%	7,56%	1,99%
75-90 %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
90-100 %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Aus diesen Hauptlastpunkten der drei Lastkollektive konnte die Aufteilung der Nutzung auf die drei untersuchten Szenarien ermittelt werden. Das Ergebnis ist, dass das Fahren einen repräsentativen

Anteil von 15% an der Gesamtnutzung hat, das Kehren einen repräsentativen Anteil von 65% und das Stehen einen repräsentativen Anteil von 20%.

Im zweiten Schritt wurden die drei Szenarien Fahren, Kehren und Stehen genauer spezifiziert. Das Fahren teilt sich in die Anteile Stadt- und Überlandfahrt auf. Aus Messdaten von Versuchsträgern der Fa. Aebi Schmidt wurden für die beiden Anteile repräsentative Geschwindigkeits-Zeit-Profile extrahiert. Das Szenario Kehren untergliedert sich aufgrund der verschiedenen Anforderungen an die Kehrbesen. Je nach Untergrund (Asphalt, Pflaster, Bordsteinkanten, …) und Verschmutzungsgrad der Straße variierte die notwendige Leistung der Kehrbesen. Für das Projekt wurden hierbei die drei Unterscheidungen Kehren normal, Kehren mit Randstein, und Kehren mit Randstein und hoher Last definiert. Diese Auswahl basiert auf den Auslegekriterien der Fa. Aebi Schmidt, die ebenfalls für die dieselmotorischen Kehrmaschinen Geltung haben.

Zusätzlich zur bedarfsgerechten Auslegung der elektrifizierten Kompaktkehrmaschine auf Grundlage von aus Kundendaten abgeleiteten repräsentativen Lastpunkten existiert die DIN EN 15429-2. Diese beschreibt die Anforderungen an Leistung und Prüfverfahren für Maschinen zur Oberflächenreinigung für den Einsatz im Außenbereich. Innerhalb der Norm wird der in Abbildung 3 dargestellte Prüfzyklus definiert, der ebenfalls berücksichtig wird.

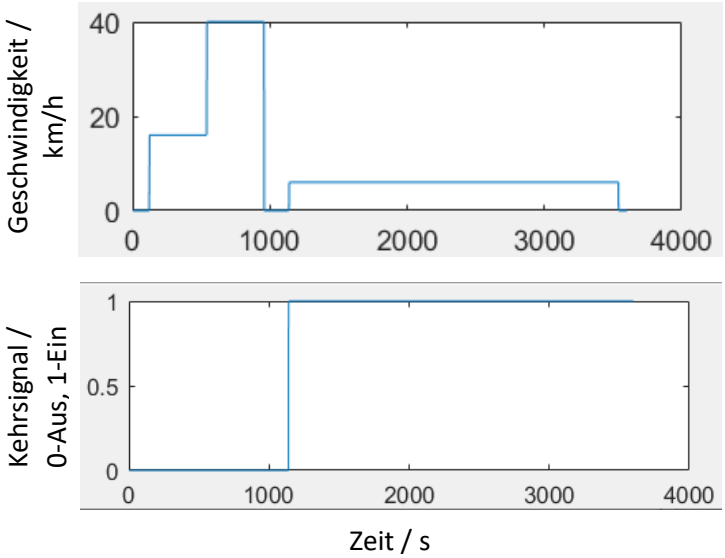

Abbildung 3: DIN EN 15429-2 Zyklus

Für die weitere Nutzung der erarbeitenden Arbeitszyklen wurde ein Programm entwickelt, mit dem der gewünschte Zyklus für die Auslegung der Kehrmaschine generiert werden kann. In Abbildung 4 ist die Eingabemaske mit den frei einstellbaren Parametern dargestellt. Zur Auswahl stehen vier verschiedene Lastzyklen, beginnend mit dem Fahrzyklus nach der Din EN 15429-2. Die zweite Möglichkeit ist es, einen selbstdefinierten Fahrzyklus auf Grundlage der erarbeiteten Szenarien zu erstellen. Dabei können als Zyklusparameter die gewünschten Szenarien ausgewählt werden (bspw. Überlandfahrt / Stadtfahrt) und die Zeitanteile für die Szenarien vorgegeben werden. Weiterhin ist es möglich die gewünschte Geschwindigkeit für die Szenarien zu definieren. Die dritte Möglichkeit des Lastzyklus ist der Bergsteigversuch, mittels dem die Steigfähigkeit der Kehrmaschine für frei wählbare Steigungen untersucht werden kann. Hierbei sind die Anfahrfähigkeit und die maximal erreichbare Ge-

schwindigkeit für die zu untersuchende Steigung von Interesse. Als letzte Möglichkeit kann ein Zeitschrieb einer aufgenommenen Messung als Fahr- und Arbeitszyklus gewählt werden.

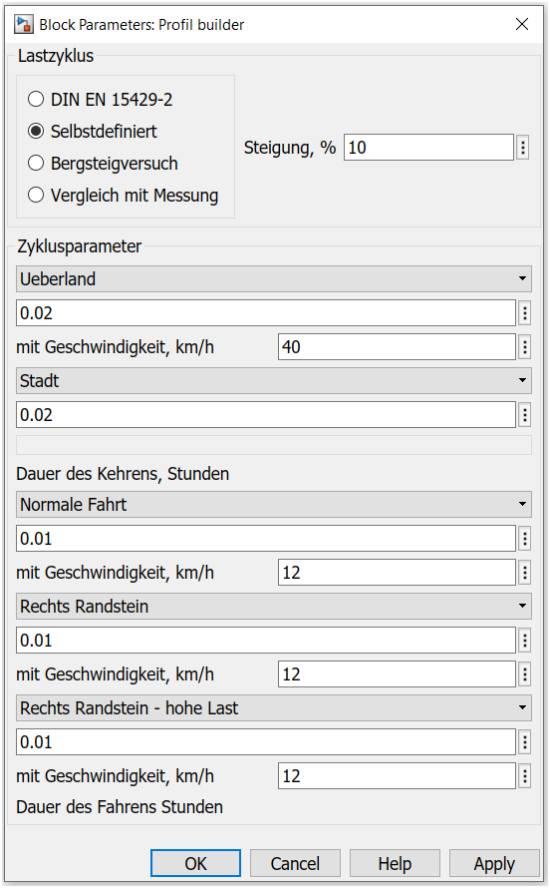

Abbildung 4: Eingabefenster zur Definition vom Fahr- und Arbeitszyklus

2.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Innerhalb des Arbeitspaketes wurden die relevanten Lastpunkte für die Auslegung der elektrifizierten Kompaktkehrmaschine ermittelt. Diese basieren auf den Kundendaten dieselmotorischer Kehrmaschinen und bilden somit die repräsentative Nutzung ab. Die abgeleiteten, relevanten Szenarien wurden anschließend in ein Programm zur Fahr- und Arbeitszyklusgenerierung überführt. Somit stehen diese für die nachfolgenden Arbeitspakete als Auslegungsgrundlage zur Verfügung.

2.2. AP 1.2: Ermittlung Energiebedarfe im Fahr- und Arbeitsbetrieb

2.2.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel des Arbeitspakets war es, für die in AP 1.1 ermittelten Lastpunkte im Fahr- und Arbeitsbetrieb die Energiebedarfe für den Fahr-, Hydraulik- und Sauggebläseantrieb zu ermitteln.

2.2.2. Verlauf und Umsetzungen

Im Rahmen des Projektes InnoEKom wurden Simulationsmodelle für zwei verschiedene Kompaktkehrmaschinen aufgebaut. Im ersten Schritt wurde das Simulationsmodell für die kleine elektrifizierte Kehrmaschine eSwingo entwickelt, die schon als reales Fahrzeug zur Verfügung stand. Somit war es möglich das Simulationsmodell auf der Grundlage von Messdaten der Kehrmaschine zu validieren. Im zweiten Schritt wurde die Simulation auf die Parameter der Kompaktkehrmaschine angepasst, um die notwendigen Leistungs- und Energiebedarfe zu ermitteln.

2.2.3. Aufbau der Simulationsumgebung

In Abbildung 5 ist das Grundprinzip des Simulationsmodells gezeigt. Es handelt sich dabei um eine Vorwärtssimulation, bei dem nur die Längsdynamik der Kehrmaschine betrachtet wird. Das Modell ist als Regelkreis aufgebaut, bei dem ein Geschwindigkeits-Zeit-Profil die Vorgabe ist. Ein Fahrerregler versucht das Geschwindigkeits-Zeit-Profil abzufahren, indem Soll- und Ist-Geschwindigkeit abgeglichen werden und auf Grundlage der Differenz eine Fahr-, oder Bremspedalstellung ausgegeben werden. Die Steuergeräte-Ebene enthält die Logik zur Ansteuerung der Triebstrangkomponenten. Aus der eingehenden Fahr- und Bremspedalstellung wird eine Momentenanforderung berechnet. Der Triebstrang enthält den Fahrantrieb und berücksichtigt dortige Leistungsflüsse zwischen den Komponenten Batterie, Leistungselektronik, E-Maschine und Getriebe. Aus der Momentenanforderung wird unter Berücksichtigung der Systemgrenzen das realisierbare Moment berechnet. Im Modul Fahrwerk sind Modelle der mechanischen Bremsen und Reifen enthalten. Das realisierbare Moment des Triebstrangs wird im Reifenmodell in eine Zugkraft umgerechnet. Abschließend wird im Modul Fahrzeug die Zugkraft mit den Fahrwiderstandskräften bilanziert und eine resultierende Beschleunigungskraft berechnet. Aus der Beschleunigungskraft werden die Beschleunigung und durch Integration der Beschleunigung die aktuelle Geschwindigkeit berechnet. Diese wird zurück an den Fahrerregler geleitet, der den Abgleich zwischen Ist- und Sollgeschwindigkeit durchführt.

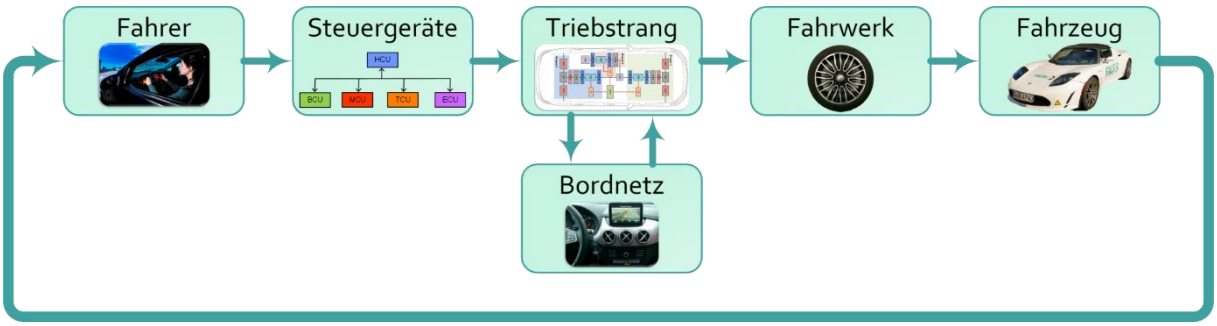

Abbildung 5: Grundprinzip des Simulationsmodells

Eine Besonderheit der Kehrmaschine im Vergleich zum PKW sind die hydraulischen Komponenten, die für die Kehraufgabe notwendig sind. Dies sind die Hydraulikpumpe, Kehrbesen, sowie die Wasserpumpen. Diese wurden in der Simulation ebenfalls berücksichtigt und als Hydrauliksimulation in das Modul Bordnetz integriert. Die Hydrauliksimulation ist als eigener Regelkreis aufgebaut, dies ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Die Vorgaben sind die Last am Kehrbesen und die Soll-Drehzahl der Kehrbesen. Ein PID-Regler gibt auf Grundlage des Vergleichs der Soll- und Ist-Drehzahl des Hydraulikmotors eine Last vor, die von der Hydraulikpumpe als Hydraulikdruck gestellt wird. Für die Komponenten Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor wurden im Rahmen des Projektes detaillierte physikalische Modelle erstellt.

Die Kopplung der Hydrauliksimulation an die Fahrzeugsimulation wurde über den Leistungsfluss zwischen der Batterie im Triebstrang und dem Hydraulikmotor umgesetzt.

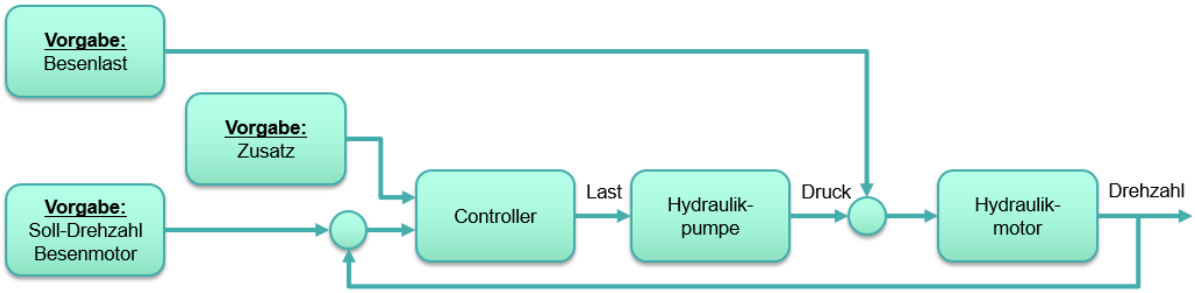

Abbildung 6: Grundprinzip der Simulation der hydraulischen Komponenten

In Abbildung 7 ist der Aufbau der Simulationsumgebung dargestellt. Das Gesamtmodell besteht aus den Submodellen Modell, Pre-Processing, Post-Processing und dem Armaturenbrett. Das Modell enthält den oben vorgestellten Aufbau der Kompaktkehrmaschine. Es ist modular aufgebaut und kann abhängig von der gewünschten Präzision der Simulation angepasst werden. Dafür stehen für die verschiedenen Komponenten Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Verfügung.

Das Submodell Pre-Processing enthält das in Kapitel 2.1 vorgestellte Eingabefenster zur Definition der zu simulierenden Lastzyklen. Mittels dem Post-Processing können die simulierten Ergebnisse betrachtet und ausgewertet werden. Dazu werden Graphen der ausgewählten Signale der Fahrdynamik und Leistungen im Triebstrang erzeugt und dargestellt. Um zur Laufzeit der Simulation den aktuellen Betriebszustand, sowie die relevanten Signale der Komponenten Fahrantrieb, Hydraulikantrieb und Sauggebläseantrieb nachverfolgen zu können, wurde das Armaturenbrett designt.

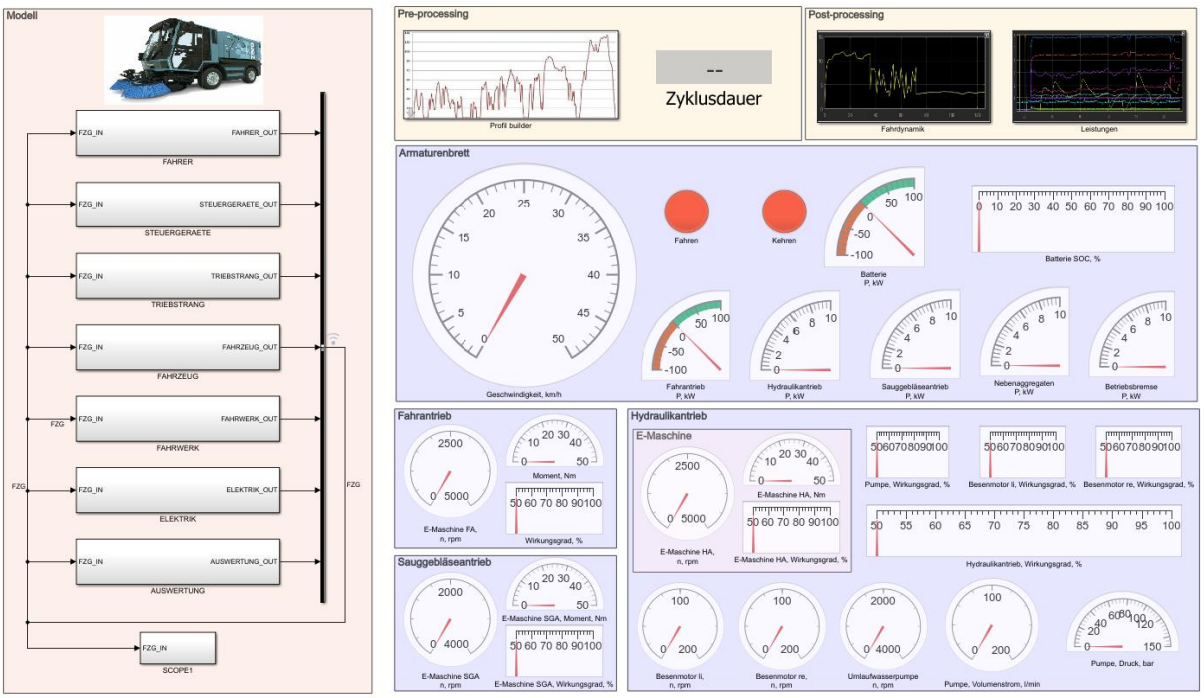

Abbildung 7: Aufbau der Simulationsumgebung

2.2.4. Validierung der Simulationsumgebung

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden von der Fa. Aebi Schmidt Messungen an der Kehrmaschine eSwingo durchgeführt und dem FKFS zur Verfügung gestellt. Dabei wurden die Daten der folgenden Signale aufgenommen: Fahrzeuggeschwindigkeit, Drehmomente und Drehzahlen der E-Maschinen des Fahr-, Hydraulik- und Sauggebläseantriebs, Spannung, Strom, und Ladezustand (SOC) der Batterie. Aus den Messdaten wurde das Fahrprofil extrahiert und über das Submodell Pre-Processing in die Simulation geladen.

Das Ergebnis vom Vergleich der Simulation mit den Messdaten ist für den Fahrantrieb in der Abbildung 8 und für den Hydraulik- und Sauggebläseantrieb in Abbildung 9 dargestellt. Die Ergebnisse beim Fahr- und Sauggebläseantrieb zeigen dabei gute Übereinstimmungen. Beim Vergleich des Signals Drehmoment vom Hydraulikantrieb sind dagegen deutlich Unterschiede zwischen dem Mess- und dem Simulationssignal erkennbar. Das Messsignal zeigt eine deutliche größere Dynamik als das Simulationssignal. Dies liegt an der Modellierungstiefe des Simulationsmodells. Es wurden hierbei nur die für den Energiebedarf relevanten Verbraucher, wie Kehrbesen und Umlaufwasserpumpe berücksichtigt und nicht die kleinen Verbraucher, wie Ventile. Für die Betrachtung der Energiebedarfe ist dies jedoch ausreichend.

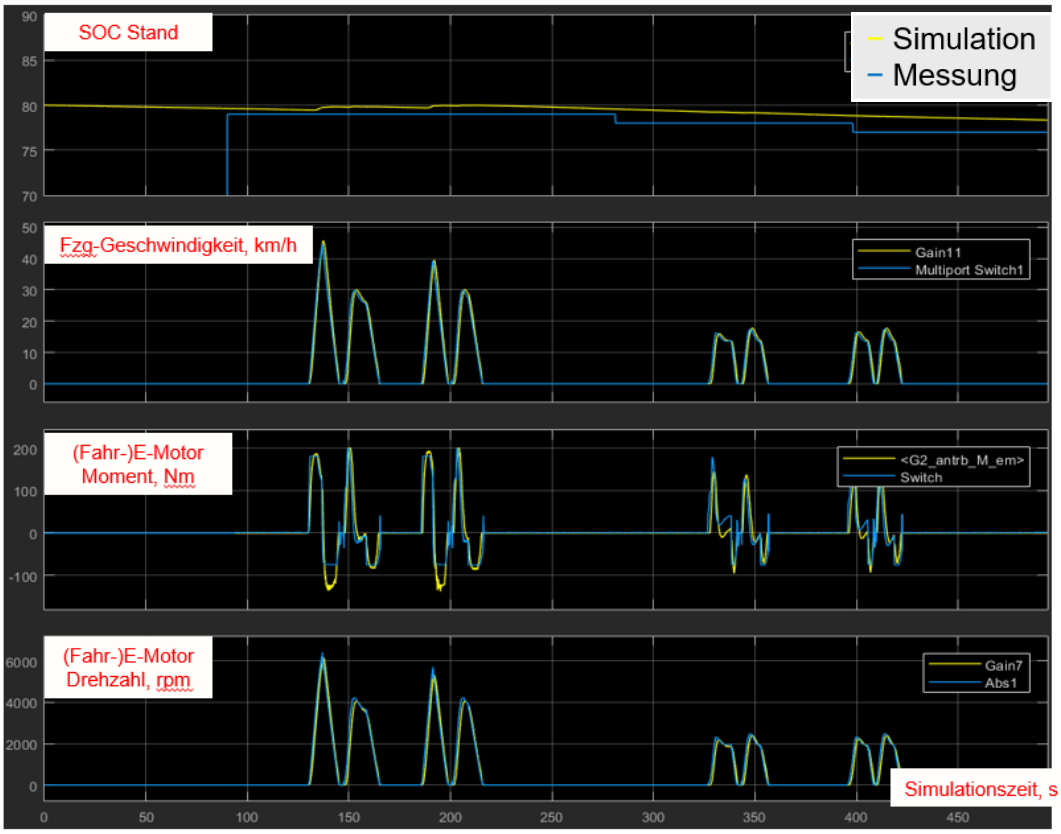

Abbildung 8: Validierung des Fahrantriebs durch Abgleich von Simulation und Messung

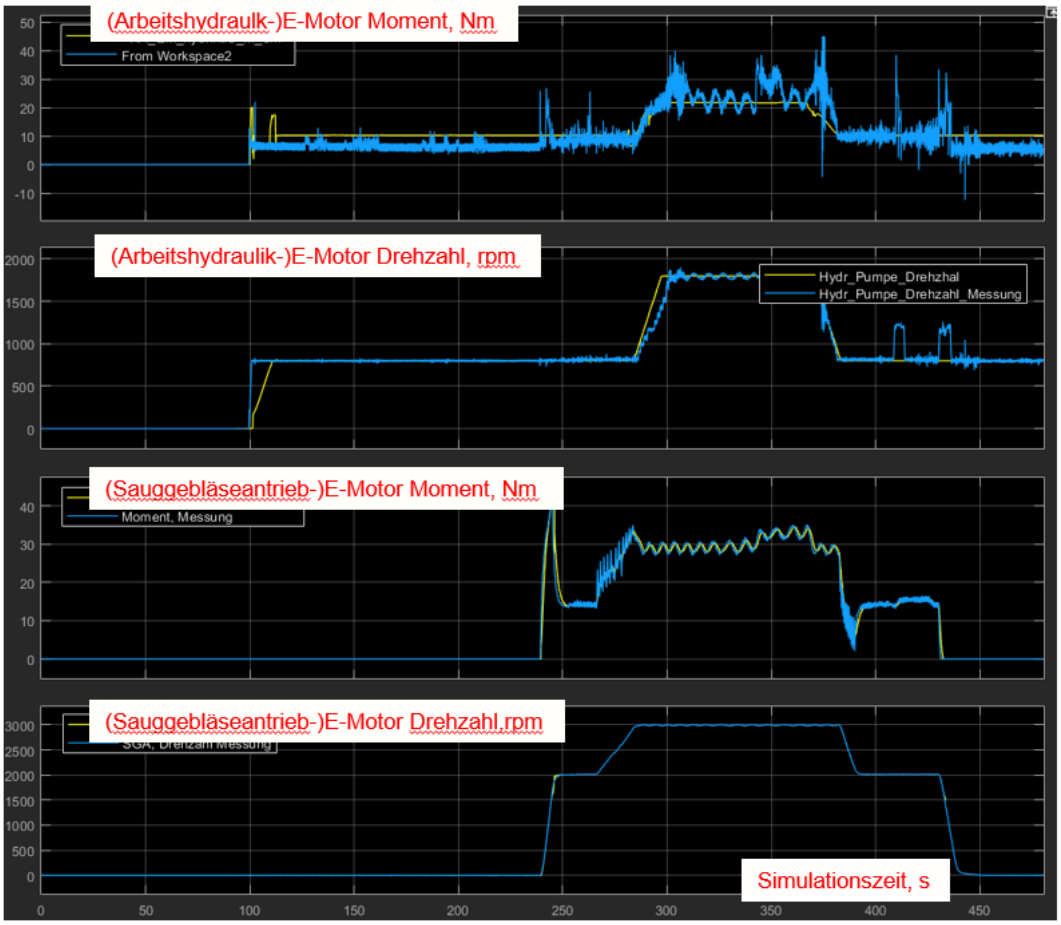

Abbildung 9: Validierung der Arbeitshydraulik durch Abgleich von Simulation und Messung

2.2.5. Ableitung der Energiebedarfe der Kompaktkehrmaschine

Nach der erfolgreichen Verifizierung des Simulationsmodells der eSwingo wurde dieses für die Kompaktkehrmaschine erweitert. Dazu wurden die Parameter des Simulationsmodells angepasst, dies sind zum Beispiel die Fahrzeugmasse, Stirnfläche und weitere Konstruktionsparameter, sowie die notwendigen Leistungsdaten vom Fahr-, Hydraulik- und Sauggebläseantrieb.

Zur Ermittlung der Energiebedarfe der Kompaktkehrmaschine wurde ein realitätsnaher Zyklus auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 2.1 aufgebaut, der die folgenden Abschnitte beinhaltet:

- Überlandfahrt (Betriebshof – Einsatzort) mit einer Geschwindigkeit von ca. 40 km/h
- Stadtfahrt mit einer Geschwindigkeiten von 0 bis ca. 30 km/h
- Kehren am Einsatzort im normalen Betrieb
- Kehren am Einsatzort mit Randstein
- Kehren am Einsatzort mit Randstein und hoher Last auf den Kehrbesen

Der Gesamtdauer der Simulation ist auf 1 Stunde begrenzt, kann aber auf beliebig lange Einsatzdauern des Fahrzeuges skaliert werden. In Abbildung 10 ist das repräsentative Geschwindigkeits-Zeit-Profil dargestellt. Die einzelnen Fahrszenarien Überlandfahrt, Stadtfahrt und Kehrbetrieb wurden hierbei hervorgehoben.

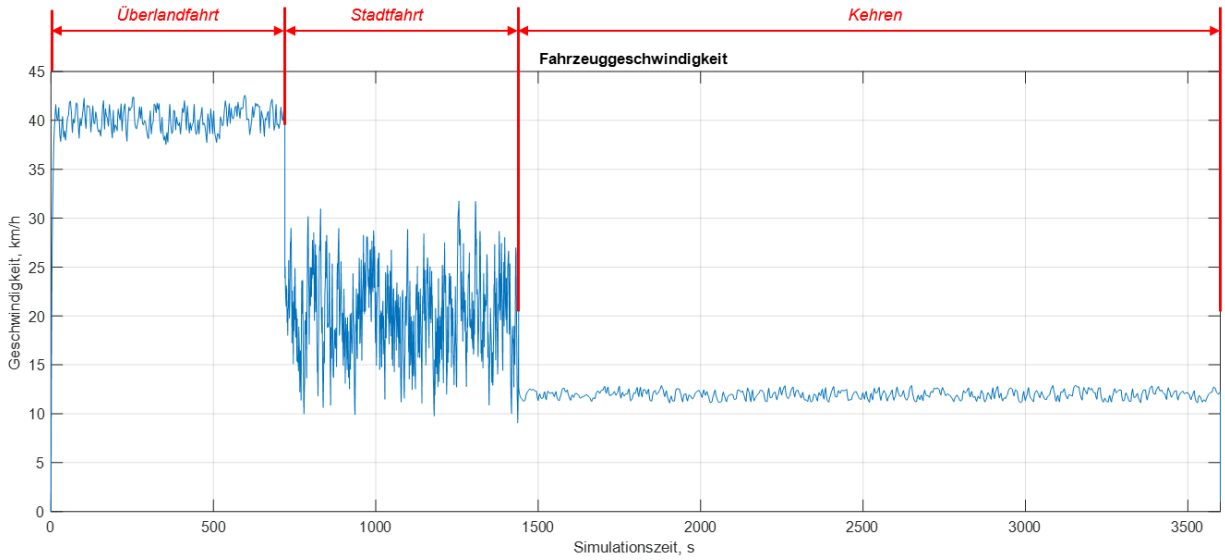

Abbildung 10: Geschwindigkeits-Zeit-Profil des repräsentativen Fahrzyklus

In Abbildung 11 ist das Ergebnis der Simulation für die notwendige Leistung des Fahrantriebs dargestellt. Dabei sind die unterschiedlichen Leistungsanforderungen der Fahrszenarien erkennbar. Während in den Fahrszenarien Überlandfahrt und Stadtfahrt sehr dynamische Leistungsanforderungen mit Spitzenleistungen von über 100kW für die Beschleunigungsvorgänge notwendig sind, wird im Kehrbetrieb eine kontinuierliche Leistung von ca. 8kW benötigt.

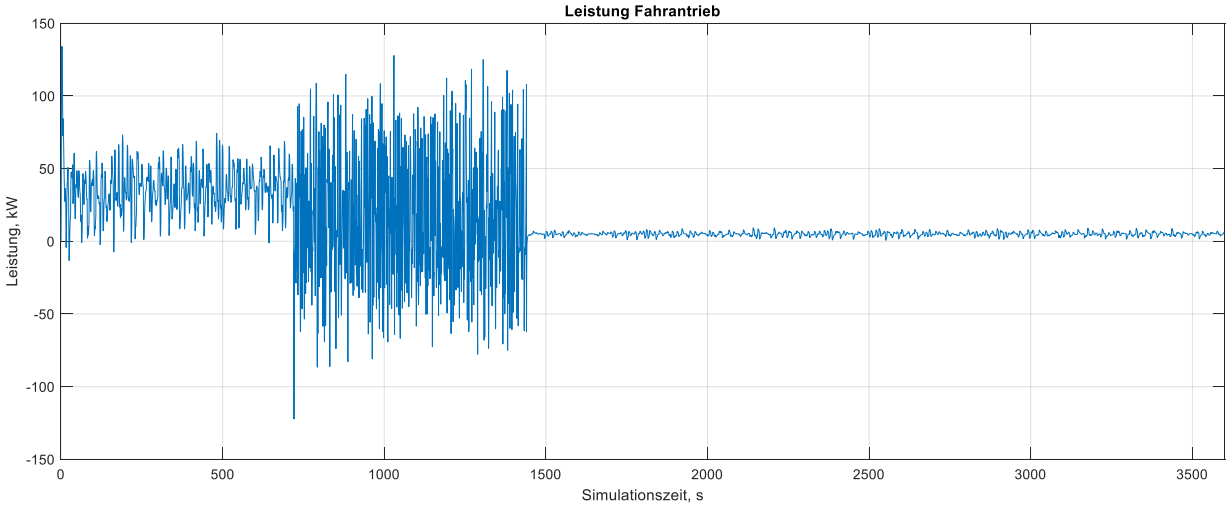

Abbildung 11: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Fahrantriebs

Die benötigte Leistung für den Hydraulikantrieb ist in Abbildung 12 dargestellt. Die einzelnen Fahrszenarien, sowie die Aufteilung des Kehrbetriebs in die einzelnen Lastszenarien wurden hierbei hervorgehoben. Während der Fahrszenarien Überland- und Stadtfahrt wird eine geringe Leistung vom Hydraulikantrieb benötigt. Die Ursache ist, dass die Bremsen und Lenkung hydraulisch angetrieben werden und dadurch der Hydraulikdruck permanent aufrechterhalten werden muss. Im Szenario Kehren steigt durch den Betrieb der Kehrbesen die notwendige Leistung des Hydraulikantriebs deutlich an. Ein zusätzlich erhöhter Leistungsbedarf tritt durch die Berücksichtigung eines Randsteins, sowie einer erhöhter Last aufgrund eines stärkeren Verschmutzungsgrades auf.

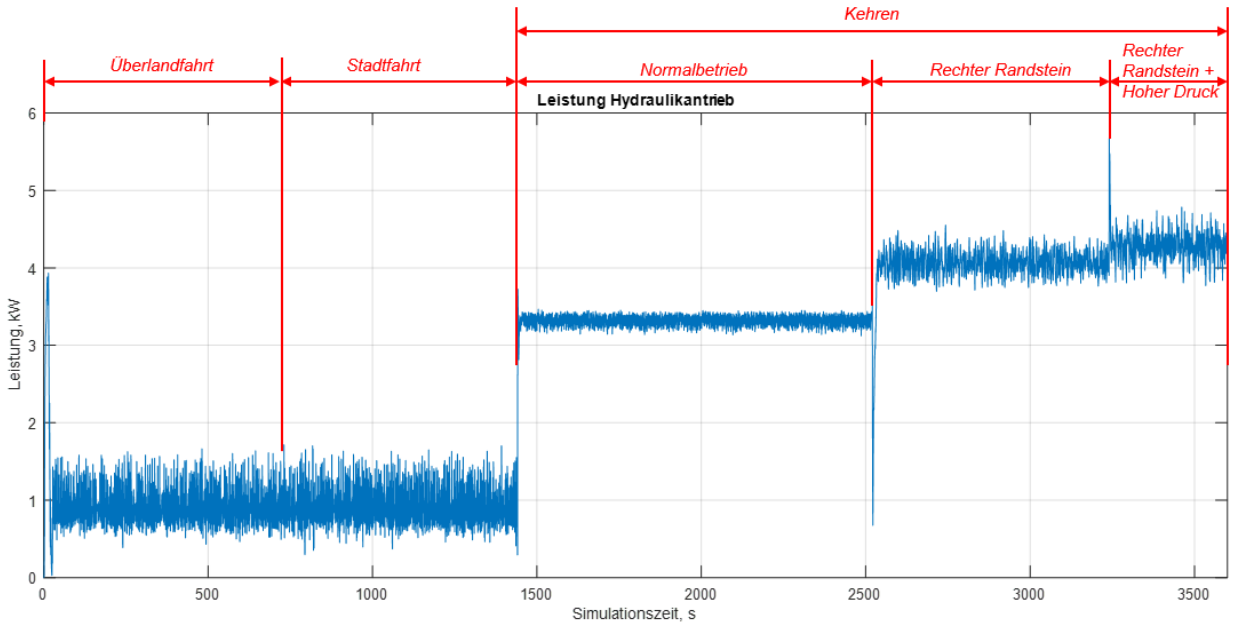

Abbildung 12: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Hydraulikantriebs

Die Leistung des Sauggebläses kann vom Fahrer der Kompaktkehrmaschine mittels eines Bedienelements in mehreren Stufen variiert werden. Im Rahmen des Projektes gab es jedoch kein Nutzungsprofil dafür. Diesbezüglich wurde das Worst Case Szenario gewählt und das Sauggebläse in der Stufe der maximalen Leistung betrieben, dargestellt in Abbildung 13.

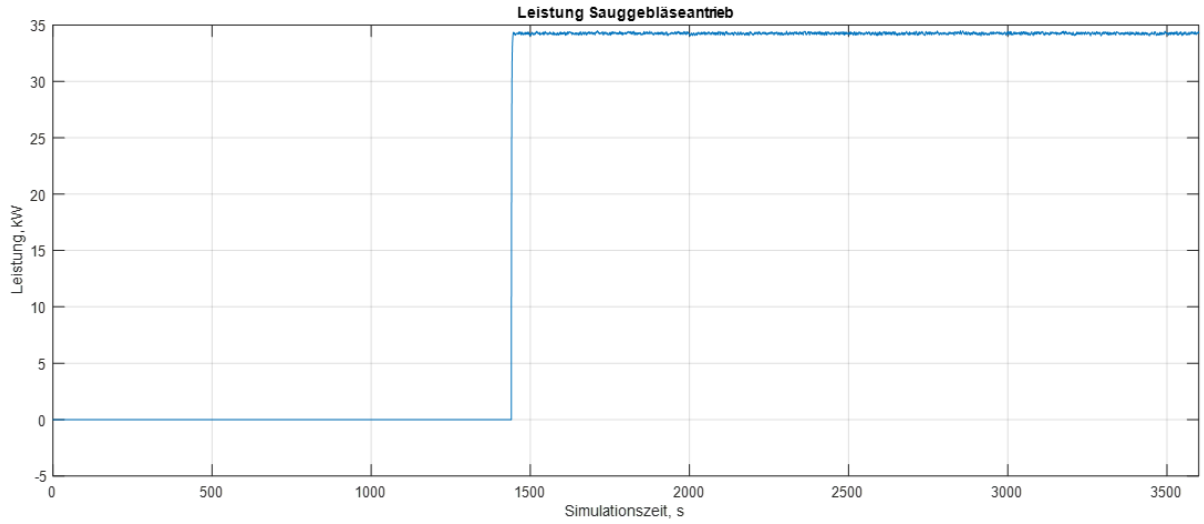

Abbildung 13: Simulationsergebnisse der notwendigen Leistung des Sauggebläseantriebs

Die in Abbildung 14 dargestellte Leistung der Batterie entspricht der Summe der Einzelleistungen der Komponenten Fahr-, Hydraulik- und Sauggebläseantrieb, sowie zusätzlich der Nebenverbraucher und Klimatisierung. Die durchschnittliche Leistung ist für die beiden Szenarien Fahren und Kehren annähernd gleich. Dies ist auf die hohe Leistungsanforderung des Sauggebläses im Kehrbetrieb zurück zu führen.

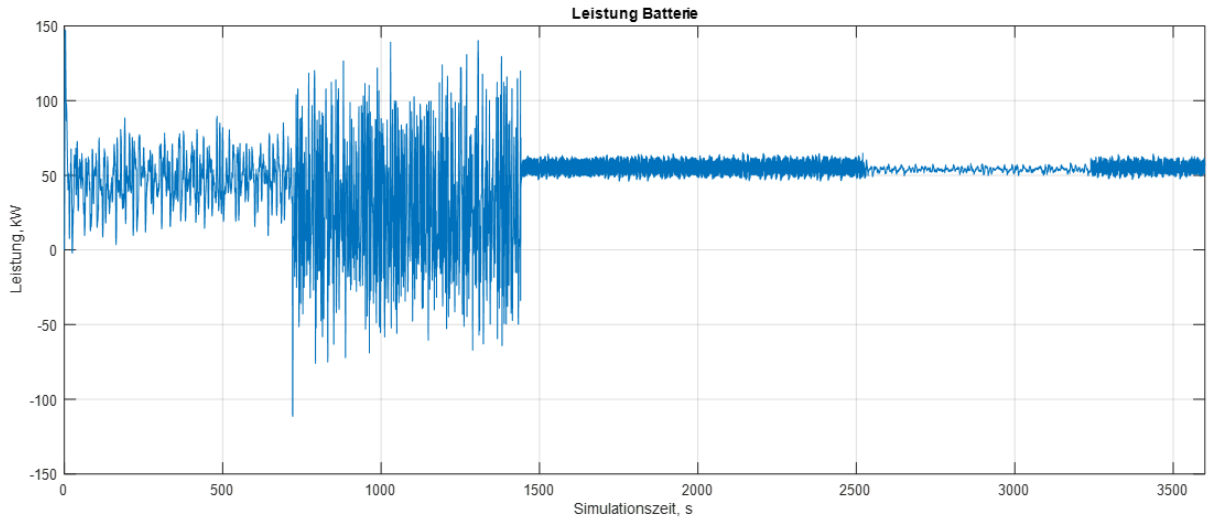

Abbildung 14: Simulationsergebnisse der Leistung an der Batterie

Zusätzlich zu dem vorgestellten Kundennahen Betriebszyklus wurde eine Best und Worst Case Analyse durchgeführt. Dabei wurden für den Worst Case für die Antriebe die maximal auftretenden Lasten angenommen, aus denen die maximal benötigten Leistungen resultieren. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der Tabelle 3 aufgeführt. Als Durchschnittsbedarf über die drei Szenarien Fahren, Kehren und Stehen wird somit eine Leistung von 21kW für die Kompaktkehrmaschine benötigt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Best und Worst Case Simulation

	Fahren		Kehren		Stehen
	15%		65%		20%
	best	worst	best	worst	
	80%	20%	70%	30%	
Fahrantrieb	27	86	3	14	0
Hydraulik	2	4	5	8	2
Sauggebläse	0	0	5	15	0
Kabinenkonditionierung	0	4	0	4	0
Nebenverbraucher	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4
Summe	29,4	94,8	13,4	41,8	2,4
Einzeldurchschnitte	23,52	18,96	9,38	12,54	0,48
Gesamtdurchschnitte		6,372		14,248	0,48
Summe					21,1

2.2.6. Zusammenfassung und Ergebnis

Für die in AP1.1 ermittelten Lastpunkte wurde im Rahmen von AP1.2 eine Best und Worst Case Analyse durchgeführt. Dabei wurden die notwendigen Leistungen für den Fahr-, Hydraulik und Sauggebläseantrieb betrachtet. Aus den so ermittelten Leistungen wurde anschließend der Durchschnittsbedarf der Gesamtleistung für den kundennahen Betrieb ermittelt. Der Durchschnittsbedarf und die tägliche Arbeitszeit ergeben schließlich die benötigte Energie, die für einen Arbeitstag zur Verfügung stehen muss. Bei einer täglichen Nutzungszeit von 6h werden somit 126kWh und bei einer täglichen Nutzungszeit von 8h werden 168kWh an Energie benötigt.

2.3. AP 1.3: Konzept einer funktionalen Fahrzeugarchitektur

2.3.1. Ziel des Arbeitspaketes

In diesem Arbeitspaket werden die Fahrzeugarchitektur und entsprechende Systemschaubilder erarbeitet. Dabei müssen zusätzlich zu den Antrieben die elektrischen Schnittstellenkomponenten wie DC/DC-Wandler und Power-Distribution-Units (PDU) mitberücksichtigt werden.

2.3.2. Verlauf und Umsetzung

In Abbildung 15 ist das erarbeitete Schaubild der elektrischen Systemarchitektur dargestellt. Direkt an die Batterie ist die PDU (Power-Distribution-Unit) angeschlossen, die die maximal von der Batterie zur Verfügung stehende Leistung auf die Subkomponenten verteilt. Zur Versorgung des 12V-Bordnetzes wird ein DC/DC-Wandler eingesetzt. Für die Klimatisierung der Kompaktkehrmaschine

soll eine energieeffiziente Wärmepumpe eingesetzt werden. Weiterhin werden drei E-Maschinen an die PDU angeschlossen. Der Fahrmotor dient dabei dem alleinigen Antrieb. Die anderen beiden E-Maschinen sind für die Versorgung der Nebenverbraucher vorgesehen. Der Sauggebläsemotor treibt direkt das Sauggebläse an und ersetzt den bisherigen Hydraulikmotor. Jedoch ist es aktuell noch nicht möglich alle Hydraulikantriebe durch E-Maschinen zu ersetzen, da teilweise recht hohe Anforderungen an die Umgebungsbedingungen der Maschinen gestellt werden und der Markt dafür keine passenden E-Maschinen zu Verfügung stellt, oder die Bauraumanforderungen eine technisch notwendige E-Maschinen-Getriebe Konfiguration nicht zulassen. Diesbezüglich treibt die dritte E-Maschine eine Hydraulikpumpe an, die den notwendigen Hydraulikdruck erzeugt, um diese spezifischen Nebenverbraucher durch Hydraulikmotoren anzusteuern.

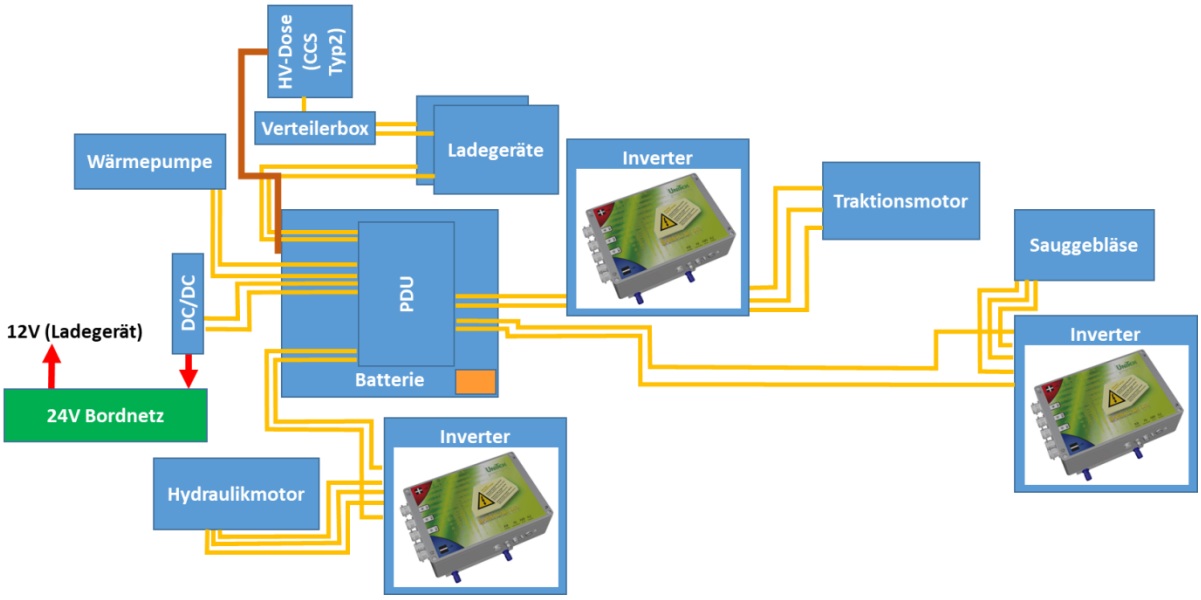

Abbildung 15: Schaubild der elektrischen Fahrzeugarchitektur

2.4. AP 1.4: Management Energieaustausch zwischen den Spannungsebenen zur optimalen Nutzung der Energiespeicher

2.4.1. Ziel des Arbeitspaketes

Das Ziel des Arbeitspaketes ist die Konzeption eines energieoptimierten Energiemanagements zwischen den unterschiedlichen Spanungsebenen (NV und HV). Dadurch wird es ermöglicht, Energieströme effizient zwischen den Teilsystemen, welche auf unterschiedlichen Spannungsebenen betrieben werden, zu verteilen.

2.4.2. Verlauf und Umsetzung

Für das Energiemanagement stehen zwei Lösungsansätze zur Auswahl. Der erste Lösungsansatz sieht dabei vor, die gesamte in AP1.2 ermittelte, notwendige Energie in der Batterie zu speichern und diese außerhalb der Betriebszeit zu Laden. Der Vorteil hierbei ist die Unabhängigkeit von einer Ladevorrichtung während der Betriebszeit. Nachteilig dagegen sind die Größe der notwendigen Batterie und

die damit einhergehenden Bauraumanforderungen. Diesbezüglich sieht der zweite Lösungsansatz vor, die Batterie kleiner auszulegen und schnellladefähig zu gestalten. Bei diesem Lösungsansatz ist ein Zwischenladen, beispielsweise in der Pausenzeit des Fahrers, notwendig. Zudem muss zum Zwischenladen an den Betriebshof zurückgekehrt werden, sofern keine Schnellademöglichkeit im Einsatzgebiet zur Verfügung steht.

Es werden beide Varianten weiterverfolgt. So sind zwei elektrische Speichervarianten (120 kWh und 160 kWh) sowie unterschiedliche Ladevarianten mit Ladeleistungen zwischen 22 kW und 1C untersucht worden. Die im AP 3.2 entstehenden Ergebnisse aus den simulationsbasierten TCO Betrachtungen sowie spezifische technische Rahmenbedingungen zur Lademöglichkeit bei den Endkunden der Fahrzeuge werden zu Handlungsempfehlungen bei der Ausstattung der Fahrzeuge führen.

Werden die einzelnen Spannungsebenen betrachtet, finden sich neben der HV- und LV-DC-Spannung auch die variable 3-Phasen Wechselspannungen wieder. Diese werden benötigt um verschiedene Aktoren, wie den Traktionsmotor, das Sauggebläse und den Hydraulikmotor zu betreiben.

Mit Hilfe von Umrichtern kann so aus der vorhandenen DC-Spannung eine 3Phasen-Wechselspannung für die Aktoren generiert werden. Je nach Aktor-Anwendungsgebiet wird eine unterschiedliche Regelform benötigt. So ist der Traktionsmotor drehmomentengeregelt wohingegen das Sauggebläse drehzahlgeregelt läuft. Um hier die entsprechende Regelung vorzunehmen, bedarf es geringfügiger Messtechnik, diese beinhaltet die Strommessung und die Drehzahl / Motorpositionsmessung. Die Messtechnik ist bei den Umrichtern aus dem Hause UniTek einmal intern verbaut – Strommessung – und extern angeschlossen bzw. am Motor verbaut – Motorpositionsmessung. Durch entsprechende Parametrierung des Umrichters lässt sich ein und dasselbe Gerät auf die unterschiedlichen Aktoren und Anwendungsfälle parametrieren.

Im Rahmen des Projektes wurde das Regelverhalten eines UniTek-Umrichters mit Standard-Regelkarte in einem Matlab-Model nachgebildet, siehe Abbildung 16. Als Grundlage dient hier der vorhandene C-Coder der bereits im System implementiert ist. Es wurden Modelle in unterschiedlicher Tiefe und auf unterschiedlichen Ebenen entwickelt. So stellt das Grundmodel die rein softwaretechnische Regelung dar. In diesem sind viele Grundfunktionen des Gerätes hinterlegt. Dazu zählt der Regelalgorithmus des Stromreglers sowie des Drehzahlreglers. Ein Algorithmus zur Rampenbildung bei Drehzahl und Drehmoment sowie zur Limitierung und Überwachung der Signale. Für die einzelnen nachgebildeten Funktionen wurden dieselben Taktzyklen hinterlegt, wie sie auch im Mikrokontroller aufgerufen wurden, um die Streckennachbildung der Regelung möglichst nahe an der Realität zu orientieren. Des Weiteren wurde das Gegenstück zur Software, die Hardware mit Hilfe von SimScape auf einer physikalischen Ebene gestaltet, siehe Abbildung 17.

Im Projektzeitraum konnten einige Funktionen und Eigenschaften der Soft- und Hardware nicht im Model implementiert werden. So wären ein Temperaturmodell und eine verifizierte Übertragungsfunktion der Hardware mit Verlusten für ein Thermo- und Wirkungsgradbetrachtung noch weiter von Vorteil gewesen.

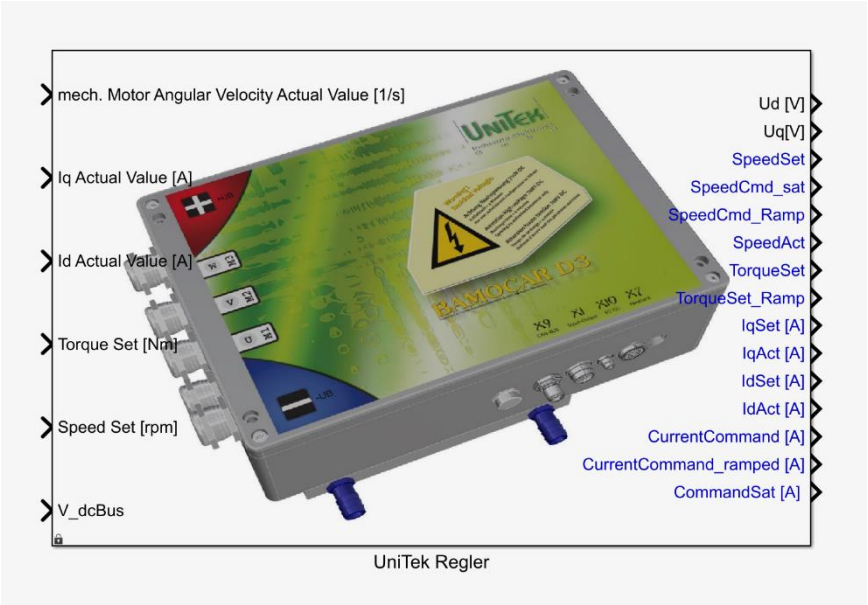

Abbildung 16: Matlab-Simulink-Model UniTek Umrichter BAMOCAR

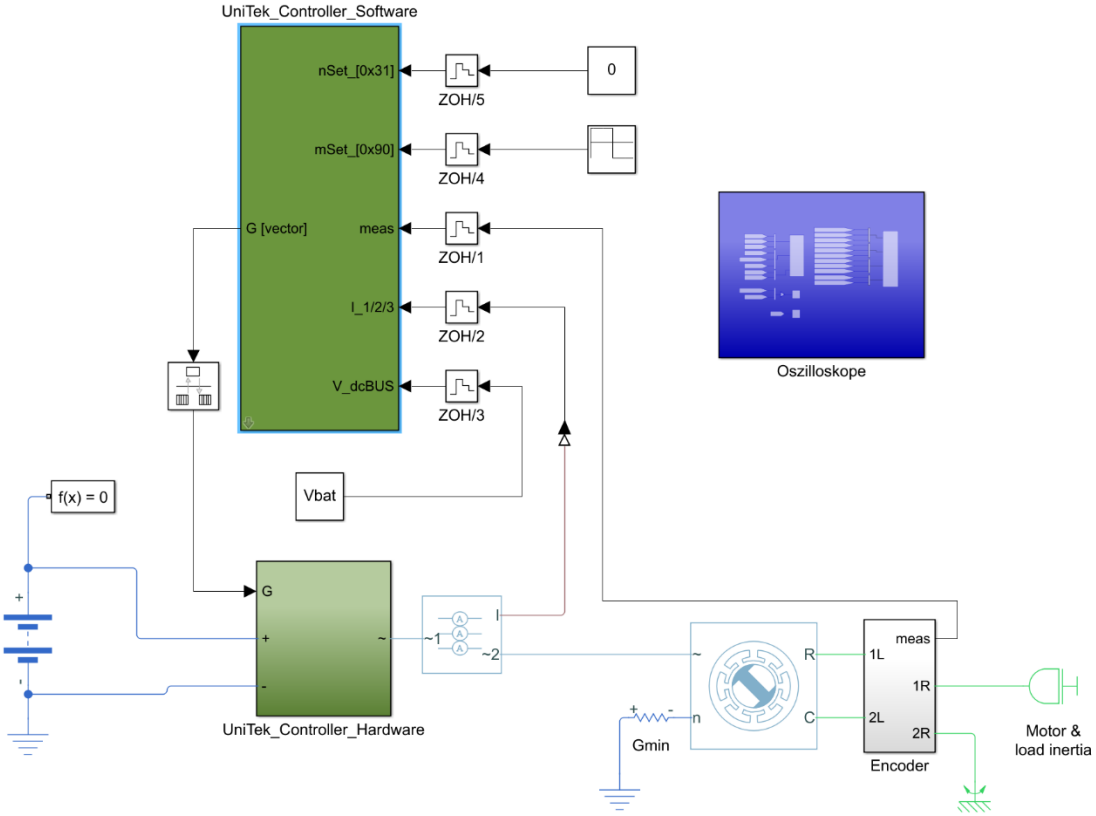

Abbildung 17: Matlab-Simulink- und -SimScape-Model UniTek Umrichter BAMOCAR

2.5. AP 1.5: Grobkonzept Thermomanagement (Antrieb, Speicher, Kabine)

2.5.1. Ziel des Arbeitspaketes

Um ein energieeffizientes Gesamtsystem abbilden zu können, ist es unverzichtbar möglichst viele Energieströme im Fahrzeug zu nutzen. Der im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Antrieb hohe Wirkungsgrad und die damit einhergehend geringere Abwärme der elektrischen Komponenten erfordert ein effizientes Thermomanagement um den Energiebedarf der Kabinenklimatisierung und Batteriekonditionierung möglichst gering zu halten und somit Reichweitenvorteile zu erzielen. Gleichwohl ist es erforderlich, auf einen sehr heterogenen Einsatz der Maschinen (z.B. Heißland/ Kaltland, unterschiedliche Anteile Transfer- und Arbeitsbetrieb) mit einer innovativen Variantenbildung zu reagieren.

2.5.2. Verlauf und Umsetzung

Das Thermomanagement besteht beim untersuchten Fahrzeug aus 6 Systembereichen:

- Der Kühlkreislauf für die Antriebskomponenten. Der Fahrantrieb und Fahrinverter, das Getriebe, der Hydraulikantrieb und seine Steuerung sowie das Hydrauliköl erwärmen sich durch Wirkungsgradverluste im Betrieb. Diese Wärmekapazität muss zum einen zur betriebsgerechten Anwendung aus dem System abgeführt werden, bietet aber auch die Möglichkeit, diese Wärme zur Konditionierung der Kabine als auch der Batterie zu nutzen.
- Der Kühlkreislauf für das Laden: Wird die Batterie mit einem AC Onboard-Lader geladen, entsteht auch hier Abwärme, die der Komponente entzogen werden muss. Je nach Außentemperatur muss die Wärme in die Umwelt abgegeben werden oder sie kann zur Temperierung der Batterie genutzt werden.
- Batteriekonditionierung: Die Funktion und Alterung der Batterie (s.a. AP3.3) hängt stark von der thermischen Konditionierung der Batterie ab. Hier kann sowohl das Heizen als auch das Kühlen erforderlich sein.
- Die Kabine: In der Regel mäßig isolierte Kabinen mit großen Fensterflächen stellen eine vergleichsweise große Herausforderung an die Kabinenklimatisierung. Sowohl das Heizen, als auch das Kühlen sind „state of the art“ bei mobilen Arbeitsmaschinen. Während beim Heizen der Anwendung die Auslegung dadurch vereinfacht wird, dass Kehrmaschinen in der Regel nicht unter 0°C eingesetzt werden, da sonst das Reinigungswasser gefrieren würde, muss nur der Einsatz in heißen Umgebungen berücksichtigt werden.
- Der Kühlkreislauf für das Sauggebläse: In der untersuchten Anwendung ist das Kühlgebläse dezentral im Saugbehälter untergebracht. Die zu erwartenden Antriebsleistung (maximal 30 kW, durchschnittlich ca. 15 kW ausschließlich im Arbeitsmodus) lässt bei den zu erwartenden Wirkungsgraden von ca. 90% relativ geringe Abwärmewerte erwarten, die nicht sinnvoll in den restlichen Antriebskühlkreislauf zu überführen sind.
- Die zusätzliche Heizung und Kühlung: Hier gibt es zwei Herangehensweisen:
    - Klassisch: Es wird ein zusätzlicher PTC Heizer und ein elektrischer Klimakompressor mit der entsprechenden Systemtechnik verbaut
    - Es wird eine Wärmepumpe verwendet

Die Konzeptuntersuchungen haben sehr schnell ergeben, dass für die Kompaktkehrmaschine eine thermische Batteriekonditionierung entgegen den Lösungen am kleineren Schwesterfahrzeug eSwingo erforderlich ist.

Da nicht in jedem Betriebspunkt sichergestellt werden kann, dass Kabine und Batterie gleichförmig beheizt oder gekühlt werden, ist bei einem klassischen Ansatz eine unabhängige Konditionierung notwendig. Diese Lösung ist sehr aufwändig. Daher wurde in der Folge, auch zur Erhöhung der Energieeffizienz, im Projekt der Einsatz einer Wärmepumpe verfolgt. Hierbei können nun die drei Anforderungen in der Kabine (Heizen, Kühlen, Defrosten) sowie das Heizen und das Kühlen der Batterie in einem System unabhängig regel- und kombinierbar gestaltet werden. Der Entwurf des Konzeptes des Thermomanagements ist in Abbildung 18 dargestellt.

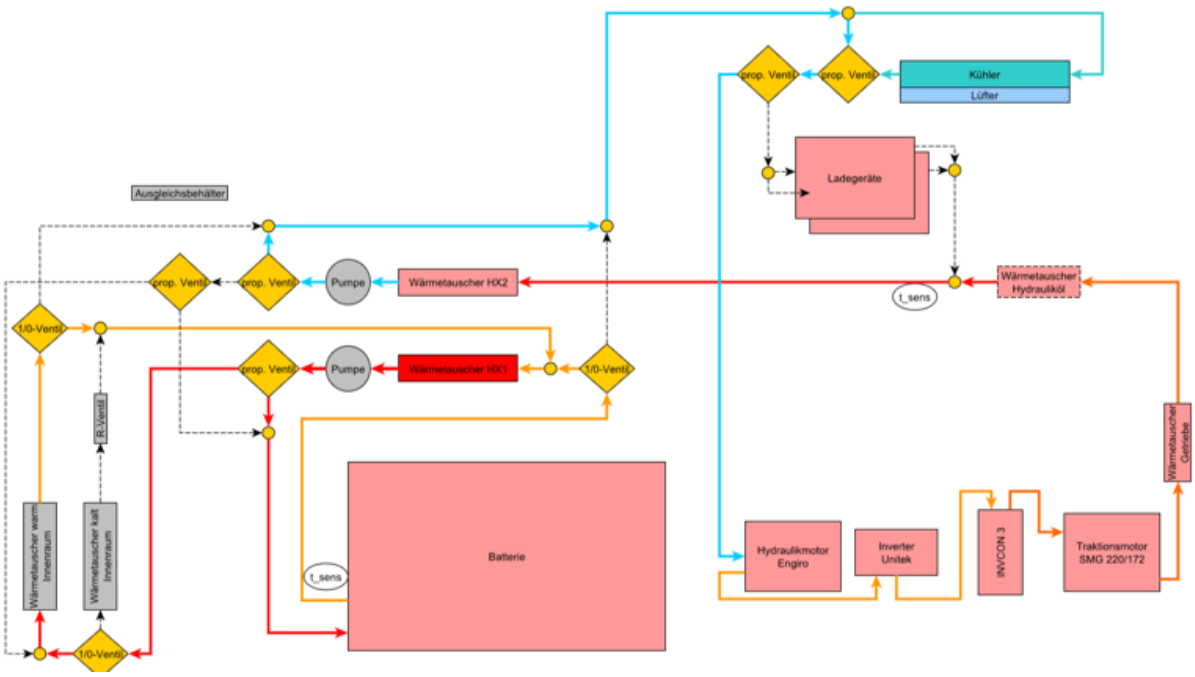

Abbildung 18: Konzept des Thermomanagements

Im weiteren Verlauf wurde noch eine Vereinfachung des Systems untersucht, da durch den speziellen Einsatz der Kompaktkehrmaschine auf die unabhängige Defrost-Funktion verzichtet werden kann. Daraus ergibt sich ein deutlich vereinfachtes Schema, bei dem die Mediensteuerung von acht auf fünf Ventile reduziert werden konnte, dargestellt in Abbildung 19. Darüber hinaus reduziert sich der Leitungsverlegungsaufwand um etwa die Hälfte.

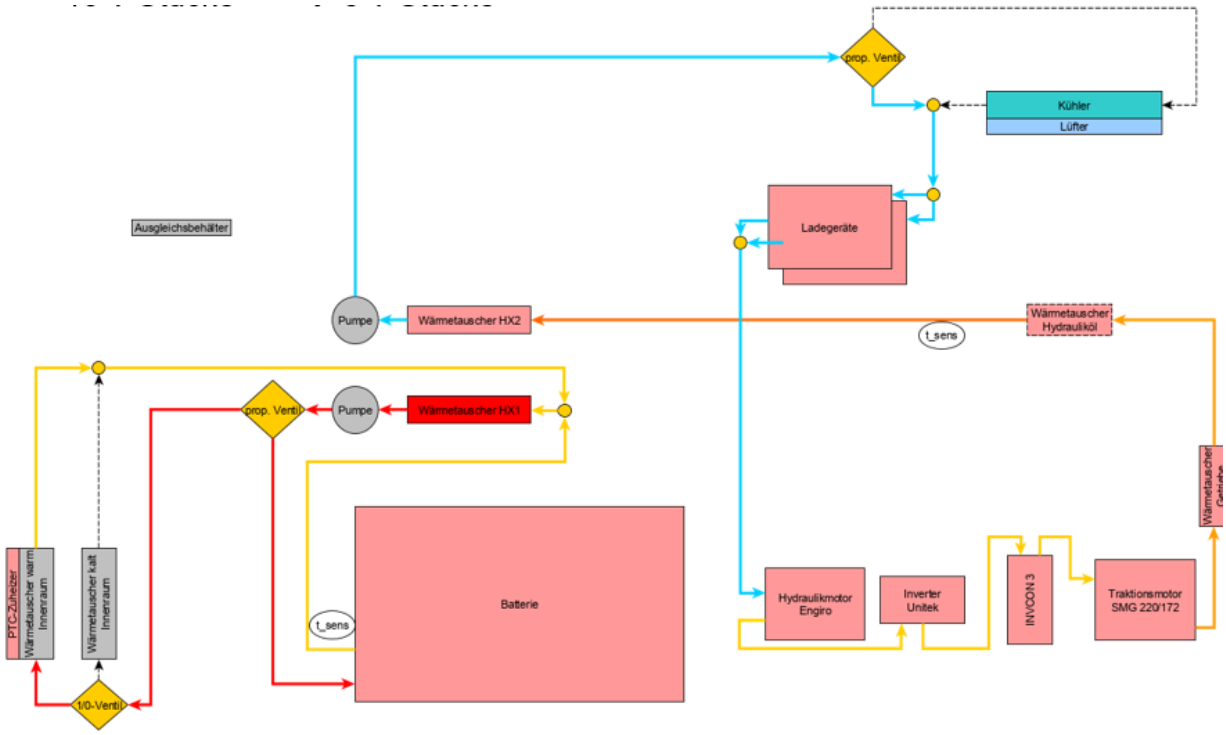

Abbildung 19: Vereinfachtes Konzept des Thermomanagements

Losgelöst davon wird als unabhängiges, eigenständiges System der Sauggebläseantrieb gekühlt, dargestellt in Abbildung 20. Leider lässt die Abluftführung keine Kühlung der Komponenten durch einen Luftstrom zu. Deshalb ist auch bei diesem System eine Flüssigkeitskühlung vorgesehen, bei der der Ausgleichsbehälter in den Wärmetauscher integriert ist. Der Kühlflüssigkeitsstrom wird durch eine kleine elektrische Wasserpumpe realisiert.

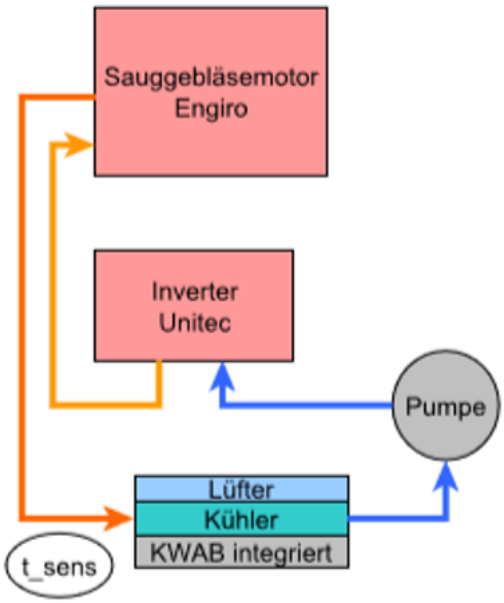

Abbildung 20: Kühlung des Sauggebläses

2.5.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Das Grobkonzept sieht ein komplexes Wärmepumpensystem vor, dass durch ein anwendungsgerechtes Design deutlich vereinfacht werden konnte. Dadurch reduziert sich auch signifikant der Steuer- und Regelaufwand des Systems. Der Sauggebläseantrieb muss unabhängig gekühlt werden.

3. AP 2: Elektrifizierung Kommunalfahrzeug

3.1. AP 2.1: Erarbeitung des Anforderungskatalogs

3.1.1. Ziel des Arbeitspaketes

Aus den im AP1 definierten Anforderungen, abgeleitet aus dem kleineren Schwesterfahrzeug eSwingo entsteht ein Anforderungskatalog, der die Auswahl der geeigneten elektrischen und mechanischen Kennwerte, sowie der dafür in Frage kommenden Komponenten zulässt.

3.1.2. Verlauf und Umsetzung

Aus den in AP1 erarbeiteten Anforderungen wurden die notwendigen Parameter der Batterie und E-Maschinen bestimmt. Zwei mögliche Spannungslagen des Hochvoltsystems wurden festgelegt. Für die Batteriegröße gilt die Anforderung aus dem Ergebnis von AP1.2. Für die Kombinationen E-Maschine und Getriebe wurden die notwendigen Anforderungen für Drehmomente und Drehzahlen aus den Leistungen in AP1 bestimmt.

3.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Der Anforderungskatalog steht somit größtenteils fest und dient als Grundlage für die folgenden Arbeitspakete.

3.2. AP 2.2: Auslegung des Elektrischen Antriebs und Speicher

3.2.1. Ziel des Arbeitspaketes

Ziel des Arbeitspaketes ist es, eine Auswahl an möglichen Fahrantriebssträngen zu generieren, zu bewerten und eine Entscheidung für ein Konzept herbeizuführen.

3.2.2. Verlauf und Umsetzung

Es wurden unterschiedlichste Varianten für den Fahrantrieb untersucht. Dies betraf die Spannungslage, hier wurden Systeme mit 400V und 700V Nennspannung untersucht. Dazu wurden langsam laufende, etwa mit der Drehzahl des Hydrostaten vergleichbare Motoren, sowie schnelllaufende Systeme untersucht, die ein zusätzliches Getriebe erfordern.

Die langsam drehenden Antriebe mit 700 V Nennspannung ermöglichen zwar den Entfall eines Getriebes, konnten aber durchweg die heterogenen Anforderungen (Arbeiten: sehr langsame Fahrt; Transfer: schnelle Fahrt) nicht erfüllen. Entweder schaffen die Antriebe bei entsprechender Differenetialauslegung die notwendige Steigfähigkeit (18% dauerhaft) oder die erforderliche Endgeschwindigkeit (50/60 km/h). Beide Anforderungen sind mit am Markt verfügbaren Antrieben nur durch sehr große, nicht mit dem Bauraum und dem Kostenrahmen kompatiblen Lösungen, darzustellen.

Es hat sich gezeigt, dass ein schnelllaufender Motor (400V Nennspannung) mit einem 2-Gang Getriebe hinsichtlich der Fahrleistungen die ideale Kombination darstellt. Solche Getriebe sind aber am Markt nicht verfügbar. Es konnte aber eine Lösung gefunden werden, die bei geringen Abweichungen von den Anforderungen – die Endgeschwindigkeit wird knapp nicht erreicht – ein einstufiges Getriebe zulässt.

Es wurden unterschiedliche Getriebekonfigurationen untersucht. Für die Integration des Fahrantriebs hat sich eine Position über dem Achsdifferential als Bauraumoptimal herausgestellt, siehe Abbildung 21. Hierdurch wird es auch möglich, kostengünstige, schnelllaufende E-Motoren einzusetzen.

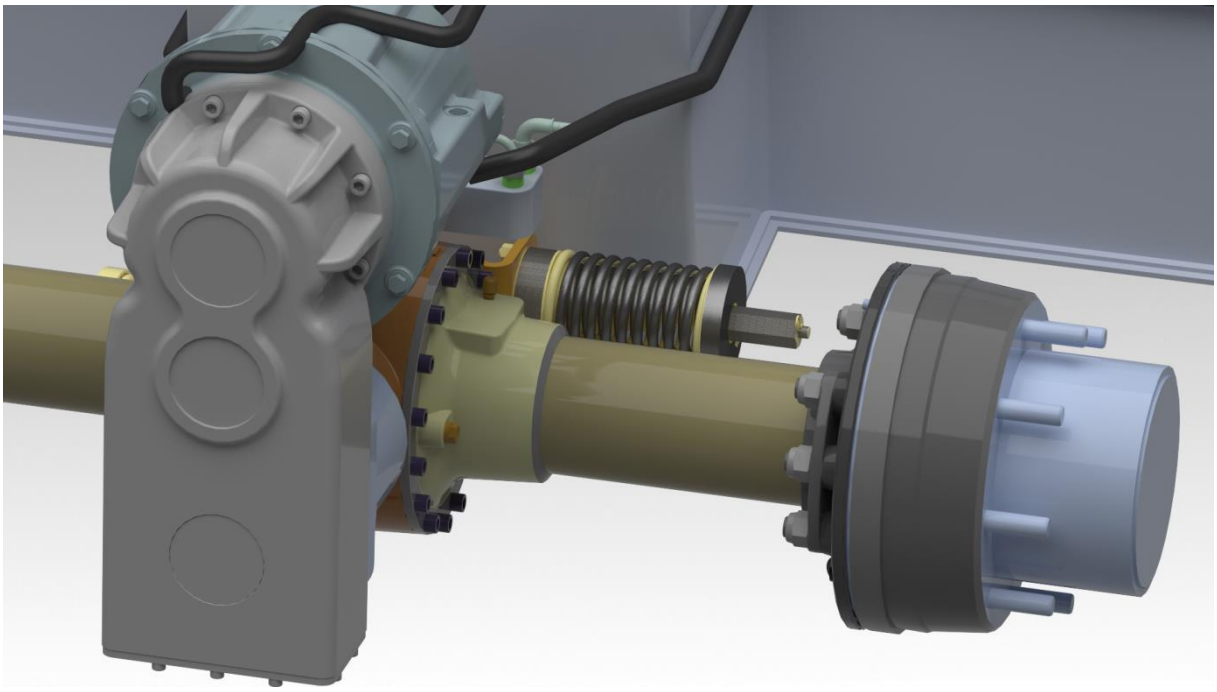

Abbildung 21: Position des Fahrantriebs

Hydraulische Antriebe, so diese eine Dauerbewegung erzeugen, arbeiten mit einem vergleichsweise schlechten Wirkungsgrad. Deshalb wird das Sauggebläse auch mit einem elektrischen Direktantrieb ausgestattet. Das Fahrzeug erhält aber trotzdem ein Hydrauliksystem. Zum einen um die Besenantriebe, sie befinden sich in einem beschädigungsanfälligen Bereich an der Fahrzeugfront, nicht hinsichtlich Anforderungen aus der Hochvoltsicherheit schützen zu müssen und zum anderen, um Lenkung und Bremsanlage hinsichtlich der Zulassungskriterien nicht verändern zu müssen. Eine elektrische Maschine treibt eine per load-sensing verstellbare Hydraulikpumpe an, siehe Abbildung 22. Eine weitere angeflanschte Pumpe ermöglicht die mechanische Trennung des Arbeitsantriebs von Lenkung und Bremse.

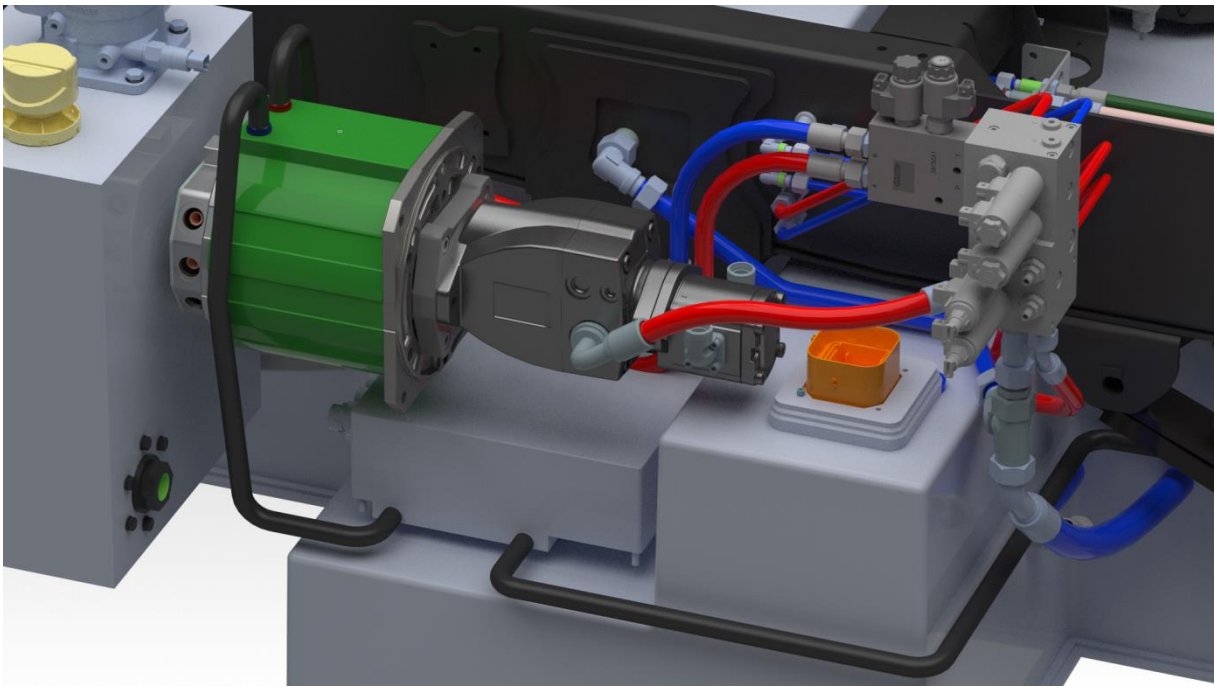

Abbildung 22: Realisierung des Hydraulikantriebs

Für den Speicher wird ein modularer Ansatz gewählt. Es werden vorkonfektionierte Module verwendet, die anschließend zur Batterie verschalten werden. Die Batteriechemie LFP hat sich in der weiteren Entwicklung durchgesetzt, da keine hohen C-Werte notwendig sind, LFP Zellen nicht zum thermal runaway neigen, also sicherer sind als NMC-Zellen und die Energiedichte als für das Fahrzeug ausreichend ermittelt wurde.

3.2.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Als Ergebnis wurden 5 unterschiedliche Grundfahrzeuge untersucht. Davon blieben zwei Fahrzeuge in der Weiterentwicklung. Es sind Fahrzeuge mit einer Nennspannung von 400 V mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten (120 und 160 kWh). Dazu sind unterschiedlichste Sondervarianten möglich: Zum Beispiel Laden (AC bis 4 kW und DC bis 1C) oder ein Batteriesystem mit und ohne thermische Konditionierung.

3.3. AP 2.3: Bauraumuntersuchung

3.3.1. Ziel des Arbeitspaketes

Die ausgewählten Komponenten sowie die Hauptleitungsroutings wurden im Fahrzeug untersucht. Hierbei wurde darauf geachtet, die im vorherigen AP definierten Fahrzeugvarianten weitgehend baugleich auszuführen.

3.3.2. Verlauf und Umsetzung

Eine erste Analyse des zur Verfügung stehenden Bauraumes wurde durchgeführt. Dabei wurden im ersten Schritt am Markt verfügbare Batteriesysteme im Fahrzeug untersucht. Der spezielle Bauraum des Fahrzeugs ermöglicht aber keine Unterbringung hinreichender Kapazität für die geforderte Fahrzeugperformance. Durch eine geschickte Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bauräume und die von der Batterie getrennt ausgeführte HV-Energieverteilung (Power Distribution Unit > PDU) kann ein einteiliges Batteriemodul realisiert werden. Die PDU sitzt über der Batterie im Rahmen, um kurze HV Leitungen zu ermöglichen. Es wurden einige Varianten untersucht, aus denen sich 2 Varianten mit unterschiedlicher Batteriekapazität aber größtmöglichem Verblockungsanteil herauskristallisiert haben.

3.3.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Der zur Verfügung stehende Bauraum lässt eine den Anforderungen entsprechend ausreichend große Batteriekapazität im Fahrzeug zu.

3.4. AP 2.3: Packagingkonzept

3.4.1. Ziel des Arbeitspaketes

In diesem Arbeitspaket wurde untersucht, ob die übrigen Fahrzeugkomponenten wie Hydraulik, Thermomanagement, Ladeinfrastruktur etc. im Fahrzeug sinnvoll zu installieren sind.

3.4.2. Verlauf und Umsetzung

Durch eine genaue Beleuchtung der funktionalen Abhängigkeiten konnte das Thermomanagement deutlich vereinfacht werden. Sämtliche Komponenten konnten im Fahrzeug sinnvoll untergebracht werden. So wurde eine möglichst große elektrische Speicherkapazität durch sinnvolle Anordnung der Komponenten und kurze, strukturierte Verlegewege realisiert. Die einzelnen Funktionen sind im Bauraum sinnvoll zusammengefasst. Servicezugänge sind gut zu erreichen. Die Volumina der Wassertanks konnten erhalten werden. Am Ausgangsfahrzeug sind keine signifikanten Änderungen notwendig. In Abbildung 23 ist der Aufbau sämtlicher im Rahmen des Projektes erarbeiteten Komponenten für die Batterievariante mit 160kWh dargestellt.

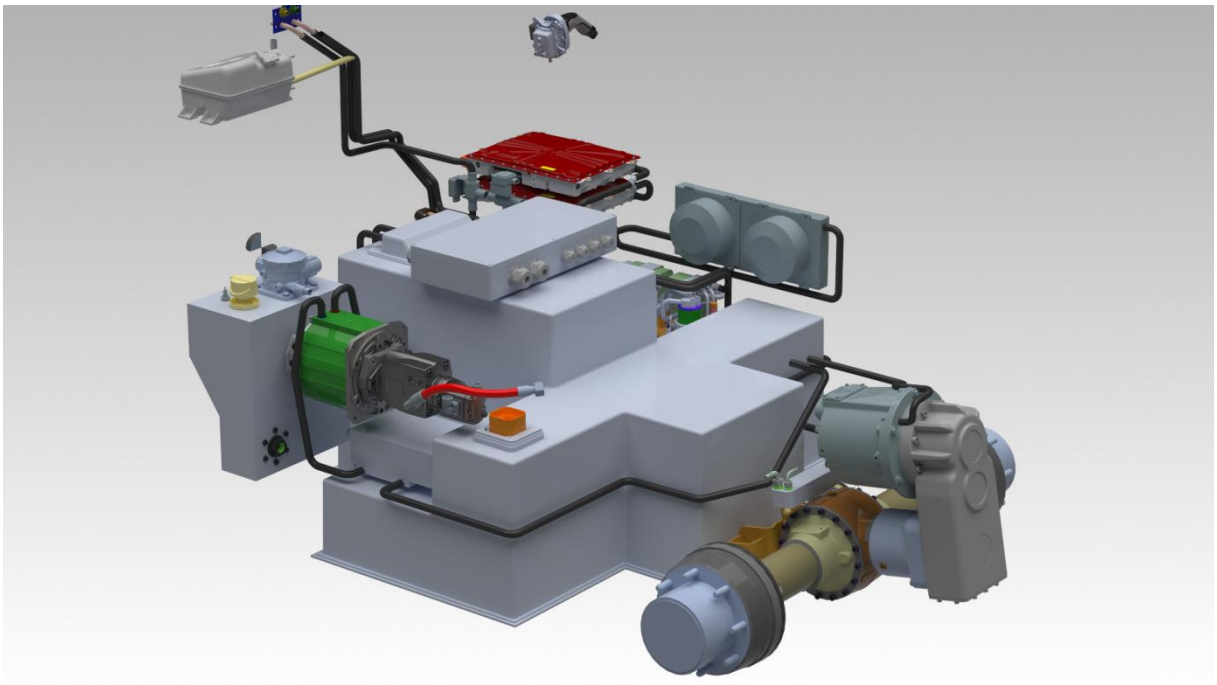

Abbildung 23: DMU Modell mit 160 kWh elektrischen Speicher

3.4.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Das Konzept ermöglicht eine Batteriekapazität von ca. 160 kWh bei einer sinnvollen Raumausnutzung am unveränderten Chassis. Die Längslenker der Vorderachse verhindern eine noch bessere Ausnutzung des Bauraums. Ebenfalls könnte eine Änderung des Feststellbremssystems noch eine Optimierung des Bauraums ermöglichen. Die unterschiedlichen Varianten zur Behälterentleerung (Kippen und Scherenheber) wurden berücksichtigt.

4. AP 3: Lifetimebetrachtung Diesel vs. Elektro

4.1. AP 3.1: Emissionen

4.1.1. Ziel des Arbeitspaketes

Ziel der ersten Betrachtung ist der Vergleich der im Betrieb anfallenden Emissionen der dieselmotorischen und elektromotorischen Variante der Kehrmaschine. In der vorliegenden Betrachtung liegt der Fokus auf den CO_2 Emissionen.

4.1.2. Verlauf und Umsetzung

Da Elektrofahrzeuge keine CO_2 Emissionen während dem Betrieb verursachen, werden die Daten der CO_2 Emission bei der Stromerzeugung für den deutschen Strommix für das Jahr 2019 vom Umweltbundesamt entnommen. Die Entwicklung der CO2 Emissionen für den deutschen Strommix sind in der Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: CO2 Emissionen bei der Stromerzeugung in Deutschland [Quelle: www.umweltbundesamt.de]

Jahr	Kohlendioxid-emissionen der Stromerzeugung [Mio. t]	CO_2-Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]
1990	366	764
1991	361	764
1992	345	730
1993	335	726
1994	335	722
1995	335	713
1996	336	685
1997	325	669
1998	329	671
1999	318	647
2000	327	644
2001	336	659
2002	338	654
2003	340	634
2004	333	614
2005	333	610
2006	339	603
2007	351	621
2008	328	581
2009	299	566
2010	313	555
2011	310	568
2012	321	573
2013	326	572
2014	312	557
2015	304	527
2016	304	523
2017	283	485
2018*	269	468
2019**	219	401

2018* vorläufig 2019** geschätzt

Für den Vergleich der beiden Maschinen wird für die dieselmotorische Kehrmaschine der real ermittelte Verbrauch in l/h herangezogen. Für die elektromotorische Kehrmaschine wird der aus der Simulation ermittelte Verbrauch in kWh verwendet. Als Grundlage dienen weiterhin die Annahmen einer Betriebszeit von 6h pro Tag und eine Verwendung von 250 Tagen im Jahr. In Tabelle 5 ist dies noch einmal zusammengefasst, sowie die daraus berechnete jährliche CO2 Emission aufgeführt.

Tabelle 5: Vergleich der CO2 Emissionen Diesel vs. Elektro

	Diesel	Elektro
Verbrauch, l/h (kWh)	11,2	22
CO2 Ausstoß pro g/kWh	-	401
Ausstoß CO2 pro 1L Diesel, kg	2,56	-
Tage	250	
Betrieb, Stunden	6	
CO2, kg	43008	13233

4.1.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Aus der aufgeführten Berechnung folgt, dass in einem Jahr die elektromotorische Variante der Kehrmaschine 29.775 kg weniger CO2 als dieselmotorische Kehrmaschine verursacht, angenommen das beide Fahrzeuge 6 Stunden am Tag und 250 Tage im Jahr im Betrieb sind.

4.2. AP 3.2: TCO-Vergleich beider Antriebskonzepte

4.2.1. Ziel des Arbeitspaketes

Ziel der TCO Betrachtung ist es herauszufinden, ab wie vielen Arbeitsstunden sich die elektromotorische Version gegenüber der dieselmotorischer wirtschaftlich rechnet.

4.2.2. Verlauf und Umsetzung

Für die TCO Betrachtung wurden zu Beginn für die wesentlichen Kategorien (Anschaffungskosten, Betriebskosten, Wiederverkaufswert, Förderung) die relevanten Kostenpunkte erarbeitet und in einer Tabelle aufgelistet, siehe Tabelle 6. Für den Vergleich werden neben der dieselmotorischen Kehrmaschine zwei Varianten der elektromotorischen Kehrmaschine betrachtet, mit 120kWh und 160kWh Batterie. In Kooperation mit Aebi Schmidt wurden anschließend für alle drei Kehrmaschinen die Kostenpunkte aufgelistet. Da einige Kosten sehr variabel sind, bspw. die Sonderausstattung, wurden diese für die TCO Betrachtung nicht betrachtet.

Die Grundlagen der Nutzungshäufigkeit sind für die TCO Betrachtung gleich der Annahmen in AP 3.1:

- 6 Stunden pro Tag
- 250 Tage pro Jahr

Tabelle 6: Kostenaufstellung der diesel- und elektromotorischen Varianten

Kategorie	Unterkategorie	Kostenpunkt	dieselmotorisch		elektromotorisch 120 kWh		elektromotorisch 160 kWh	
Anschaffungskosten	Fahrzeuganschaffung	Kaufspreis	120000		156000		173000	
		Sonderausstattung	k.A.		k.A.		k.A.	
		Überführung/Zulassung	k.A.		k.A.		k.A.	
	Batteriekosten	Batteriepreis	-		60000		80000	
		Infrastruktur (Ladepunkte)	-					
Betriebskosten	Variable Kosten	Energieverbrauch, l/h (kW/h) --> Euro/h	11,2	13,44	22	7,26	22	7,26
		Reparatur und Wartung	12000		15600		17300	
		Kraftstoff-/Energieverbrauch	23520		12705		12705	
		Schmierstoff	1200					
	Fixkosten	Versicherung	1122		1122		1122	
		KfZ-Steuer	0		0		0	
		Stellplatz	500		500		500	
	sonstige Kosten	Verwaltung, Wagnis	15600		15600		15600	
Wiederverkaufswert	Fahrzeugverkauf	Euro, % zu Neuwagenpreis	14000		49405	31,67	54789	31,67
	Batterie	Second use, Euro	-		6000		8000	
Förderung					18000	100000	26500	100000
		Total Kosten im Jahr:	53942		45527		47227	

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit basiert auf verschiedenen Annahmen bzgl. der staatlichen Förderung und ggf. einem notwendigen Batteriewechsel. Aus diesem Grund wurden folgende Szenarien der TCO kalkuliert:

- ohne staatliche Förderung
- staatliche Förderung mit 50% des Mehrwertes
- staatliche Förderung mit 100.000 Euro
- mit Batteriewechsel
- ohne Batteriewechsel

Für die Szenarien mit einem Batteriewechsel wurden die Kosten der neuen Batterie auf die ersten 10 Jahre der Nutzung verteilt. Die Ergebnisse der aufgeführten Szenarien (Kombination aus der Art der Förderung und ggf. einem Batteriewechsel) sind in Tabelle 7 bis Tabelle 12 aufgeführt. Aus Tabelle 7 wird ersichtlich, dass die Rentabilität ohne staatliche Förderung und ohne Berücksichtigung von Kosten für einen Batteriewechsel 6 Jahre für die elektrische Kehrmaschine mit 120kWh beträgt. Die elektrische 160kWh Variante erreicht die Rentabilität im Vergleich zu dieselmotorischen Variante nach 8 Jahren.

Tabelle 7: Berechnung der Wirtschaftlichkeit ohne staatliche Förderung

	Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **ohne** Förderung, Euro		
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	201527	220227
2	227884	247054	267454
3	281826	292581	314681
4	335768	338108	361908
5	389710	383635	409135
6	443652	429162	456362
7	497594	474689	503589
8	551536	520216	550816
9	605478	565743	598043
10	659420	611270	645270

Aus Tabelle 8 wird ersichtlich, dass eine Rentabilität ohne staatliche Förderung und mit Berücksichtigung von Kosten für einen Batteriewechsel nach 12 Jahren für die 120kWh Variante gegeben ist und nach 20 Jahren für die 160kWh Variante.

Tabelle 8: Berechnung der Wirtschaftlichkeit ohne staatliche Förderung und mit Batteriewechsel

	Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **ohne** Förderung und **mit** Batteriewechsel, Euro		
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	207527	228227
2	227884	259054	283454
3	281826	310581	338681
4	335768	362108	393908
5	389710	413635	449135
6	443652	465162	504362
7	497594	516689	559589
8	551536	568216	614816
9	605478	619743	670043
10	659420	671270	725270
11	713362	716797	772497
12	767304	762324	819724
13	821246	807851	866951
14	875188	853378	914178
15	929130	898905	961405
16	983072	944432	1008632
17	1037014	989959	1055859
18	1090956	1035486	1103086
19	1144898	1081013	1150313
20	1198840	1126540	1197540

Die Rentabilität mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes und ohne Berücksichtigung von Kosten für einen Batteriewechsel beträgt 3 Jahre für die 120kWh Variante, dargestellt in Tabelle 9. Die 160kWh Variante erreicht nach 5 Jahren die Rentabilität.

Tabelle 9: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes

Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **mit** Förderung in Höhe von **50% des Mehrwertes**, Euro			
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	183527	193727
2	227884	229054	240954
3	281826	274581	288181
4	335768	320108	335408
5	389710	365635	382635

In Tabelle 10 ist die Betrachtung mit einem Batteriewechsel dargestellt, dabei wird die Rentabilität mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes nach 8 Jahren für die 120kWh Variante und nach 16 Jahren für die 160kWh Variante erreicht.

Tabelle 10: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 50% des Mehrwertes und Batteriewechsel

Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **mit** Förderung in Höhe von **50% des Mehrwertes** und **mit** Batteriewechsel, Euro			
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	189527	201727
2	227884	241054	256954
3	281826	292581	312181
4	335768	344108	367408
5	389710	395635	422635
6	443652	447162	477862
7	497594	498689	533089
8	551536	550216	588316
9	605478	601743	643543
10	659420	653270	698770
11	713362	698797	745997
12	767304	744324	793224
13	821246	789851	840451
14	875188	835378	887678
15	929130	880905	934905
16	983072	926432	982132
17	1037014	971959	1029359
18	1090956	1017486	1076586
19	1144898	1063013	1123813
20	1198840	1108540	1171040

Die Rentabilität mit staatlicher Förderung in Höhe von 100.000 Euro und ohne Berücksichtigung von Kosten für einen Batteriewechsel ist für beide Varianten sofort erreicht, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 100.000 Euro

	Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **mit** Förderung in Höhe von **100.000 Euro**, Euro		
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	101527	120227

In Tabelle 12 ist die Berechnung der Rentabilität mit einer staatlichen Förderung in Höhe von 100.000 Euro und der Berücksichtigung eines Batteriewechsels aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass auch in diesem Szenario die Rentabilität sofort erreicht ist.

Tabelle 12: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit staatlicher Förderung in Höhe von 100.000 Euro und mit Batteriewechsel

Rentabilität (Kaufpreis+Betriebskosten) **mit** Förderung in Höhe von **100.000 Euro** und **mit** Batteriewechsel, Euro			
Jahre	**dieselmotorisch**	**elektromotorisch 120 kWh**	**elektromotorisch 160 kWh**
1	173942	107527	128227
2	227884	159054	183454
3	281826	210581	238681
4	335768	262108	293908
5	389710	313635	349135

4.2.3. Zusammenfassung und Ergebnis

In der Abschreibungstabelle für Anlagegüter vom Bundesministerium der Finanzen (AfA-Tabellen) wird für Kehrmaschinen eine gewöhnliche Nutzungsdauer von 9 Jahren festgelegt. Dies ist die Zeit, in der die Kehrmaschine für gewöhnlich in einem Betrieb genutzt werden kann, bevor dieser erneuert werden muss. Damit eine elektrifizierte Kehrmaschine sich wirtschaftlich gegenüber einer dieselmotorischen Kehrmaschine rechnet, muss somit der Zeitpunkt der Rentabilität innerhalb der 9 Jahre liegen.

Aus den vergleichenden Betrachtungen der Rentabilität der verschiedenen Szenarien wird ersichtlich, dass sich auch ohne eine staatliche Förderung die Anschaffung einer elektrifizierten Kehrmaschine gegenüber der dieselmotorischen Variante wirtschaftlich rechnet. Bei der Variante mit 120kWh Batterie tritt dies nach 6 Jahren und bei der Variante mit 160kWh Batterie nach 8 Jahren ein. Durch die zwei untersuchten Fördermaßnahmen wird dieser Punkt der Rentabilität nach vorne verschoben.

Als teuerstes Bauteil der elektrifizierten Kehrmaschine wurde die Batterie in die Betrachtung der TCO-Szenarien mit einbezogen. Dabei wurden die Auswirkungen eines Batteriewechsels betrachtet. Tritt dieser Fall ein, ohne eine staatliche Förderung, so ist die Rentabilität der 120kWh Variante nach 12 Jahren und der 160kWh Variante nach 20 Jahren erreicht. Somit nicht mehr innerhalb der gewöhnlichen Nutzungsdauer.

Durch eine staatliche Förderung von 50% des Mehrwertes tritt die Rentabilität auch mit einem Batteriewechsel nach 8 Jahren für die 120kWh Variante und nach 16 Jahren für die 160kWh Variante ein. Durch eine staatliche Förderung von 100.000€ ist die Rentabilität sofort erreicht. Eine staatliche Förderung kann somit das wirtschaftliche Risiko durch einen Batteriewechsels verringern und damit die Hürde zum Wechsel auf eine elektrifizierte Kehrmaschine beseitigen.

4.3. AP 3.3: Batteriealterungsuntersuchung

4.3.1. Ziel des Arbeitspaketes

Als kostenintensivster Bestandteil Batterieelektrischer Fahrzeuge stellt der betriebsbedingte Verschleiß der Hochvoltbatterie einen Haupteinflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit solcher Fahrzeuge dar. Daher soll die Alterung aus den ermittelten Lastfällen für die beiden Batterievarianten simulativ bestimmt werden

4.3.2. Verlauf und Umsetzung

Für die Bestimmung der Alterung der Batterie wurde der Gesundheitszustand (SoH) als Kriterium ausgewählt. Dieser beschreibt die prozentuale Degradation der Batterie, die durch die Abnahme der Kapazität und Zunahme des Innenwiderstandes hervorgerufen wird. Zur Bestimmung vom SoH wurden verschiedene Alterungsmodelle für Batterien miteinander verglichen, siehe Tabelle 13. Die physikalischen Modelle basieren auf den elektrochemischen Vorgängen innerhalb der Zelle und bilden die Alterung von Batterien sehr detailliert ab. Die Umsetzung eines solchen Modells innerhalb des Projektes InnoEKom war jedoch nicht möglich, da weder ein detailliertes Wissen über die innere Zusammensetzung der Zellen, noch eine große Anzahl Messdatensätze vorlagen. Die Mathematischen Modelle betrachten die Batteriezelle als Blackbox, wodurch kein detailliertes Wissen über den Aufbau der Zelle notwendig ist. Zur Parametrierung der Mathematischen Modelle werden jedoch wiede-

rum große Messdatensätze benötigt, die im Rahmen des Projektes InnoEKom nicht vorlagen. Die Methode der Schädigungsmodelle, abgeleitet aus der Berechnung der Schädigung mechanischer Bauteile, benötigt dagegen weder ein detailliertes Zellwissen, noch umfangreiche Messdatensätze. Zur Berechnung der Schädigung, bzw. Alterung werden nur sogenannte Stressfaktoren benötigt, die aus der Literatur entnommen werden können. Als ein Modell innerhalb der Schädigungsmodelle zeigte sich das Weighted-Ah Modell als am geeignetsten und wurde im Rahmen des Projektes umgesetzt.

Tabelle 13: Vergleich verschiedener Batteriealterungsmodelle

Methode	Physikal. Modelle (Elektrochem., Empirisch, ECM)	Mathematische Modelle	Schädigungs Modelle (Wöhler, Weighted Ah)
Vorgehen	Berechnung der Bildung der SEI-Schicht	Blackbox Modellierung mittels bspw. Neuronalen Netzwerken	$Ah_{eff} = \sum_i w_i * NEi * Ahi$
Vorteile	• Detaillierte Abbildung der Alterung anhand physikal. und chem. Formeln	• kein Zellwissen notwendig	• Einfache Implementierung • Verwendung der Palmgren-Miner Regel
Nachteile	• Detailliertes Wissen über die Zelle notwendig • Messdatensätze notwendig (Empir., ECM)	• Große Messdatensätze notwendig	• keine kalend. Alterung • Stressfaktoren müssen bekannt sein (Messung notwendig)

Beim Weighted-Ah Modell wird angenommen, dass jede Batterie eine gewisse Gesamtkapazitätsmenge hat, die ihr entnommen werden kann. Wurde diese der Batterie entnommen, so ist das Ende der Lebensdauer erreicht und die Batterie muss gewechselt werden.

Die Gesamtkapazität berechnet sich aus der Zellkapazität multipliziert mit der maximalen Anzahl an Lade- und Entladezyklen. Die Anzahl Zyklen werden vom Zellhersteller vorgegeben und beziehen sich auf 20°C Normtemperatur und einen Normzyklus. Eine Abweichung der Systemparamater von diesen Normgrößen hat einen zusätzlichen Einfluss auf die Alterung der Batterie. Diesbezüglich werden diese Systemparameter als Stressfaktoren bezeichnet. Im Rahmen des Projektes wurden die Batterietemperatur und der Entladungsgrad (DoD) als Stressfaktoren verwendet, dargestellt in Abbildung 24.

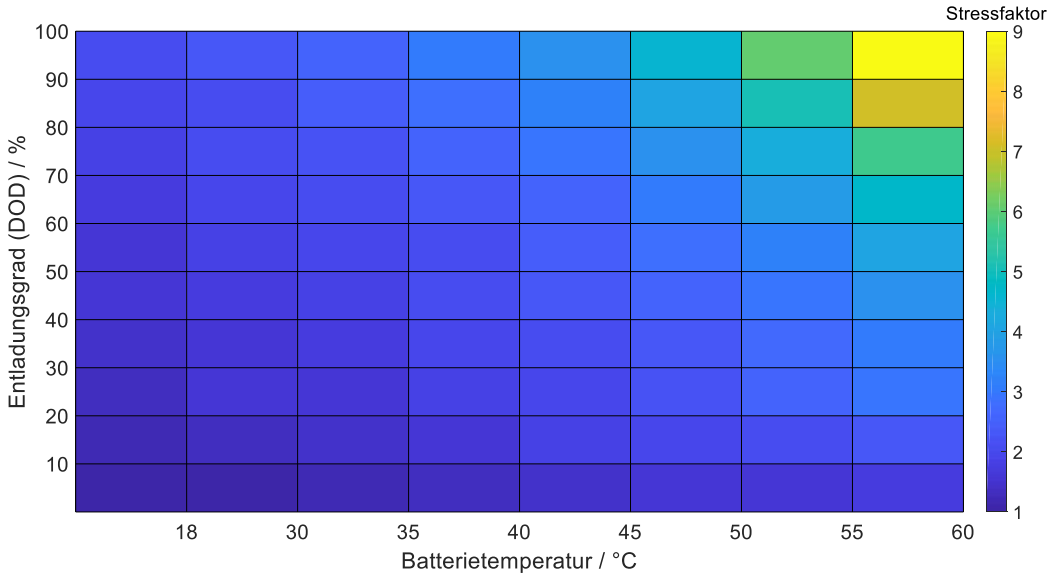

Abbildung 24: Angewendeter Stressfaktor über Batterietemperatur und Entladungsgrad

Zur Berechnung der Alterung wird für einen simulierten Fahrzyklus die umgesetzte Kapazitätsmenge der Batterie berechnet. Aus den Systemparametern Batterietemperatur und Entladungsgrad werden die Stressfaktoren bestimmt. Die umgesetzte Kapazitätsmenge wird anschließend mit den Stressfaktoren multipliziert und man erhält die gewichtetet Kapazität. Da die Stressfaktoren zu einer höheren Alterung der Batterie führen, sind diese vom Zahlenwert immer größer eins. Somit ist die gewichtete Kapazität immer größer als die im Fahrzyklus umgesetzte Kapazitätsmenge. Die gewichtete Kapazität entspricht somit dem Anteil der Gesamtkapazitätsmenge, der innerhalb des Fahrzyklus verbraucht wurde. Abschließend wird die gewichtete Kapazität ins Verhältnis zur Gesamtkapazitätsmenge gesetzt und man erhält den Anteil der prozentualen Alterung.

Mit der in Kapitel 2.2 vorgestellten Simulationsumgebung wurde der kundennahe Betriebszyklus für die 120kWh und 160kWh Variante der Kompaktkehrmaschine simuliert. Die Ergebnisse der Simulation und der anschließend durchgeführten Batteriealterungsuntersuchung mit dem Weighted-Ah Modell sind in Tabelle 14 aufgelistet. Die berechnete Alterung (Δ SoH) entspricht dabei einer fiktiven Alterung, da die Stressfaktoren aufgrund fehlender Messdaten nicht auf die verwendete Batteriezelle angepasst werden konnten. Es ist jedoch möglich einen Vergleich zwischen den beiden Batterievarianten durchzuführen. Dabei zeigt die 120kWh Variante eine um 50% stärkere Alterung als die 160kWh Variante für den kundennahen Betriebszyklus. Dies liegt zum einen an der größeren gewichteten Kapazität der 120kWh Batterie. Diese resultiert aus dem größeren SoC Hub (Δ SoC) der zu einem niedrigeren Entladungsgrad führt und der aufgrund einer höheren C-Rate auftretenden stärkeren Erwärmung der Batterie. Beide Zustände führen nach Abbildung 24 zu größeren Stressfaktoren für die Batterie. Zum anderen ist bei der 120kWh Variante die zur Verfügung stehende Gesamtkapazitätsmenge um 25% kleiner als bei der 160kWh Variante. Aus den größeren Stressfaktoren und der geringeren Gesamtkapazitätsmenge resultiert die stärkere Alterung.

Tabelle 14: Ergebnisse der Batteriealterungsuntersuchung

	120kWh Variante	160kWh Variante
Δ SoC	23,6 %	16 %
Umgesetzte Kapazität	55,4 Ah	54,7 Ah
Gewichtete Kapazität	84,3 Ah	74,7 Ah
Δ SoH	0,134 ‰	0,089 ‰

4.3.3. Zusammenfassung und Ergebnis

Zur Untersuchung der Batteriealterung wurde das Schädigungsmodell Weighted-Ah Modell umgesetzt und am Beispiel der zwei Batterieversionen der Kompaktkehrmaschine vorgestellt. Eine Berechnung der absoluten Batteriealterung ist mit dem Modell nicht möglich, da dafür benötigte Messdaten im Rahmen des Projektes nicht zur Verfügung stehen. Es können jedoch vergleichende Analysen zwischen zwei Simulationen durchgeführt werden, beispielsweise:

- Vergleich zweier Fahr-&Arbeitszyklen bezüglich der Alterung
- Vergleich zweier Batterieauslegungen bezüglich der Alterung

Die durchgeführte Analyse zeigt eine um 50% höhere Alterung bei der 120kWh Variante im Vergleich zur 160kWh Variante der Kompaktkehrmaschine.

5. Zusammenfassung

5.1. Gesamtbewertung zur wissenschaftlichen und industriellen Nutzbarkeit

FKFS

Das FKFS konnte sein KnowHow im Bereich alternativer Antriebe auf den Nutzfahrzeugbereich ausweiten. Eine am FKFS bestehende Simulationsumgebung wurde innerhalb des Projektes InnoEKom entsprechend erweitert. Es ist somit möglich auch hydraulische Komponenten zu simulieren und in das Energiesystem des elektrischen Antriebs einzubinden. Das FKFS kann so zukünftig von weiteren Forschungsaufträgen in diesem Bereich profitieren.

Aebi Schmidt Deutschland GmbH

Die Aebi Schmidt Deutschland GmbH kann zukünftig durch die simulationsgestützten Betrachtungen das Gesamtenergiemanagementsystem von Kommunalfahrzeugen weiter optimieren. Die bereits vorhandene TCO (total cost of ownership) Betrachtung Diesel- vs. Elektroantrieb konnte unter Berücksichtigung der Batteriealterung noch differenzierter ausgearbeitet werden. In Verbindung mit Daten aus kundenspezifischen Lastzyklen können zukünftig genauere Aussagen bezüglich Emissionseinsparungen und Umwelteinflüssen getroffen werden.

GreenIng GmbH & Co. KG

Die GreenIng GmbH & Co. KG konnte in diesem Projekt sein Wissen über die Architektur von Arbeitsmaschinen mit alternativen Antrieben erweitern. Es konnten wertvolle Entscheidungshilfen zur Komponentenauswahl, Spannungslage, Thermomanagement und Antriebsarchitektur entwickelt werden. Die Herausforderungen aus den technischen Abhängigkeiten zwischen den einzusetzenden Systemen wurden vertieft. Neue Konzepte für einen modularen, an die Arbeitsanforderungen angepassten Batteriebaukasten wurden entwickelt.

UniTek Industrie Elektronik GmbH

Die Firma UniTek konnte durch die Projektkooperation das Wissen im Anwendungsgebiet der kommunalen Nutzfahrzeuge Auf- und Ausbauen. Erstmals wurde in der Firma die bestehende Softwarestruktur in ein Simulationsmodel überführt. Mit Hilfe dieses Prozesses konnten softwareseitige Verbesserungen und Vereinfachungen identifiziert werden, die in die zukünftige Softwareentwicklung einfließen. Des Weiteren konnte in einem neuen Fachgebiet – der Simulation – entsprechendes KnowHow aufgebaut werden. Die Simulation zeigt, dass viele Parameter und Indikatoren im Vorfeld bekannt und definiert werden müssen um ein aussagekräftiges, an der Realität gleichendes Ergebnis zu erhalten. Dies ist aufgrund unterschiedlicher Simulationstiefen und Informationen je nach Projektstand eine Hürde die es zu berücksichtigen gilt.

5.2. Erreichte Technologietransfer / Wissenstransfer

Aebi Schmidt Deutschland GmbH

Durch das Projekt InnoEKom ist Aebi Schmidt in der Lage zukünftig Fahrantriebs- und Gesamtenergiemanagementsysteme in Kommunalfahrzeugen, während der Entwicklungsphase, zu simulieren und zu verbessern. Des Weiteren können die Simulationsdaten genutzt werden um kundenspezifische Lastzyklen bzw. mögliche Einsatzszenarien des Kunden genauer zu ermitteln und wo möglich zu optimieren.

GreenIng GmbH & Co. KG

InnoEKom hilft der GreenIng GmbH & Co. KG aktuelle und zukünftige Kundenprojekte noch zielgerichteter und effizienter zu bearbeiten. Es kann nun ein noch breiteres Feld an technischen Lösungen in die Projekte einfließen. So kann das Thermomanagement durch Einbindung einer Wärmepumpe in anwendungsoptimierten, unterschiedlichen Komplexitätsgraden entsprechend der Fahrzeuganforderung eingesetzt werden. Ein modulares Batteriesystem kann jetzt abhängig von der Leistungs- und Kapazitätsanforderung sowohl in einzelnen Fahrzeugtypen als auch in Fahrzeugflotten den jeweiligen Betriebsanforderungen angepasst werden.