

# Abschlussbericht

## Elektrifizierung eines knickgelenkten Geräteträges für den 4 Jahreseinsatz und im schweren Winterdienst

**DBU-Aktenzeichen: 32380**

**HOLDER**

**Max Holder GmbH**

Max-Holder-Str. 1, 72555 Metzingen

Telefon: +49 71 23 966-0

Telefax: +49 71 23 966-213

Internet: [www.max-holder.com](http://www.max-holder.com)

Abschlussbericht über das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte  
Entwicklungsprojekt, AZ 32380

Von

Max Holder GmbH; Christian Mayer, Sebastian Reusch

Metzingen, 28.04.2017

Der Bericht kann über die Max Holder GmbH bezogen werden.

11/95		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>32380/01</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>104.000,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Elektrifizierung eines knickgelenkten Geräteträgers für den 4 Jahreseinsatz und im schweren Winterdienst</b>			
<b>Stichworte</b>		Verteilergetriebe, Reduzierung Kraftstoffverbrauch, Reduzierung Schadstoffemissionen			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>18 Monate</b>		<b>10.08.2015</b>		<b>09.02.2017</b>	
Zwischenberichte:		Kurzbericht zum		Zwischenbericht zum	
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Max Holder GmbH Max-Holder-Straße 1 72555 Metzingen		Tel 07123 966-393 Fax 07123 966-148	
				Projektleitung Herr Christian Mayer	
				Bearbeiter Herr Christian Mayer	
<b>Kooperationspartner</b>					
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Ziel des Vorhabens war die Elektrifizierung eines knickgelenkten Geräteträgers auf Basis eines Holder S990 Erprobungsträgers für den vier Jahreseinsatz Ziel war der Nachweis der Systemeffizienzsteigerung um 20 %. Der Nachweis sollte über definierte Testzyklen anhand eines dieselektrischen Kommunalfahrzeuges erbracht werden.</p> <p>Es wurde erforscht, inwiefern sich elektrische Antriebe für den kommunalen Einsatz und im schweren Winterdienst (Schneeräumen) eignen. Hierbei spielt die Absicherung gegen Niedrigtemperaturen und Stößen eine wichtige Rolle. Zudem wurden die Vorteile von dieselektrischen Antrieben (Fahrantrieb rein elektrisch. Zapfwelle und Hydraulikversorgung über Dieselmotor) im Vergleich zu dieselhydraulischen Antrieben aufgezeigt.</p> <p>Folgende Ergebnisse wurden erreicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es wurde der Nachweis auf einem nach ECE R85 zertifizierten Teststand erbracht, dass je nach Steigung bis zu 2 Stunden rein elektrisches Fahren (nur der Fahrantrieb ohne Nebenaggregate) möglich ist.</li> <li>• Weiteres Ziel war der Nachweis einer Steigerung der Systemeffizienz um 20 %. Der Nachweis wurde über definierte Testzyklen anhand eines Testlaufes nach ECE R85 erbracht.</li> </ul>					

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Im Vorhaben wurde die Elektrifizierung eines knickgelenkten Geräteträgers für den 4 Jahreseinsatz erforscht. Hier wurde erforscht, ob sich elektrische Antriebe für den kommunalen Einsatz, besonders im schweren Winterdienst (Schneeräumen und Schneefräsen) eignen.

Die Projektarbeiten konzentrierten sich im Wesentlichen auf folgende Kernbereiche:

- Entwicklung von Lastkollektiven: Das Verhältnis der im Automobilstandard angegebenen Nennleistung zur Dauerleistung der E-Aggregate kann im Off-Road Bereich nicht angewendet werden, da dort deutlich längere Zeitabschnitte mit hoher Last gefahren werden müssen. Hier ist ein großer Unterschied zu On-Road Anwendungen festzustellen, was in der Auslegung der Aggregate berücksichtigt werden muss. In der Realerprobung wird das System dann validiert.
- Entwicklung der Fahrtriebsregelung und Schnittstellen zwischen E-Antrieb und Fahrzeughardware
- Implementierung in einen prototypischen Geräteträger

Die Inhalte und Ergebnisse sind im Projektabschlussbericht dargestellt. Die Bearbeitung des Projektes erfolgte durch ein Projektteam, das interdisziplinär aus Mitarbeitern der am Prozess beteiligten Fachabteilungen zusammengesetzt war. Die Terminplanung und –steuerung erfolgte unter Anwendung der üblichen Methoden des Projektmanagements.

Folgende Ergebnisse wurden erreicht:

- Es wurde der Nachweis auf einem nach ECE R85 zertifizierten Teststand erbracht, dass je nach Steigung bis zu 2 Stunden rein elektrisches Fahren (nur der Fahrtrieb ohne Nebenaggregate) möglich ist.
- Weiteres Ziel war der Nachweis einer Steigerung der Systemeffizienz um 20 %. Der Nachweis wurde über definierte Testzyklen anhand eines Testlaufes nach ECE R85 erbracht.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die Ergebnisse des Projektes werden durch Fachartikel, Messen, Präsentation bei Kunden und den bestehenden Kundenstamm öffentlich gemacht.

### ***Fazit***

Das durchgeführte Projekt hat der Max Holder GmbH einen enormen Wissenszuwachs im Bereich der Elektromobilität für zukünftige Projekte gegeben. Besonders die Auslegung von Elektromaschinen inklusive der benötigten Komponenten auf Off-Road-Anwendungen im Vergleich zum Automobilstandard, hat für enormen Wissenstransfer gesorgt. Weiterhin konnte mit dem durchgeführten Projekt bewiesen werden, dass Elektroantriebe grundsätzlich für multifunktionale Geräteträger geeignet sind. Allerdings konnte auch aufgezeigt werden, dass es Stand heute nicht möglich ist, auch die Nebenaggregate wie zum Beispiel die Zapfwelle auf längere Zeit elektrisch zu betreiben, da die momentan verfügbaren Batterien, keine längere Einsatzzeiten zulassen würden.

## 1. Verzeichnisse

### I. INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Verzeichnisse</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>4. Hauptteil</b> .....	<b>12</b>
3.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	12
3.2 Projektverlauf .....	12
3.3 Projektergebnisse .....	23
3.4 Umweltrelevanz.....	24
<b>5. Fazit</b> .....	<b>26</b>
<b>6. Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>27</b>

## II. VERZEICHNIS DER BILDER, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN

Abbildung 1: Holder Systemfahrzeug mit Knicklenkung .....	9
Abbildung 2: Heutiger Entwicklungsstand eines Powertrains .....	10
Abbildung 3: S990 im Winterdienstesinsatz.....	12
Abbildung 4: Mögliches Gesamlayout des elektrifizierten Prototyps .....	13
Abbildung 5: Einbauuntersuchungen .....	14
Abbildung 6: Kraftfluss schnelle Übersetzung.....	15
Abbildung 7: Kraftfluss langsame Übersetzung .....	15
Abbildung 8: ECE R85 zertifizierter Teststand .....	18
Abbildung 9: Temperaturverlauf der Motorwicklungen.....	18
Abbildung 10: Visualisierung der berechneten Lastpunkte .....	19
Abbildung 11: Visualisierung der berechneten Lastpunkte.....	19
Abbildung 12: Systemlayout für den elektrischen Fahrantrieb.....	20
Abbildung 13: CAD Layout des elektrifizierten Erprobungsträgers .....	21
Abbildung 14: Display zur Visualisierung der Prozessdaten.....	21
Abbildung 15: Links – S990 Serienmaschine / Rechts – Ziel S 990 elektrifiziert Erprobungsträger ..	22
Abbildung 16: Holder Verteilergetriebe .....	22

## III. VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Beispielhafte Berechnung eines Lastpunktes .....	15
Tabelle 2: Darstellung der Projektergebnisse .....	23
Tabelle 3: Energiebilanz für knickgelenkte Fahrzeuge in deutschen Kommunen .....	25

### 2. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Elektrifizierung eines knickgelenkten Geräteträgers auf Basis eines Holder S990 Erprobungsträgers für den vier Jahreseinsatz. Ziel war der Nachweis der Systemeffizienzsteigerung um 20 %. Der Nachweis sollte über definierte Testzyklen anhand eines dieselektrischen Kommunalfahrzeuges erbracht werden.

Es wurde erforscht, inwiefern sich elektrische Antriebe für den kommunalen Einsatz und im schweren Winterdienst (Schneeräumen) eignen. Hierbei spielt die Absicherung gegen Niedrigtemperaturen und Stößen eine wichtige Rolle. Zudem wurden die Vorteile von dieselektrischen Antrieben (Fahrantrieb rein elektrisch, Zapfwelle und Hydraulikversorgung über Dieselmotor) im Vergleich zu dieselhydraulischen Antrieben aufgezeigt.

#### **Folgende Ergebnisse wurden erreicht:**

- Es wurde der Nachweis auf einem nach ECE R85 zertifizierten Teststand erbracht, dass je nach Steigung bis zu 2 Stunden rein elektrisches Fahren (nur der Fahrantrieb ohne Nebenaggregate) möglich ist.
- Weiteres Ziel war der Nachweis einer Steigerung der Systemeffizienz um 20 %. Der Nachweis wurde über definierte Testzyklen anhand eines Testlaufes nach ECE R85 erbracht.

Die Förderung erfolgte durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Entwicklungsprojekt AZ 32380.

### 3. Einleitung

#### **Problemdarstellung und Bewertung**

Die Firma Holder entwickelt, produziert und vertreibt seit 1954 Spezialfahrzeuge, die auch als Geräteträger mit Knicklenkung weltweit bekannt geworden sind. Einsatzbereiche dieser sogenannten Knicklenker finden sich u.a. bei selbstfahrenden Bau- und Arbeitsmaschinen bei denen es auf eine gute Wendigkeit auf kleinem Raum ankommt oder aber in der Forsttechnik, sowie bei allradgetriebenen Kommunalfahrzeugen. Kommunale Anwendungen oder Dienstleistungen wie z. B. Mähen, Kehren, Schneeräumen sowie Wein- und Obstbau sind häufige Anwendungsbereiche. Die Knicklenkung sorgt für Wendigkeit, Genauigkeit, Spurtreue, kleinste Wendekreise und optimale Kraftübertragung. Weitere Vorteile der Fahrzeuge liegen darin, dass weniger Rangieraufwand, wenig manuelle Arbeit, präzises und radnahes Arbeiten, Bodenschonung und minimaler Reifenabrieb zu verzeichnen sind. Ein weiterer Grund für die außerordentliche Anwendungsbreite der Fahrzeuge liegt darin, dass diese mit verschiedensten Anbaugeräten kombiniert werden können wie z.B. Kehrbürsten, Schneefräsen, Mähwerken, Laubschneidern, Mulchern etc.



Abbildung 1: Holder Systemfahrzeug mit Knicklenkung

Die Knicklenkung ist ein Kennzeichen der Holder Fahrzeuge, sie ist die Bezeichnung für eine besondere Form der Fahrzeuglenkung. Diese setzt voraus, dass das zwei- oder mehrachsige Fahrzeug aus mindestens zwei Teilen besteht, die mit einem Gelenk verbunden sind. Die Lenkung erfolgt dadurch, dass das Vorderteil gegenüber dem Hinterteil abgeknickt bzw. verdreht werden kann.

Ein weiteres Kennzeichen einiger Holder-Fahrzeuge ist ein Getriebe, mit dem die verschiedenen Anbaugeräte über einen zentralen Antriebsmotor angetrieben werden können. Dieses Getriebe hat zusätzlich noch die wichtige Funktion das Fahrzeug zu versteifen und zu stabilisieren.

Knicklenker werden Stand heute, aufgrund der Anforderungen an Nebenabtriebe und Leistungseigenschaften der Antriebsquelle, ausschließlich mit Dieselmotoren angetrieben. Die verwendeten Wirkprinzipien des Antriebs sind teils rein hydraulisch oder als umschaltbare Kombination zwischen mechanischem und hydraulischem Wirkprinzip zur Leistungsübertragung ("DualDrive") realisiert. Bedingt durch die weiteren Anforderungen, wie geringe Bauraumdimensionen und Eigenschaften der Nebenantriebe, sind Kombinationsmöglichkeiten und der Einsatz verschiedener fortschrittlicher Technologien wie z.B. Gasmotoren, Benzinmotoren oder auch elektrischer Antriebe, beschränkt.

Auf dem Markt verfügbare Knicklenker, z. B. Radlader, verfügen über ein starres Getriebe-Konzept, d. h. es wird nur eine Getriebeübersetzung auf eine Antriebsquelle, z. B. Dieselmotor abgestimmt. In diesem Fall ist die maximale Drehzahl zur Erreichung der maximalen Geschwindigkeit und der Arbeitsfunktionen notwendig. Von diesem, auch bei Firma Holder gültigen Stand der Technik, soll sich dieses Vorhaben deutlich abheben.

### ***Beschreibung des Standes der Technik bei Holder***

Gegenwärtig werden Knicklenker über ein Powertrain-Getriebekonzept angetrieben. Hierbei ist der Dieselmotor fest an den Guss-Antriebsstrang angeflanscht.

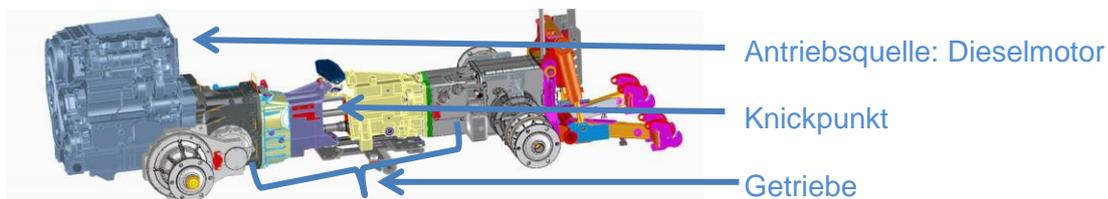


Abbildung 2: Heutiger Entwicklungsstand eines Powertrains

Der Powertrain bildet das tragende Element des Fahrzeuges. Hierbei sind die Achsen mit festen Achsabständen, ein Teil des Getriebekonzeptes. Die Dieseldrehzahl wird über feste Übersetzungsverhältnisse durch den Powertrain geleitet. Dadurch sind Fahrgeschwindigkeiten (im mechanischen Gang), Zahnradpumpendrehzahlen, Zapfwellendrehzahlen etc. direkt aneinander gekoppelt. Zudem werden Klimakompressor und Lichtmaschine direkt vom Motor angetrieben. Daher besteht eine hohe Abhängigkeit von der Motordrehzahl. Die für den hydraulischen Fahrmodus relevanten hydraulischen Geräteverstellpumpen werden heute auf die Fahrtriebepumpe aufgeflanscht, das bedeutet eine hohe Abhängigkeit von Kom-

patibilität der Komponenten. Wenn z.B. Anbaugeräte über eine Zapfwelle angetrieben werden sollen, ist zur Steuerung einfach mit dem Gaspedal oder Handgashebel die Drehzahl des Motors und damit die Zapfwelldrehzahl zu regeln.

### ***Differenzierung zum Stand der Technik***

Auf dem Markt verfügbare Knicklenker verfügen ausschließlich über Dieselmotoren. Holder möchte mit diesem Vorhaben den Ansatz verfolgen, verschiedene Antriebsquellen beliebig variabel und ohne nennenswerten Anpassungsaufwand zu nutzen.

## 4. Hauptteil

### 3.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Erforschung, inwiefern sich elektrische Antriebe für den kommunalen Einsatz im schweren Winterdienst (Schneeräumen) eignen.

#### Warum soll Elektrifiziert werden?

Durch die Elektrifizierung des Fahrtriebs wird je nach Anwendungsfall eine Systemeffizienzsteigerung um 20 % angestrebt. Zudem sollen die entsprechenden Schadstoffemissionen um ca. 25% gesenkt werden können. Durch die Elektrifizierung soll zudem die Fahrgeschwindigkeit von derzeit 40 km/h auf 60 km/h erhöht werden. Weiterhin ergeben sich neue Anwendungsgebiete (Flughäfen, Parkhäuser, Friedhöfe etc...).

### 3.2 Projektverlauf

Es wurde erforscht, inwiefern sich elektrische Antriebe für den kommunalen Einsatz und im schweren Winterdienst (Schneeräumen) eignen. Hierbei spielt die Absicherung gegen Niedrigtemperaturen und Stößen eine wichtige Rolle. Zudem wurden die Vorteile von diesel-elektrischen Antrieben (Fahrtrieb rein elektrisch. Zapfwelle und Hydraulikversorgung über Dieselmotor) im Vergleich zu dieselhydraulischen Antrieben aufgezeigt.



Abbildung 3: S990 im Winterdienstinsatz

Folgende Entwicklungstätigkeiten wurden durchgeführt:

### AP 1: Pflichtenheft

Nach der Definition der einzelnen Parameter (Pflichtenheft) wurde ein detaillierter Vorgehensplan zur Erreichung der Ziele formuliert. Nachfolgend ist der mögliche Aufbau der Komponenten dargestellt:

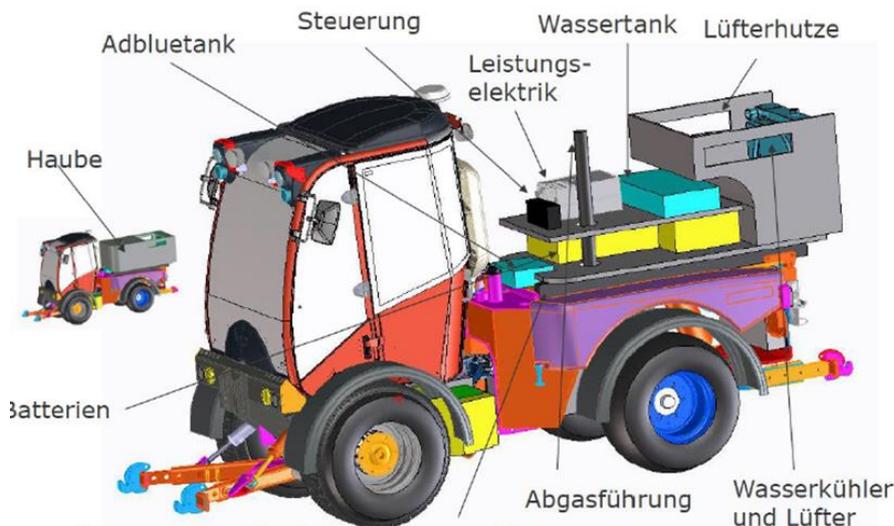


Abbildung 4: Mögliches Gesamtlayout des elektrifizierten Prototyps

### AP 2: Grobkonzeption

Im nächsten Schritt erfolgten die Auslegung des Elektromotors, sowie Berechnungen der benötigten Leistung, Drehzahl und Drehmoment. In erfolgten Bauraumuntersuchungen wurden die einzelnen Positionen analysiert und ausgelegt. In nachfolgendem Bild ist die Einbauuntersuchung des Elektromotors dargestellt. Hier stellte sich heraus, dass um den Bauraum einzuhalten zu können, die E-Aggregate versetzt werden müssen. Weiterhin werden Distanzscheiben von je 80mm benötigt, um den Abstand zwischen E-Aggregat und Reifen gewährleisten zu können.

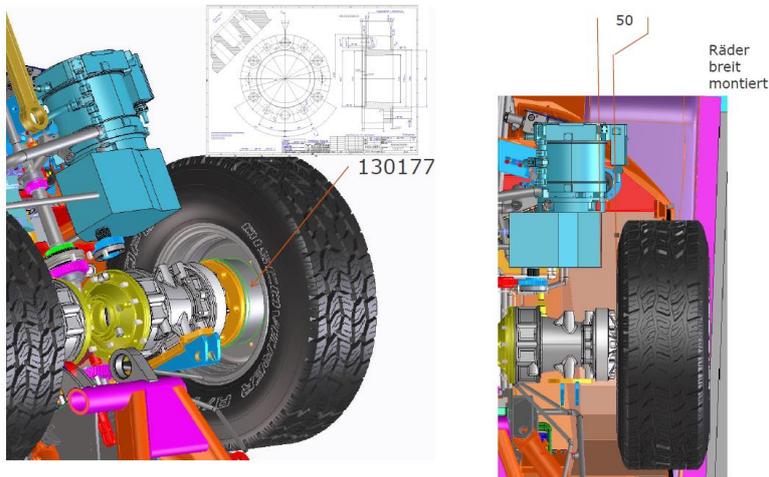


Abbildung 5: Einbauuntersuchungen

### AP 3: Auslegung aufgrund von Lastkollektiven

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden aus den erdenkbaren späteren Einsatzmöglichkeiten und den daraus resultierenden Anforderungen an das Verteilergetriebe aussagekräftige Lastszenarien und Lastkollektive erstellt.

1. **Lastpunkt Straßenfahrt:** Steigung 5%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 34 km/h;
2. **Lastpunkt Arbeitsfahrt:** Steigung 15%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 30 km/h;
3. **Lastpunkt Weinbau:** Steigung 35%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 5 km/h;

Aufgrund des oben genannten Lastkollektivs erfolgte die Auslegung des Elektromotors sowie des Elektrogenerators inkl. Versatzgetriebe.

Anhand des nachfolgenden Getriebeschemas wurden die erforderlichen Drehzahlen, Drehmomente sowie die erforderliche Leistung erforscht und berechnet. Dabei wurde sowohl der schnelle als auch der langsame Gang berücksichtigt.

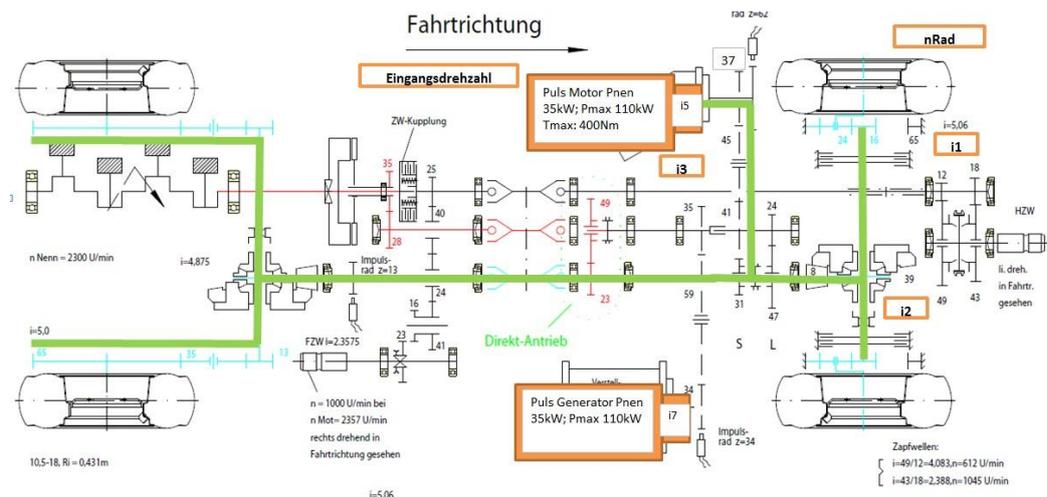


Abbildung 6: Kraftfluss schnelle Übersetzung

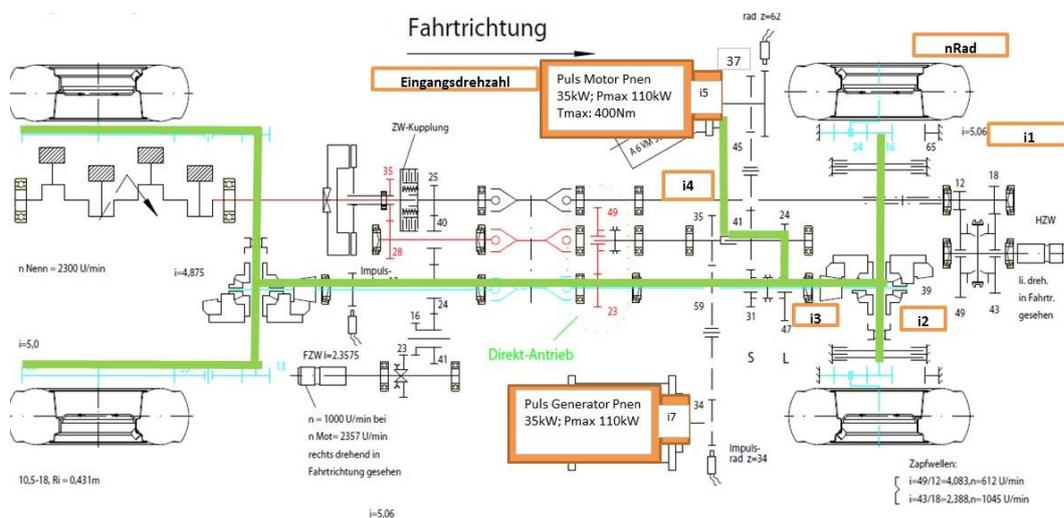


Abbildung 7: Kraftfluss langsame Übersetzung  
■ Kraftfluss elektronischer Fahrentrieb

Beispielhafte Berechnung eines Lastpunktes (Der  $c_w$ -Wert wurde nicht berücksichtigt):

Vorgegebene Werte Übersetzung langsamer Gang	
$i_1$	5,06
$i_2$	4,875
$i_3$	1,958333333
$i_4$	1,108108108
<b><math>i_{ges}</math> langsamer Gang</b>	<b>53,53</b>

Tabelle 1: Beispielhafte Berechnung eines Lastpunktes

Es besteht die Möglichkeit, den Elektromotor mit  $i=5$  und den Elektrogenerator mit  $i=7$  gegeneinander zu tauschen. Daraus resultieren verschiedene Drehzahlen und Momente, bei dem das Verhalten der verschiedenen Übersetzungen auf den Antriebsstrang getestet werden kann.

Nachfolgende Daten wurden mit dem Übersetzungsverhältnis des schnellen Gangs berechnet. Die Lastkollektive wurden auf einem nach ECE R85 zertifizierten Teststand abgefahren. Durch das Abfahren der geforderten Lastprofile konnte gezeigt werden wie lange die E-Maschinen in dem jeweiligen Bereich betrieben werden können.

**1. Lastpunkt Straßenfahrt:** Steigung 5%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 34 km/h; benötigte Leistung 28,52 kW; erforderliches Drehmoment 61,23 Nm; erforderliche Drehzahl am Anflanshpunkt 4450 1/min; Drehzahl des Elektromotors 22500 1/min

**2. Lastpunkt Arbeitsfahrt:** Steigung 15%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 30 km/h; benötigte Leistung 60,52 kW; erforderliches Drehmoment 147,23 Nm; erforderliche Drehzahl am Anflanshpunkt 3927 1/min; Drehzahl des Elektromotors 19635 1/min

**3. Lastpunkt Weinbau:** Steigung 35%; Gewicht 4.500Kg; Geschwindigkeit 5 km/h; benötigte Leistung 22,35 kW; erforderliches Drehmoment 407,25 Nm; erforderliche Drehzahl am Anflanshpunkt 523,62 1/min; Drehzahl des Elektromotors 2618 1/min

Folgende Betriebsdauern ergeben sich über die Zeit:

### Beispielhafte Rechnung anhand des 2. Lastpunktes:

Berechnung Steigung:

$$\alpha [^\circ] = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha [\%]}{100}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{15 [\%]}{100}\right) = 8,54 [^\circ]$$

Berechnung Gewichtskraft:

$$F_G = m * g = m * 9,81 = 4500 \text{ kg} * 9,81 = 44145 \text{ [N]}$$

Berechnung Hangabtriebskraft:

$$F_H = F_G * \sin(\alpha [^\circ]) = 44145 \text{ [N]} * \sin(8,54 [^\circ]) = 6548,49 \text{ [N]}$$

Berechnung Rollreibungskraft:

$$F_{Reib} = \mu * F_G = 0,02 * 44145 \text{ [N]} = 873,13 \text{ [N]}$$

Berechnung Luftwiderstandskraft:

$$F_{Luft} = c_w * A * \frac{\rho * v^2}{2}$$

Berechnung Zugkraft:

$$F_{Zug} = F_{Reib} + F_H = 6548,49 \text{ [N]} + 873,13 \text{ [N]} = 7421,62 \text{ [N]}$$

Berechnung Drehmoment am Reifen:

$$M_{\text{Reifen}} = F_{\text{Zug}} * r = 7421,62 \text{ [N]} * 0,41 \text{ [m]} = 3042,86 \text{ [Nm]}$$

Berechnung Drehmoment am Anflanshpunkt:

$$M_{\text{Anflansch}} = \frac{M_{\text{Reifen}}}{i_{ges}} = \frac{3042,86 \text{ [Nm]}}{20,67} = 147,21 \text{ [Nm]}$$

Berechnung Geschwindigkeit:

$$v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{v \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{3,6} = \frac{30 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{3,6} = 8,33 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Berechnung Drehzahl am Reifen:

$$n_{\text{Reifen}} \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] = \frac{v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * 1000 * 60}{D \text{ [mm]} * \pi} = \frac{8,33 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * 1000 * 60}{838 \text{ [mm]} * \pi} = 190,02 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

Berechnung Drehzahl am Anflanshpunkt:

$$n_{\text{Anflansch}} \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] = n_{\text{Reifen}} * i_{ges} = 190,02 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] * 20,67 = 3927,19 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

$$n_{\text{Anflansch}} \left[ \frac{1}{\text{s}} \right] = \frac{n_{\text{Anflansch}} \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]}{60} = \frac{3927,19 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]}{60} = 65,45 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$$

Berechnung Leistung am Anflanshpunkt.

$$P_{\text{Anflanschg}} = \frac{2 * \pi * n_{\text{Anflansch}} * M_{\text{Anflansch}}}{1000} = \frac{2 * \pi * 65,45 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right] * 147,21 \text{ [Nm]}}{1000} = 60,52 \text{ [kW]}$$

Berechnung Drehzahl Motor:

$$n_{\text{Motor}} \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] = n_{\text{Anflansch}} * i = 3927,19 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] * 5 = 19635 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

	<b>Gang</b>	<b>Betriebsdauer</b>
1. Lastpunkt	Schnell	Unendlich
2. Lastpunkt	Schnell	45 Sekunden
2. Lastpunkt	Langsam	Unendlich
3. Lastpunkt	Langsam	Unendlich
3. Lastpunkt	Schnell	140 Sekunden
4. Lastpunkt	Langsam	Unendlich
4. Lastpunkt	Schnell	160 Sekunden

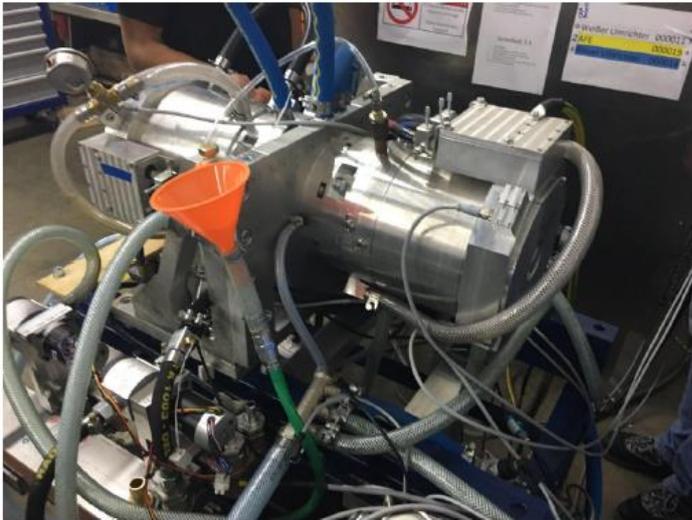
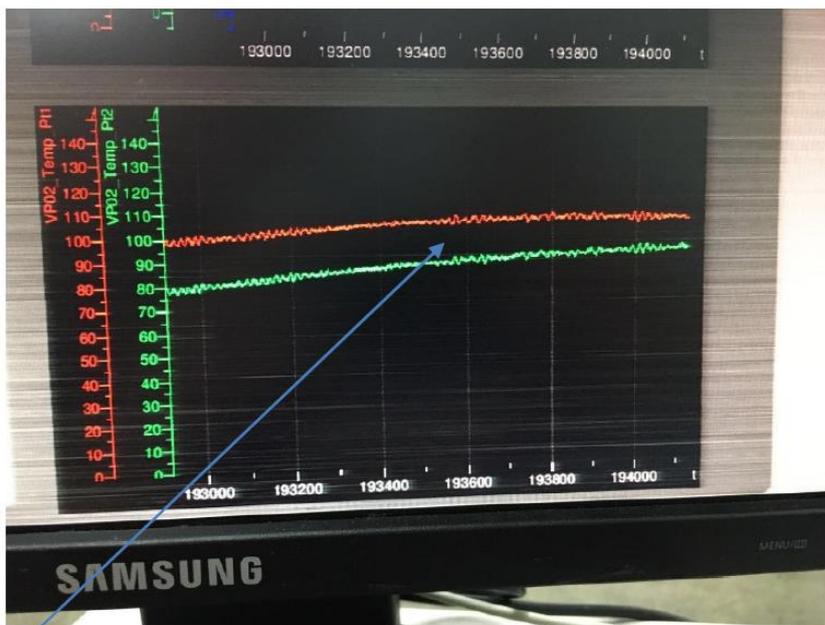


Abbildung 8: ECE R85 zertifizierter Teststand



Temperaturverlauf der Motorwicklungen. Wie hier zu sehen ist, befinden sich die Verläufe im Sättigungsbereich, d.h. es wäre ein Dauerbetrieb bei diesem Lastpunkt möglich.

Abbildung 9: Temperaturverlauf der Motorwicklungen

Wie in der Abbildung 10 ersichtlich ist, steigt mit zunehmender Geschwindigkeit die erforderliche Leistung deutlich an. Bei Abbildung 11 ist ersichtlich, dass um eine höhere Steigung zu überwinden, ein deutlich höheres Drehmoment erforderlich ist.

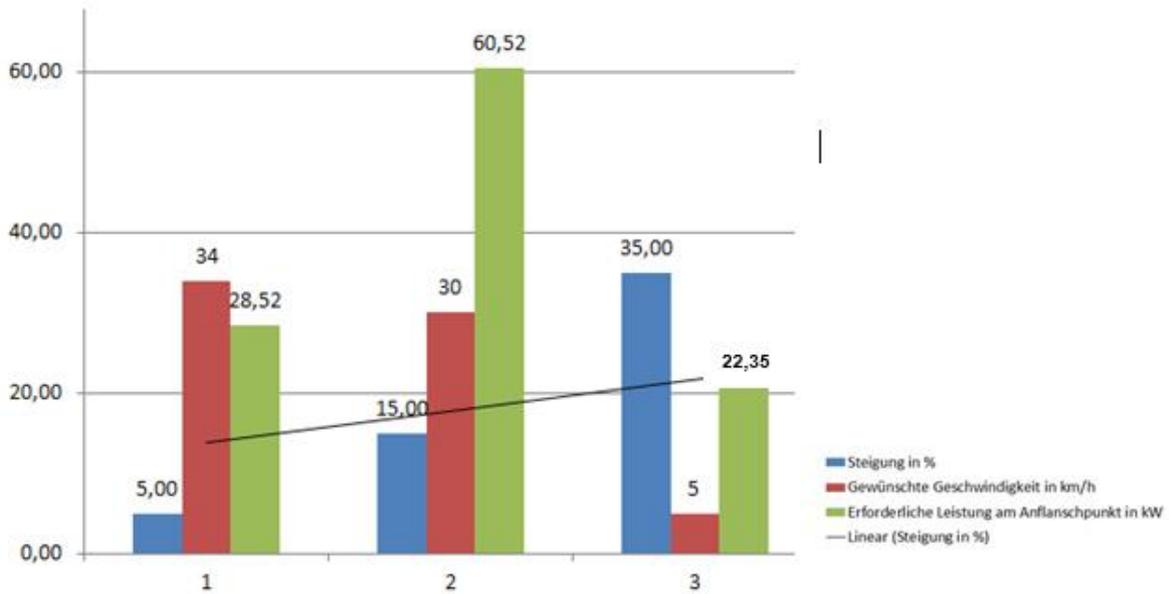


Abbildung 10: Visualisierung der berechneten Lastpunkte

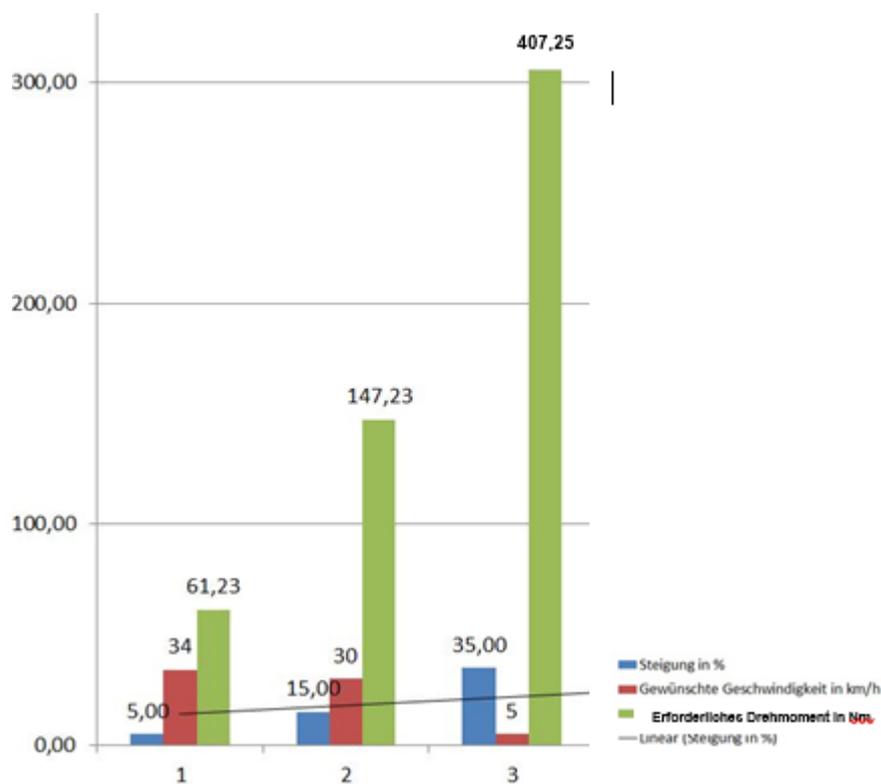


Abbildung 11: Visualisierung der berechneten Lastpunkte

### AP 4 / 5: Entwicklung der Fahrtriebsregelung und Schnittstellen zwischen E-Antrieb und Fahrzeughardware

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde die Fahrtriebsregelung und Leistungselektronikeinheit für das rein elektrische Fahren ohne Hybrid entwickelt. Ferner wurden die Schnittstellen zwischen E-Antrieb und Fahrzeughardware, sowie die Ansteuerung der Elektrokomponenten in Abhängigkeit der entwickelten Lastkollektive definiert.

Die unten gezeigte Grafik zeigt das favorisierte Systemlayout des elektrischen Fahrtriebs.

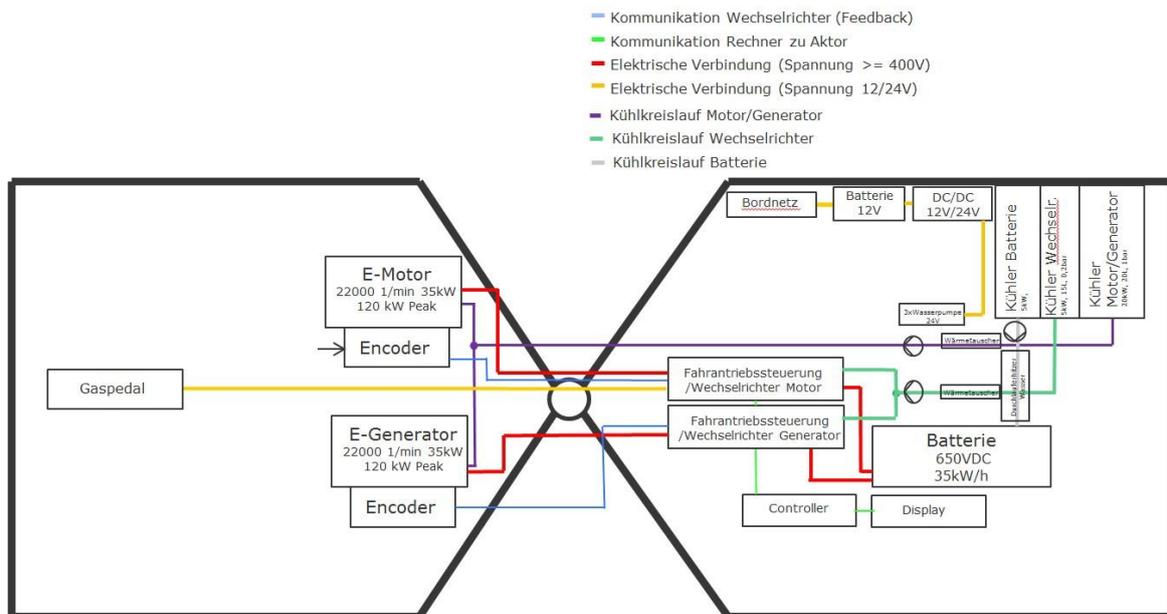


Abbildung 12: Systemlayout für den elektrischen Fahrtrieb

Auf dem Display sollen wichtige Prozessdaten des Erprobungsträgers visuell dargestellt werden, um einen einfachen Überblick über den aktuellen Fahrzeugstatus erhalten zu können. Dies sind unter anderem aktuelle Betriebstemperaturen, momentaner Stromverbrauch, Durchschnittsverbrauch, Drehzahlen und der Ladezustand der Batterie.

In der nachfolgenden Abbildung ist das CAD Layout des elektrifizierten Erprobungsträgers ersichtlich. Auf dem hinteren Aufbau wurden folgende Komponenten untergebracht:

- Umrichter für die Elektromaschine im Motorprinzip
- Umrichter für die Elektromaschine im Generatorprinzip
- DC/DC-Wandler für die Versorgung des 12VDC Bordnetzes, welcher die Batteriespannung von 400VDC auf 12VDC transformiert
- Wasserglykolkühler für die Kühlung der Elektromaschinen

- Wasserglykolkühlung für die Kühlung der Leistungselektronik und der Steuerelektronik
- Lithium-Ionen-Batterie mit einer Energie von 40kW/h
- Wasserpumpe für den Kühlkreislauf
- Steuergerät für die Ansteuerung und Regelung des Gesamtsystems

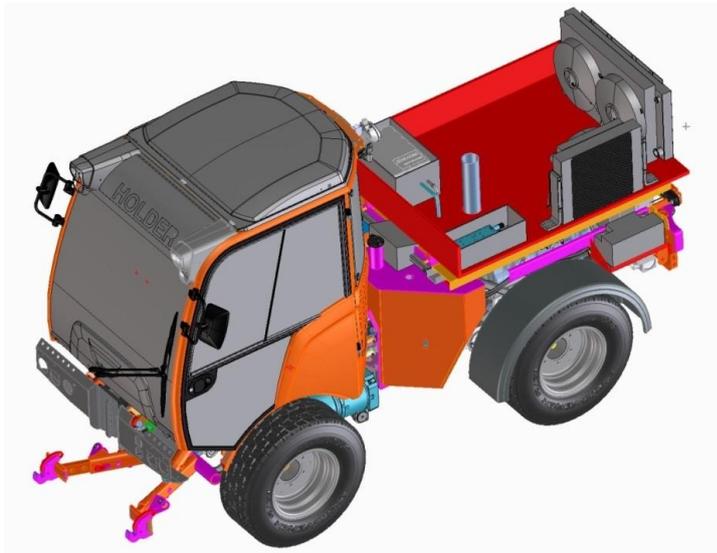
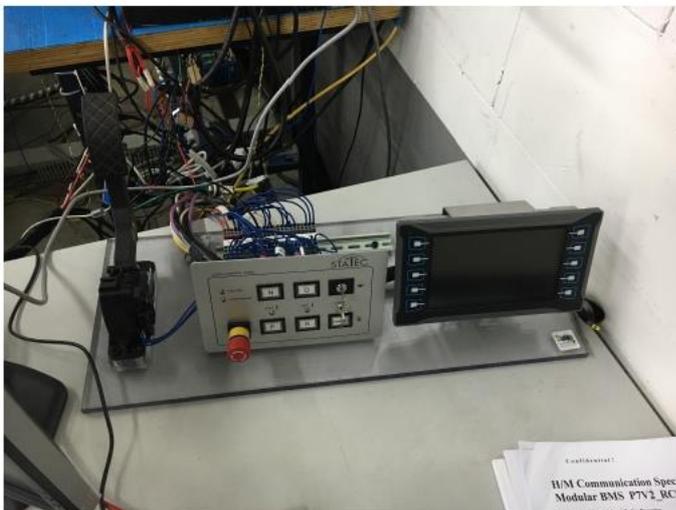


Abbildung 13: CAD Layout des elektrifizierten Erprobungsträgers



Gaspedal, Gangwahleinheit und Display sind am Hydac-Steuergerät angeschlossen.

Abbildung 14: Display zur Visualisierung der Prozessdaten

### AP 6: Implementierung in einen prototypischen Geräteträger

Der Erprobungsträger (Bild 11 – rechts) wurde auf Basis einer Serienmaschine (Bild 11-links) entwickelt.

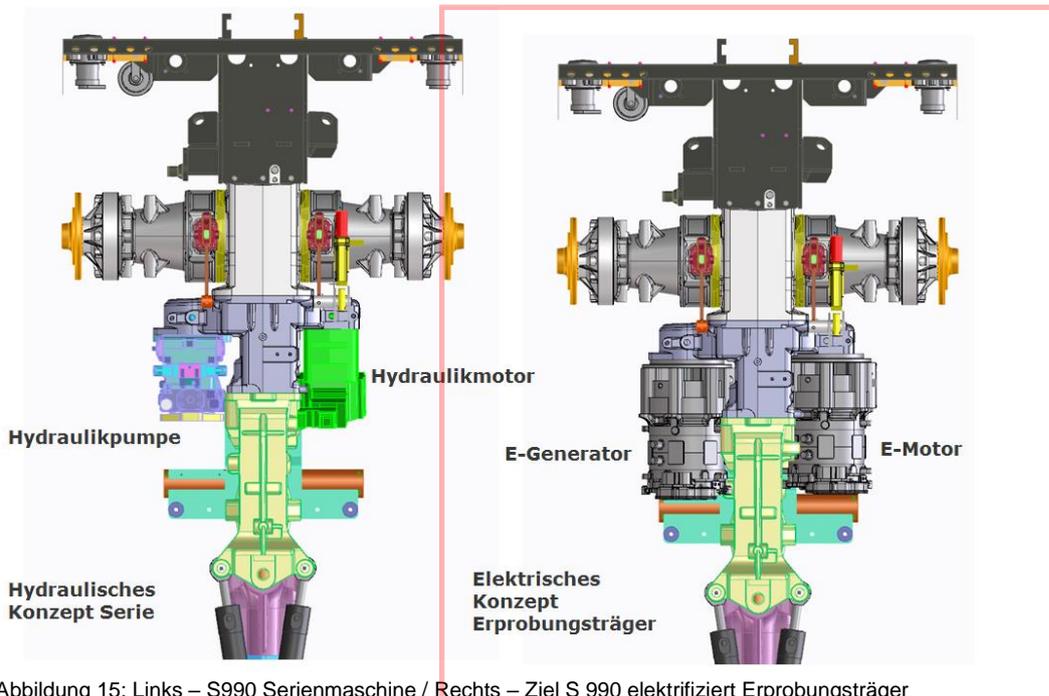


Abbildung 15: Links – S990 Serienmaschine / Rechts – Ziel S 990 elektrifiziert Erprobungsträger

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Holder-Verteilergetriebe mit den angebauten Elektromaschinen (Motor und Generator) inklusive Übersetzungsgetriebe.



Abbildung 16: Holder Verteilergetriebe

### 3.3 Projektergebnisse

Parameter	Stand der Technik	Ziel	
		Ziel	Ist
Elektroantriebe im kommunalen Umfeld - Winterdienst	Nicht verfügbar	Nachweis der Eignung soll erstmalig erbracht werden	Es wurde der Nachweis auf dem Teststand erbracht, dass je nach Steigung bis zu 2 Stunden rein elektrisches Fahren (nur Fahrtrieb ohne Nebenaggregate) möglich ist.
Systemeffizienzsteigerung		+20%	+20%
Kraftstoffverbrauch Kommunalfahrzeug zu angegebenen Lastkollektiven	10l / h bei <b>90 PS</b>	8l/h bei 90 PS	8l/h bei 90 PS
Fahrgeschwindigkeiten	Max. 40 km/h in dieser Leistungsklasse		34 km/h
Fahr- und Arbeitsantriebe	Getrennte Systeme: Fahrtrieb Diesel, Zapfwelle Diesel		Getrennte Systeme: Fahrtrieb elektrisch, Zapfwelle Diesel
Mögliche Nebenabtriebe	Zahnradpumpe + Klimakompressor am Dieselmotor	Zahnradpumpe + Klima-kompressor am Dieselmotor	Zahnradpumpe + Klima-kompressor am Dieselmotor
Energieeffizienz	Max. Motordrehzahl >2.500 1/min (z.B. für 40 km/h)	<p>Dieseldrehzahl bei elektrischer Fahrt 800 1/min aufgrund von Lenkung und Lichtmaschine.</p> <p>Bei Arbeitseinsatz (Schneefräsen) Dieseldrehzahl 2500 1/min aufgrund mechanischer Verbindung zu Zapfwelle</p>	10% Energieeinsparung durch höheren Gesamtwirkungsgrad der Elektrokomponenten
Schadstoffemissionen	CO: 1,082 g/kWh HC+NOX 4,247 g/kWh Partikel: 0,288 g/kWh Abgasstufe 3A	Reduzierung der Emissionen	CO: 1,021 g/kWh HC: 0,19 g/kWh NOX: 3,1 Partikel: 0,021  Abgasstufe 3B

Tabelle 2: Darstellung der Projektergebnisse

## 3.4 Umweltrelevanz

Eine besondere Innovation des Projektes liegt darin, dass der Power Train die vollkommene Unabhängigkeit gegenüber der Antriebsquelle bei gleichzeitigem Einbinden verschiedenster Wirkprinzipien zur Leistungsübertragung im Fahrantrieb ermöglicht. Diese kann mechanisch, hydraulisch oder elektrisch erfolgen. Es ist zudem die Ausweitung auf hybride Antriebe und Kombinationen angedacht.

Ermöglicht wird dies durch die in diesem Vorhaben zu entwickelnde Technologie, die eine hohe Variabilität bzgl. der Antriebsquelle, aber auch bzgl. der Achsabstände und Traglasten mit sich bringt. Der Power Train soll es zudem ermöglichen mit verschiedenen Nebenabtrieben zu operieren. Hierzu soll erstmalig die Einbindung verschiedener Nebenabtriebe unabhängig der Antriebsquelle ermöglicht werden. Diese können hydraulisch oder elektrisch angeflanscht werden.

Weiterhin ist mit dem Power Train ein rein elektrischer Betrieb möglich wie in diesem Projekt dargestellt wurde. Dies ermöglicht es in Zukunft, wenn die Batterien dies zulassen, ein rein elektrischer Antriebsstrang anbieten zu können.

Einer vom Ministerium für Verkehr und Infrastruktur in Baden-Württemberg in Auftrag gegebenen Studie zufolge „emittierten im Jahr 2010 Maschinen der Sektoren Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Industrie, Garten und Hobby deutschlandweit etwa die gleiche Menge an Abgaspartikeln wie der gesamte Straßenverkehr. Bei den Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) entsprachen die Emissionen der mobilen Maschinen 2010 etwa einem Viertel derer des Straßenverkehrs<sup>1</sup>“. Genau hier setzt das Vorhaben an.

Nach heutiger Einschätzung lassen sich Kraftstoffeinsparungen von ca. 20% gegenüber aktuell auf dem Markt verfügbaren Technologien realisieren. Alleine nur Kommunen können beispielsweise bei 1.000 Fahrzeugen bei 500 Stunden Einsatz pro Jahr ca. 1 Mio. Liter Kraftstoff p.a. einsparen<sup>2</sup>.

In den kommenden Jahren treten neue Abgasgesetzgebungen in Kraft. Um diese einhalten zu können, werden für moderne Dieselmotoren immer mehr zusätzliche Komponenten für die Abgasnachbehandlung benötigt. Aus Platzgründen ist es nicht möglich, diese Motoren ohne große konstruktive Eingriffe in den heutigen Fahrzeugen einzusetzen. Alternative An-

---

<sup>1</sup> Endbericht des ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH zum Thema „Schadstoffemissionen und Belastungsbeitrag mobiler Maschinen in Baden-Württemberg“ vom Juli 2014

<sup>2</sup> 1.000 Fahrzeuge, Verbrauch 10L/h, Reduktion Kraftstoffverbrauch 20%. Dies entspricht bei einer Nutzungsdauer von 500 Stunden p.a. ca. 1 Mio. Liter Kraftstoffersparnis.

triebsmotoren lassen die erforderlichen Nebenaggregate nicht zu. Zu erwähnen ist auch, dass erste größere Städte Dieselfahrzeuge bei der Beschaffung kommunaler Fahrzeuge bereits nicht mehr berücksichtigen. Durch diese neue Technologie wird durch eine intelligente Abschaltung der Verbrennungsmaschine sowie den E-Antrieb, ebenfalls ein schadstofffreies Fahren in geschlossenen Räumen ermöglicht

### Energiebilanz für knickgelenkte Fahrzeuge in deutschen Kommunen

(nicht berücksichtigt sind weitere knickgelenkte Fahrzeuge, sowie Fahrzeuge außerhalb knickgelenkten Fahrzeuge, z. B. Transportsektor, Traktoren,...).

Parameter	Stand der Technik	Anzahl Fahrzeuge in deutschen Kommunen	Nutzungsdauer	Reduktion durch VTG Technologie	Einsparungspotenzial
Kraftstoffverbrauch knickgelenkte Fahrzeuge in deutschen Kommunen	Ca. 10 l/h	10.000	500 Stunden pro Jahr	- 20% Kraftstoffeinsparung (entspricht 2l/h Einsparung)	- <b>10.000.000 Liter Kraftstoff pro Jahr</b> - 26.400.000 kg CO <sub>2</sub> <sup>3</sup>
	Ca. 10 l/h	10.000	500 Stunden pro Jahr	-100% Kraftstoffeinsparung bei rein elektrischer Nutzung (entspricht 10l/h Einsparung)	- <b>50.000.000 Liter Kraftstoff pro Jahr</b> - 132.000.000 kg CO <sub>2</sub>
Kraftstoffverbrauch kommunale Transporter in deutschen Kommunen	Ca. 10 l/h	15.000	700 Stunden pro Jahr	- 20% Kraftstoffeinsparung (entspricht 2l/h Einsparung)	- <b>21.000.000 Liter Kraftstoff pro Jahr</b> - 55.440.000 kg CO <sub>2</sub>
	Ca. 10 l/h	15.000	700 Stunden pro Jahr	-100% Kraftstoffeinsparung bei rein elektrischer Nutzung (entspricht 10l/h Einsparung)	- <b>105.000.000 Liter Kraftstoff pro Jahr</b> - 277.200.000 kg CO <sub>2</sub>

Tabelle 3: Energiebilanz für knickgelenkte Fahrzeuge in deutschen Kommunen

<sup>3</sup> Faktor: 2.640 g CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel

## 5. Fazit

Das durchgeführte Projekt hat der Max Holder GmbH einen enormen Wissenszuwachs im Bereich der Elektromobilität für zukünftige Projekte gegeben. Besonders die Auslegung von Elektromaschinen inklusive der benötigten Komponenten auf Off-Road-Anwendungen im Vergleich zum Automobilstandard, hat für enormen Wissenstransfer gesorgt. Weiterhin konnte mit dem durchgeführten Projekt bewiesen werden, dass Elektroantriebe grundsätzlich für multifunktionale Geräteträger geeignet sind. Allerdings konnte auch aufgezeigt werden, dass es Stand heute nicht möglich ist, auch die Nebenaggregate wie zum Beispiel die Zapfwelle auf längere Zeit elektrisch zu betreiben, da die momentan verfügbaren Batterien, keine längere Einsatzzeiten zulassen würden.

Um die Multifunktionalität erhalten zu können und die Vorteile der Elektroantriebe nutzen zu können, wird zukünftig ein serieller Hybrid entwickelt werden. Hierbei kann der Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Gas) im optimalen Kennfeld betrieben werden, was wiederum für einen höheren Wirkungsgrad sorgt. Daraus resultieren ein niedrigerer fossiler Brennstoffverbrauch sowie eine geringere Umweltbelastung.

Das Vorhaben wird von Holder auch zukünftig weiterverfolgt.

### 6. Abkürzungsverzeichnis

$v$  = Geschwindigkeit

$n$  = Drehzahl

$D$  = Durchmesser Reifen

$\alpha$  = Steigung [%]

$m$  = Masse [kg]

$v$  = Geschwindigkeit [m/s]

$\mu$  = Rollreibungszahl

$F_{\text{Reib}}$  = Reibungskraft [N]

$F_G$  = Gewichtskraft [N]

$F_{\text{Luft}}$  = Luftwiderstand [N]

$c_w$  =  $c_w$ - Wert

$\rho$  = Luftdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]

$A$  = Stirnfläche [ $\text{m}^2$ ]

$F_H$  = Hangabtriebskraft [N]

$F_{\text{Zug}}$  = Zugkraft [N]

$M$  = Drehmoment [Nm]

$r$  = Reifenradiusindex [m]

$P$  = Leistung [kW]