

# Modularer Hybridantrieb für Nutzfahrzeuge (HyTruck)



## Schlussbericht

### Teilvorhaben MAN Truck & Bus AG

01.09.2009 – 30.09.2011

Gefördert durch das



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie



---

<b>Vorhaben:</b>	<b>Verbundprojekt: Modularer Hybridantrieb für Nutzfahrzeuge</b> (Kurzbezeichnung: <b>HyTruck</b> )
<b>Teilvorhaben MAN:</b>	Projektleitung; Entwicklung, Aufbau und Erprobung von vier Hybrid-Lkw-Prototypen in der Fzg-Klasse 12 – 40 t
<b>Fördergeber:</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
<b>Förderkennzeichen:</b>	19 U 9029 A
<b>Ausführende Stelle:</b>	MAN Truck & Bus AG
<b>Projektleiter:</b>	Dr.-Ing. Stefan Kerschl
<b>Anschrift:</b>	MAN Truck & Bus AG Zentralbereich Research Dachauer Strasse 667 80995 München Tel.: 089/1580-3503 Fax: 089/1580-3228
<b>Projektpartner:</b>	ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

München, den 31.10.2011

**In diesem Schlussbericht sind firmen-spezifische Daten und Ergebnisse dargestellt.**

**Aus diesem Grund ist dieser Schlussbericht zeitlich begrenzt auf 5 Jahre vertraulich zu behandeln.**

---

Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>7</b>
1.1.1	Einführung .....	7
1.1.2	Zielsetzung des Vorhabens .....	9
1.1.3	Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen des BMWi .....	10
<b>1.2</b>	<b>Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Planung und Ablauf des Teilprojekts MAN .....</b>	<b>11</b>
1.3.1	Planung des Teilprojekts MAN .....	11
1.3.2	Ablauf des Teilvorhabens MAN .....	16
<b>1.4</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand .....</b>	<b>16</b>
1.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik .....	16
1.4.2	Bisherige Arbeiten der Fa. MAN Truck & Bus.....	17
<b>1.5</b>	<b>Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Hybrid-Technologieträger TGL 12.220 (A1) .....</b>	<b>22</b>
2.1.1	Entwicklung des Hybrid-Basisumfangs.....	25
2.1.2	Systemerweiterung mit elektrischen Nebenaggregaten.....	31
2.1.3	Systemerweiterung für Plug-In-Betrieb .....	40
<b>2.2</b>	<b>Hybrid-Erprobungsfahrzeuge TGL 12.220 (A2).....</b>	<b>48</b>
2.2.1	Entwicklung und Aufbau der Hybrid-Erprobungsfahrzeuge .....	48
2.2.2	Homologation der Erprobungsfahrzeuge .....	50
2.2.3	Erprobung, Optimierung und Absicherung der Erprobungsfahrzeuge ....	53
2.2.4	Kunden-Erprobungseinsatz mit Betreuung und Auswertung .....	55
<b>2.3</b>	<b>Hybrid-Prototypfahrzeug der 26-40t-Gewichtsklasse (A3) .....</b>	<b>61</b>
2.3.1	Analyse von Einsatzprofile von Müllsammelfahrzeugen hinsichtlich Hybridisierung.....	61
2.3.2	Ermittlung Randbedingungen für Hybridsystem für 40t-Fzg-Klasse .....	66
2.3.3	Systemauslegung Hybridsystem für 40t-Fzg-Klasse .....	66
2.3.4	Konzepterstellung für Komponenten-Integration für 26-40t-Fzge .....	69

---

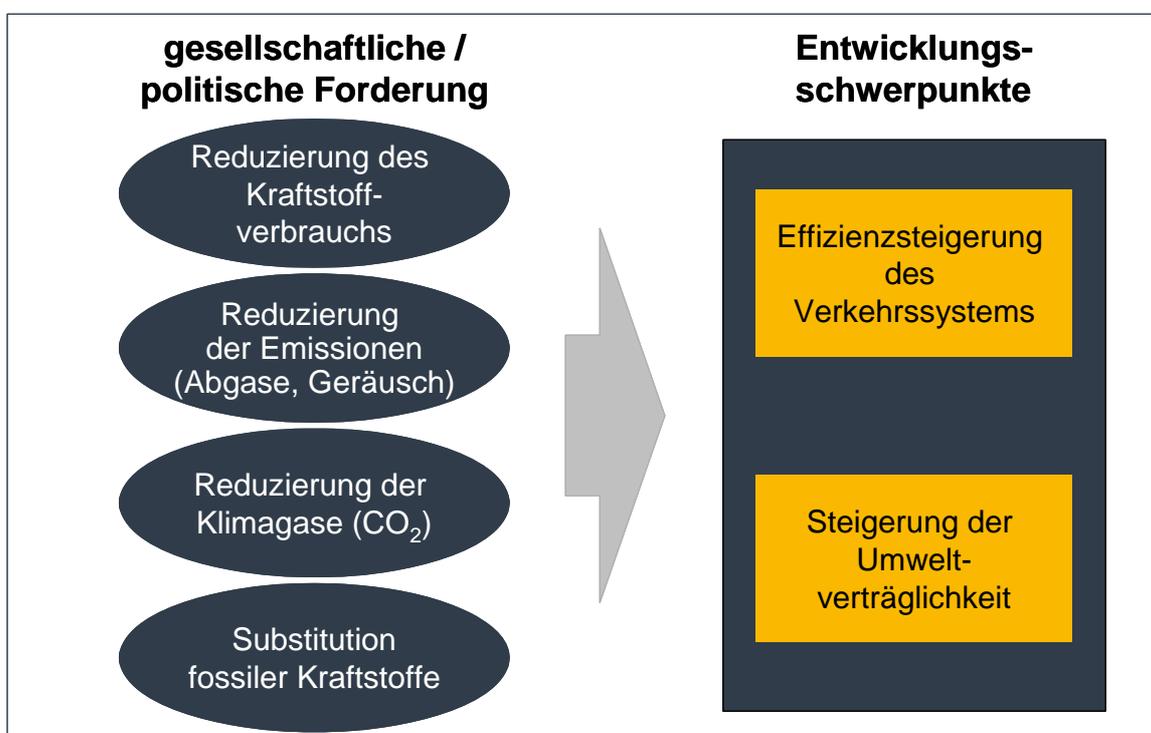
2.3.5	Entwicklung Hybrid-Prototypfahrzeug.....	70
2.3.6	Durchführung von Referenzmessungen .....	74
2.3.7	Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung Hybrid-Prototypfahrzeug .....	75
<b>2.4</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>77</b>
<b>3</b>	<b>Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>81</b>
3.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	81
3.2	Technische Erfolgsaussichten.....	82
3.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	83
<b>4</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>83</b>

# 1 Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

### 1.1.1 Einführung

Im Rahmen der Steigerung der Nachhaltigkeit und Umweltschonung des Transportverkehrs sind gesellschaftliche und politische Forderungen zu erfüllen (siehe **Bild 1.1.1-1**). Während die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen bereits seit längerem stark im Entwicklungsfokus stehen, werden zukünftig auch die Reduzierung der Klimagase, insbesondere CO<sub>2</sub> als auch die Substitution fossiler Kraftstoffe immer wichtiger. Daraus leiten sich als Entwicklungsschwerpunkte die Effizienzsteigerung des Verkehrssystems als auch die Steigerung der Umweltverträglichkeit ab.



**Bild 1.1.1-1:** Entwicklungsschwerpunkte zur Nachhaltigkeit und Umweltschonung

Aus heutiger Sicht wird der Dieselantrieb, insbesondere bei Nutzfahrzeugen mittelfristig die Hauptantriebsquelle bleiben. Daher gilt es vordringlich, aus umweltpolitischer Sicht, die Effizienz dieser Antriebsart weiter zu steigern.

Mehrere Forschungsvorhaben wurden diesbezüglich durchgeführt, um den Kraftstoffverbrauch und gleichzeitig die Emissionen (Abgase und Geräusch) bei Nutzfahrzeugen für den Stadtverkehr - insbesondere Stadtomnibussen - deutlich zu reduzieren, ohne die Fahrleistungen zu schmälern.

Die verschiedenen Fahrzeugklassen im Nutzfahrzeugbereich, Fahrzeuge für Stadt-, Verteiler- und Fernverkehr, Busse im Stadt- und Überlandverkehr sowie Arbeits- und

Baumaschinen, sind für ihren jeweiligen speziellen Einsatzfall ausgelegt. Hinzu kommen Spezial- und Nischenanwendungen wie Kommunal- und Müllfahrzeuge. Damit ist der Markt für jede einzelne Klasse gemessen am Gesamtvolumen klein.

Beim Aufbau von Hybrid-Prototypenfahrzeugen und -Kleinserien stand bis dato die Neuentwicklung speziell auf die jeweiligen Anforderungen zugeschnittener Hybridantriebe für einzelne Fahrzeugklassen im Vordergrund. So wurden bislang Hybridantriebe für die am viel versprechendsten Applikationen, zu denen v.a. der Stadtbus und der Verteiler-Lkw gehören, entwickelt.

Hybridantriebe mit unterschiedlichen Strukturen und Auslegungen werden dafür für die Fahrzeugklassen Lieferverkehr und Stadtbus als aussichtsreich gesehen (**Bild 1.1.1-2**). Erste Prototypen stellen dies eindrucksvoll unter Beweis.



**Bild 1.1.1-2:** Chancen von Hybrid-Antrieben im Nutzfahrzeug

Inzwischen rücken jedoch auch andere Fahrzeugklassen und -applikationen in den Bereich des Interesses, Hybridsysteme einzusetzen.

Jedoch führen auf bestimmte Fahrzeugklassen optimierte Hybridantriebe zu Insellösungen, deren Komponenten und Systeme nicht skalierbar und nicht auf andere Fahrzeugklassen übertragbar sind. Dadurch ergeben sich als Konsequenz niedrige Stückzahlen und dadurch sowohl hohe Entwicklungs- und Komponentenkosten, als auch die Problematik, dass verschiedene Fahrzeug-Applikationen aufgrund zu erwartender geringer Absatzzahlen überhaupt nicht bedient werden können.

Dies gilt sowohl für den Fahrzeughersteller, der über verschiedene Fahrzeugbaureihen hinweg (mit modularen Systemen) Hybridsysteme einsetzspezifisch konfigurieren möchte, als auch für den Hybridgetriebe-Zulieferer, der (mit

skalierbaren Systemen) verschiedene Baureihen mit gleicher Technik bedienen könnte.

Durch eine damit gegebene Reduzierung des Entwicklungsaufwandes und Erhöhung der Stückzahlen könnte auch die Kostensituation der Hybridsysteme entschärft werden, ansonsten lässt sich die Hybridtechnologie in den vielfältigen Nutzfahrzeuganwendungen bei den gegenwärtig absehbaren geringen Stückzahlen voraussichtlich trotz der ökologischen Vorteile kommerziell nur sehr schwer darstellen.

### **1.1.2 Zielsetzung des Vorhabens**

Im gemeinsamen Verbundvorhaben soll die Entwicklung eines modularen Hybridantriebssystems für Nutzfahrzeuge erfolgen. Während ZF die Entwicklung des Hybridmoduls selbst als Kernaufgabe übernimmt, wird MAN sowohl die unterschiedlichen Anforderungen von der Fahrzeugseite zur Systemauslegung, die Fragen der Systemintegration sowie den Aufbau und den Betrieb der Prototypfahrzeuge leisten.

Als gemeinsames Ziel steht die Darstellung eines modularen Hybridmodulbaukastens für NKW, aus dem sich für die unterschiedlichen Fahrzeug- und Einsatzklassen im Lkw-Bereich zwischen 8 t und 40 t hinsichtlich E-Maschinenleistung und -drehmoment, Batteriedimensionierung, Neben- und Zusatzaggregate-Ausstattung angepasste und kostengünstige Hybridantriebssysteme/-fahrzeuge konfigurieren lassen.

### **Entwicklungsziel und -aufgaben Teilprojekt MAN**

Als Entwicklungsziel steht die Klärung, in welchen Fahrzeug- und Einsatzklassen im Lkw-Bereich zwischen 8 t und 40 t eine Hybridisierung Vorteile bieten kann. Für die Fahrzeugklassen, in denen sich die Hybridisierung als sinnvoll erweist, ist ein modularer Hybridmodulbaukasten zu definieren, aus dem sich hinsichtlich E-Maschinenleistung und -drehmoment, Batteriedimensionierung, Neben- und Zusatzaggregate-Ausstattung sowie entsprechenden Hybridmanagement angepasste und durch die Verwendung von Gleichteilen kostengünstige Hybridantriebssysteme/-fahrzeuge konfigurieren lassen.

Dazu die Teilaufgaben:

- Weiterentwicklung eines Hybrid-Verteiler-Lkw der 12-t-Klasse mit integriertem Starter/Generator (ISG-Hybrid-Lkw TGL 12.220) als Technologie-Träger für die Funktionsentwicklung. Applikation elektrischer Nebenaggregate und Plug-In-Hybridisierung.
- Gewinnung von Erkenntnissen hinsichtlich Bedienung, Alltagstauglichkeit und Einsparpotenzialen im Kundeneinsatz. Dazu werden zwei Vorserienfahrzeuge des Hybrid-Verteiler-Lkw TGL 12.220 für den Erprobungseinsatz bei einem Pilotkunden aufgebaut.

- Grundlegende Untersuchung der Eignung von Verteiler-Lkw der 26-40 t-Klasse zur Hybridisierung. Systemauslegung, Entwicklung und Aufbau eines geeigneten Prototypfahrzeugs als Hybrid-Lkw der 26-40 t-Klasse mit angepasstem, integriertem Starter/Generator-Hybridsystem.

### 1.1.3 Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen des BMWi

Hauptargumente für die Weiterentwicklung der Hybridtechnologie sind die von der Bundesregierung gesetzten Umwelt- und Klimaziele. Damit einhergehend wird eine größere Unabhängigkeit vom Rohstoff Öl angestrebt.

So gilt es gerade auch im Nutzfahrzeubereich, eine weitere Steigerung der Effizienz der Antriebssysteme anzustreben und den Einsatz umweltverträglicher Fahrzeuge zu forcieren.

Das Vorhaben entspricht insbesondere dem aktuellen Förderprogramm für Elektro- und Hybridfahrzeuge im Rahmen der Elektromobilitätsförderung des BMWi [1]. Schwerpunkte sind hier die mittelfristige Energieeinsparung durch Einsatz von Hybridantriebssystemen, da gerade im Nutzfahrzeubereich der Dieselmotor auch noch über einen längeren Zeitraum die Hauptantriebsquelle bleiben wird.

Durch den Beitrag der geplanten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten können neben den ökologischen Vorteilen auch durch Entwicklung von Hochtechnologien wie der Hybridtechnik die Exportchancen gesteigert und Arbeitsplätze in Deutschland gesichert werden. Hinsichtlich der Hybridtechnologie zeigt sich, dass Länder wie v.a. Japan und USA, unterstützt durch massive Fördermittel, z.T. bereits einen Vorsprung erreicht haben, den es wieder aufzuholen gilt.

[1] Erdmann, M., Koonen, B.: Der Nationale Entwicklungsplan (NEP) der Bundesregierung zur Elektromobilität, 6. Symposium "Hybrid Vehicles und Energy Management", Braunschweig, 2009.

## 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Als Grundlage für dieses Vorhaben dienten Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die bei MAN Truck & Bus auf dem Gebiet der Hybridantriebssysteme für Stadtbusse und Verteiler-Lkw bereits durchgeführt wurden. Die Historie der Vorläuferprototypfahrzeuge ist in **Abschnitt 1.4.2** „Bisherige Arbeiten der Fa. MAN Truck & Bus“ beschrieben.

Im Rahmen dieser Vorprojekte ist im Hause MAN Fachwissen über Konzeption, Planung, Simulation, Auslegung sowie Aufbau und Test von hybriden Antriebssystemen aufgebaut worden, das in dieses Projekt eingeflossen ist und weiter vertieft werden konnte. Des Weiteren wurde im Rahmen der vorangegangenen Projekte auch Test-Equipment zum Testen insbesondere der elektrischen Komponenten auf entsprechenden Prüfständen angeschafft, welches

auch in diesem Projekt eingesetzt werden konnte.

Unter diesen Voraussetzungen konnte das Teilvorhaben MAN im Rahmen des HyTruck-Projektes kompetent und inhaltlich umfassend bearbeitet werden.

## 1.3 Planung und Ablauf des Teilprojekts MAN

### 1.3.1 Planung des Teilprojekts MAN

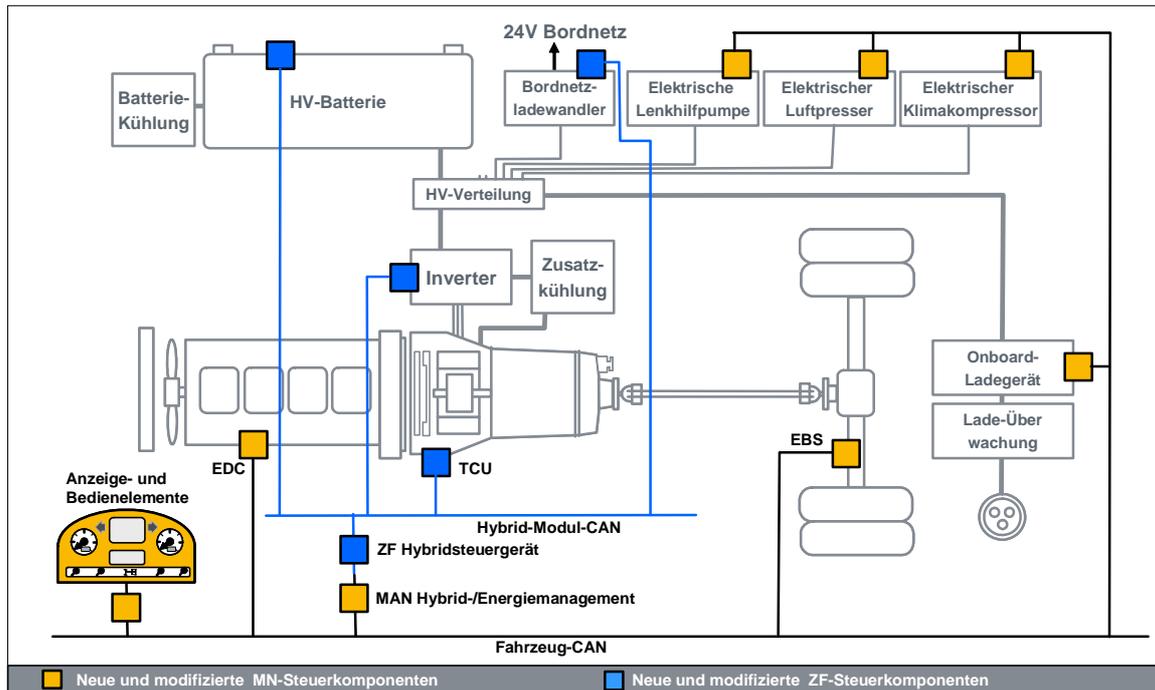
Im Rahmen des Projekts sollen folgende Entwicklungsaufgaben durchgeführt werden:

- **A1:** Weiterentwicklung eines Hybrid-Verteiler-Lkw der 12-Tonnen-Klasse mit integriertem Starter/Generator (ISG-Hybrid-Lkw TGL 12.220) als Technologie-Träger für die Funktionsentwicklung. Applikation elektrischer Nebenaggregate und Plug-In-Hybridisierung.
- **A2:** Aufbau von zwei Prototypfahrzeugen von Hybrid-Verteiler-Lkw TGL 12.220 für den Erprobungseinsatz bei einem Pilotkunden.
- **A3:** Grundlegende Untersuchung der Eignung von schweren Verteiler-Lkw der 26-40 t-Tonnen-Klasse zur Hybridisierung. Systemauslegung, Entwicklung und Aufbau eines geeigneten Prototypfahrzeugs als Hybrid-Lkw der 26-40 t-Klasse mit angepasstem, integriertem Starter/Generator-Hybridsystem.

Zur Verdeutlichung der Ausbaustufen und deren Modularität, die im Rahmen von Arbeitsumfang A1 ausgeführt werden, zeigen die **Bilder 1.3.1-1 bis 1.3.1-3** mit den jeweiligen Systemumfängen. In **Bild 1.3.1-1** ist der Basisumfang des Hybridantriebsystems dargestellt. Dieser besteht aus dem ISG-Parallelhybridgetriebe mit integrierter E-Maschine, dem Inverter, Hochvoltverteilung, der Hochvolt-Batterie, dem 24V-Bordnetzladewandler sowie den Kühlungseinrichtungen für E-Maschine, Inverter und Hochvoltbatterie.







**Bild 1.3.1-4:** Schematische Darstellung des Steuergeräte-Verbunds

Die zu definierenden Schnittstellen müssen so angelegt werden, dass alle Skalierungen der Komponenten (z.B. Standard- und Plug-In-Batterie oder z.B. unterschiedlich dimensionierte Luftpresser für verschiedene Fahrzeugklassen) und Ausstattungsvarianten modular bedient werden können.

Neben der Komponentenauswahl und -auslegung, der steuerungstechnischen Vernetzung kommt dem Hybrid-Energiemanagement als weiterer Bestandteil des Hybridsystems eine sehr große, zentrale Bedeutung zu. Die wesentliche Aufgabe des Hybrid-Energiemanagements ist es, über die Ansteuerung der Komponenten die Energieflüsse im Fahrzeug (verbrauchs- und emissions-)optimiert zu steuern. Diese Funktionen betreffen sowohl Hybridmodulfunktionen als auch Nebenaggregate- und Plug-In-Funktionen. Unter Berücksichtigung der Fahrzeug- und Komponenten-Eigenschaften (z.B. Wirkungsgradverhalten, Leistungsfähigkeit, Dynamikverhalten, Temperatur,...), des Fahrzustandes (z.B. Beschleunigung, Verzögerung, Stillstand,...) sowie des Fahrerwunsches werden über sehr komplexe Optimierungsalgorithmen geeignete Komponentenanforderungen generiert. So wird beispielsweise über das Energiemanagement entschieden, wann der Dieselmotor abgeschaltet werden kann oder z.B. ob eine Lastanhebung mit Nachladen des Energiespeichers sinnvoll ist. Die hier beschriebene Funktionalität des Hybrid-Energiemanagements wird als „strategisches Hybrid-Energiemanagement“ bezeichnet und soll im Vorhaben seitens MAN weiterentwickelt werden.

Die operative Funktionalität auf Komponentenebene (für E-Maschine, Getriebe, DC/DC-Wandler und HV-Batterie) wird seitens ZF entwickelt (siehe auch

Verbundvorhabensbeschreibung „Schnittstellen Hybrid-Energiemanagement“). Durch Definition einer geeigneten Schnittstelle werden die operativen Hybridfunktionen (ZF) über die strategischen Hybridfunktionen (MAN) angesteuert.

Die Weiterentwicklung des MAN Hybrid-/Energiemanagement ist sowohl zur weiteren Steigerung des Einsparpotenzials durch Verfeinerung des bestehenden Managements als auch zur Erweiterung für die Nutzung der zusätzlichen Freiheitsgrade der erweiterten Hybridausstattungen (elektrische Nebenaggregate und Plug-In).

Ziel der Entwicklung ist, dass die Bandbreite der verschiedenen Applikationen mit unterschiedlichen Ausstattungen modular und dennoch jeweils optimal mit dem Hybrid-Energiemanagement ausgestattet werden können.

Unterstützend für die Konzeptfindung, -auslegung als auch die Entwicklung des optimierten Hybrid-Energiemanagements (Funktionsentwicklung) wird ein bereits bei MAN entwickeltes Simulationstool auf Basis Matlab/Simulink eingesetzt. Für die konkreten Aufgabenstellungen im Rahmen des Vorhabens müssen hierzu jedoch Teilmodelle angepasst sowie neue Teilmodelle erstellt und validiert werden. Ebenso müssen die Modellparameter bei neuen Komponenten oder Komponentenvariationen aufbereitet und implementiert werden.

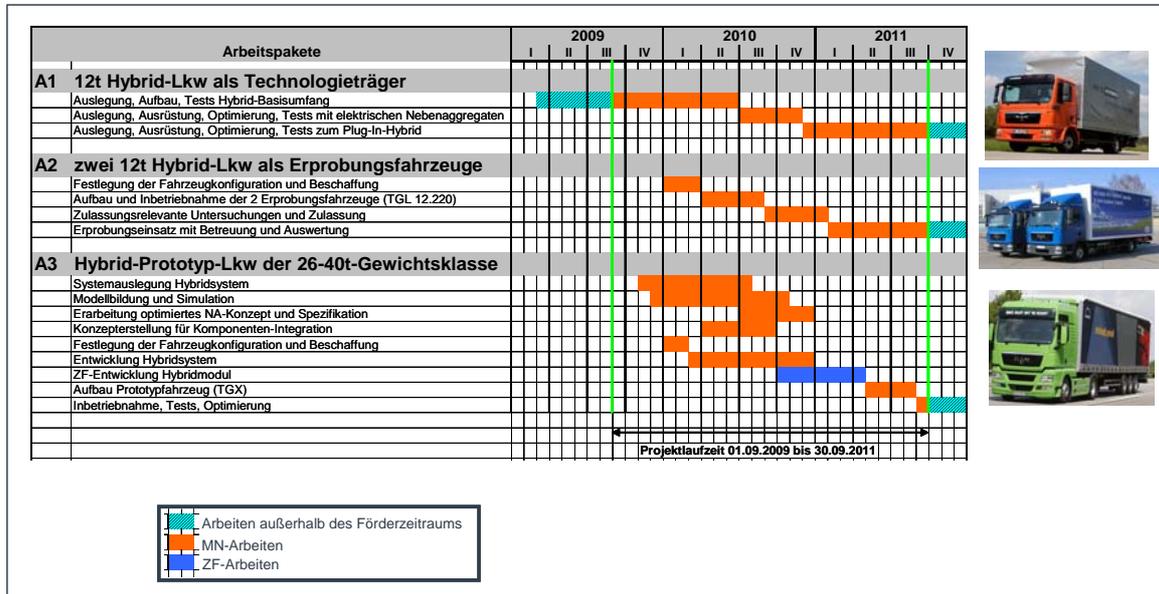
Durch Kopplung der mittels dSpace TargetLink erstellten Hybridfunktionsblöcke können die erreichten Entwicklungsstände sowohl in der Simulation als auch am Prototypenfahrzeug getestet und optimiert werden.

Die im Rahmen von A2 aufgebauten beiden Vorserienfahrzeuge weisen einen Ausstattungsumfang gemäß **Bild 1.3.1-1** auf und werden den Pilotkunden für die Dauer des Erprobungseinsatzes unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Hybrid-spezifische Wartungsarbeiten werden von MAN durchgeführt. Die Kunden übernehmen lediglich die üblichen Betriebskosten. Eine Festlegung der Kunden erfolgte im Laufe des Projekts.

Die Festlegung des im Rahmen von A3 ausgewählten Fahrzeugstyps im Bereich der 26-40t-Lkw-Klasse für den Aufbau des Hybrid-Prototypfahrzeugs erfolgt abhängig von den Ergebnissen der theoretischen Vorarbeiten im Laufe des Projekts (siehe **Abschnitt 2.3**). Als Ausstattungsumfang sind die Hybrid-Basiskomponenten geplant, jedoch mit einer seriellen Verschaltung zweier Batteriesysteme).

### 1.3.2 Ablauf des Teilvorhabens MAN

Die zeitliche Abfolge der wesentlichen Arbeitspakete für die Projektschienen A1, A2 und A3 ist im **Bild 1.3.2-1** dargestellt.



**Bild 1.3.2-1:** Zeitliche Abfolge der Projektschienen A1, A2 und A3

Die Arbeiten des Projektes konnten im Wesentlichen in der Abfolge analog dem im Projektantrag aufgestellten Zeitplan erfolgen.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Neben der verstärkten internationalen Hybrid-Aktivitäten im Pkw-Bereich, ausgelöst durch die Markteinführung des Toyota Prius, werden derzeit auch Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieben entwickelt und eingesetzt. Die bisherige Entwicklung von Hybridsystemen erfolgte sowohl für Pkw-Anwendungen, im Speziellen aber für Anwendungen im Nutzfahrzeug-Segment, die exakt auf den jeweiligen Einsatzfall zugeschnitten sind. Ein "Stand der Technik", der zwar für einzelne Einsatzfälle zu einem optimalen Hybridantrieb führt, jedoch aufgrund der Spezialisierung jeweils nur geringe Stückzahlen und damit eine reduzierte Chance auf Wirtschaftlichkeit erzielt. Solche spezialisierten Hybridanwendungen wurden bisher in Studien, Prototypenfahrzeugen und Kleinserien vereinzelt in Europa, vornehmlich aber auf dem Japanischen und US-Amerikanischen Markt begünstigt durch staatliche Förderungen realisiert. Diese lassen sich aufgrund anderer Anforderungen hinsichtlich des Fahrzeugs und des Anwendungsfalls nicht ohne weiteres in Fahrzeugen auf dem Europäischen Markt integrieren.

Des Weiteren wurden der in diesem Vorhaben beschriebene modulare Ansatz sowie plattformorientierte Hybridsysteme bzw. –baukästen bis dato nicht umgesetzt. Ebenfalls fehlen bislang ausreichend qualifizierte und taugliche Hybridkomponenten für die im Vergleich zum Pkw-Sektor weitaus höheren Anforderungen für den Einsatz in Nutzfahrzeugen. Sehr hohe Defizite gibt es noch bei der Entwicklung von geeigneten elektrischen Nebenaggregaten sowie bei auf die Anforderungen von Nutzfahrzeugen abgestimmten, adäquaten Lithium-Batteriesystemen. Speziell im Bereich der Energiespeicher auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie existieren bisher keine ausreichenden Erfahrungen. Ebenso ist sowohl die erforderliche Systemtechnik, als auch Batteriesysteme mit deutlich erhöhtem Energieinhalt für die Plug-In-Hybrid-Applikation noch nicht entwickelt. Hinsichtlich der Betriebssicherheit, der Qualifizierung und Zulassung der Komponenten und Systeme bestehen derzeit noch sehr viele offene Fragen. Zur Ausschöpfung des Energieeinsparungspotenzials muss aber auch im Bereich der Funktionsentwicklung und des Energiemanagements noch sehr viel Entwicklungsarbeit geleistet werden.

#### **Literatur zu 1.4.1:**

- [2] Sandkühler, G.: A new Hybrid Drive for a Refuse Collection Vehicle, 6. Symposium "Hybrid Vehicles und Energy Management", Braunschweig, 2009.
- [3] Sauer, B.: HYBOB - Diesel-electric hybrid drive for omnibuses, 6. Symposium "Hybrid Vehicles und Energy Management", Braunschweig, 2009.
- [4] Rau, W.: Hybrid-Drives for City Buses – First experiences with a parallel and a serial concept, 6. Symposium "Hybrid Vehicles und Energy Management", Braunschweig, 2009.

#### **1.4.2 Bisherige Arbeiten der Fa. MAN Truck & Bus**

MAN Truck & Bus AG betreibt seit über 30 Jahren aktiv die Entwicklung von alternativen Antrieben, insbesondere von Hybrid-Stadtbussen und Hybrid-Verteiler-Lkw. Durch eigene Kompetenz der Integration von Hybridsystemen in Fahrzeuge, die Verknüpfung und Adaption der Fahrzeugsysteme und der Entwicklung des Hybrid-/Energiemanagements ist es MAN möglich, optimierte Hybrid-Fahrzeug-Systemlösungen zu entwickeln.

Sowohl aus Simulations- und Prüfstandsuntersuchungen als auch aus realen Erprobungseinsätzen der neuen Antriebskonzepte steht eine breite Erfahrungsbasis zur Verfügung, gerade auch in Hinblick auf Nutzung der Bremsenergie sowie typische Betriebsweisen und Lastkollektive der Antriebsstrangkomponenten.

Speziell für die Entwicklung von Hybridantriebssystemen von Verteiler-Lkw waren folgende Arbeiten der letzten Jahre (siehe **Bild 1.4.2-1**) wesentlich:



**Bild 1.4.2-1:** Entwickelte Hybridsysteme für Verteiler-Lkw

Im Projekt „OPTISTRANG“ wurde der konventionelle Antriebsstrang eines Verteiler-Lkw analysiert. Auf dieser Basis wurde ein optimiertes Antriebskonzept definiert und entwickelt. Wesentliche Merkmale des neu definierten Antriebsstrangs waren Mildhybrisierung mit Starter-Generator-System, automatisiertes Schaltgetriebe, erweitertes 2-Spannungs-Bordnetz, NiMH-Batterie und Ultracaps als leistungsfähige und zyklusfeste Energiespeicher, Entkopplung und bedarfsgerechter Betrieb der Nebenaggregate, optimiertes Antriebsstrang-, Energie- und Wärmemanagements, Stopp-Start-Automatik und Erreichung der EURO5-Abgasgrenzwerte durch Abgasnachbehandlungssystem. Das Projekt wurde vom BMBF gefördert.

Ebenso wurde in einem gemeinsamen Projekt mit ZF Friedrichshafen das sog. EDA-System, ein elektrodynamisches Anfahrlement mit einer Kopplung der E-Maschine über eine Planetenstufe als Hybridsystem für den Verteiler-Lkw entwickelt, welches neben den Standard-Hybridfunktionen auch zusätzliche Komfortfunktionen bietet.

#### Literatur zu 1.4.2:

- [5] Kersch, S., Hipp, E., Lexen, G.: Optimierter Antriebsstrang für Verteiler-Lkw, VDI-Berichte 1827, Friedrichshafen, 2004.
- [6] Kersch S., Pflanz T., Gruber C.: Der MAN-Brennstoffzellen-Hybrid-Stadtbus und sein Energiemanagement, DGES-Fachtagung „Hybrid- und

- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und -Strukturen, Ingolstadt, 2005.
- [7] Kerschl S., Lexen, G.: Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge, Tagungsband „Hybridfahrzeuge“, expert-Verlag, Renningen, 2005.
- [8] Kerschl, S., Hipp, E., Lexen, G.: Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse, 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2005.
- [9] Roske, M., Speck, F.-D., Kerschl, S.: Das elektrodynamische Anfahrlement – ein Hybridantrieb mit erweiterter Anfahrunktionalität, VDI-Tagung „Getriebe in Fahrzeugen“, Tagungsband 1943, Friedrichshafen, 2006.
- [10] Kerschl, S., Lexen, G., Holl, E.: IDEAS – Innovative DE-Hybrid Drive for City Buses; 4. Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management, Braunschweig, 2007.
- [11] Kerschl, S.: Die neue Generation der MAN-Hybrid-Stadtbusse; VDV-Akademie: "Hybridantriebe im Linienbusbereich", Köln, 2007.
- [12] Kerschl, S., Döbereiner, R., Hipp, E.: The MAN IDEAS hybrid bus – experience from trial operation, 6. Symposium "Hybrid Vehicles and Energy Management", Braunschweig, 2009.
- [13] Kerschl, S., Döbereiner, R., Hipp, E.: Auslegung, Aufbau und Integration von Hybrid-Antriebskomponenten im Nutzfahrzeug, VDI-Tagung „Getriebe in Fahrzeugen, VDI-Bericht 2071, Friedrichshafen, 2009.

## 1.5 Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten

Im dem hier beschriebenen Verbundvorhaben kooperierten MAN Truck & Bus AG und ZF Friedrichshafen AG als Projekt- und Entwicklungspartner. MAN übernahm dabei federführend die Gesamtprojektleitung.

Die Projektverzahnung und die sich ergebenden Schnittstellen zwischen den Projektpartnern ZF und MN sind anhand der jeweiligen Systemumfänge von ZF und MAN erkenntlich. In den **Bildern 1.3.1-1 bis 1.3.1-3** sind die wesentlichen Hardware-Zusatzkomponenten des Hybridantriebsystems dargestellt.

Der ZF-Umfang besteht aus dem ISG-Getriebe mit integrierter E-Maschine, dem Inverter, der Hochvolt-Batterie, dem 24V-Bordnetzladewandler sowie den Kühlungseinrichtungen für E-Maschine, Inverter und Hochvoltbatterie.

Ausgehend vom Grundfahrzeug als Basis sind die zusätzlichen Komponenten seitens MAN die Hochvoltverteilung, die elektrifizierten Nebenaggregate

(Lenkhilfpumpe, Luftpresse, Klimakompressor) sowie ein Onboard-Ladegerät und die Ladesystemtechnik inkl. Ladestecker.

Durch die jeweiligen Systemumfänge und die unterschiedlichen Anforderungen aus Sicht der Hybridmodul-Entwicklung (ZF) als auch der Gesamtfahrzeug-Entwicklung (MAN) ergeben sich folgende Hauptschnittstellen:

- **Schnittstelle: Systemspezifische Auslegung Hybridmodul**

MAN lieferte hierzu Anforderungen aus den unterschiedlichen Fahrzeugklassen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, E-Maschinen-Leistungen und –drehmomente etc. ZF prüfte die Anforderungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit innerhalb des modularen Hybridbaukastens, entwickelte und lieferte angepasste Prototypsysteme.

- **Schnittstelle: Auslegung des Energiespeichers**

MAN lieferte hierzu Anforderungen aus den unterschiedlichen Fahrzeugklassen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, Batterie-Leistungen und -energieinhalt etc. ZF prüfte die Anforderungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit innerhalb des modularen Hybridbaukastens, entwickelte und lieferte angepasste Prototypsysteme.

- **Schnittstelle: Integration des Hybridmoduls**

ZF und MAN mussten sich bzgl. der Integration hinsichtlich Konstruktion (Bauraum, Gewicht,...), Kühlungs- sowie Steuerungseinbindung sehr eng abstimmen. Ebenso waren Fragen der Sicherheit (Batteriesicherheit, Schutzmechanismen und Notausverhalten,...) gemeinsam festzulegen.

- **Schnittstelle: Hybridmanagement**

ZF konzentrierte seine Entwicklung auf die Darstellung und Optimierung der operativen Funktionalität des Hybridmoduls.

MAN hat im Zuge der Erstellung eines Hybrid-Energiemanagements die strategischen Hybridfunktionen entwickelt, die im Wesentlichen die Energieflüsse im Fahrzeug optimiert steuern. Diese Funktionen betreffen sowohl Hybridmodulfunktionen als auch Nebenaggregate- und Plug-In-Funktionen.

Durch Definition einer geeigneten Schnittstelle werden die operativen Hybridfunktionen (ZF) über die strategischen Hybridfunktionen (MAN) angesteuert.

Zur Verdeutlichung der Begriffe „operativ“ und „strategisch“ sei hier als Beispiel die Funktion „Elektrisches Anfahren“ angeführt: ZF stellt über die operative Funktionalität ein elektrisches Anfahren über die E-Maschine unter Überwachung von Leistungs- und Bauteilbelastungsgrenzen anwählbar dar. MAN steuert über die strategische Hybridfunktion unter Beachtung der Energieströme, Wirkungsgrade und

---

Speicherladezustand, wann, mit welchem Drehmoment und bis zu welcher Geschwindigkeit das „Elektrische Anfahren“ angefordert wird.

Die Zusammenarbeit der MAN mit weiteren Zulieferern betrifft im Wesentlichen den Bereich „Elektrische Nebenaggregate“ und Komponenten für das Hochvolt-Bordnetz. MAN sammelte im Rahmen der Systemauslegung und Packaging-Untersuchungen für diese Komponenten die entsprechenden Anforderungen und setzt diese in eine technische Spezifikationen um.

Ausgewählte Zulieferer wurden durch MAN beauftragt, geeignete Komponenten prototypisch aufzubauen oder verfügbare Seriensysteme prototypisch anzupassen. Komplette Neuentwicklungen waren aufgrund der kurzen Projektlaufzeit und der zur Verfügung stehenden Mittel nicht möglich.

Jedoch stehen nun am Projektende unter Einbeziehung der gewonnenen Erfahrungen überarbeitete Spezifikationen zur Verfügung, die für eine mittelfristige Komponentenentwicklung weiter verwendet werden können.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Hybrid-Technologieträger TGL 12.220 (A1)

Die Definition der Grundanforderungen an einen Hybrid-Verteiler-Lkw setzen auf Vorarbeiten auf und wurde im Projekt weiter bearbeitet.

Verteiler-Lkw werden, wenn auch nur anteilig, überwiegend im städtischen Umfeld oder in bewohnten Gebieten und damit in emissionssensiblen Bereichen eingesetzt. So leiten sich die Anforderungen an den Hybrid-Verteiler-Lkw zunächst aus den globalen Zielen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zur Schonung der Ressourcen und der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, jedoch auch aus lokalen Zielen zur Reduzierung und Vermeidung von Emissionen in Form von Abgasen und Geräusch ab.

Die Reduzierung von Emissionen sowie die Steigerung der Systemeffizienz kann durch folgende Hybridfunktionalität verfolgt werden:

- Rekuperation der Bremsenergie
- Start-Stopp-Automatik
- Betriebspunktoptimierung (Lastpunktverschiebung)
- Downsizing des Dieselmotors
- Befahren von Kernzonen teil-elektrisch oder rein elektrisch

Das Einsatzspektrum reicht über den Transport von Stückgut, Getränke-Transport, Kühl- und Tiefkühltransport, Entsorgungsaufgaben, Bau- und Container-Anwendungen, fahrbaren Arbeitsbühnen, Abschleppdiensten, Kran- und Hydraulik-Greifern bis hin zu Feuerwehr- und Spezialeinsatz-Diensten (**Bild 2.1-1**).



**Bild 2.1-1:** Breites Einsatzspektrum des Verteiler-Lkw MAN TGL

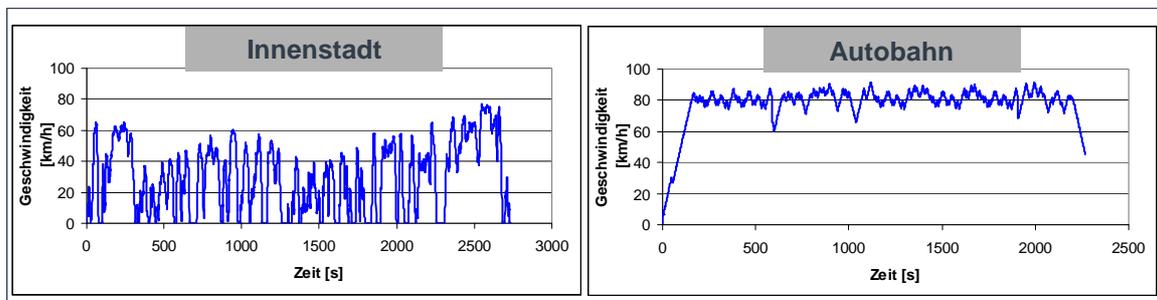
Abhängig von der Fahrzeugausstattung und Transportaufgabe können jedoch auch durch ein bereits vorhandenes Hybrid-System darüber hinaus Zusatzfunktionalitäten dargestellt werden. So können durch eine leistungsfähige E-Maschine im Generatorbetrieb auch Zusatz- und Aufbauaggregaten (z.B. Kühlaufbauten, Hydraulikpumpen, Stellantriebe, Werkzeuge,...) elektrisch versorgt werden.

Diesen Ansätzen sind jedoch im Nutzfahrzeugbereich durch die Forderung nach Erhaltung bzw. Steigerung der Wirtschaftlichkeit enge Grenzen gesetzt. So müssen erhöhte Investkosten sowie eine durch das Mehrgewicht des Hybridsystems reduzierte „Pay load“ mit erreichbaren niedrigeren Betriebskosten in einem vertretbaren Verhältnis stehen.

Zusätzliche Anforderungen für einen rein elektrischen, emissionsfreien Kurzstreckenbetrieb können durch die Schaffung von Umweltzonen in größeren Städten mit entsprechenden Emissionsauflagen zukünftig entstehen.

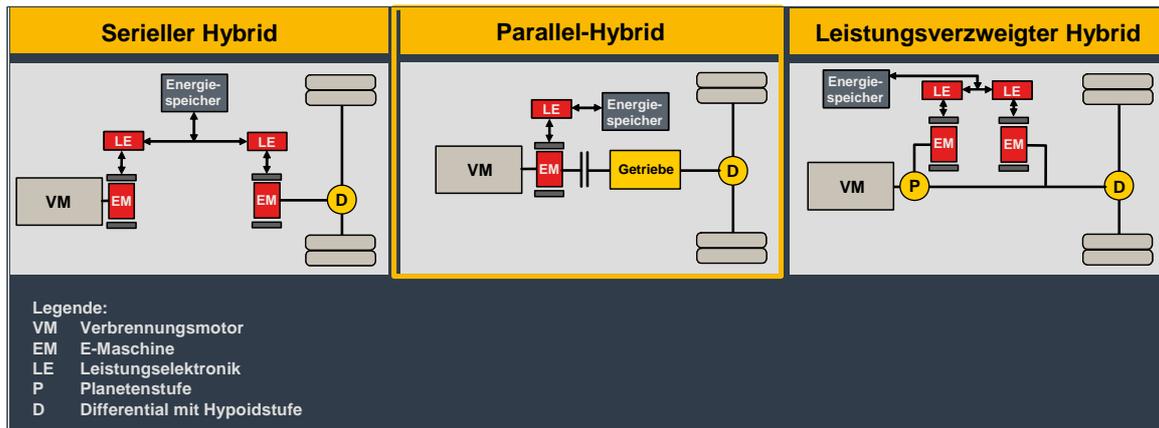
### Auslegung des Hybridantriebs

Neben den generellen Anforderungen an das Hybridsystem sind auch die typischen Randbedingungen in die Auslegung miteinzubeziehen. Aber auch hier zeigt sich aufgrund der unterschiedlichen Einsatzfelder eine breite Streuung. Neben unterschiedlichen Einsatzprofilen (Beispiele in **Bild 2.1-2**) schwankt die Beladung des Fahrzeugs zwischen Leerfahrt und Vollbeladen bei Tonnagen im Bereich von 8 bis 12 t ZGM. Die jährliche Kilometerleistung beträgt typischerweise 30 bis 60 Tkm, die mittleren Kraftstoffverbräuche liegen bei 15 bis 30 l/100 km.



**Bild 2.1-2:** Verschiedene Einsatzprofile

Grundlage der Auslegung bildet zunächst die Auswahl einer geeigneten Hybridtopologie. Hybridantriebe werden anhand des Energieflusses im Antriebstrang in parallele, serielle und leistungsverzweigte Systeme unterschieden, **Bild 2.1-3**.



**Bild 2.1-3:** Hybrid-Grundstrukturen

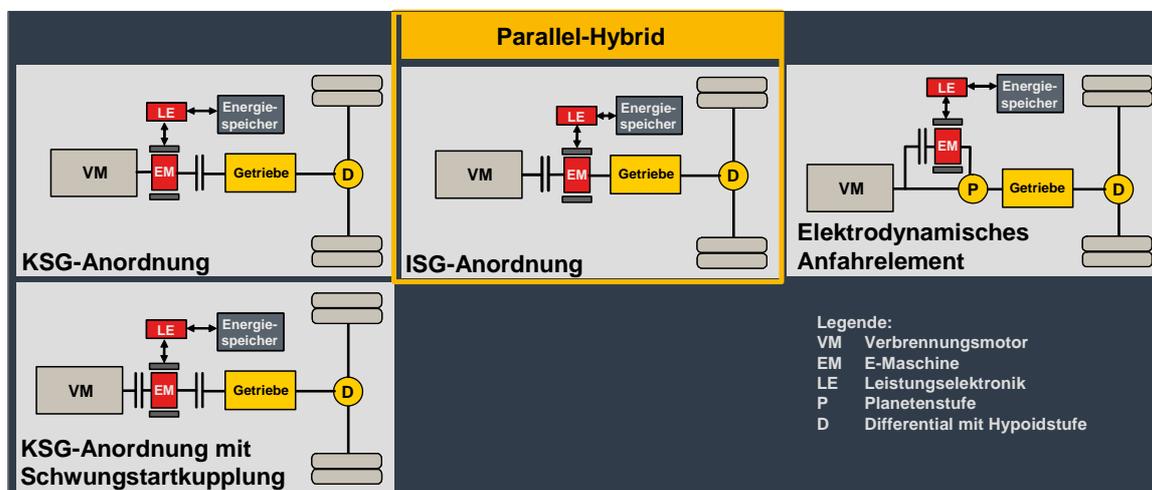
Beim parallelen Hybrid wird zusätzlich zum konventionellen Antriebstrang ein Elektromotor integriert, der Bremsenergie rekuperieren oder das Fahrzeug zusätzlich antreiben kann. Der serielle Hybridantrieb ist ein diesel-elektrischer Antrieb, bei dem zusätzlich Energie aus dem Energiespeicher für die Fahrt entnommen bzw. beim Bremsen abgespeichert werden kann. Hier gibt es keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Achse, die Drehzahl des Dieselmotors ist nicht an die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt. Der leistungsverzweigte Hybridantrieb kombiniert die Eigenschaften der beiden anderen Varianten. Ein Teil der Leistung kann hier mechanisch an die Achse geleitet werden, der andere Teil über den elektrischen Pfad. Je nach Betriebszustand ist die Leistungsaufteilung variabel.

Der serielle Hybridantrieb bietet Vorteile, da er Bremsenergie mit den geringsten Verlusten rekuperiert und wieder zur Verfügung stellen kann. Für Einsätze mit größerem Energiedurchsatz, wie beim Verteiler-Lkw, ist der parallele Hybridantrieb vorteilhaft, da hier der gute Wirkungsgrad des mechanischen Antriebstrangs vom Dieselmotor zur Achse zur Geltung kommt.

Unter Berücksichtigung vor allem der Antriebsstrangeffizienz, des universellen Einsatzes (Innenstadt bis Autobahn), des Verhältnisses Kosten/Aufwand, die Integrationsmöglichkeiten in den bestehenden Antriebstrang, die Möglichkeit zur Schaffung modularer Konzepte und Varianten, der erreichbaren Stückzahlen und dem voraussichtlichen Marktanteil erweist sich die Auswahl des parallelen Hybridantriebs für Lkw-Antriebsstränge als vorteilhaft.

Innerhalb der Parallelhybridstrukturen gibt es mehrere Strukturvarianten. In **Bild 2.1-4** sind diese beispielhaft dargestellt. Abhängig von gewünschter Hybridfunktionalität und Dimensionierung der Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine ist die Auswahl zu treffen. Bei einfacheren Systemen mit geringen elektrischen Leistungen ist die Schwungrad-seitige Integration der E-Maschine (KSG-Anordnung) sinnvoll, werden höhere E-Maschinenleistungen installiert und wird auch das rein elektrische Fahren als Hybridfunktion gefordert, so bietet sich die Getriebe-seitige Integration der E-Maschine an. Daneben existieren auch Lösungen mit zwei Trennkupplungen, die jedoch hinsichtlich Bauraum und Kosten aufwendiger sind. Eine spezielle Anordnung der E-Maschine über eine Planetenstufe (Elektrodynamisches Anfahrerelement)

bietet unter nur leichter Erweiterung der Mechanik das Anfahren über das sog. „Geared neutral-Getriebe“ und somit den Ersatz der Anfahrkupplung sowie eine deutliche Erhöhung des Fahrkomforts ähnlich einem Automatgetriebe.



**Bild 2.1-4:** Parallel-Hybridstrukturen

Wesentliche Auslegungskennwerte sind neben der Antriebsstrangstruktur Rekuperationsfähigkeit, Hybridfunktionalität, Spannungsklasse, geforderte Lebensdauer der Batterie, Bauraum, Gewicht und Kosten.

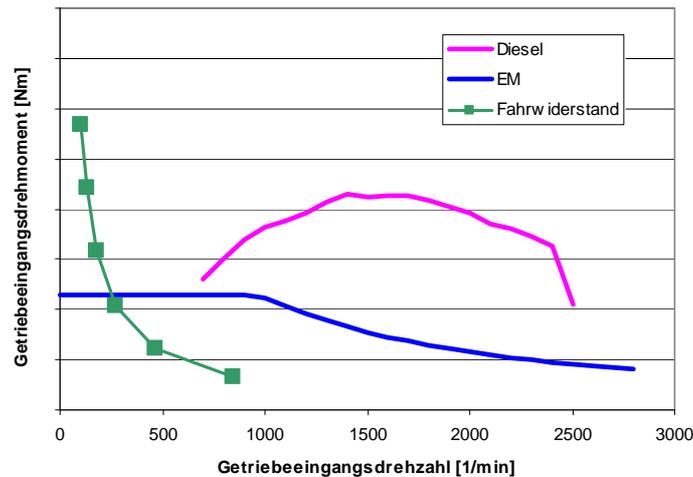
Die Hybridgrundfunktionalität mit Rekuperation, Stopp-Start-Automatik, Lastpunktverschiebung kann mit einem vergleichsweise kleinen, auf Leistung und Zyklusfestigkeit getrimmten Batteriesystem erreicht werden. Soll dagegen die Zusatzfunktion „rein elektrischer Kurzstreckenbetrieb“ dargestellt werden, sind deutlich größere Batteriesysteme erforderlich. Grenzen der elektrisch darstellbaren Reichweite leiten sich aus den Batteriekennwerten sowie wieder den Größen Bauraum, Gewicht und Kosten ab.

### 2.1.1 Entwicklung des Hybrid-Basisumfangs

Für einen 12t-Lkw mit Ausstattungsumfang „Hybrid-Basisumfang“ (siehe **Bild 1.3.1-1**) existierten zu Projektbeginn erste, noch unvollständige und nicht abgesicherte Anforderungen zur Systemauslegung.

Diese wurden nun anhand der Weiterentwicklung des bereits vor Projektstart aufgebauten Fahrzeugprototyps sowie mittels Simulation und Messung weiter vervollständigt. Die begleitende Systemauslegung hatte hauptsächlich das Ziel, das bestehende System zu detaillieren und abzusichern.

Hierzu wurden mittels Simulation und Messung am Prototypfahrzeug verschiedene Untersuchungen durchgeführt.



**Bild 2.1.1-1:** Anfahruntersuchung für E-Maschinenauslegung

**Bild 2.1.1-1** zeigt beispielhaft eine Anfahruntersuchung bei voller Beladung in der Ebene. Es zeigt sich, dass bei der verwendeten E-Maschinenauslegung auch ein elektrisches Anfahren problemlos möglich ist.

Da die im ersten Ausbaustand verfügbare HV-Prototypenbatterie deutlich leistungsschwächer war als von der Systemauslegung vorgesehen, lag ein weiterer Schwerpunkt darin, die Einsatzgrenzen festzulegen und die Auswirkungen des schwächeren Systems abzuschätzen.

In weiteren Ausbauständen wurde dann ein weiter entwickeltes B1-Muster und ein A2-Muster verbaut und getestet (siehe **Bild 2.1.1-2**).



**Bild 2.1.1-2:** Im Prototypfahrzeug verwendete HV-Batterie-Musterstände

### Modellbildung und Simulation TGL 12.220 Hybrid-Basisumfang

Auf Basis eines bereits bestehenden Simulationstools wurden entsprechend dem Hybridausstattungsumfang Teilmodelle ergänzt. Nach Validierung des Modells anhand von verfügbaren Messdaten des Referenzfahrzeugs wurden Simulationsstudien durchgeführt. Diese dienen als Grundlage der Funktionsentwicklung und der weiteren Systemauslegung / -optimierung.

Die Modellbildung des TGL im Hybrid-Basisumfang wurde vervollständigt und eine Validierung des konventionellen Antriebsstrangs anhand von Messdaten des

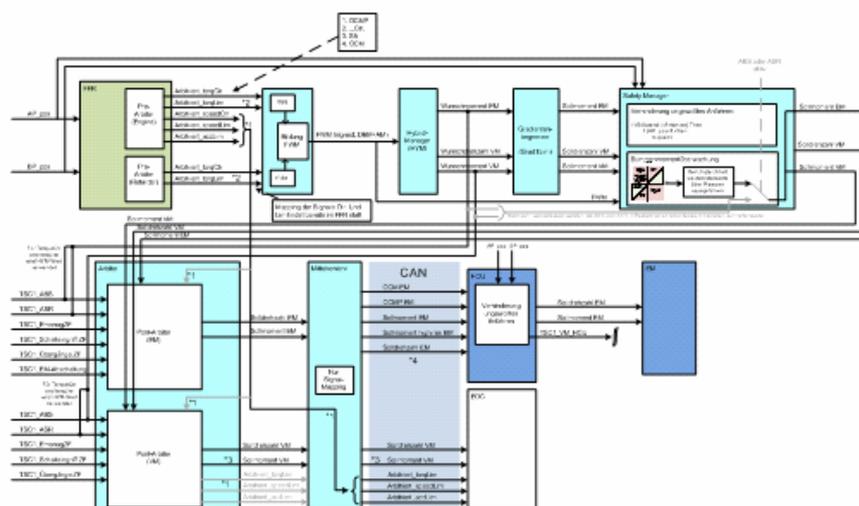
konventionellen Fahrzeugs durchgeführt. Die Validierung des Hybrid-Systems erfolgte anhand der durchgeführten Rollenprüfstandsmessungen im zweiten Schritt. Durch Integration eines Energiemanagements, die an die für die Prototypfahrzeuge zu entwickelnden Software angelehnt ist, wurde erreicht, dass die Funktionsentwicklung durch Parameter-Studien mittels Simulation effizient unterstützt werden kann.

Vor den Rollenprüfstandsversuchen wurden zu erwartende Einsparpotenziale errechnet. Diese Vorsimulationen lagen sehr nah an dem am Rollenprüfstand ermittelten Einsparpotenzial. Es wurden sowohl Untersuchungen zu verschiedenen Betriebsstrategien durchgeführt als auch die Einflüsse von verschiedenen Hybrid-Funktionen wie Start/Stop, Betriebspunktoptimierung, etc untersucht.

**Entwicklung Energiemanagement:**

Der Schwerpunkt in der Entwicklung des Energiemanagements lag bei Hybrid-Grundfunktionen („Elektrisches Fahren“, „Dieselmotor-Starten“, „Fahrbetrieb mit Lastpunkt-Anhebung/-Absenkung“, „Rekuperation“ und „Dieselmotor-Abschalten“) und der Entwicklung der Logik zur energetisch optimalen Ansteuerung dieser Grundfunktionen.

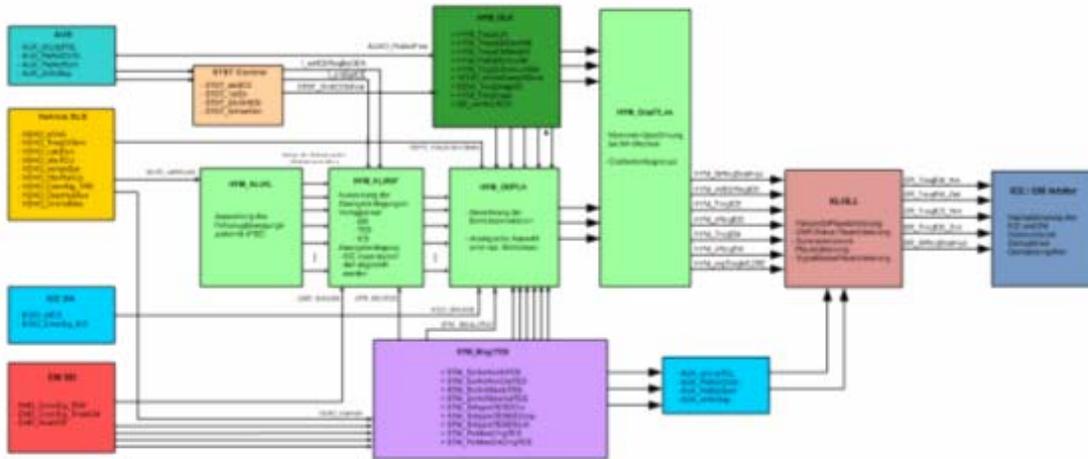
Als Vorarbeit war zum Einen die Definition einer geeigneten Schnittstelle zum Hybrid-Getriebe erforderlich, zum Anderen mussten die hybridspezifischen Steuergeräte in den bestehenden CAN-Fahrzeugverbund eingegliedert werden. Dies beinhaltete eine Anpassung der bestehenden Fahrzeugsteuergeräte an die neue CAN-Topologie, sowie eine Parameteranpassung aufgrund der erweiterten Anforderungen aus dem Hybridsystem. Insbesondere musste das Bremsensteuergerät auf die neue Dauerbremse (Rekuperation mit der Elektrischen Maschine) adaptiert werden. **Bild 2.1.1-3** zeigt eine Übersicht zum Momentenpfad.



**Bild 2.1.1-3:** Übersicht Momentenpfad

Die Entwicklung der Energiemanagement-Software gliederte sich in zwei Abschnitte. Zunächst musste eine geeignete Softwarestruktur (siehe **Bild 2.1.1-4**) erarbeitet werden, die allen Anforderungen an ein Energiemanagement gerecht wird. Hierzu

gehören neben einem modularen Aufbau vor allem auch die leichte Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen, eine klare und übersichtliche Struktur, so wie eine Struktur, die eine schnelle Fehlersuche ermöglicht.



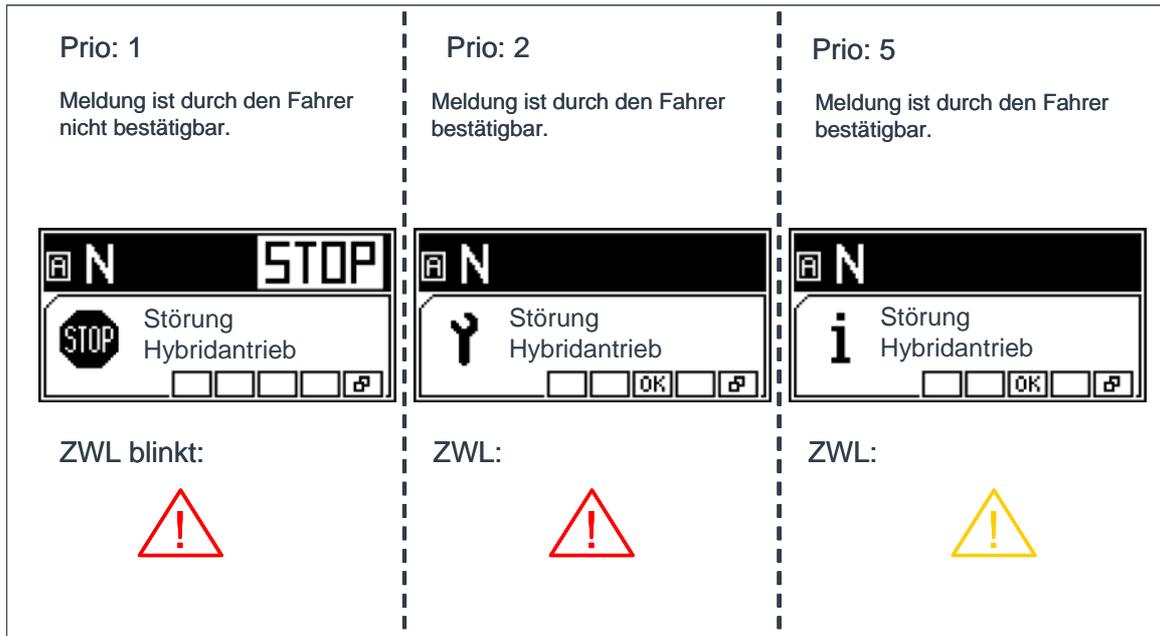
**Bild 2.1.1-4:** SW-Struktur des Energiemanagements

Nach der Entwicklung dieser Struktur folge im zweiten Abschnitt die eigentliche Entwicklung der Energiemanagement-Software. Die Programmierung der Software erfolgte modellbasiert in Matlab/Simulink. Die anschließende Autocodegenerierung wurde in TargetLink der Firma dSPACE vorgenommen. Da von Anfang an der Einsatz der Software in den Erprobungsfahrzeugen beim Kunden geplant war, wurde statt eines „Rapid Prototyping“-Steuergerätes als Zielhardware ein MAN-Seriensteuergerät gewählt.

Der Entwicklungsprozess des Energiemanagements war sehr stark Prototypen orientiert. So wurden neue Softwaremodule in sehr engen Abständen direkt im Fahrzeug getestet und parametrieren. Eine Optimierung und Erweiterung der Software erfolgte begleitend zum Aufbau der Erprobungsfahrzeuge und während des Erprobungseinsatzes.

Um einen sicheren Einsatz der Software beim Kunden zu ermöglichen, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung eines eigenen Sicherheitsmoduls gerichtet. Dieses Modul plausibilisiert unabhängig vom Energiemanagement die Momentensollwerte an die Maschinen, mit dem vom Fahrer geforderten Summenmoment.

Ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zum Kundeneinsatz war die Programmierung einer einfachen Diagnosefunktionalität. So werden dem Fahrer bei Fehlfunktionen des Hybridsystems, über das Display am Fahrerarbeitsplatz, störungsabhängige Verhaltenshinweisen angezeigt (siehe **Bild 2.1.1-5**).

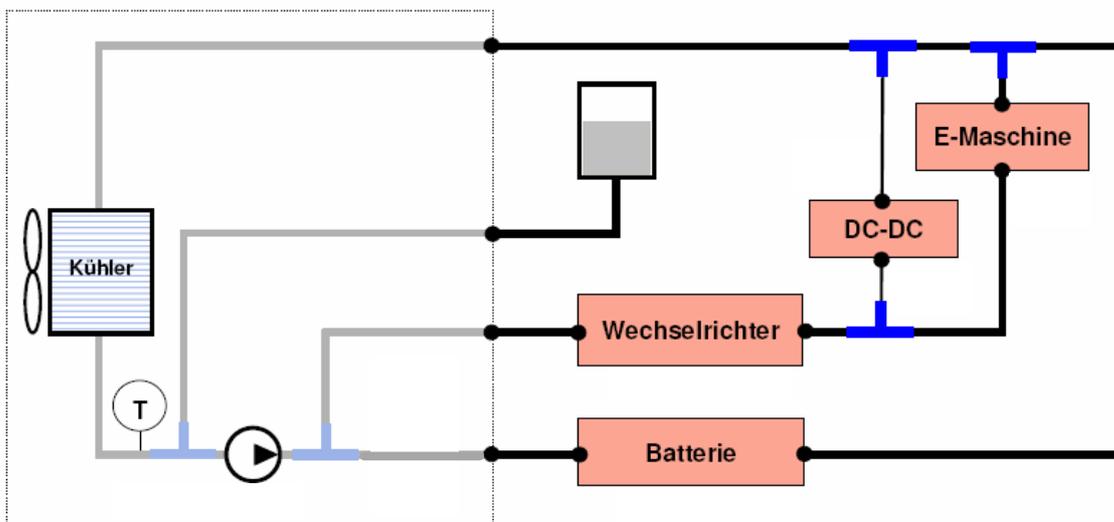


**Bild 2.1.1-5:** Hybrid-spezifische Fehlermeldungen

**Aufbau Technologieträger (Hybrid-Basisumfang)**

Im Rahmen des Förderprojekts wurde der bereits vorab begonnene Prototypenaufbau abgeschlossen. Die Hybrid-Ausstattung umfasst dabei den Basisumfang mit ISG-Hybridgetriebe, Wechselrichter, kleiner 2 kWh Li-Ionen-Batterie, Bordnetzladewandler und zusätzlicher Kühlung für die elektrischen Komponenten.

Die Fertigstellung beinhaltet im Wesentlichen noch den Einbau der Messtechnik, die Verbesserung der Kabelführung, den Tausch der HV-Kabel inkl. Welschläuche und die Auflastung des Fahrzeugs.



**Bild 2.1.1-6:** Schema des Sekundärkühlsystems

Weiterhin wurde die luftgekühlte Prototypenbatterie gegen eine wassergekühlte A2-Muster-Batterie getauscht. Hierzu musste der Sekundärkühlkreislauf angepasst und

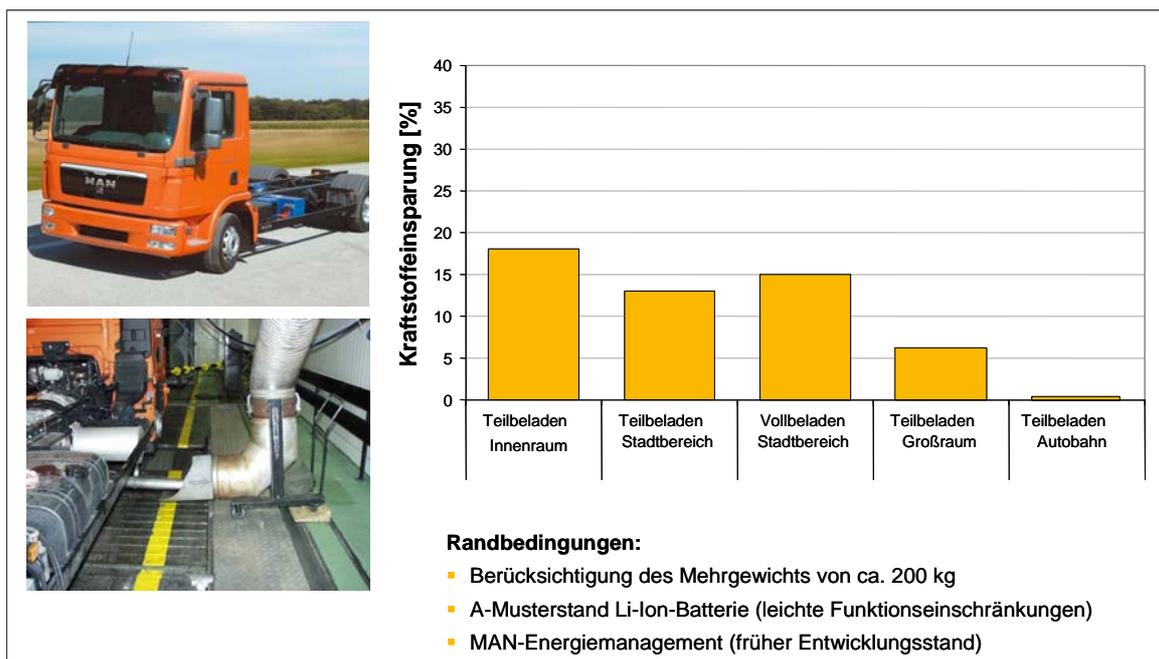
die Batterie mit einbezogen werden. **Bild 2.1.1-6** zeigt den Sekundärkühlkreislauf mit angeschlossenem Batteriesystem.

### Inbetriebnahme, Optimierung, Tests, Rollenprüfstand

Die Inbetriebnahme konnte erfolgreich abgeschlossen werden. An dem fahrfähigen Prototyp wurden umfangreiche Testfahrten durchgeführt, schrittweise der Funktionsumfang erweitert und neue Software-Stände der MAN- und ZF-Steuergeräte in Betrieb genommen.

Nach Abschluss einer ersten Optimierungsphase wurde das Fahrzeug auf dem MAN-Rollenprüfstand vermessen. Hauptziel der Messungen war die Ermittlung des Kraftstoffeinsparpotenzials. Durch eine ausführliche Vermessung des Basisfahrzeugs vor dem Umbau zum Hybridfahrzeug auf dem Rollenprüfstand, konnte ein am gleichen Fahrzeug gemessener Vergleich zwischen konventionellem und hybridisiertem Antriebssystem durchgeführt werden.

**Bild 2.1.1-7** zeigt das Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand sowie die Ergebnisse der Messungen. Es zeigen sich die bereits durch Simulation ermittelten, Einsatzprofil-abhängigen Kraftstoffeinsparpotenziale von 5 bis 15% im Verteilereinsatz. Im Autobahneinsatz konnte durch die Hybridfunktionalität der Verbrauchsnachteil durch das Mehrgewicht der Hybridkomponenten kompensiert werden.



**Bild 2.1.1-7:** Ergebnisse der Rollenprüfstandsmessungen

Weitere Messungen betrafen Berganfahrten, potenziellen Anhängerbetrieb, Beschleunigungsvermögen, das Bremsverhalten und anderer Punkte, die alle der weiteren Systemoptimierung, der weiteren Systemauslegung und der Optimierung des Energiemanagement dienen.

## 2.1.2 Systemerweiterung mit elektrischen Nebenaggregaten

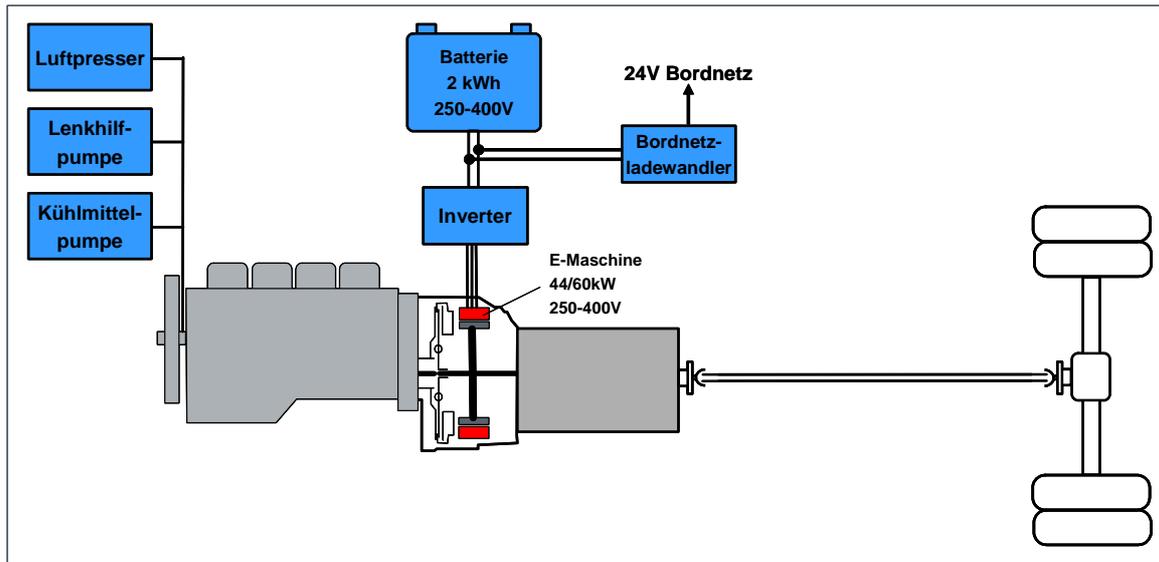
Durch die Drehzahlkoppelung der Nebenaggregate an den Dieselmotor im konventionellen TGL Fahrzeug war kein bedarfsgerechter, energieoptimierter Betrieb der Lichtmaschine, Luftpresser, Klimakompressor und Lenkhilfpumpe möglich. Ebenso war ein kurzzeitig elektrischer Fahrbetrieb bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor mit dem Hybrid-Basissystem nicht möglich, da die geforderte Lenkunterstützung nur bei laufender Lenkhilfpumpe sichergestellt war. Aus diesem Grund wurde eine Systemerweiterung mit elektrischen Nebenaggregaten in Betracht gezogen. Mögliche Konzepte zur Ersetzung der Lichtmaschine und Elektrifizierung von Luftpresser, Klimakompressor und Lenkhilfpumpe werden im Folgenden erläutert.

Für die Nebenaggregate-Ausstattung von Lkw der 12t-Klasse existierten nur die Lastenhefte für konventionelle Aggregate. Im Zuge der Elektrifizierung können durch zusätzliche Freiheitsgrade die Auslegung, die Funktionsanforderungen, Integrations- und Diagnosemöglichkeiten dieser Aggregate variieren. Ebenso mussten die mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anforderungen an die elektrischen Nebenaggregate, siehe **Bild 2.1.2-2**, erst noch erarbeitet werden. Ein geeignetes Nebenaggregate-Management für die zusätzlichen Freiheitsgrade und eine Schnittstelle zum Hybrid-Energiemanagement, mussten ebenfalls erst geschaffen werden.

Zur Modellierung der elektrischen Nebenaggregate und genaueren Definition der Systemanforderungen wurde das Simulationsmodell vom Hybrid-Basisumfang erweitert und validiert.

### **Systemauslegung/-anpassung für elektrische Nebenaggregate**

Die Systemauslegung beinhaltete die systemtechnische Auslegung, Optimierung und konstruktive Integration der o.g. elektrischen Nebenaggregate. Der Aufwand für die systemtechnische Auslegung lag z.B. darin, dass konventionelle Nebenaggregate direkt drehzahlgekoppelt vom Dieselmotor mechanisch relativ robust angetrieben werden, elektrische Nebenaggregate jedoch mit einem angepassten E-Motor angetrieben werden können. Der Hochvolt DC-Zwischenkreis des Hybrid-Basissystems, mit einer Betriebsspannung von 250 – 450 VDC, wurde für die Versorgung der Leistungselektronik der elektrischen Nebenaggregate vorgesehen.



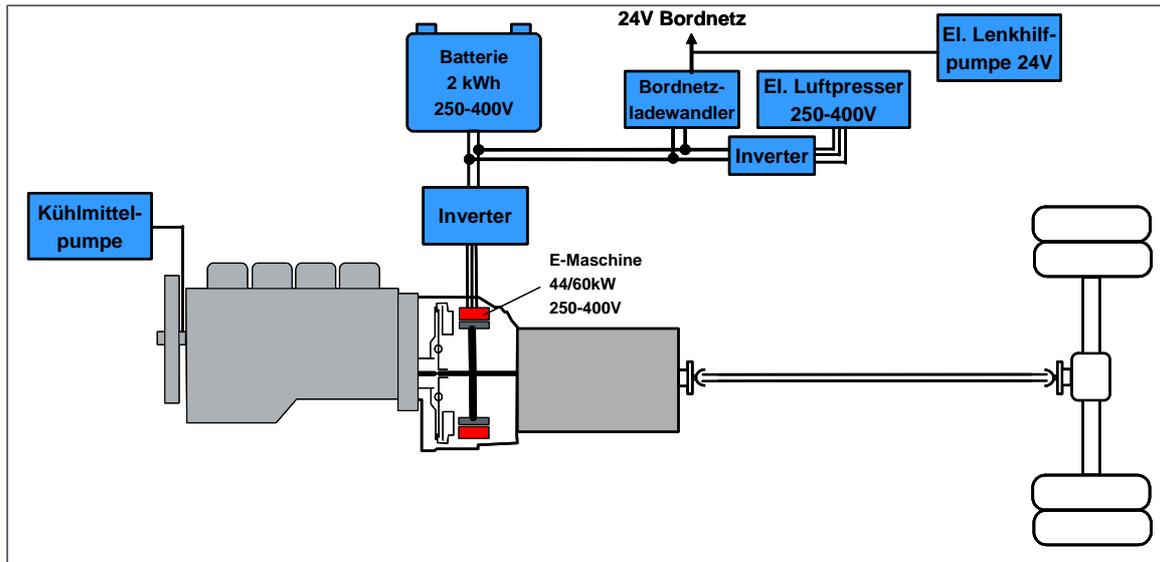
**Bild 2.1.2-1:** Nebenaggregatekonzept mit Bordnetzladewandler

Das erste Nebenaggregatekonzept im Hybrid-Basisumfang, dargestellt in **Bild 2.1.2-1**, führt einen Bordnetzladewandler (DCDC-Wandler von Hochvolt auf 24V) ein, die Lichtmaschine bleibt als Notsystem verbaut. So werden keine aufwendigen Eingriffe im Motorraum des konventionellen Systems nötig. Dies setzt aber voraus, dass der Verbrennungsmotor dauerhaft läuft um die restlichen Nebenaggregate anzutreiben. Vorausgesetzt wurde ebenso, dass die Primär-Kühlmittelpumpe stets am Verbrennungsmotor hängt. Dafür kann das Batteriesystem mit einem kleinen Speichereinhalte von 2 kWh nur zur Abdeckung der Hybridfunktionalität dimensioniert werden.

Um rein elektrisch Anfahren zu können, wurde im zweiten Schritt ein Konzept untersucht, das eine elektrische Lenkunterstützung vorsieht. Die spezifizierte Pumpe benötigt eine relativ geringe elektrische Dauerleistung von 1-2 kW und kann somit an das 24V-Bordnetz angeschlossen werden, das mittels des Bordnetzladewandlers stabilisiert und dauerhaft geladen werden kann. So ist ein Energieinhalt von 2 kWh bei der HV-Batterie weiterhin ausreichend. Die Serienanforderungen der konventionellen Lenkunterstützung konnte bei dieser Pumpleistung nicht ganz erfüllt werden, musste aber hinsichtlich der Drehzahlentkoppelung/Freiheitsgrade ohnehin neu beurteilt werden.

Ein Konzept mit rein elektrischem Fahrbetrieb (Zero-Emission-Betrieb) wird möglich durch die Einführung eines elektrisch angetriebenen Luftpressers. Ein Inverter ist hierzu mit dem DC-Zwischenkreis elektrisch verbunden und versorgt den E-Motor des Luftpressers. Der Energieinhalt der Batterie aus den vorherigen Konzepten ist allerdings zu gering für einen Zero-Emission-Betrieb über längere Strecken, weshalb dieser nicht direkt vom Fahrer, sondern nur abhängig vom Fahrzustand und Fahrzyklus über das Energiemanagement angesteuert werden kann.

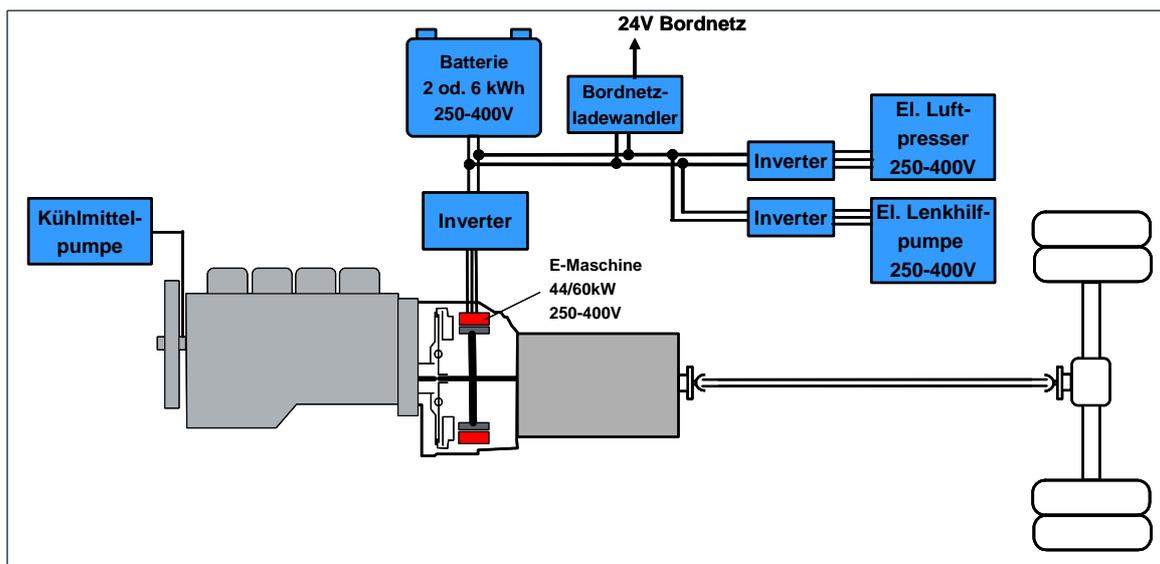
Die beiden o.g. Konzepte zur Elektrifizierung von Lenkhilfpumpe und Luftpresser sind gemeinsam in **Bild 2.1.2-2** dargestellt.



**Bild 2.1.2-2:** Nebenaggregatekonzept mit elektrischen Nebenaggregaten

Die nächste Konzeptuntersuchung sieht eine Erhöhung des Energieinhalts der Batterie auf 6 kWh bei gleicher Betriebsspannung vor und ermöglicht somit einen längeren rein elektrischen Fahrbetrieb bis ca. 5 km. Diesen kann der Fahrer nun selber durch einen Schalter anfordern. Die Kosten, Gewicht und Größe des Batteriesystems steigen hierbei jeweils deutlich. Die Ausführung der elektrischen Nebenaggregate entspricht weiterhin dem Konzept aus **Bild 2.1.2-2**.

Weiterhin lässt sich zusätzlich die elektrische Lenkhilfpumpe ebenfalls vom 24 V Bordnetz auf die Hochvolt-Schiene verlagern, womit höhere Pumpleistungen bei kleinerer Baugröße und somit die spezifizierte Lenkperformance voll erreicht werden.

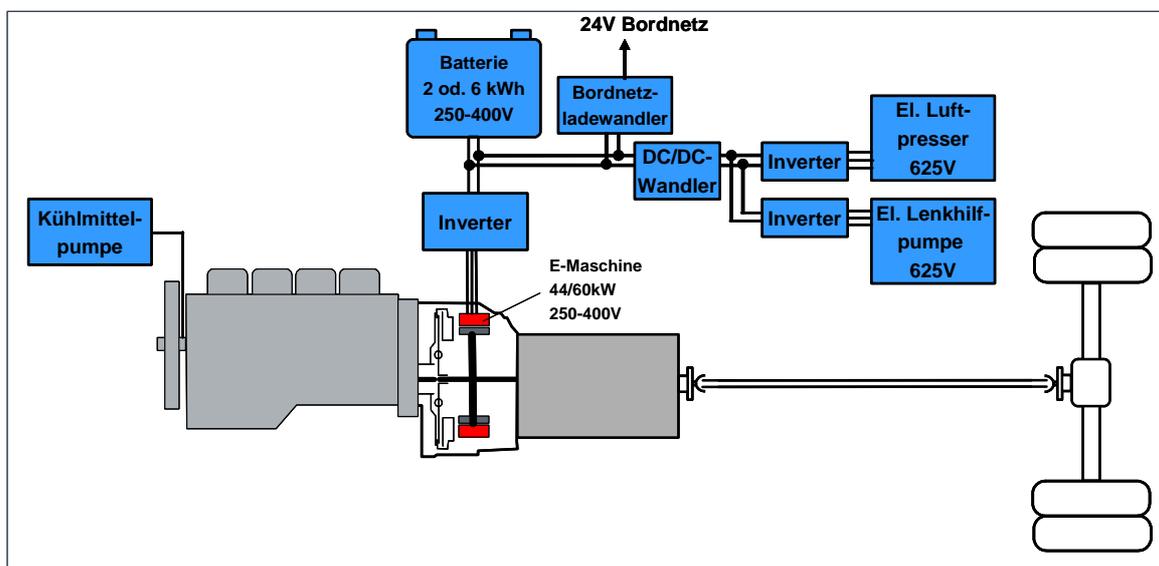


**Bild 2.1.2.3:** Nebenaggregatekonzept mit Hochspannungs-Nebenaggregaten

Das in **Bild 2.1.2-3** dargestellte Konzept bindet alle elektrischen Nebenaggregate

über eine geeignete Leistungselektronik an den DC-Zwischenkreis bei einer Betriebsspannung von 250 - 400 VDC.

Die o.g. Konzepte berücksichtigten HV-Komponenten aus dem PKW-Bereich mit Spannungen bis 400 VDC. Das HV-System im MAN Hybrid-Stadtbuss beinhaltet HV-Komponenten mit einer Betriebsspannung von 625 VDC. Um Synergien zu schaffen können die elektrischen Nebenaggregate aus dem Hybrid-Bus über einen DC/DC-Wandler über denselben DC-Zwischenkreis versorgt werden, siehe **Bild 2.1.2-4**. Somit wäre eine höhere Modularität bei der Komponentenlieferung gegeben. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Anforderungen der Nebenaggregate im Bus- und Lkw-Bereich zu differenziert sind, um aktuelle Synergieeffekte voll ausschöpfen zu können.

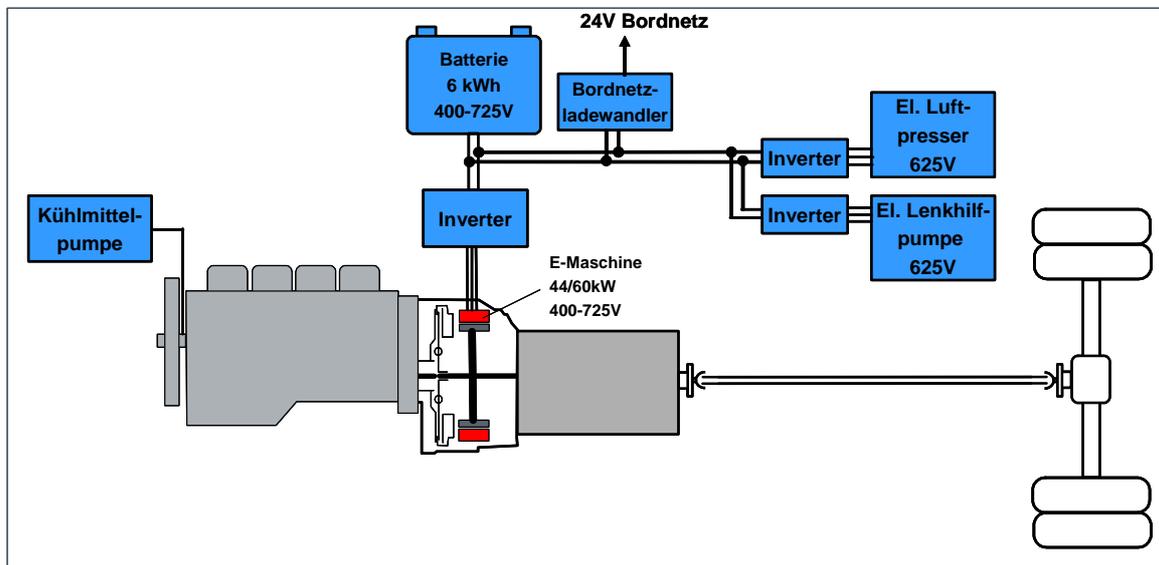


**Bild 2.1.2-4:** Nebenaggregatekonzept mit Komponenten aus dem Hybrid-Stadtbuss

Ebenfalls wurde ein Konzept untersucht, bei dem ein DC/DC-Wandler direkt an die HV-Batterie angeschlossen wird, um das Spannungsniveau des gesamten DC-Zwischenkreis zu erhöhen. Vorteil ist die Verfügbarkeit von qualifizierten Pkw-Batteriesystemen bis 400 VDC in absehbarer Zeit. Nachteilig ist der zusätzliche DC/DC-Wandler, welcher durch seine Anbindung an den Antriebswechselrichter schwerer, teurer und größer ausfällt und zusätzliche Verluste im elektrischen Fahrtrieb erzeugt.

Ein Nebenaggregatekonzept mit höherem Spannungsniveau aus dem Hybrid-Bus ist in **Bild 2.1.2-5** dargestellt und erübrigt den vorher diskutierten DC/DC-Wandler. Der elektrische Antriebsmotor, –wechselrichter sowie die elektrischen Nebenaggregate hängen am DC-Zwischenkreis mit einer Betriebsspannung von ca. 400 – 725 VDC, bedingt durch die Lithium-Ionen-Speichertechnologie. Die Serienschaltung von Einzelzellen ergab einen größeren Energieinhalt der Batterie von ca. 6 kWh, welches die Dauer des rein elektrischen Fahrbetriebs erhöht. Dem steht ein größeres, schwereres und teureres Batteriesystem gegenüber. Bei Anpassung der Inverter für

die elektrischen Nebenaggregate können dieselben Nebenaggregat-E-Motoren wie im Hybrid-Bus verwendet werden. Der elektrische Antriebsmotor sowie der Wechselrichter benötigen ebenfalls eine Anpassung auf die höhere Betriebsspannung.



**Bild 2.1.2-5:** Nebenaggregatekonzept mit Synergien zum MAN-Hybrid-Bus

Bei allen Konzepten ist der Energieinhalt des Batteriesystems entscheidend bei der Auslegung des restlichen Antriebsstrangs. So musste, um Baugröße, Kosten und Wirkungsgrade in günstigen Rahmen zu halten, der E-Motor sehr genau nach dem tatsächlichen Lastprofil und –kollektiv sowie notwendigen Leistungsspitzen ausgelegt werden. Zusätzlich spielt bei elektrischen Antrieben die Kühlung eine wesentliche Rolle, die die Dauer der Spitzenbelastung, den Übergang in die Dauerbelastbarkeit und das Derating stark beeinflusst. Dies machte sich vor allem in der technischen Auslegung der Leistungselektronik bemerkbar, welche das empfindlichste Glied in der thermischen Auslegungskette darstellt. Da die Geometriedaten der elektrischen Nebenaggregate von den konventionellen deutlich abwichen und eine Positionierung unabhängig vom Dieselmotor erfolgen konnte, war eine konstruktive Integration mit entsprechenden Bauraumuntersuchungen erforderlich. Weiterhin bestand die Möglichkeit vollkommen integrierte Komponenten inklusive Leistungselektronik, E-Motor und Pumpe/Kompressor zu verbauen oder eine im Fahrzeug zentrale Leistungselektronik für die einzelnen elektrischen Nebenaggregat-Antriebe zu benutzen, was z.B. Vorteile bei der Integration des Kühlsystems mit sich bringen würde. Untersuchungen hierzu sind ebenfalls in das letztendlich ausgearbeitete Konzept eingegangen. Auf der anderen Seite wollte man das HV-System möglichst modular gestalten, um die elektrischen Nebenaggregate relativ einfach in bestehenden Schnittstellen der konventionellen Systeme integrieren zu können ohne dabei die Luftdruckanlage, die Hydraulik für die Lenkunterstützung und dem Kühlmittelkreislauf der Klimaanlage des konventionellen TGL-Fahrzeugs zu stark zu verändern.

Auf Basis der Analyse der konventionellen Lenkunterstützung mit mechanisch angetriebener Hydraulikpumpe wurde eine entsprechende Systemoptimierung für eine elektrische Lenkhilfpumpe untersucht und daraus ein geeignetes Konzept erarbeitet. Die konstruktive Umsetzung hierzu erfolgte anschließend mit Einbau im TGL-Technologieträger.

Zur Einbindung einer elektrischen Klimaanlage wurde der konventionelle Kältemittelkreislauf des TGL hinsichtlich Integrationsfähigkeit und Energiebedarf untersucht. Es zeigte sich, dass die Integration eines elektrischen Aggregats in den bestehenden, konventionellen Kältemittelkreislauf möglich ist, ohne dabei Energieeinbußen durch den konventionellen Kältemittelregelkreislauf befürchten zu müssen. Nach Bewertung und Auswahl verschiedener Aggregatkonzepte fiel die Wahl auf ein Power-Pack mit integrierter Leistungselektronik, E-Motor und Pumpe. Die Steuergeräte-Logik zur Regelung des Kühlmittelkreislaufs wurde im bestehenden TGL-Klimasteuergerät beibehalten, so dass der Fahrer weiterhin die kalte Luftzufuhr über die Lüfterdrehzahl einstellen kann.

Durch die geforderte Modularität, sollte die Luftdruckanlage mitsamt konventionellem Lufttrockner bestehen bleiben, welcher der Luft im Förderbetrieb Feuchtigkeit entzieht und zwischen Förder- und Freiblasbetrieb mechanisch über interne Druckventile hin- und herschaltet. Deshalb wurde zur Elektrifizierung der Luftdruckanlage das Zusammenspiel von Luftpresser und Lufttrockner genauer analysiert und anschließend ein Konzept mit zusätzlicher Sensorik in der Luftdruckanlage erarbeitet.

### **Modellbildung und Simulation TGL 12.220 mit elektrischen Nebenaggregaten**

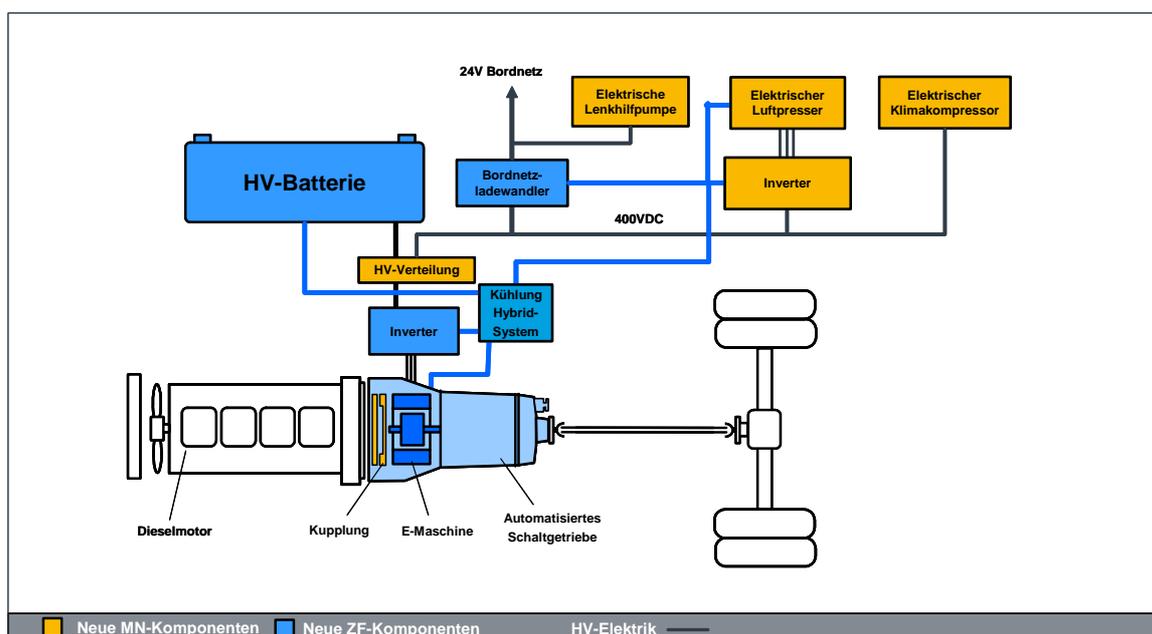
Das für den Hybrid-Basisumfang bereits erweiterte Simulationsmodell wird entsprechend mit Teilmodellen für die elektrischen Nebenaggregate ergänzt. Mit diesem Tool werden Simulationsstudien zur Ermittlung der Optimierungs- und Einsparpotenziale durchgeführt, die als Grundlage der Funktionsentwicklung und der weiteren Systemauslegung dienen.

Auf Seiten der Modellbildung wurde der Aufbau eines relativ komplexen Druckluftsystem-Modells weitergeführt. Zur Validierung des Modells wurden zusätzlich Messungen durchgeführt. Funktionell bietet dieses Modell die Simulation des Luftverbrauchs durch Betätigung der Bremsen und durch die Luftfederung sowie das Nachfördern über den Luftpresser.

### **Spezifikation und Beschaffung Komponenten für elektrische Nebenaggregate**

Die Entkoppelung der Nebenaggregate im TGL erlaubt Freiheitsgrade bei der Spezifikation der elektrischen und mechanischen Leistungen, da nun eine bedarfsgerechte Ansteuerung und Regelung möglich wurde. Für alle drei Nebenaggregat-Systeme konnten elektrische Nebenaggregate mit geeigneter Leistung gefunden werden. Ziel war die Integration von bereits für den Nutzfahrzeugbereich qualifizierten HV-Komponenten, jedoch waren nicht alle elektrischen Nebenaggregate mit eigener bzw. kompatiblen Leistungselektronik ausgestattet, so dass keine einheitliche elektrische Schnittstelle an den DC-

Zwischenkreis gegeben war. Da nur wenige passende Komponentenlösungen auf dem Markt existierten und im gewünschten Zeitraum verfügbar waren, wurde das in **Bild 2.1.2-6** dargestellte Konzept festgelegt.



**Bild 2.1.2-6:** Konzeptumsetzung der elektrischen Nebenaggregate am TGL Technologieträger

Ein für den Automobilbereich qualifizierter elektrischer Klimakompressor mit einer Betriebsspannung von 200 - 420 VDC konnte direkt an den DC-Zwischenkreis des Hybrid-Basisumfangs angeschlossen werden. Die bevorzugte Lösung für die elektrische Lenkhilfpumpe mit integriertem E-Motor und Leistungselektronik wurde am Rahmen seitlich hinter dem Hybridgetriebe angebracht und über das 24V-Bordnetz betrieben. Diese 24 V-Anbindung bot eine höhere Ausfallsicherheit gegenüber einem HV-System, was eine konventionelle Lenkhilfpumpe im Fahrzeug aus Sicherheitsaspekten überflüssig machte. Aufgrund der fehlenden Erfahrung mit dem 24 V-Lenksystem wurde die konventionelle Pumpe jedoch als Notsystem beibehalten. Ein für den Nutzfahrzeugbereich entwickelter Luftpresserprototyp, bestehend aus einem Kolbenkompressor mit angeflanschem E-Motor, wurde im hinteren Bereich des Fahrzeugs integriert und benötigte zur Ansteuerung einen separaten Wechselrichter auf 400V-Basis.

Das Fahrzeug-Packaging richtete sich nach dem Bauraum-Bedarf der verfügbaren HV-Komponenten. Ausschlaggebend für deren Einbauort waren vor allem die Verlegung der HV- und Rohrleitungen des sekundären Kühlkreislaufts zwischen Antriebswechselrichter und im Hybridgetriebe integrierten E-Traktionsmotor. Die wassergekühlten HV-Komponenten wurden so nah wie möglich an den ZF-Komponenten platziert. Die notwendigen Schnittstellen der Hydraulik für die Lenkunterstützung und die Rohre der Luftdruckanlage wurden an die Komponenten weiterverlegt. Die Verrohrung zum konventionellen Luftpresser wurde ausgebaut. Der Kreislauf der konventionellen Lenkhilfpumpe blieb bestehen und führte einen

Parallelzweig zum elektrischen Antrieb. Der Klimakompressor konnte nah am Verbrennungsmotor platziert werden, so dass nur die Klimazuleitungen verlegt werden musste. Das tatsächliche Packaging der elektrischen Nebenaggregate richtete sich nach dem geplanten HV-Komponentenstand des TGL Plug-In Hybridfahrzeugs und wurde mit dem Umbau des Technologieträgers zum Plug-In Hybrid umgesetzt.

Schlussendlich zeigte sich, dass am Markt nicht die gewünschten elektrischen HV-Komponenten für elektrische Nebenaggregate im TGL Fahrzeugbereich verfügbar waren.

### **Funktionsentwicklung für TGL 12.220 mit elektrischen Nebenaggregaten**

Für eine bedarfsgerechte Ansteuerung der elektrischen Nebenaggregate sorgte das Nebenaggregat-Management als Bestandteil des Energiemanagements. Es wurde als Unterfunktion im TGL Hybrid-/Energiemanagement integriert, welches eine energieoptimierte Ansteuerung der Nebenaggregate unter Berücksichtigung von Fahrzuständen und Fahrzeugdaten erlaubt. Hierfür wurde ein Konzept und entsprechende Architektur für die Software erarbeitet, um die bestehenden Software-Schnittstellen aus dem Hybrid-Basisumfang zu erweitern und anzupassen. Ein erster Entwicklungs-Stand wurde in Software geschrieben und bereits am Fahrzeugprototyp getestet:

- **Elektrische Lenkhilfpumpe:**

Erste Funktionstests der elektrischen Lenkhilfpumpe im Stillstand wurden erfolgreich durchgeführt. Da die konventionelle Pumpe weiterhin am Verbrennungsmotor installiert war, bot sich aus energetischen Gründen an, diese als Hauptpumpe bei laufendem Verbrennungsmotor zu betreiben und die elektrische Pumpe erst bei Verbrennungsmotor-Stopp zu aktivieren. Besonders komfort- und sicherheitskritisch war die Überblendung vom rein elektrischen Anfahren in einen konventionellen Fahrbetrieb bzw. umgekehrt, da dort ein Blending von der elektrischen zur konventionellen Lenkhilfpumpe erfolgen muss. Um die Qualität dieses Übergangs während der Fahrt beurteilen zu können, musste seitens ZF in den Hybrid-Komponenten Wechselrichter und E-Traktionsmotor eine Software zum Starten und Stoppen des Verbrennungsmotors während der Fahrt bereitgestellt werden. Auf Basis einer zunächst sehr rudimentären Software konnten auch diese Tests bereits erfolgreich durchgeführt werden. Eine Optimierung der Software erfolgte anhand der aufgezeichneten Fahrzustände.

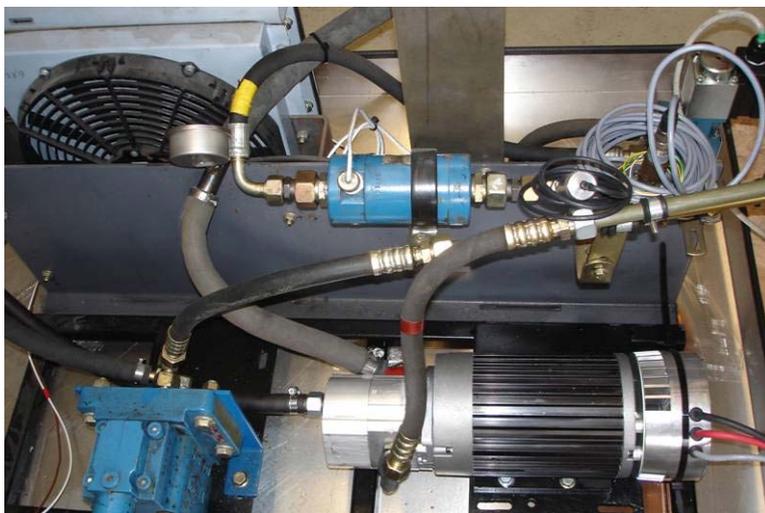
- **Elektrischer Luftpresser und Klimakompressor:**

Die Software-Anforderungen zur Ansteuerung dieser beiden elektrischen Nebenaggregate wurden spezifiziert und entwickelt.

### **Prüfstandstests zu elektrischen Nebenaggregaten**

Geplant wurden Komponententests der elektrischen Nebenaggregate am elektrischen Prüfstand, beispielhaft dargestellt in **Bild 2.1.2-7**. Ziel war die

Überprüfung der Funktion sowie die Vermessung hinsichtlich Wirkungsgrade und Komponentenparameter zur Erstellung von Kennlinien als Simulationseingangsparameter. Geprüft wurde die elektrische Lenkhilfpumpe bzgl. Leistungsaufnahme (in Abhängigkeit der Eingangsspannung), Wirkungsgradverhalten, Dynamik, Drehzahlregelung, Durchfluss und Kommunikation.



**Bild 2.1.2-7:** Prüfstandversuche mit elektrischer Lenkhilfpumpe

### **Ausrüstung mit elektrischen Nebenaggregaten**

Die für ein Plug-In Hybridfahrzeug erforderliche Traktions-Spannungserhöhung gegenüber des TGL Hybrid-Basisumfang, siehe **Abschnitt 2.1.3** Systemerweiterung für Plug-In-Betrieb, beeinflusste zusätzlich auch die Auslegung der elektrischen Nebenaggregate. Man versuchte unter Berücksichtigung von Synergieeffekten die verschiedenen Spannungsebenen modular, z.T. unter Verwendung von DC/DC-Wandlern mit möglichst wenigen Nebenaggregat-Ausführungen abzudecken. Die in **Abschnitt 2.1.2** Systemerweiterung mit elektrischen Nebenaggregaten modularen Nebenaggregat-Ausführungen konnten teilweise direkt bzw. mit Änderungen übernommen werden. Aus diesem Grund wurde die Ausrüstung des Technologieträger-Fahrzeugs mit elektrischen Nebenaggregaten verschoben, um diese gleichzeitig mit dem Umbau zum Plug-In Hybrid durchzuführen.

Die Anbindung der elektrischen Lenkhilfpumpe an das 24V-Bordnetz wurde beibehalten. Die bestehende elektrische 400 V-Schnittstelle des Klimakompressors wurde um einen DCDC-Tiefsetzsteller erweitert. Eine Weiterentwicklung der integrierten Leistungselektronik zur Abdeckung des Spannungsbereichs auf 700 VDC war somit nicht notwendig. Für die Anbindung des elektrischen Luftpressers an den HV-DC-Zwischenkreis konnte ein Umrichter aus dem Hybrid-Bus-Baukasten verwendet werden. Die Integration der zusätzlichen Komponenten benötigten einige Änderungen im Packaging des Fahrzeugs.

Es zeigte sich aber auch ein nicht vorhergesehener Mehraufwand bei der Eingliederung von HV-Komponenten aus dem Automobilbereich mit 400 VDC in den DC-Zwischenkreis mit 700 VDC. Diese nicht einheitlichen elektrischen Schnittstellen zum DC-Zwischenkreis erforderten zusätzlichen Entwicklungsaufwand, weil die

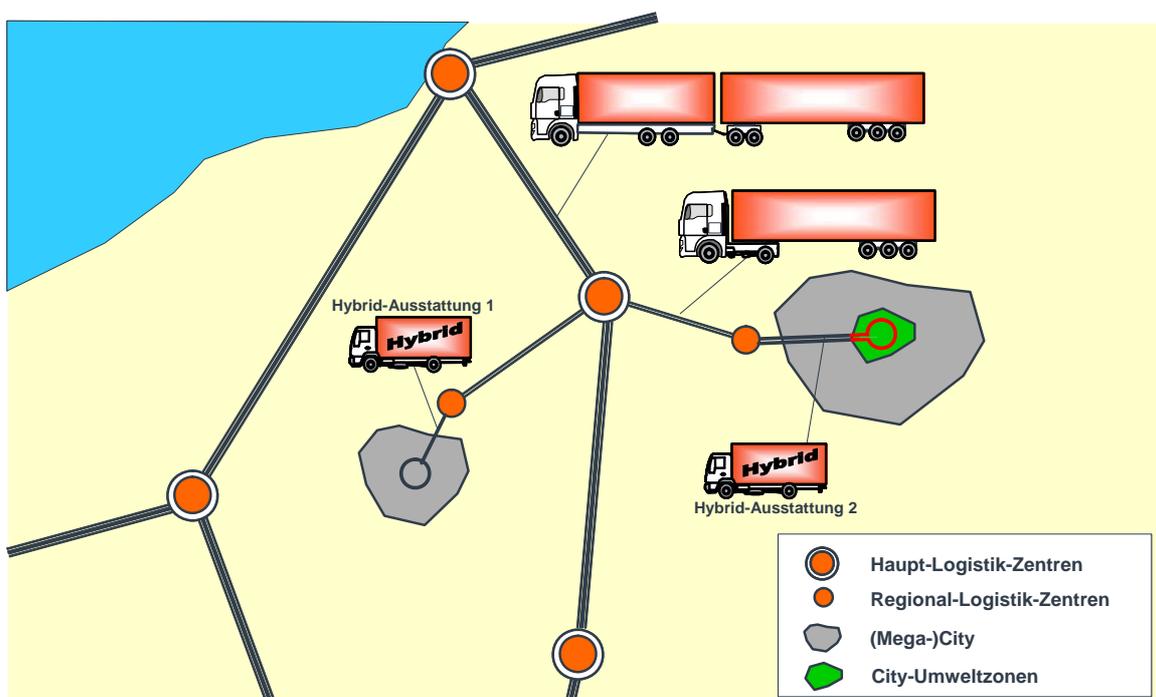
Grundlage der einzelnen Komponentenentwicklung jeweils unterschiedliche Betriebsspannungen voraussetzte und somit unterschiedliche Auslegungen der Komponenten bzgl. Grundspannungsfestigkeit, Festigkeit gegen Spannungsfllanken und Elektromagnetischer-Robustheit mit sich brachte.

### Inbetriebnahme, Optimierung, Tests

Die Ausrüstung des Technologieträgers mit der elektrischen Lenkhilfpumpe und deren Inbetriebnahme wurde bereits vor dem Umbau zum Plug-In Hybrid durchgeführt. Erste Fahrtests und grundsätzliche funktionale Softwaretests bestätigten den korrekten Betrieb der Komponente.

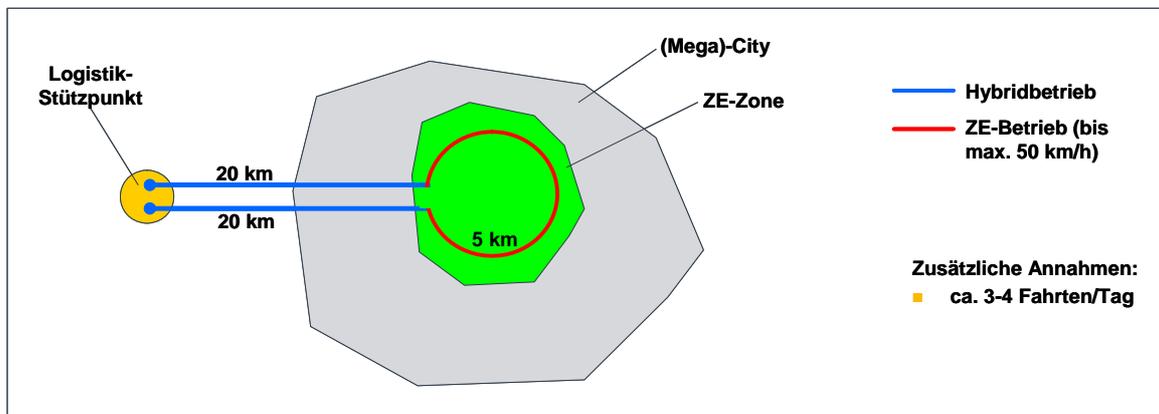
### 2.1.3 Systemerweiterung für Plug-In-Betrieb

Eine innerhalb der MAN durchgeführte Studie hatte ergeben, dass sich die Anforderungen aus der zukünftigen Warenverteilung ändern und in der Nutzfahrzeugentwicklung mitberücksichtigt werden sollten. Ergebnisse dieser Studie sehen ein zukünftiges Szenario voraus (siehe **Bild 2.1.3-1**), in dem an Verkehrsknotenpunkten Haupt-Logistik-Zentren liegen. Mit großen Fahrzeug-einheiten werden aus diesen heraus kleinere regionale Logistik-Zentren versorgt, die wiederum mit typischen, kleinen Verteiler-Lkw die Mega-Cities beliefern. Hinzu kommen Anforderungen des Gesetzgebers, dass City-Umweltzonen künftig nur noch von Fahrzeugen mit begrenzter Schadstoffemission, ggf. im Zero-emission-Betrieb z.B. nur rein elektrisch befahren werden dürfen.



**Bild 2.1.3-1:** Anforderung aus der zukünftigen Warenverteilung

Untersuchungen bereits existierender Umweltzonen aktueller Weltstädte sowie Befragungen großer Logistikunternehmen (z.B. DHL, UPS,...) ergeben ein mögliches Einsatzszenario eines typischen TGL-Verteilerfahrzeugs, dargestellt in **Bild 2.1.3-2**. Hierfür wurde eine typische Einsatzstrecke zwischen Logistik-Stützpunkt und Umweltzone von ca. 40 km ermittelt, welche sich wegen des innerstädtischen Verkehrs speziell für den Einsatz von Hybridfahrzeugen eignet. Ein Plug-In Hybrid-Fahrzeugkonzept mit größerem Batteriespeicher, der ausreichend dimensioniert ist um 5 km rein elektrisch zu fahren, würde den geforderten Betrieb innerhalb der Zero-Emission-Zone erlauben. Das Nachladen der Batterie ist sowohl auf der Einsatzstrecke zwischen Stadt und Logistik-Zentrum über den Hybrid-Betrieb als auch während der Be-/Entladezeit am Logistik-Zentrum über ein Onboard-Ladesystem möglich und optional vorgesehen.

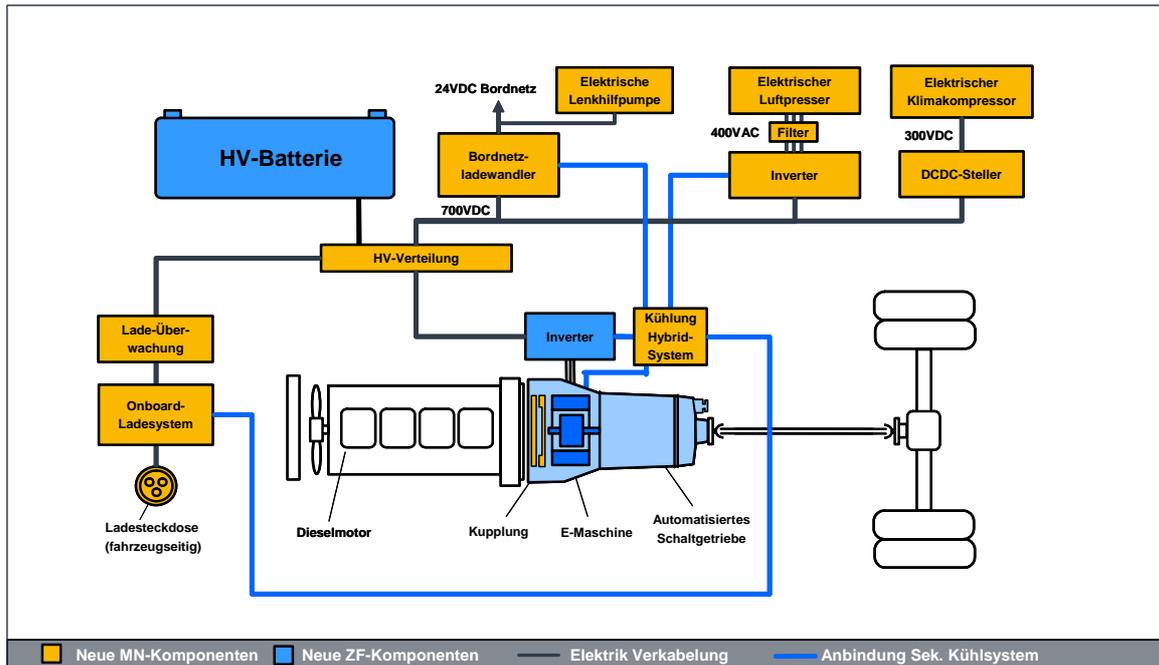


**Bild 2.1.3-2:** Mögliches Einsatzszenario TGL Plug-In Hybrid

### Systemauslegung/-anpassung für Plug-In-Ausrüstung

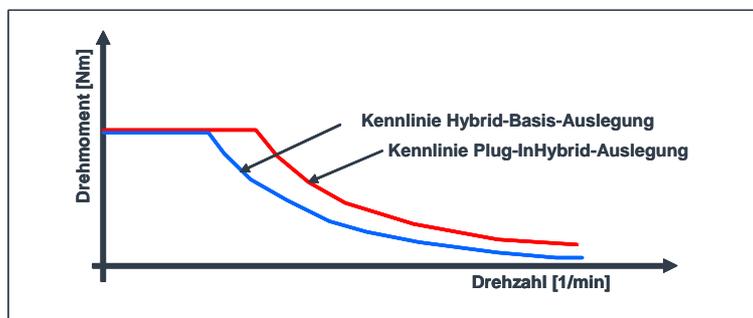
Die Systemauslegung stellt eine Erweiterung des Hybridsystems für den rein elektrischen Kurzstreckenbetrieb mit deutlich vergrößerter Batterie sowie die Nachlademöglichkeit über eine stationäre Ladestation mittels Onboard-Ladegerät und entsprechend erforderlicher Systemtechnik dar. Ebenso waren die damit verbundenen konstruktiven Integrationsarbeiten beinhaltet. Das ausgearbeitete Konzept ist in **Bild 2.1.3-3** dargestellt.

Für die Systemauslegung wurde zunächst das oben diskutierte mögliche Einsatzszenario sowie Anforderungen an die erforderliche Fahrdynamik des Plug-In-Fahrzeugs im elektrischen Betrieb definiert und mit ZF abgestimmt. Das Einsatzszenario beinhaltet v.a. die elektrische Mindestreichweite von 5 km, An- und Abfahrtsstrecken zwischen Logistik-Verteilzentrum und Zero-Emission-Zone, Nachladezeiten sowie Anzahl der Fahrten (Zyklen) pro Tag/Jahr.



**Bild 2.1.3-3:** Schematische Komponentenübersicht des TGL Plug-In Hybrid Konzepts

Da bzgl. Fahrdynamik ein „Mitschwimmen“ im Stadtverkehr ermöglicht werden soll, wurde als Anforderung eine Mindestgeschwindigkeit im rein elektrischen Betrieb von 60 km/h bei akzeptablen Beschleunigungswerten formuliert. Gemeinsam mit ZF durchgeführte Simulationsrechnungen (auch mit geänderten Getriebe-Schaltprogrammen) und Messungen mit der E-Maschinen-Ausrüstung des Hybrid-Basisumfanges zeigten, dass diese Motorisierung hierfür zu schwach war. Daher wurde die bereits für den modularen Hybridbaukasten definierte Skalierbarkeit der E-Maschinenleistung über eine Anhebung des Spannungsbereichs angewandt. Simulationsberechnungen zeigten, dass das Spannungsniveau auf 650 V anzuheben sei, um damit die benötigte, höhere E-Maschinen-Leistungen darstellen zu können (siehe **Bild 2.1.3-4**). Dies wirkt sich auch vorteilhaft auf die Rekuperationsleistung aus, die von 60 auf ca. 110 kW ansteigt.



**Bild 2.1.3-4:** E-Maschinenauslegung für den TGL Plug-In Hybrid

Das höhere Spannungsniveau, die höhere Fahr- und Rekuperationsleistungen

bestimmen ebenso die Dimensionierung der Lithium-Ionenbatterie wie die Anforderung der elektrischen Mindestreichweite. Der notwendige Energieinhalt der Batterie wurde auf ca. 10 bis 15 kWh unter Berücksichtigung der Batteriealterung bestimmt. Zur Nachladung der Batterie wurde das System um ein Onboard „Plug-In“ Batterieladekonzept erweitert. Dabei wurde die elektrische Leistung des Ladesystems so dimensioniert, dass der elektrische Energiespeicher während den Be- und Entladezeiten an den Logistik-Stützpunkten in angemessener Zeit aufgeladen werden kann. Eine Untersuchung der Ladezeiten verschiedener Batteriegrößen ist in **Tabelle 2.1.3-1** zu sehen. Ebenfalls abhängig sind die erreichbaren Ladezeiten von den begrenzten Ladeleistungen der vorhandenen Infrastruktur der 230VAC und 400VAC Netze. Die Untersuchung ergab, dass durch die Reduktion des Ladewirkungsgrads, die Reduzierung der Batterielebensdauer und den hohen Anforderungen an das Kühlsystem eine Schnellladung mit zunehmender Batteriegröße unwirtschaftlich ist.

	20 kWh-Batterie	50 kWh-Batterie	100 kWh-Batterie
Ladezeit [min]	Ladeleistung [kW]		
120 min	8	20	40
60 min	16	40	80
30 min	32	80	160
15 min	64	160	320
5 min	192	480	960

**Tabelle 2.1.3-1:** Nachladezeiten und erforderliche Ladeleistungen (Ladehub: 80 %)

Weiterhin beeinflusste die erforderliche Traktions-Spannungserhöhung zusätzlich die Auslegung der elektrischen Nebenaggregate. Unter Berücksichtigung von Synergieeffekten versuchte man, die verschiedenen Spannungsebenen der TGL Hybridfahrzeuge modular, z.T. unter Verwendung von DC/DC-Wandlern mit möglichst wenigen Nebenaggregat-Ausführungen abzudecken.

Neben der höheren Betriebsspannung wurden an das HV-System (el. Verkabelung, el. Stecktechnik, ...) und elektrische Sicherheitskomponenten neue Anforderungen auch bzgl. mechanischer Robustheit und Qualifizierung gestellt, die seitens der Zulieferer nicht ausreichend erfüllt werden konnten. Hier fanden Entwicklungsgespräche zur Weiterentwicklung dieser HV-Komponenten mit der Industrie statt.

Die „Plug-In“-Ladefunktionalität erzeugte im System einen neuen Betriebsmodus, der beim Anschließen des Batterieladesystems an das öffentliche Stromversorgungsnetz entsteht. Dieser war vor allem aus Sicht der elektrischen Sicherheitstechnik zu berücksichtigen. Durch einen Pilotkontakt in der Ladeperipherie und einer HV-Schutzeinrichtung zwischen Fahrzeug- und Netzbetreiberseite wurde eine ausreichende Ladeüberwachung, Steuerung und Schutzfunktion des Ladevorgangs hardwareseitig sichergestellt. Der zusätzliche Umfang in der Software-Funktionalität

wurde hierbei ebenso berücksichtigt.

### **Modellbildung und Simulation TGL 12.220 mit Plug-In-Ausstattung**

Das Hybrid-Fahrzeugmodell des TGL Hybrid-Basisumfangs wurde hinsichtlich der Plug-In-Ausstattung erweitert, um Simulationsstudien zur Ermittlung der Optimierungs- und Einsparpotenziale, die als Grundlage der Funktionsentwicklung und der weiteren Systemauslegung dienen, durchzuführen.

In Simulationsrechnungen konnte so der Energieverbrauch des Systems bei verschiedenen Fahrzyklen simuliert und ausgehend von der benötigten durchschnittlichen elektrischen Leistung die Auslegung der Kühlung des Batteriesystems spezifiziert werden.

### **Spezifikation und Beschaffung der Komponenten für Plug-In**

Aus den aufgezeigten Auslegungen wurde begonnen, ein geeignetes Batteriesystem entsprechend der erarbeiteten Spezifikation zu beschaffen. Hier wurden Anfragen an potenzielle Batterie-Zulieferer gestartet, welche aber keine geeigneten Prototypen oder Muster anbieten konnten. Gespräche zwischen ZF Friedrichshafen und MAN Truck & Bus steuerten die Entwicklung eines Batterieprototyps an. Entwicklungspartner von ZF war hierbei die Fa. I+ME, welche Know-How im Bereich Zellchemie und Batteriemanagementsysteme hatte und von ZF mit dem Aufbau des Batterieprototypen beauftragt wurde. ZF führte die Kühlsystemauslegung durch und war MAN-Ansprechpartner für die Fahrzeugintegration und Schnittstellendefinition. Unter Berücksichtigung der Ladeverluste, nutzbaren SOC-Bereich und Batteriealterung wurde ein Batterieenergieinhalt von größer 12 kWh für das o.g. Einsatzszenario spezifiziert. Durch die vorhandene Zelltechnologie erreichte der Batterieprototyp einen nutzbarer Energieinhalt von ca. 14 kWh und eine elektrische Leistung von ca. 80 kW.

Die Fa. Brusa bot als einziger Serienhersteller HV-Ladegeräte im Bereich der spezifizierten Batterie-Betriebsspannung. Die elektrische Leistung der verfügbaren Ladegeräte war zu gering, weshalb im Fahrzeug mehrere Ladegeräte in Parallelbetrieb integriert worden sind, was einen höheren Aufwand in Hardware und Software bedeutete. Erreicht wurde dadurch eine maximale Ladeleistung von 10 kW. Die benötigte Energie zum Durchfahren der definierten Zero-Emission-Zone konnte dem Batteriesystem damit in einer Ladezeit von ca. 36 min wieder zugeführt werden.

### **Funktionsentwicklung für TGL 12.220 Plug-In**

Die Funktionsentwicklung beinhaltete die Erweiterung und erforderliche Anpassung des strategischen Hybrid-/ Energiemanagements hinsichtlich des elektrischen Kurzstreckenbetriebs, geeignete Nachladestrategien (im Fahrbetrieb oder stationär während der Lade-/Entladezeiten am Depot) sowie Sicherheits- und Ladeüberwachungsfunktionen. Ebenso waren die zusätzlichen Komponenten in den Fahrzeug-CAN-Verbund zu integrieren.

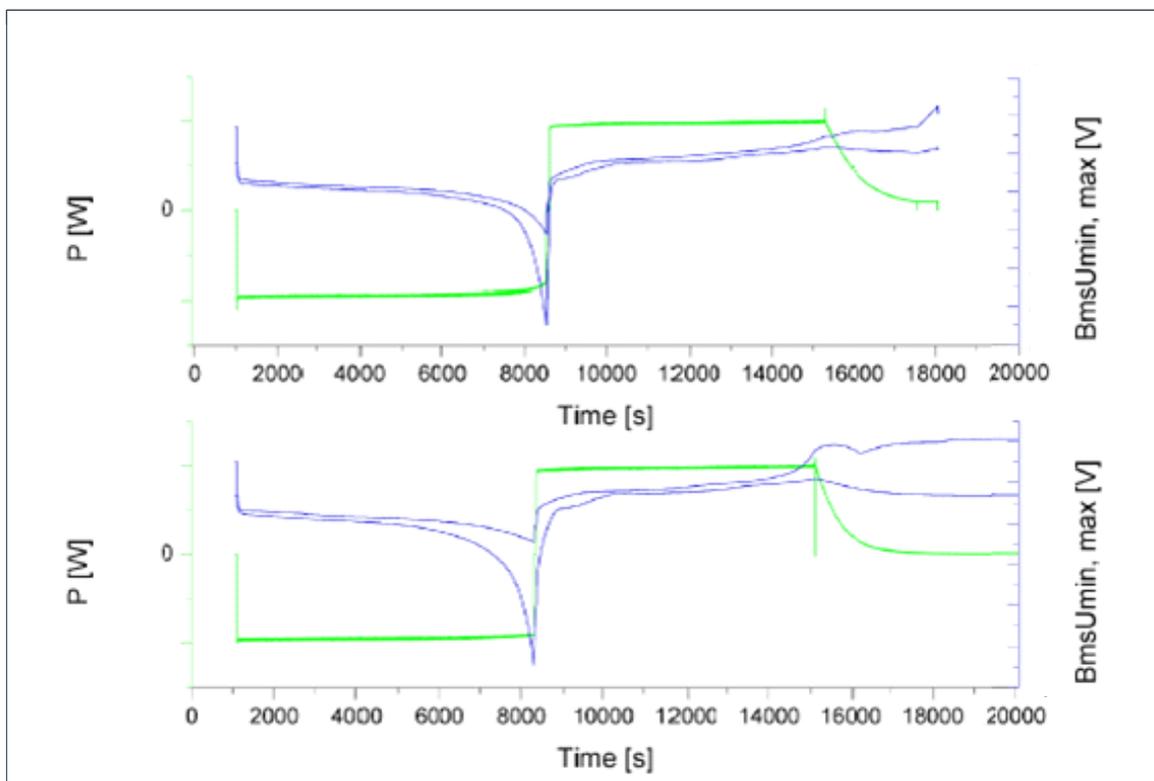
Alle MAN-seitigen Anforderungen an das Plug-In Konzept bzgl. Betriebsstrategie, Steuergerätestruktur, -versorgung, Hochlauf und Ladekonzept wurden definiert. Die

daraus abgeleitete CAN-Kommunikation wurde gemeinsam mit ZF abgesprochen und erstellt. Die geschriebene Software wurde teilweise bereits getestet.

### Prüfstandstests

Eine erste elektrische und thermische Untersuchung des ZF/I+ME Batterieprototypen am Fraunhofer-Institut belegte die elektrische Funktionalität der Batterie. Geprüft wurde die Batteriekapazität bei einer Belastungsrate von 0,5C (siehe **Bild 2.1.3-5**), die Vollentladung und anschließende Vollaufladung sowie die Dauerwechselbelastung bei maximalem SOC-Hub von 25%. Während den Messungen sollte die Wirksamkeit des Wärmemanagements überprüft werden.

Die Vermessung der Batterie ergab einen Betriebsspannungsbereich von 546 – 702 VDC und sowie einen nutzbaren Energieinhalt von 14 kWh. Die interne Luftkühlung zeigte noch Mängel bzgl. der spezifizierten elektrischen Dauerleistung. Eine genauere Bewertung am Prüfstand bei ZF läuft noch.



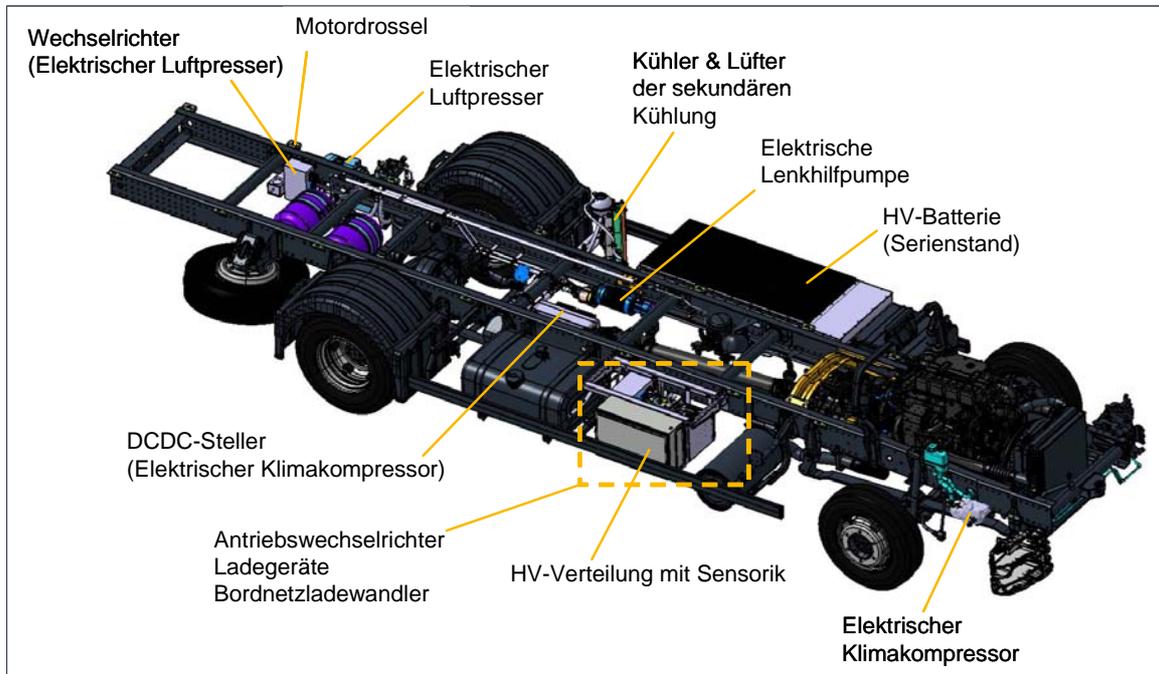
**Bild 2.1.3-5:** Vermessung Batterieprototyp für Plug-In-Ausstattung

### Ausrüstung zum Plug-In-Hybrid

Die Ausrüstung des bestehenden Prototypenhybridfahrzeugs zum Plug-In Hybrid beinhaltete den Umbau der Traktionsbatterie, den Einbau der Nachladetechnik mit Onboard-Ladegerät sowie die Modifikation des sekundären Kühlsystems und der elektrischen Verkabelung des HV-Systems.

Eine Übersicht des Packaging der HV-Komponenten inklusive der größeren Plug-In-Batterie und der Onboard-Ladepерipherie ist gemeinsam mit der Ausrüstung der

elektrischen Nebenaggregate in **Bild 2.1.3-6** zu sehen. Bei der Ausrüstung des TGL Technologieträgers mit elektrischen Nebenaggregaten wurde das notwendige Packaging des Plug-In Hybrid-Umfangs bereits mitberücksichtigt.



**Bild 2.1.3-6:** Komponentenintegration für Plug-In-TGL-Hybrid

Der Einbauort der Batterie liegt am linken Seitenträger hinter der 24V-Batterie. Da bei diesem Batterieprototyp auf Systemebene noch keine mechanischen Crashtests durchgeführt worden sind, wurde das Batterie-Packaging für seitlichen Rahmenanbau vorgesehen, jedoch aus Sicherheitsgründen mit einer Brückenthalterung zunächst auf der Fahrzeuginnenfläche montiert.

Durch den Anbau der Ladegeräte hinter dem Auspuff am Fahrzeugboden wurden diese mit einer spritzschutzwasserfesten Variante mit Wasserkühlung ausgestattet. Die zusätzliche Wasserkühlung konnte abhängig vom Fahrzeug-Betriebsmodus Fahren/Laden aktiv bzw. inaktiv geschaltet werden. Die Abwärme des Auspuffs ist zu vernachlässigen, da im Ladebetrieb der Verbrennungsmotor abgeschaltet ist und die Geräte nicht luftgekühlt sind.

Das Packaging der neuen 700V ZF-Antriebskomponenten Wechselrichter und der im Hybridgetriebe integrierten E-Maschine änderte sich nicht. Der Wechselrichter wurde möglichst nah zwischen Hybridgetriebe und Batterie hinten den Ladegeräten platziert. Der Bordnetzladewandler befindet sich über dem Wechselrichter.

Der Hochspannungsverteilerkasten, welcher ebenfalls die HV-Sicherungen und Fahrzeug-Sensorik enthält, wurde rechts seitlich vor den Wechselrichter, Bordnetzladewandler und Ladegeräten montiert.



**Bild 2.1.3-7:** Foto des aufgebauten Plug-In-TGL-Hybrid-Prototypfahrzeugs

**Bild 2.1.3-7** zeigt das fertig aufgebaute Plug-In-Hybrid-Prototypfahrzeug. Die erforderlichen Inbetriebnahmearbeiten wurden begonnen. Da jedoch die Prototypbatterie nochmals beim Hersteller überarbeitet werden musste, konnte die Inbetriebnahme nicht im Rahmen des Projektes abgeschlossen werden. Der Abschluss der Inbetriebnahme wird nach Rücklieferung der HV-Batterie voraussichtlich im 4. Quartal 2011 erfolgen können.

## 2.2 Hybrid-Erprobungsfahrzeuge TGL 12.220 (A2)

Neben den Tests und Bewertungen der einzelnen Hybrid-Prototyp-Fahrzeuge durch MAN-eigene Mitarbeiter ist für die Entwicklung der Hybridkonzepte auch der Betrieb im realen Einsatz bei Kunden sehr entscheidend. Daraus können noch offene Punkte beantwortet werden.

Die Ziele des Erprobungseinsatzes waren damit:

- Demonstration der Alltagstauglichkeit
- Test der Stabilität/Verfügbarkeit/Zuverlässigkeit des Hybridsystems
- Sammlung von Belastungskollektiven der Hybridkomponenten
- Test des Hybrid-/Energiemanagements
- Kundenfeedback bzgl. Hybrid-Funktionalität (Akzeptanz, Bedienbarkeit, Abstimmung,..)
- Analyse des energetischen Verhalten im realen Einsatz

Um jedoch die Hybrid-Prototypfahrzeuge bei einem Kunden einsetzen zu können, muss eine entsprechende Qualifizierung der Komponenten sowie eine Homologation der Prototypfahrzeuge erfolgen.

### 2.2.1 Entwicklung und Aufbau der Hybrid-Erprobungsfahrzeuge

Im Projektzug A2 war geplant, zwei baugleiche Erprobungsfahrzeuge aufzubauen und bei einem Kunden zu erproben. Die Festlegung der Fahrzeugkonfiguration erfolgte auf Basis des TGL-Hybrid-Technologieträgers. Da Nutzfahrzeuge immer kundenspezifisch angepasst werden, musste der Kunde für die Erprobung der beiden Prototypen bereits frühzeitig festgelegt werden (siehe auch **Abschnitt 2.2.4**).

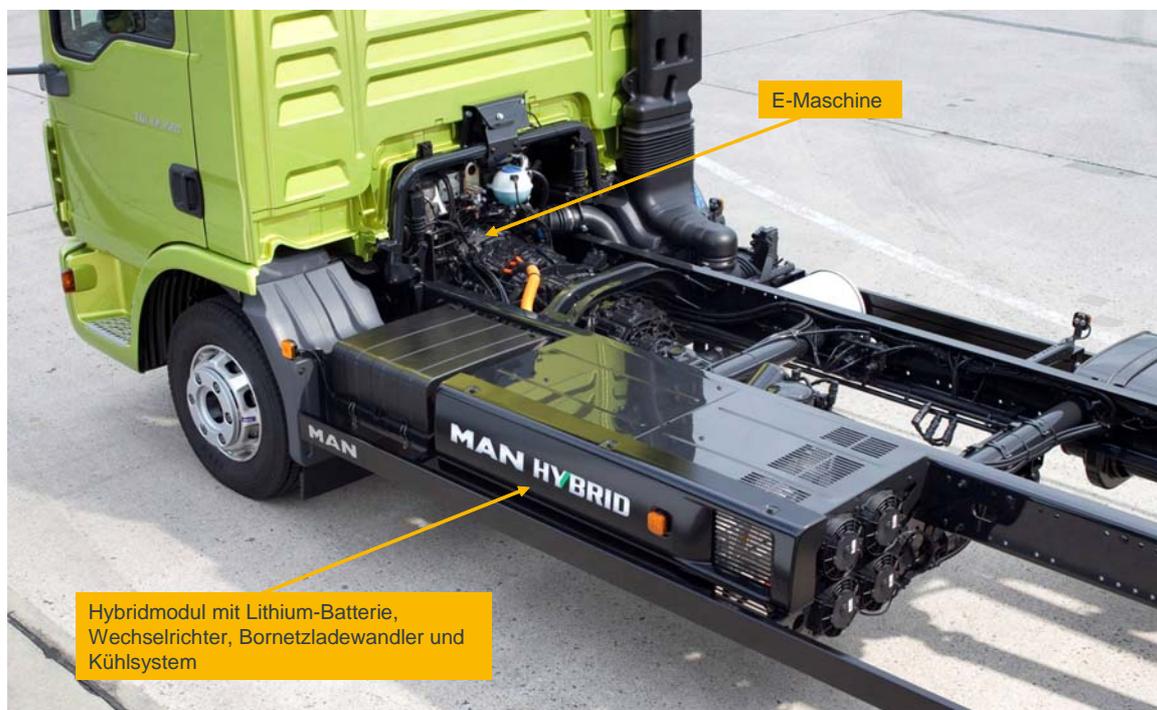
Aufgrund neuer Musterstände der Komponenten mit Unterschieden in Geometrie, Schnittstellen und Kühlungsanforderungen (z.B. Kühlung der Batterie nicht mehr separat, sondern integriert in den zweiten Kühlkreislauf) wurde die Integration der Hybrid-Komponenten im Vergleich zum TGL-Hybrid-Technologieträger (A1) komplett überarbeitet und der Modulgedanke konsequent umgesetzt. In diesem Zusammenhang wurde auch der zusätzliche Kühlkreislauf erneut simuliert und ausgelegt.

Der Aufbau der beiden Erprobungsfahrzeuge siehe (**Bild 2.2.1-1**) wurde aufgrund der sehr engen Zeitschiene parallel durchgeführt. Wesentliche Schritte waren hier die Integration des Hybridgetriebes, der Aufbau des neu gestalteten Hybridmoduls, das die Lithium-Batterie, den Wechselrichter, den DC-DC-Wandler, ein vorübergehend notwendiges EMV-Filter sowie die gesamten Kühlungskomponenten beinhaltet sowie der Einbau der HV-Verkabelung. Zusätzliche Arbeiten waren die Erweiterung des 24V-Bordnetzes, die Verdrahtungsänderungen im Bereich der Steuergeräte-Struktur sowie der Einbau zusätzlicher Steuergeräte und des Zusatzdisplays.



**Bild 2.2.1-1:** Aufbau der Erprobungsfahrzeuge

Die Integration der Hybridkomponenten ist in **Bild 2.2.1-2** zu sehen. Durch die Entwicklung des beschriebenen Hybridmoduls konnten alle Hybridzusatzkomponenten außer der E-Maschine zusammengefasst werden und somit eine sehr modulare Integration in das konventionelle Fahrzeug dargestellt werden.



**Bild 2.2.1-2:** Integration der Hybridkomponenten

Die technischen Hauptdaten der beiden aufgebauten und in Betrieb genommenen Fahrzeuge sind in **Bild 2.2.1-3** zusammengestellt.

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Verbrennungsmotor</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ D08-Vierzylinder-Dieselmotor</li> <li>■ Leistung 220PS</li> <li>■ Abgasnorm Euro 5 / EEV</li> </ul> </li>   <li>■ <b>Elektromaschine</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ PM Synchronmotor</li> <li>■ Betriebsspannung 340 V</li> <li>■ Leistung max. 60 kW</li> <li>■ Drehmoment max. 425 Nm</li> </ul> </li>   <li>■ <b>Energiespeicher</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lithium-Ionen Batterie</li> <li>■ Kapazität ca. 2 kWh</li> </ul> </li> </ul>	
--	--

**Bild 2.2.1-3:** Daten der Erprobungsfahrzeuge

## 2.2.2 Homologation der Erprobungsfahrzeuge

### Zulassungsrelevante Untersuchungen

Die zulassungsrelevanten Untersuchungen hinsichtlich Risikoanalyse, Bremsenabstimmung/-Abnahme, EMV-Messungen sowie Akustikmessungen mit jeweils notwendigen Optimierungsmaßnahmen und Messwiederholungen mussten für eine Freigabe und Zulassung der Erprobungsfahrzeuge auf öffentlichen Straßen durchgeführt werden.

Nach Beauftragung der TÜV SÜD Automotive GmbH erfolgte eine positive Beurteilung aller Zulassungsrelevanten Dokumente des Hybridsystemsumfangs von MAN und ZF. Die Abnahmetests durch den TÜV Süd vor Ort wurden ebenfalls erfolgreich durchgeführt.

EMV-Messungen der Erprobungsfahrzeuge bzgl. Störaussendung und Störfestigkeit (siehe **Bild 2.2.2-1**) wurden bei Kraus-Maffei-Wegmann entsprechend einer Typprüfung durchgeführt und in einem ausführlichen Typbeschreibungsbogen dokumentiert. Hinsichtlich der Serienentwicklung der HV-Komponenten wurden zukünftige Anforderungen bzgl. elektro-magnetischer Robustheit an ZF gestellt.



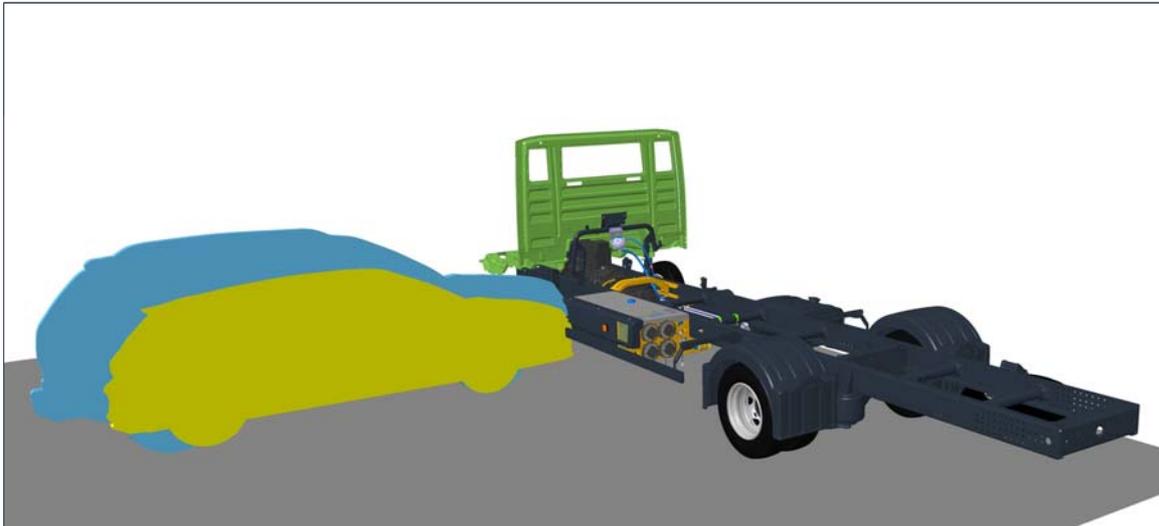
**Bild 2.2.2-1:** EMV-Störaussendung/-festigkeitsmessung in der EMV-Halle

Die EMV-Magnetnahefeldmessungen (**Bild 2.2.2-2**) sind nicht zulassungsrelevant, jedoch ebenfalls wichtig zur Beurteilung von EMV-Auswirkungen auf Personen, insbesondere Fahr- und Servicepersonal.



**Bild 2.2.2-2:** EMV-Nahfeldmessungen

Konstruktionsbegleitend wurden Festigkeits- und Crash-Untersuchungen im Bereich der seitlich am Fahrzeugrahmen angebrachten HV-Batterie durchgeführt (siehe **Bild 2.2.2-3**). Neben der geforderten Eigensicherheit der Batterie bei Deformation konnte durch zusätzliche mechanische Schutzeinrichtung die Sicherheit durch seitlichen Pkw-Kontakt weiter erhöht werden.



**Bild 2.2.2-3:** Unfallszenario bei seitlichem Pkw-Aufprall unterschiedlicher Pkw-Klassen

Allgemeine Tests zur Bremsfunktionalität wurden im Rahmen der Funktionsentwicklung durchgeführt und abgestimmt.

Eine aktuelle MAN Risikoanalyse für den Hybridsystemumfang wurde auf Basis einer Risikoeinschätzung von ZF für den Erprobungseinsatz durchgeführt.

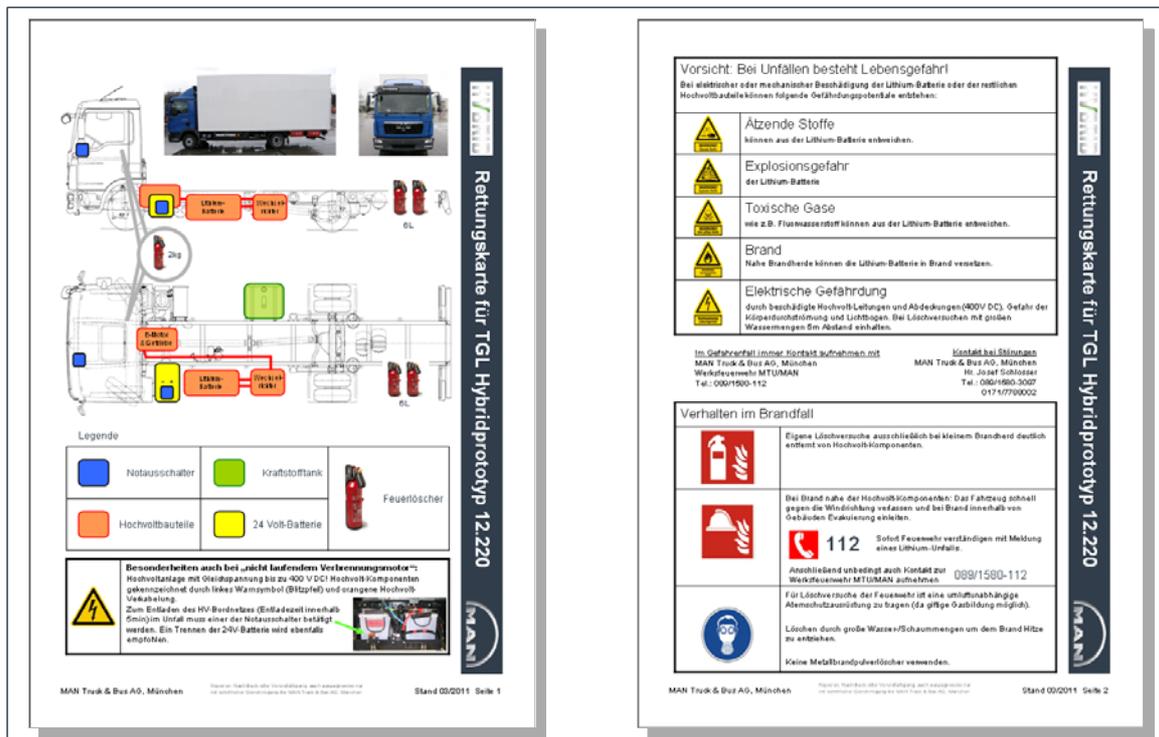
Ebenso wurden Gesamtfahrzeug-Akustikmessungen erfolgreich bei MAN vor Ort absolviert.

### Zulassung

Die Zulassungsdokumente (Systembeschreibung, Bedienungsanleitung, Sicherheitskonzept, Normen, etc.) wurden auf Basis der o.g. zulassungsrelevanten Dokumente und Untersuchungen erstellt und gemeinsam mit den Zulassungsbehörden durchgeführt.

Eine Liste der zulassungsrelevanten Untersuchungen und Vorbereitungen wurde erstellt. Die Abarbeitung aller Punkte war ebenfalls relevant für eine Zulassung der Hybriderprobungsfahrzeuge. Die Abnahmetests durch den TÜV Süd wurden erfolgreich abgeschlossen, womit eine Einzelzulassung der Erprobungsfahrzeuge auch nach der ECE-Regelung 100/01 für Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb erreicht werden konnte.

Ergänzend zu den Fahrzeugpapieren wurde, was durch das Engagement des ADAC bereits für konventionelle Pkw bereits nahezu Standard ist, auch eine Rettungskarte für die Erprobungsfahrzeuge erstellt (siehe **Bild 2.2.2-3**).



**Bild 2.2.2-3: Rettungskarte TGL Hybrid**

Die Rettungskarte ist insbesondere für Hybridfahrzeuge aufgrund der zusätzlichen Gefahrenpotentiale für Rettungskräfte wichtig. Sie zeigt neben der Lage der wesentlichen Komponenten die Anweisungen zur Spannungsfreischaltung des Hybridsystems, das bestehende Gefahrenrisiko, die Ansprechpartner im Notfall sowie geeignete Verhaltensweisen und Maßnahmen inkl. Löschmittel im Notfall.

### 2.2.3 Erprobung, Optimierung und Absicherung der Erprobungsfahrzeuge

Nach der Inbetriebnahme des Fahrzeuges folgte eine umfangreiche Erprobung und Feinparametrierung aller Teilkomponenten. Besonderes Augenmerk galt dem korrekten Anlaufverhalten der Kühlmittelpumpe und der Sekundärkühlkreislüftern, dem Zusammenspiel des Bordnetzladewandlers und der Backup-Lichtmaschine bei einem Ausfall des primären Energiewandlers, der Dynamik des WR-EM-Verbundes und dem Zuschalten und Trennen des Hochvoltenergiespeichers.

Die Erprobung und Abstimmung der Fahrzeugfunktionen erfolgte MAN intern auf einem eigenen Testgelände. Zur Erprobung der Funktionssicherheit der herkömmlichen Assistenzfunktionen wie ABS und ESP in Kombination mit einem Hybridfahrzeug, stand ein spezieller Streckenabschnitt mit unterschiedlichsten Straßenbelägen zur Verfügung. Anhand dieser konnten verschiedenste Bremssituation mit unterschiedlichen Haftreibungskoeffizienten ( $\mu$ -Wert) simuliert werden.

Die Optimierung der Betriebsstrategie gliederte sich in zwei Abschnitte. Im Fokus des ersten Abschnitts stand zunächst die Optimierung von Funktionen, welche die Zuverlässigkeit und Fahrbarkeit des Fahrzeugs im Feld verbesserten. Diese Optimierung erfolgte anhand von speziellen Fahrmanövern auf der Teststrecke. Die größte Herausforderung liegt dabei zum einen in einer ruckfreien Überführung der Momente von elektrischer Maschine und Verbrennungsmotor bei einem Wechsel der Antriebsstrangkonfiguration, zum anderen bei der Einbettung der hybrid Funktionen in die bestehenden Fahrzeugfunktionen des konventionellen Fahrzeugs.

Für die energetische Optimierung des Hybrid-Systems wurde das Fahrzeug basierend auf dem Stand aus Abschnitt 2.1.1 erneut auf dem MAN-Rollenprüfstand vermessen (siehe **Bild 2.2.3-1**). Hierzu wurde die Fahrzeugantriebsachse auf einer Prüfrolle mit verschiedensten Fahrprofilen beaufschlagt, die Ergebnisse analysiert und der Kraftstoffverbrauch durch eine gezielte, iterative Parametervariation minimiert.



**Bild 2.2.3-1:** Rollenprüfstandmessungen mit einem TGL-Hybrid-Erprobungsfahrzeug

Zur finalen Absicherung der korrekten/erwartungsgemäßen Funktionsweise der Steuerungs- und Energiemanagement-Software, wurde diese einem intensiven Fahrzeugsystemtest unterzogen. Anhand von über 150 definierten Usecases wurde das Systemverhalten systematisch gegen die festgelegten Systemanforderungen geprüft. Die Usecases umfassten hierbei diverse Bereiche aus dem Fahrzeugstandardverhalten und spezielle für das Hybridsystem definierte Testcases. Zu nennen sind als Beispiel, Fahrmanöver wie Konstantfahrten, Teil- und Vollastbeschleunigungen und div. Bremsmanöver mit ABS und ESP Eingriffen. Die Testcases zur Prüfung der Funktionalität des Hybridsystems, umfassen diverse

Wechsel der Antriebsstrangkonfigurationen, verschiedene Motor Stopp-Start Abläufe, provozierte Energiespeicherüberläufe, bis hin zu simulierten Ausfällen einzelner Systemkomponenten.

Das Fahrzeug zeigte in sämtlichen Situationen ein äußerst robustes und souveränes Verhalten gegen diese Störeinflüsse.

## 2.2.4 Kunden-Erprobungseinsatz mit Betreuung und Auswertung

Die Suche nach einem geeigneten Kunden für den Erprobungseinsatz wurde bereits zu einem sehr frühen Projektzeitpunkt begonnen um die möglichen Kundenspezifischen Anforderungen bereits in den Aufbau der Fahrzeuge einfließen zu lassen. Kriterien für die Auswahl des Kunden waren unter anderem die Nähe zum MAN-Werk, das Fahrzeug-Einsatzprofil des Kunden und der bereits vorhandene Fuhrpark des Kunden bzgl. Vergleichbarkeit zu den Hybrid-Fahrzeugen. Die Firma Arndt erfüllt als typische Verteilerfirma im Großraum München mit Sitz in Allach alle relevanten Anforderungen, die an den Pilotkunden für den Erprobungseinsatz gestellt wurden.

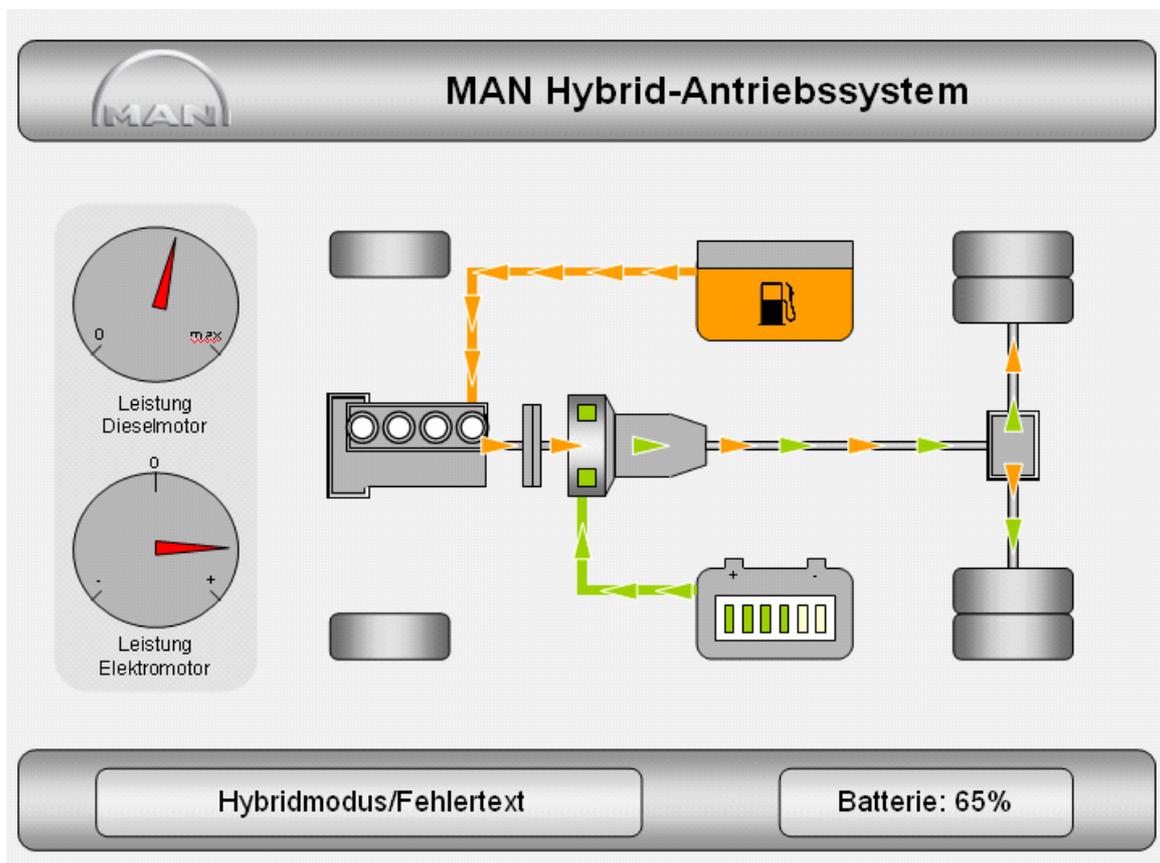
Zur Vorbereitung der beiden Erprobungsfahrzeuge auf den Erprobungseinsatz wurde neben den technisch notwendigen Entwicklungsarbeiten und der Zulassung seitens MAN eine Außengestaltung der Fahrzeuge entworfen, die die Standard-Außengestaltung der konventionellen Fahrzeuge des Kunden als auch das Thema Hybrid vereint (siehe **Bild 2.2.4-1**), um auch eine entsprechende Außenwirkung des Erprobungseinsatzes zu erzeugen.



**Bild 2.2.4-1:** Hybridspezifische Außengestaltung der Erprobungsfahrzeuge

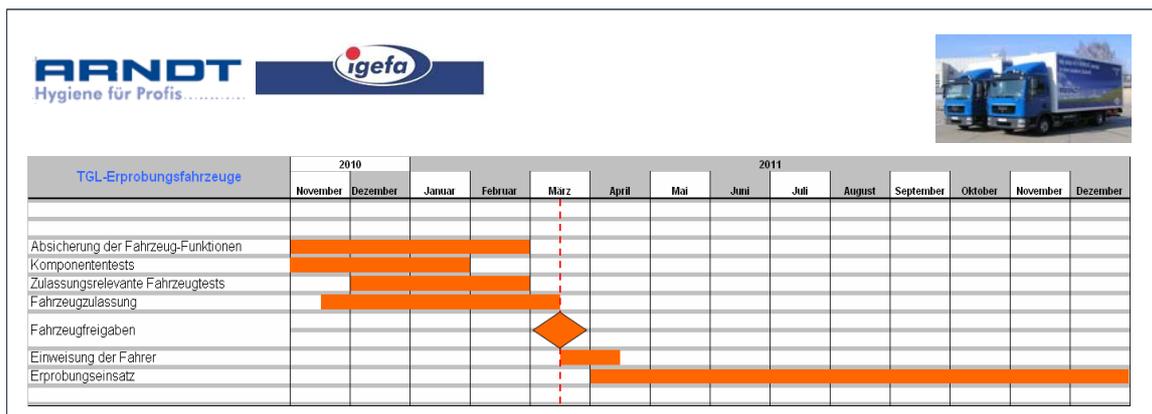
Nach Abstimmung mit dem Kunden wurden das Design festgelegt und die beiden Fahrzeuge entsprechend beklebt.

Um auch den Fahrern ein besseres Systemverständnis über die Funktionalität des Hybridsystems zu vermitteln wurde zusätzlich eine Energieflussanzeige programmiert (siehe **Bild 2.2.4-2**) und in einem seitlich am Fahrer Arbeitsplatz angebrachten Zusatzdisplay dem Fahrer angezeigt. Die Energieflussanzeige zeigt im Fahrbetrieb die jeweiligen aktuellen Leistungen des Verbrennungsmotors und der E-Maschine sowie die Energieflussrichtungen zwischen den Antriebsstrang-Komponenten in Abhängigkeit des Betriebszustandes



**Bild 2.2.4-2:** Energieflussanzeige am Fahrer Arbeitsplatz

Der Beginn des Erprobungseinsatzes konnte nach Abschluss der Absicherungsmaßnahmen Anfang April 2011 erfolgen (siehe **Bild 2.2.4-3**) und wurde zunächst bis Ende September 2011 terminiert, jedoch aufgrund des positiven Verlaufs bis Ende 2011 verlängert.



**Bild 2.2.4-3:** Zeitplan für Erprobungseinsatz bei Fa. Arndt

In einem ersten Treffen mit Firma Arndt wurden neben den Vertragsbestandteilen auch bereits der Zeitplan für Feedbackgespräche und regelmäßige Inspektionstermine festgelegt. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Treffens war die Fahrerschulung/Einweisung. Da es sich bei den Erprobungsfahrzeugen um Prototypen und nicht um Serienfahrzeuge handelt, ist ein Betrieb der Fahrzeuge nur durch Fahrer erlaubt, die eine entsprechende Unterweisung zu den Fahrzeugen durchlaufen haben. Der Inhalt der Unterweisung erstreckte sich von technischen Grundlagen des Hybridsystems über die korrekte Bedienung des Fahrzeugs bis hin zum richtigen Verhalten bei einem Systemausfall oder im Gefahrenfall. Ein weiterer Bestandteil der Schulung war eine Einweisungsfahrt auf dem MAN-Testgelände. Auf dem für die Öffentlichkeit gesperrten Gelände bestand die Möglichkeit das Fahrzeugverhalten in verschiedensten Fahrsituationen kennen zu lernen, wie z.B. das elektrische Anfahren bei 15% Steigung.

In **Bild 2.2.4-4** sind die beiden für die Übergabe an die Fa. Arndt vorbereiteten Erprobungsfahrzeuge abgebildet.

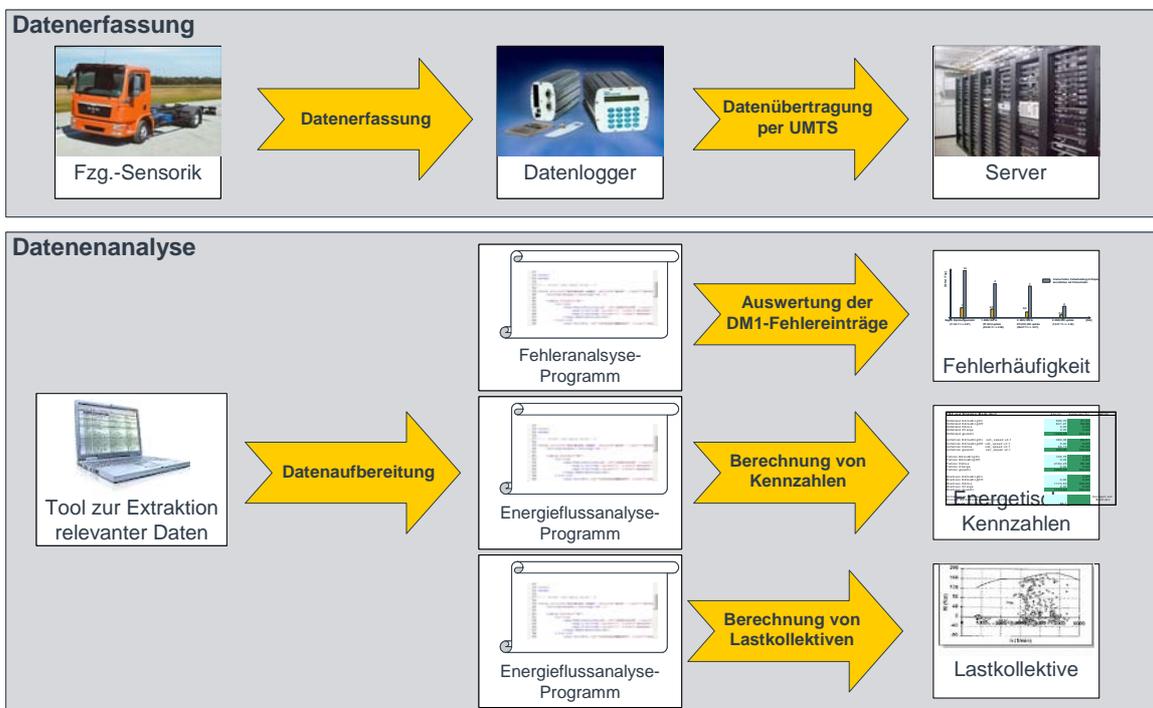


**Bild 2.2.4-4:** Erprobungsfahrzeuge vorbereitet für die Übergabe an Fa. Arndt

An den ersten beiden Tagen des Erprobungseinsatzes wurden die Fahrer der Firma

Arndt von einem Funktionsentwickler der MAN begleitet, um die Fahrer gezielt auf die Fahrzeugeigenschaften im typischen Arbeitseinsatz hinzuweisen. Ein regelmäßiger Informationsaustausch bzgl. Fahrverhalten, Alltagstauglichkeit, Fehlermeldungen und Verbesserungsvorschlägen zwischen Fahrern und MAN-Entwicklern fand im Rahmen der Inspektionstermine statt.

Beide Erprobungsfahrzeuge wurden mit Datenloggern zur Erfassung von Funktionsrelevanten und Energierelvanter Daten ausgerüstet (siehe **Bild 2.2.4-5**). Diese Daten wurden täglich automatisch per UMTS an einen Server gesendet, von der MAN ausgelesen und zur weiteren Analyse aufbereitet. Anhand der Rückmeldungen aus den Fahrgesprächen und der Kombination mit den Messdaten der Datenlogger konnte die Software in regelmäßigen Abständen bezüglich Zuverlässigkeit und dem energetischen Systemverhalten optimiert werden.



**Bild 2.2.4-5:** Datenaufzeichnung und Verarbeitung

Neben der Optimierung der Software wurden aus den Daten mit entsprechenden Tools automatisch Lastkollektive für die verschiedenen Hybridkomponenten gebildet. Diese Kollektive dienen als Grundlage für zukünftige Komponenten- und Systemauslegungen, sowie zur Abschätzung der Komponenten-Lebensdauern.

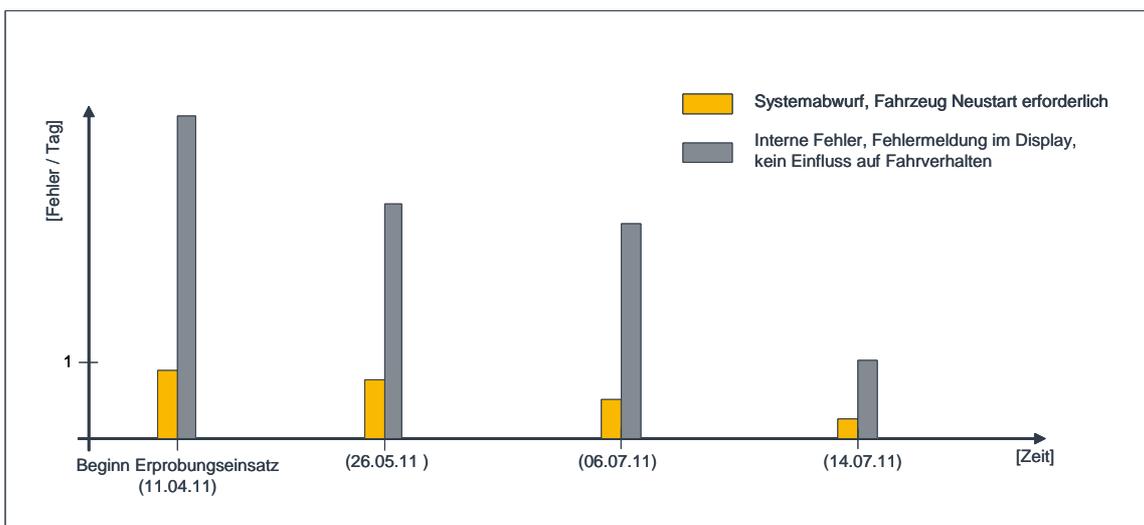
Während des gesamten Erprobungseinsatzes wurden beide Fahrzeuge routinemäßig im Abstand von drei Monaten im MAN-Werk untersucht. Dafür wurden geeignete Wartungs- und Checklisten erstellt (siehe **Bild 2.2.4-6**). Neben einer optischen Begutachtung des Hybridsystems lag der Fokus vor allem auf der elektrischen Sicherheit des Systems, die anhand verschiedener Prüfvorgänge mit einem

entsprechenden Prüfprotokoll sichergestellt wurde. Bei aufgetretenen Störungen während des Betriebs, wurde das System von MAN-Fachleuten vor Ort bei der Firma Arndt untersucht und gegebenenfalls Reparaturarbeiten im MAN-Werk durchgeführt.



**Bild 2.2.4-6:** Wartungslisten für Wiederholungsprüfungen am HV-System sowie Fahrzeugchecklisten

Die Fahrzeuge zeigten sowohl bei der Hardware wie auch bei der Software während des gesamten Einsatzes ein sehr robustes Verhalten. Bereits nach einer sehr kurzen Anlaufphase konnten die Fehler, die den Fahrer zu einem Neustart des Systems aufforderten, wie in **Bild 2.2.4-7** dargestellt, auf deutlich unter einen Fehler pro Tag gesenkt werden. Die Antriebsstrangkomponenten blieben bis zur Berichtserstellung fehlerfrei. Lediglich die Komponente zur Versorgung des 24V-Bordnetzes musste wegen eines Defektes in einem Fahrzeug einmalig getauscht werden.



**Bild 2.2.4-7:** Fehlerhäufigkeit Hybridsystem im Erprobungseinsatz

Die energetische Analyse der Daten aus dem Erprobungseinsatz so wie die Analyse einer parallel zur Erprobung laufenden Verbrauchsmessung im Münchner Stadtgebiet zeigten eine deutliche Übereinstimmung zu den Ergebnissen aus Simulation und des Rollenprüfstands. Auch die Zyklus-Abhängigkeit des Kraftstoffeinsparpotenzials stellte sich mit erwarteten Werten im Mittel von 5 bis 15 % ein.

## 2.3 Hybrid-Prototypfahrzeug der 26-40t-Gewichtsklasse (A3)

Das Einsatzprofil von normalen Verteilerfahrzeugen, auch in der 26t-Gewichtsklasse ist hinreichend bekannt. Da hier wenige Änderungen im Vergleich zum 12t-Verteiler-LKW sowohl was Einsatzprofile als auch Hybridisierungskonzepte betrifft, zu sehen sind, wurden auch andere Einsatzrandbedingungen betrachtet. Zum einen sollten Müllsammelfahrzeuge im Hinblick auf eine Hybridisierung weitergehend analysiert werden. Zum anderen wurde der Fernverkehrseinsatz als Untersuchungsgegenstand für eine Hybridisierung gewählt.

### 2.3.1 Analyse von Einsatzprofile von Müllsammelfahrzeugen hinsichtlich Hybridisierung

Um die Möglichkeiten einer Hybridisierung untersuchen zu können, müssen zunächst die konventionellen Einsatzprofile der jeweiligen Fahrzeugklasse ermittelt werden. In einer Marktrecherche ergaben sich folgende näher zu untersuchende Einsatzprofile:

- Müllsammelfahrzeuge lassen sich in verschiedene unterschiedliche Aufbaukonzepte unterscheiden. Man unterscheidet zwischen Heckladern, Seitenladern, Frontladern und Absetzkippern.
- Unterscheidung zwischen kommunalem Entsorger und privatem Betreiber.
- Ebenso relevant ist der Einsatzort des entsprechenden Fahrzeugs, dies sind Großstädte, Kleinstädte und ländliche Regionen.

#### Ermittlung der Einsatzprofile für 26t-Fzg-Klasse

Nach dieser groben Klassifizierung wurde eine Anzahl von Fahrzeugen und Einsatzbedingungen ausgewählt, mit Messtechnik ausgestattet und jeweils mindestens eine Woche lang vermessen. Dies sollte im ersten Schritt eine Klassifizierung der Betriebszeiten und Fahrprofile zulassen.

Ausgewählt wurden je ein:

- Hecklader eines kommunalen Betreibers in einer Großstadt
- Hecklader eines privaten Betreibers in einer Kleinstadt und in ländlicher Gegend
- Frontlader eines privaten Betreibers in einer Großstadt
- Absetzkipper eines privaten Betreibers in ländlicher Umgebung
- Seitenlader eines privaten Betreibers in einer Kleinstadt und in ländlicher Gegend

Alle oben genannten Fahrzeuge wurden mit Messtechnik zur CAN-Aufzeichnung sowie einem GPS-Gerät ausgestattet.

Im zweiten Schritt wurden der Hecklader des kommunalen Betreibers sowie der Frontlader des privaten Betreibers (siehe **Bild 2.3.1-1**) zusätzlich mit

Drehmomentwellen zur Leistungsmessung am Fahrzeugantrieb und am Nebenabtrieb sowie mit einer Kraftstoffmessanlage ausgestattet. Damit konnten neben dem Geschwindigkeitsprofil auch Kraftstoffverbräuche sowie Leistungs- und Energiebedarfe ermittelt werden.



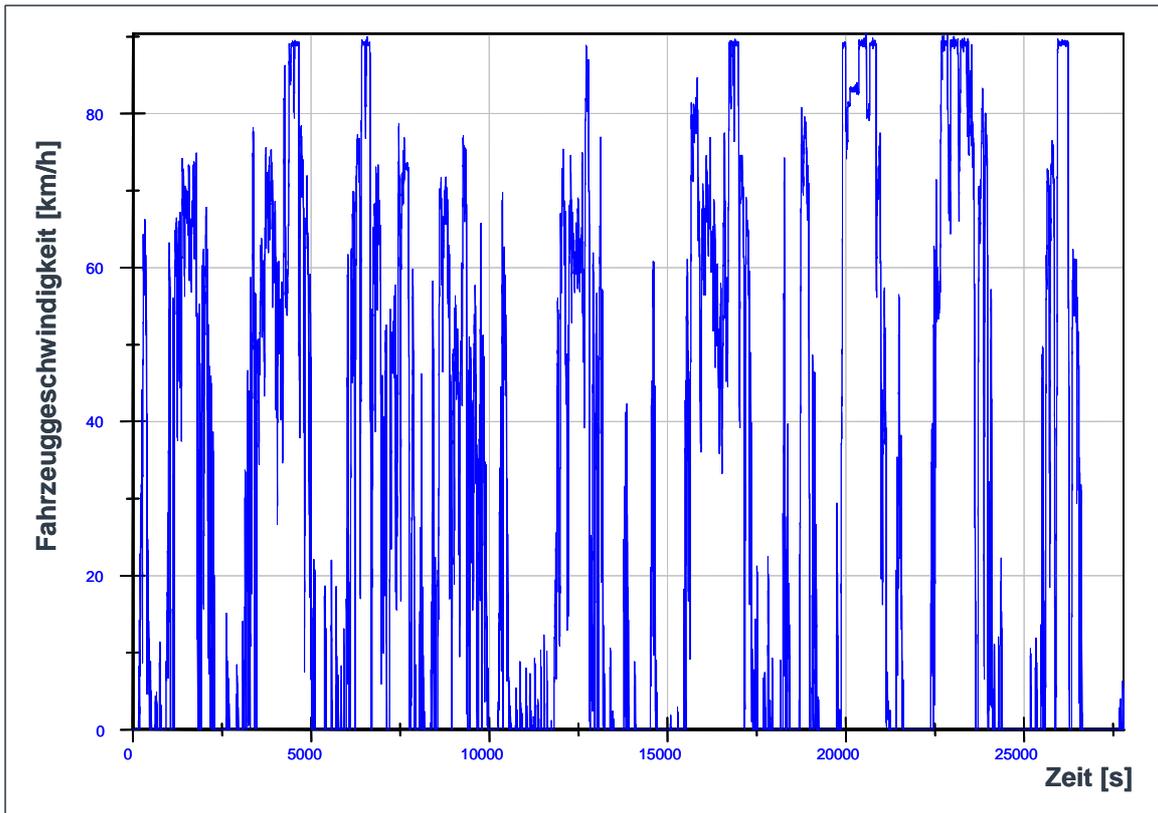
**Bild 2.3.1-1:** Mit Messtechnik ausgestattete Müllsammelfahrzeuge.

Die Auswertung der Ergebnisse ergab eine sehr spezifische Ausprägungen der Einsätze, sowohl was verschiedene Aufbauten als auch verschiedene Einsatzorte angeht.

#### **Absetzkipper:**

Das Einsatzprofil des Absetzkippers ist sehr ähnlich zu dem eines Verteiler-LKW. Das Fahrzeug ist je nach Einsatzregion im Stadtverkehr oder Überlandverkehr eingesetzt und hat einen sehr geringen Anteil an Energie für die Nebenabtriebe, da immer nur ein Container abgeholt und zur Deponie gebracht wird.

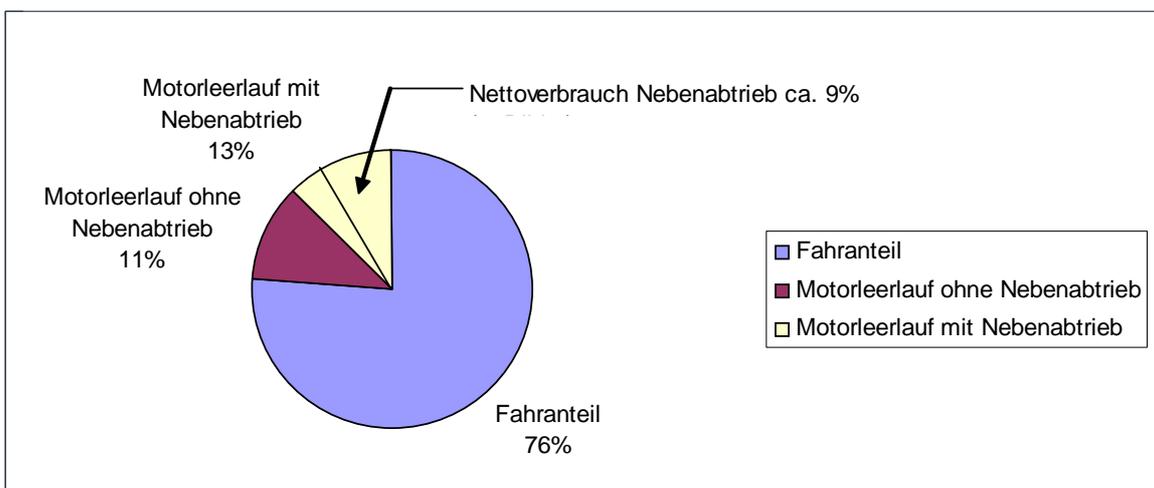
**Bild 2.3.1-2** zeigt exemplarisch ein Einsatzprofil eines Absetzkippers im Stadt- und Überlandverkehr. Für Fahrzeuge mit diesem Einsatzprofil empfiehlt sich eine Ableitung des Hybridsystems für Verteiler-LKW.



**Bild 2.3.1-2:** Exemplarisches Einsatzprofil eines Absetzkippers

**Frontlader:**

Frontlader werden hauptsächlich im industriellen Umfeld eingesetzt. Das Fahrzeug fährt damit überwiegend von Kunde zu Kunde und legt dazwischen immer wieder größere Distanzen im städtischen oder ländlichen Umfeld zurück. Der Anteil der Energie für Nebenabtriebe ist höher als bei einem Absetzkipper, der Fahranteil überwiegt aber weiterhin.



**Bild 2.3.1-3:** Exemplarische Energiebedarfsverteilung eines Frontladers

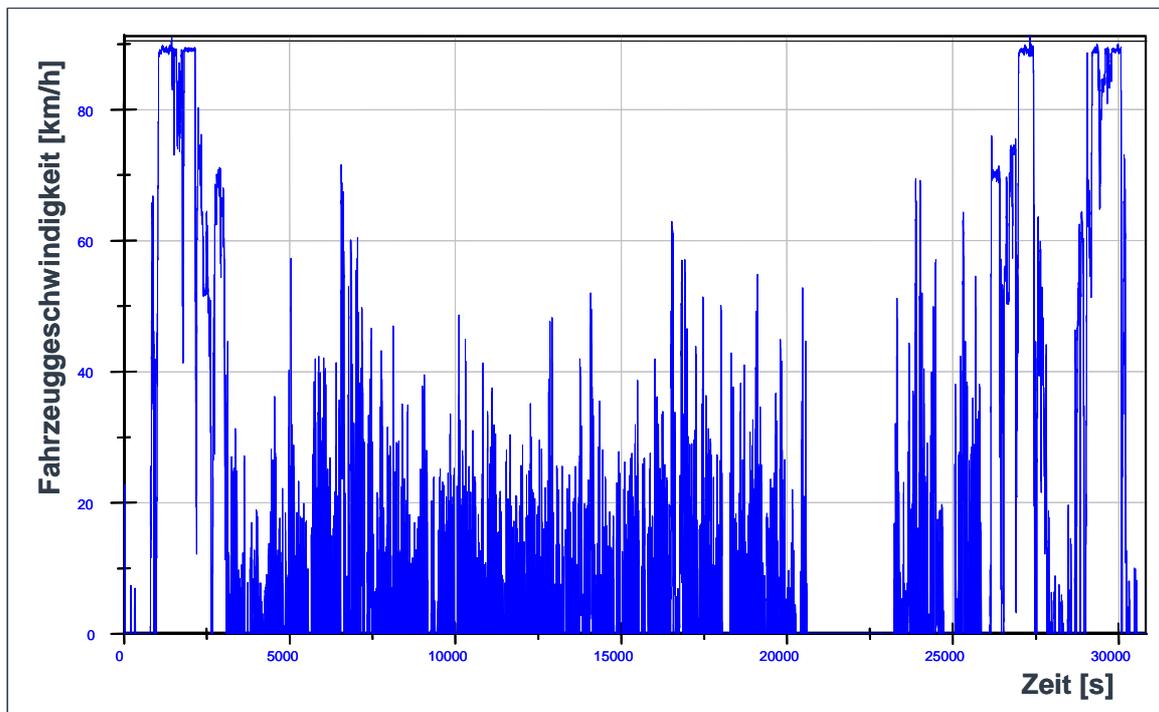
**Bild 2.3.1-3** zeigt die Aufteilung der Energie zwischen Antrieb, Leerlaufverbrauch und Nebenantrieb.

Überraschend hoch ist der Verbrauchsanteil des Motorleerlaufs. Ein Hybridsystem analog zu einem Verteiler-LKW könnte hier Energie einsparen. Ein Motor-Stopp bei gleichzeitigem Erhalt des Innenraumkomforts (Heizung und Klimaanlage) ist hier sinnvoll.

#### Seitenlader:

Seitenlader werden für die normale Hausmüllentsorgung eingesetzt. Vorteil dieses Systems ist, dass nur eine Person zum Bedienen des Systems benötigt wird, vorausgesetzt, die Mülltonnen stehen richtig am Straßenrand.

Bei diesen Fahrzeugen ist ein deutlicher Unterschied im Geschwindigkeitsprofil zwischen der Transferphase, d.h. der Fahrt zwischen Deponie und Sammelgebiet sowie der Sammelphase im Sammelgebiet (siehe **Bild 2.3.1-4**).



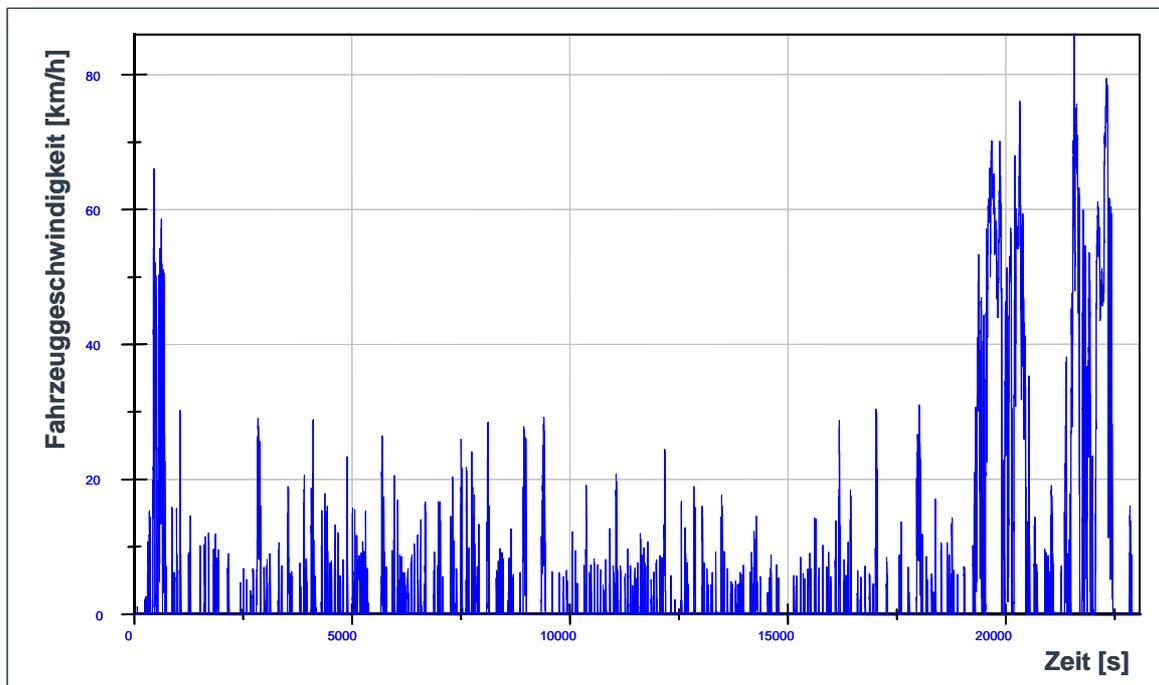
**Bild 2.3.1-4:** Exemplarisches Geschwindigkeitsprofil eines Seitenladers

Nur während der zeitlich kurzen Transferphase entspricht das Fahrprofil dem eines Verteiler-LKW. In der Sammelphase sind die Geschwindigkeiten sehr niedrig. Dennoch ist in der Sammelphase eine größere Energiemenge in Bremsmanövern enthalten, die mit einem Hybridsystem rekuperiert werden könnte. Da aufgrund der seitlichen Beladung jeder Straßenzug in beide Richtungen befahren werden muss, erhöht sich die gefahrene Strecke im Sammelgebiet sowie die Anzahl der Stopps im Vergleich zum Hecklader beträchtlich. Aufgrund des hohen Energiebedarfs für die große Zahl an Müllsammelvorgängen (Tonnen anheben, entleeren und pressen) ist

es notwendig, bei einer Hybridisierung auch den Müllsammelaufbau zu berücksichtigen. Damit unterscheidet sich das Einsatzprofil deutlich von dem eines Verteiler-LKW und benötigt für eine optimale Hybridisierung ein eigenes Konzept.

### Hecklader:

Der Hecklader unterscheidet sich am deutlichsten von einem Verteiler-LKW. Analog zum Seitenlader sind deutliche Unterschiede zwischen Transferphase und Sammelphase zu erkennen. In der Sammelphase werden zwischen zwei Stopps häufig weniger als 10 km/h Maximalgeschwindigkeit erreicht und fast nie ist es mehr als 20 km/h. Sowohl die Beschleunigungs- als auch die Bremsvorgänge sind sehr langsam und damit steht sehr wenig Energie zum Rekuperieren zur Verfügung. **Bild 2.3.1-5** zeigt das Geschwindigkeitsprofil eines Heckladers in einer Großstadt.



**Bild 2.3.1-5:** Exemplarisches Geschwindigkeitsprofil eines Heckladers

Auch hier ist der Verbrauchsanteil für den Nebenantrieb sehr hoch. Zusammen mit der niedrigen verfügbaren Energie durch Rekuperation bedeutet das, dass ein Hybrid-System nur dann sinnvoll ist, wenn die in der Sammelphase schlechten Wirkungsgrade des Verbrennungsmotors verbessert werden können, die Leerlaufzeiten des Verbrennungsmotors verringert werden und der Müllsammelvorgang durch das Hybridsystem mit optimiert wird.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die verschiedenen Aufbauarten sehr deutliche Unterschiede in den Einsatzprofilen aufweisen. Durch die Konzentration auf einzelne Fahrzeuge können die ermittelten Einsatzprofile aber nur Momentaufnahmen in einem sehr breiten Einsatzspektrum sein und es lässt sich

---

daraus kein allgemeingültiges Profil ermitteln oder Einsatzgrenzen festlegen.

### **Systemauslegung Hybridsystem für 26t-Fzg-Klasse**

Aufgrund des festgestellten großen Einsatzspektrums der Müllsammelfahrzeuge sowie das Fehlen typischer Vertreter dieser Fahrzeugklasse gestaltet sich die Systemauslegung schwierig. Die Auswertungen zeigten, dass Einsatzszenarien z.B. der vermessene Frontlader sehr stark von der Transportfunktion geprägt sind und daher parallele Hybridsysteme gut geeignet sind, jedoch gibt es auch Szenarien die von extrem niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten und überwiegend von der Müllsammelaufgabe (Lade- und Verdichtungsvorgang) selbst stark geprägt sind, für die auch serielle Hybridkonzepte Vorteile bieten könnten.

Daraus abgeleitet können ein Teil der Müllsammelfahrzeuge aus dem gemeinsam mit ZF definierten Hybrid-Modulbaukasten sinnvoll bedient werden. Aufgrund von Entwicklungsaufwand, Kosten und Stückzahlen kann jedoch nicht für jeden Einsatz spezifisch ein optimiertes Hybridsystem dargestellt werden.

### **2.3.2 Ermittlung Randbedingungen für Hybridsystem für 40t-Fzg-Klasse**

Für den 40t-Fernverkehrseinsatz liegen bereits viele Erkenntnisse bzgl. der Betriebsweise vor. Jedoch wurden diese Erkenntnisse in Hinblick auf die Auslegung und Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs gesammelt. Daher mussten zunächst diese Erkenntnisse überprüft werden, ob sie in Bezug auf die Systemauslegung der Hybridisierung ebenfalls verwendet werden können oder ob z.T. andere und zusätzliche Randbedingungen notwendig sind.

Für ein konventionelles Fahrzeug ist es häufig ausreichend, Aussagen anhand der Ergebnisse in einem repräsentativen Zyklus zu treffen. Für ein Hybridfahrzeug ist es aber notwendig, das Verhalten des Systems anhand verschiedener, unterschiedlicher Zyklen beurteilen zu können, um zu sehen, bei welchen Einsatzprofilen das System die größeren Vorteile bietet.

Aufgrund der guten Datenlage im konventionellen Bereich wurde eine Auswahl verschiedener Zyklen getroffen, anhand derer zuerst simulativ und später anhand eines Prototypen auf dem Rollenprüfstand Ergebnisse ermittelt werden können.

Für die Auslegung des Hybridsystems wurde ein 4x2-Fernverkehrs-Sattelzugfahrzeug mit Auflieger als typisches Fahrzeug des Fernverkehrseinsatzes gewählt.

### **2.3.3 Systemauslegung Hybridsystem für 40t-Fzg-Klasse**

Wegen der häufigen Konstantfahrten eines Fernverkehr-LKWs kommt ausschließlich ein paralleles Hybridsystem in Frage, da bei Konstantfahrt der Wirkungsgrad des Systems keinesfalls signifikant unter dem des konventionellen Systems liegen darf.

Bei einer anderen Hybrid-Topologie besteht die Gefahr, dass das System unter bestimmten Randbedingungen z.B. durch zusätzliche Energieumwandlungsverluste einen Mehrverbrauch hat. Die weiteren Vorteile des parallelen Systems sind ein geringer Bauraum und eine variable Auslegung der E-Maschinenleistung, die keine bestimmte Mindestleistung abdecken muss.

Wie auch beim TGL wird ein Parallel-Hybrid in der ISG-Anordnung gewählt. Bei den TGL-Fahrzeugen ist der Vorteil dieser Anordnung die Möglichkeit des elektrischen Fahrbetriebs. Dieser spielt beim TGX eine eher untergeordnete Rolle, Vorteil der ISG-Anordnung ist hier jedoch die Möglichkeit zum Abkuppeln des Motors während der Rekuperation bei geringen Bremsleistungen.

Da das Parallel-Hybrid-Konzept ohne Anpassung des Antriebsstrangs durch Leerlaufverluste der E-Maschine sowie das Mehrgewicht einen leicht erhöhten Verbrauch zum konventionellen Fahrzeug aufweist, wurden zwei Alternativen untersucht, die dieses Problem umgehen.

Im Downsizing-Konzept wurde die Möglichkeit untersucht, einen Verbrennungsmotor mit geringerem Hubraum einzusetzen, der ein niedrigeres Maximalmoment aufweist, bei hohen Drehzahlen aber die gleiche Leistung aufweist, wie der ursprüngliche Motor. Das fehlende Maximalmoment würde durch die E-Maschine ausgeglichen werden, wenn der Speicher leer ist, würde auf höhere Drehzahlen geschaltet werden, um in beiden Fällen die gleiche Dynamik wie beim ursprünglichen Motor zu generieren. Da in der aktuellen Motorengeneration aber keine Verbrauchsvorteile des kleineren Motors vorliegen, wurde das Konzept für den ersten Schritt verworfen. Bei zukünftigen Motorengeneration kann dieses Konzept wieder aufgegriffen werden und auch in die zukünftige Motorenentwicklung mit einfließen.

Im Downspeeding-Konzept wurde untersucht, wie sich eine längere Hinterachsübersetzung auf das Verbrauchsverhalten des Hybrid-Fahrzeugs auswirkt. Auch in diesem Konzept würde die E-Maschine die geringere Fahrdynamik kompensieren, so lange genug Energie im Speicher vorhanden ist. Durch die niedrigere Drehzahl und das höhere Drehmoment des Verbrennungsmotors bei Konstantfahrt wird hier ein Verbrauchsvorteil erzeugt. Dieses Konzept wird ebenfalls nicht im ersten Ausbaustand des Prototyps angewendet, da erst ermittelt werden soll, welche Vorteile das Hybrid-System ohne weitere Anpassung des Antriebsstrangs bietet.

Für die Auslegung von E-Maschinenleistung und Energiespeichergröße wurden die Simulationsergebnisse des aufgebauten Simulationsmodells herangezogen. Auf verschiedenen Fahrzyklen wurden Auswertungen bezüglich der Leistungsverteilung bei Bremsvorgängen und des Energieinhaltes bei Bremsvorgängen durchgeführt. Aufgrund der Bauraumverhältnisse in einer Sattelzugmaschine spielt die Baugröße bei der Systemauslegung ebenfalls eine große Rolle.

Weiterhin steht das Baukastensystem im Fokus, das zum Ziel hat, möglichst viele Gleichteile bei den verschiedenen Leistungsstufen einzusetzen, um aus

Skaleneffekten profitieren zu können und um im Nutzfahrzeugbereich ausreichende Stückzahlen erreichen zu können.

Unter Berücksichtigung aller Aspekte wurde eine Festlegung auf eine Permanentenerregte Synchronmaschine mit 120 kW Leistung und ein Energiespeicher mit 4 kWh Energieinhalt gewählt.

Eine weitere Verfeinerung der Systemauslegung wird dann im zweiten Schritt nach Aufbau und Test des Prototypfahrzeugs erfolgen können.

### **Modellbildung und Simulation für 26-40t Fzge**

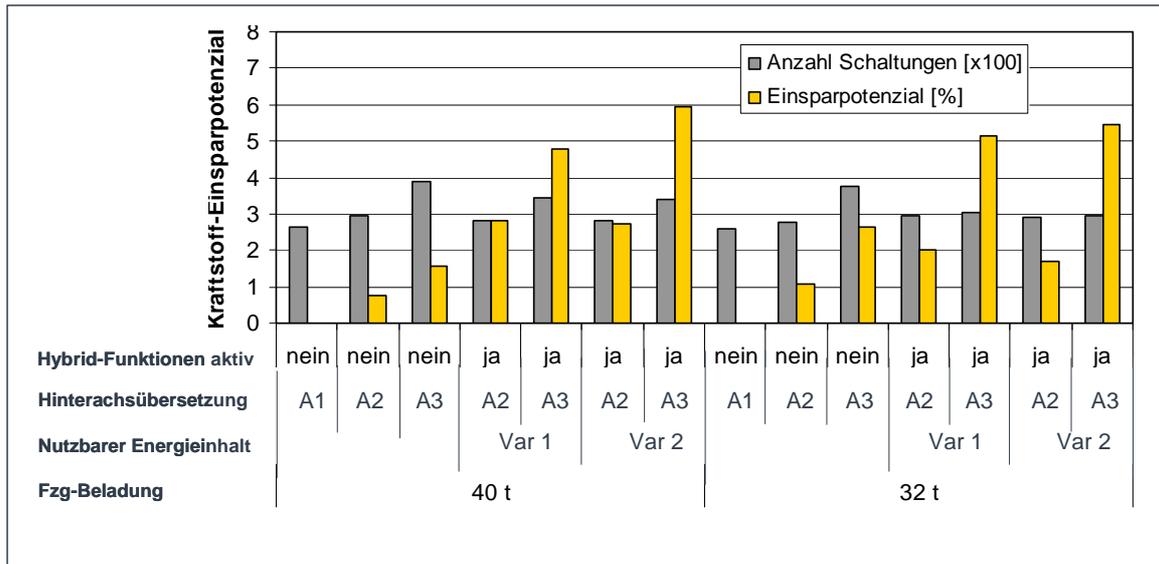
Für die Modellbildung von 26-40t-Fahrzeugen wurde das bestehende Längsdynamikmodell der konventionellen Fahrzeuge verwendet und um die Hybrid-Komponenten erweitert. Diese wurden zum Teil neu erstellt und zum Teil aus den Modellen für den TGL-Hybrid abgeleitet.

Nach allen Anpassungen und der Datenbeschaffung für die zu untersuchende Sattelzugmaschine (Komponenten im Antriebsstrang, Hybridkomponenten und Gesamtfahrzeug), wurde das neu erstellte Modell anhand von Messdaten von konventionellen Fahrzeugen sowie Simulationsergebnissen mit dem bestehenden Längsdynamikmodells validiert. Eine Validierung des Modells mit aktivierten Hybridfunktionen kann erst durchgeführt werden, wenn Messergebnisse des ersten Prototyps vorliegen.

Eine Kernkomponente des Modells ist das Energiemanagement, das für diese Fahrzeugklasse deutlich angepasst werden musste. Das grundlegende Modell aus dem TGL-Modell wurde um die erweiterten Funktionen des TGX wie z.B. die Retarderfunktionalität erweitert und von der Hybridfunktionalität auf das Fernverkehrsfahrzeug angepasst. Es wurde die Möglichkeit geschaffen, durch die Variation von Parametern verschiedene Strategien zu untersuchen und damit die Funktionsentwicklung des Energiemanagement zu unterstützen.

Mit dem aufgebauten Modell wurde die Systemauslegung unterstützt und die Konzepte von Downsizing und Downspeeding detailliert untersucht. Es wurden verschiedene Varianten von Energiemanagementstrategien untersucht, verschiedene Energiespeichergrößen und E-Maschinenauslegungen getestet und die Einsparpotenziale simulativ ermittelt.

**Bild 2.3.2-1** stellt die Ergebnisse einer Untersuchung des Einsparpotenzials mit verschiedenen Hinterachsübersetzungen und verschiedenen Energiespeichergrößen auf einem einzelnen, repräsentativem Zyklus dar. Das Modell enthält ein vereinfachtes Energiemanagement mit den Hybridfunktionen Boosten und Rekuperation, Lastpunktverschiebung ist nicht integriert. Das Zusatzgewicht der Hybrid-Komponenten ist mit berücksichtigt.



**Bild 2.3.2-1:** Kraftstoffeinsparpotenziale eines Hybrid-Fernverkehrs-Lkw

### 2.3.4 Konzepterstellung für Komponenten-Integration für 26-40t-Fzge

Während die Hybridkomponenten in den 26t-Fahrzeugen ähnlich wie in der 12t-Applikation aufgrund der längeren Radstände relativ einfach integriert werden können, stellt die Fernverkehrs-Sattelzugmaschine den kritischsten Fall dar.

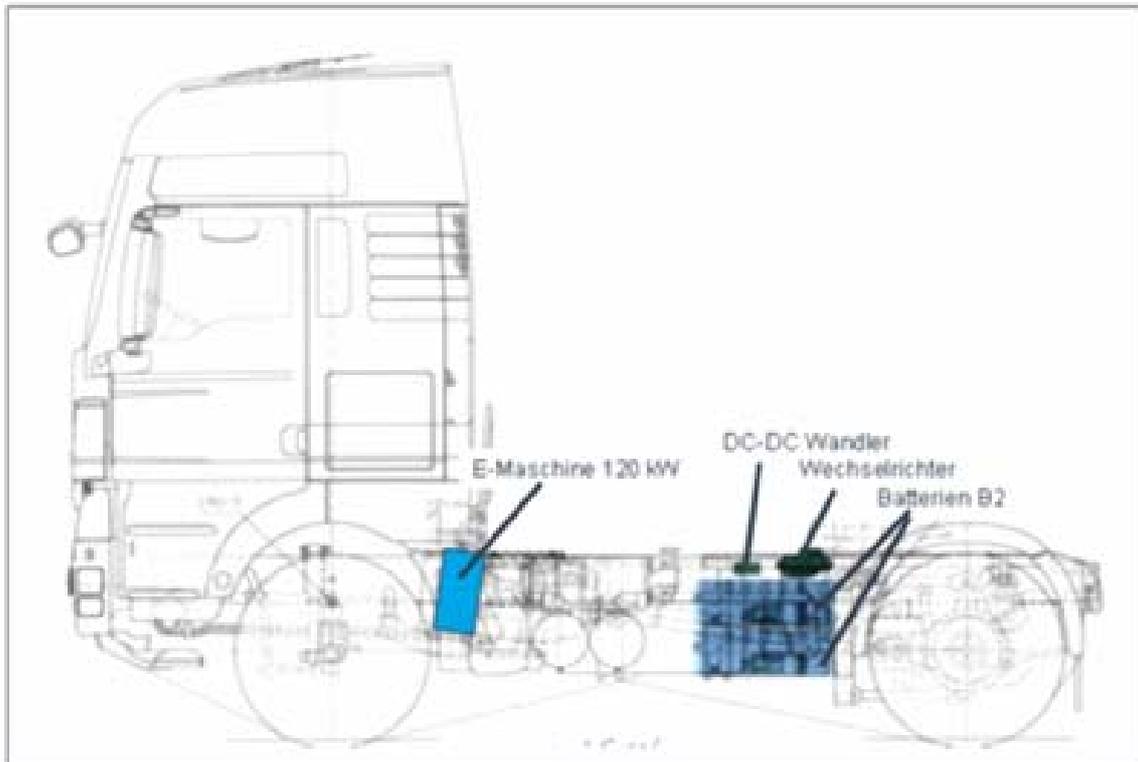
Die Fernverkehrs-Sattelzugmaschine weist einen sehr kurzen Radstand sowie sehr kurze Gelenkwellen-Längen auf. Darüber hinaus sind entsprechend den Kundenanforderungen nach Möglichkeit alle „freien“ Rahmen-Anbau-Räume durch Kraftstoff-Zusatztanks blockiert. Zusätzlich erschwerend sind bereits die größer dimensionierten, zukünftigen Abgasnachbehandlungssysteme für EURO6 zu berücksichtigen.

In diesem Spannungsfeld wurde untersucht, in wie fern die E-Maschine als auch die Hybridzusatzkomponenten (Li-Batterie, Leistungselektronik, Kühlung) im Fahrzeug untergebracht werden können. Die aus der parallel bei ZF laufenden Konstruktion der SAE1-120 kW E-Maschine lieferte die entsprechenden Abmaße. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass Sattelzug-Fahrzeuge ab einem Radstand von 3600 mm mit der 120 kW-E-Maschine dargestellt werden kann. Dieser Radstandsbereich stellt den Großteil der Zulassungszahlen dar.

Die Integration der Zusatzkomponenten stellt jedoch die Anforderung, bestehende Komponenten des konventionellen Fahrzeugs wegzulassen sowie das installierbare maximale Tankvolumen deutlich zu reduzieren. Durchgeführte Konzeptstudien zur Verlagerung bestehender Bauräume und Komponenten konnten die Bauraumsituation nicht entspannen.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurden die entsprechenden Hybrid-Zusatzkomponenten unter Inkaufnahme des Entfalls des Reserverads und ca. 600 l geringerer Tankkapazität am Fahrzeugrahmen positioniert. **Bild 2.3.2-2** zeigt die ersten groben Bauraumuntersuchungen zur Komponentenintegration.

Um auch hier den modularen Gedanken fortzuführen, wurde versucht, diese Zusatzkomponenten in ein Modul zusammenzufassen und dieses dann kompakt am Fahrzeugrahmen zu befestigen.



**Bild 2.3.2-2:** Erste Bauraumuntersuchung im Sattelzugfahrzeug

### 2.3.5 Entwicklung Hybrid-Prototypfahrzeug

Auf Basis der Untersuchungen zur Hybridisierung von 26 bis 40 t-Fahrzeuge zeigte sich, dass das Fernverkehrs-Sattelzugfahrzeug bzgl. der Anforderungen an ein Hybridsystem sowie die Integration der notwendigen Komponenten am kritischsten ist. Zudem spannen die 12t- und die 40t-Applikation den ganzen Bereich der möglichen Lkw-Applikationen auf, sodass Aussagen zu allen dazwischen liegenden Applikationen daraus abgeleitet werden können.

Aus diesem Grunde haben sich die Projektpartner, wie dem Projektträger bereits im gemeinsamen Meilenstein-Meeting dargelegt, entschieden, ein 40t-Fernverkehrs-Sattelzugfahrzeug als Hybrid-Prototyp aufzubauen.

Nachdem die Festlegung auf das Fernverkehrssegment mit Sattelzugmaschine erfolgt war, wurde eine Untersuchung zu Verkaufszahlen durchgeführt. Die 4x2-Sattelzugmaschine mit 3600mm Radstand wurde hier als das Standard-Modell ermittelt. Antriebsstrangseitig stellt der 440PS-Motor die am häufigsten verkaufte Variante dar. Aufgrund der geplanten Hybridisierung wurde ein automatisiertes Schaltgetriebe gewählt, das bei Fernverkehrsfahrzeugen nahezu ausschließlich in

der DirectDrive-Variante verwendet wird. Daraus ergibt sich eine von MAN empfohlene Hinterachsübersetzung von 2,85, die ebenfalls ausgewählt wurde.

Da EURO-6-Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Fahrzeugbestellung erst als Prototypfahrzeuge zur Entwicklung des EURO6-Abgasnachbehandlungssystem getestet wurden, war es nicht möglich, bereits ein EURO6-Fahrzeug in diesem Projekt einzusetzen. Jedoch wurde eine spezielle Motorisierung und Fahrzeug-Ausführung konfiguriert, die letztendlich auch Aussagen in Richtung EURO6 zulassen.

### **Entwicklung Hybridsystem für 26-40t-Fzg-Klasse**

Auf Grundlage der Systemauslegung wurden der Systemumfang und die verwendeten Komponenten festgelegt. In der ersten Ausbaustufe entspricht dieser dem Hybrid-Basisumfang der TGL-Hybrid-Prototypen, allerdings mit einer Anpassung der Komponenten.

Damit ergibt sich folgende Konfiguration:

- Permanenterregte Synchronmaschine von ZF Sachs
  - 120 kW max. Leistung
  - 650V Nennspannung
- Li-Ionen-Batterie
  - 4 kWh Energieinhalt
  - Spannungsbereich 450V-750V
- Wechselrichter von ZF Elektronik
- DCDC-Wandler von MAN

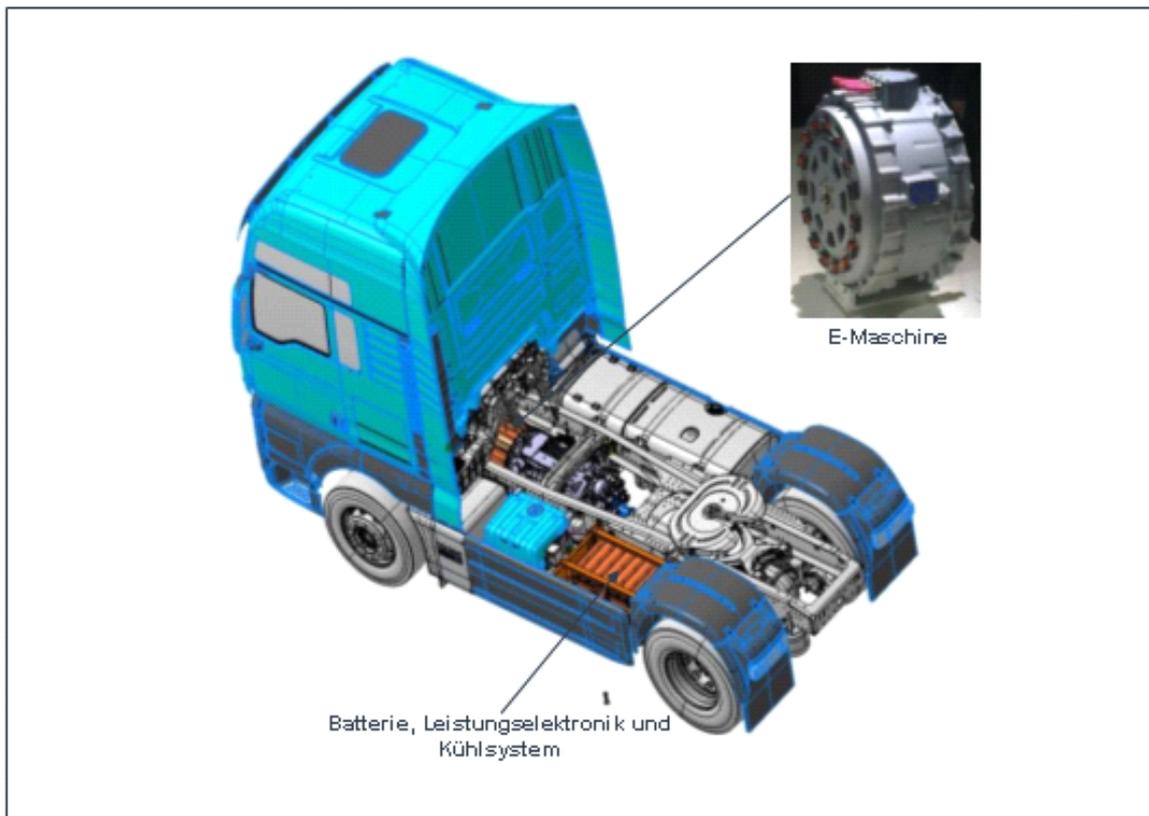
Die Li-Ionen-Batterie ist im Sinne des Modulbaukastens aus zwei Batteriesystemen aufgebaut, die in Serie geschaltet werden. Die Master-Batterie entspricht im Baukastensystem der Batterie des TGL-Hybrid, während bei der Slave-Batterie zur Einhaltung der Spannungsgrenzen Zellen entfernt wurden.

Da für den Prototyp schon der nächste Musterstand des Batteriesystems verfügbar war, wurden im Vergleich zu den TGL Hybrid Erprobungsfahrzeugen B2-Muster anstelle des B1-Musters verbaut.

Der Wechselrichter ist ebenfalls ein Gleichteil zum TGL-Hybrid System, der durch unterschiedliche Bestückung von Bauteilen für die höhere Spannung verwendet werden kann. Auch hier liegt für den Prototyp ein neuer Musterstand vor, der verwendet wurde.

Der DCDC-Wandler aus den TGL-Hybrid Fahrzeugen konnte nicht weiter verwendet werden, da dieser für die hohe Spannung nicht ausgelegt ist. Da bei MAN aus anderen Hybrid-Projekten eine passende Komponente verfügbar war und der DCDC-Wandler nicht im Fokus des Entwicklungsprojekts steht, wurde dieser verwendet.

**Bild 2.3.2-3** zeigt die Anordnung der Komponenten im Fahrzeug.



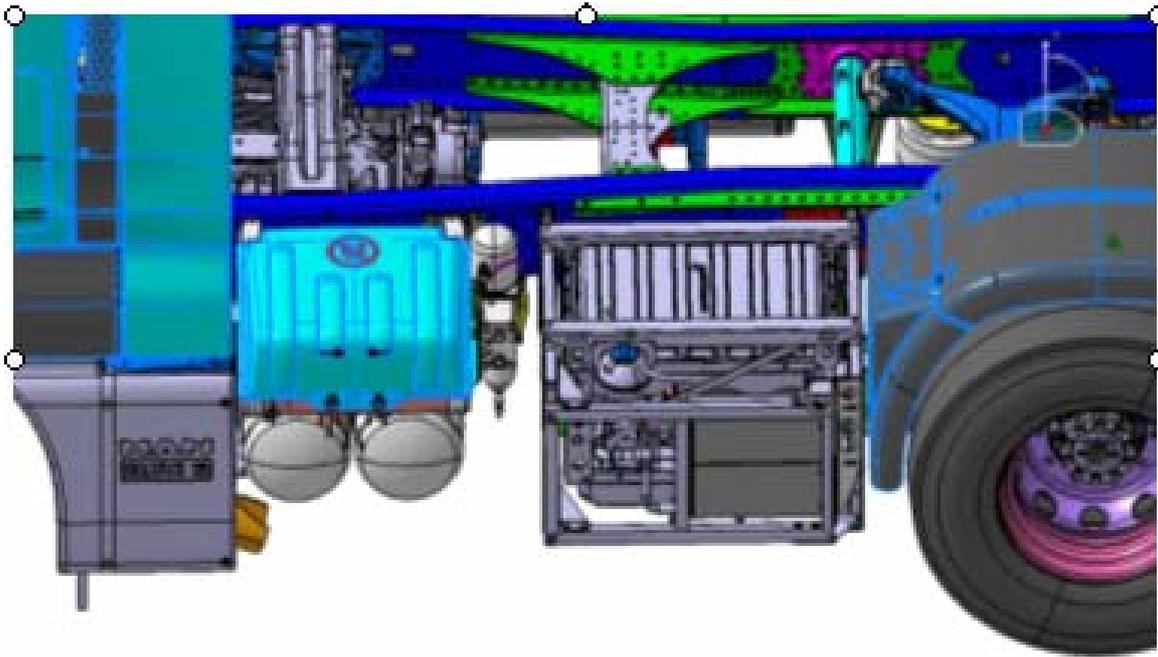
**Bild 2.3.2-3:** Hybrid-Komponenten-Integration im Fahrzeugprototyp

Für die Entwicklung des Hybridsystems waren nach der Systemauslegung mit Festlegung der Komponenten hauptsächlich vier Themenfelder zu bearbeiten.

Mechanische Integration:

Das Hybridgetriebe wurde konstruktiv in das Fahrzeug integriert. Aufgrund der Triebstrangverlängerung durch die E-Maschine wurde eine kürzere Gelenkwelle verwendet und die Motor-/Getriebelagerung überprüft.

Es wurde ein Hybridmodul konstruiert, in dem die beiden Batterien, der Wechselrichter und der Bordnetzladewandler mit dem gesamten Sekundärkühlkreislauf am Rahmen angebaut werden können. **Bild 2.3.2-4** zeigt den Rahmenanbau des Hybridmoduls.



**Bild 2.3.2-4:** Integration des Hybridmoduls am Prototypfahrzeug

Hierbei wurde darauf geachtet, dass das Modul möglichst wenige Schnittstellen zum Fahrzeug aufweist und unabhängig vom Fahrzeug aufgebaut werden kann. Die einzigen Schnittstellen sind die HV-Verkabelung zwischen Wechselrichter und E-Maschine sowie die Signalverkabelung und die 24V-Versorgung des Bordnetzes und der 24V-Batterie aus dem Bordnetzladewandler.

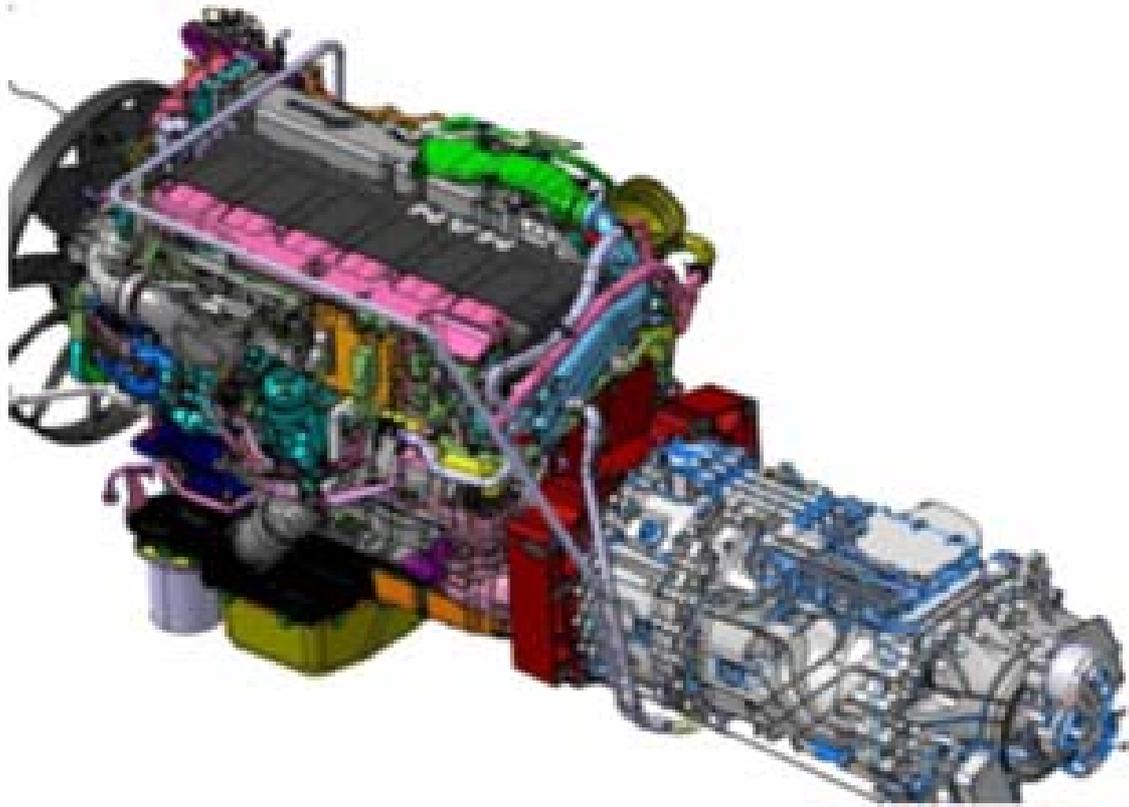
#### Elektrik:

Die gesamte 24V-Verkabelung inkl. Sicherungen, CAN-Verkabelung, Steuergeräteverbund sowie die HV-Verkabelung wurde im Detail festgelegt und dokumentiert. Durch Steckverbinder der 24V-Verkabelung am Hybridmodul wird sichergestellt, dass das Modul einfach vom Fahrzeug getrennt werden kann.

Die Hybridverkabelung wurde so konzipiert, dass eine Änderung der Verkabelung im konventionellen Fahrzeug an möglichst wenigen Stellen notwendig ist.

#### Kühlung:

Die Hybridkomponenten im Hybridmodul (Batterien, Wechselrichter und Bordnetzladewandler) werden mit einem autarken Kühlkreislauf mit Wasser/Glycol gekühlt. Die Pumpe und die Kühler mit Lüftern befinden sich ebenfalls im Hybridmodul. Da die E-Maschine im Gegensatz zu den Hybrid-TGL-Prototypen für hohe Vorlaufemperaturen geeignet ist, konnte die E-Maschine mit in den Verbrennungsmotorkühlkreislauf integriert werden. Damit sind keine Kühlleitungen zwischen Hybrid-Modul und Fahrzeug nötig. **Bild 2.3.2-5** zeigt die Konstruktion der E-Maschinenkühlung und die Einbindung in den Verbrennungsmotorkühlkreislauf.



**Bild 2.3.2-5:** Hybrid-Antriebsstrang mit Kühlungsverrohrung

Software/Energiemanagement:

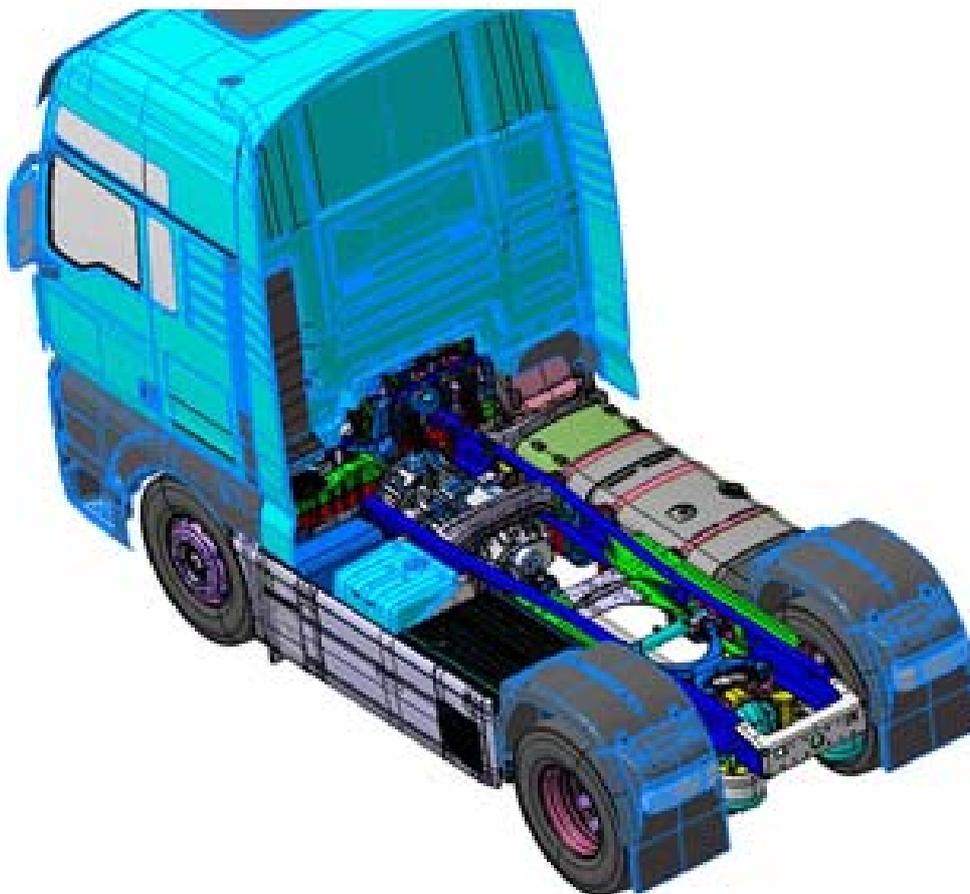
Die CAN-Schnittstelle und der Steuergeräteverbund sind identisch. Lediglich für den neuen Bordnetzladewandler war eine kleine Anpassung notwendig. Auf Basis des Energiemanagements für den TGL-Hybrid wurde durch Parameteranpassung ein erster Softwarestand für den Hybrid-TGX-Prototyp erstellt, der in weiteren Fahrversuchen optimiert werden muss.

### 2.3.6 Durchführung von Referenzmessungen

Um das Kraftstoff- und Emissionseinsparpotenzial des Hybridfahrzeugs zu ermitteln wurden bereits für das Basisfahrzeug Referenzmessungen eingeplant. Da ZF für die Hybridgetriebeentwicklung auf eine neue Getriebe-Generation (Nachfolger der bekannten ZF-AStronic-Baureihe) aufsetzt, war es notwendig, das Basisfahrzeug bereits mit der neuen Getriebegeneration zu applizieren. Dazu musste das Fahrzeug, insbesondere das Getriebe aufwändig abgestimmt werden und auf ca. 5000 km eingefahren werden. Erst danach konnten Straßenmessungen und anschließend Messungen am Rollenprüfstand durchgeführt werden. Für die Rollenprüfstandsmessungen wurden typische Fernverkehrszyklen und Geschwindigkeitsprofile aus dem Verteilereinsatz gewählt. Messwerte für diese Zyklen mit verschiedenen Beladungen liegen nun vor und können für einen späteren Vergleich mit Verbrauchs- und Emissionswerten des Hybridfahrzeugs herangezogen werden.

### 2.3.7 Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung Hybrid-Prototypfahrzeug

Das Hybrid-Prototypfahrzeug wurde wie geplant auf- und umgebaut. Es wurde wie geplant das Hybrid-Modul unabhängig vom Fahrzeug aufgebaut und anschließend am Fahrzeug angebracht. Das konventionelle Getriebe wurde durch das Hybridgetriebe ersetzt und das Verbrennungsmotorkühlsystem zur Einbindung der E-Maschine modifiziert. Die 24V-Verkabelung und die HV-Verkabelung wurden durchgeführt. **Bild 2.3.7-1** zeigt den Endstand der Konstruktion für den Prototyp mit allen angebauten Teilen.



**Bild 2.3.7-1:** Konstruktionsendstand des Prototypfahrzeugs

Die Erstinbetriebnahme des TGX-Hybrid wurde wie geplant durchgeführt. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses liegt ein fahrfähiger Prototyp (siehe **Bild 2.3.7-2**) vor, der natürlich noch weiter getestet und optimiert werden muss.



**Bild 2.3.7-2:** TGX-Hybrid Prototypfahrzeug

## 2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In **A1** konnten sowohl die Grundlagen für die Entwicklung des Hybridbasisumfanges zur Ausrüstung der Erprobungsfahrzeuge erarbeitet werden als auch schrittweise die Erweiterung des Hybridsystems mit elektrischen Nebenaggregaten und der Plug-In-Funktionalität umgesetzt werden. Damit konnten auch neue Hybridfunktionen wie z.B. das rein elektrische Anfahren mithilfe der elektrischen Lenkhilfpumpe erfolgreich dargestellt werden. Wesentliche Erkenntnisse konnten für die Komponenten- und Funktionsanforderungen der elektrischen Nebenaggregate und der Plug-In-Komponenten daraus abgeleitet werden. Die dafür am Markt sehr spärlich verfügbaren Komponenten konnten für erste Funktionsversuche zum Teil verwendet werden, jedoch wurden in den meisten Fällen die geforderten Spezifikationen nicht erfüllt. Dies gilt insbesondere auch für die notwendigen Plug-In-Komponenten (z.B. Onboard-Ladegeräte, Batteriesystem,...) in dieser Fahrzeugklasse.

Die in **A2** geplante Kundenerprobung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die beiden dafür aufgebauten TGL-Hybrid-Erprobungsfahrzeugen wurden im Rahmen der Optimierung und Absicherung auf eine sehr guten technischen und funktionellen Entwicklungsstand gebracht. Nach Durchlaufen der Abnahmetests, der Homologation und Zulassungsprüfungen konnten die Erprobungsfahrzeuge Anfang April 2011 an die Fa. Arndt übergeben werden.

Die Fahrzeuge zeigten unter realen Einsatzbedingungen (**Bild 2.4-1**) ein sehr stabiles Verhalten und die gewünschte Alltagstauglichkeit. Das Fahrerfeedback war positiv und konnte zudem zur Funktionsfeinabstimmung mit in die Entwicklung einfließen.



**Bild 2.4-1:** TGL-Hybrid-Erprobungsfahrzeug im Alltagseinsatz

Auch die erreichten Kraftstoffeinsparungen im Mittel mit 5 bis 15 % bestätigten die bereits durch Simulation und Rollenprüfstand ermittelten Werte. Aufgrund des positiven Erprobungsverlaufes wurde der Erprobungseinsatz, der zunächst auf Projektende terminiert war, bis Ende 2011 verlängert.

Durch die Analyse des Einsatzspektrums der Lkw in der 26 t bis 40 t-Klasse in **A3** wurden die Möglichkeiten einer Hybridisierung untersucht. Abhängig von der Gewichtsklasse, jedoch deutlich stärker abhängig von der Transportaufgabe und der am Fahrzeug verbauten Aufbauaggregate sind unterschiedliche Hybridkonzepte und -auslegungen denkbar. In der Kategorie der Müllsammelfahrzeuge ist dies am stärksten ausgeprägt. Bei diesen Fahrzeugen zeigten sich in Abhängigkeit vor allem vom Bautyp und der Einsatzregion extrem unterschiedliche Einsatzprofile und auch Energiedurchsätze für Antrieb und Aufbau. Die Auswertungen zeigten, dass Einsatzszenarien wie z.B. bei dem vermessenen Frontlader-Müllsammelfahrzeug sehr stark von der Transportfunktion geprägt sind. Für diesen Einsatzfall wären parallele Hybridsysteme gut geeignet, jedoch gibt es auch Szenarien die von extrem niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten und überwiegend von der Müllsammelaufgabe (Lade- und Verdichtungsvorgang) selbst stark geprägt sind, für die auch serielle Hybridkonzepte Vorteile bieten könnten.

Bei den Untersuchungen zur Hybridisierung von 26 bis 40 t-Fahrzeuge zeigte sich, dass das Fernverkehrs-Sattelzugfahrzeug bzgl. der Anforderungen an ein Hybridsystem sowie die Integration der notwendigen Komponenten am kritischsten ist. Zudem spannen die 12t- und die 40t-Applikation den ganzen Bereich der möglichen Lkw-Applikationen auf, sodass Aussagen zu allen dazwischen liegenden Applikationen daraus abgeleitet werden können.

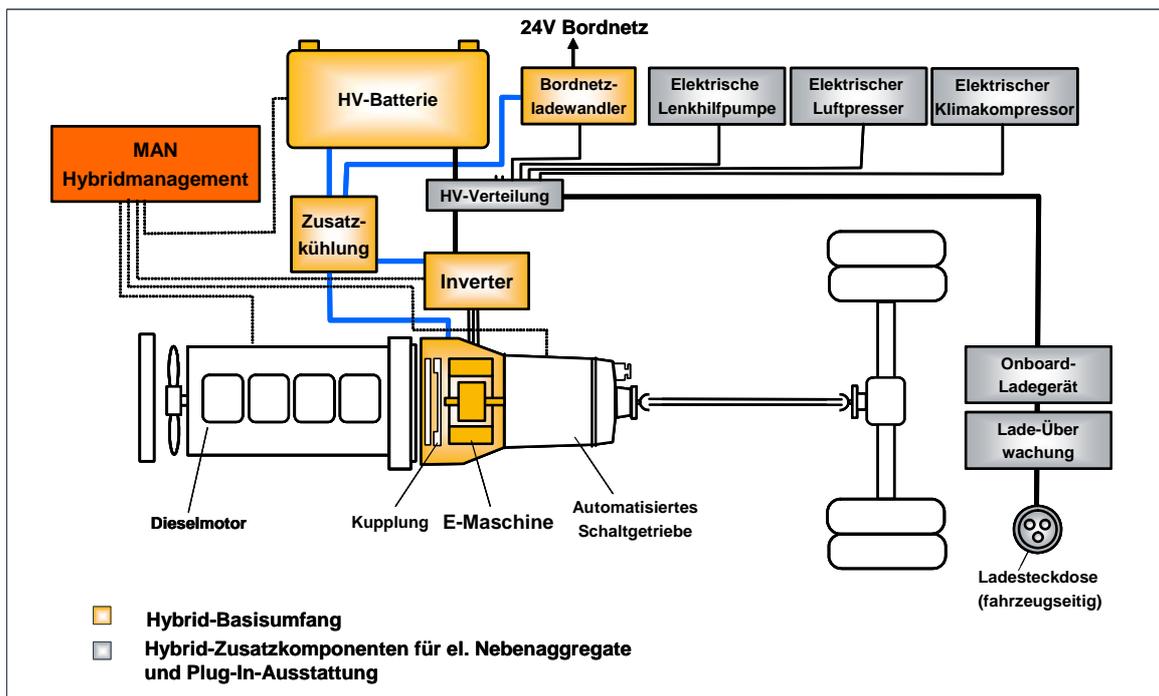
Auf Basis durchgeführter Simulations- und Packaging-Untersuchungen wurde ein Hybridkonzept für den 40t-Fernverkehrs-Lkw erarbeitet, optimiert und dimensioniert. Die Auslegungswerte sind 120 kW Leistung für die Elektromaschine und 4 kWh Energieinhalt für den Lithium-Energiespeicher. Dieses Konzept wurde im Rahmen des Projekts in die entsprechende Komponentenentwicklung, insbesondere was die Entwicklung des Hybridgetriebes bei ZF betrifft, überführt, als Prototypfahrzeug aufgebaut und in Betrieb genommen. Die weiteren Tests und Optimierungen am Fahrzeug sowie die Ableitung der Erkenntnisse werden aufgrund der kurzen Projektlaufzeit wie geplant außerhalb des Förderprojekts durch MAN fortgesetzt.

Als **übergreifende Ergebnisse** kann entsprechend dem Projektansatz „Modularer Hybridantrieb für Nutzfahrzeuge“ festgehalten werden:

Die Untersuchung des Lkw-Fahrzeug- und Einsatzspektrums von 8 bis 40 t kann mit Parallel-Hybridsystemen, natürlich mit angepassten Auslegungen und Hybridfunktionen, sinnvoll hybridisiert werden. Lediglich in dem untersuchten Bereich bei Müllsammelfahrzeugen ergaben sich Einsatzfälle, für die spezifisch auch andere

Hybridtopologien (z.B. serielle Hybridkonzepte mit Range extender) denkbar wären. Daraus abgeleitet können ein Teil der Müllsammelfahrzeuge aus dem gemeinsam mit ZF definierten Hybrid-Modulbaukasten für Parallelhybride sinnvoll bedient werden. Aufgrund von Entwicklungsaufwand, Kosten und Stückzahlen kann jedoch nicht für jeden Einsatz spezifisch ein optimiertes Hybridsystem dargestellt werden.

Die gemeinsam mit ZF erfolgte Definition eines „Modularen Hybridbaukasten“ für verschiedene Fahrzeug-Baureihen/Gewichtsklassen und Ausstattungsumfängen vom Hybrid-Basisumfang (HEV) bis zum Plug-In-Hybrid (PHEV) bestätigten grundsätzlich den nochmals in **Bild 2.4-2** dargestellten Ansatz.



**Bild 2.4-2:** Definierter Modulbaukasten für Parallelhybridsysteme

Für die notwendige Anpassung an die verschiedenen Auslegungen wurden folgende Ansätze definiert und auch umgesetzt, die die Skalierbarkeit und Flexibilität des Hybridbaukasten in geeigneter Weise zulassen:

- Verwendung von zwei unterschiedlichen Spannungsniveaus mit 400V und 750V
- Segmentierung der E-Maschine über zwei Baugrößen: 60 kW und 120 kW, weitere Skalierung der E-Maschinen-Leistung über das Spannungsniveau
- Modulare Lithium-Batterien mit optionaler, serieller Verschaltung von Batteriesystemen zur Anpassung der Spannungslage und Erhöhung des Energieinhalts

- 
- Ausstattung des Hybridbasissystems mit Lithiumbatterien mit Leistungszellenbestückung, jedoch Ausstattung des Plug-In-Hybridsystems mit Lithiumbatterien mit Energiezellenbestückung
  - Anbindung der Nebenaggregate auf 24 V, 400 V oder 750 V; ggf. Verwendung von DC/DC-Wandlern zur Reduzierung der Komponentenvarianten.
  - Kühlung der Hybridkomponenten abhängig von geforderter Hybridfunktionalität wahlweise separat über Sekundärkühlsystem oder Einbeziehung der E-Maschine in den Verbrennungsmotor-Kühlkreislauf

### **3 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

#### **3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Betreiber von Nutzfahrzeugen sind darauf angewiesen, Transportleistungen bzw. Arbeiten mit Land- und Baumaschinen zuverlässig und wirtschaftlich mit den eingesetzten Fahrzeugen anbieten zu können. Hohe Fahrzeugverfügbarkeiten und niedrige Invest- und Wartungskosten sind daher zwingend erforderlich. Den Maßstab bilden dabei die jeweiligen konventionellen Diesel-Fahrzeuge. Hybridantriebsysteme, die auf den in diesem Vorhaben beschriebenen Hybridmodulen und -komponentenbaukästen basieren, müssen für eine spätere Serientauglichkeit trotz hoher Komplexität ähnliche Verfügbarkeiten und Wartungskosten bei gleichzeitig möglichst niedrigen zusätzlichen Investkosten nachweisen können.

Die Entwicklung eines spezifischen Hybridsystems auf Basis eines separaten und spezialisierten Hybridmoduls für einzelne Nkw-Fahrzeuganwendungen gilt als „Stand der Technik“, welche durch hohe Entwicklungskosten umgelegt auf geringe Hybrid-Nutzfahrzeug Stückzahlen für den Endanwender unwirtschaftlich sind. Diese Einzelentwicklungen haben ohne hohe Einzelverkaufsförderungen nur geringe Chancen auf dem freien Markt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll eine Nutzfahrzeug-spezifische Hybridmodul-Plattform, die den Anforderungen von Lkw für Stadt-, Verteiler- und Fernverkehr, Bussen im Stadt- und Überlandverkehr sowie Arbeits- und Baumaschinen zu 90% (Volumenmarkt) entspricht, entwickelt werden. Stückzahlpoolung, Skaleneffekte, optimale Mehrfachnutzung der Entwicklungsressourcen sowie eine Verkürzung der Entwicklungszeit zur Marktreife werden eine signifikante Senkung der Kosten und damit eine deutlich verbesserte Wirtschaftlichkeit des Hybridmoduls ermöglichen. Um eine kostengünstige und konjunkturwirksame Verbreitung des NKW Hybridmoduls im gesamten Nutzfahrzeugsektor zu ermöglichen, wird das Ziel verfolgt, den einmaligen Entwicklungsinvestitionen geringe Applikationskosten zur Anpassung des NKW Hybridmoduls an die verschiedenen Grundtriebe gegenüberzustellen.

Ebenso soll es über das zu entwickelnde Hybridbaukastensystem dem Fahrzeughersteller ermöglicht werden, verschiedene Fahrzeugreihen und -applikationen mit reduziertem Entwicklungsaufwand und geringeren Kosten anbieten zu können.

Die begleitend zum Projekt durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Hybridisierung von Verteiler-Lkw (8-12 to) zeigen, dass trotz der erzielbaren Kraftstoffeinsparungen im städtischen Einsatz kein akzeptabler „Return on Invest“ erreicht werden kann. Selbst steigende Kraftstoffpreise der nächsten Jahre führen hier zu keiner grundlegenden Änderung der Kostensituation.

Jedoch wird erwartet, dass im Zuge von künftigen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebungen diese Hybrid-Fahrzeuge verstärkt gefordert werden.

Die Mehrkosten der Plug-In-Variante mit größerer HV-Batterie werden nochmals deutlich (etwa Faktor 2) höher liegen. Diese Variante wird aus heutiger Sicht nur dann Anwendung finden, wenn Betreiber sog. Umweltzonen mit entsprechenden Auflagen für Zero Emission-Betrieb bedienen müssen.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten der Hybridisierung von Fernverkehrs-Lkw sind noch stark von der Konzeptauslegung, den darstellbaren Hybrid-Funktionen, den damit erzielbaren Einsparungen und den Randbedingungen abhängig. Jedoch wird auch bei schwereren Fahrzeugklassen mittelfristig eine Einführung von Hybridsystemen stattfinden.

### **3.2 Technische Erfolgsaussichten**

Die in Abschnitt 1.4.2 aufgeführten Vorstudien und Aufbauten der Funktionserprobungsfahrzeuge, mit denen bereits signifikante Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch in Messungen nachgewiesen werden konnten, weisen die technische Machbarkeit eines Parallelhybrids im NKW-Segment nach. Sie bilden die Grundlage für die Entwicklung des Basis-Hybridmoduls, der entsprechenden Muster der Hybridkomponenten sowie erster funktionsfähiger Stände der Hybrid- und Getriebesteuerungen im Systemverbund. Diese werden bei MAN sowohl im Technologieträger als auch in den Erprobungsfahrzeugen eingesetzt.

Die Ergebnisse bisheriger Arbeiten und die ersten Erkenntnisse aus der Kundenerprobungen bei MAN im Rahmen des Verbundvorhabens unterstützen die Entwicklung des plattformtauglichen Hybridmoduls sowie die erforderliche Weiterentwicklung der Hybridkomponenten.

MAN greift auf die umfangreichen Erfahrungen bei der Entwicklung von Hybrid-Stadtbussen und Hybrid-Verteiler-Lkw zurück. Durch eigene Kompetenz der Integration von Hybridsystemen in Fahrzeuge, die Verknüpfung und Adaption der Fahrzeugsysteme und der Entwicklung des Hybrid-/Energiemanagements ist es MAN möglich, optimierte Hybrid-Fahrzeug-Systemlösungen zu entwickeln.

Im Rahmen des Projektes konnten die Entwicklung soweit durchgeführt werden, dass sich die technische Umsetzbarkeit sowohl der Verteiler-, Verteiler-Plug-In- als auch der Fernverkehrs-Hybridisierung in Form von aufgebauten Prototypfahrzeugen darstellen lässt. Ebenso konnte durch geeignete Ansätze zur Skalierbarkeit und modularer Ausstattung der unterschiedlichen Applikationen der angedachte Hybridkomponenten-Baukasten entworfen und weiterentwickelt werden.

### **3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens werden aus der gesamten Fahrzeugpalette der NKW-Anwendungen zwei Fahrzeugtypen aufgebaut und untersucht, drei 12t Verteiler-Lkw sowie ein Fahrzeug aus der 26-40t Klasse. Die hierbei erarbeiteten Ergebnisse ermöglichen es zudem, dass die Anwendung des Hybrid-Baukastens ausgeweitet und eine Applikation des Hybridmoduls auf Stadt- und Überlandbusse sowie Land- und Baumaschinen erfolgen kann. Des Weiteren sind Applikationen des Hybridmoduls auf Sonderfahrzeuge, wie Kräne, Bahn- und Militäranwendungen, möglich.

Neben der Applikation des Hybridmoduls in weitere Fahrzeugsegmente steht die Weiterentwicklung der Hybridkomponenten im Vordergrund. Denn nach Ende des Vorhabens ist der Stand der Hybrid-Komponentenentwicklung in keinsten Weise abgeschlossen, sondern es gibt auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse in Kooperation mit den Zulieferfirmen, insbesondere bei elektrischen Nebenaggregaten eine Reihe von neuen Ansätzen, das System und die Komponenten weiter zu optimieren.

Der in den Erprobungsfahrzeugen, sowie im 40t-Fernverkehrs-Prototyp und im Technologieträger dargestellte Umfang der Grundfunktionen mit Start-Stopp-Funktion, Rekuperation, elektrisches Fahren und Mischbetrieb/Boosten ist ebenso weiter zu entwickeln.

Die für Hybridsysteme in Nutzfahrzeugen mit parallelen Hybridantrieben attraktiven Zusatzfunktionen können schrittweise ergänzt werden. Hierbei sind Anwendungen wie Müllpressen, Kühlfahrzeuge, Müllfahrzeuge, Hebebühnen, Betonmischer, etc. als wichtige Zielfahrzeuge für einen solchen erweiterten Funktionsumfang zu nennen.

#### **Betrieb von weiteren elektrischen Neben- und Aufbauaggregaten**

Über das Hochvoltsystem können elektrische Aggregate direkt mit Energie versorgt werden (elektrisch angetriebene Arbeitsgeräte, Kühlaggregate, etc.). Daneben kann eine Steckdose zur Versorgung elektrischer Geräte mit herkömmlichem Netzanschluss (AC 400/230V) realisiert werden.

#### **Elektrischer Betrieb von mechanischen angetriebenen Zusatzaggregaten**

Über die elektrische Maschine ist ebenso ein Betrieb des mechanischen „Power Take Off (PTO)“ bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor möglich. Damit können mechanisch angetriebene Zusatzaggregate wie beispielsweise Hydraulikpumpen für Ladebordwände, Hebebühnen, Fahrzeugkräne, etc. elektrisch betrieben werden.

## **4 Veröffentlichungen**

Eine internationale Präsentation des Entwicklungsstandes der Erprobungsfahrzeuge (A2) konnte im Rahmen der MAN-Vorpressekonzferenz 2010 [14] als auch auf der IAA-Nutzfahrzeuge 2010 [15] gegenüber Fachjournalisten als auch allen interessierten Messebesuchern erreicht werden.

Im Anschluss an die IAA erfolgten weitere Fahrzeugpräsentation der MAN gegenüber Kunden.

Ebenfalls hat MAN mit dem TGL Hybrid (Stand Erprobungsfahrzeuge) an der Challenge Bibendum in Berlin teilgenommen [16].

Im Rahmen des Erprobungseinsatzes bei der Fa. Arndt wurde über entsprechende Pressemitteilungen [17] als auch über die auffällige Gestaltung der Fahrzeuge eine hohe Außenwirkung erreicht.

Neben den Fahrzeugpräsentationen wurden im Rahmen vieler Vorträge und Veröffentlichungen Inhalte des Vorhabens ebenfalls präsentiert. Als Auszug sind hier einige Veröffentlichungen [18-22] aufgelistet.

- [14] MAN Pressemitteilung: MAN IAA Vorpressekonferenz 2010, 22.07.2010.
- [15] MAN-Pressemitteilung: MAN Nutzfahrzeuge auf der 63. IAA Nutzfahrzeuge 2010, 21.09.2010.
- [16] MAN Pressemitteilung: MAN Truck & Bus auf der Challenge Bibendum 2011 in Berlin, 12.05.2011.
- [17] MAN-Pressemitteilung: MAN Truck & Bus und Münchner Großhändler Arndt testen TGL Hybrid im Alltagseinsatz, 05.08.2011.
- [18] Kersch, S., Döbereiner, R., Hipp, E.: Auslegung, Aufbau und Integration von Hybrid-Antriebskomponenten im Nutzfahrzeug, VDI-Tagung „Getriebe in Fahrzeugen, VDI-Bericht 2071, Friedrichshafen, 2009.
- [19] Kersch, S.: Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge, VBEW-Informationstag zu Elektromobilität, München, 03.05.2010.
- [20] Hipp, E.: Elektromobilität – Wege in die Zukunft sichern, Berlin, 03.05.2010.
- [21] Müller, B. Messung von Fahrlastwerten bei Abfallsammelfahrzeugen, IFAT-Hybrid, 16.09.2010.
- [22] Hipp, E.: Lkw-Hybridanwendungen bei MAN Truck & Bus, DVWG, München, 09.06.2011.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart <b>Schlussbericht</b>
3. Titel  <b>Modularer Hybridantrieb für Nutzfahrzeuge (HyTruck) (Schlussbericht Teilvorhaben MAN Truck &amp; Bus AG)</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  <b>Dr. Kerschl, Stefan</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>30.09.2011</b>
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>MAN Truck &amp; Bus AG Dachauer Str. 667, 80995 München</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>19 U 9029 A</b>
	11. Seitenzahl <b>84</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn</b>	13. Literaturangaben <b>22</b>
	14. Tabellen <b>1</b>
	15. Abbildungen <b>62</b>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>TÜV Rheinland Consulting GmbH, PT MVt, 51101 Köln, 31.10.2011</b>	
18. Kurzfassung  Das Ziel des Verbundvorhabens von MAN Truck & Bus und ZF Friedrichshafen besteht auf Basis eines Parallelhybrid-Konzepts in der Definition eines modularen Hybrid-Baukastens für NKW, aus dem sich für die unterschiedlichen Fahrzeug- und Einsatzklassen im Lkw-Bereich hinsichtlich E-Maschinenleistung und -drehmoment, Batteriedimensionierung, Neben- und Zusatzaggregate-Ausstattung angepasste und kostengünstige Hybridantriebssysteme/-fahrzeuge konfigurieren lassen.  Im Rahmen des Teilprojekts MAN wurde ein Hybrid-Modulbaukasten für Lkw definiert und auf dieser Basis ein bestehender Hybrid-Verteiler-Lkw als Technologieträger weiterentwickelt, mit elektrischen Nebenaggregaten erweitert und zu einem Plug-In-Hybrid mit rein elektrischem Kurzstreckenbetrieb ergänzt. Für die Gewinnung von Erkenntnissen hinsichtlich Bedienung, Alltagstauglichkeit und Einsparpotenzialen von Hybrid-Verteiler-Lkw im Kundeneinsatz wurden dazu zwei Prototypfahrzeuge des TGL 12.220 Hybrid aufgebaut und bei Fa. Arndt als Kunde im Alltagseinsatz erprobt. Zur Aufspannung des gesamten Lkw-Spektrums von 8 bis 40 t wurde zudem die Anforderungen von Verteiler-Lkw der 26-40 t-Klasse hinsichtlich Hybridisierung untersucht. Für ein 40t-Sattelzugfahrzeug wurde aus dem Hybridmodulbaukasten ein geeignetes, angepasstes Hybridkonzept entwickelt und in Form eines entsprechendes Prototyp-Fahrzeug aufgebaut.	
19. Schlagwörter <b>Nutzfahrzeug, Lkw, Hybridantrieb, Modulbaukasten, Energiemanagement, HEV, PHEV</b>	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) <b>Final report</b>
3. title  <b>Modular hybrid drive for commercial vehicles (HyTruck) (Final report project part MAN Truck &amp; Bus AG)</b>	
4. author(s) (family name, first name(s))  <b>Dr. Kerschl, Stefan</b>	5. end of project <b>30.09.2011</b>
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  <b>MAN Truck &amp; Bus AG Dachauer Str. 667, 80995 München, Germany</b>	9. originator's report no.
	10. reference no. <b>19 U 9029 A</b>
	11. no. of pages <b>84</b>
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references <b>22</b>
	14. no. of tables <b>1</b>
	15. no. of figures <b>62</b>
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) <b>TÜV Rheinland Consulting GmbH, PT MVt, 51101 Köln, 29.04.2011</b>	
18. abstract  The main outcome of the join-venture project between the MAN Truck & Bus and ZF Friedrichshafen is a parallel hybrid drive concept, which is realized as a modular hybrid system for commercial vehicles. It allows a configuration of cost-efficient hybrid trucks for different vehicle- and application classes in the truck range concerning power, torque of the electric motor, battery dimensions and auxiliaries.  Within the scope of the project part of MAN the modular hybrid building blocks were defined and a hybrid distributor truck was developed as a prototype. It includes extended electric auxiliaries and a Plug-in-hybrid functionality with purely electric drive for short distances. For gaining in experience with handling, suitability for daily use and saving potentials of hybrid distribution trucks in customer application two prototype vehicles of the TGL 12.220 Hybrid were built up additionally. They were tested with the distributor Arndt as a customer in everyday applications.  To stretch the whole truck spectrum from 8 to 40 t the demands of distribution trucks of the 26-40 t class concerning hybridization were investigated. For a 40 t trailer truck a suitable, adapted hybrid concept was developed from the modular hybrid building blocks and built up as a prototype vehicle.	
19. keywords <b>Commercial vehicle, truck, hybrid drive, modular building blocks, energy management, HEV, PHEV</b>	
20. publisher	21. price