



# **OPTIMIERTER ANTRIEBSSTRANG FÜR NUTZFAHRZEUGE MIT REDUZIERTEN KRAFTSTOFFVERBRÄUCHEN UND EMISSIONEN (OPTISTRANG)**

**– Phase 2: Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung –**

**Förderkennzeichen 19 U 1057**

## **Schlussbericht**

**Juni 2001 – April 2005**

**MAN Nutzfahrzeuge AG**

**Dr. Stefan Kersch**





**Vorhaben:** Optimierter Antriebsstrang für Nutzfahrzeuge mit reduzierten Kraftstoffverbräuchen und Emissionen (OPTISTRANG) - Phase 2: Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung

**Fördergeber:** Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

**Förderkennzeichen:** 19 U 1057

**Ausführende Stelle:** MAN Nutzfahrzeuge AG

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Stefan Kerschl

**Anschrift:** MAN Nutzfahrzeuge AG  
Zentralbereich Vorentwicklung  
Dachauer Strasse 667  
80995 München  
Tel.: 089/1580-3503  
Fax: 089/1580-3228

München, den 20.10.2005



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG, PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>6</b>
1.1.1	Ziel des Vorhabens.....	6
1.1.2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms .....	7
1.1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	8
<b>1.2</b>	<b>Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand .....</b>	<b>14</b>
1.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik .....	14
1.4.2	Schutzrechte.....	18
1.4.3	Bisherige Arbeiten der MAN Nutzfahrzeuge AG .....	19
<b>1.5</b>	<b>Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Systemauslegung .....</b>	<b>23</b>
2.1.1	Komponentenspezifikation und -auslegung.....	23
2.1.1.1	Auslegung des Starter-Generator-Systems .....	23
2.1.1.2	Erweiterung der Bordnetzfunktionen .....	26
2.1.1.3	Auslegung der elektrischen Energiespeicher .....	28
2.1.1.4	Modifizierung der Nebenaggregate .....	30
2.1.1.5	Modifizierung des Kühlungssystems .....	31
2.1.1.6	Konfiguration des Dieselmotors und Auslegung des Abgas-Systems.....	33
2.1.1.7	Automatisiertes Schaltgetriebe.....	35
2.1.1.8	Bilanzierung der Gewichte und Trägheitsmassen .....	36
2.1.2	Entwicklung einer geeigneten Fahrsteuerung .....	38
2.1.2.1	Integration der Fahrsteuerung .....	39
2.1.2.2	Energiemanagement .....	40
2.1.2.3	Wärmemanagement.....	41



<b>2.2</b>	<b>Untersuchung des Antriebssystems am Prüfstand .....</b>	<b>41</b>
2.2.1	Beschreibung des Prüfstands.....	41
2.2.2	Fahrzeug-Basis .....	43
2.2.3	Daten des Referenzfahrzeugs.....	43
2.2.4	Prüfstands Aufbau und Prüfprogramm .....	44
2.2.5	Ergebnisse.....	46
<b>2.3</b>	<b>Aufbau des Prototypfahrzeugs .....</b>	<b>52</b>
<b>2.4</b>	<b>Fahrzeugerprobung.....</b>	<b>62</b>
2.4.1	Ziele des Erprobungsbetriebs.....	62
2.4.2	Durchführung der Erprobung.....	63
2.4.2.1	Beschreibung der Erprobungsstrecke .....	63
2.4.2.2	Durchführung der Messungen.....	64
2.4.2.3	Subjektive Beurteilung des Systemverhaltens .....	64
2.4.2.4	Messtechnik .....	64
<b>2.5</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2</b>	<b>Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten .....</b>	<b>66</b>
<b>3.3</b>	<b>Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>ALLGEMEINER FORTSCHRITT .....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	<b>68</b>



# 1 Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

### 1.1.1 Ziel des Vorhabens

Aufgrund der stetigen Zunahme des Verkehrs in städtischen und stadtnahen Bereichen wird immer mehr Wert auf eine umweltschonende Verkehrsbedienung gelegt. Um auch den zukünftigen europäischen Grenzwerten für Schadstoffausstoß von Kraftfahrzeugen (**Bild 1**) zu genügen, ist eine gezielte Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik in Hinblick auf eine Minderung der Abgas- und Geräuschemissionen sowie einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch erforderlich.

Grenzwerte für ESC- und ELR-Prüfung (ESC: Europäische Prüfung mit stationärem Fahrzyklus) (ELR: Europäische Prüfung mit lastabhängigem Fahrzyklus)						
Norm	Stufe / Datum	CO [g/kWh]	THC * [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	Partikel (PT) [g/kWh]	Ruß [m <sup>-1</sup> ]
EURO 3	A / 2000	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13 <sup>1)</sup>	0,8
EURO 4	B1 / 2005	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
EURO 5	B2 / 2008	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
EEV **	C / -	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15

Grenzwerte für ETC-Prüfung <sup>2)</sup> (ETC: Europäische Prüfung mit instationärem Fahrzyklus)						
Norm	Stufe / Datum	CO [g/kWh]	NMHC *** [g/kWh]	Methan <sup>3)</sup> [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	Partikel (PT) <sup>4)</sup> [g/kWh]
EURO 3	A / 2000	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16 0,21 <sup>1)</sup>
EURO 4	B1 / 2005	4,0	0,55	1,1	3,5	0,03
EURO 5	B2 / 2008	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03
EEV **	C / -	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02

1) Für Motoren mit einem Hubraum von unter 0,7 dm<sup>3</sup> je Zylinder und einer Nenndrehzahl von über 3000 min<sup>-1</sup>  
 3) Nur für Erdgasmotoren  
 \* THC: Total Hydrocarbons  
 \*\* EEV: Enhanced Environmentally Friendly Vehicle  
 \*\*\* NMHC: Non Methane Hydrocarbons

Bild 1: EU-Abgasgrenzwerte für Dieselmotoren (Schwere Nutzfahrzeuge)



Dem Rechnung zu tragen, wird im Vorhaben "OPTISTRANG" eine gesamtheitliche Optimierung des Systems "Antriebsstrang" hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen unter Berücksichtigung der spezifischen Fahrzeugeinsatzbedingungen des Verteilerverkehrs verfolgt.

Auf der Emissionsseite gilt es mit diesem innovativen Fahrzeug-Antriebsstrangsystem für Verteilerfahrzeuge die EURO5- bzw. EEV-Grenzwerte (EEV - enhanced environmentally friendly vehicle) zu erreichen und zudem den Kraftstoffverbrauch, der im Gegensatz zum Pkw-Bereich im Nutzfahrzeugbereich nicht durch gesetzliche, normierte Prüfverfahren ermittelt wird, im realen Fahrbetrieb deutlich zu reduzieren.

Ziel der Phase 2 des Vorhabens „OPTISTRANG“ ist es, die in der vorgelagerten theoretischen Grundsatzuntersuchung (Vorhaben „OPTISTRANG“ - Phase 1) ermittelten Einspar- und Optimierungspotenziale anhand einer Prototypen-Entwicklung nachzuweisen. Um hier eine maximale Transparenz der Auswirkungen einzelner Optimierungsmaßnahmen zu erhalten, wurde das Vorhaben so konzipiert, dass vor Aufbau des Prototyp-Fahrzeugs umfangreiche Prüfstandsuntersuchungen stattfanden. So konnte unter reproduzierbaren Versuchsbedingungen stufenweise jede Einzelmaßnahme durch Vergleich mit einer unmittelbar zuvor erfolgten Referenzmessung hinsichtlich Energieeinsparpotenzial und Abgasreduzierung quantifiziert werden.

Erst nach Abschluss dieser Prüfstandsversuche wurde ein Prototyp-Fahrzeug aufgebaut und nach erfolgter Inbetriebnahme im realen Einsatz erprobt.

### **1.1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Nicht zuletzt wegen des nach wie vor erheblichen technologischen und wirtschaftlichen Aufwands für die Realisierung von Zero-Emission-Fahrzeugen (ZEV) entwickelt sich deren Marktdurchdringung zur Zeit eher unbefriedigend. Gleichzeitig wird die Umweltbilanz konventioneller Antriebsformen aufgrund moderner Technik immer besser, so dass kurz- und mittelfristig die Optimierung des konventionellen Antriebsstranges die erfolgversprechendste Alternative zur Entschärfung des Spannungsverhältnisses von Ökonomie und Ökologie im Straßenverkehr ist.

Die in diesem Vorhaben angestrebte Reduzierung der Stickoxide und Partikelemissionen soll mit einer gleichzeitigen Verringerung des Kraftstoffverbrauchs kombiniert werden. Um den Zielkonflikt zwischen Emissions- und Verbrauchsreduzierung zu überbrücken, soll das Optimierungspotenzial des konventionellen Antriebsstrangs ausgeschöpft und durch ein



Abgasnachbehandlungssystem ergänzt werden. Ansätze wie der bedarfsgerechte, optimierte Betrieb der Nebenaggregate, die Abschaltung des Verbrennungsmotors während des Fahrzeugstillstands durch eine Stopp-Start-Automatik, der Einsatz eines automatisierten Schaltgetriebes und Rekuperation im Schubbetrieb führen zu Kraftstoffminderverbrauch, Reduktion der Abgasemissionen und zu einer geringeren Geräuschemissionen.

### **1.1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Die Arbeiten der theoretischen Voruntersuchung (Vorhaben „OPTISTRANG“ Phase 1) basierten auf einer systemorientierten Analyse des gesamten konventionellen Antriebsstrangs. Ausgehend von dieser Betrachtung konnten unter Einbeziehung neuer Technologien und Komponenten (z. B. Entwicklungen im Bereich Starter/Generator oder elektrische Speicher) verschiedene Optimierungsansätze und Konzeptentwürfe generiert werden. Nach Beurteilung bzw. Quantifizierung der Konzepte hinsichtlich Realisierbarkeit, Einsparpotenzialen und Kosten wurde daraus ein Konzeptentwurf ausgewählt, der in der hier beschriebenen Phase 2 als Prototyp aufgebaut, in Betrieb genommen und im realen Einsatz erprobt werden sollte.

**Die darzustellenden Funktionsvorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:**

#### **Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch:**

- Einstellung des Dieselmotors verbrauchsoptimal
- Bedarfsgerechter Antrieb/Regelung der Nebenaggregate
- Stopp-Start-Automatik
- Rekuperation
- optimierte Schaltstrategie des automatisierten Schaltgetriebes

#### **Reduktion der Emissionen durch:**

- CO<sub>2</sub>-Verminderung durch Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs
- Abgasnachbehandlungssystem (GD-KAT-System)
- beschleunigte Dieselmotorerwärmung durch Wärmemanagement
- Stopp-Start-Automatik

**zusätzliche optionale Sicherheits-und Komfortfunktionen:**



- schnelles Aufheizen des Fahrerhauses (z.B. elektrisches Heißluftmodul, elektrischer Bremswiderstand u.ä.)
- schnelles Abtauen der Frontscheibe durch Frontscheibenheizung

#### **sonstige Zusatzfunktionen:**

- optionale Versorgung elektrischer Hochlastverbraucher (z.B. Aufbau-Kühlaggregat)
- optionale leistungsfähige 230 V-Steckdose

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Als Grundlage der Arbeiten diene neben den unter **Abschnitt 1.4.3** genannten Vorarbeiten der MAN Nutzfahrzeuge die im Vorhaben „OPTISTRANG“ Phase 1 durchgeführte theoretische Voruntersuchung.

Die Arbeiten der theoretischen Voruntersuchung konzentrierten sich zunächst auf eine systemorientierte Analyse des gesamten konventionellen Antriebsstrangs. Ausgehend von dieser Betrachtung konnten unter Einbeziehung neuer Technologien und Komponenten (z. B. Entwicklungen im Bereich Starter/Generator oder elektrische Speicher) verschiedene Optimierungsansätze und Konzepte generiert werden. Nach Beurteilung bzw. Quantifizierung der Konzepte hinsichtlich Realisierbarkeit, Einsparpotenziale und Kosten wurde daraus ein Konzeptentwurf (siehe Abschnitt 2) ausgewählt, der nun in der durchgeführten zweiten Vorhabensphase als Prototyp aufgebaut, in Betrieb genommen und im realen Einsatz erprobt wurde.

#### **Erzielte Ergebnisse der Phase 1 im Überblick:**

- **Untersuchung und Festlegung der Antriebsstrang-Topologie**

Die Integration einer E-Maschine als Starter/Generator bietet eine Vielzahl denkbarer Antriebsstrang-Topologien. Aus den in der ersten Konzeptphase definierten 11 Antriebsstrang-Topologien konnten 2 Strukturen als zielführend bewertet werden. Struktur 1 stellt eine sog. KSG-Lösung dar, in der die E-Maschine direkt ohne eigene Lagerung an der Kurbelwelle im Schwungradgehäuse integriert wird. Struktur 2 übernimmt durch weitere Integration einer schaltbaren Planetenstufe, ausgeführt als "Geared-neutral-Getriebe" zusätzlich die Funktion der Hauptkupplung. Damit kann die Hauptkupplung entfallen und das Anfahren erfolgt verschleißfrei über die E-Maschine.

Mit Hilfe der Simulation wurden diese beiden Strukturen genauer untersucht und optimiert. Ebenfalls wurden bereits Konstruktionsentwürfe der favorisierten Strukturen erstellt.

- **Untersuchung und Festlegung der Nebenaggregate-Topologie**

Ausgehend von der Analyse des Energiebedarfs der einzelnen Nebenaggregate im Serienfahrzeug (Referenzfahrzeug) wurden verschiedene Antriebsarten (mechanisch/elektrisch, zentral, dezentral) sowie Optimierungsmaßnahmen an den Aggregaten selbst untersucht und bewertet.

Daraus abgeleitet wurde unter den gegebenen Randbedingungen eine hinsichtlich Energiebedarf optimierte Nebenaggregate-Topologie wie folgt definiert.

Der Antrieb des Luftpressers und des Kühlerlüfters erfolgt mechanisch über die Kurbelwelle. Die Optimierungsmaßnahmen bestehen aus einer elektrisch schaltbaren Kupplung zum Luftpresser zur Reduzierung der Verluste im Abblasbetrieb sowie einer modifizierten Ansteuerung der Viscokupplung zum Kühlerlüfter.

Der Antrieb der Kühlwasserpumpe sowie der der Lenkhilfpumpe erfolgt elektrisch entkoppelt und damit drehzahl- bzw. bedarfsregelbar über zwei getrennte E-Maschinen.

Zur konstruktiven Gestaltung der Kupplung zum Luftpresser wurden mehrere Variantenentwürfe (nass- und trockenlaufende Lamellen- sowie Einscheibenkupplungen) erstellt.

- **Festlegung der Bordnetzspannung**

Aufgrund der höheren Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Bordnetzes z.B. für den Direktstart des Dieselmotors muss eine Erhöhung der Bordnetzspannung erfolgen. Nach Bewertung verschiedener Bordnetzkonzepte (Ein- und Mehrspannungsbordnetze kombiniert mit unterschiedlichen Spannungsniveaus) wurde die Lösung als Zweispannungsbordnetz mit 24/28V und 36/42V als die sinnvollste Variante festgelegt.

- **Bordnetz-Planung**

Ausgehend von o.g. Festlegung wurden die einzelnen Verbraucher (Hoch-, Niederlastverbraucher), elektrische Speicher (Leistungs-, Energiespeicher) sowie der erforderliche DC/DC-Wandler in Form einer Grobplanung in die Bordnetzstruktur integriert.

- **Auswahl/Auslegung der elektrischen Speicher**

Die Auswahl eines geeigneten Speichers wird v. a. durch die Kaltstart-Strombelastung sowie den Energieumsatz geprägt. Der Energieumsatz im Speicher ist durch die Fahrzustände Start-/Stopp und Rekuperation im Schubetrieb im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug stark erhöht. Aufgrund der beiden genannten Anforderungen kommen nur hochstromfähige und zyklusfeste Speichersysteme in Frage.

Da ein rein elektrisches Fahren über die E-Maschine nicht vorgesehen ist, sind vom elektrischen Speicher nur kleine Energiemengen zwischenspeichern. Daher kann die Kapazität und damit auch das Gewicht der Speicher klein gehalten werden.

Als zielführend unter Berücksichtigung der Kostensituation wurden drei geeignete Speicherkonfigurationen definiert, die sich bzgl. Zyklusfestigkeit, Leistungsfähigkeit aber auch Kosten deutlich unterscheiden. Während die Bleibatterie in AGM-Technologie (absorbent glass matt) eine gesteigerte Zyklusfestigkeit bei moderaten Mehrkosten bietet (Konfiguration 1), erreicht eine deutlich teurere NiMH-Batterie (Konfiguration 2) die erforderliche Zyklusfestigkeit für eine Lebensdauer von 6 bis 10 Jahren bei besseren Wirkungsgraden. Da NiMH-Batterien bei tiefen Temperaturen nur stark reduzierte Leistungen liefern können, werden in Konfiguration 3 zusätzlich zu einer NiMH-Batterie Doppelschicht-Kondensatoren (sog. Ultracaps) für den Kaltstart des Dieselmotors verwendet.

- **Auswahl eines geeigneten E-Maschinen-Typs als Starter/Generator**

In Form eines ersten Lastenhefts wurden die für das Projekt "OPTISTRANG" spezifischen Anforderungen an die E-Maschine als Starter/Generator zusammengestellt. In Zusammenarbeit mit den Firmen ISAD, Sachs, Siemens, Bosch und ZF wurden daraufhin deren spezielle Technologien (Asynchron-, Synchron-, Außenläufer-, Innenläufer, konstruktiver Aufbau, Kühlung, Leistungsfähigkeit, usw.) auf dem Gebiet der Starter/Generatoren auf Übertragbarkeit und Eignung im Nutzfahrzeugbereich untersucht.

- **Konstruktion/Auslegung der E-Maschine als Starter/Generator**

In Zusammenarbeit mit den möglichen Zulieferern wurden die konstruktive Integration und die Auslegung der E-Maschine vorbereitet. Zentrale Auslegungskriterien sind erforderliches Startdrehmoment und Generatorleistung. Eine endgültige Auslegung wurde durch die Durchführung von Kaltstartversuchen zur Ermittlung des notwendigen Startdrehmoments vorbereitet.

Im Nutzfahrzeugbereich sind die Anforderungen nach hohem Startmoment, passender Leistungs-/Drehzahlcharakteristik und gutem Wirkungsgradverhalten wesentlich schwieriger als im Pkw-Bereich zu erfüllen. Der Grund hierfür liegt in deutlich höheren Startmomenten bei begrenzter Leistung der E-Maschine, bedingt durch die Leistungsfähigkeit des elektrischen 42V-Bordnetzes und der elektrischen Speicher.

- **Abgasnachbehandlungssysteme**

Zur Erreichung der zukünftigen Abgasgrenzwerte EURO4/5 muss der Ausstoß von Partikeln und Stickoxiden drastisch reduziert werden. Dazu wurden zwei verschiedene Lösungsansätze betrachtet:

- a) Innermotorische Stickoxidreduktion mit nachgeschaltetem Partikelfilter
- b) Innermotorische verbrauchsoptimale, partikelreduzierte Verbrennung mit nachgeschaltetem Denox-System mit Harnstoff als Reduktionsmittel

Variante b bietet bei höheren Kosten das Potenzial die EEV-Grenzwerte zu erreichen und wurde, da dieses System zudem eine verbrauchsoptimale Dieselmotoreinstellung zulässt, für den OPTISTRANG ausgewählt. Problematisch sind für die Funktionsweise des Abgasnachbehandlungssystems die niedrigen Abgastemperaturen im typischen Verteilerbetrieb. Fällt die Abgastemperatur zu weit ab, reduzieren sich die Konvertierungsraten.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, bietet das OPTISTRANG-Konzept die Möglichkeit, die Auskühlung des Dieselmotors und des Abgasnachbehandlungssystems im Motorleerlauf durch eine Stopp-Start-Automatik wirkungsvoll zu vermeiden.

- **Fahrsteuerung-Management**

Die Grobdefinition der einzelnen Steuerungsaufgaben und Teilfunktionen für Antriebstrang-, Energie- und Wärmemanagement wurden erstellt und die dafür erforderliche Sensorik sowie Stellglieder konzeptmäßig eingeplant.

- **Bestimmung der Kraftstoff-Einsparpotenziale**

Unter Berücksichtigung der speziellen Einsatz-Randbedingungen des Verteilerverkehrs, festgelegt in den spezifischen Fahrzyklen (Bundesautobahn, Großraum, Stadtbereich, Innenstadt), den Beladungsverhältnissen, den Stillstandszeiten, Jahreskilometerleistungen und Lastkollektive der Neben- und Aufbauaggregate wurden die Kraftstoff-Einsparpotenziale der einzelnen Optimierungsmaßnahmen quantifiziert.

Als Ergebnis der Simulationsrechnungen lassen sich Einsparpotenziale vor allem im Bereich der Nebenaggregate-Optimierung von bis zu 5,6 % (bezogen auf den Gesamtkraftstoffverbrauch) und durch Betriebsstrategie-Maßnahmen aufgrund der zusätzlichen Funktionalitäten und verbrauchsoptimale Dieselmotoreinstellung bis zu 12,4 % anführen. Zusätzliches Mehrgewicht und leicht erhöhte Trägheitsmomente im Antriebsstrang führen jedoch zu leichtem Kraftstoff-Mehrverbrauch, so dass sich insgesamt Einsparpotenziale bis zu etwa 14 % berechnet wurden.



Zusammenfassend konnte somit ein deutliches Kraftstoffeinsparpotenzial bei gleichzeitiger Erreichbarkeit der EURO5 bzw. EEV-Grenzwerte als realisierbar festgestellt werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten des Vorhabens „OPTISTRANG – Phase 2 Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung“ konnten im wesentlichen in der Abfolge analog dem aufgestellten Zeitplan (**Tabelle 1**), jedoch mit einem Gesamtzeitverzug von etwa 12 Monate durchgeführt werden.

Aktualisierter Zeitplan: Projekt "OPTISTRANG Phase 2"	2001				2002				2003				2004				2005			
	I	II	III	IV																
AP1 Projektkoordinierung																				
AP2 Auslegung Schnittstellenkoordination																				
AP3 Konstruktion																				
AP4 Entwicklung/Darstellung Regelung																				
AP5 Bordnetzplanung/elektrische Nebenaggregate																				
AP6 Aufbau/Funktionsversuche Dieselmotor/GD-Kat																				
AP7 Vorversuche Dieselmotor/GD-Kat																				
AP8 Aufbau Gesamtsystem																				
AP9 Inbetriebnahme/Messungen																				
AP10 Zwischenauswertung und Optimierung																				
AP11 Detail-Planung/Konstruktion für Prototyp																				
AP12 Aufbau des Prototyp-Grundfahrzeugs																				
AP13 Einbau der OPTISTRANG-Komponenten																				
AP14 Inbetriebnahme Prototypfahrzeug																				
AP15 Fahrzeugerprobung/-optimierung																				
AP16 Fahrzeugerprobung im realen Einsatz																				
AP17 Erstellung des Abschlussberichts																				
Geplante Dauer des Vorhabens																				
Tatsächliche Dauer des Vorhabens																				

**Tabelle 1:** Zeitplan des Vorhabens

Der entstandene Zeitverzug wurde im Wesentlichen durch folgende Sachverhalte verursacht: Aufgrund des Projektstarts im 3. Quartal 2001 zu Beginn der Haupt-Urlaubszeit war der Projektanlauf mit den verschiedenen Zulieferern sehr schleppend. Dadurch verzögerte sich die Detaillierung der Spezifikationen und Lastenhefte, was zur Aufgabe der zunächst eingeplanten Zeitfenster und damit zu Terminverschiebungen führte. Als Beispiel sei hier die zeitkritische Komponente Starter-/Generator-System genannt. Abweichend vom ursprünglich geplanten Liefertermin Ende 01/2002 hat sich der tatsächliche Liefertermin auf Ende 07/2002 verschoben, was einem Zeitverzug von 6 Monaten entspricht.

Zeitkritisch erwies sich ebenfalls die Applikation des GD-Kat-Systems, da das Kat-Konzept aus technischen Gründen geändert werden musste und das GD-KAT-System als Kompaktmodulvariante erst in 05/2002 als Prototypenteil vorlag. Schwierigkeiten mit dem B-Muster des Harnstoffdosiergeräts verzögerten ebenfalls die Durchführung der Funktionsversuche am Motorenprüfstand.

Die Arbeitsumfänge im Vorhaben überstiegen durch nicht vorhergesehene Zusatzaufgaben gerade in Verbindung mit der Inbetriebnahme der Prototypkomponenten und der Umsetzung von Steuerungsfunktionen die ursprüngliche Planung. Dies betraf im Wesentlichen die Arbeitspakete 8 und 9.

Aufgrund der Vielzahl der eingesetzten Prototypkomponenten verbunden mit mehreren Ausfällen im Laufe der Prüfstandsuntersuchungen stellte sich ein weiterer zeitlicher Verzug von etwa 2 Monate ein.

Ebenso ergab sich ein erhöhter Arbeitsaufwand bei Aufbau des Prototyp-Grundfahrzeugs und bei Einbau der OPTISTRANG-Komponenten in das Prototypfahrzeug, v.a. was die Modifikationen an der Fahrzeugelektrik betrifft (AP13).

In AP 15 verursachten Funktionsprobleme und Ausfälle der elektrischen Lenkhilfpumpe eine weitere zeitliche Verschiebung von mehr als 5 Monaten.

Durch eine - soweit wie mögliche – zeitlich überlappende Bearbeitung einzelner Arbeitspakete sowie eine Komprimierung der Erprobungsphase konnte das Projekt mit einem Verzug von insgesamt 12 Monaten zur ursprünglichen Planung (Projektende 30.04.2004) erfolgreich abgeschlossen werden.

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

### **1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik**

Aufgrund des bereits angesprochenen Zielkonflikts zwischen Emissions- und Verbrauchsreduzierung ist eine weitere Emissionsreduzierung bei konventionellen Antriebssträngen mit Dieselmotoren ohne eine Gesamtantriebsstrangoptimierung in der Regel nur unter Inkaufnahme eines Kraftstoffmehrverbrauchs zu erreichen.

Bezugnehmend auf den Stand der Wissenschaft, auf dem die Phase 2 des Vorhabens aufsetzte, war im Bereich der Pkw-Automobilhersteller sowie deren Zulieferer eine verstärkte Aktivität auf dem Gebiet der Gesamtantriebsstrangoptimierung zu verzeichnen. Getrieben wurden diese Entwicklungen aus den gestiegenen Kundenanforderungen hinsichtlich Komfort, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Erste Lösungsansätze zu der hier geforderten Antriebsstrangoptimierung existierten für den Pkw-Bereich. Hier wurden vor allem durch die Integration einer elektrischen Starter/Motor/Generator-Einheit [1,...,14], Erhöhung der Bordnetzspannung, als Übergangslösung die Einführung von Zweispannungsbordnetzen [18,...,26], bedarfsgerechter

Betrieb der Nebenaggregate [15,...,17] z.B. durch elektrische Entkopplung sowie die Kombination mit elektrischen Speichern neue Antriebskonzepte entwickelt.

Die für diese Konzepte notwendigen zusätzlichen Antriebsstrangkomponenten waren technologisch bekannt und überwiegend bereits als Prototypen bzw. in einer ersten Kleinserie von verschiedenen Herstellern erhältlich. Der Entwicklungsbedarf bestand hier im Wesentlichen in der auf den jeweiligen Anwendungsfall optimalen Auslegung, der Erfüllung der Lebensdauernanforderungen und der Kostenreduktion.

Elektrische Speicher [27,...,34] wurden aufgrund der erhöhten Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Zyklusfestigkeit, insbesondere bedingt durch die Funktionen Rekuperation und Start-Stopp-Betrieb aus dem Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeuge ständig, wenn auch nur mit kleinen Fortschritten, weiterentwickelt. Zur Verfügung standen derzeit NiMH- und Lithium-Ionen-Batteriesysteme als vielversprechendste Alternative zur preiswerten Bleibatterie, die verbessert als AGM-Bleibatterie ebenfalls in bestimmten Bereichen Anwendung findet.

Doppelschichtkondensatoren sind eine interessante Alternative zu Batterien, da sie schnell hohe Ströme aufnehmen und nahezu ohne Wirkungsgradverluste wieder abgeben können. Ebenso wichtig ist deren Zyklusfestigkeit, wenn sie als Kurzzeitspeicher eingesetzt werden.

Abgasnachbehandlungssysteme für direkteinspritzende Dieselmotoren [35,...,38] zur Reduzierung der NO<sub>x</sub> und PM-Werte befanden sich als Prototyplösung im Fahrversuch. Im Nutzfahrzeugbereich wurde an der Erfüllung der EURO4-Grenzwerte durch Einsatz von CRT-Filtern gearbeitet. Die Erreichung der EURO5-Werte schien nur mit einem Redox-Katalysatorsystem mit Harnstoff bzw. Ammoniak als Reduktionsmittel möglich.

Eine Kombination dieser Komponenten, insbesondere mit zusätzlicher Einbindung eines Abgasnachbehandlungssystems hinsichtlich einer Emissionsreduzierung, bei gleichzeitiger Verbrauchsminderung war für den Nutzfahrzeugsektor nicht bekannt.

#### **Literatur zu 1.4.1**

- [1] Hoffmann, B.: ISAD-Technologie: Kompakte Hochleistung im KSG, Tagungsband „Kurbelwellenstartgenerator (KSG) – Basis für zukünftige Fahrzeugkonzepte“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1999.
- [2] Adamis P., Miersch, R.: Schwungrad-Starter-Generator: Der Weg zu einem innovativen Antriebsstrang, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [3] Wähler, L., Johanning, H.-P.: Moderne Starter-Generatoren für Kraftfahrzeuge: Vom Konzept zur Serie, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das

- multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [4] Hengstenberger, H., Esschendal, H., Masberg, U.: Das ISAD-System für Nutzfahrzeuge, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [5] Weimer, J.: Der Sachs DynaStart: Technologie für zukünftige Fahrzeug-Generationen, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [6] Eriksson, R.: ISG (Integrated Starter Generator) Soft Hybrid on 42V, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [7] Altenbernd, G.: Welche Maschinen sind aus heutiger Sicht als Starter-Generator für den Serieneinsatz geeignet?, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [8] Schenk, R., Pesch, M.: Startgenerator: Konzepte und Potentiale, Tagungsband „Kurbelwellenstartgenerator (KSG) – Basis für zukünftige Fahrzeugkonzepte, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1999.
  - [9] Toshihiro, H.: Start Alternator System: Nissan's Solution, Tagungsband „Kurbelwellenstartgenerator (KSG) – Basis für zukünftige Fahrzeugkonzepte, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1999.
  - [10] Bauch-Banetzky, D., Rühllein, A., Sonnenburg, R.: Permanent magneterregte Synchronmaschine mit Nd-Fe-B Dauermagneten für den Einsatz im Personenkraftfahrzeugen, VDI-Berichte 1459, 1999.
  - [11] Bischof, H., Bork, M., Schenk, R.: Startergenerator: System, Funktion, Komponenten, Tagungsband „E-Maschinen im Antriebsstrang“, LuK, Bühl, 1999.
  - [12] Reik, W., Pels, T., Reitz, D. : Strukturen für Startergeneratoren und Hybridantriebe, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [13] Reik, W.: Mögliche Anordnungen des Startergenerators im Antriebsstrang, Tagungsband „E-Maschinen im Antriebsstrang“, LuK, Bühl, 1999.
  - [14] Fischer, R., Hirt, G.: Integration automatisierter Schaltgetriebe mit E-Maschine, Tagungsband „E-Maschinen im Antriebsstrang“, LuK, Bühl, 1999.
  - [15] Schmidt, M.: Neue Funktionen, Strukturen und Einsparpotentiale mit KSG, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug", expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
  - [16] Schmidt, M., Isermann, R., Lenzen, B., Hohenberg, G.: Nebenaggregate und ihr Einfluß auf Verbrauch und Emissionen - Modelle, Simulationen, Messungen, VDI-Berichte Nr. 1418, Dresden, 1998.
  - [17] Voß, B.: Bedarfsorientierte Nebenaggregate, ATZ 94 (1992) 12, 1992.

- [18] Richter, G: Mögliche Bordnetzarchitekturen unter Berücksichtigung des Entwicklungsstandes für Energiespeicher, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [19] Hoffmann, B., Gründe, A.: Neue Kostensenkende Topologie für KSG-Umrichter und DC/DC-Wandler, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [20] Graf, H.-M.: Wie verändert die höhere Spannung das elektrische Bordnetz?, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [21] Haub, M., Huart, D., Plasse, C.: 42 Volt Generatoren und Bordnetze, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [22] Bowden, U., Wilson, D.: Kurbelwellen Starter Generator-Lösungen, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [23] Hartmann, H.-D.: 42 Volt Bordnetz im Kraftfahrzeug - Stand der Normung, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [24] Thiemer, H.: Motoren für 42 Volt, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [25] Adams, M.: 42 Volt Bordnetzeinflüsse, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [26] Hoffmann, V.: Neue Anforderungen an das Bordnetz: 42 Volt Versorgungsstrategien, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [27] Dietrich, T.: Elektrische Doppelschicht-Kondensatoren – Technologie und Anwendungsgebiete, VDI-Berichte 1418, 1998.
- [28] Egger, A., Schmid, M.: Doppelschicht-Kondensator als Kurzzeitspeicher für den Autarken Hybrid, VDI-Berichte 1459, 1999.
- [29] Dietrich, T., Staib, B.: Ultracapacitors: Power für innovative Automobilanwendungen, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [30] Schmid, M., Egger, A.: Doppelschicht-Kondensator als Kurzzeitspeicher für den Fahrzeugeinsatz, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [31] Höcker, J., Richter, G.: Entwicklungstendenzen für zukünftige Autobatterien, VDI-Berichte 1418, 1998.
- [32] Frey, M.: Ultra-Power-Kondensatoren: Neue Weiterentwicklungen und Anwendungen auf dem Gebiet der elektrischen Doppelschicht-Technologie, Tagungsband „Integrierter Starter-Generator (ISG) – Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug“, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [33] Staib, B.: Kondensatoren als Energiespeicher, Tagungsband „42 Volt - Von der Innovation zur Integration“, Stuttgart, 29./30. Juni 2000.
- [34] Kruger, F.: Wiederaufladbare Batteriesysteme für das nächste Jahrtausend, 3. Euroforum Tagung Emissionsarm in die automobile Zukunft, Frankfurt a. M. 22./23. Juni 1998.



- [35] Cartus, T., Holy, G., Herzog, P., L.: NOx-Adsorbertechnologie für direktein-spritzende Otto- und Dieselmotoren, VDI-Berichte 1418, 1998.
- [36] Hühwohl, G., Maurer B.: Das CRT/SCRT-System als wirksame Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, Kongress "CRT contra Erdgas? - Umweltfreundliche Omnibusantriebe" der Berliner Verkehrsbetriebe, 9./10. September 1999.
- [37] Gieshoff, J., Schäfer-Sindlinger, Spurk, P.C., Garr, G.: Improved SCR systems for heavy duty applications, SAE technical paper series 2000-01-0189, Detroit, 2000.
- [38] Schaper, K., Konieczny, R., Brück, R.: Dielekatalysatoren mit Hybrid-Trägerstruktur, Abgasnachbehandlung von Fahrzeugdieselmotoren, Haus der Technik, Essen, 15./16. Juni 1999.

### 1.4.2 Schutzrechte

In unten stehender Aufstellung sind vor der Laufzeit des Vorhabens veröffentlichte, relevante Patente sowie Patentanmeldungen aufgelistet, die sich im wesentlichen auf den Aufbau des Starter/Generators, auf dessen Funktionen, auf die Antriebsstrangstruktur sowie auf die Steuerung und den Betrieb des Antriebsstrangs beziehen.

Die angemeldeten Schutzrechte engten nicht das Vorgehen im Vorhaben ein. Bei der Umsetzung des erstellten Konzepts in Form von Prototypaufbauten wurde die Patentsituation unter Einbeziehung auch der Patentrechte der Entwicklungspartner bzw. Zulieferer überprüft.

- [39] EP 0 937 205 B1: Starteinheit für eine Brennkraftmaschine
- [40] DE 198 58 320 A1: Starter-Generator
- [41] DE 198 49 051 C1: Verfahren zum Starten einer Brennkraftmaschine mit einem Starter-Generatorsystem, sowie Starter-Generator-System zum Durchführen des Verfahrens
- [42] US 005345761 A: Energy management system for hybrid vehicle
- [43] DE 196 37 209 A1: Verfahren zum Steuern des Antriebsstrangs eines Kraftfahrzeugs und integrierte Antriebsstrangsteuerung
- [44] DE 197 43 958 A1: Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung eines Antriebssystems in einem Kraftfahrzeug
- [45] DE 29 43 554 A1: Hybrid-Antrieb für ein Fahrzeug, insbesondere Kraftfahrzeug
- [46] DE 196 28 000 A1: Steuerungssystem für Fahrzeugantriebseinheit
- [47] EP 0 903 258 A2: Control system for hybrid vehicle
- [48] DE 44 22 554 C1: Vorrichtung zur Drehzahlsynchronisation für ein Kraftfahrzeug mit Hybridbetrieb
- [49] DE 39 28 814 A1: Kraftfahrzeug mit einem selbsttätig schaltenden Getriebe
- [50] EP 0 99 0094 A1: Starting and driving unit for an internal combustion engine of a motor vehicle
- [51] EP 09 80 320 A1: Elektrisches Nebenaggregat mit variabler Getriebeübersetzung für eine Kraftfahrzeug-Brennkraftmaschine
- [52] DE 198 42 928 C1: Starter-Generator für ein Kraftfahrzeug

- [53] DE 199 37 545 A1: Antriebsstrang
- [54] DE 199 34 936 A1: Antriebsstrang
- [55] EP 09 64 995 A1: Startersysteme für einen Verbrennungsmotor sowie Verfahren zum Start eines Verbrennungsmotors
- [56] DE 196 32 074 A1: Verfahren zum Betrieb eines mit einem Starter-Generator koppelbaren ventilgesteuerten Verbrennungsmotors
- [57] DE 198 14 402 A1: Antriebssystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zum Betreiben desselben
- [58] DE 198 49 156 A1: Antriebsstrang für ein Kraftfahrzeug
- [59] DE 198 17 497 A1: Verfahren und Startersystem zum Starten eines Verbrennungsmotors
- [60] EP 08 44 937 B1: Antriebssystem für ein Kraftfahrzeug, mit einem Antriebsaggregat und einer elektrischen Maschine, und Verfahren zum Betreiben desselben
- [61] DE 199 17 295 A1: Antriebsvorrichtung
- [62] DE 199 18 513 C1: Elektrische Antriebsanordnung für eine Brennkraftmaschine in einem Kraftfahrzeug
- [63] EP 08 76 554 B1: Starter/Generator für einen Verbrennungsmotor, insbesondere eines Kraftfahrzeugs

### 1.4.3 Bisherige Arbeiten der MAN Nutzfahrzeuge AG

Die MAN Nutzfahrzeuge AG hat Erfahrung mit konventionellen Dieselfahrzeugen, mit Diesel-elektrischen Hybridantrieben, mit Batteriefahrzeugen und Bremsenergieerückgewinnung.

Das Vorhaben "OPTISTRANG" basiert auf diesen Entwicklungen, die teilweise als eigene Projekte und teilweise als geförderte Vorhaben realisiert wurden. Als geförderte Vorhaben sind zu nennen:

- Typische Betriebsweisen von Verteiler-Lkw und Stadtbussen in Verdichtungsräumen [64]
- Bremsenergieerückgewinnung
- Brennstoffzellenantrieb für Stadtbusse [65]
- Geregelter Dieselmotorkatalysator (SINO<sub>x</sub>)

Weitere für das Vorhaben relevante Entwicklungen sind:

- Automatisiertes Handschaltgetriebe (ASG) mit kennfeldunterstützter verbrauchs-optimierter Schaltstrategie
- Hybrid-Verteiler-Lkw [66, 68]
- Fahrzeugführungsrechner
- Abgasnachbehandlungssystem GD-KAT [67, 69]

Die Ergebnisse dieser Projekte wurden in das Vorhaben "OPTISTRANG Phase 1" eingebracht und bildeten gemeinsam eine fundierte Grundlage auch für die zweite Vorhabensphase „Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung“.

### Literaturauszug zu 1.4.3

- [64] Feigl, E., Hipp, E., Lindner, A., Hoffmann, A., Heckelsmüller, J.: Betriebsweisen von Verteiler-Lkw in Verdichtungsräumen, Technischer Schlussbericht, BMBF-Fördervorhaben 19G 9424.
- [65] Lexen, G., Gruber, Ch.: MAN Stadtbusse mit Brennstoffzellenantrieb, VDI-Berichte Nr. 1565, 2000.
- [66] Schubert, A.: Hybridantrieb im Verteiler-Lkw, Haus der Technik, Essen, 1996.
- [67] Jacob, E., Döring, A.: GD-KAT: Abgasnachbehandlungssystem zur simultanen Kohlenstoffpartikel-Oxidation und NO<sub>x</sub>-Reduktion für EURO 4/5-NFZ-Dieselmotoren, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 12, Nr. 420, Band 2, 2000.
- [68] Schaller, K.-V.: Power für den Lkw der Zukunft, Deutsche Verkehrszeitung, Zukunftsbeilage Dezember 2000.
- [69] Döring, A., Jacob, E.: GD-KAT: Abgasnachbehandlungssysteme zur Verringerung von Partikel und NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Nutzfahrzeug-Dieselmotoren, Tagung "Motorische Verbrennung - aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze, Haus der Technik, Essen 2001.

## 1.5 Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten

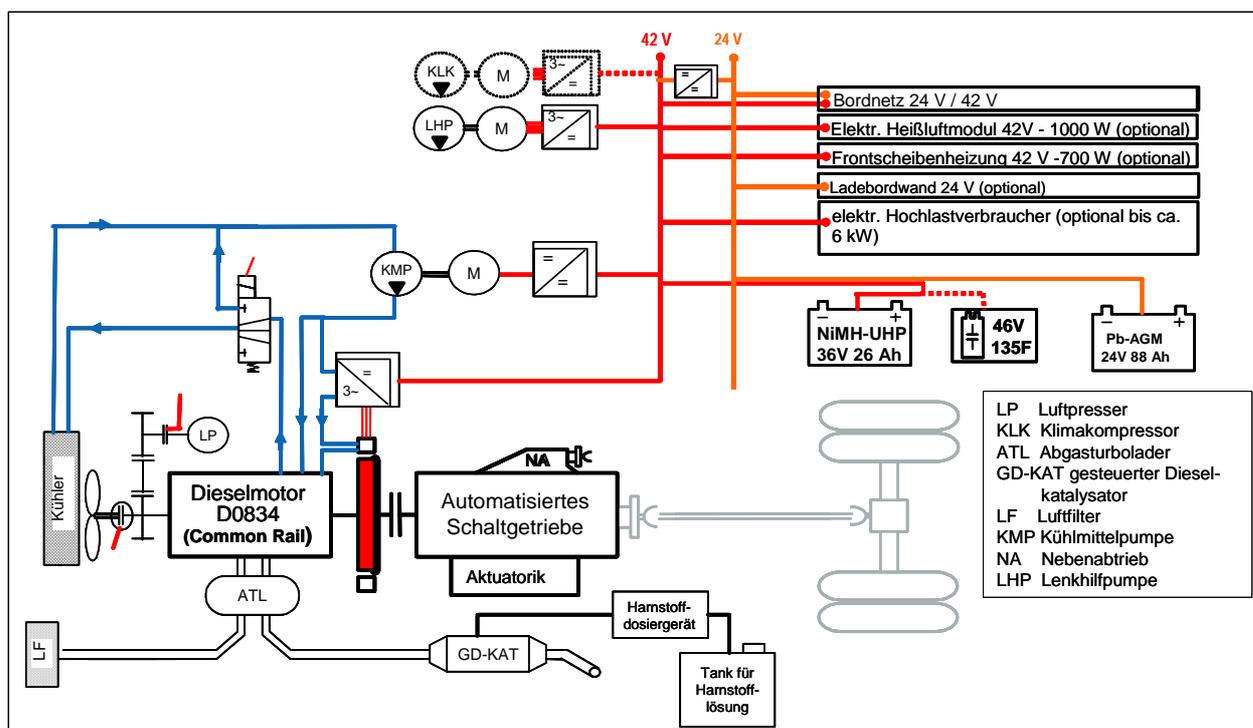
Die MAN Nutzfahrzeuge AG hat im Rahmen des Projekts die zentralen Entwicklungsarbeiten (v.a. Auslegung, Konstruktion, Regelungsentwicklung, Prototyp-Fahrzeugaufbau, Versuch) übernommen. Die einzelnen Teilkomponenten wurden von Zulieferfirmen in der Regel mit meist nur geringem Applikationsaufwand bezogen. Aufgrund der noch vielfachen Prototypstände der eingesetzten Komponenten war jedoch eine intensive Zusammenarbeit mit den jeweiligen Zulieferern notwendig.

Die zentralen Komponenten, das Starter-Generator-System sowie das Abgasnachbehandlungssystem erforderten einen höheren Applikationsaufwand. Während die Applikationsarbeiten für das Starter-Generator-System als F&E-Auftrag von der Fa. Continental ISAD in Zusammenarbeit mit MAN erbracht wurden, wurden die Applikationsarbeiten für das Abgasnachbehandlungssystem im Hause geleistet.

## 2 Ergebnisse

Die Arbeiten der Projektphase 2 konzentrierten sich auf die Schwerpunkte Systemauslegung, Aufbau, Untersuchung und Optimierung des Antriebssystems am Prüfstand, Aufbau und Inbetriebnahme des Prototypfahrzeugs sowie abschließend die Fahrzeugerprobung. Die daraus erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten aufgezeigt.

Ausgehend von den in der theoretischen Vorstudie durchgeführten Konzeptbewertungen wurde der in **Bild 2** dargestellte, ausgewählte Konzeptentwurf festgelegt und verfeinert. Der Dieselmotor wird dabei mit einem automatisierten Schaltgetriebe kombiniert und bildet unverändert die Hauptantriebseinheit.



**Bild 2:** Optimiertes Antriebsstrangkzept „OPTISTRANG“

Die Integration der E-Maschine als Starter/Generator erfolgt direkt zwischen Dieselmotor und Getriebe als sog. KSG-Lösung. Die E-Maschine wird in Add-On-Bauweise in ein axial verlängertes Schwungradgehäuse eingebaut. Die E-Maschine wird so ausgelegt, dass sie sowohl die Kalt- als auch Warm- bzw. Schnellstartanforderungen des Dieselmotors erfüllt sowie eine generatorische Leistung von 6 kW, kurzzeitig bis max. 12 kW bereitstellen kann. Der konventionelle Starter und die Lichtmaschine entfallen.

Die Anbindung der Nebenaggregate wurde anhand der durchgeführten energetischen Betrachtung wie folgt festgelegt. Der Antrieb des Luftpressers und des Kühlerlüfters erfolgt mechanisch über die Kurbelwelle. Die Optimierungsmaßnahmen bestehen aus einer elektrisch schaltbaren Kupplung zum Luftpresser zur Reduzierung der Verluste im Abblasbetrieb sowie einer elektrisch angesteuerten Viscokupplung zum Kühlerlüfter.

Der Antrieb der Lenkhilfpumpe erfolgt elektrisch entkoppelt und damit drehzahl- bzw. bedarfsregelbar über eine E-Maschine. Optional würde ein Klimakompressor ebenfalls elektrisch entkoppelt angetrieben werden.

Das Kühlungssystem besteht aus einem einzigen Kühlkreislauf für Dieselmotor, Starter/Generator sowie dessen Leistungselektronik. Die Einbindung von elektrisch ansteuerbarem 3/2-Wegeventil anstatt Thermostat-Ventil, elektrisch angesteuerter Viscokupplung und elektrisch angetriebener drehzahlregelbarer Kühlwasserpumpe mit der für die Regelung erforderlichen Temperatursensorik bietet die notwendigen Stellglieder für die Applizierung eines Wärmemanagements. Funktionell kann dadurch ein beschleunigtes Aufheizen des Kühlwassers sowie durch Vorsteuerung eine Reduzierung des Energiebedarfs für den Kühlerlüfter erreicht werden.

Abgasseitig wird zusätzlich ein GD-KAT-System integriert. Dieses Abgasnachbehandlungssystem ermöglicht eine verbrauchsoptimale, partikelminimierte Einstellung des Dieselmotors. Die Reduktion von Stickoxiden sowie die Oxidation der Kohlenstoffpartikel erfolgt im Abgasnachbehandlungssystem. Als Reduktionsmittel wird dazu eine Harnstoff-Wasserlösung in den Abgasstrom eingedüst. Das Katalysatorsystem besteht aus dem motornah verbauten Vorkatalysator, der Harnstoffeindüsung mit Harnstoffdosier-Steuergerät, dem Hydrolysekatalysator sowie nachgeschaltet der Reduktionskatalysator mit Ammoniak-Sperrkat-Beschichtung. Die Harnstoff-Bevorratung erfolgt über einen Zusatztank.

Das Bordnetz wird entsprechend den neuen Funktionsanforderungen modifiziert. Zur Versorgung der Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf wird die Bordnetzspannung auf 42 V angehoben. Als Übergangslösung wird in diesem Vorhaben aufgrund der derzeitigen Nichtverfügbarkeit der konventionellen Verbraucher und Elektronikkomponenten in 42 V-Ausführung das Bordnetz in Form eines Zweispannungsbordnetzes 24/42V ausgeführt. Wesentliche Komponenten sind die Einbindung des Starter/Generator über einen bidirektionalen Wechselrichter, die elektrischen Antriebe für die Lenkhilfpumpe und Kühlmittelpumpe sowie Steller für elektrischen Kühlwasser-Zuheizer und Heizkat. Optional

können z.B. ein elektrisches PTC-Heißluftmodul, die Frontscheibenheizung und über einen Hochsetzsteller ein Kühlaggregat elektrisch versorgt werden.

Der erhöhte elektrische Energieumsatz des/der Speicher/s aufgrund des Stopp-Start -Betriebs und der Rekuperation machen den Einsatz zyklusfester, leistungsfähiger elektrische Speicher notwendig. Die Größe und Kapazität der Speicher kann relativ gering gehalten werden, da die Anforderung eines rein elektrischen Fahrbetriebs nicht besteht. Drei geeignete Speicherkonzepte wurden dazu alternativ definiert, die sich bzgl. Zyklusfestigkeit, Leistungsfähigkeit aber auch Kosten deutlich unterscheiden. Während die Bleibatterie in AGM-Technologie eine gesteigerte Zyklusfestigkeit bei moderaten Mehrkosten bietet, erreicht eine deutlich teurere NiMH-Batterie die erforderliche Zyklusfestigkeit für eine Lebensdauer von 6 bis 10 Jahren bei besseren Wirkungsgraden. Der Einsatz von Doppelschichtkondensatoren als Kurzzeitspeicher für den Kaltstart des Dieselmotors ist in Kombination mit einer NiMH-Batterie ebenfalls vorgesehen.

## **2.1 Systemauslegung**

Auf Basis des o.g. Antriebsstrang-Konzepts wurden zu Beginn der zweiten Projektphase detaillierte Schnittstellen- und Komponentenspezifikationen durchgeführt.

### **2.1.1 Komponentenspezifikation und -auslegung**

#### **2.1.1.1 Auslegung des Starter-Generator-Systems**

Die Auslegung der E-Maschine erfolgte anhand der Anforderungen, die sich aus den Funktionen des OPTISTRANG-Konzepts ergeben. Zentrale Auslegungskriterien sind dabei das erforderliche Drehmoment zum Starten des Dieselmotors und die Generatordauerleistung.

Da diese beiden Anforderungen gegenläufig sind, gilt es bei einer optimierten Auslegung durch eine günstige Maschinengestaltung als auch durch eine sinnvolle Abstimmung der Zieleigenschaften ein Optimum zu finden.

Hinzu kommt, dass im Nutzfahrzeugsbereich die Anforderungen nach hohem Startmoment, passender Leistungs-/Drehzahlcharakteristik und gutem Wirkungsgradverhalten wesentlich schwieriger als im Pkw-Bereich zu erfüllen sind. Diese Auslegung wird zusätzlich dadurch erschwert, dass im generatorischen Betrieb zwar hohe Spitzenleistungen bis ca. 6...12 kW

gefordert werden, jedoch die durchschnittlichen Leistungen lediglich bei etwa 1 bis 1,5 kW, also im wirkungsgradungünstigen Teillastgebiet liegen.

### **Voruntersuchung zur Starter-Generator-Auslegung**

In der in Projektphase 1 durchgeführten Untersuchung in einer Klimakammer konnten maximal notwendige Drehmoment- und Leistungsanforderungen für einen sicheren Start des Dieselmotors bei verschiedenen Betriebstemperaturen insbesondere bei extremen Kaltstartbedingungen bestimmt werden. Diese Messwerte lieferten zusammen mit den Anforderungen zur generatorischen Leistungsfähigkeit die Eckdaten der E-Maschinenauslegung.

### **Auswahl des E-Maschinentyps**

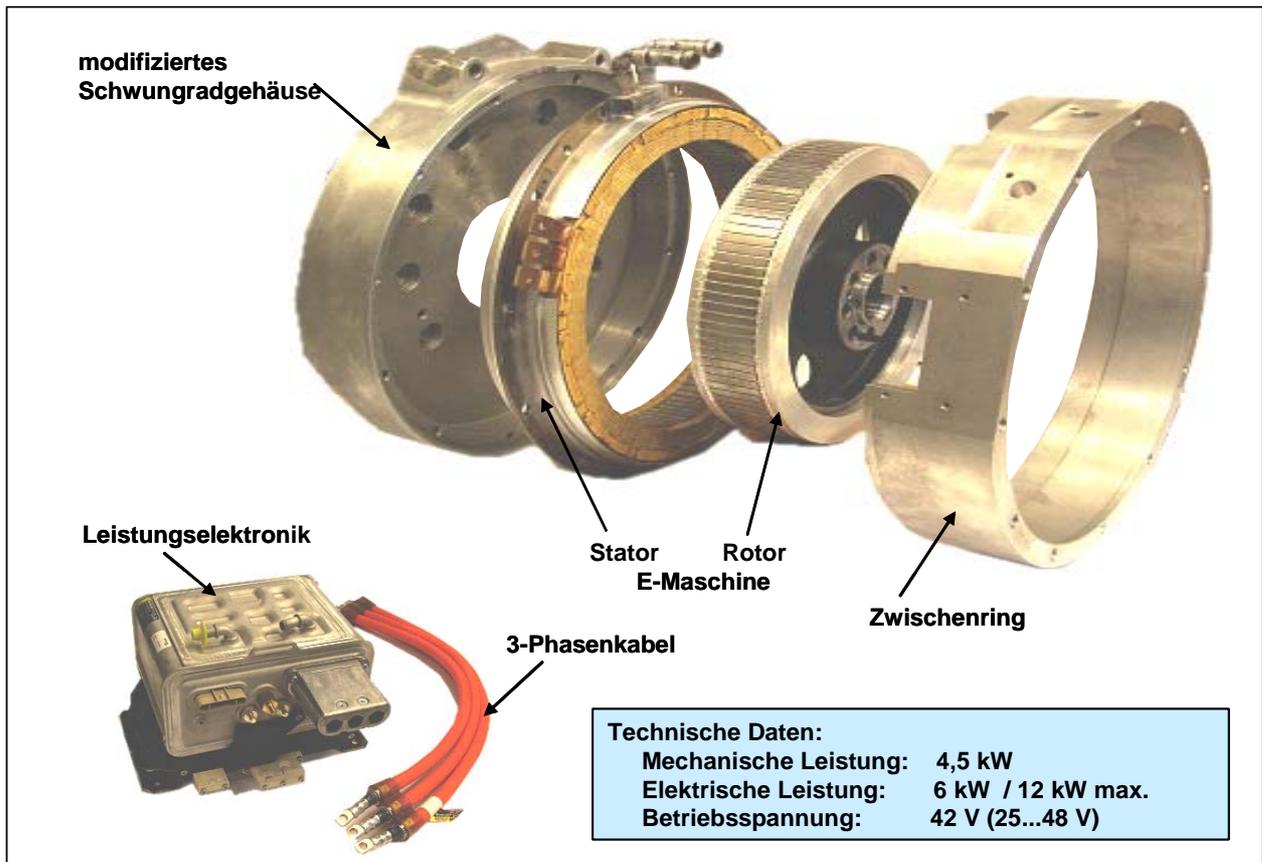
Grundsätzlich standen für diese Applikation die beiden E-Maschinen-Typen Asynchronmaschine und permanent-erregte Synchronmaschine zur Auswahl. Anhand der festgelegten Eckdaten der E-Maschine und unter Berücksichtigung der Integrationsverhältnisse wurden mit den Zulieferern Fa. Sachs und Fa. ISAD passende E-Maschinen ausgelegt.

Auf Basis dieser E-Maschinenentwürfe wurde eine Bewertung beider Technologien durchgeführt. Kriterien hierzu waren elektrische Startleistung, generatorische Dauerleistung, generatorischer Wirkungsgrad, Geometrie (z.B. axiale Länge, Luftspalt), Trägheitsmoment, Gewicht, Einbau, Montage, Wartung, Lebensdauer, Robustheit, Risikoanalyse sowie Eigenschaften der zugehörigen Leistungselektronik. Die Systemkosten wurden anhand erster Serienpreisinformationen verglichen.

Das Ergebnis der Bewertung zeigte, dass grundsätzlich beide Systeme mit ihren jeweiligen systembedingten Vor- und Nachteilen für diese Applikation geeignet sind. Abhängig von der prognostizierten mittleren Bordnetzleistung zeigt das Asynchronprinzip bei eher niedrigen Bordnetzleistungsbedarf (1-1,5 kW) Wirkungsgradvorteile über einen großen Drehzahlbereich, bei höheren Bordnetzleistungsbedarf (> 2,5 kW) kann die permanent erregte Synchronmaschine Wirkungsgradvorteile erzielen.

Da nach Einschätzung der MAN sich mittelfristig jedoch die durchschnittlichen Leistungen überwiegend im Bereich von etwa 1 bis 1,5 kW bewegen werden, wurde unter Einbeziehung auch der übrigen Systemeigenschaften die Asynchrontechnologie der Fa. ISAD für dieses Projekt ausgewählt.

In **Bild 3** ist das gemeinsam mit der Fa. ISAD konzipierte Starter-Generator-System abgebildet, bestehend aus wassergekühlten Stator, Aluminium-Rotor, modifiziertem Schwungradgehäuse, Zwischenring sowie der Leistungselektronik.



**Bild 3:** Konzipiertes Starter-Generator-System

### Systemfunktionen:

Die E-Maschine kann über den bidirektionalen 3-Phasen-Wechselrichter sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden.

Dazu stehen folgende Regelungsmodi zu Verfügung:

- Drehzahlregelung mit Drehmomentenbegrenzung (motorischer Betrieb)
- Drehmomentregelung (motorischer Betrieb)
- Spannungsregelung (generatorischer Betrieb)

Dadurch lassen sich folgende Systemfunktionen darstellen:

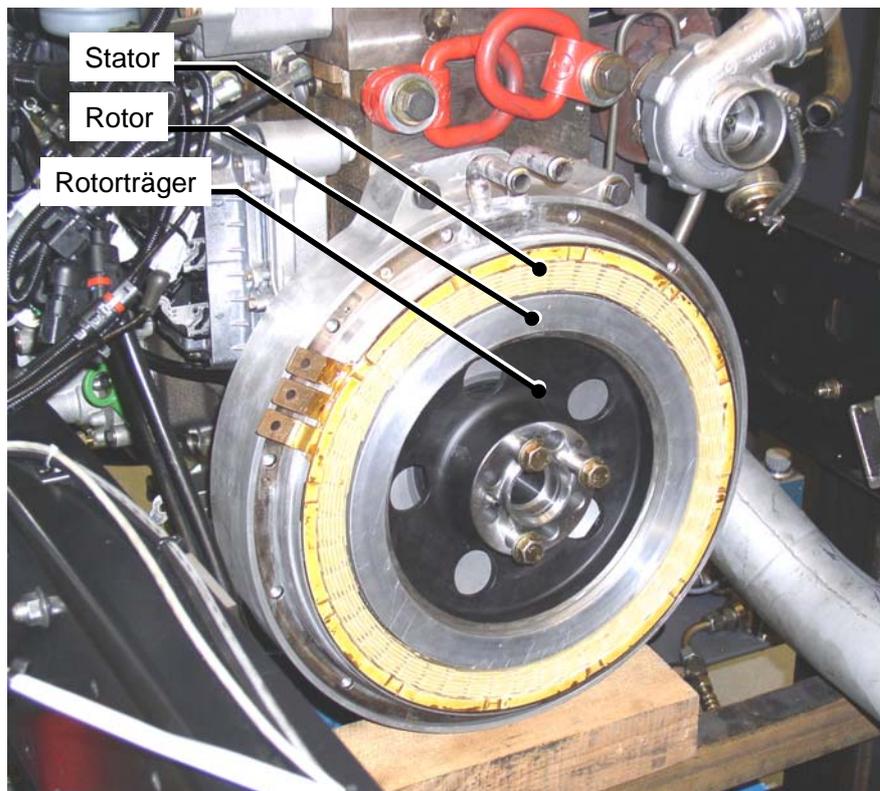
- Kalt- und Warm bzw. Schnellstart des Dieselmotors
- Generatorbetrieb mit variabler Ladespannung
- Rekuperation
- Abbremsen und definiertes Stoppen des Dieselmotors
- Hochlaufunterstützung / Boosten

Folgende weitere Funktionen sind möglich, wurden jedoch nicht umgesetzt:

- Leerlaufdrehzahl-Stabilisierung
- Aktive Drehschwingungsdämpfung in Resonanzdrehzahlbereichen

### Konstruktive Integration der E-Maschine

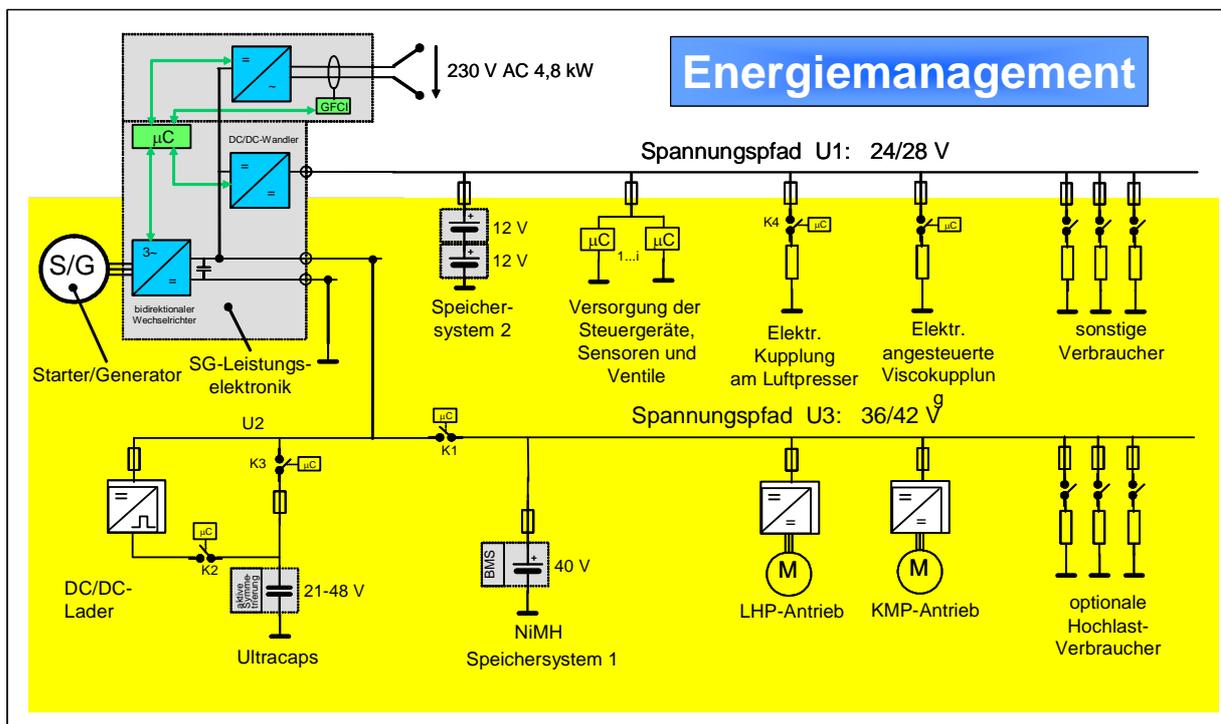
In Zusammenarbeit mit den Zulieferern wurde ebenfalls die konstruktive Integration der E-Maschine durchgeführt. Hierfür galt es sowohl die Anforderungen der konventionellen Antriebsstrangkomponenten als auch die der E-Maschine zu berücksichtigen. **Bild 4** zeigt die im modifizierten Schwungradgehäuse eingebaute E-Maschine.



**Bild 4:** Integration des Starter-Generator-Systems im Antriebsstrang

#### 2.1.1.2 Erweiterung der Bordnetzfunktionen

Eine geeignete Bordnetzstruktur wurde unter den Gesichtspunkten der erweiterten Funktionalität, höherer Leistungsanforderungen und nach energetischen Kriterien festgelegt. Schematisch ist diese Struktur im **Bild 5** dargestellt.



**Bild 5:** Realisierte Bordnetzstruktur für erweiterte Funktionalität

Die Bordnetzstruktur weist dabei insgesamt 3 Spannungsebenen auf. Das Starter-Generator-System als zentrales Bordnetzelement kann sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden. Die eingesetzten Energiespeicher können dabei je nach Betriebsart Energie aufnehmen oder abgeben.

Über die dazugehörige Leistungselektronik können die einzelnen Bordnetzäste versorgt werden (24 V über bidirektionalen DC/DC-Wandler, 42 V direkt am Gleichspannungsausgang des Wechselrichters, 230 V über einen Hochsetzsteller). Auch eine Versorgung der Bordnetzäste untereinander ist z.B. bei Motorstillstand möglich.

Die 24 V-Spannungsebene versorgt das konventionelle Bordnetz (Steuergeräte, Lampen, elektrische Standardverbraucher usw.). Zusätzlich werden die elektrisch betätigte Luftpresserkupplung und die Getriebeaktuatorik versorgt.

Die 42 V-Spannungsebene versorgt Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf wie die elektrische Lenkhilfpumpe und Hauptkühlmittelpumpe.

Optional besteht für den Fahrzeugnutzer die Möglichkeit 230V-Standard-Geräte bis zu einer Leistung von 4,8 kW im Fahrbetrieb (Onboard) oder im Standbetrieb (Off board) zu betreiben. Damit kann in den meisten Fällen auf ein Notstromaggregat verzichtet werden, was vor allem für Handwerker interessant ist.

Kaltstart und Schnellstart können sowohl über das Batterie-Speichersystem 1 als auch über das Ultracap-Pack erfolgen. Die Nachladung der Ultracaps wird dabei über einen spannungsführten Hochsetzsteller erreicht.

### 2.1.1.3 Auslegung der elektrischen Energiespeicher

Der erhöhte elektrische Energieumsatz des/der Speicher/s aufgrund des Stopp-Start-Betriebs und der Rekuperation machen den Einsatz zyklusfester, leistungsfähiger elektrischer Speicher notwendig.

Da ein rein elektrisches Fahren über die E-Maschine vorerst nicht vorgesehen ist, sind vom elektrischen Speicher nur kleine Energiemengen zwischenspeichern. Daher kann die Kapazität und damit auch das Gewicht der Speicher klein gehalten werden.



**Bild 6:** Eingesetzte Batteriesysteme

Das Speicherkonzept sieht für die 24 V-Seite eine verkleinerte Bleibatterie in AGM-Technologie und auf der 42 V-Seite eine Hochleistungs-NiMH-Batterie vor. Zusätzlich werden Doppelschichtkondensatoren als Kurzzeitspeicher für den Kalt- und Schnellstart des Dieselmotors in Kombination mit der NiMH-Batterie eingebaut, die optional aktiviert werden können (**Bild 6**).

#### 24V-Batterie

Als 24 V Pufferbatterie werden zwei Blei-AGM-Batterien der Fa. EXIDE mit folgenden Kenndaten eingesetzt:

**Kenndaten:**

Bezeichnung:	EXIDE MAXXIMA 900 Deep Cycle
Typ:	Blei-AGM (Absorbant Glass Matt), gewickelt / Orbital Technologie
U_Nenn:	12 V
Kapazität:	50 Ah
Gewicht:	17 kg

**Eigenschaften:**

- hohe Leistungsfähigkeit
- niedriger Innenwiderstand
- schnelle und hohe Stromaufnahmefähigkeit
- erhöhte Lebensdauer / Zyklusfestigkeit

**42 V-Batterie**

Als sog. 42 V Batterie wird eine NiMH-Prototyp-Batterie der Fa. Varta eingesetzt:

**Kenndaten:**

Bezeichnung:	Varta NiMH
Zellentyp:	NiMH, 1,25 V, 25 Ah
Zellenzahl:	32 Stck. in Serie
U_Nenn:	40 V
U_Betrieb:	21 ... 48 V
Energieinhalt:	1 kWh
Gewicht:	52 kg (inkl. Modulgehäuse und Batteriemangement)
Kühlung:	aktive Luftkühlung

**Eigenschaften:**

- hohe Leistungsfähigkeit
- niedrige Innenwiderstände
- Betrieb im weiten Ladezustandsfenster möglich
- extrem hohe Zyklusfestigkeit

**Ultracap-Speicher**

Das Ultracap-Speicher-Modul (Fa. EPCOS) besteht aus 18 in Reihe verschalteten 1200 F-Ultracap-Zellen.

Zur Zellspannungssymmetrierung besitzt jede Zelle eine aktive Spannungssymmetrierung.

**Modul-Kenndaten:**

U_nenn:	42 V
U_max:	48 V
I_max:	400 A
C_Modul:	67 F

**2.1.1.4 Modifizierung der Nebenaggregate**

Der Antrieb des Luftpressers erfolgt weiterhin mechanisch über die Kurbelwelle. Die Optimierungsmaßnahmen bestehen aus einer zusätzlichen elektrisch schaltbaren Kupplung sowie der dazugehörigen Ansteuerung (siehe **Bild 7**). Dadurch lassen sich durch Öffnen der Kupplung die Verluste im Abblasbetrieb reduzieren. In Abhängigkeit von Druckgrenzwerten und dem Status der Luftaufbereitung wird die Kupplung angesteuert. Ebenso vorteilhaft ist die Öffnung der Kupplung bei Kalt- und Schnellstart des Dieselmotors, um hier das notwendige Drehmoment zu reduzieren und damit auch die Startzeiten zu verkürzen.

Der Antrieb der Lenkhilfpumpe erfolgt abweichend vom konventionellen System elektrisch und damit drehzahl- bzw. bedarfsregelbar über eine E-Maschine. Das verwendete Kompaktaggregat als autarke Einheit beinhaltet die Hydraulikpumpeneinheit, bürstenloser EC-Motor, Leistungselektronik und Lenkölbehälter. Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade kann unabhängig von der Dieselmotordrehzahl ein gewünschter Volumenstrom ohne Abregelverluste eingestellt werden. Dieser Volumenstrom wird über eine geeignete Ansteuerung in Abhängigkeit vom der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem Fahrzustand und der Fahrer-Lenkbewegung, die über einen Lenkwinkelsensor erfasst wird, kennfeldgeregelt.

### Luftpresser mit elektrisch ansteuerbarer Kupplung:

- Kupplungszustand = f (Druckgrenzwerte, ECAM-Status)
- Öffnen der Kupplung bei Kalt- und Schnellstart



### Elektrisch angetriebene Lenkhilfpumpe:

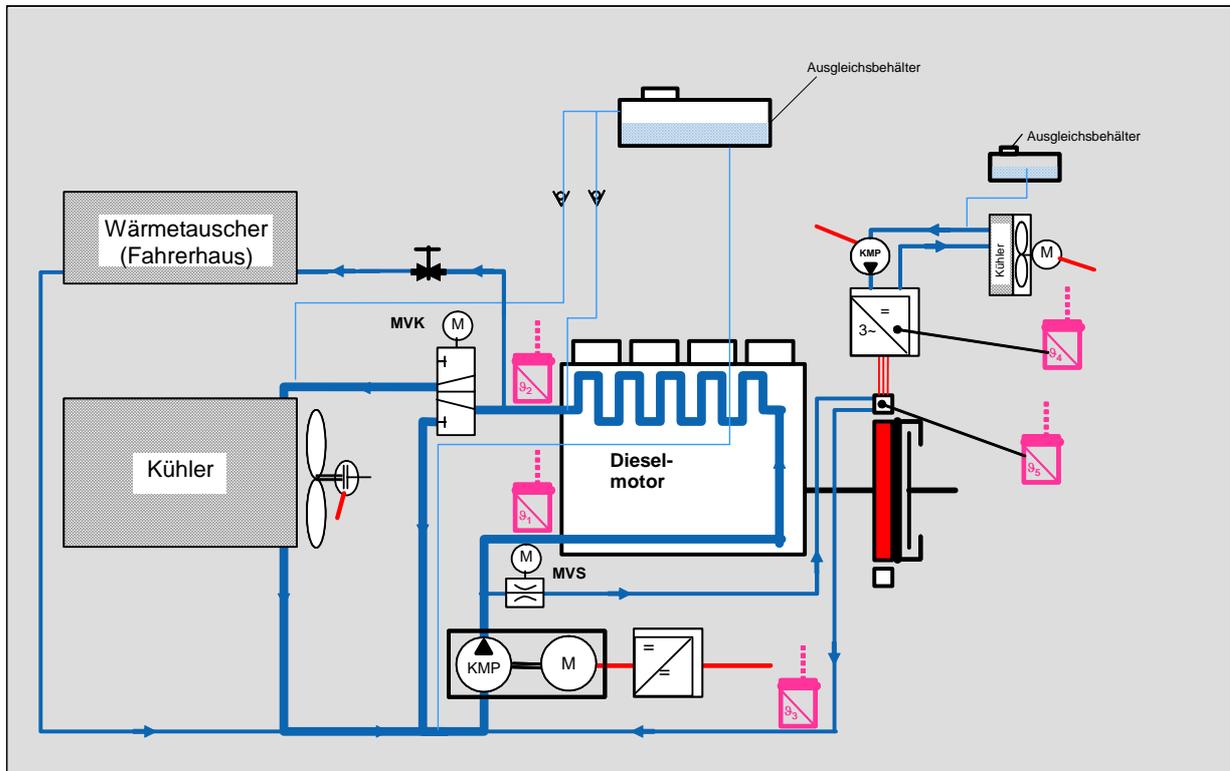
- Konstanter Volumenstrom unabhängig von Dieselmotordrehzahl
- Erfassung der Lenkbewegung über Lenkwinkelsensor
- Volumenstrom = f (Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkbewegung)
- Abschalten im Stillstand



**Bild 7:** Optimierungsmaßnahmen an Luftpresser und Lenkhilfpumpe

#### 2.1.1.5 Modifizierung des Kühlungssystems

Das modifizierte Kühlungssystem (siehe **Bild 8**) besteht aus einem erweiterten Kühlkreislauf für Dieselmotor und Starter-Generator-System. Lediglich die Kühlung der SG-Leistungselektronik musste im verwendeten Musterstand separat auf einem niedrigeren Temperaturniveau gekühlt werden. Der angestrebte Serienmusterstand könnte jedoch auch über den Dieselmotor-Kühlkreislauf mitgekühlt werden.



**Bild 8:** Optimiertes Kühlungskonzept

Die konventionelle, im Motorblock integrierte Kühlmittelpumpe wurde durch eine elektrisch betriebene Kühlwasserpumpe ersetzt (siehe **Bild 9**). Die dafür eingesetzte Prototypkomponente besteht aus Pumpeneinheit, EC-Motor und Leistungselektronik. Der gewünschte Volumenstrom kann über eine Drehzahlregelung vorgegeben werden.

Der Antrieb des Kühlerlüfters verbleibt mechanisch, jedoch wird die zugehörige Viscokupplung nicht mehr über eine Bimetallfeder, sondern über ein elektrisch ansteuerbares Stellglied angesteuert.

Ebenso wird anstatt den bekannten Thermostatventilen ein elektrisch betätigtes Mischventil eingesetzt.

### Kühlsystem:

- Elektrische Kühlwasserpumpe mit regelbarem Volumenstrom
- Elektrisch angesteuerte Viscokupplung
- Elektrisch betätigtes Mischventil anstatt Thermostatventile
- Kühlung SG-System über Dieselmotor-Kühlkreislauf
- Regelung SG-Volumenstrom über elektrisches Drosselventil
- Erweiterung der Temperatursensorik
- Implementierung eines Wärmemanagements



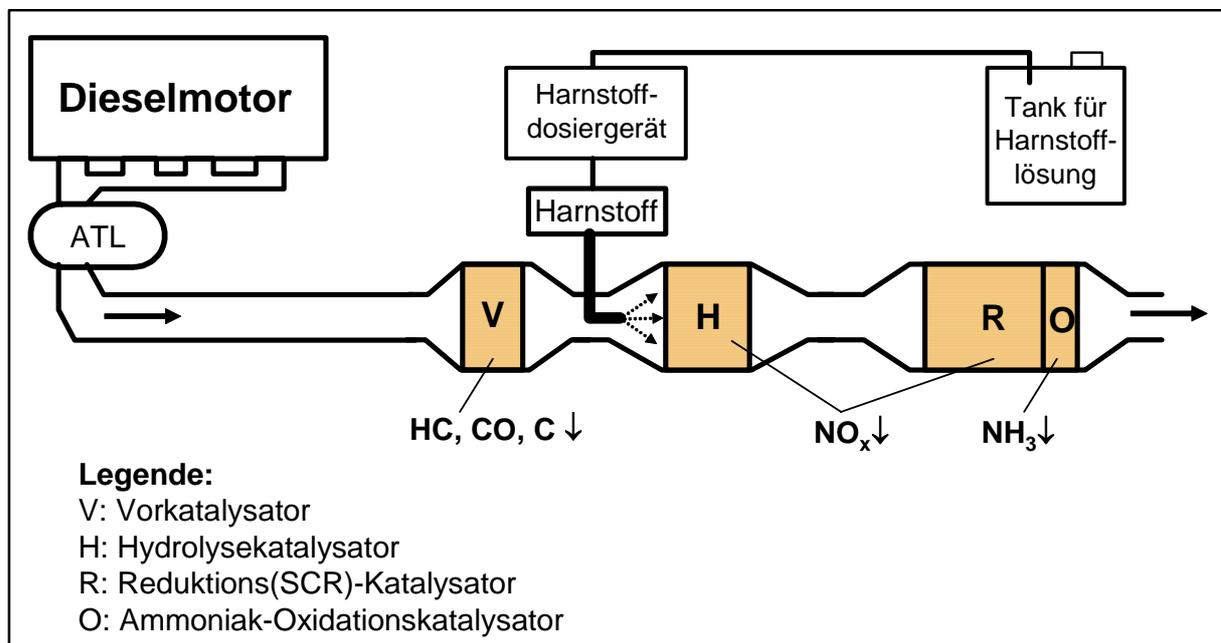
**Bild 9:** Optimierungsmaßnahmen am Kühlsystem

Das implementierte Wärmemanagement selbst kann durch die zusätzliche Sensorik und Aktuatorik den Kühlwasservolumenstrom bedarfsgerecht einstellen sowie konstantere Kühlwassertemperaturen einregeln, was den Energiebedarf für das Kühlsystem reduziert. Ebenso kann bei Kaltstart durch Absenken des Kühlwasservolumenstroms eine schnellere Motoraufwärmung dargestellt werden.

#### 2.1.1.6 Konfiguration des Dieselmotors und Auslegung des Abgas-Systems

Der Dieselmotor bildet unverändert die Hauptantriebseinheit. Ausgehend vom EURO3-Serienmotor wurde in der MAN-Motorenentwicklung in Nürnberg ein auf das GD-KAT-Abgasnachbehandlungssystem abgestimmter Motor konfiguriert. So wurde der Dieselmotor verbrauchoptimal und partikelminimiert bei erhöhten Stickoxidraten eingestellt. Dazu wurde die Abgrasrückführung deaktiviert, der Turbolader auf die geänderten Abgasmassenströme abgestimmt sowie das CR-Einspritzsystem, die Einspritzkennfelder und EDC-Parametrierungen adaptiert. Aufgrund der modifizierten Nebenaggregate-Anbindung entfällt der gesamte Riementrieb am Motor-Front-End.

Abgasseitig wird zusätzlich ein GD-Kat-System integriert, dessen Aufgabe es ist, die erhöhten Stickoxid-Raten zu reduzieren (>80%) sowie die Kohlenstoffpartikel (>50%) zu oxidieren.



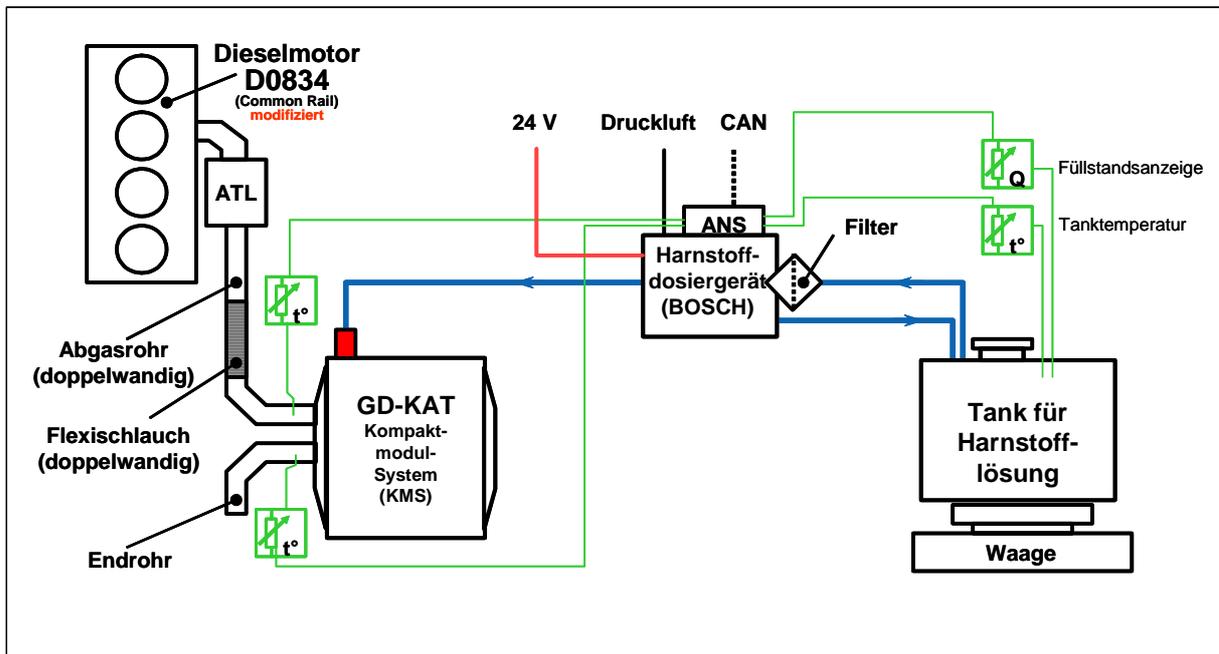
**Bild 10:** Aufbau des „Gesteuerten Diesel-Katalysators“ (GD-KAT)

Der funktionelle Aufbau des von MAN entwickelten „Gesteuerten Diesel-Katalysators“ (kurz: GD-KAT<sup>®</sup>) ist in **Bild 10** dargestellt. Das VHRO-Kat-System des GD-KAT besteht aus Vor-, Hydrolyse-, Reduktions- und Ammoniak-Oxidationskatalysator. Vor dem Hydrolysekatalysator wird eine 32,5%-Harnstofflösung (sog. AdBlue<sup>®</sup>) als Reduktionsmittel über ein Dosiergerät eingedüst. Der Harnstoffverbrauch beträgt ca. 4...7 % des Kraftstoffverbrauchs. Die Harnstoff-Bevorratung erfolgt in einem Zusatztank.

Um die Entstehung von Schwefelsäure zu vermeiden, ist der Einsatz von schwefelfreiem Dieselmotoröl (S < 10 ppm) sowie schwefelarmem Motoröl (S < 0,053 %) unabdingbar.

Zusätzlich wurden Maßnahmen zur thermischen Isolierung der Abgasführung sowie zur Anhebung des Temperaturniveaus durch die implementierte Stopp-Start-Automatik ergriffen.

In **Bild 11** ist der Prüfstandsaufbau des GD-KAT-Systems und der Harnstoffversorgung schematisch dargestellt.



**Bild 11:** GD-Kat-System und Harnstoffversorgung

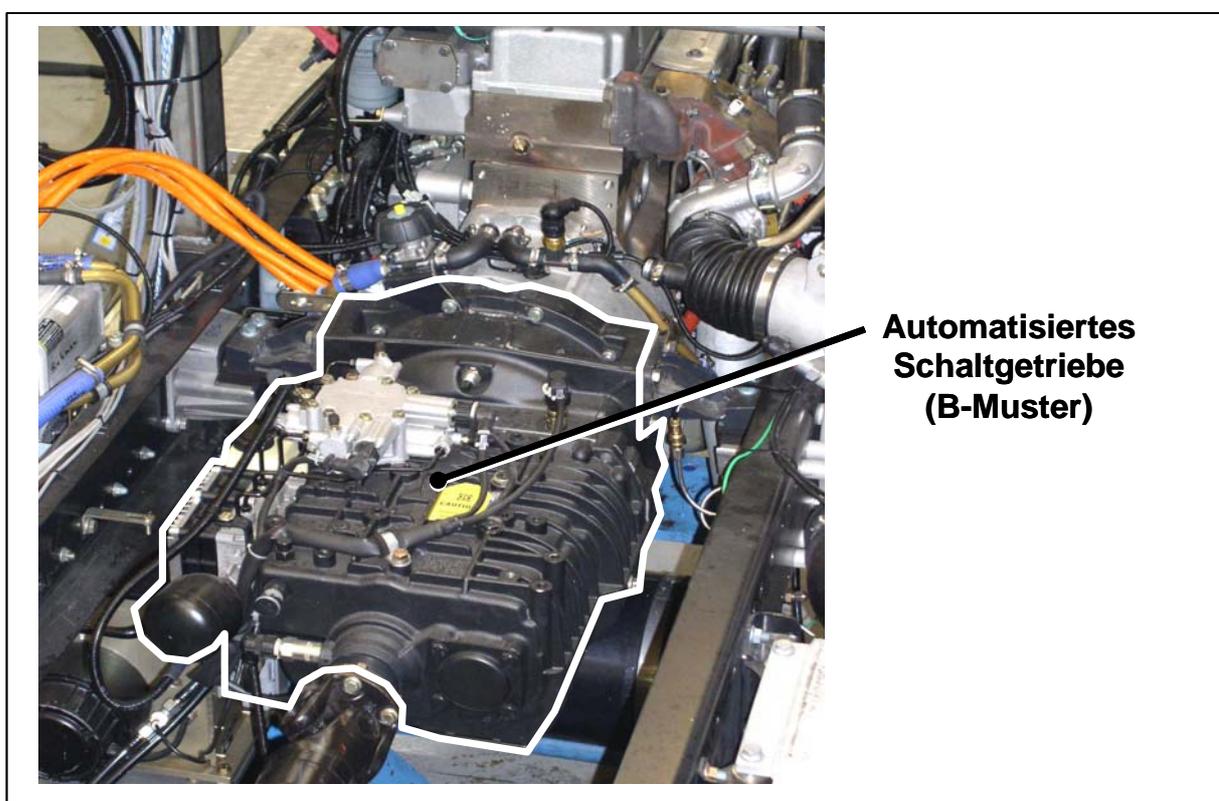
Das GD-KAT-System wurde zu Projektstart bei MAN für den Fernverkehr entwickelt. Für diese speziellen Einsatzbedingungen und der schweren Motorenbaureihe D28 lagen bereits erste Prüfstandserfahrungen vor. Auf dieser Basis musste das System für die kleinere Motorenbaureihe D08 und die Randbedingungen des Verteilerfahrzeugs adaptiert werden. Im ersten Konzeptentwurf war daher ein verteiltes Katalysator-System mit möglichst motornah verbautem Vorkatalysator angedacht, um hohe Konvertierungsraten zu gewährleisten. Erste Versuchsmuster wurden daraufhin am Motorenprüfstand untersucht. Eingehende Einbauuntersuchungen für die Fahrzeugintegration zeigten jedoch, dass das notwendige Vorkatalysatorvolumen motornah nicht dargestellt werden konnte. Daraufhin wurde ein Kompaktmodulsystem entwickelt, das alle vier Katalysatorstufen im Hauptschalldämpfergehäuse beinhaltet. Um die Abgastemperaturverluste bis zum Hydrolysekatalysator zu minimieren, wurden doppelwandige Abgasrohre zwischen Turbolader und Kompaktmodulsystem verwendet.

### 2.1.1.7 Automatisiertes Schaltgetriebe

Das bisherige Schaltgetriebe wurde durch ein automatisiertes Schaltgetriebe ersetzt. Dadurch können unter Beibehaltung des guten Wirkungsgradverhaltens die zur Implementierung der

Stopp-Start-Automatik notwendigen Funktionen dargestellt werden. Zusätzlich kann durch eine optimierte Schaltstrategie eine Verbrauchsreduktion erreicht werden.

Als automatisiertes Getriebe wurde ein zusätzlich angefertigter Prototyp (**Bild 12**) aus einem parallel laufenden MAN-Serienprojekt zur Entwicklung eines automatisierten Schaltgetriebes verwendet. Während die Schaltabfolge, Schaltqualität und Schaltstrategie Themen des Serienprojekts waren, wurden im Rahmen des OPTISTRANG-Projekts die spezifischen Getriebefunktionen zur Darstellung der Stopp-Start-Automatik definiert, entwickelt und getestet.



**Bild 12:** Automatisiertes Schaltgetriebe

#### 2.1.1.8 Bilanzierung der Gewichte und Trägheitsmassen

Die einzelnen Optimierungsmaßnahmen bedingen den Einbau zusätzlicher Komponenten, die Modifikation und z.T. Entfall bestehender Komponenten. Dies wirkt sich sowohl auf das Fahrzeugleergewicht und die Trägheitsmassen im Antriebsstrang als auch dadurch bedingt auf den Kraftstoffverbrauch aus. Der Einfluss des Mehrgewichts auf den Kraftstoffverbrauch wird über eine separate Messreihe mit Gewichtsvariation bestimmt.

### Bilanzierung der Gewichte

Zur Bilanzierung der Gewichtsverhältnisse wurden die konventionellen und modifizierten Einzelkomponenten gewogen. Fasst man diese Einzelkomponenten nach Baugruppen zusammen, ergeben sich die in **Tabelle 2** dargestellten Gewichte:

Baugruppe	Referenzfahrzeug	Optistrang	Differenz
Getriebe	110 kg	120 kg	+ 10 kg
Lenkhilfpumpe	3 kg	5 kg	+ 2 kg
Luftpresserkuppl.		9 kg	+ 9 kg
Starter-Generator u. Kupplung	74 kg	125 kg	+ 51 kg
Kühlungssystem	17 kg	33 kg	+ 16 kg
Energiespeicher	66 kg	177 kg	+ 111 kg
Bordnetz (zusätzl. Komponenten)		23 kg	+ 23 kg
Abgas-System	39 kg	96 kg	+ 57 kg
<b>Summe</b>	<b>309 kg</b>	<b>588 kg</b>	<b>+279 kg</b>

**Tabelle 2:** Bilanzierung der Gewichte

Das Mehrgewicht gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang beträgt ca. 280 kg. Da es sich hier vielfach um nicht gewichtsoptimierte Prototypkomponenten handelt, scheint eine Reduzierung des Mehrgewichts auf ca. 150 bis 200 kg jedoch erreichbar.

### Bilanzierung der Trägheitsmassen

Die Veränderung der Trägheitsmassenverhältnisse im Antriebsstrang wird im Wesentlichen durch die Integration des Starter-Generators verursacht. Eine Erhöhung des rotatorischen Trägheitsmoments wirkt sich negativ auf das Verbrauchsverhalten und die Schaltbarkeit des Getriebes aus. Um daher den Effekt zu kompensieren, wurden die Schwungrad- und Kupplungsträgheitsmassen reduziert. Diese Reduzierung war möglich, da die konventionelle Auslegung der Schwungrad- und Kupplungsgeometrie im Wesentlichen nach den drei Gesichtspunkten Festigkeit (z.B. Tellern), Wärmekapazität und Motorrundlauf erfolgt. Durch die Verwendung des automatisierten Getriebes kann eine Fehlbedienung der Kupplung steuerungstechnisch unterbunden und die Wärmekapazität deutlich reduziert werden. Ebenso sitzt der E-Maschinen-Rotor auf der Kurbelwelle, so dass das für den Motorrundlauf erforderliche Massenträgheitsmoment nicht mehr alleine vom Schwungrad vorgehalten werden muss.

Da der Starter-Generator den Dieselmotor direkt startet, kann der Anlasser-Zahnkranz ebenfalls entfallen.

Die sich ergebenden Massenträgheitsmomente sind in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Massenträgheitsmoment	Referenzfahrzeug	Optistrang	Differenz
<b>Summe*</b>	1,12 kgm <sup>2</sup>	0,90 kgm <sup>2</sup>	-0,22 kgm <sup>2</sup>

\*Massenträgheitsmomente jeweils ohne Dieselmotor, Kupplungsbelagscheibe und Getriebe, da identisch

**Tabelle 3:** Bilanzierung der rotatorischen Trägheitsmassen

Durch diese Gegenkompensation konnte für das modifizierte System sogar ein geringfügig niedrigeres Massenträgheitsmoment erzielt werden. Für eine Serienlösung müsste jedoch noch eine genauere Bauteilauslegung erfolgen.

### 2.1.2 Entwicklung einer geeigneten Fahrsteuerung

Das OPTISTRANG-Konzept sieht vor, ausgehend vom konventionellen Antriebsstrang durch Erweiterungen der Antriebsstrangkomponenten sowie Erhöhung der Funktionalitäten und Freiheitsgraden einen optimierten Betrieb darzustellen.

Der Fahrer ist jedoch nicht mehr in der Lage, den komplexen Antriebsstrang optimal zu betreiben. Die Konsequenz daraus führt zwangsläufig zu einer Automatisierung des Antriebsstrangs, die gleichzeitig auch zu einer Entlastung des Fahrers genutzt werden kann.

Für die Steuerung eines Antriebsstrangs mit seinen wesentlichen Teilsystemen Bordnetz, Kühlsystem und Nebenaggregate ist die Entwicklung einer geeigneten Fahrsteuerung mit implementiertem Energie- und Wärmemanagement erforderlich.

Kernstück der Fahrsteuerung ist die Flussdiagramm-Steuerung. In ihr sind die Fahrzustandserkennung sowie sämtliche übergeordnete Management-Funktionen abgelegt. Die daraus bestimmten Ausgangsgrößen dienen als Vorgabe für die unterlagerten Steuerungen. Im Einzelnen sind dies die folgenden Steuerungen:

- ASG-Steuerung
- Stopp-Start-Automatik
- Dieselmotorsteuerung (inkl. Leerlaufregelung)
- Steuerung der Nebenaggregate
- Steuerung Bordnetz und elektrische Speicher

Die Flussdiagramm-Steuerung ermittelt in der hierarchisch obersten Ebene aus dem Fahrerwunsch (Pedalwerten über die Pedalskalierung, Fahrerbedienelemente) und dem

aktuellen Fahrzeugzustand den Soll-Fahrzustand. Dabei werden folgende Fahrzustände unterschieden:

- Stillstand
- Segeln/Rollen
- Bremsbetrieb
- Anfahren/Fahrbetrieb/Boostern

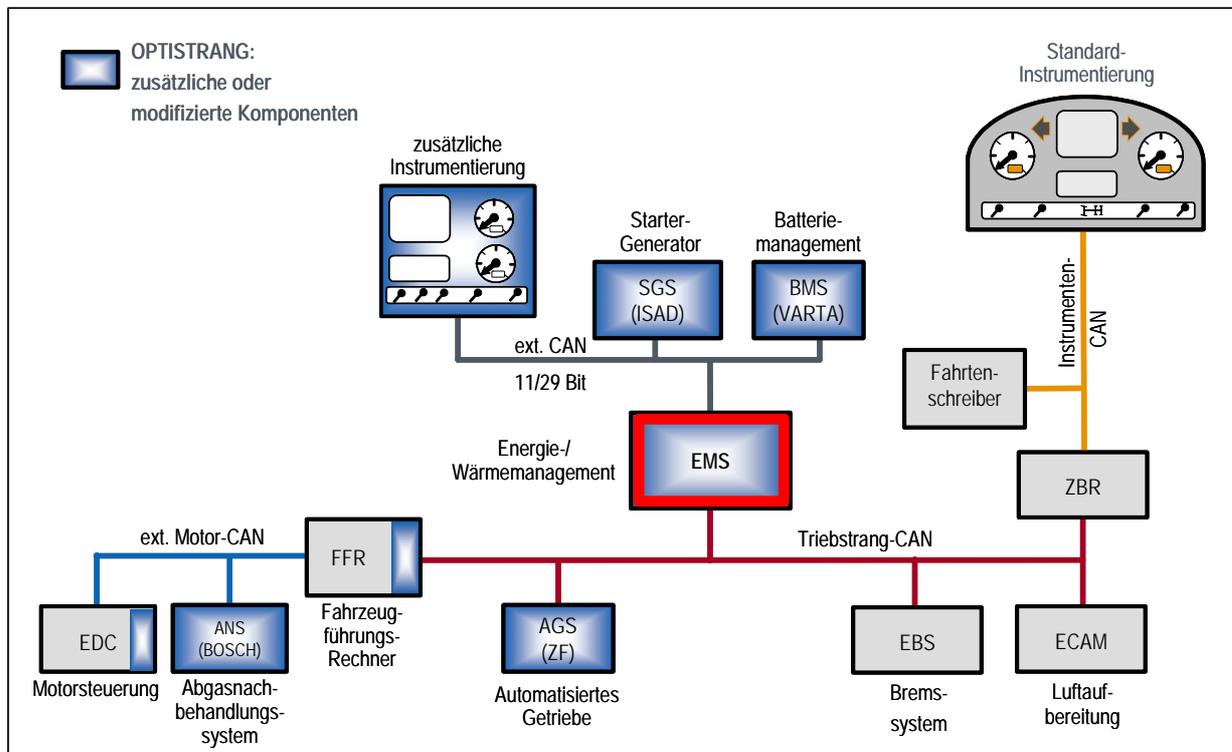
In den zugeordneten, unterlagerten Routinen werden für die jeweiligen Fahrzustände die Fahrzeugzustandsgrößen überwacht und die entsprechenden Steuergrößen belegt.

### 2.1.2.1 Integration der Fahrsteuerung

Die Integration der neuen Funktionalitäten sollte auf Basis der heute serienmäßig im MAN-Lkw verwendeten Steuergeräte-Struktur erfolgen. Diese Struktur stellt eine dezentrale, modular aufgebaute Steuerung dar, deren einzelne Steuergeräte funktionell bestimmten Komponenten zugeordnet und über drei separate CAN-Bus-Systeme (Motor-, Triebstrang- und Instrumenten-CAN) mit einander verbunden sind. Hierarchisch priorisiert koordiniert der Fahrzeugführungsrechner (FFR), angeordnet zwischen Motor- und Triebstrang-CAN, übergeordnete fahrzeugspezifische Steueraufgaben. Die Dieselmotorsteuerung (EDC) ist über den Motor-CAN und die Steuergeräte für Karosserielektronik (ZBR), Bremssystem (EBS), und Luftaufbereitung (ECAM) über den Triebstrang-CAN mit dem FFR verknüpft. Die Instrumentierung sowie der Fahrtenschreiber sind über den Instrumenten-CAN mit der ZBR verbunden.

Die OPTISTRANG-Fahrsteuerung (siehe **Bild 13**) erfordert durch die zusätzlichen Antriebsstrangkomponenten und Management-Aufgaben eine Erweiterung des bestehenden Steuergeräte-Verbunds. Als neue Komponentensteuergeräte werden Steuergeräte für die Harnstoffdosierung des GD-KAT-Systems (ANS), für die Ansteuerung des Starter/Generators (SGS) und für die Ansteuerung des automatisierten Getriebes (ASG) appliziert. Für die Übernahme der Managementfunktionen werden das Energie- und Wärmemanagementmodul (EMS) und das Batteriemanagement (BMS) integriert. Zur Verfügungsstellung der notwendigen Daten aus Motor- und Triebstrang-CAN wurden ebenfalls Software-Änderungen am FFR sowie zur Optimierung des Dieselmotor-Schnellstart-Verhaltens Modifikationen an der EDC durchgeführt. Im EMS wurden übergeordnet Betriebsstrategie und Antriebsstrangmanagement abgelegt. Zudem mussten, da Steuergeräte von Zulieferern (SGS, BMS und AGS) eingesetzt werden, auch eine CAN-Abstimmung extern mit den Lieferanten des Starter-Generator-Systems sowie dem automatisiertem Schaltgetriebe geführt werden.

Der Fahrer wird über eine zusätzliche Instrumentierung über wichtige System- und Komponentenzustände informiert (siehe Abschnitt 2.3)



**Bild 13:** Integration in den Fahrzeugsteuerungsverbund

### 2.1.2.2 Energiemanagement

Das entsprechend Bild 5 ausgeführte Bordnetz weist aufgrund mehrerer Speicher neue Freiheitsgrade im Betrieb auf. Aus Gründen eines energetisch optimierten Betriebs und zum Schutz der Komponenten ist daher ein steuernder Eingriff in das Bordnetz notwendig. Dies wird über ein Energiemanagement koordiniert.

Die wesentlichen Funktionen des Energiemanagements sind wie folgt:

- Überwachung der Zustände der einzelnen Energiespeicher (State of charge, kurz SOC, Lade- und Entlade-Strombegrenzungen) in Verbindung mit einem unterlagerten Batteriemanagementsystem (BMS)
- Ansteuerung der Spannungen zur geeigneten Ladung der Speicher (24 V- und 42 V-Ast)
- Ansteuerung der erforderlichen Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fahrzustand
- Kontrolle von Spitzen- und Dauerlastanforderungen

- Überwachung der einzelnen Verbraucher zur Detektion von Ausfällen und Fehlfunktionen sowie Schutz des Bordnetzes vor Überlastung
- Zu- und Abschaltung bzw. Reduzierung der Aufnahmeleistung einzelner Verbraucher. Die Abschaltung erfolgt nach vorgegebenen Kriterien unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter und nicht sicherheitsrelevanter Komponenten.
- Darstellung eines energetisch optimierten Betriebs durch optimierte Nutzung der Energiespeicher entsprechend ihren spezifischen Eigenschaften sowie Reduzierung der Umwandlungsverluste durch intelligente Ansteuerung von Energiequellen und -senken.

### 2.1.2.3 Wärmemanagement

Das Wärmemanagement selbst kann durch die zusätzliche Sensorik und Aktuatorik (siehe auch Bilder 8 und 9) den Kühlwasservolumenstrom sowie die Lüfterdrehzahl in weiten Grenzen bedarfsgerecht einstellen, konstantere Kühlwassertemperaturen einregeln und bei Kaltstart eine schnellere Motoraufwärmung darstellen. Diese Wärmemanagement-Funktionen sind ebenfalls im EMS-Steuergerät implementiert.

## 2.2 Untersuchung des Antriebssystems am Prüfstand

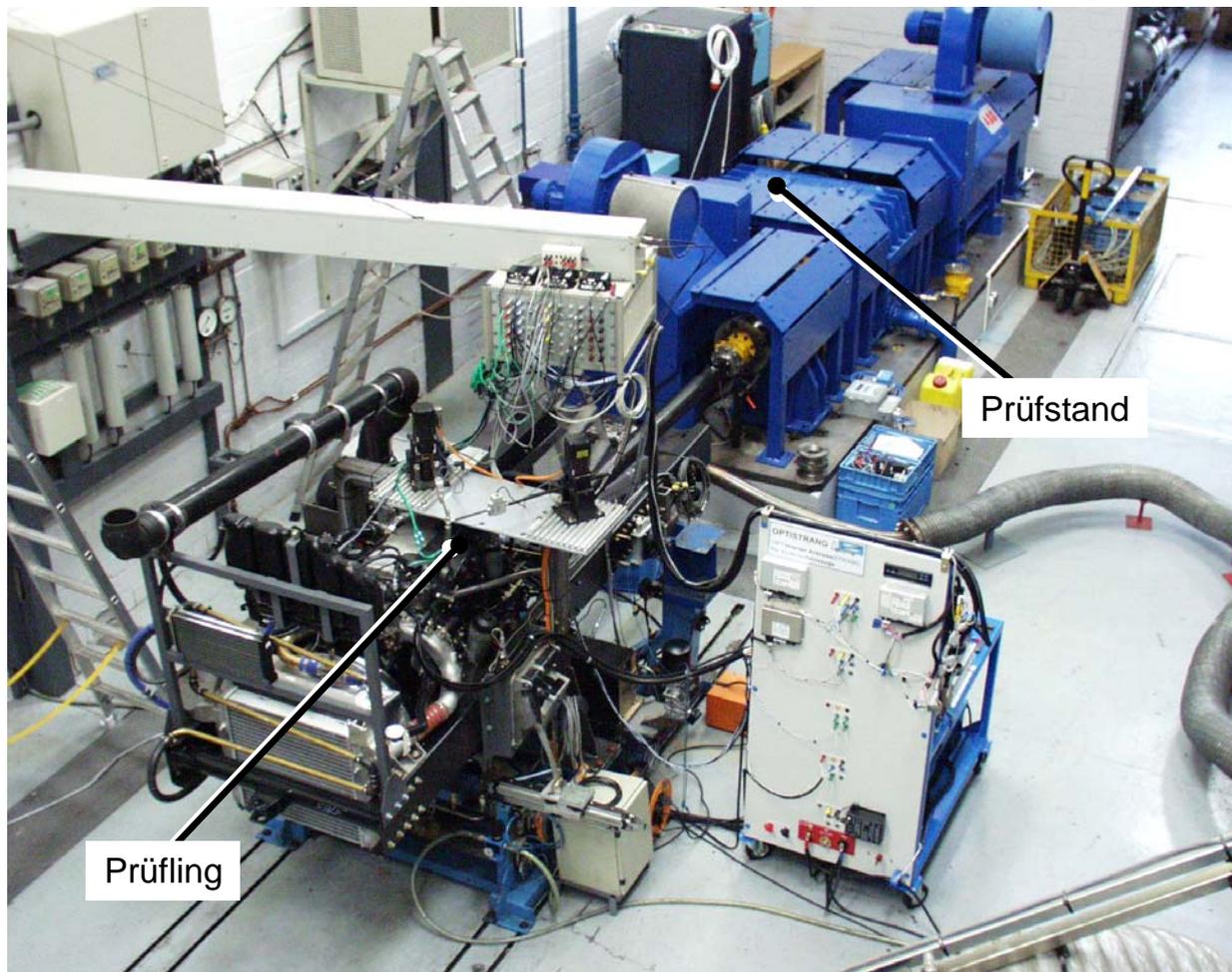
Zum messtechnischen Nachweis der Auswirkungen einzelner Optimierungsmaßnahmen war es zwingend erforderlich, genaue Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen durchführen zu können. Daher wurde der gesamte Antriebsstrang, ausgehend vom Referenzzustand (konventioneller Antriebsstrang) an einem Antriebsstrang-Prüfstand aufgebaut, schrittweise umgebaut und jeweils vermessen.

Da der Energieverbrauch der Nebenaggregate im realen Fahrbetrieb einen erheblichen Anteil hat und somit den Kraftstoffverbrauch stark beeinflusst, mussten analog zu den Simulationsrechnungen auch hier neben der Vorgaben der Fahrprofile für den Getriebeabtrieb die einzelnen Nebenaggregate definierten Belastungen unterzogen werden, um deren Energieverbrauchseinflüsse analysieren zu können.

### 2.2.1 Beschreibung des Prüfstands

Sämtliche Messungen wurden an einem Antriebsstrangprüfstand durchgeführt, an dem mit Ausnahme der Hinterachse der komplette Antriebsstrang des Verteiler-Lkw fahrzeugtauglich aufgebaut ist (vgl. **Bild 14**) und unter Vorgabe realistischer Fahrprofile vermessen werden kann. Die Gelenkwelle ist mit dem Prüfstandsaggregat verbunden, wodurch alle im realen

Fahrbetrieb auftretenden Fahrwiderstände unter Berücksichtigung der fahrzeug- und betriebsspezifischen Daten simuliert werden können.



**Bild 14:** Antriebsstrang-Prüfstand

Der Antriebsprüfstand selbst besteht aus zwei Asynchron-Drehstrommaschinen mit Anpassgetriebe und Bremsseinheit und bildet über diese das Abtriebsmoments in Abhängigkeit zum aktuellen Fahrzustand durch Motor- bzw. Generatorbetrieb ab. Ein digitaler Simulationsrechner übernimmt die Regelung der Prüfstandsaggregate. Die Steuerung und Überwachung des gesamten Versuchsablaufs findet in der Prüfstandswarte statt.

Da die Umgebungsbedingungen der Prüfstandshalle nahezu konstant gehalten werden können, kann eine relativ gute Reproduzierbarkeit der Versuche gewährleistet werden.



### 2.2.2 Fahrzeug-Basis

Die Fahrzeug-Basis des typischen Verteiler-Lkw ist der Pritschenwagen mit 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht (MAN TGL). Als typische Motorisierung wird in diesem Segment überwiegend ein 4-Zylinder-Dieselmotor der kleinen D08-Motorenbaureihe mit einer Leistung zwischen 150 und 180 PS eingebaut.

Abhängig von der zu erfüllenden Transportaufgabe werden die Aufbauten als Planen- oder Kofferaufbau ausgeführt. Der Anteil der Kühl- und Tiefkühl-Aufbauten für Frischdienst-Aufgaben beträgt etwa 2 ... 3 %.

### 2.2.3 Daten des Referenzfahrzeugs

Für die Untersuchungen wurden die in **Tabelle 4** aufgeführten technischen Daten für den 7,5 t Verteiler-Lkw festgelegt.

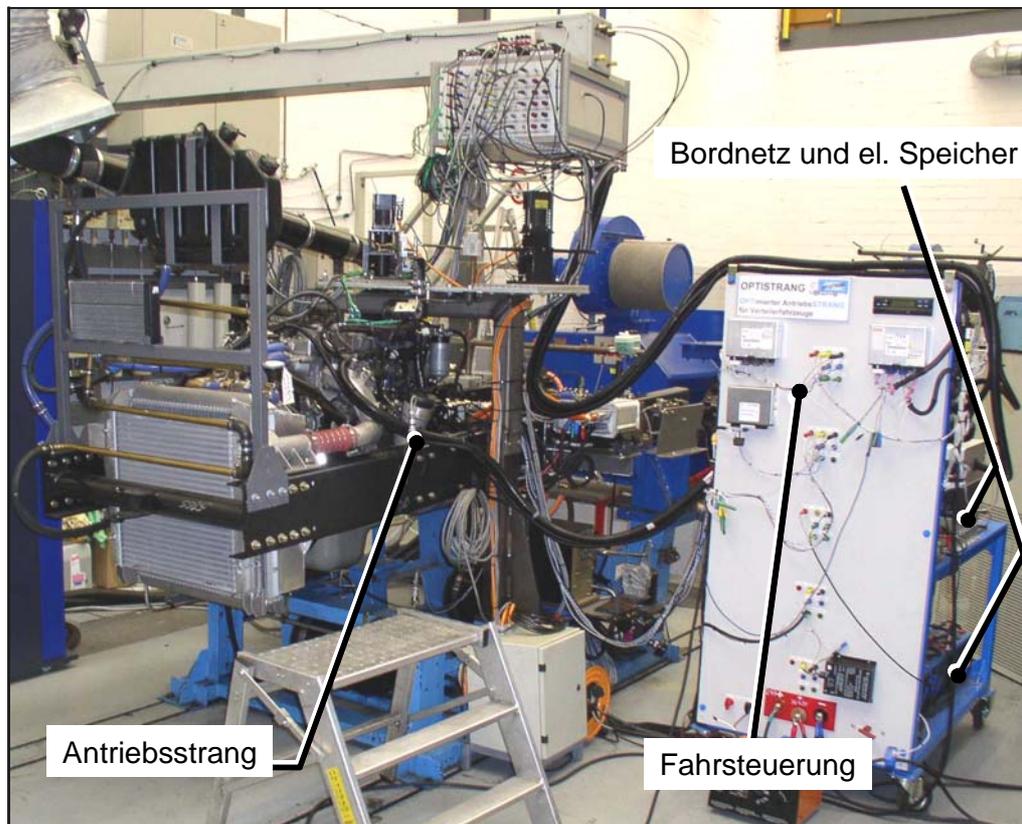
Fahrzeugtyp	Verteiler-Lkw
<b>Gewichte</b>	
zul. Gesamtgewicht	7.500 kg
Einstellung für Messungen	5.675 kg
<b>Triebstrang</b>	
<b>Dieselmotor</b>	D0834 CR, EURO5 mit EDC7
Leistung	132 kW (180 PS) bei 2400 min <sup>-1</sup>
Drehmoment	700 Nm bei 1600 min <sup>-1</sup>
Drehzahlbereich	600 (LL) ... 2400 (Nennzahl) min <sup>-1</sup>
<b>Kupplung</b>	Typ MFZ 362
<b>Getriebe</b>	6-Gang Schaltgetriebe 6AS-850
i_Gang	6,72 / 3,68 / 2,15 / 1,41 / 1,00 / 0,79
<b>Hinterachse</b>	Hypoid-Achse Hy-0645 (i=3,9)
<b>Räder</b>	
Reifen	215/75-R17,5
dyn. Reifenradius r_dyn	0,372 m

Nebenaggregate	
Lüfter	Durchmesser 600 mm
Visco-Kupplung	Ansteuerung über Bimetall-Feder
Luftpresser	Einzylinder, 238 cm <sup>3</sup>
Lenkhilfpumpe	Flügelzellenpumpe, 14 cm <sup>3</sup>
Lichtmaschine	Klauenpolmaschine, 28 V 80 A

**Tabelle 4:** Fahrzeugdaten

### 2.2.4 Prüfstands Aufbau und Prüfprogramm

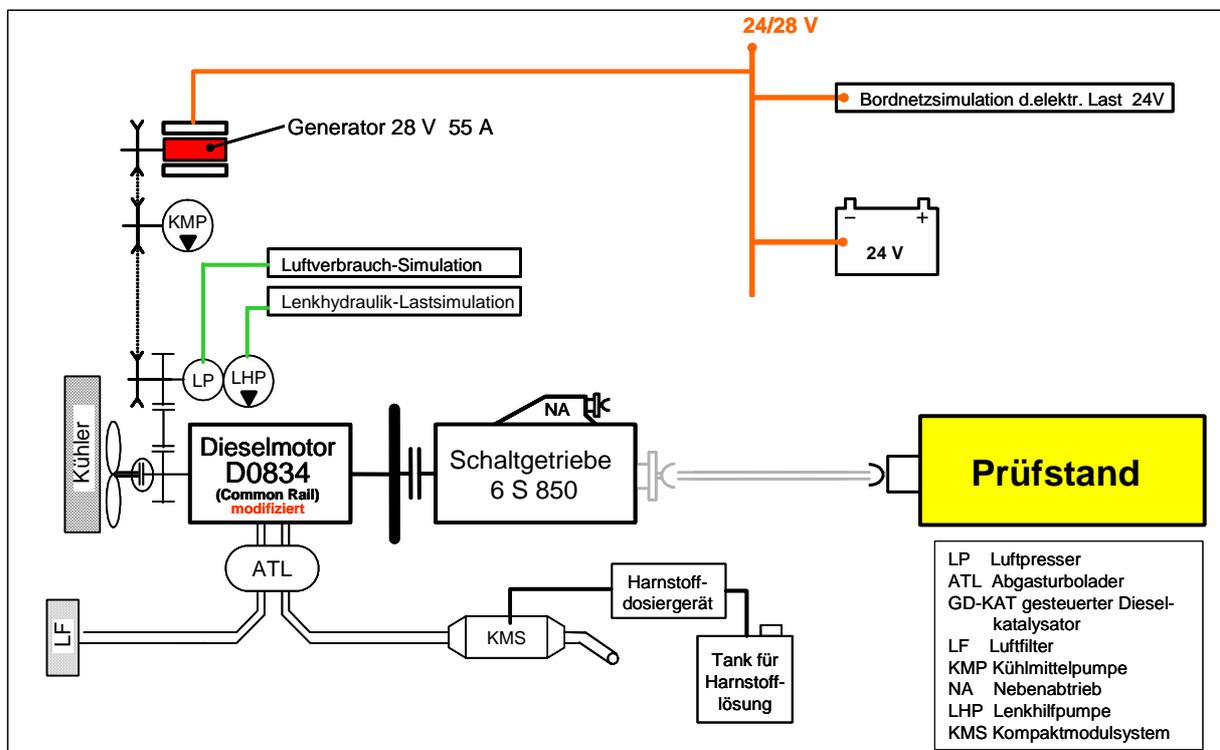
Der Prüfstands Aufbau für die OPTISTRANG-Messungen ist in **Bild 15** dargestellt. Auf einem Prüflingsträger wird der gesamte Antriebsstrang aufgespannt und mit einer Gelenkwelle ab Getriebeausgang mit dem Prüfstand verbunden. Die zugehörige Fahrsteuerung (CAN-Bus-Struktur mit Steuergeräten) sowie das Bordnetz mit den einzelnen Energiespeichern wurden separat als Laboraufbau ausgeführt. Die Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen wurden mit der Prüfstandssteuerung verknüpft und über diese angesteuert.



**Bild 15:** Prüfstands Aufbau „OPTISTRANG“

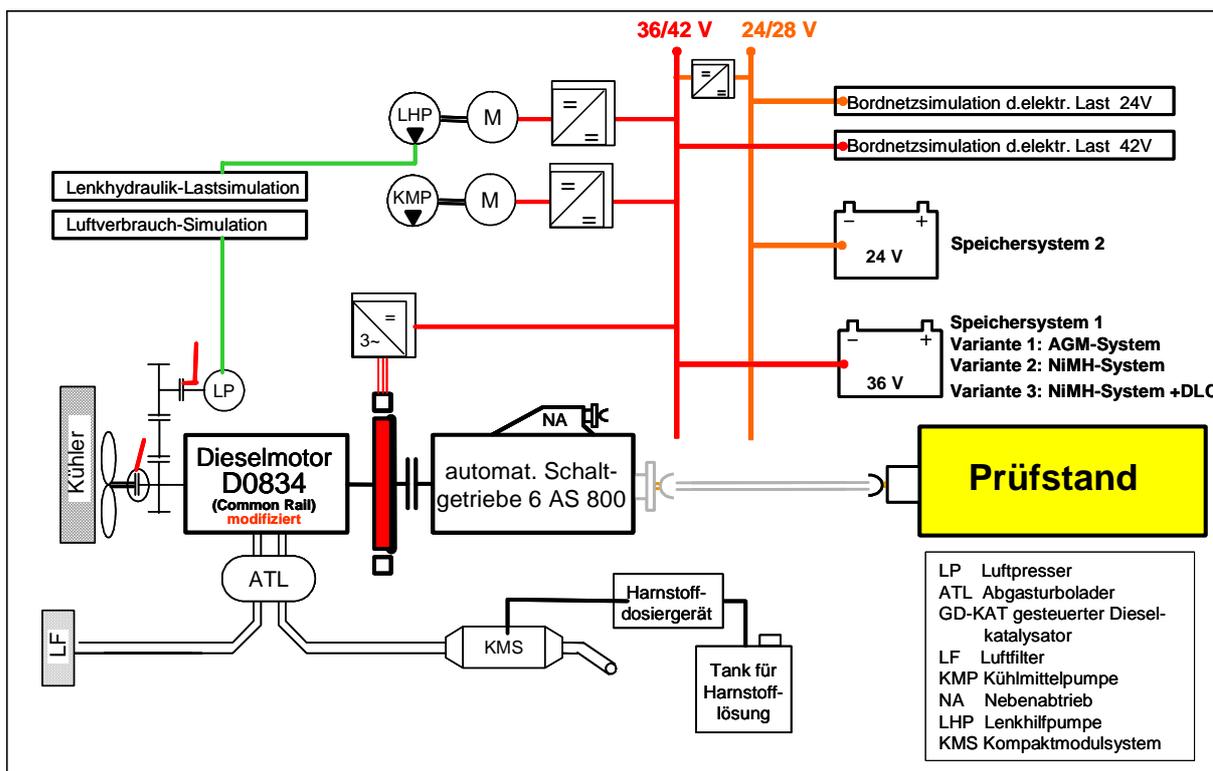
Zum messtechnischen Nachweis der Auswirkungen der einzelnen durchgeführten Optimierungsmaßnahmen wurden ausgehend vom Referenzzustand in mehreren Aus- und Umbaustufen Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt.

In **Bild 16** ist der untersuchte Referenzzustand schematisch abgebildet. Hauptkomponenten im Antriebsstrang bilden der Dieselmotor, die Trockenkupplung und das 6-Gang-Handschatgetriebe. Auf der Nebenaggregate-seite werden Luftpresser und Lenkhilfpumpe über den Rädertrieb, Kühlmittelpumpe und Generator über einen weiteren Poly-V-Riemen sowie der Lüfter über eine Bimetall-gesteuerte Visco-Kupplung angetrieben.



**Bild 16:** Prüfstands-aufbau: Referenzzustand

In **Bild 17** ist die nach mehreren Umbaustufen erreichte Vollausbaustufe dargestellt, die sämtliche neue Komponenten des OPTISTRANG-Konzepts gemäß Abschnitt 2 beinhaltet. Parallel wurden die Fahrsteuerungs- und Energiemanagementfunktionen nachgezogen.



**Bild 17:** Prüfstands Aufbau: Optistrang

Die notwendigen Lastsimulationen der Nebenaggregate am Prüfstand wurden für alle Umbaustufen gleichermaßen dargestellt. Der Luftverbrauch durch Bremsbetätigung wurde über ein über die Prüfstandssteuerung angesteuertes Ventil nachgebildet. Die hydraulische Lenkunterstützung wurde aufgrund fehlender Kurven- bzw. Lenkinformationen vom Vorgabenzklus auf einen nahezu konstanten mittleren Gegendruck eingestellt. Der Bordnetzverbrauch wurde durch eine regelbare elektrische Last abgebildet.

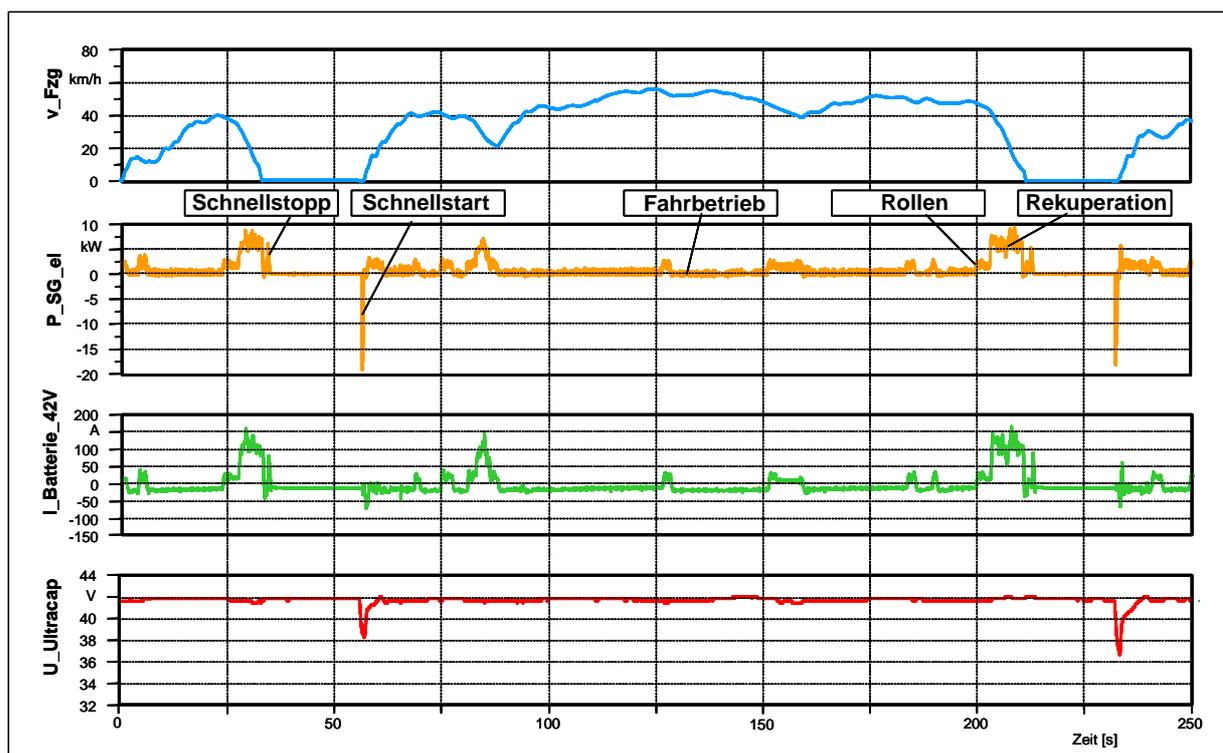
Als Vorgabezyklen werden die bereits bei den Simulationsuntersuchungen herangezogenen typischen Verteiler-Lkw-Fahrzyklen Innenstadt, Stadtbereich, Großraum sowie Autobahn verwendet.

### 2.2.5 Ergebnisse

Im Rahmen der Prüfstandsversuche konnte das funktionelle und energetische Systemverhalten durch eine Vielzahl aufgenommener Messkanäle sehr genau analysiert werden. Dadurch war es möglich, bereits in diesem frühen Stadium den Antriebsstrang weiter zu optimieren. So zeigte es sich auch, dass belastbare Aussagen zu möglichen Kraftstoffeinsparungen erst gemacht werden konnten, wenn das Energie- und Wärmemanagement entsprechend gut abgestimmt war. Zugleich konnten bei der Umsetzung

am Prüfstand auch Potenziale erkannt werden, die aufgrund des Prototypstands einzelner Komponenten im Rahmen des Projekts noch nicht vollständig nutzbar waren.

Als Beispiel einer Messung zeigt **Bild 18** einen typischen Betriebsausschnitt zentraler Systemgrößen. Diagramm 1 stellt die Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs dar. Über das Energiemanagement wird in Abhängigkeit vom Fahrzustand die Leistung des SG-Systems gesteuert (Bild 18, Diagramm 2). So wird im normalen Fahrbetrieb mit geringer Leistung geladen. Im Fahrzustand "Rollen" wird die Ladeleistung zuerst leicht und im Schubbetrieb bis etwa 6 kW angehoben. Erreicht das Fahrzeug den Fahrzustand Stillstand bei aktivierter Stopp-Start-Automatik, wird der Dieselmotor über die Funktion "Schnellstopp" abgestellt. Erst nach Verlassen des Bremspedals durch den Fahrer wird der Dieselmotor innerhalb von 500 bis 600 Millisekunden wieder gestartet, wozu bis zu 18 kW Peakleistung elektrisch erforderlich sind.



**Bild 18:** Typische Betriebsweise des SG-Systems und der elektrischen Speichersysteme

Die zugehörige Energieaufnahme bzw. -abgabe insbesondere während der Stopp-Phasen zur Versorgung der aktiven Verbraucher erfolgt über die 42V-NiMH-Batterie (Bild 18, Diagramm 3). Lediglich die Versorgung des SG-Systems für den Schnellstart wird aufgrund der höheren Entladeleistungen aus den Ultracaps bereitgestellt. Das Nachladen der Ultracaps erfolgt unmittelbar nach dem Entladevorgang (Bild 18, Diagramm 4).

Die im Fahrbetrieb erforderliche Generatorleistung wird über das Energiemanagement gesteuert. Die generatorische Leistungsfähigkeit des SG-Systems ist stark drehzahlabhängig und liegt zwischen 5 und 12,5 kW.

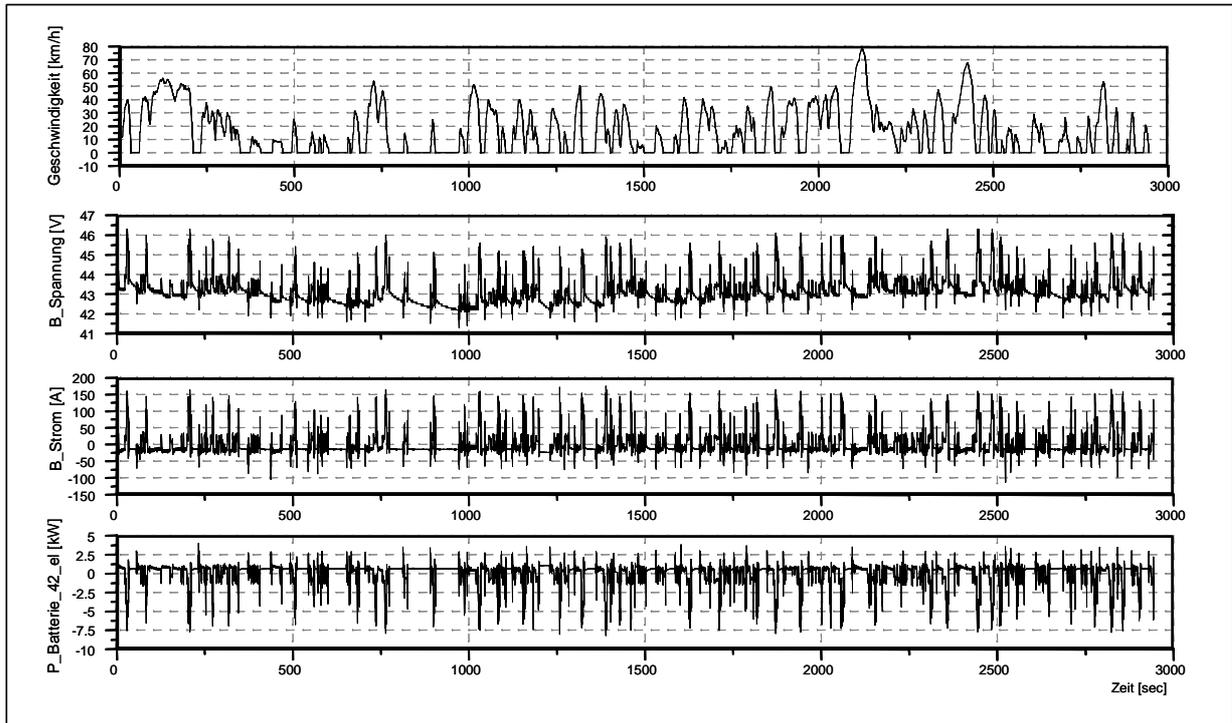
Die Ergebnisse der durchgeführten Wirkungsgradmessungen im generatorischen Betrieb sind in **Tabelle 5** für die typischen Verteiler-Zyklen dargestellt. Im Bestpunkt erreicht das SG-System (E-Maschine inkl. Leistungselektronik) 85 %. Die Wirkungsgrade der konventionellen Lichtmaschine liegen im Vergleich deutlich niedriger bei etwa 58 bis 62 %.

Fahrzyklus	Mittlerer generatorischer Wirkungsgrad
Innenraum	79 %
Stadtbereich	78 %
Großraum	77 %
Autobahn	76 %

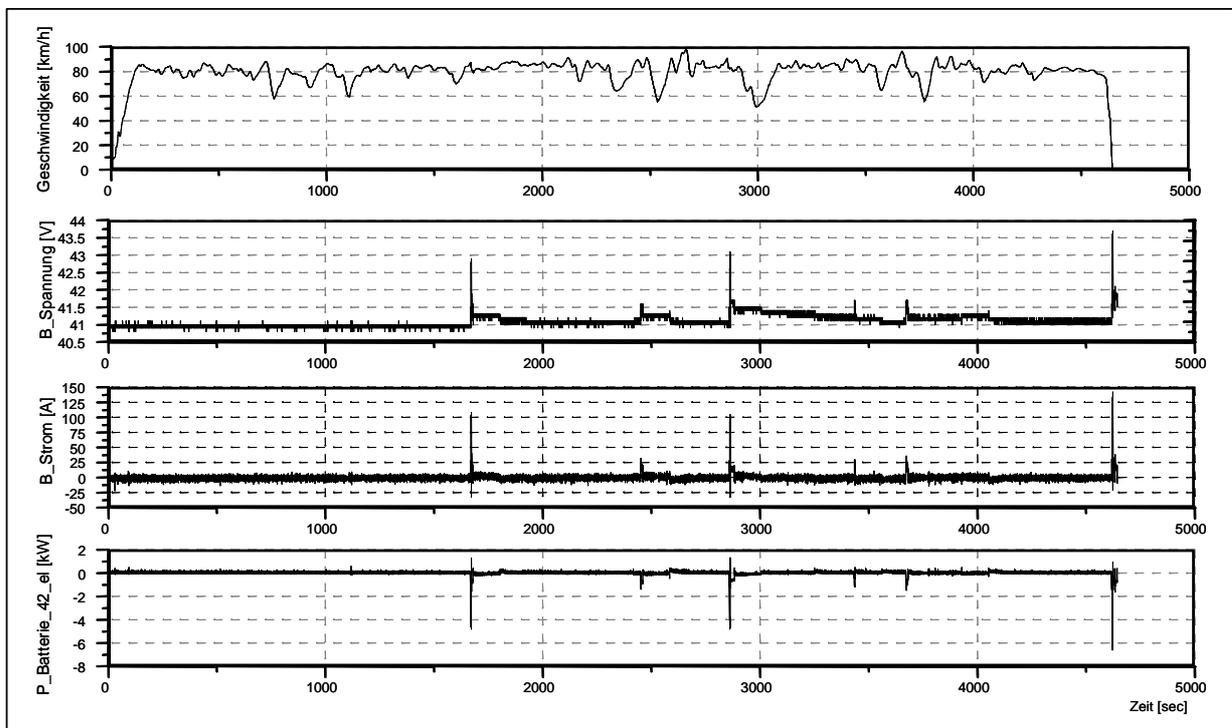
**Tabelle 5:** Mittlere generatorische Wirkungsgrade (SG-System)

Wesentlicher Schwerpunkt der Prüfstandsuntersuchungen waren auch die Bestimmung und Optimierung der Batteriebelastung. Hier standen die Aspekte Ausnutzung der Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Erfüllung der geforderten Lebensdauer sowie der Betrieb in einem engen Batterieladezustandfenster bei extrem unterschiedlichen Fahrzyklusanforderungen im Vordergrund.

Zur Veranschaulichung zeigen die **Bilder 19 und 20** für die Fahrzyklen Innenraum und Autobahn die sehr unterschiedlichen Batteriebelastungen.



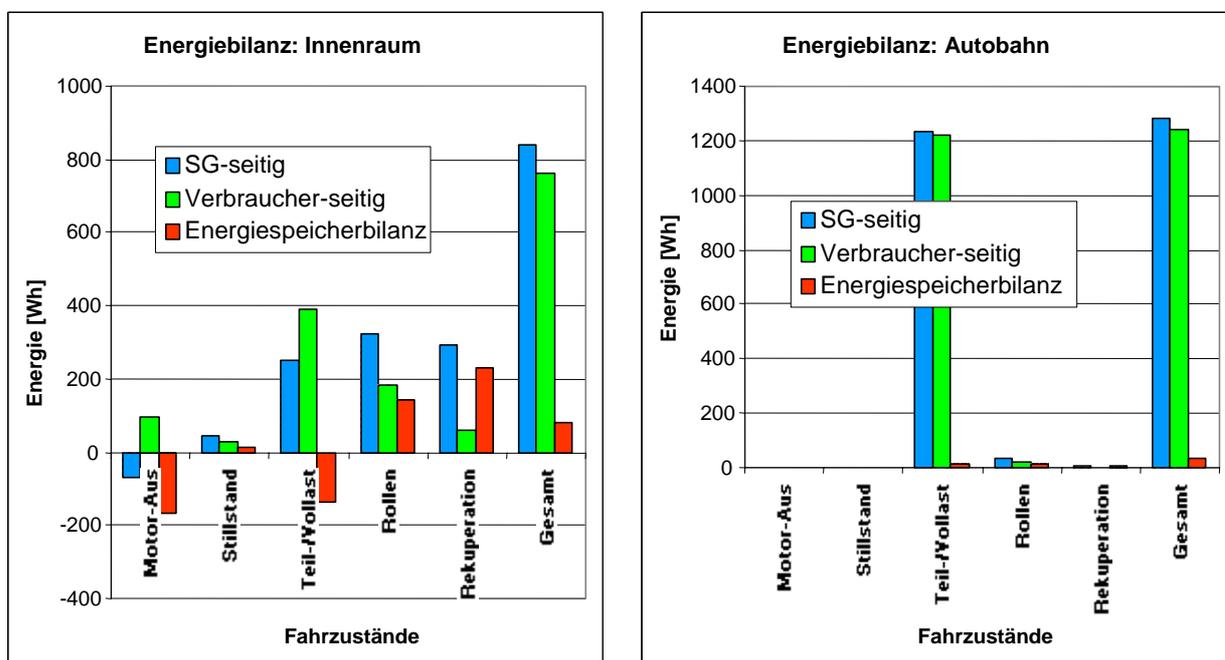
**Bild 19:** Batteriebelastung im Fahrzyklus Innenraum



**Bild 20:** Batteriebelastung im Fahrzyklus Autobahn

Das implementierte Energiemanagement muss nun so konzipiert werden, dass im Fahrbetrieb unabhängig von Einsatzfall sich eine in etwa ausgeglichene Ladebilanz einstellt und dennoch die Lade- und Entladevorgänge energetisch günstig gestaltet werden.

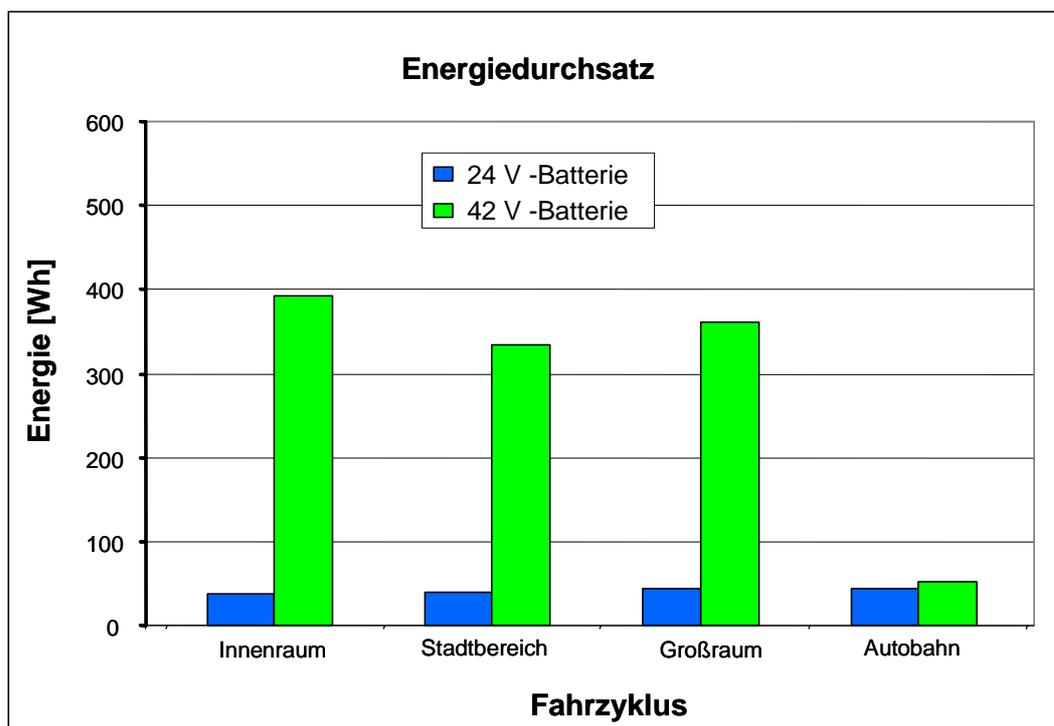
**Bild 21** zeigt wieder anhand der beiden Fahrzyklus-Extreme Innenraum und Autobahn die elektrischen Energiebilanzen. Betrachtet man jeweils den gesamten Fahrzyklus, erzielt das Energiemanagement in beiden Fällen eine gewünschte, leicht positive Ladebilanz. Analysiert man die Energiebilanzen unterschieden nach Fahrzustand insbesondere im Fahrzyklus Innenraum, so ist zu erkennen, dass die Fahrzustände Teillast/Vollast und Motorstopp eine negative Ladebilanz aufweisen, die übrigen eine positive. Dadurch kann die in den Fahrzuständen Rollen und Rekuperation zurückgeladene Energie energetisch günstig genutzt werden.



**Bild 21:** Elektrische Energiebilanzen exemplarisch für die Fahrzyklen Innenraum und Autobahn

Eine stärkere Nutzung der Rekuperation wäre energetisch zwar sinnvoll, jedoch erhöht sie neben der Stopp-Start-Funktion ebenso die Zyklisierung des Energiespeichers, im vorliegenden Fall der 42 V-NiMH-Batterie. Die Zyklusfestigkeit der Batterie muss deshalb hier ebenfalls berücksichtigt werden und ein Kompromiss zwischen Batterielebensdauer, was direkt mit den Batteriekosten korreliert, und Reduzierung der Betriebskosten durch verstärkte Nutzung der Bremsenergie.

In **Bild 22** sind die Energiedurchsätze in Abhängigkeit vom Fahrzyklus dargestellt. Die Einstellungen im Energiemanagement sind so gewählt, dass unter Zugrundelegung eines typischen Fahrzyklusmixes die Lebensdauer der zyklusfesten NiMH-Batterie einem gesamten Fahrzeugleben standhält.



**Bild 22:** Energiedurchsätze der Energiespeicher in Abhängigkeit vom Fahrzyklus

Zusammenfassend konnten nach Abschluss der Optimierungsarbeiten die in **Bild 23** aufgeführten Kraftstoffeinsparungen im Vergleich zum Referenzfahrzeug mit 180 PS EURO 3-Motor und Handschaltgetriebe erzielt werden.

Die Einsparanteile einzelner Optimierungsmaßnahmen zeigen deren unterschiedliche Einflüsse in Abhängigkeit vom Fahrzyklus.

Während Maßnahmen an Luftpresser und Lenkhilfe sich vor allem in den Stadtzyklen positiv auswirken, zeigen die Optimierungen am Kühlsystem bei den Fahrzyklen mit höheren mittleren Motorleistungen Großraum und Autobahn höhere Einsparungen.

Das SG-System kann insbesondere aufgrund der Stopp-Start-Funktionalität im Innenstadtzyklus bis zu 6,4 % einsparen. Die verbrauchsgünstige Dieselmotoreinstellung erreicht Verbesserungen bis zu 3,9 % im Autobahnbetrieb.

Aufgrund des Mehrgewichts von ca. 150 kg durch die zusätzlich eingebauten Komponenten reduzieren sich die Einsparungen zyklusabhängig um 1,0 bis 1,5 %.

Insgesamt konnten Kraftstoffeinsparungen bis zu 11,5 % bei gleichzeitiger Erreichung der EURO5-Grenzwerte nachgewiesen werden. Bei dieser Betrachtung blieb die mögliche Kraftstoffeinsparung durch eine optimierte Schaltstrategie in Kombination mit dem automatisierten Getriebe unberücksichtigt.

In der Betriebskosten-Kalkulation muss jedoch auch der durch das GD-KAT-System bedingte Harnstoffverbrauch mitberücksichtigt werden.

Maßnahme	Fahrzyklus			
	Innenstadt	Stadtbereich	Großraum	Autobahn
Luftversorgung	- 4,1 %	- 3,8 %	- 2,6 %	- 2,0 %
Servolenkung <sup>1)</sup>				
Kühlkreislauf	- 2,1 %	- 2,2 %	- 2,5 %	- 3,3 %
Visco-Lüfter				
Starter-Generator-System ges. - Wirkungsgradvorteil - Stopp-Start-Automatik - Rekuperation - Wegfall Riementrieb - Speicher + SG-Verluste	- 6,4 %	- 3,4 %	- 2,9 %	- 0,9 %
EURO 5 + GD-Kat-System	- 0,4 %	- 1,4 %	- 2,9 %	- 3,9 %
Mehrgewicht (150 kg)	+ 1,5 %	+ 1,4 %	+ 1,3 %	+ 1,0 %
<b>Kraftstoffverbrauch <sup>1)</sup></b>	<b>- 11,5 %</b>	<b>- 9,4 %</b>	<b>- 9,6 %</b>	<b>- 9,1 %</b>

Referenz: Verteiler-Lkw konventionell mit EURO3-Motor (Fzg-Typ: 8.180, BB, mittlere Beladung)

<sup>1)</sup> Werte in Klammern ohne Berücksichtigung der Lenkhydraulik-Gegendruck-Korrektur

**Bild 23:** Erreichte Kraftstoffeinsparungen

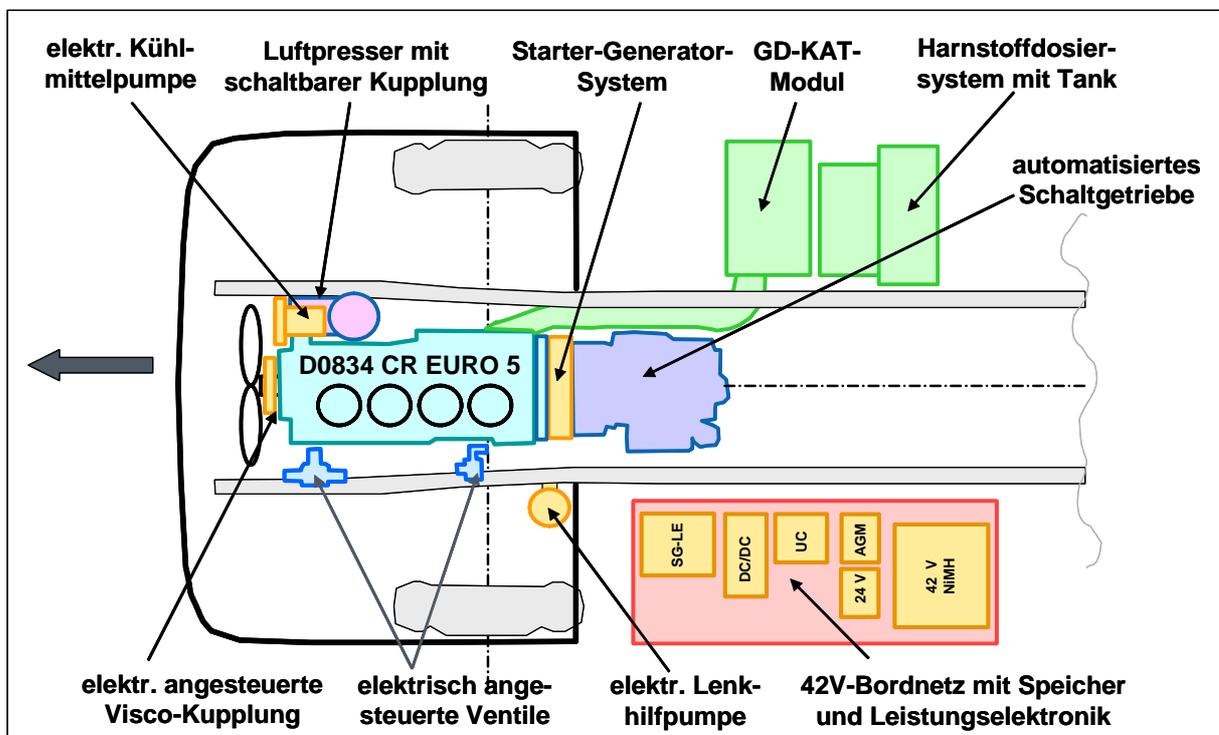
### 2.3 Aufbau des Prototypfahrzeugs

Während alle energetischen Untersuchungen und Emissionsmessungen am Prüfstand durchgeführt wurden, wurde anschließend ein Prototypfahrzeug mit diesem "OPTISTRANG" ausgerüstet und im realen Straßenverkehr eingesetzt (siehe **Bild 24**).



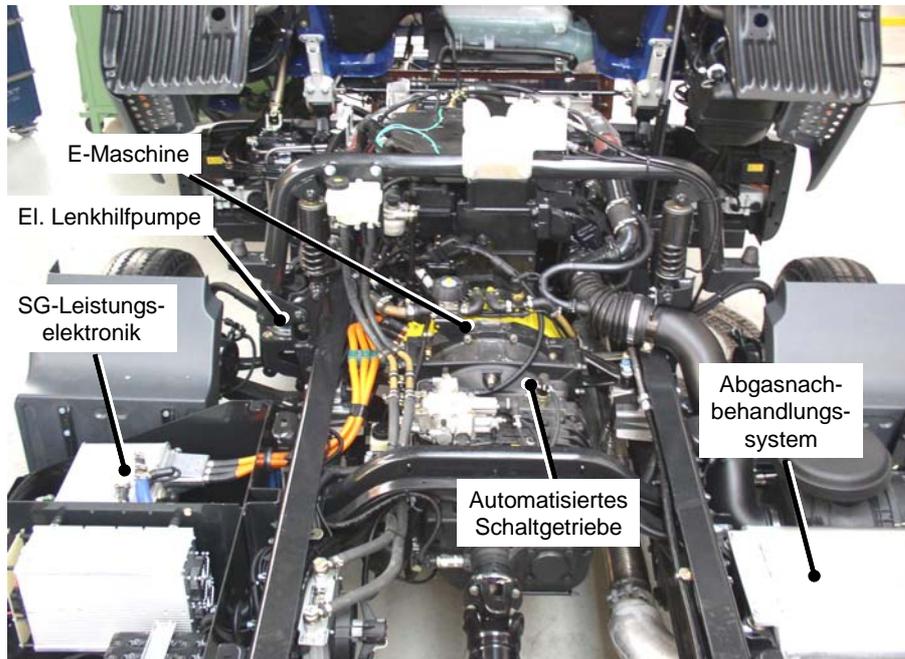
**Bild 24:** Prototyp-Fahrzeug

Die entsprechende Integration der OPTISTRANG-Einzelkomponenten ist in **Bild 25** schematisch dargestellt. Die E-Maschine des Starter-Generator-Systems wurde zwischen Dieselmotor und Getriebe in den Antriebsstrang integriert, wodurch dieser axial etwa um 80 mm verlängert wurde. Das automatisierte Schaltgetriebe ersetzt bei etwa gleichem Bauraumbedarf das Handschaltgetriebe. Das 42 V-Bordnetz mit Leistungselektronik und elektrische Speichern wurde seitlich links am Fahrzeugrahmen in einem geschlossenen Kasten, das GD-KAT-System bestehend aus Katalysatormodul, Harnstoffdosiersystem und -tank seitlich rechts untergebracht. Die elektrischen Nebenaggregate sowie Komponenten für den Kühlkreislauf wurden im Umfeld des Dieselmotors integriert.



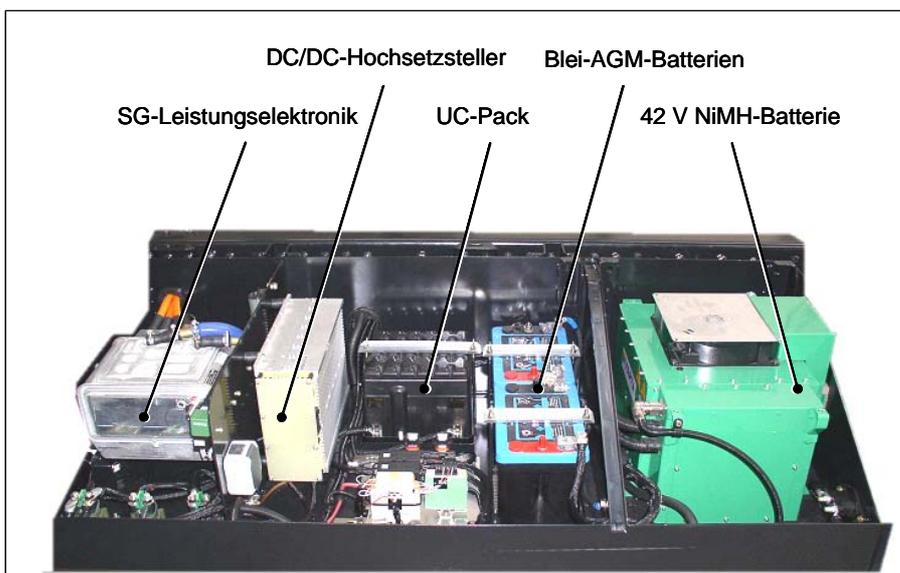
**Bild 25:** Konstruktive Integration im Fahrzeug

**Bild 26** zeigt die integrierten Hauptkomponenten am Prototypfahrzeug.



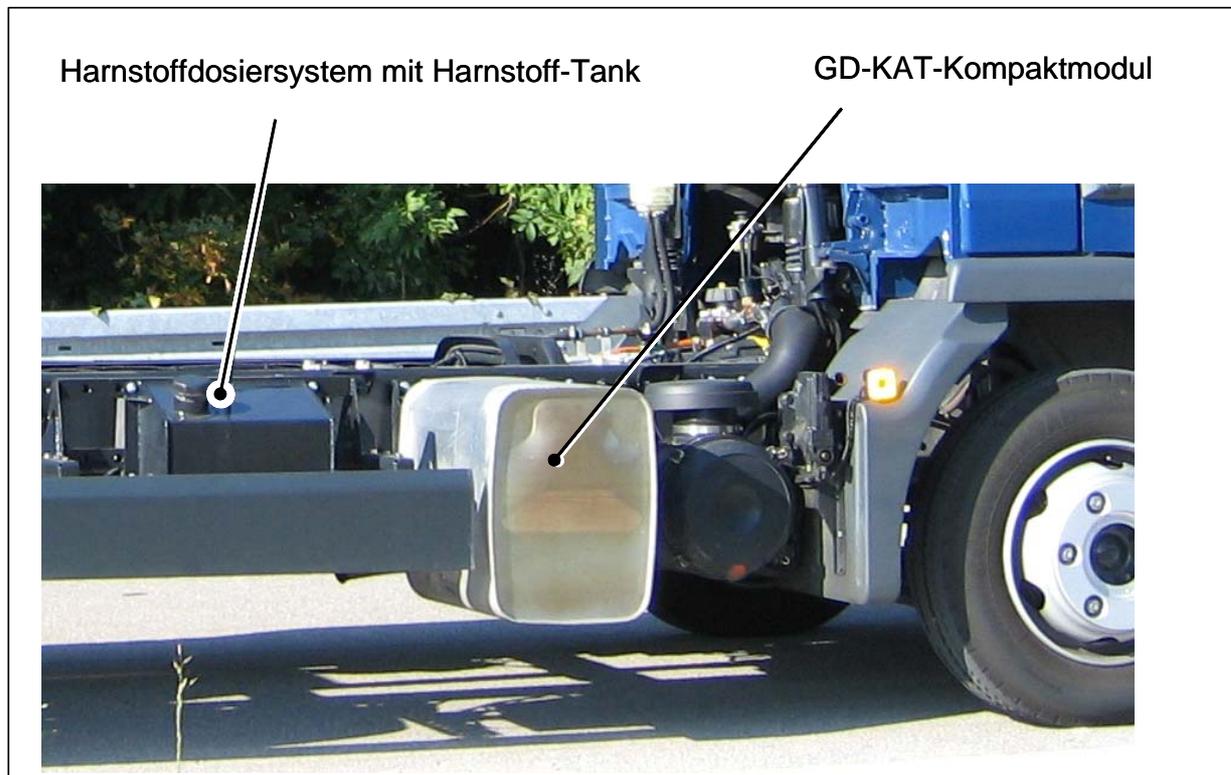
**Bild 26:** Prototypfahrzeug mit eingebauten „OPTISTRANG“-Komponenten

In **Bild 27** ist der am Fahrzeugrahmen befestigte "Batteriekasten" abgebildet, in dem die verschiedenen Energiespeicher, die Leistungselektroniken, Schütze und Sicherungen untergebracht sind.



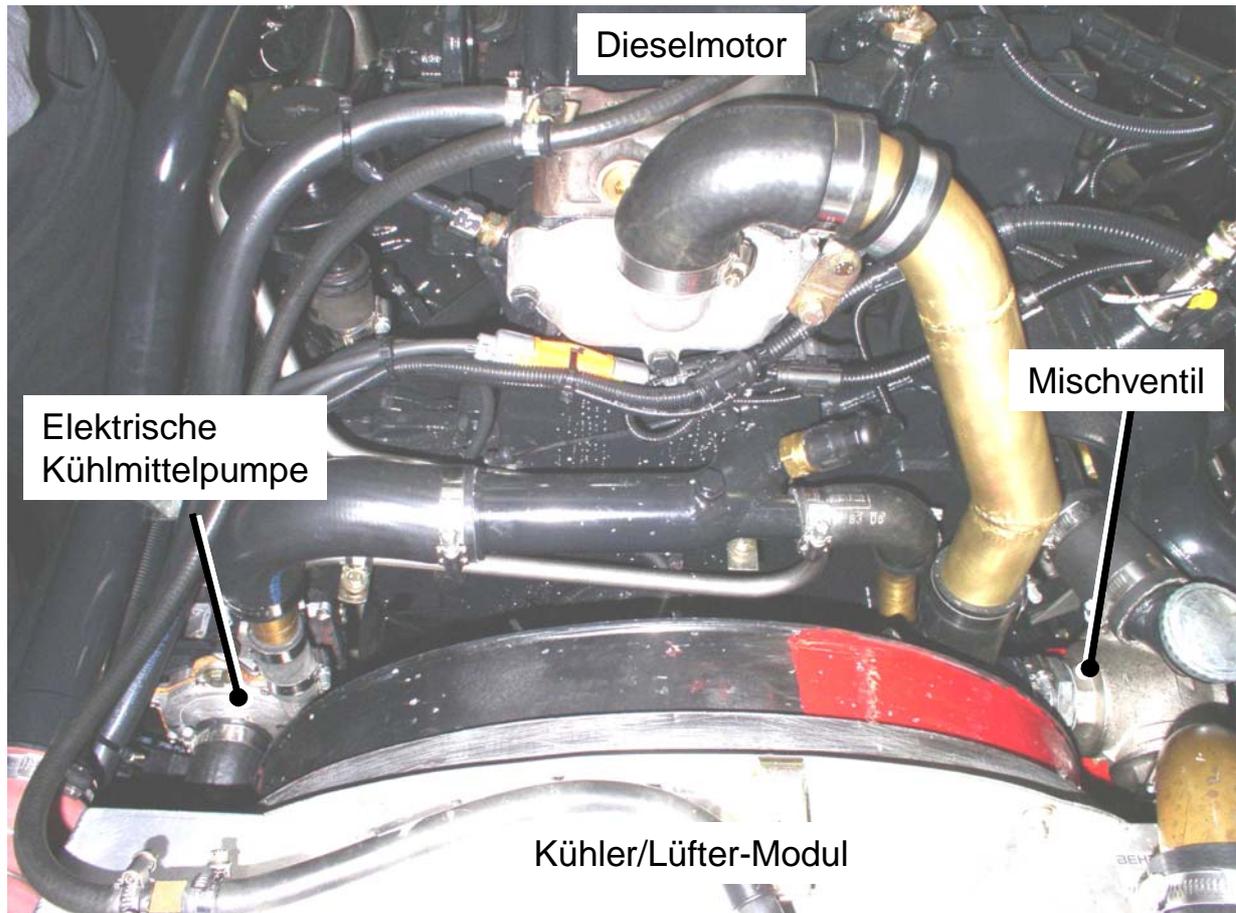
**Bild 27:** „Batteriekasten“ mit Energiespeicher, Leistungselektroniken und Bordnetzkomponenten

**Bild 28** zeigt die Integration des GD-KAT-Systems an der rechten Fahrzeugrahmenseite.



**Bild 28:** GD-KAT-System

In **Bild 29** ist das modifizierte Frontend des Dieselmotors zu sehen. Der komplette Riementrieb ist entfallen. Der freigewordene Platz wird derzeit von Kühlungskomponenten (z.B. elektrische Kühlmittelpumpe, Mischventil, dazugehörige Verrohrung) eingenommen, mittelfristig könnten jedoch diese Komponenten funktionell direkt in das Frontend integriert werden.



**Bild 29:** Modifiziertes, riemenloses Motor-Front-End

Die Bedienung des Fahrzeugs ist grundsätzlich mit der von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar. Durch die Automatisierung des Getriebes mit hinterlegter Schaltstrategie wird jedoch der Fahrer entlastet. Die dem Fahrer zusätzlich zur Verfügung stehenden Funktionen können im Prototypfahrzeug zur besseren Darstellung über einzelne Schalter aktiviert oder deaktiviert werden. Aus Sicherheitsgründen wurde zusätzlich ein Not-Aus-Schalter eingebaut, der bei Störungen oder Beschädigungen am elektrischen System die 42 V-Batterie vom Bordnetz trennt. In **Bild 30** sind die am Fahrerarbeitsplatz angebrachten Schalter abgebildet.

**Schalter (1) UC:** Starten über Ultracaps. Ist dieser Schalter nicht gedrückt, erfolgt der Dieselmotorstart über die 42 V-NiMH-Batterie

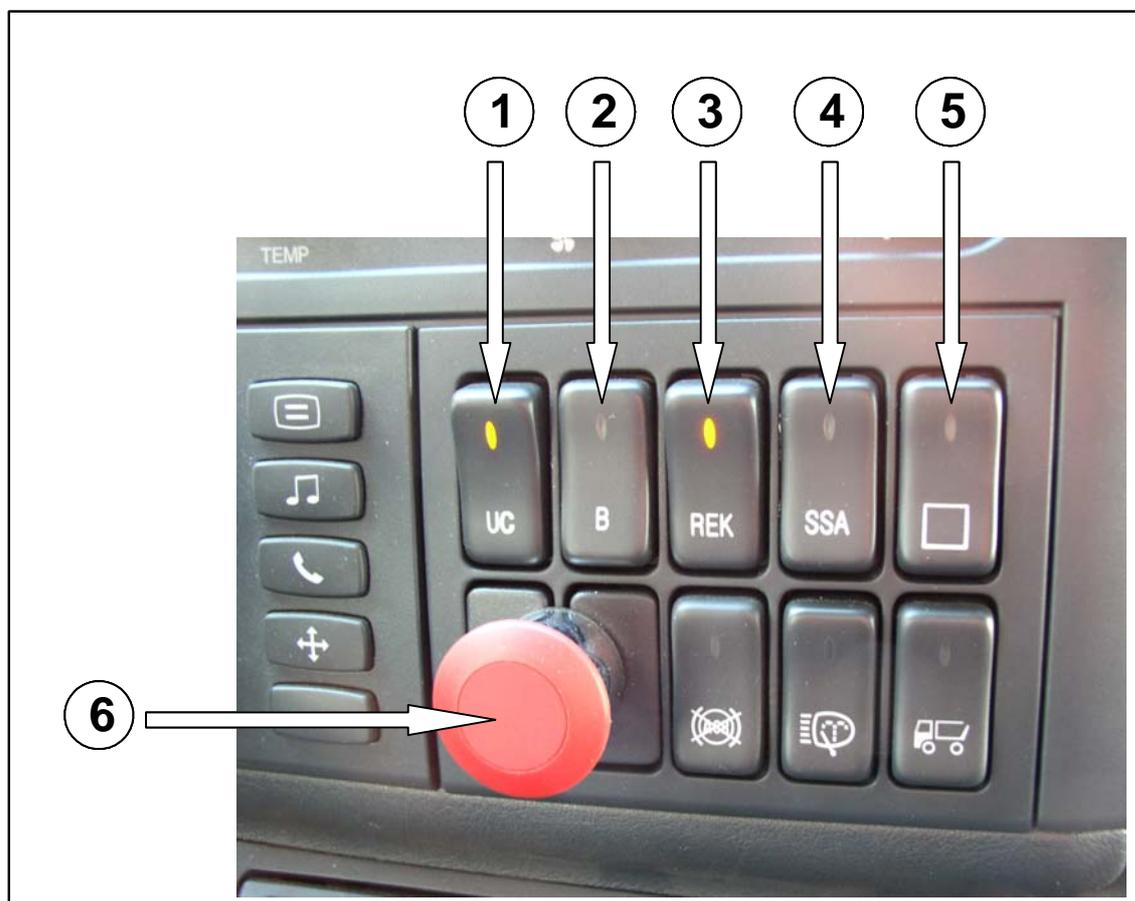
**Schalter (2) B:** Aktivierung der Boostfunktion

**Schalter (3) Rek:** Aktivierung der Rekuperation im Schub- und Bremsbetrieb

**Schalter (4) SSA:** Aktivierung der Stopp-Start-Automatik. Die eingebaute LED signalisiert die Freigabe der Stopp-Start-Automatik

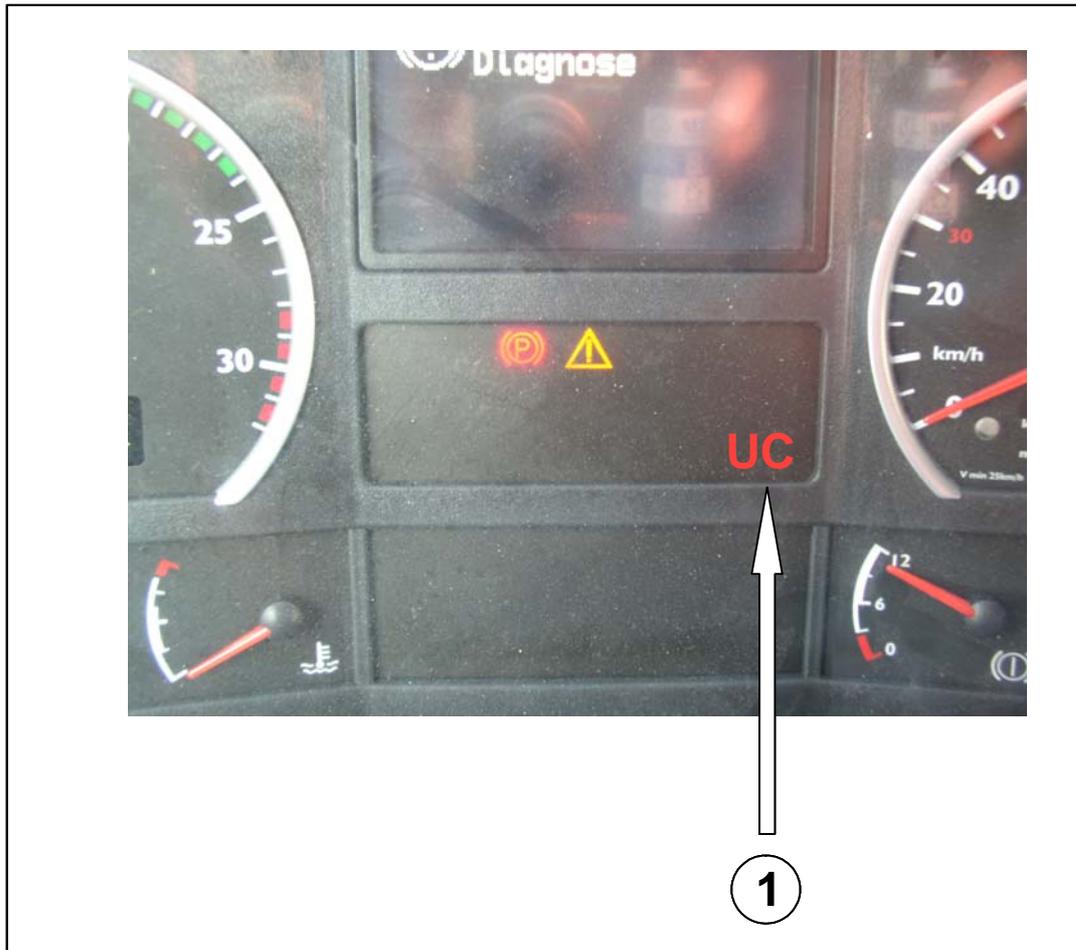
**Schalter (5)** []: Umschalten des Zusatz-Displays

**Schalter (6)** : Batterie-Not-Aus



**Bild 30:** Zusätzliche Bedienelemente

Ebenfalls am Fahrerarbeitsplatz wird zusätzlich über das Standard-Instrumentendisplay angezeigt (siehe **Bild 31**), falls der Ultracapspeicher für einen sofortigen Startvorgang nicht ausreichend geladen ist. Dies wird anhand der Ist- und Soll-Ultracapspannung ermittelt. Die Soll-Ultracapspannung wird dabei in Abhängigkeit vom zu erwartenden Startenergiebedarf bestimmt, der wiederum u.a. abhängig von der Motoröltemperatur und der Umgebungstemperatur als Kennlinie abgelegt ist. Ist der Nachladevorgang des Ultracapspeichers noch nicht abgeschlossen, wird dies über ein rotes UC-Symbol angezeigt.

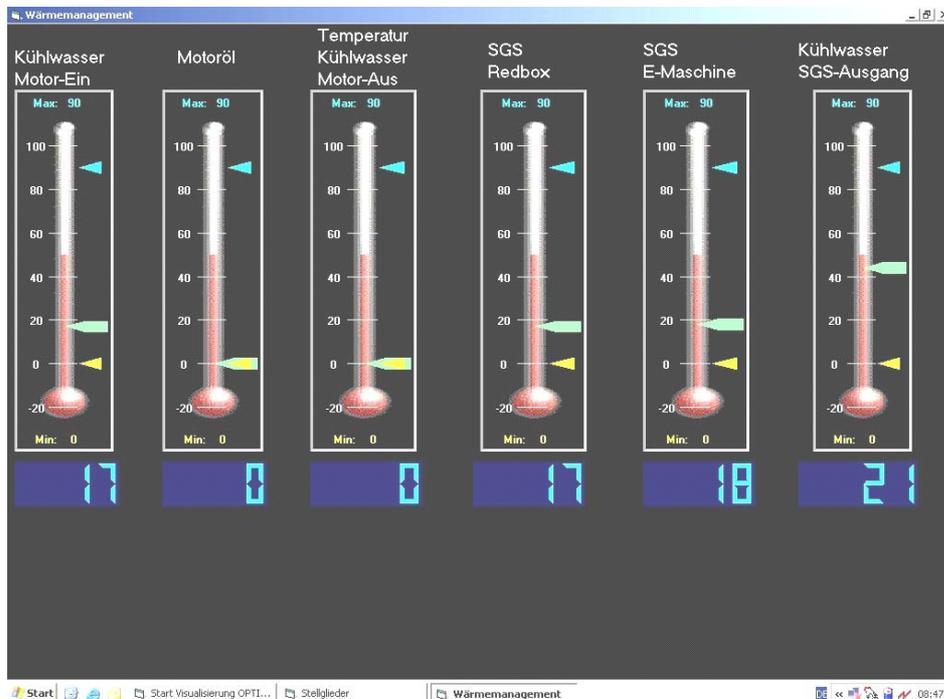


**Bild 31:** Erweitertes Standard-Fahrer-Display

Zur Darstellung des aktuellen Systemverhaltens wurde darüber hinaus ein weiteres Grafikdisplay installiert, das thematisch gruppiert Komponentenzustände des Kühlsystems, des Bordnetzes, des Starter-Generator-Systems und des Druckluftsystems visualisiert (siehe **Bilder 32 bis 36**).



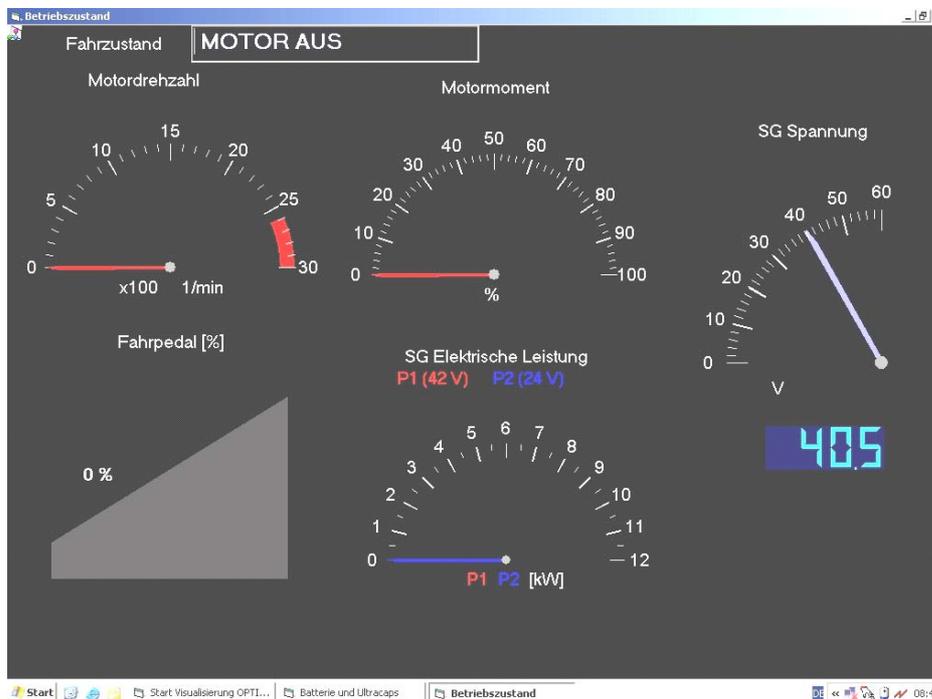
**Bild 32:** Zusätzliches Fahrer-Display: Kühlungssystem



**Bild 33:** Zusätzliches Fahrer-Display: Komponententemperaturen



**Bild 34:** Zusätzliches Fahrer-Display: Bordnetz



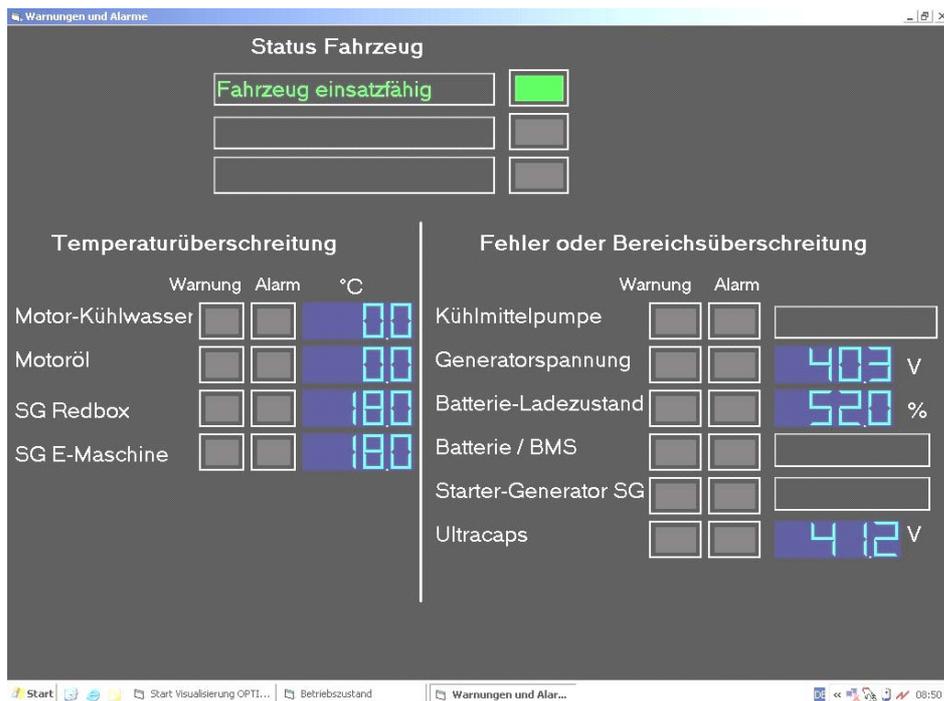
**Bild 35:** Zusätzliches Fahrer-Display: Dieselmotor- und Starter-Generator-System



**Bild 36:** Zusätzliches Fahrer-Display: Druckluftsystem

Um den Fahrer von der Überwachung des komplexeren Antriebsstranges zu entlasten, wurden in die Steuerung (EMS) zusätzliche Systemdiagnosefunktionen implementiert. So werden kritische Systemgrößen fortlaufend überwacht. Bei Überschreitung von Warn- und Alarmschwellen wird dann dem Fahrer (akustisch signalisiert) ein entsprechender Fehlerbildschirm am zusätzlichen Fahrer-Display angezeigt (siehe **Bild 37**). In diesem wird dem Fahrer als Hauptinformation der Fahrzeugzustand in Form einer Ampel gemeldet. Dabei werden die drei Fahrzeugzustände „grün = Fahrzeug einsatzfähig“, „gelb = Fahrzeug bedingt einsatzfähig“ und „rot = Fahrzeug nicht einsatzfähig“ unterschieden. Ist das Fahrzeug nur noch bedingt einsatzfähig, kann das Fahrzeug zwar noch weiter betrieben werden, jedoch ist umgehend eine Überprüfung notwendig. Ist das Fahrzeug nicht mehr einsatzfähig, darf das Fahrzeug nicht mehr betrieben werden und es ist unmittelbar abzustellen.

Im zweiten Schritt kann dann der Fahrer über die am Bildschirm darunter angeordnete Anzeige feststellen, bei welcher Komponente entweder die Warn- oder die Alarmschwelle überschritten wurde.



**Bild 37:** Zusätzliches Fahrer-Display: Fahrzeug-Status und Fehlerbildschirm

## 2.4 Fahrzeugerprobung

Nach Aufbau, Inbetriebnahme und Optimierung des Systemverhaltens wurde das Prototypfahrzeug im realen Straßenverkehr, vor allem im typischen Stadtverkehr erprobt.

### 2.4.1 Ziele des Erprobungsbetriebs

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, wurden die zur Bestimmung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs relevanten Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen anhand der repräsentativen Vorgabezyklen am Prüfstand durchgeführt. Im realen Fahrbetrieb können hierzu aufgrund der Vielzahl von Störgrößen (z.B. Einflüsse von Fahrer, Verkehrsfluss, Außentemperatur, u.v.m.) keine genauen Aussagen gemacht werden. So lag der Schwerpunkt im Erprobungsbetrieb auf folgenden Zielen:

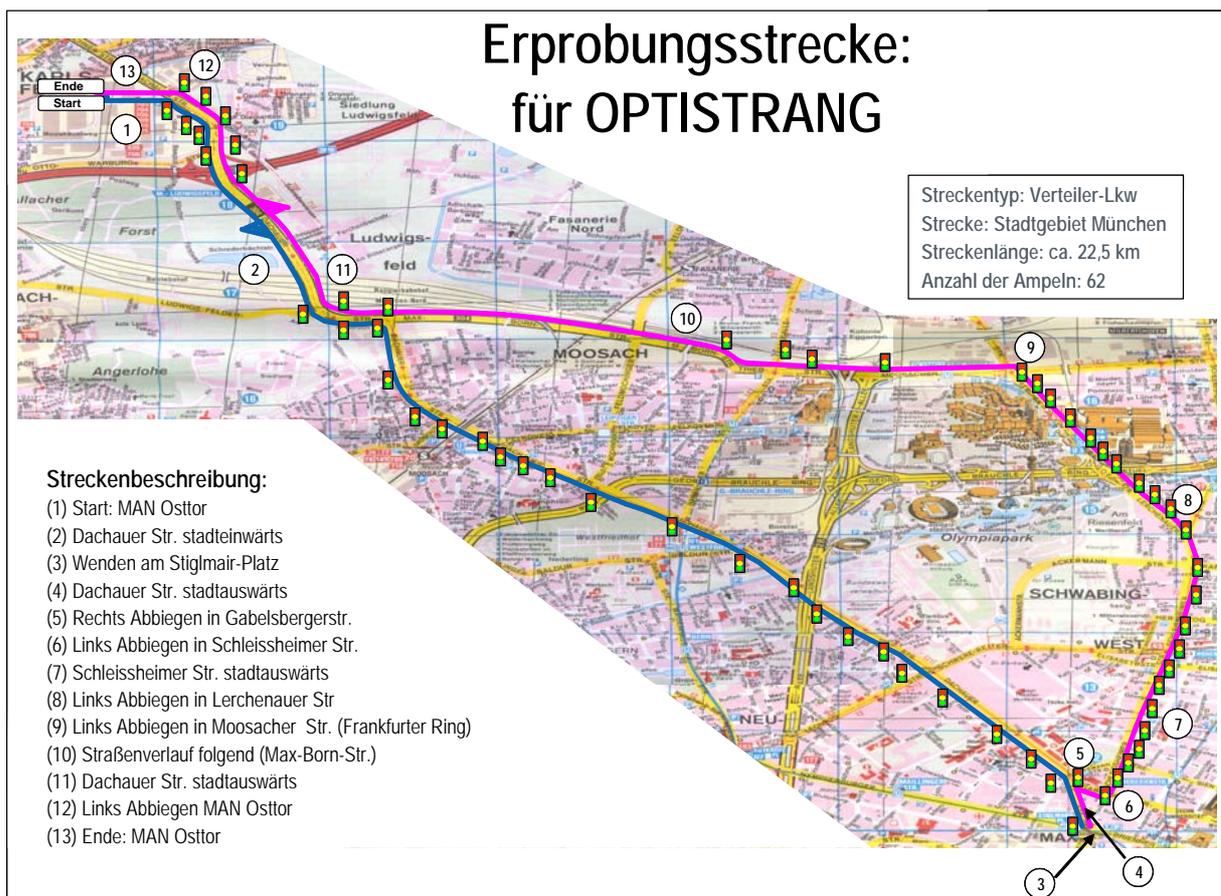
- Untersuchung der Funktionsstabilität und Zuverlässigkeit von Gesamtsystem Komponenten und Steuerung (insbesondere von Energie- und Wärmemanagement)
- Untersuchung der Alltagstauglichkeit (insbesondere der Stopp-Start-Automatik)
- subjektive Bewertung der Funktionen und des Fahrverhaltens durch die Fahrer
- Lastkollektivbestimmung der Lenkhilfpumpe

## 2.4.2 Durchführung der Erprobung

Für die Durchführung der Erprobung des Prototypfahrzeugs im realen Verkehr wurden zunächst eine geeignete Erprobungsstrecke, die Fahrer sowie ein Beurteilungsbogen festgelegt.

### 2.4.2.1 Beschreibung der Erprobungsstrecke

Als geeignete Erprobungsstrecke wurde eine typische Verteiler-Lkw-Strecke im Raum München ausgewählt. Es handelt sich um einen Rundkurs. Der Startpunkt liegt in einem Industriegebiet am Stadtrand, führt dann radial nahe an das Stadtzentrum und auf einer Alternativstrecke wieder zurück zum Ausgangspunkt. Dadurch wird sehr gut eine typische Fahrt zur Auslieferung von Waren im Verteilerbetrieb abgebildet (siehe **Bild 38 bzw. Anlage 1**).



**Bild 38:** Verlauf der Erprobungsstrecke

Die wesentlichen Kenndaten der Erprobungsstrecke sind in **Tabelle 6** zusammengefasst.



Streckentyp:	Verteiler-Lkw, Stadtgebiet
Streckenlänge:	22,5 km
streckenbedingte max. Haltepunkte / km (z.B. Ampeln, Vorfahrtstraßen,...):	2,8 <sup>1</sup> / <sub>km</sub>
mittlere gemessene Halte / km:	1,5 <sup>1</sup> / <sub>km</sub>

**Tabelle 6:** Kenndaten der Erprobungsstrecke

Dieser Stadtzyklus bildete den Schwerpunkt im Erprobungsbetrieb. Daneben wurden auch Autobahnfahrten durchgeführt.

#### 2.4.2.2 Durchführung der Messungen

Die ausgewählten Fahrer (Mitarbeiter der MAN Nutzfahrzeuge) brachten unterschiedliche Erfahrungswerte mit dem Führen von Lkw mit. Nach kurzer Einweisung wurde jeweils mehrfach der o.g. Rundkurs gefahren.

Der Messzeitraum erstreckte sich von Oktober 2004 bis April 2005.

Die Messfahrten wurden mit folgendem Zustand der Sonderfunktionen (Wahl über Kippschalter) durchgeführt:

- Schnellstart aus Ultracaps aktiv
- Booster nicht aktiv
- Rekuperation aktiv
- Stopp-Start-Automatik (SSA) aktiv / nicht aktiv

#### 2.4.2.3 Subjektive Beurteilung des Systemverhaltens

Um die subjektiven Fahreindrücke zu sammeln, wurden die Fahrer am Ende der Messfahrten mithilfe eines Beurteilungsbogens zu ihrer Bewertung verschiedener Funktionen sowie des Gesamteindrucks befragt. Die daraus abgeleiteten Bewertungen sind in den Ergebnissen in Abschnitt 2.4.3 eingearbeitet.

#### 2.4.2.4 Messtechnik

Zur Erfassung des Systemverhaltens wurden im Wesentlichen CAN-Daten (aus Triebstrang-CAN, EMS-CAN, BMS-CAN) aufgezeichnet. Zudem wurden ein Kraftstoffmessgerät und eine Druckmesstelle im Lenkhilfskreislauf implementiert.

Die Daten wurden mit einem Langzeitdatenlogger aufgenommen und im zweiwöchigen Rhythmus ausgelesen.

## 2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „OPTISTRANG – Phase 2“ konnte das OPTISTRANG-Konzept erfolgreich umgesetzt und sowohl am Prüfstand als auch im aufgebauten Prototypfahrzeug getestet und analysiert werden.

Während die Untersuchungen am Prüfstand aufgrund der reproduzierbaren Randbedingungen die wesentlichen Ergebnisse hinsichtlich Energie-, Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen lieferten, konnten durch die Erprobung des Prototypfahrzeugs im realen Verkehr wertvolle Aussagen zur Bedienung, Funktionsabstimmung und Alltagstauglichkeit gewonnen werden.

Zusammenfassend konnten Kraftstoffeinsparungen bis zu 11,5 % in den typischen Verteilerzyklen erzielt werden. Im Autobahneinsatz wurde zudem ebenfalls eine Einsparung von 9,1 % erreicht. Dies konnte bei gleichzeitiger Einhaltung der EURO5-Abgaswerte dargestellt werden. Der mit dem Einsatz des Denox-Abgasbehandlungssystem verknüpfte Harnstoffverbrauch muss jedoch in den Betriebskosten gegengerechnet werden.

Zusätzlich trägt die Stopp-Start-Automatik in den Betriebszuständen Motorstopp zu einer temporären Geräuschreduzierung bei.

Der Fahrkomfort kann durch das Wärmemanagement und den möglichen Einsatz von 42 V - Hochlastverbrauchern z.B. PTC-Zuheizer oder elektrische Frontscheibenheizung gesteigert werden.

Weiter kann durch den Einsatz der Ultracaps auch bei stark entladener Batterie ein sicherer Start dargestellt werden.

Optional als Zusatzfunktion kann eine leistungsfähige 230 V-Steckdose genutzt werden, die den Anschluss von Standard-Elektrogeräten während der Fahrt oder auch im Stand bis zu 4,8 kW erlaubt. Damit kann in den meisten Fällen auf ein zusätzliches Notstromaggregat verzichtet werden, was vor allem z. B. für Handwerker interessant ist.

Die Fahrerprobung des Prototypfahrzeugs zeigte eine sehr gute und stabile Funktion der Teilsysteme, insbesondere der Stopp-Start-Automatik als auch des Energie- und Wärmemanagements. Insgesamt konnte dem Gesamtsystem eine Alltagstauglichkeit, soweit das für ein Prototypfahrzeug möglich ist, bescheinigt werden.

## 3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben „OPTISTRANG – Phase 2: Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung“ baut unmittelbar auf der vorangegangenen theoretischen Vorstudie (OPTISTRANG - Phase 1) auf.

Die darin gewonnenen Ergebnisse zeigen ein deutliches Kraftstoffeinsparpotential sowie Reduzierungspotenziale der Abgasemissionen, die ein Erreichen der EURO5 bzw. EEV-Werte auch unter den kritischen Verhältnissen im typischen Verteilerbetrieb möglich erscheinen lassen.

Dies konnte durch Umsetzung des Konzepts am Prüfstand und im Prototypfahrzeug belegt werden.

### **3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Der OPTISTRANG-Antriebsstrang konnte deutliche Kraftstoffeinsparungen bei gleichzeitiger Einhaltung der EURO5-Abgasgrenzwerte erreichen. Unter Berücksichtigung des AdBlue-Verbrauchs kann man für verschiedene Einsatzszenarien die Betriebskosteneinsparungen quantifizieren. Offen sind jedoch die in der Serie anfallenden Mehrkosten für dieses Antriebsstrangsystem. Erschwerend für die Abschätzung der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten kommt hinzu, dass das Produktsegment der Verteilerfahrzeuge sehr preissensibel ist und hier Stückzahleinflüsse sehr stark in die Herstellkosten eingehen. Aufgrund der heutigen Komponentenkosten ist ein wirtschaftlicher Einsatz derzeit nicht gegeben, steigende Kraftstoffpreise, Energiesteuer sowie emissionsabhängig gestufte staatliche Maßnahmen (z.B. Lkw-Maut, Kfz-Steuer bzw. Förderungen) könnten und werden die im Vorhaben erarbeiteten Lösungen attraktiv machen.

### **3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten**

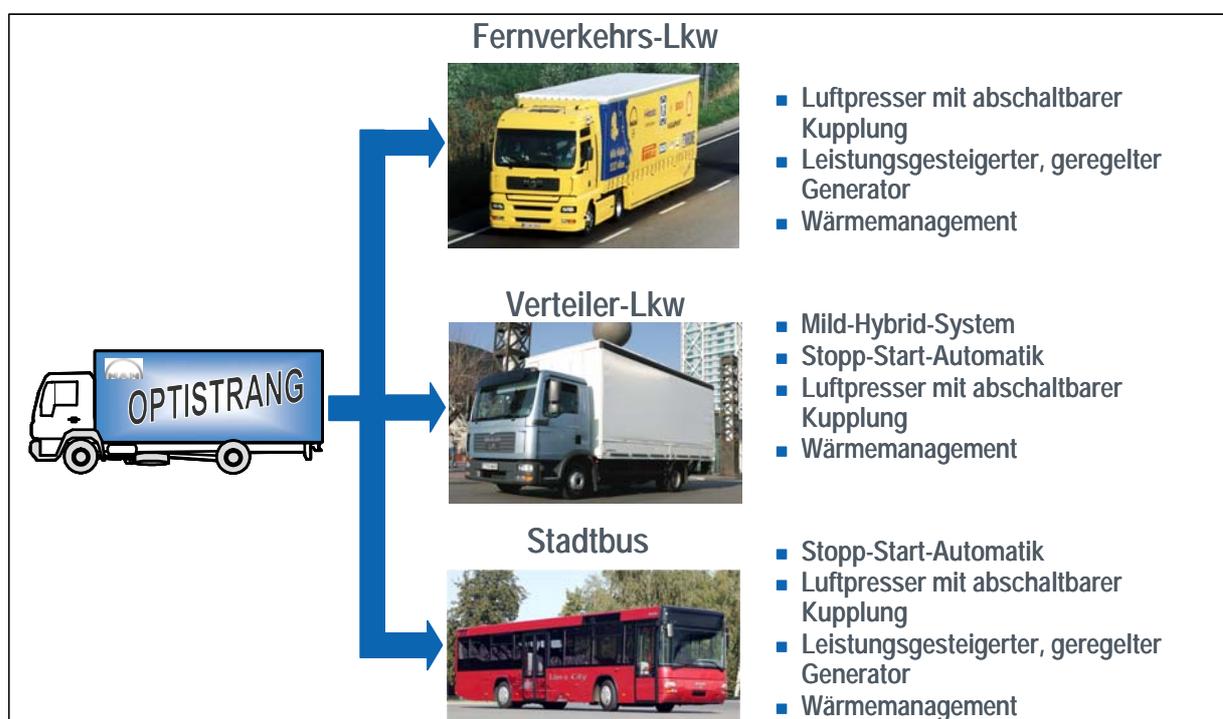
Durch den Aufbau des OPTISTRANG-Antriebes am Prüfstand und in ein Prototypfahrzeug konnten die deutlichen Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsvorteile nachgewiesen werden. Aufgrund der Vielzahl verwendeter Prototypkomponenten konnten nicht alle Einsparpotenziale bereits in diesem Projekt vollständig nutzbar gemacht werden. Hier könnte durch eine Feinabstimmung sowie eine optimiertere Komponentenauslegung das Kraftstoffverbrauchsverhalten im Prozentbereich weiter gesteigert werden.

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

Im Projekt „OPTISTRANG“ wurde ein Antriebsstrang mit einer Vielzahl von zusätzlichen Komponenten und Funktionen aufgebaut. Die Umsetzung dieses Antriebssystems mit identischer Konfiguration in eine direkte Serienentwicklung wäre, insbesondere in dieser sehr

preissensiblen Produktreihe nicht zielführend. So muss im nächsten Schritt, bzw. wenn geeignete Serienkomponenten zur Verfügung stehen, eine Kosten-Nutzen-Bewertung durchgeführt werden, um einzelne, trennbare Funktionen auf ihre jeweilige Wirtschaftlichkeit hin prüfen zu können.

Parallel wird zudem überprüft, welche Einzelfunktionen in anderen Produktreihen v.a. Fernverkehrs-Lkw und Stadtbus zum Einsatz kommen könnten. Dieser Technologietransfer aus dem Projekt „OPTISTRANG“ ist in **Bild 39** dargestellt. So wurden hierzu bereits eine Reihe von Folgeprojekten angestoßen.



**Bild 39:** Technologietransfer

## 4 Allgemeiner Fortschritt

Getragen vor allem durch Entwicklungen im Pkw-Bereich wurden während der Vorhabenslaufzeit Fortschritte auf den Gebieten Starter/Generator, Doppelschichtkondensatoren, Batterien und elektrischen Nebenaggregaten gemacht, die soweit geeignet und als Prototypen verfügbar im Vorhaben verwendet wurden bzw. als Alternative mit betrachtet wurden. Beispielhaft können hier die Firmen DANA, Panasonic, Exide, Varta, EPCOS, RTA, Bosch, ZF-Friedrichshafen, ZF-Lenksysteme, ZF-Sachs, Continental ISAD und Siemens VDO genannt werden, zu denen ein intensiver Kontakt bestand.

Eine richtungsweisende Trendwende während der Projektlaufzeit zeichnete sich bezüglich der geplanten mittelfristigen Einführung reiner 42 V-Bordnetze im Pkw ab. Die ursprünglich favorisierte 42 V-Technologie wurde aufgrund des doch erheblichen Umstellungsaufwands ohne das Vorhandensein eines gleichzeitigen unmittelbaren Kundennutzens von der Pkw-Industrie wieder fallen gelassen. Durch den Markterfolg v.a. des Toyota Prius und gesetzliche Vorgaben aus den USA kamen die europäischen Pkw-Automobilhersteller jedoch unter Druck und seit etwa Ende 2004 werden auch hier die Entwicklungen für Hybridantriebe stark forciert. Jedoch sind nun mit höheren Spannungen nicht mehr nur die Mildhybridanwendung, sondern in erster Linie auch die Fullhybride Entwicklungsschwerpunkte. Für diese Antriebe sind nun leistungsfähigere E-Komponenten mit höheren Spannungen (meist 200 - 500 V) notwendig, deren Entwicklung derzeit anläuft. Bezogen auf die Auslegung der Optistrang-Komponenten würde sich daher zukünftig auch aus Synergiegründen die Anhebung der Bordnetzspannung anbieten.

## 5 Veröffentlichungen

Im Rahmen von Vorträgen wurden die Ergebnisse des Fördervorhabens „OPTISTRANG“ bereits auf entsprechenden Fachtagungen vorgestellt [70,...,73].

### **Bisherige Veröffentlichungen:**

- [70] Kerschl, S., Hipp, E., Lexen, G.: Optimierter Antriebsstrang für Verteiler-Lkw, VDI-Berichte 1827, Friedrichshafen, 2004.
- [72] Hipp, E., Lexen, G.: Bewertung des Einsatzes von Hybridantrieben für Lkw und Stadtbusse, VDI-Berichte 1876, 2005.
- [73] Kerschl S., Lexen, G.: Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge, Tagungsband „Hybridfahrzeuge“, expert-Verlag, Renningen, 2005.

